

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Факультет Електроніки  
Кафедра мікроелектроніки

ЗВІТ

Про виконання лабораторної роботи №7  
з дисципліни: «Твердотіла електроніка»

**Дослідження вольт-амперних характеристик  
біполярних транзисторів**

Виконав:  
Студент 3-го курсу

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кузьмінський О.Р.

Перевірив:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Королевич Л.М.

# 1. Мета роботи

Теоретичне вивчення і практичне дослідження біполярних транзисторів з допомогою вимірювання вольт-амперних характеристик, визначення фізичних та основних технічних параметрів біполярних транзисторів із вольт-амперних характеристик.

## 2. Завдання

- 1) Вивчити структуру паспортних параметрів біполярних транзисторів. Ознайомитися із вимірювальним стендом та використовуваними приладами (рис. 1, 2, 3, 4).
- 2) Зібрати схему для дослідження вольт-амперних характеристик біполярних транзистора ввімкненого за схемою із спільним емітером (або із спільною базою).
- 3) Визначити експериментально і побудувати графічно сімейство вхідних характеристик транзистора - залежність вхідного струму від вхідної напруги.
- 4) Визначити експериментально та побудувати графічно сімейство вихідних характеристик транзистора - залежність вихідного струму від вихідної напруги.
- 5) \* Провести температурні дослідження ВАХ біполярного транзистора при підвищеній температурі  $T_2 \approx +70^\circ C$ .
- 6) \*\*Із вхідних та вихідних ВАХ побудувати характеристики зворотного зв'язку і прямої передачі.
- 7) За побудованими графіками характеристик визначити основні параметри біполярного транзистора: коефіцієнт підсилення струму бази -  $\beta$ ; коефіцієнт підсилення струму емітера -  $\alpha$ ; диференційні опори емітерного  $r_e$  і колекторного  $r_c$  переходів для вибраної робочої точки  $A_p(I_c, U_{ce})$ ; графічно визначити дифузійний потенціал емітерного переходу  $\varphi_0$  та опір бази  $r_b$ .
- 8) Провести аналіз результатів досліджень, і зробити висновки з виконаної роботи.

### 3.Схема вимірювання

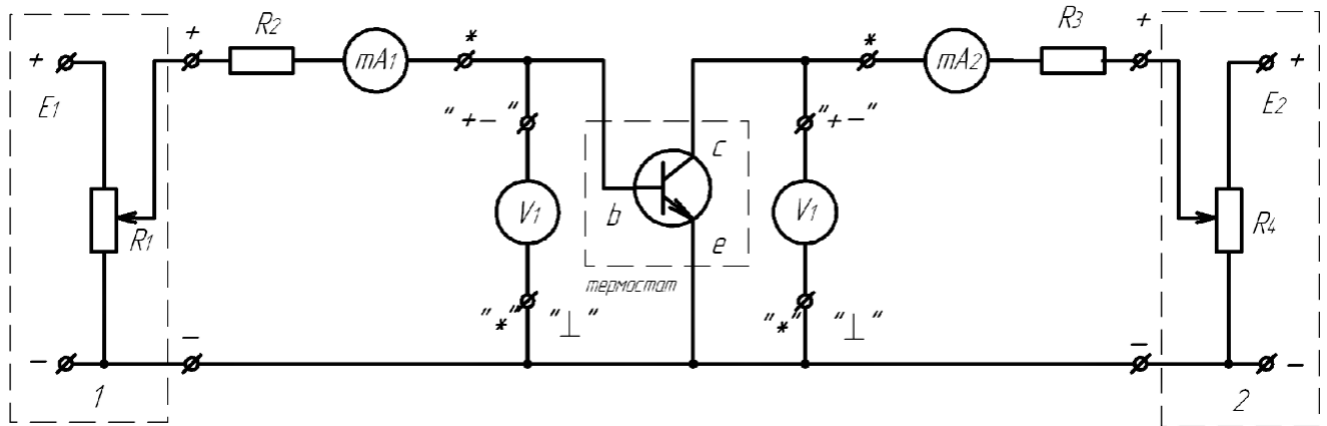


Рис.1. Схема для дослідження вольт амперних характеристик транзистора ввімкненого за схемою із спільним емітером.

В схему вимірювання ВАХ транзистора входять: блок живлення  $E_1$  для вхідного кола та блок живлення  $E_2$  для вихідного кола схеми, міліамперметр  $A_1$  для вимірювання вхідного струму бази, міліамперметр  $A_2$  для вимірювання вихідного струму колектора, вольтметри  $V_1$  та  $V_2$  для вимірювання напруг база-емітер та колектор-емітер відповідно.

## 4.Вхідні дані

Табл.1. Значення вхідних струмів і напруг при напругах виходу 0 та 8 В.

$U_{\text{вих}} = 0 \text{ В}$		$U_{\text{вих}} = 8 \text{ В}$	
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$I_{\text{вх}}, \text{ мкА}$	$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$I_{\text{вх}}, \text{ мкА}$
0,441	2	0,599	2
0,463	4	0,619	4
0,476	6	0,632	6
0,485	8	0,638	8
0,493	10	0,644	10
0,5	12	0,649	12
0,506	14	0,653	14
0,51	16	0,656	16
0,516	18	0,659	18
0,518	20	0,662	20
0,524	22	0,664	22
0,527	24	0,666	24
0,53	26	0,667	26
0,533	28	0,668	28
0,536	30	0,67	30
0,539	32	0,672	32
0,541	34	0,673	34
0,544	36	0,674	36
0,548	38	0,675	38
0,55	40	0,676	40
0,552	42	0,676	42
0,554	44	0,676	44
0,556	46	0,678	46
0,557	48	0,678	48
0,56	50	0,678	50

Зазначимо, що похибки струмів і напруг для обох випадків дорівнювали:  
 $\Delta U = 2,5 \text{ мВ}$ ,  $\Delta I = 0,75 \text{ мкА}$ .

Табл.2. Значення вихідних струмів і напруг при різних вхідних струмах

$I_{\text{BX}} = 3\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 6\text{мкА}$			
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,12	0,06	0,025	0,00375	0,12	0,125	0,025	0,00375
0,2	0,24	0,025	0,00375	0,22	0,55	0,025	0,00375
0,3	0,29	0,025	0,00375	0,36	0,66	0,025	0,00375
0,5	0,31	0,025	0,00375	0,6	0,665	0,025	0,00375
10	0,315	0,25	0,00375	10	0,675	0,25	0,00375

$I_{\text{BX}} = 9\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 12\text{мкА}$			
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,1	0,115	0,025	0,00375	0,1	0,158	0,025	0,0015
0,2	0,66	0,025	0,00375	0,14	0,4125	0,025	0,00375
0,3	0,98	0,025	0,0075	0,18	0,7175	0,025	0,00375
0,4	1,01	0,025	0,0075	0,2	0,93	0,025	0,0075
2	1,025	0,075	0,0075	0,3	1,3	0,025	0,0075
4	1,03	0,25	0,0075	0,4	1,345	0,025	0,0075
10	1,04	0,25	0,0075	0,6	1,38	0,025	0,0075
				0,94	1,39	0,025	0,0075
				3	1,4	0,25	0,0075
				6	1,41	0,25	0,0075
				10	1,42	0,25	0,0075

$I_{\text{BX}} = 15\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 18\text{мкА}$			
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,1	0,234	0,025	0,0015	0,1	0,268	0,025	0,0015
0,14	0,515	0,025	0,00375	0,12	0,595	0,025	0,00375
0,2	1,12	0,025	0,0075	0,16	0,84	0,025	0,0075
0,24	1,45	0,025	0,015	0,2	1,38	0,025	0,015
0,3	1,62	0,025	0,015	0,3	1,9	0,025	0,015
0,4	1,69	0,025	0,015	0,4	1,98	0,025	0,015
0,5	1,72	0,025	0,015	0,52	2,02	0,025	0,015
0,6	1,74	0,025	0,015	0,6	2,06	0,025	0,015
0,8	1,76	0,025	0,015	0,7	2,08	0,025	0,015
1,5	1,78	0,075	0,015	1,1	2,12	0,075	0,015
10	1,81	0,25	0,015	2,5	2,14	0,075	0,015
				10	2,18	0,25	0,015

Табл.2. Значення вихідних струмів і напруг при різних вхідних струмах (продовження<sub>1</sub>)

$I_{\text{BX}} = 21\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 24\text{мкА}$			
$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВИХ}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВИХ}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,1	0,166	0,0075	0,0015	0,09	0,252	0,0075	0,0015
0,12	0,285	0,0075	0,00375	0,11	0,4175	0,0075	0,00375
0,15	0,61	0,0075	0,00375	0,13	0,67	0,0075	0,00375
0,18	1,01	0,0075	0,0075	0,15	0,97	0,0075	0,0075
0,2	1,29	0,0075	0,0075	0,18	1,42	0,0075	0,0075
0,23	1,66	0,0075	0,015	0,22	1,92	0,0075	0,015
0,25	1,84	0,0075	0,015	0,25	2,22	0,0075	0,015
0,27	1,98	0,0075	0,015	0,3	2,4	0,0075	0,015
0,3	2,1	0,0075	0,015	0,5	2,6	0,025	0,015
0,4	2,29	0,025	0,015	0,6	2,66	0,025	0,015
0,5	2,34	0,025	0,015	0,7	2,69	0,025	0,015
0,6	2,38	0,025	0,015	0,9	2,76	0,025	0,015
0,76	2,42	0,025	0,015	1,5	2,84	0,075	0,015
2,6	2,51	0,075	0,015	5	2,88	0,25	0,015
10	2,56	0,25	0,015	10	2,92	0,25	0,015

$I_{\text{BX}} = 27\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 30\text{мкА}$			
$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВИХ}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВИХ}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,08	0,218	0,0075	0,0015	0,06	0,108	0,0075	0,0015
0,11	0,48	0,0075	0,00375	0,1	0,42	0,0075	0,00375
0,12	0,605	0,0075	0,00375	0,11	0,555	0,0075	0,00375
0,15	1,09	0,0075	0,0075	0,12	0,7	0,0075	0,00375
0,17	1,39	0,0075	0,0075	0,13	0,89	0,0075	0,0075
0,19	1,74	0,0075	0,015	0,15	1,185	0,0075	0,0075
0,22	2,11	0,0075	0,015	0,17	1,59	0,0075	0,015
0,25	2,38	0,0075	0,015	0,19	1,9	0,0075	0,015
0,34	2,78	0,025	0,015	0,21	2,18	0,0075	0,015
0,4	2,88	0,025	0,015	0,25	2,64	0,0075	0,015
0,6	2,96	0,025	0,015	0,3	2,9	0,0075	0,015
1,1	3,175	0,075	0,0375	0,4	3,075	0,025	0,0375
2	3,25	0,075	0,0375	0,5	3,15	0,025	0,0375
10	3,325	0,25	0,0375	0,8	3,3	0,025	0,0375
				2	3,55	0,075	0,0375
				10	3,65	0,25	0,0375

Табл.2. Значення вихідних струмів і напруг при різних вхідних струмах (продовження<sub>2</sub>)

$I_{\text{BX}} = 33\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 36\text{мкА}$			
$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВИХ}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{ВИХ}}, \text{В}$	$I_{\text{ВИХ}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,06	0,124	0,0075	0,0015	0,06	0,144	0,0075	0,0015
0,08	0,25	0,0075	0,00375	0,07	0,19	0,0075	0,00375
0,1	0,475	0,0075	0,00375	0,09	0,385	0,0075	0,00375
0,11	0,6125	0,0075	0,00375	0,11	0,675	0,0075	0,00375
0,12	0,8	0,0075	0,0075	0,13	1,03	0,0075	0,0075
0,13	0,955	0,0075	0,0075	0,15	1,47	0,0075	0,0075
0,14	1,13	0,0075	0,0075	0,17	1,88	0,0075	0,015
0,15	1,32	0,0075	0,0075	0,19	2,23	0,0075	0,015
0,16	1,54	0,0075	0,015	0,21	2,55	0,0075	0,015
0,17	1,74	0,0075	0,015	0,23	2,808	0,0075	0,015
0,18	1,89	0,0075	0,015	0,25	3,05	0,0075	0,0375
0,19	2,06	0,0075	0,015	0,29	3,3	0,0075	0,0375
0,2	2,21	0,0075	0,015	0,32	3,5	0,025	0,0375
0,21	2,36	0,0075	0,015	0,4	3,575	0,025	0,0375
0,25	2,82	0,0075	0,015	0,8	3,85	0,025	0,0375
0,36	3,3	0,025	0,0375	1,5	4,2	0,075	0,0375
0,4	3,325	0,025	0,0375	2,7	4,3	0,075	0,0375
0,5	3,4	0,025	0,0375	5,6	4,35	0,25	0,0375
0,6	3,475	0,025	0,0375	10	4,425	0,25	0,0375
0,7	3,55	0,025	0,0375				
1,1	3,75	0,075	0,0375				
2,9	3,95	0,075	0,0375				
10	4,05	0,25	0,0375				

Табл.2. Значення вихідних струмів і напруг при різних вхідних струмах (продовження<sub>3</sub>)

$I_{\text{вх}} = 39\text{мкА}$				$I_{\text{вх}} = 42\text{мкА}$			
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,06	0,166	0,0075	0,0015	0,06	0,2	0,0075	0,0015
0,07	0,256	0,0075	0,0015	0,07	0,292	0,0075	0,0015
0,08	0,345	0,0075	0,00375	0,08	0,3775	0,0075	0,00375
0,09	0,43	0,0075	0,00375	0,09	0,48	0,0075	0,00375
0,1	0,5775	0,0075	0,00375	0,11	0,85	0,0075	0,0075
0,12	0,935	0,0075	0,0075	0,13	1,23	0,0075	0,0075
0,15	1,59	0,0075	0,015	0,15	1,72	0,0075	0,015
0,18	2,16	0,0075	0,015	0,17	2,16	0,0075	0,015
0,2	2,56	0,0075	0,015	0,2	2,74	0,0075	0,015
0,24	3,05	0,0075	0,0375	0,24	3,3	0,0075	0,0375
0,3	3,6	0,0075	0,0375	0,28	3,7	0,0075	0,0375
0,4	3,825	0,025	0,0375	0,36	4	0,025	0,0375
0,6	4	0,025	0,0375	0,44	4,1	0,025	0,0375
1	4,25	0,025	0,0375	0,54	4,2	0,025	0,0375
2	4,6	0,075	0,0375	0,7	4,3	0,025	0,0375
10	4,75	0,25	0,0375	0,8	4,4	0,025	0,0375
				0,9	4,45	0,025	0,0375
				1,5	4,75	0,075	0,0375
				3	5	0,075	0,0375
				3,4	5,05	0,25	0,0375
				10	5,15	0,25	0,0375



Табл.2. Значення вихідних струмів і напруг при різних вхідних струмах (продовження<sub>4</sub>)

$I_{\text{BX}} = 45\text{мкА}$				$I_{\text{BX}} = 48\text{мкА}$			
$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$I_{\text{вих}}, \text{мА}$	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{мА}$
0,06	0,202	0,0075	0,0015	0,06	0,202	0,0075	0,0015
0,07	0,275	0,0075	0,00375	0,07	0,305	0,0075	0,00375
0,08	0,39	0,0075	0,00375	0,08	0,425	0,0075	0,00375
0,09	0,525	0,0075	0,00375	0,09	0,5725	0,0075	0,00375
0,1	0,7	0,0075	0,00375	0,11	0,99	0,0075	0,0075
0,12	1,1	0,0075	0,0075	0,13	1,44	0,0075	0,0075
0,14	1,62	0,0075	0,015	0,15	1,93	0,0075	0,015
0,16	2,04	0,0075	0,015	0,17	2,44	0,0075	0,015
0,18	2,5	0,0075	0,015	0,19	2,86	0,0075	0,015
0,21	3,05	0,0075	0,0375	0,22	3,4	0,0075	0,0375
0,26	3,7	0,0075	0,0375	0,25	3,8	0,0075	0,0375
0,3	4	0,0075	0,0375	0,28	4,075	0,0075	0,0375
0,4	4,3	0,025	0,0375	0,32	4,35	0,025	0,0375
0,5	4,4	0,025	0,0375	0,4	4,5	0,025	0,0375
0,6	4,5	0,025	0,0375	0,5	4,6	0,025	0,0375
0,96	4,75	0,025	0,0375	0,6	4,675	0,025	0,0375
2	5,3	0,075	0,0375	0,8	4,8	0,025	0,0375
6	5,5	0,25	0,0375	1,1	5,1	0,075	0,0375
10	5,55	0,25	0,0375	1,5	5,3	0,075	0,0375
				2	5,5	0,075	0,0375
				2,5	5,675	0,075	0,0375
				3	5,75	0,075	0,0375
				10	5,8		0,0375

## 5.Графіки та обробка даних

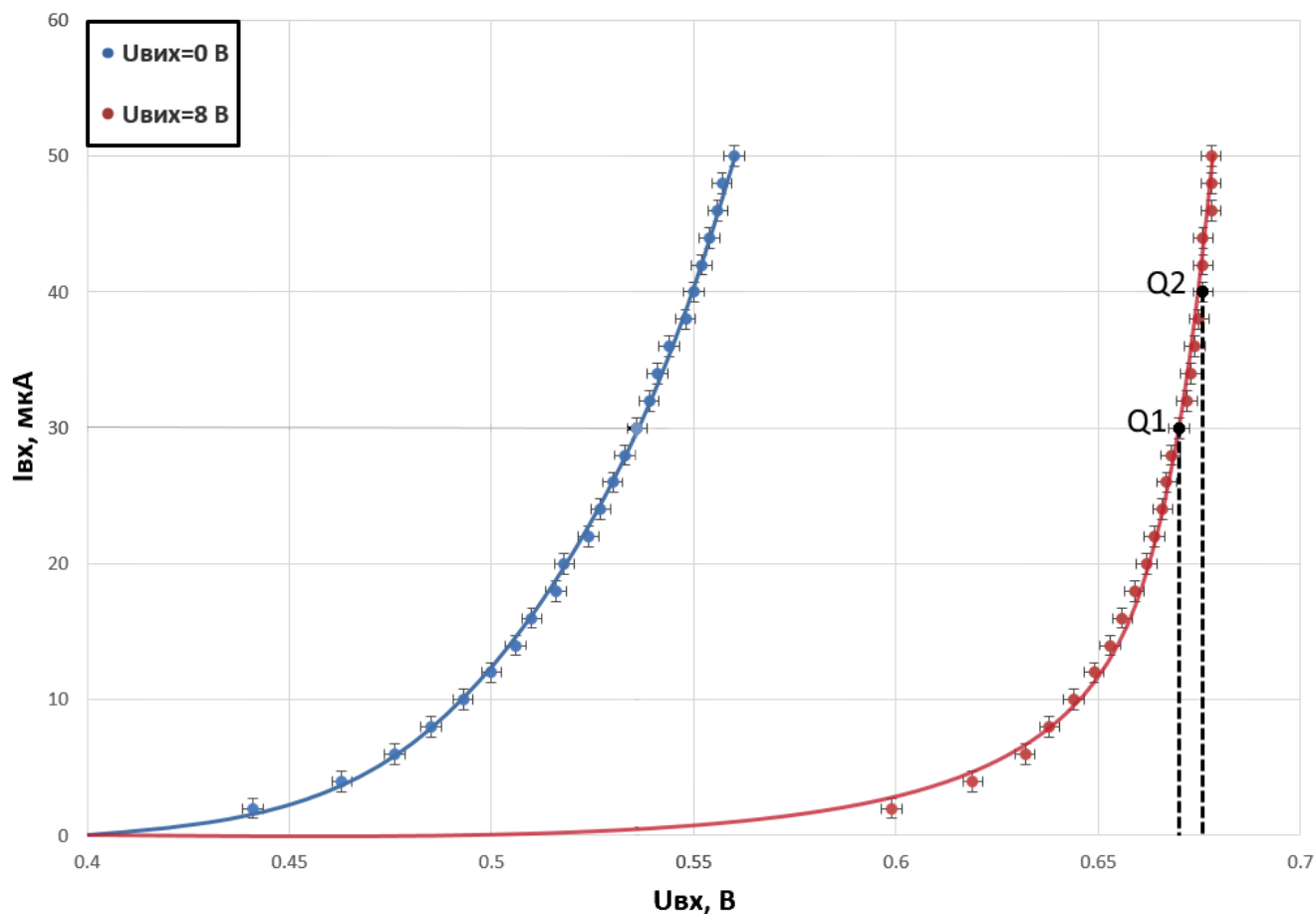


Рис.2. Вхідні ВАХ транзистора при вихідній напрузі 0 та 8 В.

На рисунку ми бачимо дві гілки ВАХ. Гілка при 0 В відповідає колекторному струму, оскільки рівні легування в емітері та колекторі різні, зокрема потенційний бар'єр емітера більший ніж у колектора, і тому струм потече через колектор при нульовій напрузі. З цього рисунку можна знайти вхідний опір- він же- опір емітера за формулою:

$$R_{\text{вх}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бе}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{ек}}=\text{const}} \quad (1)$$

Наш графік є фактично залежністю струму бази від напруги емітер-база. Прирости  $\Delta I_{\text{б}}$  та  $\Delta U_{\text{бе}}$  можна задати як різниці струмів і напруг відповідно в різних точках. Тому оберемо дві робочі точки  $Q_1$  та  $Q_2$ , але так щоб вони лежали на одній кривій, яка відповідає напрузі колектор-емітер.

Маємо по дві координати на кожну точку:  $Q_1(U_{\text{бе1}}; I_{\text{б1}})$  та  $Q_2(U_{\text{бе2}}; I_{\text{б2}})$ , тому модифікувавши рівняння (1), отримаємо наступний вираз:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{бе}}^{Q_2} - U_{\text{бе}}^{Q_1}}{I_{\text{б}}^{Q_2} - I_{\text{б}}^{Q_1}} \quad (2)$$

Підставляючи усі дані отримаємо таке значення  $R_{\text{вх}}$ :

$$R_{\text{вх}} = r_e = \frac{0,675 - 0,66875}{40 \cdot 10^{-6} - 30 \cdot 10^{-6}} = 625 \text{ Ом.}$$

Визначимо з графіку також  $I_6$ , як значення на осі  $I_{\text{вх}}$ , яке відтинається перпендикуляром, що проведений з середини між робочими точками  $Q_1$  та  $Q_2$ . Бачимо, що значення складає  $I_6 = 35 \text{ мкА}$ .

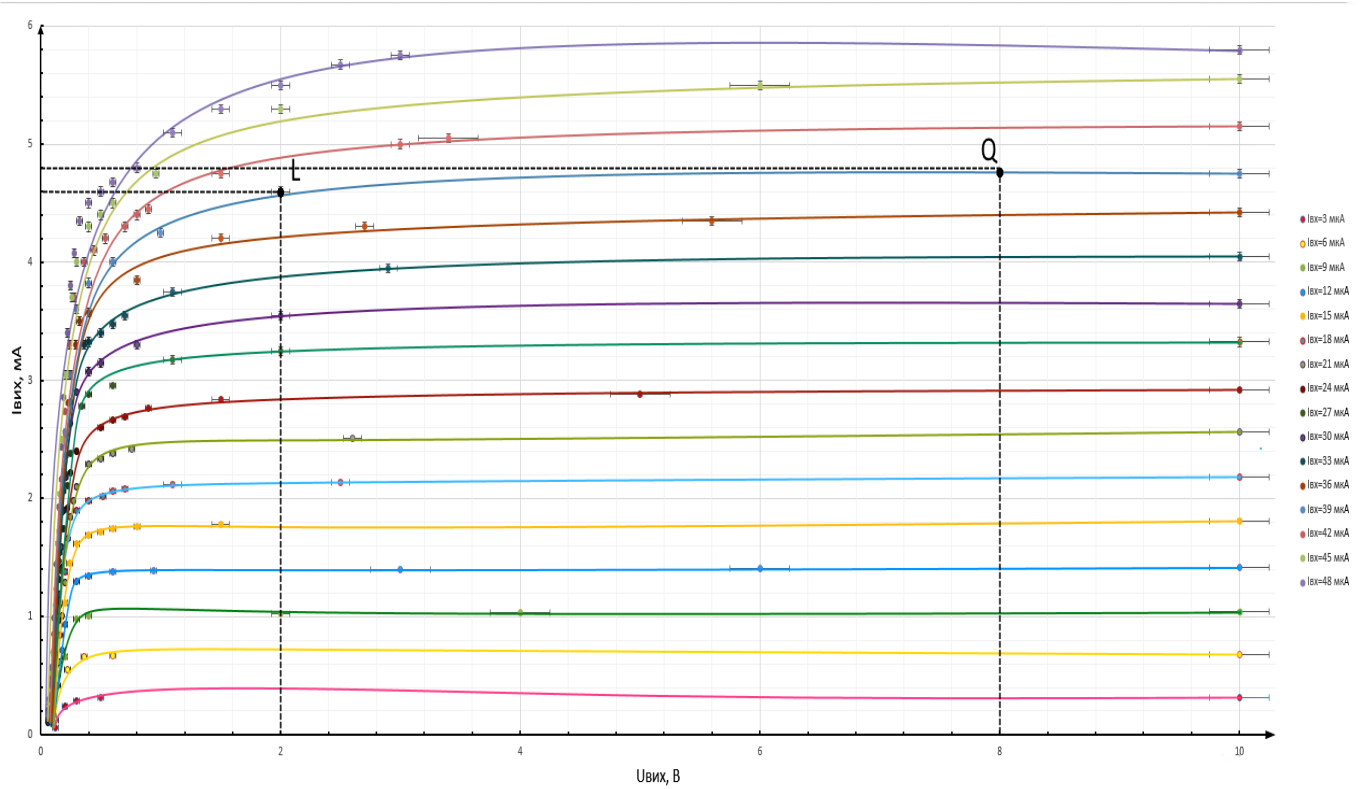


Рис.3. Сімейство вихідних ВАХ транзистора.

Тепер знайдемо опір колекторного переходу по вихідних характеристиках транзистора, користуючись приростами за формулою:

$$R_{\text{вих}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{ке}}}{\Delta I_{\text{к}}} \right|_{I_6 = \text{const}} \quad (3)$$

На рис.3. вихідна напруга відповідає напрузі колектор-емітер, а вихідний струм-струму колектора. По аналогії з вхідними характеристиками оберемо на рисунку знову робочу точку  $Q$ , але так, щоб перпендикуляр, опущений з неї на вісь  $x$ , відсікав значення 8 В, оскільки на вхідних характеристиках ця сама робоча точка  $Q$  розташовувалась на гілці, що відповідала напрузі  $U_{\text{ке}} = 8 \text{ В}$ .

Для забезпечення відчутної різниці  $\Delta I_{\text{к}}$  другу робочу точку  $L$  обрали на значній відстані від точки  $Q$ , майже в зоні режиму насичення. Зазначимо, що дві точки розташовані на одній кривій, оскільки цього вимагає умова формули (3) ( $I_6 = \text{const}$ ), а крива якраз відповідає  $I_6$ .

Модифікуємо формулу (3), замінюючи прирости на різниці координат двох обраних робочих точок:

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{ке}}^Q - U_{\text{ке}}^L}{I_{\text{к}}^Q - I_{\text{к}}^L}, \quad (4)$$

та обраховуємо значення вихідного (колекторного) опору:

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{ке}}^Q - U_{\text{ке}}^L}{I_{\text{к}}^Q - I_{\text{к}}^L} = \frac{8 - 2}{4,8 \cdot 10^{-3} - 4,6 \cdot 10^{-3}} = 3000 \text{ Ом.}$$

Також з рис.3. визначаємо струм колектора  $I_{\text{к}}$ , як значення на осі  $y$ , що відтинається перпендикуляром, який проведений з середини відрізка між двома робочими точками  $Q$  та  $L$ . Тобто з рисунка маємо, що  $I_{\text{к}} = 4,6 \text{ мА}$ .

Маючи струм бази та струм колектора, можемо знайти струм емітера, скориставшись формулою для коефіцієнта підсилення за струмом для спільного емітера:

$$\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{е}} - I_{\text{к}}}, \quad (5)$$

а отже  $I_{\text{б}} = I_{\text{е}} - I_{\text{к}}$ , або  $I_{\text{е}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}$ .

Тобто струм емітера-це сума струмів бази та колектора:

$$I_{\text{е}} = 0,035 \cdot 10^{-3} + 4,6 \cdot 10^{-3} = 4,635 \cdot 10^{-3} = 4,635 \text{ мА.}$$

Далі, маючи струм емітера, знаходимо опір емітера за наступною формулою:

$$r_e = \frac{\varphi_T}{I_{\text{е}}}. \quad (6)$$

Виконуємо розрахунок та знаходимо опір емітера:

$$r_e = \frac{\varphi_T}{I_{\text{е}}} = \frac{26 \text{ мВ}}{4,635 \text{ мА}} \approx 5,6 \text{ Ом.}$$

Обчислимо значення коефіцієнта підсилення за струмом для спільного емітера за формулою (5):

$$\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = \frac{4,6 \text{ мА}}{35 \text{ мкА}} \approx 130.$$

Розрахуємо коефіцієнт підсилення струму бази за наступною формулою:

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{е}}}. \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{е}}} = \frac{4,6}{4,635} \approx 0,99$$