

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Лабораторна робота з фізики №1

ВНУТРІШНІЙ ОПІР ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА УЗГОДЖЕННЯ  
ПОТУЖНОСТЕЙ

Виконала:  
студент групи ФІ-12  
Бекешева Анастасія

Київ-2022

## Розділ 1. Теоретична довідка.

**Ключові поняття:** джерело струму або напруги, електрорушійна сила, ЕРС, вихідна напруга, напруга на клеммах джерела, холостий хід, робота без навантаження, коротке замикання, закон Ома, закони Кірхгофа, узгодження потужностей.

**Мета роботи:** Дослідити декілька джерел електричної енергії на предмет:

- Внутрішнього опору;
- Узгодження потужностей джерела та споживача;
- Визначити до якої групи відноситься те чи інше джерело за величиною внутрішнього опору (джерело напруги або джерело струму);
- Визначити за якого режиму джерело буде віддавати максимальну корисну потужність;
- За якого режиму джерело матиме максимальний ККД.

**Теоретичне підґрунтя:**

Розглянемо електричне коло Рис.1 , яке складається з джерела електричної енергії зі своїм внутрішнім незмінним опором  $R_i$ , з зовнішнього опору навантаження(реостат)  $R_e$ , який можна змінювати, амперметра та вольтметра  $V$ .

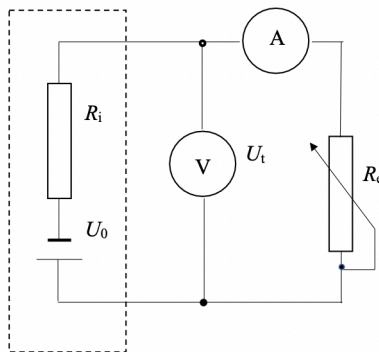


Рис. 1: Схема електричного кола

Струм у колі визначається за сумою опору навантаження  $R_e$  та внутрішнього опору  $R_i$ . Так як опір  $R_i$  є незмінним, то зміна струму в колі залежить від величини опору навантаження  $R_e$  і визначається за рівнянням закону Ома:

$$I = \frac{U_0}{R_i + R_e}$$

Приймає найменше значення  $I = 0$  при  $R_e = \infty$ , та найбільше при  $R_e = 0$

- Режим кола, коли опір навантаження  $R_e = \infty$  визначається як **режим холостого ходу**. Тобто на клеммах джерела присутня напруга холостого ходу  $U_0$ .
- Режим кола, коли опір навантаження  $R_e = 0$  визначається як **режим короткого замикання**, струм в колі максимальний.

Прослідкуємо як змінюються спад напруги на опорах в залежності від струму в колі.  
Спад напруги на внутрішньому опорі дорівнює:

$$U_{R_i} = I \cdot R_i$$

Величина цього спаду напруги пропорційна величині струму і змінюється від 0 до найбільшого значення  $U_0$  при струму максимальному.

Спад напруги на зовнішньому опорі дорівнює:

$$I \cdot R_e = U_0 - I \cdot R_i$$

Цей спад напруги також знаходиться в лінійній залежності від струму. Так як опір навантаження під'єднаний до вихідних клем джерела, то спад напруги на опорі навантаження можна вважати як вихідну напругу джерела яка визначається за рівнянням:

$$U_{R_e} = U_0 - U_{R_i}$$

Нормовані графіки, які показують залежність  $U_{R_i}$  та  $U_{R_e}$  від струму  $I$  наведенні на рис. 2

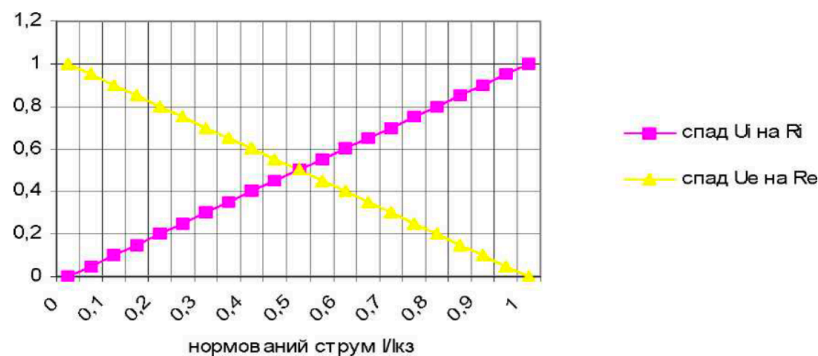


Рис. 2

За умов коли  $R_e = R_i$ , а їхня сума дорівнює  $2R$ , має місце співвідношення:

$$I = \frac{U_0}{2R} = \frac{I_{кз}}{2}$$

І спад напруг на опорах рівні між собою, тобто:

$$\frac{I_{кз}}{2} \cdot R_i = \frac{I_{кз}}{2} \cdot R_e = \frac{U_0}{2}$$

Такий режим називається узгодження внутрішнього опору джерела та опору споживача, або узгодженням потужностей джерела та споживача. електрична потужність визначається за співвідношенням:

$$P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{2}$$

Визначимо співвідношення між потужностями, які виділяються на елементах електричного кола.

Повна потужність електричного кола визначається за співвідношенням:

$$P_0 = U_0 \cdot I_{кз}$$

Повна потужність джерела складається з потужності, яка виділяється на внутрішньому опорі джерела визначається за співвідношенням:

$$P_i = I^2 \cdot R_i$$

Потужність, яка виділяється на опорі навантаження

$$P_e = I^2 \cdot R_e$$

Визначається як різниця між повною потужністю та потужністю, яка виділяється на внутрішньому опорі

$$P_e = P_0 - P_i = U_0 \cdot I_{кз} - I^2 R_i$$

Потужність джерела струму змінюється пропорційно струму від найменшого значення до найбільшого.

Потужність дорівнює нулю, коли струм дорівнює нулю. Для визначення найбільшого значення потужності візьмемо першу похідну від минулої формули та прирівнемо її до 0. Звідти отримаємо співвідношення:

$$U_0 = 2I \cdot R_i$$

Але при будь-якому значенні опору  $R_e$  (при будь-якому режимі)

$$U_0 = I \cdot (R_i + R_e)$$

Порівнюючи два останні вирази видно, що потужність  $P_e$  досягає найбільшого значення при  $R_i = R_e$ , струм в колі буде відповідати:

$$I = \frac{U_0}{2R_i} = \frac{I_{кз}}{2}$$

Тобто максимальна потужність  $P_e$ , яка виділяється на зовнішньому опорі навантаження буде дорівнювати потужності  $P_i$ , яка виділяється на внутрішньому опорі і буде дорівнювати  $\frac{1}{4}P_0$  – режим узгодження потужностей джерела та споживача.

$$P_e = I^2 \cdot R_e = \frac{U_0^2}{4R_i^2}$$

Графіки, які виявляють залежність потужностей від відношення опорів наведенні на 3 та 4

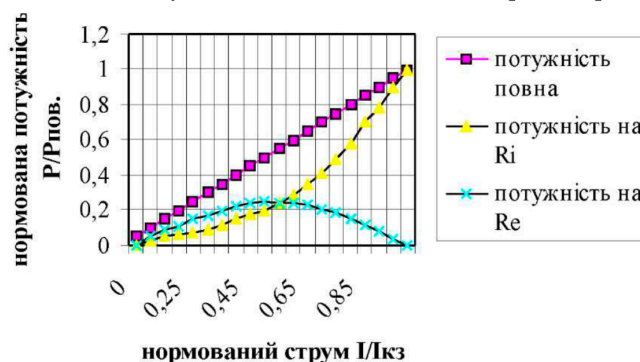


Рис. 3: Нормованні графіки залежності потужності, які виділяються на опорах  $R_i$  та  $R_e$

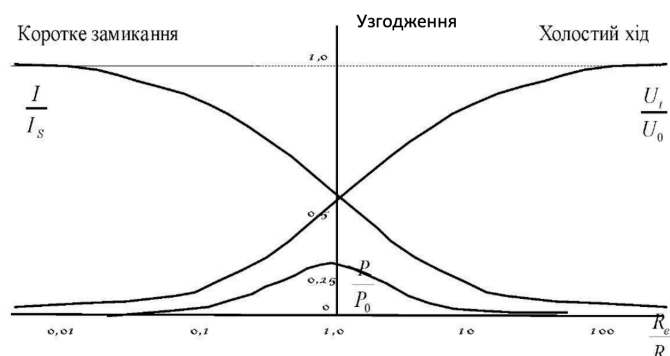


Рис. 4: Нормований графік залежності потужності джерела струму від навантаження

Визначимо за якого режиму джерело видає максимальну корисну потужність. Корисна потужність – це потужність, яка виділяється на опорі навантаження, тобто потужність  $P_e$ . Потужність, яка виділяється на внутрішньому опорі, це потужність втрат  $P_i$ . Режим, коли джерело розвиває найбільшу корисну потужність має місце при:

$$R_i = R_e$$

В цьому випадку струм у колі дорівнює струму короткого замикання поділений на 2, а корисна потужність і потужність втрат дорівнює

$$P_i = P_e = \frac{U_0 \cdot I_{\text{кз}}}{4}$$

Максимальна потужність, яку може розвинути джерело:

$$P_0 = -U_0 \cdot I_{\text{кз}}$$

К.К.Д – коефіцієнт корисної дії джерела визначається як відношення корисної потужності, виділеної на навантаженні до повної потужності. Як видно з 3 та 4 корисна потужність дорівнює 0.25 від повної потужності джерела. Потужність, яку розвине джерело в режимі узгодження дорівнює сумі потужностей на внутрішньому та зовнішньому опорі і дорівнює 0.5 повної потужності. Тобто ККД за режиму узгодження коли  $P_i = P_e$  джерела дорівнює:

$$\eta = \frac{P_e + P_i}{P_0} = \frac{1}{2}$$

### Експериментальне обладнання:

Експериментальне обладнання складається з трьох джерел електричної енергії:

- Батарейка з трьох марганцево-цинкових елементів для кишенькових ліхтариків;
- Свинцевого кислого акумулятора;
- Електронного блока живлення;
- Реостата з максимальним опором 10 Ом;
- Реостата з максимальним опором 45 Ом;
- Реостата з максимальним опором 100 Ом;
- Астатичний амперметра

- Цифрового вольтметра
- В якості амперметра використовується магнітоелектричний прилад. В якості вольтметра використовується вольтметра з великим вхідним опором.

## Хід експеременту.

### Дослід №1

1. Зберіть вимірювальну схему згідно 1 (в якості джерела використайте марганцево-цинкову батарейку для кишенькового ліхтарика)
2. В якості навантаження використати реостат з максимальним опором 45 або 100 Ом.
3. Виміряти напругу холостого ходу –  $U_0$  (на клеммах джерела без навантаження)
4. За допомогою вольтметра виміряти залежності напруги  $U_{R_e}$  на опорі навантаження від струму  $I$ , тобто від величини опору навантаження (струм змінювати реостат з кроком 0.1 А до максимального значення 2А, тобто зробити 15-20 вимірів).
5. Встановіть опір навантаження таким, щоб спад напруги на опорі навантаження  $U_{R_e}$  становить  $\frac{1}{2}U_0$ . В цьому випадку опір навантаження буде дорівнювати внутрішньому опору джерела  $R_e = R_i$  (режим узгодження опорів або потужностей). Не змінюючи положення реостата за допомогою омметра виміряйте опір навантаження.
6. Отримані дані занесіть до таблиці.

### Дослід №2

1. Зберіть вимірювальну схему згідно 1 (в якості джерела використайте свинцевий акумулятор)
2. В якості навантаження використати реостат з максимальним опором 45 або 100 Ом.
3. Виміряти напругу холостого ходу –  $U_0$  (на клеммах джерела без навантаження).
4. Виміряти залежності напруги  $U_{R_e}$  від струму  $I$ , тобто від величини навантаження (струм змінювати реостатом з кроком 0.05 – 0.1А до максимального значення 2А, зробити 10 –15 вимірів).
5. Отримані дані занесіть до таблиці.

### Дослід №3

1. Зберіть вимірювальну схему згідно 1 (в якості джерела використайте блок живлення, який живиться від силової мережі).
2. В якості навантаження використати реостат з максимальним опором 45 або 100 Ом.
3. Виміряти напругу холостого ходу –  $U_0$  (на клеммах джерела без навантаження).
4. За допомогою вольтметра для кожного значення струму виміряйте залежність спаду напруги на опорі навантаження  $U_{R_e}$  від струму  $I$ , тобто від величини опору навантаження (струм змінювати реостат з кроком 0.1А до максимального значення 2А, тобто зробити 15-20 вимірів)

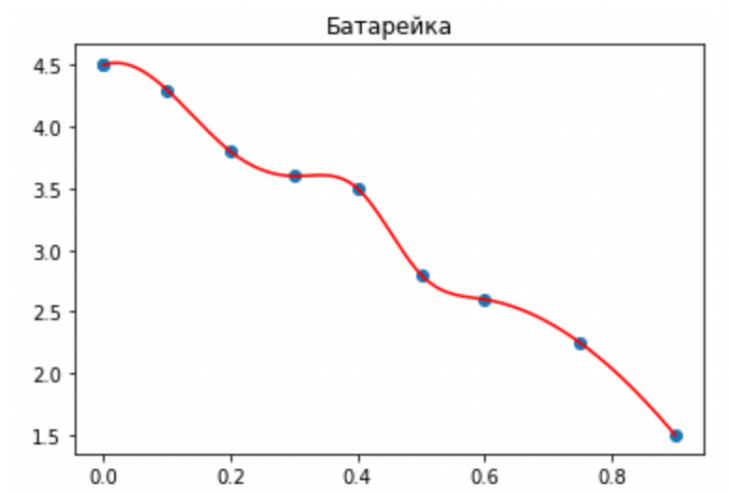
5. Отримані дані занесіть до таблиці.

### **Завдання.**

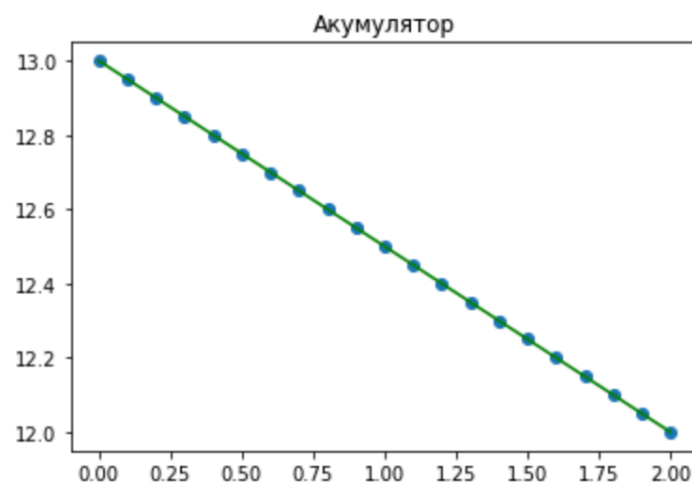
1. Побудуйте графік залежності  $U(I)$  для всіх досліджуваних джерел. Зробіть апроксимацію для кожного побудованого графіка.
2. За апроксимацією графіків визначте внутрішній опір кожного джерела за різних режимів навантаження.
3. Побудуйте нормовані графіки залежності потужності від струму аналогічно 3 та 4.
4. Визначте похибки, поясніть за яких факторів виникли ці похибки..
5. На підставі проведених дослідів та розрахунків дайте остаточну характеристику кожного з джерел та зробіть висновки.

## Розділ 2. Експериментальні дані.

Графік залежності  $U$  від  $I$ . Апроксимація.



(а) Батарейка



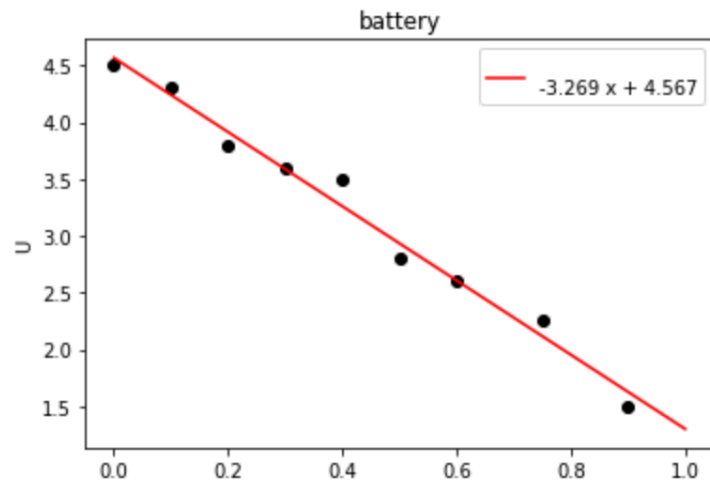
(b) Акумулятор



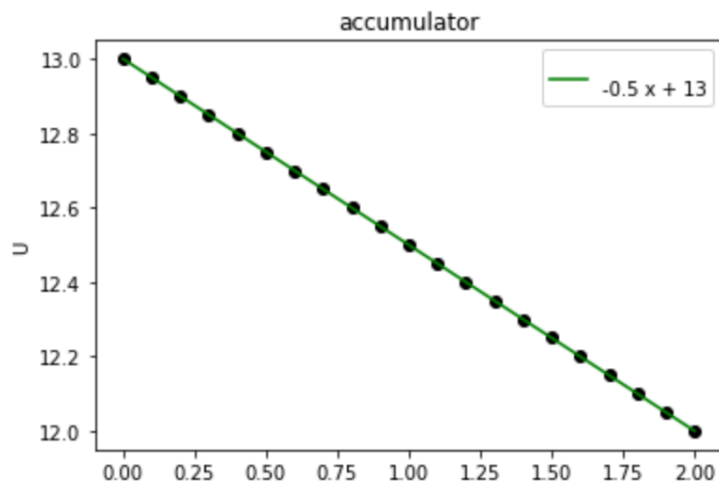
(c) Блок живлення

Рис. 5: Графіки залежності  $U$  від  $I$

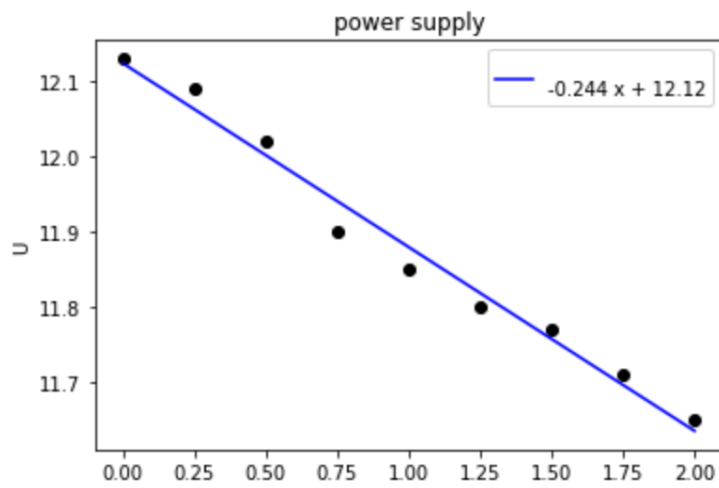




(a) Батарейка



(b) Акумулятор



(c) Блок живлення

Рис. 6: Апроксимовані графіки залежності  $U$  від  $I$

## Внутрішній опір.

- З графіку 6а лінійна апроксимація залежності  $U$  від  $I$  батарейки:

$$y = -3.269x + 4.567$$

А отже  $R_i$  апроксимоване дорівнює 3.329

- З графіку 6б лінійна апроксимація залежності  $U$  від  $I$  акумулятору:

$$y = -0.5x + 13$$

А отже  $R_i$  апроксимоване дорівнює 0.5

- З графіку 6в лінійна апроксимація залежності  $U$  від  $I$  блоку живлення:

$$y = -0.244x + 12.12$$

А отже  $R_i$  апроксимоване дорівнює 0.2414

## Похибки.

Похибки будуть обчислюватись за такими формулами:

$$\langle R_i \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_{i_k} \quad (1)$$

$$\Delta R_i = \sqrt{(\Delta R_r)^2 + (\Delta R_s)^2}, R_r = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (R_{i_k} - \bar{R}_i)^2}{n(n-1)}}, \bar{R}_i = \frac{R_{i_1} + R_{i_2} + \dots + R_{i_n}}{n} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{R_i} = \frac{\Delta R_i}{\bar{R}_i}, \bar{R}_i = \frac{R_{i_1} + R_{i_2} + \dots + R_{i_n}}{n} \quad (3)$$

- За формулою 1:

$$\text{Батарейка: } \langle R_i \rangle = 0.744$$

$$\text{Акумулятор: } \langle R_i \rangle = 1.045$$

$$\text{Блока живлення: } \langle R_i \rangle = 1.079$$

- За формулою 2, так як систематична похибка не була дана, можна вважати, що вона дорівнює нулю. А отже:

$$\text{Батарейка: } \Delta R_i = 6.472\%$$

$$\text{Акумулятор: } \Delta R_i = 0.605\%$$

$$\text{Блока живлення: } \Delta R_i = 1.66\%$$

- За формулою 3:

$$\text{Батарейка: } \varepsilon_{R_i} = 8.694\%$$

$$\text{Акумулятор: } \varepsilon_{R_i} = 0.579\%$$

$$\text{Блока живлення: } \varepsilon_{R_i} = 1.539\%$$

Похибки виникли через неточність вимірювання(людський фактор). Стосовно того де похибка відсутня, або дуже мала, можна сказати, що через відсутність систематичної похибки, неможливо правильно вирахувати абсолютну похибку.

## Нормовані графіки залежності потужності і струму.

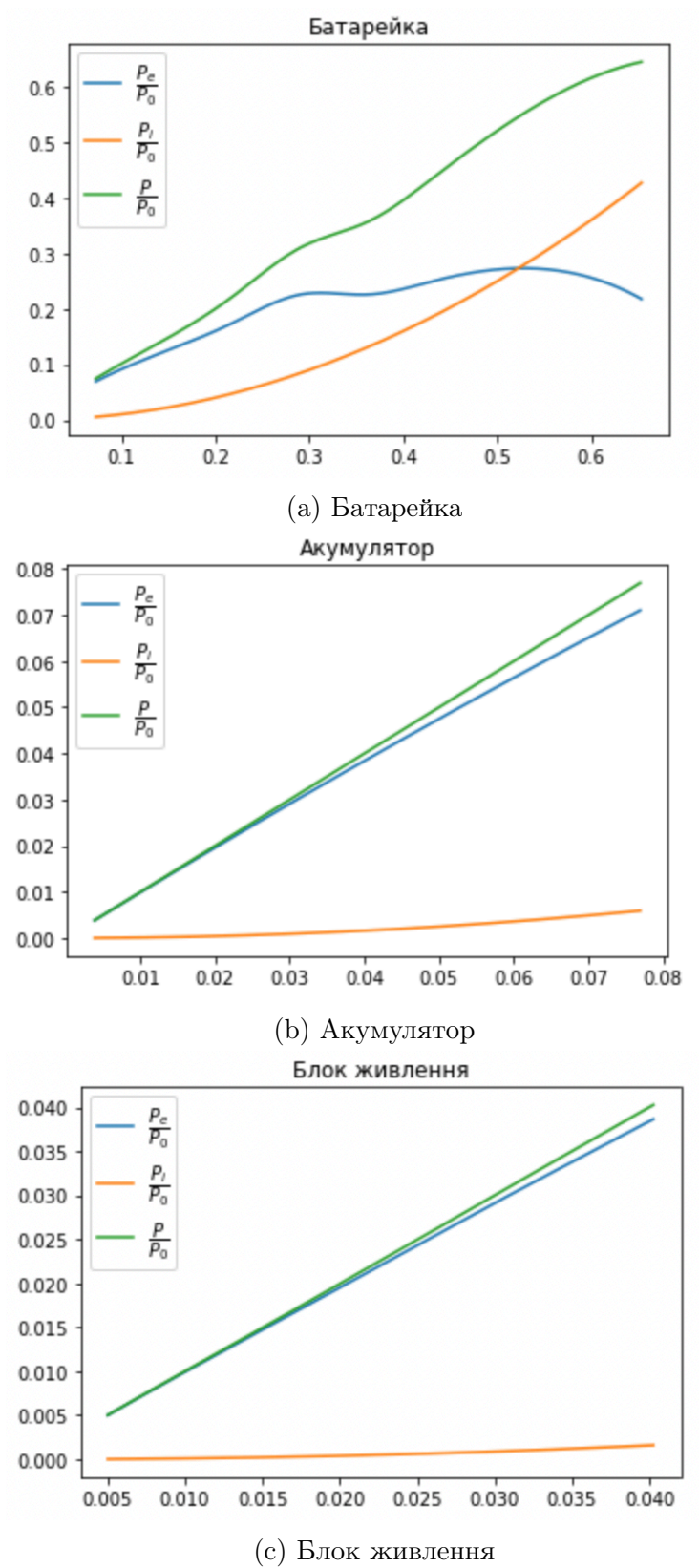


Рис. 7: Нормовані графіки залежності потужності джерела від навантаження

## Висновки

Мета лабораторної роботи полягала у дослідженні опору, сили струму, напруги, потужності, ККД в електричному полі. Протягом роботи також були досліджені властивості електричного поля та поведінки струму. Після обробки даних та необхідних підрахунків було визначено залежності напруг на клеммах джерел струму від сили струму. Всього було побудовано три залежності: для батарейки, акумулятора та блоку живлення.

## Характеристики джерел

У ході експерименту було визначено внутрішній опір джерел та їх напругу холостого ходу:

- Батарейка:  $R_i = 3.329 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 4.5 \text{ В}$ .
- Акумулятор:  $R_i = 0.5 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 13 \text{ В}$ .
- Блок живлення:  $R_i = 0.241 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 12.13 \text{ В}$ .

На 5 та 6 рисунках спостерігається лінійна залежність напруги від сили струму. З них можна зробити висновок, що внутрішні опори  $R_i$  джерел струму і напруги є сталими. На ?? та 7 рисунках було показано нормована залежність зміни потужностей від струму та нормовані графіки залежності потужності джерела від навантаження для таких джерел: батарейка, акумулятор та блок живлення. Легко бачити, що нормовані залежності напруги та струму від зовнішнього навантаження є взаємно-протилежними, що відповідає теорії. Після обрахуну внутрішнього  $R_i$  та зовнішнього  $R_e$  опорів можна зазначити, що батарейка є джерелом напруги, акумулятор - джерело напруги (може бути й джерелом струму, але далеко не найкращим), блок живлення може бути, як і джерелом напруги, так і джерелом напруги(але конкретно блок живлення у цьому експерименті не є гарним джерелом струму).

## Умови

Чи буде джерело джерелом струму а бо напруги можна визначити дослідивши його внутрішній на зовнішній опір. Якщо зовнішній  $R_e$  опір набагато більший за внутрішній  $R_i$ , то джерело є джерелом напругу, якщо навпаки - джерелом струму.

# Таблиці

Таблиця 1: Батарейка

	$U_0$ , В	$I$ , А	$U$ , В	$R_i$ (approx) Ом	$R_i$ , Ом	$R_e$ , Ом	$U_i$ , В	$U_e$ , В	$P_e$ , Вт	$P_i$ , Вт	$I_{kz}$ , А	$P_0$ , Вт	$\frac{P_e}{P_0}$	$\frac{P_i}{P_0}$	$P$ , Вт	$\frac{P}{P_0}$	ККД, %	$\langle R_i \rangle$ , Ом	$\Delta_{R_i}$ , %	$\varepsilon_{R_i}$ , %
00	4.5	0.1	4.3	3.27	2.0	43.0	0.33	4.17	0.43	0.03	1.38	6.2	0.07	0.01	0.46	0.07	6.94	2.99	17.92	6.0
1		0.2	3.8		3.5	19.0	0.65	3.85	0.76	0.13			0.12	0.02	0.89	0.14	12.27			
2		0.3	3.6		3.0	12.0	0.98	3.52	1.08	0.29			0.17	0.05	1.37	0.22	17.43			
3		0.4	3.5		2.5	8.75	1.31	3.19	1.4	0.52			0.23	0.08	1.92	0.31	22.6			
4		0.5	2.8		3.4	5.6	1.63	2.87	1.4	0.82			0.23	0.13	2.22	0.36	22.6			
5		0.6	2.6		3.17	4.33	1.96	2.54	1.56	1.18			0.25	0.19	2.74	0.44	25.18			
6		0.75	2.25		3.0	3.0	2.45	2.05	1.69	1.84			0.27	0.3	3.53	0.57	27.24			
7		0.9	1.5		3.33	1.67	2.94	1.56	1.35	2.65			0.22	0.43	4.0	0.65	21.79			

Таблица 2: Блок живления

	$U_0$ , В	$I$ , А	$U$ , В	$R_i$ (approx) Ом	$R_i$ , Ом	$R_e$ , Ом	$U_i$ , В	$U_e$ , В	$P_e$ , Вт	$P_i$ , Вт	$I_{kz}$ , А	$P_0$ , Вт	$\frac{P_e}{P_0}$	$\frac{P_i}{P_0}$	$P$ , Вт	$\frac{P}{P_0}$	ККД, %	$\langle R_i \rangle$ , Ом	$\Delta_{R_i}$ , %	$\varepsilon_{R_i}$ , %
0	12.13	0.25	12.09	0.24	0.16	48.36	0.06	12.07	3.02	0.02	49.71	603.02	0.01	0.0	3.04	0.01	0.5	0.24	1.54	6.32
1		0.5	12.02		0.22	24.04	0.12	12.01	6.01	0.06			0.01	0.0	6.07	0.01	1.0			
2		0.75	11.9		0.31	15.87	0.18	11.95	8.93	0.14			0.01	0.0	9.06	0.02	1.48			
3		1.0	11.85		0.28	11.85	0.24	11.89	11.85	0.24			0.02	0.0	12.09	0.02	1.97			
4		1.25	11.8		0.26	9.44	0.3	11.83	14.75	0.38			0.02	0.0	15.13	0.03	2.45			
5		1.5	11.77		0.24	7.85	0.37	11.76	17.66	0.55			0.03	0.0	18.2	0.03	2.93			
6		1.75	11.71		0.24	6.69	0.43	11.7	20.49	0.75			0.03	0.0	21.24	0.04	3.4			
7		2.0	11.65		0.24	5.82	0.49	11.64	23.3	0.98			0.04	0.0	24.28	0.04	3.86			

Таблица 3: Аккумулятор

	$U_0$ , В	$I$ , А	$U$ , В	$R_i$ (approx) Ом	$R_i$ , Ом	$R_e$ , Ом	$U_i$ , В	$U_e$ , В	$P_e$ , Вт	$P_i$ , Вт	$I_{kz}$ , А	$P_0$ , Вт	$\frac{P_e}{P_0}$	$\frac{P_i}{P_0}$	$P$ , Вт	$\frac{P}{P_0}$	ККД, %	$\langle R_i \rangle$ , Ом	$\Delta_{R_i}$ , %	$\varepsilon_{R_i}$ , %
0	13	0.1	12.95	0.5	0.5	129.5	0.05	12.95	1.3	0.0	26.0	338.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.38	0.5	0.0	0.0
1		0.2	12.9		0.5	64.5	0.1	12.9	2.58	0.02			0.01	0.0	2.6	0.01	0.76			
2		0.3	12.85		0.5	42.83	0.15	12.85	3.86	0.04			0.01	0.0	3.9	0.01	1.14			
3		0.4	12.8		0.5	32.0	0.2	12.8	5.12	0.08			0.02	0.0	5.2	0.02	1.51			
4		0.5	12.75		0.5	25.5	0.25	12.75	6.38	0.12			0.02	0.0	6.5	0.02	1.89			
5		0.6	12.7		0.5	21.17	0.3	12.7	7.62	0.18			0.02	0.0	7.8	0.02	2.25			
6		0.7	12.65		0.5	18.07	0.35	12.65	8.86	0.24			0.03	0.0	9.1	0.03	2.62			
7		0.8	12.6		0.5	15.75	0.4	12.6	10.08	0.32			0.03	0.0	10.4	0.03	2.98			
8		0.9	12.55		0.5	13.94	0.45	12.55	11.3	0.4			0.03	0.0	11.7	0.03	3.34			
9		1.0	12.5		0.5	12.5	0.5	12.5	12.5	0.5			0.04	0.0	13.0	0.04	3.7			
10		1.1	12.45		0.5	11.32	0.55	12.45	13.7	0.6			0.04	0.0	14.3	0.04	4.05			
11		1.2	12.4		0.5	10.33	0.6	12.4	14.88	0.72			0.04	0.0	15.6	0.05	4.4			
12		1.3	12.35		0.5	9.5	0.65	12.35	16.06	0.84			0.05	0.0	16.9	0.05	4.75			
13	13	1.4	12.3	0.5	0.5	8.79	0.7	12.3	17.22	0.98	26.0	338.0	0.05	0.0	18.2	0.05	5.09	0.5	0.0	0.0
14		1.5	12.25		0.5	8.17	0.75	12.25	18.38	1.12			0.05	0.0	19.5	0.06	5.44			
15		1.6	12.2		0.5	7.62	0.8	12.2	19.52	1.28			0.06	0.0	20.8	0.06	5.78			
16		1.7	12.15		0.5	7.15	0.85	12.15	20.65	1.44			0.06	0.0	22.1	0.07	6.11			
17		1.8	12.1		0.5	6.72	0.9	12.1	21.78	1.62			0.06	0.0	23.4	0.07	6.44			
18		1.9	12.05		0.5	6.34	0.95	12.05	22.9	1.8			0.07	0.01	24.7	0.07	6.77			
19		2.0	12.0		0.5	6.0	1.0	12.0	24.0	2.0			0.07	0.01	26.0	0.08	7.1			