

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

## ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ АТВУДА

Інструкція до лабораторної роботи

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за природничими і технічними спеціальностями*

Укладачі: Н. О. Якуніна, О. С. Климук, В. В. Колган

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2024

УДК 537.8 (075.8)

Ф 48

**Укладачі:** Якуніна Наталія Олександрівна, канд.фіз.-мат. наук, доцент  
Климук Олена Сергіївна, канд.фіз.-мат. наук, доцент  
Колган Володимир Владиславович, асистент

**Рецензент:** В.Й. Котовський, доктор т.н., професор кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Відповідальний редактор:** С.О. Решетняк, доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 6 від 28.03.2024 р.)  
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету  
(протокол № 3 від 21.02. 2024 р.)*

**Ф 48** Загальна фізика. Дослідження прискорення поступального руху за допомогою машини Атвуда [Електронний ресурс] інструкція до лабораторної роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за природничими і технічними спеціальностями / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н.О.Якуніна. О.С.Климук, В.В.Колган – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 16 с.

У навчальному посібнику викладено теоретичні відомості, опис лабораторної роботи з теми «Дослідження прискорення поступального руху за допомогою машини Атвуда», наведено методичні вказівки до виконання цієї роботи. Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «Загальна фізика» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «126.Інформаційні системи та технології». Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з курсу загальної фізики.

УДК 537.8 (075.8)

Реєстр. № 23/24-322. Обсяг 0.73 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

## Дослідження прискорення поступального руху за допомогою машини Атвуда

### Мета роботи:

1. Дослідження законів рівноприскореного руху на основі аналізу кінематичних характеристик руху системи тіл.
2. Визначення прискорення тіла на базі використання законів динаміки.

### Короткі теоретичні відомості.

Для вивчення законів рівноприскореного руху зручно розглядати рух тіла в машині Атвуда. Схематично машину Атвуда можна уявити як систему, що складається з блока, через який перекинута тонка нитка з тягарцями, що мають маси  $m_1$  і  $m_2$  (рис. 1).

При аналізі руху системи будемо вважати, що блок та нитка невагомі, нитка нерозтяжна, а тертя та опір повітря відсутні.

В цьому випадку рух тіл різної маси  $m_1$  і  $m_2$  буде прискорений. Тоді, відповідно до другого закону динаміки, прискорення визначається рівнодіючою сил, які прикладені до кожного з тіл:

$$m_1 \vec{a}_1 = m_1 \vec{g} + \vec{T}_1,$$

$$m_2 \vec{a}_2 = m_2 \vec{g} + \vec{T}_2.$$

Якщо направити вісь  $X$  донизу, як показано на рис. 1, то рівняння

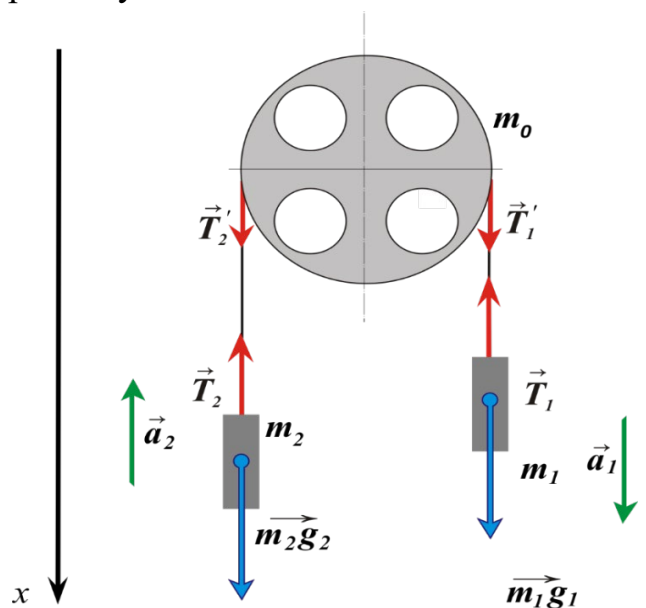


Рис. 1

руху кожного тягарця в проекції на вісь  $X$  мають вигляд:

$$m_1 a_1 = m_1 g - T'_1, \quad (1)$$

$$-m_2 a_2 = m_2 g - T'_2, \quad (2)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – сили натягу ниток,  $a_1$  і  $a_2$  – модулі прискорення відповідних тягарців.

У другому рівнянні прискорення має від'ємну проекцію на вісь  $X$ , якщо маса другого тіла менша за масу першого тіла і друге тіло рухається з прискоренням вгору. При оберненому відношенні мас ми отримаємо в розрахунках від'ємні значення прискорень.

У зв'язку з тим, що довжина нитки постійна в процесі руху, прискорення обох тягарців хоча і протилежні за напрямком, але рівні за величиною, тоді перше рівняння кінематичного зв'язку можна записати у вигляді:

$$a_1 = a_2 = a. \quad (3)$$

Враховуючи невагомість і нерозтяжність нитки, третій закон динаміки поступального руху тіл дає:  $T'_1 = -T_1$ ,  $T'_2 = -T_2$ , тобто модулі відповідних сил натягу ниток рівні:  $T'_1 = T_1$ ,  $T'_2 = T_2$ .

Тоді друге рівняння кінематичного зв'язку буде мати вигляд:

$$T'_1 = T'_2 = T. \quad (4)$$

Вважатимемо, що  $m_2 = m$ ,  $m_1 = m + \Delta m$ , тоді, розв'язуючи отриману систему рівнянь (1) – (4), отримаємо значення прискорення:

$$a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \quad \text{або} \quad a = g \frac{\Delta m}{2m + \Delta m}. \quad (5)$$

та значення сили натягу нитки:

$$T = 2g \frac{m_1 m_2}{m_2 + m_1} \quad \text{або} \quad T = 2gm \frac{m + \Delta m}{2m + \Delta m}. \quad (6)$$

Таким чином, прискорення тіл даної системи завжди менше від прискорення вільного падіння і змінюється при зміні відношення між масами обох тягарців.

### Експериментальна установка.

Машина Атвуда складається з прикріпленої до основи вертикальної *стійки*, на яку нанесено *шкалу* (рис. 2). У верхній частині стійки міститься легкий *блок*, що обертається з малим тертям. Через блок перекинута легка *нитка*, до кінців якої прикріплені два однакові тягарці  $C_1$  і  $C_2$ . До тягарця  $C_2$  можна додавати додаткові тягарці у вигляді тонких пластин. В результаті такого додавання виникає нерівність мас, і система тіл починає рухатися з деяким прискоренням.

Змінюючи масу додаткового тягарця, можна змінити прискорення системи. Розглянемо цей процес більш детально (рис. 3).

Після того, як тягарець  $C_2$  з додатковою пластиною проходить деяку відстань  $L_1$ , пластина автоматично знімається за допомогою кронштейна  $G$ . Фотодатчик 1, що знаходиться в точці з координатою  $x_1$  фіксує цей момент часу, вмикаючи таймер.

В момент, коли пластину знято, маси тягарців  $C_1$  та  $C_2$  стають однаковими, і тягарець  $C_2$  починає рухатися за інерцією: тобто рівномірно зі швидкістю, яку цей тягарець надбав в момент, коли він позбавився додаткової пластини.

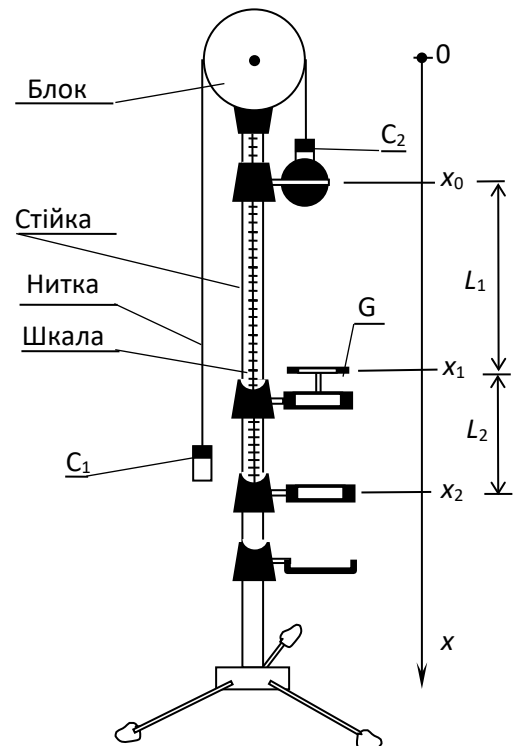


Рис. 2. Схема машини Атвуда

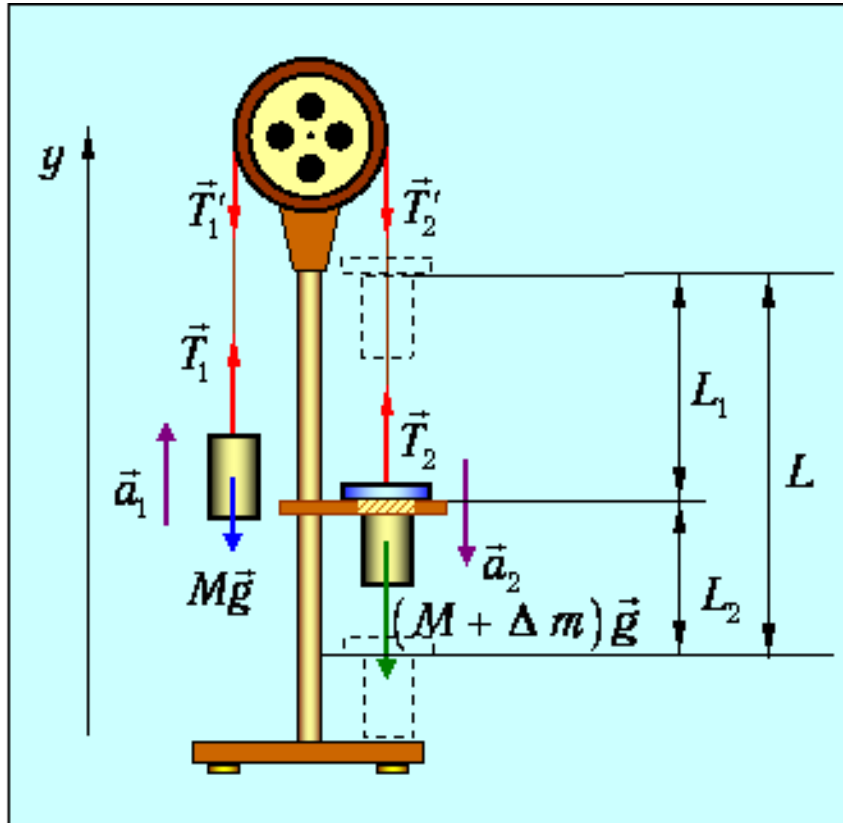


Рис.3.

Вважається, що відстань  $L_2$  тягарець проходить рівномірно.

В точці з координатою  $x_2$  розташований фотодатчик 2. Він фіксує момент, коли тягарець знаходиться в точці з координатою  $x_2$ , і вимикає таймер. Таким чином, різниця показів таймера – це час рівномірного прольоту тягарця на проміжку  $L_2$ .

### Методика визначення прискорення поступального руху.

Виходячи з аналізу руху системи тіл, проведеного в теоретичних відомостях, бачимо, що реальний рух тіл на ділянці  $L_1$  рівноприскорений. У цьому випадку його кінематичний закон руху, тобто залежність координати тіла від часу, буде мати вигляд:

$$x = x_0 + \frac{at^2}{2},$$

та залежність швидкості від часу –

$$v_1 = v_0 + at,$$

де  $x_0$  – координата, від якої тягарець  $C_2$  починає свій рух,  $v_0$  – початкова швидкість. Враховуючи, що початкова швидкість в точці  $x_0$  відсутня, отримана система рівнянь дає:

$$L_1 = x_1 - x_0 = \frac{v_1^2}{2a}, \quad (7)$$

де  $v_1$  – швидкість тягарця в момент зняття додаткової пластини й ввімкнення таймера. Якщо в системі відсутні сили тертя, то з цією ж швидкістю  $v_1$  тіло  $C_2$  буде проходити відстань між фотодатчиками після зняття з нього пластини. Рух тіла на цій ділянці буде рівномірним, тобто

$$v_1 = \frac{L_2}{t_2} = \frac{x_2 - x_1}{t_2}, \quad (8)$$

де  $L_2 = x_2 - x_1$  – відстань між двома кронштейнами ( $x_2$  – координата нижнього фотодатчика);  $t_2$  – час руху на цій ділянці шляху.

### Порядок виконання роботи

1. Верхній кронштейн  $G$  встановити на позначці  $x_1$ , а нижній кронштейн на позначці  $x_2$  так, щоб відстань між кронштейнами склала 15–20 см.
2. Записати у Табл. 1 значення  $L_2 = x_2 - x_1$ .
3. Тягарець  $C_2$  встановити у верхнє положення з координатою  $x_0$ .

**Зверніть увагу:** надалі значення  $L_2$  в процесі вимірювання не змінюють.

4. Записати у Табл. 4.1 значення мас тягарця  $m$  та додаткової пластини  $\Delta m$ .
5. Поклавши на тягарець  $C_2$  додаткову пластину  $\Delta m$ , надати руху системі тіл і одночасно ввімкнути таймер.
6. За показами таймера записати час руху  $t_2$  тягарця  $C_2$  між верхнім і нижнім кронштейнами.
7. Результати вимірювань занести до Табл. 1.

Таблиця 1

| №<br>виміру | $L_2$ ,<br>м | $m$ ,<br>кг | $\Delta m$ ,<br>кг | $L_1$ ,<br>м | $t_2$ , с | $v_1$ , м/с | $v_1^2$ ,<br>(м/с) <sup>2</sup> | $a$ ,<br>м/с <sup>2</sup> | $a_p$ ,<br>м/с <sup>2</sup> |
|-------------|--------------|-------------|--------------------|--------------|-----------|-------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1           | .            | .           | .                  | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 2           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 3           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 4           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 5           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |

8. Визначити значення швидкості  $v_1 = \frac{L_2}{t_2}$  та квадрату швидкості  $v_1^2$ .

Результати обчислень занести до Табл. 1.

9. Змінюючи відстань  $L_1$ , провести вимірювання у відповідності з пунктами 2 – 5.

10. За результатами вимірювань побудувати залежність  $v_1^2(L_1)$ . Правила для графічного представлення результатів дослідження знаходяться в Додатку 1.

Таблиця 2

| №<br>виміру | $L_2$ ,<br>м | $m$ ,<br>кг | $\Delta m$ ,<br>кг | $L_1$ ,<br>м | $t_2$ , с | $v_1$ , м/с | $v_1^2$ ,<br>(м/с) <sup>2</sup> | $a$ ,<br>м/с <sup>2</sup> | $a_p$ ,<br>м/с <sup>2</sup> |
|-------------|--------------|-------------|--------------------|--------------|-----------|-------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1           | .            | .           | .                  | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 2           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 3           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 4           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 5           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |

Таблиця 3

| №<br>виміру | $L_2$ ,<br>м | $m$ ,<br>кг | $\Delta m$ ,<br>кг | $L_1$ ,<br>м | $t_2$ , с | $v_1$ , м/с | $v_1^2$ ,<br>(м/с) <sup>2</sup> | $a$ ,<br>м/с <sup>2</sup> | $a_p$ ,<br>м/с <sup>2</sup> |
|-------------|--------------|-------------|--------------------|--------------|-----------|-------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1           | .            | .           | .                  | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 2           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 3           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 4           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |
| 5           |              |             |                    | .            | .         |             |                                 |                           |                             |

11. Визначити кутовий коефіцієнт прямої  $v_1^2(L_1)$ , за яким, згідно з (12), знайти значення прискорення  $a$ .
12. Порівняти експериментально отримане значення  $a$  зі значенням  $a = a_p$ , знайденим за формулою (5).
13. Двічі змінюючи масу  $\Delta m$  додаткового навантаження тягарця, провести вимірювання за пп.2 – 5.  
Результати вимірювань занести до Табл. 2 та Табл. 3, відповідно.
14. Побудувати залежності  $v_1^2(L_1)$  та знайти прискорення руху для відповідних пластин.
15. Побудувати графік залежності  $a(\Delta m)$ .
16. Проаналізувати отримані результати та записати висновки.

## Контрольні запитання

1. Який рух називається рівноприскореним? Запишіть кінематичні рівняння, які описують прямолінійний рівноприскорений рух тіл.
2. Що таке інерціальні та неінерціальні системи відліку? Сформулюйте 1-й закон Ньютона.
3. Що таке маса, як її виміряти?
4. Що таке сила, як її виміряти?
5. Сформулюйте 2-й закон Ньютона.
6. Сформулюйте 3-й закон Ньютона.
7. Сформулюйте умови, за яких отримані основні співвідношення роботи.
8. Які сили діють під час руху на тягарці, які закріплені на кінцях нитки? Запишіть систему рівнянь, що описують рух розглянутої установки без урахування маси блоку і сили тертя в осі.
9. Як зміниться нахил прямої  $v_1^2(L_1)$  при зростанні прискорення тіла?
10. Чим можна пояснити розбіжність значень прискорення, отриманого в експерименті та розрахованого за теоретичними викладками.
11. За якої умови сили натягу нитки з різних боків блоку можна вважати однаковими?

## Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики, т.1, Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка, вид. – К.: Техніка, 1999, § 3.1 – 3.7, 4.1 – 4.4.
2. Дослідження прискорення поступального руху за допомогою машини Атвуда. Лабораторний практикум Н.О. Якуніна, О.С. Климук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
3. Methodological instructions for laboratory work No. 4(1): «Study of the dynamics of the simplest systems using the Atwood's machine» N.O. Iakunina, O.G. Danylevych, O.S. Klymuk, I.M. Ivanova – Kyiv: I.Sikorsky KPI, 2020. – 8 p.

## Додаток 1.

Візуальне представлення результатів наукових та виробничих досліджень часто є невід'ємною частиною пошукової роботи. Одним із найбільш популярних способів наочного представлення проведеної дослідницької роботи є графіки. Знаючи ключові правила побудови графіків, можна ефективно та зрозуміло представляти експериментальні залежності та теоретичні дані, навіть у частковому чи повному відриві від зв'язного тексту, який передусє чи слідує за графіком.

При виконанні лабораторних робіт є два основних способи побудови графіків:

- «від руки»;
- за допомогою спеціального програмного забезпечення (QtiPlot, Origin, MagicPlot, Python MathLib, MathLAB, MathCAD, Maxima, GeoGebra тощо).

Графіки, що виконуються «від руки», слід робити охайно на міліметровому папері із спеціальним видом масштабу, що необхідний для конкретного випадку. Спеціальні види міліметрового паперу можна знайти у канцелярських магазинах або в інтернеті і зробити відповідні роздруківки. Також можна розліняти білий папір у відповідному масштабі самотужки. Розрізняють лінійний, логарифмічний та полярні види розлінювання міліметрового паперу (рис. 1.1).

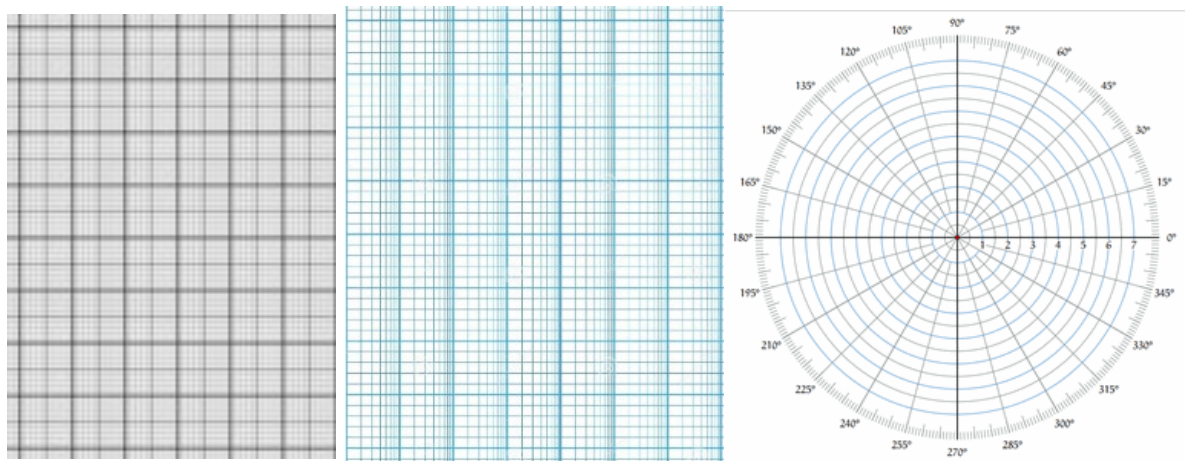
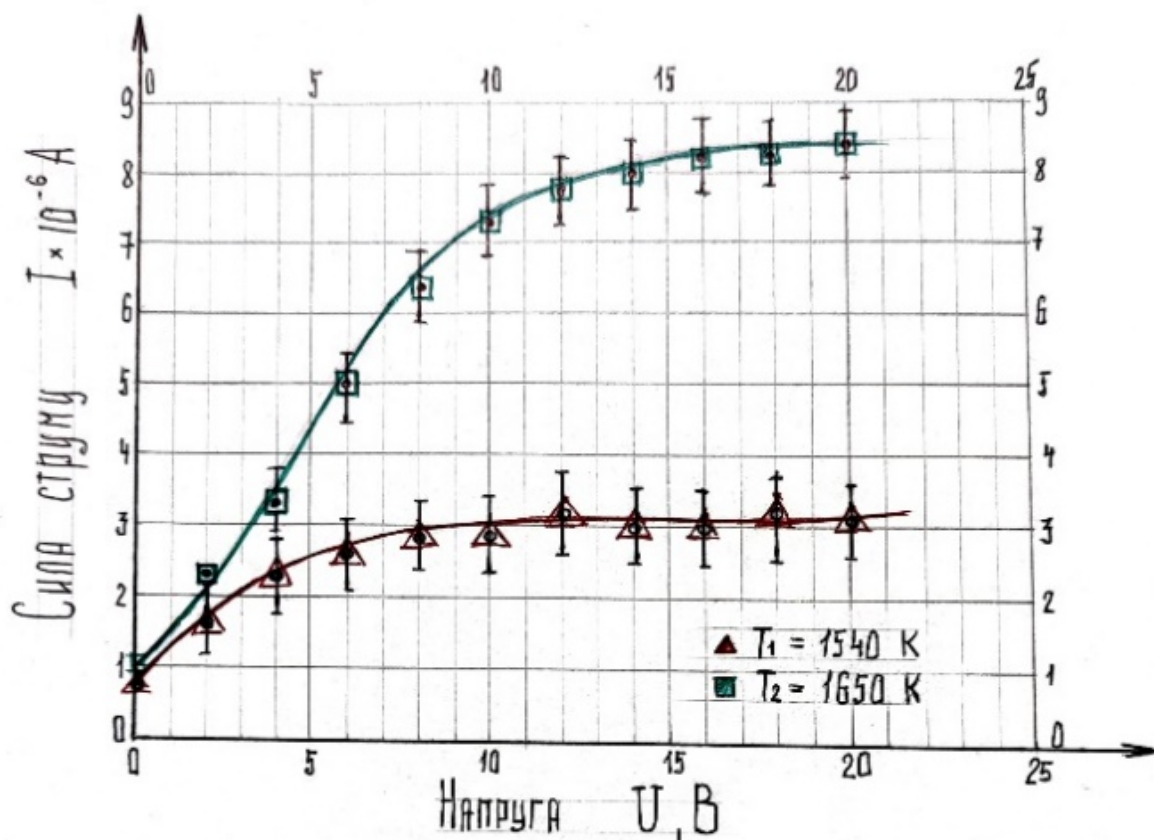


Рис. 1.1 Види розлінювання міліметрового паперу. Порядок зліва-направо відповідно: лінійне, логарифмічне горизонтальне та полярне розлінювання.

Допускається використання нелінованого білого паперу якщо відносна точність даних графіку менша за 10% або графік має лише показовий характер.

***При будь-якому способі побудови слід виконувати наступні вимоги до оформлення:***

- Не слід намагатися заповнити всю сторінку графіком. Розмір графіка повинен відповідати точності розрахунків та вимірювань.
- На графіку не повинно залишатися багато порожнього місця. Осі слід відображати в тих межах, в яких змінюються показані величини. Це допомагає заощаджувати місце і підвищує точність графіків.
- Графік повинен мати координатні лінії та сітку. Координатна сітка покращує відлік величин, але її не слід робити занадто густою, бо це може утруднювати читання графіка.
- Масштаб по осях слід вибирати з міркувань зручності. Можна дотримуватись правила: на 1 см осі зміна величини в одиницях вимірювання дорівнює  $m \times 10^n$ , де  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ ,  $m = 1, 2, 4, 5$ . Вільні місця графіка можна використовувати для написання формул та позначень.
- Експериментальні точки слід виділяти спеціальними обведеннями, наприклад, колом, квадратом або трикутником, за можливості використовувати різні кольори для різних наборів даних.
- Написи на графіку та під ним повинні бути виконані креслярським шрифтом. На осях графіка обов'язково мають бути проставлені позначення величин та одиниці їх виміру. Пам'ятайте, що графік без позначень осей і величин виміру не має сенсу.
- Залежності декількох величин від однієї і тієї ж змінної рекомендується будувати на одному графіку. Якщо крива на графіку «забирається» занадто далеко від точки початку відліку, можна використовувати розрив осей для збереження масштабу (рис. 1.2).



Залежність амплітуди вимушених коливань від частоти генератора

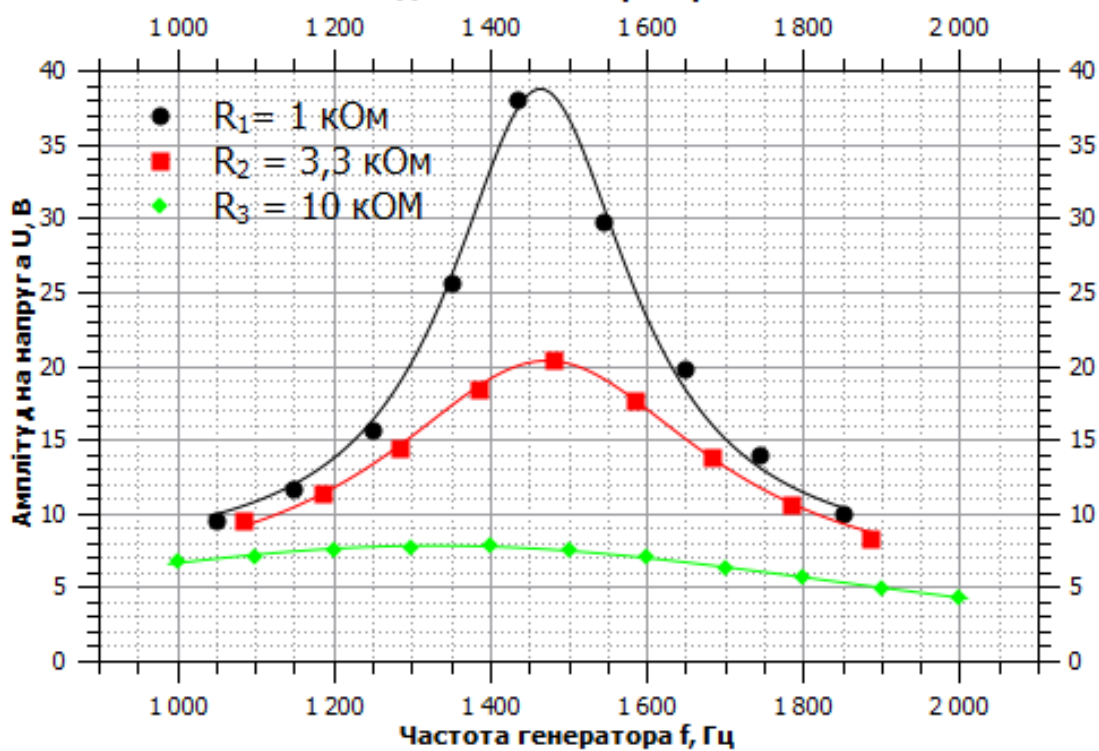
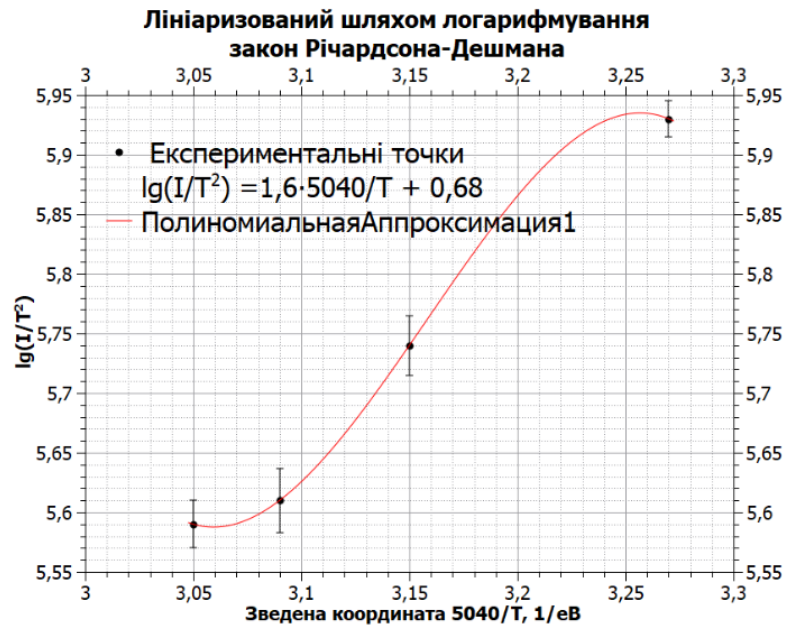
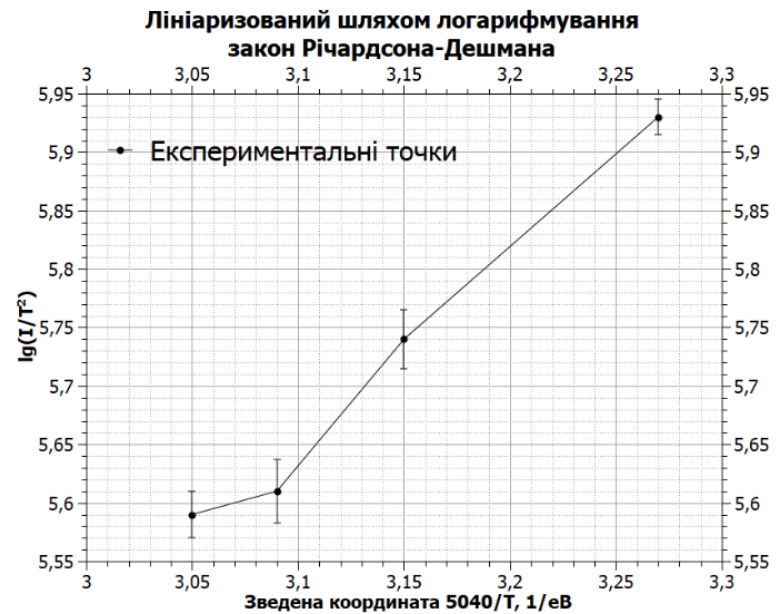


Рис. 1.2. Приклади правильної побудови графіку. Згори – «від руки», знизу – за допомогою програми (в даному прикладі QtiPlot)



а

б

Рис. 1.3. Приклади неправильно побудованих графіків.

Неприпустимо будувати експериментальну криву, з'єднуючи виміряні точки прямими відрізками (рис. 1.3а), оскільки з урахуванням похибок не завжди між двома послідовними точками графіка насправді простежується лінійна залежність. Функціональна залежність, що оминає експериментальні точки також повинна обиратися з урахуванням теоретичних відомостей, фізичних законів та формул. За рідкісним винятком можна використовувати

з'єднання точок сплайнами замість поліноміальної, експоненціальної чи Лоренц- або Гаусс- апроксимацій.

Зверніть увагу на те, що неприпустимо лінійну або прямо-пропорційну залежність зображувати кривими другого чи третього порядку (рис. 1.3б).

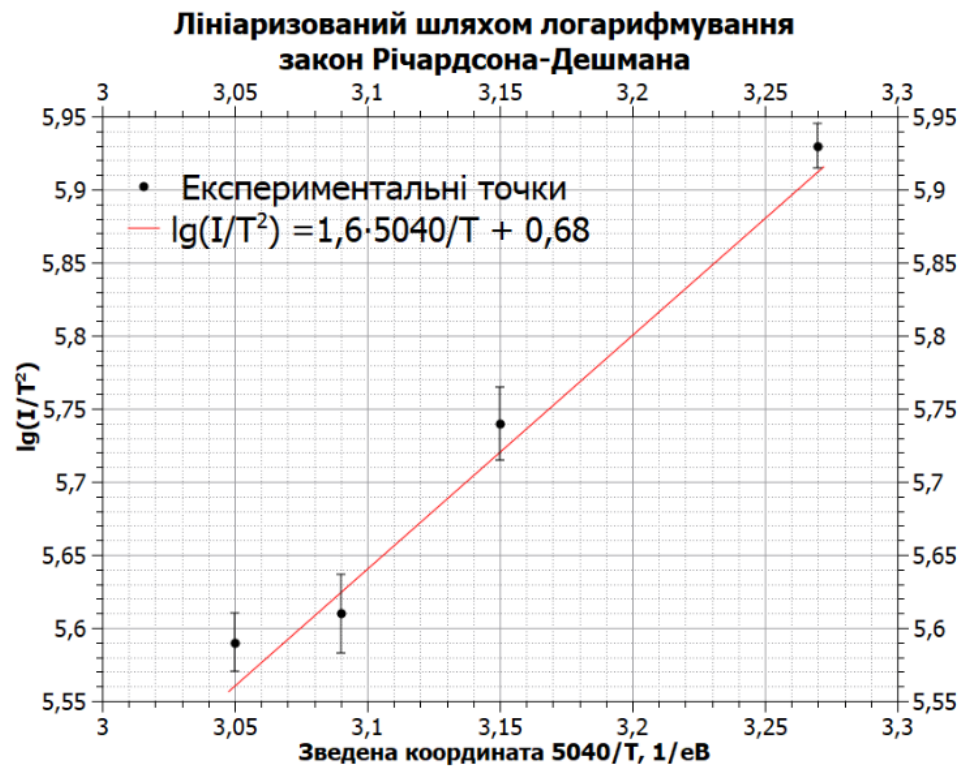


Рис. 1.4. Виправлений та правильно побудований графік, наведений на рисунку 1.3.

Оминаюча крива, представлена на графіку, повинна бути проведеною так, щоб експериментальні точки розташовувалися рівномірно по обидва боки від неї в межах похибок (рис. 1.4). Часто цю залежність знаходять за допомогою методів регресійного аналізу, серед яких найбільш популярним є метод найменших квадратів (МНК).