

УДК 548.76+621.315

Д.М. СТЕПАНЧИКОВ

Херсонський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МЕХАНІЧНОЇ ВЕЛИЧИНИ НА ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМІ З ФІЗИКИ

Представлена методична розробка лабораторної роботи “Фізичні основи роботи індуктивного параметричного перетворювача механічної величини”. Розроблено та перевірено відповідне лабораторне обладнання. Розглянуто розрахунки основних характеристик перетворювача, таких як функція перетворення, коефіцієнт перетворення та чутливість. Використано графічне, табличне та аналітичне представлення результатів експерименту. Для обробки даних та розрахунку похибок запропоновано метод найменших квадратів. Проведено аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: індуктивний параметричний перетворювач, метод найменших квадратів, лабораторний практикум.

D.M. STEPANCHIKOV

Kherson National Technical University

INVESTIGATION OF THE INDUCTIVE PARAMETRIC TRANSFORMER OF MECHANICAL QUANTITY ON A LABORATORY WORK OF PHYSICS

Abstract

Methodical development of laboratory work “Principal physics of operation of the inductive parametric transformer of mechanical quantity” is presented. The laboratory equipment is assembled and tested. Calculations of the basic performances of the transformer such as conversion function, conversion factor and sensitivity are viewed. Graphical, tabular and analytical approaches to submission of experiment results are applied. The least square method for the data processing and errors calculations is offered. The analysis of the gained results is presented.

Keywords: inductive parametric transformer, least square method, laboratory works.

Постановка проблеми

Науки, метою яких є дослідження природи (фізика, хімія, біологія тощо), спираються на експеримент як на початковий етап з'ясування закономірностей природи, так і остаточний етап підтвердження або скасування теоретично встановлених моделей та гіпотез. Тому проведення експериментів та точне встановлення їх результатів є найважливішим у розумінні природних явищ. Більше того, експеримент, як такий, дозволяє встановити взаємну залежність тих чи інших величин поміж собою. Основою наукових експериментів є вимірювання фізичних величин. Вимірювання – головний шлях отримання достовірної інформації про властивості об'єктів навколишнього матеріального світу, тобто про різноманітні фізичні величини – механічні, теплові, електричні, магнітні, оптичні та інші.

Удосконалення методів і засобів вимірювань відбувається безупинно. Їх успішне освоєння і використання на виробництві та у науковій діяльності вимагає від майбутніх фахівців знань основ методів та засобів технічних вимірів, знайомства з будовою та фізичним підґрунтям сучасних вимірювальних приладів і прийомами роботи з ними. Це завдання є одним із багатьох інших, які вирішуються на лабораторному практикумі з фізики. Дисципліна «Фізика» разом із «Вищою математикою» і «Теоретичною механікою» складають основу теоретичної підготовки інженерів, відіграючи роль фундаментальної фізико-математичної бази, без якої неможлива успішна діяльність інженера будь-якого профілю. Але треба відзначити, що у технічному вузі дуже важливим є також і прикладний аспект дисципліни «Фізика». Саме ця особливість повинна, передусім, проявлятися на лабораторному практикумі із загального курсу фізики і особливо зі спеціальних розділів фізики, які передбачені на окремих напрямках підготовки студентів технічних спеціальностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Характерною рисою сучасних вимірювань є те, що не тільки електричні й магнітні, але і більшість неелектричних величин вимірюються електричними методами, тобто шляхом попереднього перетворення неелектричної величини в електричну. Цей факт обумовлений такими перевагами електричних методів, як: універсальність, дистанційність, простота автоматизації вимірювальних процесів, придатність до вимірювання швидкозмінних величин, можливість забезпечення високої точності та чутливості [1-4].

При вимірюванні неелектричних величин електричними методами передбачається наявність первинного перетворювача вхідної неелектричної фізичної величини у вихідну електричну. Всі методи вимірювання неелектричних величин поділяють на дві групи [5, 6]:

1. Контактні – первинний перетворювач знаходиться у безпосередньому контакті з досліджуванним об'єктом (переваги: простота реалізації, висока чутливість, локалізація точки вимірювання; недоліки: вплив перетворювача на об'єкт);

2. Безконтактні – первинний перетворювач не знаходиться у безпосередньому контакті з досліджуванним об'єктом (переваги: не спотворює параметрів об'єкту, недоліки: вплив оточуючого середовища).

У первинних перетворювачах інформації фізичний сигнал одного виду – вхідний параметр x – перетворюється на фізичний сигнал іншого виду – вихідний параметр y , причому вихідний сигнал функціонально пов'язаний з вхідним. У залежності від енергетичних властивостей вихідного сигналу і способу його подальшого використання первинні перетворювачі розділяють на дві великі групи [5-7]:

1. Параметричні – вихідною величиною є параметр електричного кола (опір, ємність, індуктивність), для таких перетворювачів потрібне джерело живлення;

2. Генераторні – вихідною величиною є електрорушійна сила (ЕРС) або заряд, які є функціонально зв'язаними з вимірюваною неелектричною величиною.

Залежність вихідної величини вимірювального перетворювача y від вхідної x дається рівнянням перетворення $y = f(x)$. Рівняння перетворення (функцію перетворення) здебільшого доводиться знаходити експериментально, тобто робити градуювання перетворювачів. Результати градуювання подають у вигляді таблиць, графіків або аналітично. Основною характеристикою перетворювача є статична залежність $y = f(x)$ вихідної величини y від вхідної x , якщо вхідна величина змінюється настільки повільно, що в кожний момент часу її можна вважати незмінною. Якщо вихідний сигнал перетворювача залежить не тільки від вхідної вимірюваної величини x , але й від зовнішнього фактора z , то при градуюванні визначається ряд функцій перетворення при різних значеннях z : $y = f(x, z)$.

Іншою важливою характеристикою перетворювача є коефіцієнт перетворення [6]:

$$K(x) = \frac{y}{x}, \quad (1)$$

причому $K(x) = \text{const}$ тільки тоді, коли функція перетворення $f(x)$ є лінійною і проходить через початок координат.

Крутість статичної характеристики перетворювача називається його чутливістю S , вона характеризує ступінь реагування перетворювача на зміну вхідної величини. Якщо функція перетворення є лінійною, то чутливість є сталою, а якщо при цьому графік $f(x)$ проходить через початок координат, то $S = K(x)$. При нелінійній функції перетворення чутливість є функцією вхідної величини x і пов'язана з коефіцієнтом перетворення залежністю [6]

$$S = \frac{dy}{dx} = K(x) + \frac{dK(x)}{dx}x, \quad (2)$$

з якої випливає, що за відомим коефіцієнтом перетворення $K(x)$ завжди можна знайти чутливість S , але не навпаки. Отже, коефіцієнт перетворення є більш інформативною характеристикою, аніж чутливість.

Таким чином, розгляд будови та принципу роботи перетворювачів з точки зору “фізики процесу”, вміння знімати та аналізувати основні характеристики перетворювачів, подавати їх у різних формах (табличній, графічній, аналітичній), робити градуювання, оцінювати переваги та недоліки, умови та межі застосування, точність та похибки вимірювання перетворювачів – це пріоритетні завдання саме лабораторного практикуму з фізики як базової навчальної дисципліни, яка вивчається на перших курсах перед розглядом спеціалізованих предметів.

Формулювання мети дослідження

З метою вирішення вищезазначених завдань пропонується методична розробка лабораторної роботи “Фізичні основи роботи індуктивного параметричного перетворювача механічної величини” та відповідне лабораторне обладнання. Передбачається дослідження контактного параметричного індуктивного перетворювача механічної величини (лінійної відстані) плавної дії, експериментальне отримання функцій перетворення у графічному, табличному та аналітичному вигляді, розрахунки чутливості і коефіцієнту перетворення та їх середньоквадратичних похибок, отримання залежностей характеристик індуктивного перетворювача від переміщення осердя і величини зовнішньої напруги, оцінка переваг та недоліків запропонованого перетворювача.

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідницька установка складається з котушки з рухомим залізним осердям і вимірювальною шкалою, джерела змінної регульованої напруги, вольтметра і цифрового міліамперметра змінного струму. Для плавного переміщення осердя всередині котушки застосовано гвинтовий механізм. Зовнішній вигляд та принципову електричну схему установки подано на рис.1. Дослідницька установка вмикається у мережу змінної напруги ~220 В і частоти 50 Гц. Понижуючий трансформатор *Tr* видає робочу змінну напругу в межах до 30В. За допомогою потенціометру *R* цю напругу можна плавно регулювати.

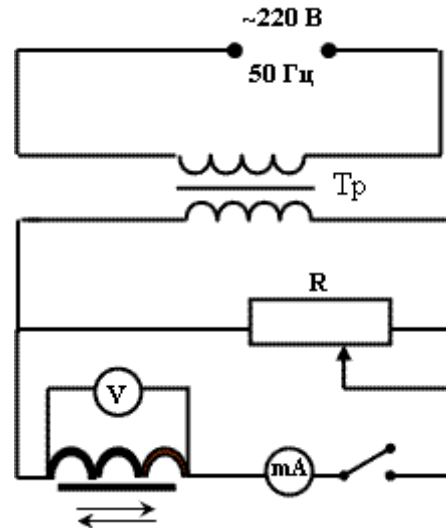


Рис. 1. Зовнішній вигляд та принципова електрична схема лабораторної установки

Під час проведення дослідів за допомогою потенціометру на котушку подавали певне значення робочої змінної напруги при повністю виведеному з неї залізному осерді. Далі за допомогою гвинтового механізму поступово з фіксованим кроком (було взято 5 мм) вводили всередину котушки осердя і вимірювали за допомогою міліамперметра струм у її обмотці. Дослід декілька разів повторювали при різних значеннях напруги *U* на обмотці котушки. Існує функціональна залежність сили струму *I* в обмотці котушки від переміщення *d* залізного осердя в ній. Якщо отримати цю функціональну залежність, то у подальшому за величиною струму в обмотці котушки можна визначати переміщення осердя в її середині. До осердя можна приєднати досліджуваний об'єкт, переміщення або лінійний розмір якого треба визначити. У такому разі отримуємо найпростіший індуктивний датчик лінійних переміщень.

У функції перетворення $y = f(x, z)$ вихідною величиною *y* є сила струму *I*, вхідною величиною *x* є лінійна відстань або переміщення *d* осердя котушки, з яким пов'язаний певний об'єкт, розмір (або рух) якого вимірюють, зовнішнім фактором *z* є напруга *U*, прикладена до котушки і значення якої ми можемо змінювати.

Таблиця 1

Експериментальні результати

<i>U</i> =30 В									
<i>d</i> , мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
<i>I</i> , мА	480	460	440	420	400	360	340	320	300
<i>U</i> =26 В									
<i>d</i> , мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
<i>I</i> , мА	410	400	390	370	350	330	300	280	260
<i>U</i> =20 В									
<i>d</i> , мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
<i>I</i> , мА	310	300	290	280	270	260	250	230	220
<i>U</i> =16 В									
<i>d</i> , мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
<i>I</i> , мА	250	240	235	230	220	210	200	190	180
<i>U</i> =12 В									
<i>d</i> , мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
<i>I</i> , мА	195	193	186	182	176	170	165	159	154

Продовження таблиці 1

U=8 В									
d, мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
I, мА	130	129	127	125	121	117	113	109	106
U=6 В									
d, мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40
I, мА	102	101	100	98	95	92	89	86	83

Експериментально необхідно отримати функцію перетворення $I = f(d, U)$ у табличному, графічному і аналітичному (тобто у вигляді математичного рівняння) вигляді. Також необхідно розрахувати чутливість S і коефіцієнт перетворення K , оцінити похибки. Експериментальна частина дослідження полягає у знятті залежності сили струму I від переміщення d осердя всередині котушки при декількох різних (але фіксованих) значеннях напруги. Результати таких вимірювань подано у табл. 1.

За результатами експерименту було побудовано сімейство графічних залежностей сили струму I від переміщення d осердя всередині котушки (рис. 2). Для отримання аналітичної залежності струму від переміщення осердя був застосований регресійний аналіз з використанням методу найменших квадратів (МНК), який апроксимує вихідну табличну (дискретну) залежність неперервною формальною аналітичною залежністю за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки [8-10]. Оскільки, як видно з рис. 2, розкид експериментальних точок невеликий, було реалізовано найпростішу лінійну регресію у вигляді функції

$$I = -Sd + b. \tag{3}$$

У результаті для кожного набору експериментальних даних отримано лінійне рівняння (табл. 2). Знайдені аналітичні залежності також показано на рис. 2 у вигляді суцільних ліній. Розраховані значення коефіцієнта лінійного кореляційного зв'язку ρ поміж величинами I та d наведено у табл. 2. Значення коефіцієнту кореляції є майже однаковими поміж собою і практично дорівнюють одиниці, що підтверджує коректність обраної лінійної апроксимації експериментальних результатів. Аналіз рис. 2 показує збільшення крутості характеристики при збільшенні зовнішньої напруги.

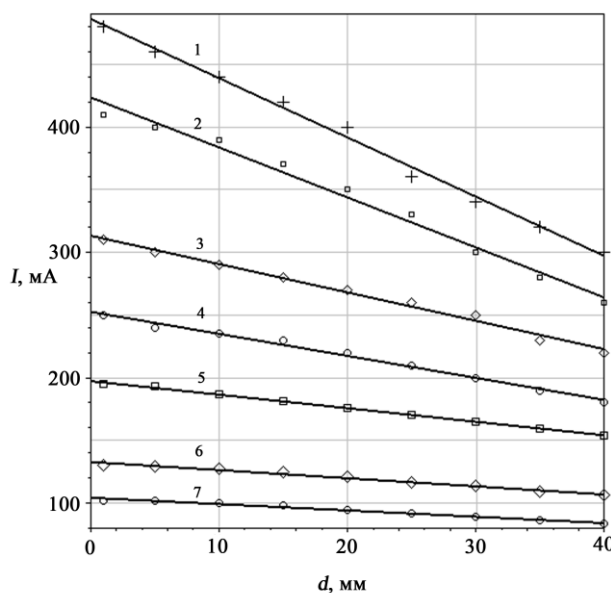


Рис. 2. Функції перетворення $I = f(d, U)$. Точки різної форми – експериментальні результати, суцільні лінії – лінійна апроксимація МНК. Цифри на графіках відповідають різним значенням напруги: 1 – 30В, 2 – 26В, 3 – 20В, 4 – 16В, 5 – 12В, 6 – 8В, 7 – 6В

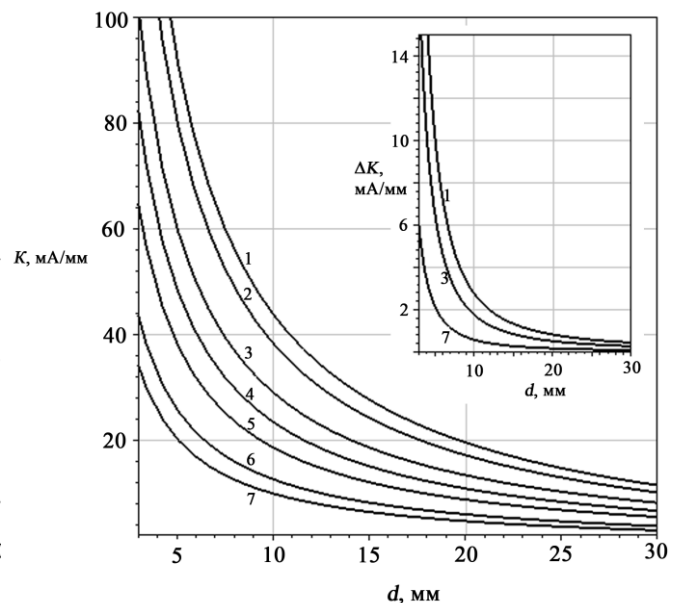


Рис. 3. Залежність коефіцієнту перетворення від лінійного переміщення осердя. На вставці показано залежність середньо-квадратичної похибки коефіцієнту перетворення від лінійного переміщення

Отримані аналітичні залежності функції перетворення і розраховані на їх підставі чутливість S та функціональна залежність коефіцієнта перетворення K , а також похибки і коефіцієнт кореляції представлено у табл. 2. Для лінійної функції перетворення $I = f(d, U)$ чутливість є постійною в усьому діапазоні зміни переміщень d осердя, що є суттєвою перевагою досліджуваного індуктивного перетворювача. Від’ємний знак S лише свідчить, що струм в обмотці зменшується з пересуванням осердя у середину котушки. З підвищенням зовнішньої змінної напруги чутливість зростає, отже бажано використовувати перетворювач при більш високих значеннях напруги. Дослідження показали, що функцію $S(U)$ можна апроксимувати квадратичною залежністю:

$$S(U) = -0,004U^2 - 0,028U - 0,160. \tag{4}$$

Залежність коефіцієнту перетворення K від переміщення d є обернено пропорційною, відповідні аналітичні рівняння наведено у табл. 2, а їх вигляд на рис. 3. З підвищенням напруги коефіцієнт перетворення також зростає. Оскільки коефіцієнт перетворення не є сталою величиною, то його середньоквадратична похибка також буде залежати від переміщення осердя. Для знаходження цієї залежності скористаємось тим, що на підставі даних табл. 2 для коефіцієнту перетворення можемо записати

$$K = \frac{b}{d} - S. \tag{5}$$

Тоді середньоквадратична похибка обчислюється за формулою

$$\Delta K = \left| \frac{\partial K}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial K}{\partial d} \right| \Delta d + \left| \frac{\partial K}{\partial S} \right| \Delta S, \tag{6}$$

де $\Delta b \equiv \sigma_b$, $\Delta S \equiv \sigma_s$, $\Delta d = 0,5$ мм.

Після взяття похідних у (6), остаточно маємо

$$\Delta K = \frac{1}{d} \sigma_b + \frac{b}{d^2} \Delta d + \sigma_s. \tag{7}$$

Вигляд цієї залежності показаний на вставці рис. 3. Залежність $\Delta K(d)$ є суттєво нелінійною, дещо подібною до залежності $K(d)$. З підвищенням напруги середньоквадратична похибка коефіцієнта перетворення зростає.

Таблиця 2

Лінійна функція перетворення, коефіцієнт кореляції ρ , чутливість S , середньоквадратичні похибки визначення чутливості σ_s , і коефіцієнта лінійного рівняння σ_b , коефіцієнт перетворення K

U , В	Лінійна апроксимація функції перетворення	ρ	S , мА/мм	σ_s , мА/мм	K , мА/мм	σ_b , мА
30	$486,25 - 4,73d$	0,997	-4,73	0,097	$-4,73 + 486,25/d$	2,321
26	$423,64 - 3,99d$	0,993	-3,99	0,123	$-3,99 + 423,64/d$	2,924
20	$313,31 - 2,26d$	0,995	-2,26	0,057	$-2,26 + 313,31/d$	1,354
16	$252,56 - 1,76d$	0,995	-1,76	0,046	$-1,76 + 252,56/d$	1,108
12	$197,28 - 1,08d$	0,999	-1,08	0,012	$-1,08 + 197,28/d$	0,297
8	$132,82 - 0,65d$	0,992	-0,65	0,022	$-0,65 + 132,82/d$	0,515
6	$104,27 - 0,51d$	0,991	-0,51	0,018	$-0,51 + 104,27/d$	0,425

Висновки

Презентована методична розробка є наочною ілюстрацією того, як можна висвітлювати прикладні аспекти на лабораторному практикумі з загальної фізики і готувати студентів технічних вузів для подальшого використання отриманих знань при вивченні спеціалізованих дисциплін. Глибоке розуміння фізичних основ роботи того чи іншого вимірювального пристрою – запорука того, що майбутній інженер

буде висококваліфікованим та потрібним на виробництві фахівцем. Крім того, застосування в роботі достатньо складної математичної обробки експериментальних результатів дає студентам навички використання математичного апарату і демонструє теоретичний аспект будь-якої прикладної експериментальної задачі.

Список використаної літератури

1. Файден Дж. Современные датчики. – М.: Техносфера, 2005. – 589 с.
2. Готра З.Ю., Ильницкий Л.Я., Полищук Е.С. и др. Датчики. – Львов: Каменяр, 1995. – 312 с.
3. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн.1. – М., Мир, 1992. – 480 с.
4. Бриндли К. Измерительные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
5. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
6. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин. Под ред. Е.С. Полищука. – К.: Вища шк., 1984. – 359 с.
7. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
8. Панев Б.И. Электрические измерения. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. – 832 с.