

## ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ БОЙКА НА УСТАНОВЦІ ДЛЯ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ «КОПЕР»

У даній статті розглянуто особливості існуючих методів вимірювання швидкості, а також аналіз оптичного методу вимірювання швидкості з використанням оптичари, яка працює на відбиття при динамічних випробуваннях на установці «Копер».

In this article we'll consider the special features of methods for measurement of speed and analysis optical method for measurement of speed with used optical sensing element which work as reflection.

Для випробувань на міцність полікристалічних надтвердих матеріалів при динамічному навантаженні в ІНМ НАНУ застосовується установка «Копер» [1]. Якість визначення механічних властивостей інструментальних матеріалів багато в чому залежить від точності вимірювальної установки. Перед кожною серією випробувань для підвищення точності вимірів і розрахунку градуювальних коефіцієнтів необхідно проводити градуювання установки «Копер». Градуювання полягає у визначенні зв'язку між силою навантаження й напругою, яка реєструється АЦП Е20-10. Своєю чергою, точність градуювального коефіцієнта прямо залежить від точності вимірювання швидкості бойка. Як відомо, багато в чому точність вимірювання швидкості бойка залежить від правильного вибору методу вимірювання.

Дослідження даної проблеми, а саме методів вимірювання і визначення швидкості бойка показали різноманітність існуючих методів.

Методи вимірювання швидкості контактного типу

### *Метод балістичного маятника*

Цей метод ґрунтується на фізичному законі збереження сумарного імпульсу системи тіл при їх зіткненні.

Балістичний маятник являє собою масивне тіло, укріплене на підвісі. Куля, що рухається, потрапляючи в нерухомий маятник, викликає його коливання. Знаючи масу кулі —  $m$ , масу маятника —  $M$  і максимальну величину підймання центра ваги маятника —  $h$ , можна розрахувати швидкість кулі  $V$  у момент зіткнення її з маятником за формулою:

$$V = \frac{m + M}{m} \sqrt{2gh},$$

де  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — прискорення вільного падіння.

### *Механічний хронограф*

Одна з конструкцій механічного хронографа являє собою два диски, закріплені на одній осі обертання. При пострілі куля пробиває спочатку перший диск, потім другий. Час руху кулі між дисками визначають за величиною кута  $\alpha$ , на який зміститься кульова пробойна на другому диску щодо пробойни на першому диску. Швидкість польоту кулі можна обчислити за формулою:

$$V = 6L \frac{N}{\alpha}$$

де  $L$  — відстань між дисками, м;  $N$  — число обертів з дисками за хвилину;  $\alpha$  — кут між пробойнами, град.

Чим більше швидкість обертання дисків, тим вище точність вимірювання швидкості кулі.

До недоліків такої системи вимірювання можна віднести: підвищені вимоги до рівномірності обертання дисків (потрібен пристрій стабілізації швидкості), додаткову похибку за рахунок динамічного впливу на систему при ударі кулі по дисках і їх деформації в процесі пробиття, зниження швидкості кулі в процесі пробиття першого диска, велика кількість відаткових матеріалів, незручність експлуатації й значний час підготовки до наступного вимірювання.

### *Електронні мілісекундоміри*

Вимірювання швидкості польоту кулі за допомогою електронних мілісекундомірів засноване на безпосередньому вимірюванні часу, за який куля проходить визначену відстань між двома датчиками. При польоті кулі через датчики перший датчик запускає мілісекундомір, а другий — зупиняє.

Датчики можуть бути виконані в різних варіантах:

- рамки із дротом, який розривається кулею, тим самим розривається електричне коло мілісекундоміра;
- електромагнітні датчики у вигляді соленоїда, в яких наводиться ЕДС самоіндукції при проходженні їх кулею;
- оптоелектронні датчики, які запускають відлік часу при перетинанні кулею світлового променя.

## Вимірювачі швидкості неконтактного типу

### *Оптичні вимірювачі*

Оптичні вимірювачі швидкості працюють на принципі фотоелектричного блокування й виконуються, як правило, у вигляді системи, що складається з двох вимірювальних оптичних площин, рознесених на величину вимірювальної бази.

Залежно від способу формування оптичних площин оптичні вимірювачі поділяються на світлодіодні й лазерні.

У світлодіодних вимірювачах оптична площина формується світлодіодною лінійкою (випромінювач) і фотодіодною лінійкою (приймач випромінювання), установленими в обойми з тонкими світлопроникними щілинами. Куля, проходячи крізь оптичну площину, послабляє світловий потік, що приходить на фотоприймач, у результаті чого на виході електронного пристрою формується сигнал запуску (зупинки) таймера.

У лазерних вимірювачах оптична площина формується багаторазовим відбиттям променя лазерного випромінювача таким чином, щоб крок променевої сітки був менше мінімального калібру кулі, і промінь, багаторазово відбившись від системи дзеркал або дзеркальних призм, потрапляв на фотоприймач. Куля, проходячи крізь оптичну площину в будь-якій її частині, повністю перериває світловий потік, що приходить на фотоприймач, чим пускає в хід електронну схему формування сигналу запуску (зупинки) таймера. Оптичні вимірювачі швидкості характеризуються високою продуктивністю, постійною готовністю до роботи, не вимагають видаткових матеріалів і працюють у широкому діапазоні швидкостей.

До недоліків таких вимірювачів належать: можлива значна похибка вимірювання; необхідність проведення профілактичних робіт з оптичними вузлами; відносно висока вартість.

### *Індуктивні вимірювачі*

Принцип роботи індуктивних вимірників швидкостей базується на зміні індуктивностей вимірювальних котушок, що є датчиками польоту кулі.

Вимірювальна база дорівнює відстані між геометричними центрами магнітних полів вимірювальних котушок. Індуктивні вимірники швидкості характеризуються більш високими експлуатаційними параметрами, ніж оптичні вимірники, але мають значну похибку вимірювання й досить чутливі до електромагнітних і механічних завад.

### *Індукційні вимірювачі*

Індукційні вимірники швидкості реалізують той самий принцип вимірювання швидкості — вимірювання інтервалу часу на фіксованій вимірювальній базі. Від інших вимірників неконтактного типу відрізняються конструкцією й принципом роботи датчиків швидкості.

Індукційні вимірники поділяються на магнітні й електромагнітні.

Основна перевага індукційних вимірювачів швидкості полягає в тому, що вихідні рівні сигналів датчиків досягають одиниць і десятків вольт, що дає змогу вибирати значний поріг компарування й надійно працювати при високому рівні зовнішніх завад. Крім того, фронти турбулентності, що супроводжують процес пострілу й польоту кулі, не чинять негативного впливу на точність вимірювань.

Основний недолік індукційних вимірників швидкості полягає у тому, що вихідний сигнал датчика швидкості прямо пропорційний швидкості кулі. Цим обмежене їхнє застосування для вимірювання малих швидкостей (мінімальна вимірювана швидкість — десятки метрів на секунду) і цілком виключені статичні вимірювання.

Проаналізувавши кожний з цих методів, ми дійшли висновку, що в нашому випадку найбільш оптимальним методом можна вважати оптичний метод вимірювання швидкості бойка із застосуванням оптопари, що працює на відбиття. Датчиком включення електромагніту є оптична пара К170Р, яка спрацьовує на відбивання. В оптичних пар такого типу випромінювач світлового потоку та приймач виконані в одному корпусі. Монолітність корпусу виключає необхідність в механічному налагоджуванні оптичної системи, невелике відхилення бойка від вертикальної осі не вплине на спрацювання оптичної пари. Вищеперелічене є перевагою оптичної пари, що працює на відбивання над оптичною парою яка працює на провіт. Відбиваючим елементом є бойок.

Як відомо з теорії зіткнення довгих пружних стрижнів одного діаметра, зусилля визначається фор-мулою [2]

$$P_{\max} = \rho C_0 V F, \quad (1)$$

де  $\rho$  — щільність матеріалу стрижня;  $C_0$  — швидкість пружної хвилі в стрижні;  $V$  — масова швидкість часток у стрижні,  $F$  — площа поперечного перерізу стрижня.

Значення швидкості  $V$  визначається за формулою

$$V = \frac{V_0}{2}, \quad (2)$$

де  $V_0$  — швидкість співударення бойка зі стрижнем.

$V_0$  визначається з рівняння вільного падіння за формулою

$$V_0 = \sqrt{2gh}, \quad (3)$$

де  $h$  — висота підйому бойка.

Використання у формулі (2) швидкості бойка, визначеної з рівняння вільного падіння, неприйнятно, бо при цьому не враховувалася відмінність величини прискорення вільного падіння (яка залежить від географічного розташування), опір повітря й тертя бо стінки в напрямному жолобі, по якому пролітає боек. Тому, для підвищення точності визначення швидкості бойка в момент удару, було запропоновано вимірювати швидкість за допомогою спеціального вимірювального приладу. Блок-схема приладу зображено на рис. 1.

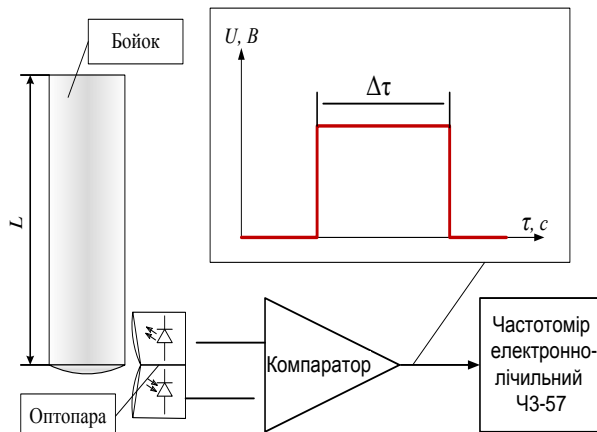


Рис. 1. Блок-схема приладу для вимірювання швидкості

Сигнал від оптопари надходить на компаратор, а після компаратора на частотомір, який налаштований на вимірювання довжини імпульсу. Важливою перевагою схеми управління на компараторі над тригерною є завадостійкість. Цей параметр важливий для пристроїв які працюють в промислових умовах, де дуже багато джерел шуму.

Боек має фіксовану довжину  $L$ . Падаючи, боек перетинає вісь спрацьовування оптопари, тим самим відкриває компаратор, а після вильоту із зони спрацьовування оптопари закриває компаратор. На виході компаратора формується прямокутний імпульс із тривалістю  $\Delta\tau$ . Довжину імпульсу вимірюємо частотоміром ЧЗ-57. Швидкість падіння бойка розраховували за формулою

$$V_p = \frac{L}{\Delta\tau} \quad (4)$$

Щодо визначення похибки вимірювання даного приладу, то основною можна вважати похибку вимірювання часу затримки. Вона дорівнює сумі похибок вимірювання часу затримки кожного із елементів приладу, а саме похибок оптопари, компаратора та частотоміра й визначається за формулою:

$$\Delta t_3 = \sqrt{\sum (\Delta t_3^i)^2}, \quad (5)$$

де  $\Delta t_3^i$  — похибка вимірювання часу затримки кожної складової приладу (оптопари, компаратора і частотоміра).

Оскільки найбільш вагому похибку вимірювання часу затримки має компаратор, розглянемо де-тальніше принцип його роботи.

На рис. 2 зображено схему увімкнення компаратора.

Компаратор формує симетричну вихідну напругу, яка практично дорівнює  $\pm E_{II}$ . Позначимо коефіцієнт передачі подільника  $R1, R5$  у ланцюгу компаратора через  $\beta_t$ :

$$\beta_t = \frac{R1}{R1 + R5} \quad (6)$$

На рис. 3. зображено часову діаграму формування вихідного сигналу.

Відомо, що похибка компаратора дорівнює сумі статичної та динамічної складових. Тоді

$$\Delta U_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta U_{\text{стат}} K_f)^2 + (\Delta U_{\text{динам}})^2}. \quad (12)$$

**Цей метод візначається порівняно невеликими конструктивними й економічними витратами, високою продуктивністю, широким діапазоном вимірюваних швидкостей, постійною готовністю до роботи, точністю.**

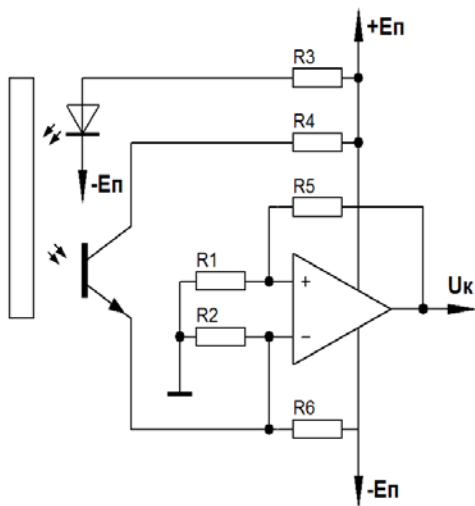


Рис. 2. Увімкнення компаратора у пристрою для вимірювання швидкості

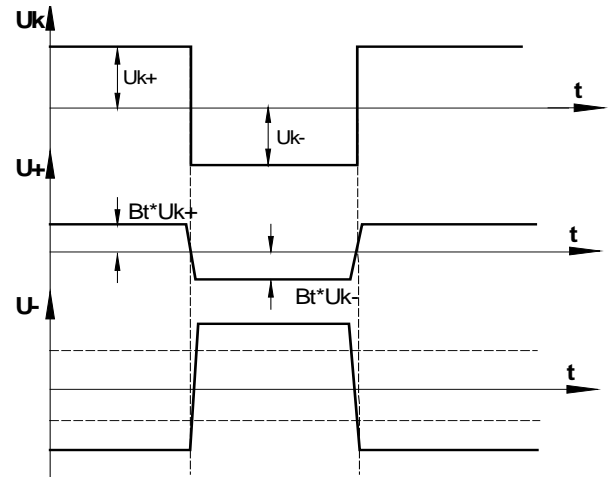


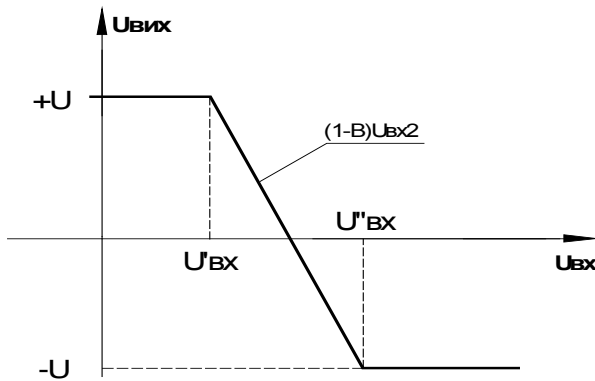
Рис. 3. Часова діаграма формування вихідного сигналу

Вихідна напруга компаратора:

$$U_{\text{вих}} = \frac{(1-\beta)K_0}{1-\beta K_0} U_{\text{вх2}} - \frac{K_0}{1-\beta K_0} \cdot U_{\text{вх1}}, \quad (7)$$

де  $K_0$  — коефіцієнт підсилення компаратора.

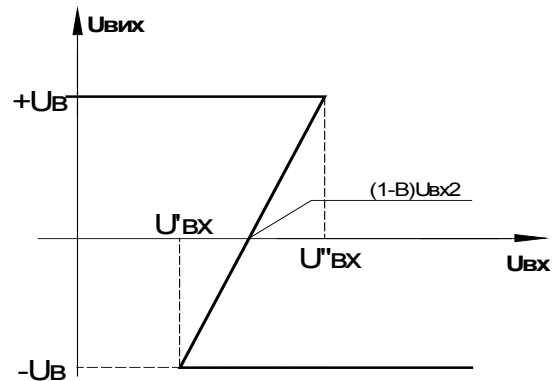
Розглянемо вихідний сигнал, коли  $\beta K_0 < 1$ :



$$U'_{\text{вх}} = (1-\beta)U_{\text{вх2}} - \frac{1-\beta K_0}{K_0} U_B, \quad (8)$$

$$U''_{\text{вх}} = (1-\beta)U_{\text{вх2}} + \frac{1-\beta K_0}{K_0} U_B. \quad (9)$$

В іншому випадку, коли  $\beta K_0 > 1$ :



$$\Delta U_{\text{стат}} = U'_{\text{вх}} - U''_{\text{вх}} = \frac{2(\beta K_0 - 1)}{K_0} U_B, \quad (10)$$

$$\Delta U_{\text{динам}} = \left| \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \right| \frac{2U_B}{S_k}, \quad (11)$$

де  $2U_B$  — зміна напруги на виході компаратора;  $S_k$  — швидкість зміни на виході компаратора, а  $dU_{\text{вх}}$  — швидкість зміни досліджуваного сигналу.

Експериментально було перевірено працездатність приладу. Для цього провели десять замірів довжини імпульсу та розрахували реальну швидкість польоту бойка. Результати експериментів подані у таблиці.

Як видно з експерименту, розрахункове значення швидкості польоту бойка менше ніж теоретичне, оскільки враховувалася відмінність величини прискорення вільного падіння (яка залежить від географічного розташування), опір повітря й тертя об стінки в напрямному жолобі, по якому пролітає боек.

Вихідні дані:  $h \Rightarrow 0,4 \text{ м}$ ;  $L = 0,015$  ;  $t_{\text{теор}} = 2,8 \text{ м}$ .

№ п/п	$\Delta\tau, \text{мс}$	$V_{\text{позр.}} \text{ м/с}$	$V_{\text{позр.ср.}} \text{ м/с}$
1	5,38	2,79	2,784
2	5,4	2,77	
3	5,39	2,78	
4	5,38	2,79	
5	5,36	2,8	
6	5,41	2,78	
7	5,38	2,79	
8	5,4	2,77	
9	5,38	2,79	
10	5,39	2,78	

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Иванов С. А. Силовое измерительное устройство для динамических испытаний материалов // Заводская лаборатория. — 1980. — 46. — № 7. — С. 665 — 667.
2. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. — М. : Иностранная литература. — 1955. — 192 с.