

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ОБОЛОЧЕК ДАТЧИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА

С. А. Новиков, В. И. Каширинов, А. С. Федоткин, В. А. Синицын,
С. И. Бодренко, О. И. Колтунов
(Москва)

Для измерения скорости и перемещения свободной поверхности в практике взрывных экспериментов нашли широкое применение бесконтактные методы: емкостной [1, 2], разнообразные оптические способы [3, 4] и др. Бесконтактные датчики не влияют на движение испытуемой поверхности, и это обстоятельство во многих случаях оказывается решающим при выборе измерительной методики.

Однако указанные выше методы обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение. Так, емкостной датчик скорости является высокоомным источником, весьма чувствительным к электромагнитным помехам, что исключает его применение, например в опытах с электровзрывом. Использование же оптических методов затруднено при исследовании движения закрытых поверхностей. Этим недостаткам лишен электромагнитный метод измерения скорости [5], и особенно его вариант с постоянным магнитом [6]. Высокая чувствительность, низкое внутреннее сопротивление электромагнитного датчика позволяют измерять даже сравнительно малые скорости перемещения токопроводящих поверхностей (≤ 10 м/с) в условиях сильных электромагнитных помех.

В настоящей работе дается описание электромагнитного датчика скорости с постоянным магнитом, приводятся результаты исследований, в которых определяется зависимость чувствительности датчика и полярности сигнала с датчика от скорости перемещения пластины, ее материала и толщины. В качестве примера приводятся результаты измерения колебательного движения стенок стальной колбы под действием внутреннего электровзрывного нагружения.

Принцип действия датчика и его калибровка

Принцип работы датчика можно пояснить с помощью рис. 1. Предположим, что магнит 1 находится в диэлектрической среде с проницаемостью $\mu = 1$, токопроводящая поверхность 2 есть граница раздела сред, имеющих проводимости $\sigma = 0$ и ∞ , а торец магнита выполнен так, что магнитное поле по оси x может быть аппроксимировано экспоненциальной функцией вида (рис. 1, 3)

$$H(x) = H_0 e^{-kx}, \quad (1)$$

где H_0 — напряженность магнитного поля в точке $x = 0$; k — численный множитель.

В этих предположениях легко показать условия, при которых разность потенциалов E на зажимах катушки 4 будет пропорциональна только скорости движения токопроводящей границы. Для этого выразим приращение координаты x при движении токопроводящей поверхности через скорость v границы раздела и время t :

$$dx = v dt. \quad (2)$$

Затем продифференцируем выражение (1) по x

$$\frac{dH(x)}{dx} = -kH_0 e^{-kx} \quad (3)$$

и, сделав замену переменных $dx \rightarrow dt$, получим изменение магнитного поля во времени в

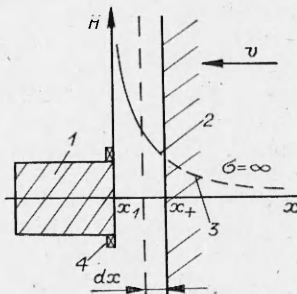


Рис. 1. Принцип действия электромагнитного датчика.



Рис. 2. Осциллограмма сигнала с датчика. Развертка $5 \cdot 10^{-4}$ с/дел, чувствительность осциллографа для а, б) 0,05 В/дел, для в) 1 В/дел, скорость образца $v = 3$ м/с.

плоскости границы раздела, имеющей фиксированную координату x^+ :

$$\left. \frac{dH(x)}{dt} \right|_{x=x^+} = -vkH_0 e^{-kx^+}, \quad (4)$$

Это временное изменение магнитного поля наводит в тонком слое токопроводящей среды вихревые токи, поле которых искажает исходное поле магнита I и индуцирует в измерительной катушке ЭДС, значение которой дается выражением

$$E = \eta ns \frac{dH}{dt} = -\eta nsvkH_0 e^{-kx^+}, \quad (5)$$

где n — число витков катушки; s — сечение катушки; η — коэффициент пропорциональности ($\eta < 1$).

Выражение (5) показывает, что измеренная E на зажимах катушки пропорциональна не только скорости перемещения токопроводящей границы, но и зависит от положения этой границы относительно магнита. Сигнал датчика будет пропорционален только скорости перемещения при условии, если граница раздела сред совершает малые колебания относительно точки x^+ .

В экспериментах определяли чувствительность датчика, в котором магнитный сердечник диаметром и высотой 10 мм изготовлен из сплава марки ЮНДК35Т5БА. Сплав намагничивали в магнитном поле электромагнита с $H = 4$ кЭ. Катушка имела 30 витков провода ПЭЛ-0,1, намотанного на магнитный сердечник.

Чувствительность исследовали в опытах с дисками из алюминия, меди и Ст. 3 с толщинами 1, 2, 3 и 5 мм и диаметром 20 мм. Диски свободно падали в направлении датчика, при этом максимальная скорость полета не превышала 5 м/с. Сигнал с датчика регистрировали осциллографом С1-37.

Опыты показали, что сигнал с датчика имеет отрицательную полярность при движении в направлении к датчику пластинок из материалов, для которых $\mu \sim 1$. Для ферромагнетиков полярность сигнала положительная. Это иллюстрируется серией осциллограмм, показанных на рис. 2. Максимальное значение амплитуды сигнала с датчика зависит от материала, толщины и скорости образца. Результаты опытов удобно представить в координатах $E/v \rightarrow x$. На рис. 3, а показана серия таких зависимостей, построенных для образцов из Al и Cu с различными толщинами. Из приведенных графиков видно, что величина E/v сильно зависит от расстояния до летящей пластины x . При $x > 3$ мм чувствитель-

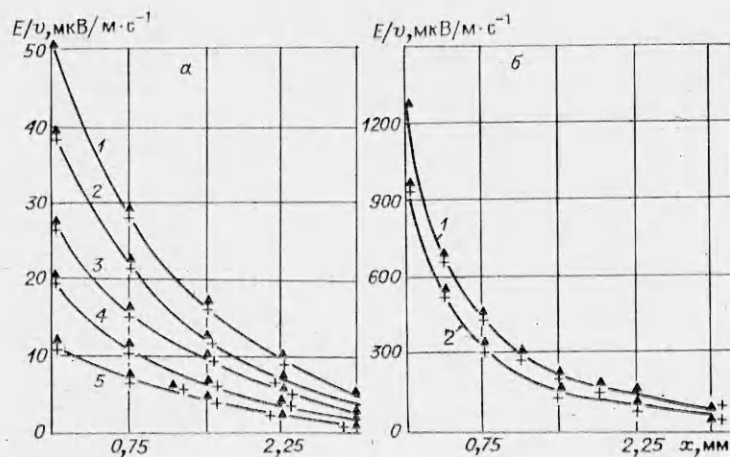


Рис. 3. Зависимость чувствительности датчика от расстояния.
 а) 1, 2 — Al, $d = 1$ и 2 мм соответственно, 3 — Al, $d = 3$ мм, Cu, $d = 1$ мм, 4, 5 — Cu, $d = 2$ и 3 мм; б) 1, 2 — Ст., $d = 3$ и 2 мм. ▲, + — точки получены при $v_1 = 3$ м/с и $v_2 = 4,4$ м/с соответственно.

ность датчика очень мала и быстро нарастает с уменьшением расстояния.

При измерении скорости пластин из ферромагнитных материалов чувствительность датчика в $\sqrt{\mu}$ раз возрастает. График зависимости чувствительности для Ст. 3 дан на рис. 3, б. Влияние на чувствительность проводимости и толщины летящей пластины связано с диффузией магнитного поля через образец. При рассмотрении кривых для одного и того же материала можно отметить тенденцию к насыщению чувствительности с увеличением толщины образца. Максимальное значение d , дальнейшее увеличение которой не будет сказываться на росте чувствительности, может быть в соответствии с [7] определено из соотношения

$$d_{кр} \geq \pi \sqrt{\kappa/v}, \quad (6)$$

где κ — коэффициент диффузии.

Насыщение чувствительности для образцов из стали в диапазоне скоростей 1—5 м/с соответствует $d \geq 3$ мм, что подтверждено и в опытах. Опыты показали также, что изменение скорости в пределах 1—5 м/с слабо сказывается на чувствительности.

Измерение колебаний металлических оболочек

Работу датчика в условиях действия сильных электромагнитных помех проверяли при измерении скорости движения стенок стальной колбы диаметром 150 и толщиной стенки 15 мм. Колбу нагружали электрическим взрывом медных проволочек, расположенных внутри. Источником взрыва служил емкостной генератор импульсного тока (ГИТ) с запасаемой энергией $E_0 \leq 12$ кДж и периодом разряда $T = 4 \cdot 10^{-6}$ с. Колбу перед взрывом заполняли дистиллированной водой. Узел взрыва состоял из взрывающихся медных проволочек диаметром 0,08 мм, расположенных на конце кабеля РК 50-11-13. Его помещали в центр колбы и фиксировали в таком положении стальной пробкой. Датчик крепили с наружной стороны колбы на специальной стойке. Зазор между стенкой колбы и плоскостью датчика величиной $1 \pm 0,4$ мм регулировали микрометрическим винтом. В этом положении чувствительность датчика составляла 300 мВ · с/м, уровень запасаемой энергии ГИТ 4,3—12 кДж. В соответствии с этим изменилось суммарное сечение взрывающихся проволочек. Оно подбиралось по числу и диаметру проволочек таким образом, чтобы взрыв происходил в максимуме тока [8].

Сигнал датчика регистрировали осциллографом ОК-33. Отсутствие электромагнитных наводок иллюстрируется осциллограммой (рис. 4). Осциллограмма соответствует опыту, в котором энергия ГИТ составила

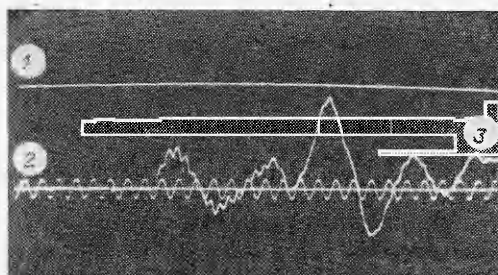


Рис. 4. Осциллограмма колебаний оболочки. Метки времени 10 мкс.

1 — сигнал калибровки; 2 — нуль-линия; 3 — сигнал датчика.

$E_0 = 7,68$ кДж. В таблице даны режимы нагружения колбы и основные результаты опытов. При проведении экспериментов энергия, подводимая к проволочкам, изменялась от опыта к опыту через ~ 2 кДж. В исследуемом интервале энергий удельный механический импульс, приобретенный оболочкой, составил $i_0 = (1,2 \div 6,6) \cdot 10^3$ г/(см·с), максимальные скорости движения стенки в направлении датчика v_{\max}^+ и v_{\max}^- при удалении от датчика пропорциональны E_0 , а максимальное отклонение стенки оболочки $\Delta x = 0,015 \div 0,096$. Коэффициент отбора энергии стенками оболочки лежит в пределах 1%, что близко к величине, полученной в [9]. Основная доля энергии диссипируется водой при образовании ударной волны и газового пузыря.

E , кДж	i_0 , г/(см·с)	v_{\max}^+ , м/с	v_{\max}^- , м/с	Δx , мм	E , кДж	i_0 , г/(см·с)	v_{\max}^+ , м/с	v_{\max}^- , м/с	Δx , мм
4,32	$1,2 \cdot 10^3$	1,0	1,75	0,015	9,72	$5 \cdot 10^3$	4,2	3,2	0,077
5,82	$1,8 \cdot 10^3$	1,5	2,0	0,018	12,00	$6,6 \cdot 10^3$	5,5	2,8	0,096
7,68	$3,2 \cdot 10^3$	2,7	2,0	0,044					

После снятия нагрузки колба совершает колебания с периодом ~ 50 мкс, что близко к ее основной частоте:

$$\omega = \left[\frac{2E^+}{(1-\nu)\rho R^2} \right]^{1/2}$$

где E^+ — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность материала; R — радиус колбы.

Поступила в редакцию 12/VII 1984,
после доработки — 11/III 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ПТЭ, 1963, 1, 135.
2. Райс. Приборы для научных исследований, 1961, 4, 77.
3. G. R. Foules. J. Appl. Phys., 1961, 32, 8.
4. С. А. Новиков, А. И. Рябикин, В. В. Пермяков и др. ПМТФ, 1978, 4, 60.
5. Ю. И. Жугни, К. К. Крушиков. ПМТФ, 1983, 1, 102.
6. J. N. Fritz, J. A. Morgan. Rev. Sci. Instrum., 1973, 2, 215.
7. Г. Киофель. Сверхсильные импульсные поля. М.: Мир, 1972.
8. В. И. Кашинцов. ФГВ, 1981, 18, 6, 144.
9. В. И. Цыпкин, А. М. Чеверикин, А. Г. Иванов и др. Проблемы прочности, 1982, 10, 56.