

EKSPERYMENTALNY SPOSÓB WYZNACZANIA WSPÓLCZYNNIKA RESTYTUCJI  
PRACUJĄCEJ MASZINY WIBROUDERZENIOWEJ

MICHAŁ TALL (GDAŃSK)

1. Wstęp

Współczynnik restytucji (regeneracji prędkości) przyjęto oznaczać literą  $R$ . Współczynnik ten jest stosunkiem prędkości ciał po uderzeniu  $v_2$  do prędkości tuż przed uderzeniem  $v_1$ . W rozpatrywanych zakresach prędkości i wymiarów zderzających się ciał współczynnik ten mało zależy od tych wielkości

$$(1.1) \quad R = \left| \frac{-v_2}{v_1} \right|.$$

Współczynnik restytucji  $R$  występuje we wszystkich rozwiązaniach różniczkowych równań ruchu przy rozpatrywaniu drgań układów (maszyn) wibrouderzeniowych [2, 5]. Dotychczas współczynnik ten był wyznaczany w literaturze tak krajowej jak i zagranicznej w sposób pośredni, tzn. mając rozwiązanie równania różniczkowego ruchu, w które wchodził współczynnik  $R$ , określano go z całki równania różniczkowego układu o jednym stopniu swobody jako stosunek prędkości przed i po uderzeniu. Stąd konfrontując przebiegi drogi otrzymane teoretycznie i eksperymentalnie wnioskowano o wartości tego współczynnika.

Stan ten był spowodowany stosowaniem czujników służących zazwyczaj do zapisu drogi jako funkcji czasu  $x = f_1(t)$ , czujników sejsmicznych lub mierzących przyspieszenia i siły występujące przy uderzeniu. W ostatnich latach stosuje się coraz częściej innego rodzaju czujniki oraz wykorzystuje się układy całkujące i różniczkujące do pomiarów maszyn wibracyjnych [3, 4]. W literaturze znane są sposoby wyznaczania tego współczynnika z bezpośrednich pomiarów jedynie dla modeli laboratoryjnych, np. dla kuli padającej na podstawę [7].

Zastosowanie czujnika indukcyjnego o nieco zmienionej konstrukcji [1] polepszyło dokładność pomiarów i pozwoliło wyznaczyć w sposób eksperymentalny współczynnik restytucji (regeneracji prędkości)  $R$  dla pracującej maszyny.

2. Eksperymentalny sposób wyznaczania współczynnika restytucji  $R$

Współczynnik restytucji  $R$  jest stosunkiem wartości dwóch prędkości. Wpływa stąd wniosek, że do jego pomiaru należy stosować czujnik, który daje możliwość rejestracji krzywej prędkości ruchu jako funkcji czasu lub drogi. W publikowanych materiałach na

temat badań maszyn wibruderzeniowych, autorzy podają przeważnie oscylogramy przemieszczeń, w funkcji czasu  $x = f_1(t)$  części uderzającej i uderzanej (np. wbijanego pala). Krzywe te wiele mówią o pracy maszyny, lecz dają zbyt małą dokładność do wyznaczenia współczynnika restytucji  $R$ .

Dla przypadku, gdy po uderzeniu część uderzająca jest przyciskana nadal przez pewien krótki czas po uderzeniu do części uderzanej, np. przez siłę pochodzenia elektromagnetycznego w maszynie elektrycznej o ruchu postępowo-zwrotnym [6], wtedy z krzywej  $x = f_1(t)$  niemożliwe jest wyznaczenie współczynnika  $R$ . Do tego celu nadaje się czujnik indukcyjny, w którym prędkość ruchu bijaka jest proporcjonalna do siły elektromotorycznej według wzoru Faradaya  $E = Bldx/dt$ . Budowę czujników tego typu omawia literatura dotycząca pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi [3, 4]. Czujniki te są jednak przeznaczone do pomiaru drgań o małej amplitudzie i dla nich dokładność pomiarów jest wystarczająca.

W maszynach wibruderzeniowych skok części uderzającej osiąga wartości od kilku milimetrów do kilku centymetrów, a czasem i więcej. Wtedy czujniki indukcyjne ze stałą szerokością szczeliny powietrznej, w której porusza się cewka pomiarowa, dają dla wahań cewki ok. 3,5 cm uchyb pomiarowy rzędu 20% na skutek nierównomierności rozkładu indukcji magnetycznej  $B$  w szczelinie dla krańcowych położenia cewki pomiarowej [1]. Okazuje się, że zjawisko to można wyeliminować profilując szerokość szczeliny powietrznej. Zapewnia to w pewnych granicach stałość indukcji magnetycznej  $B$  z wystarczającą dokładnością, a więc dokładność zamiany prędkości na wielkość elektryczną.

W przypadku drgań o dużych wahaniami rzędu 10 cm wykonanie indukcyjnego czujnika o dostatecznej dokładności następuje pewne trudności.

Jeżeli dysponujemy czujnikiem indukcyjnym, który zapewnia dokładne pomiary w granicach ok. 1 cm, to istnieje możliwość ustawienia go w taki sposób, że jego przedział dostatecznej dokładności obejmuje odcinek tej części krzywej, w środku którego będzie moment uderzenia. Do pomiarów współczynnika  $R$  pozostałe części krzywej nie są potrzebne.

**2.1. Opis układu pomiarowego.** Zapewnienie odpowiedniej dokładności czujnika nie wyczerpuje zagadnienia. Pozostałe części obwodu pomiarowego powinny być także odpowiednio dobrane. Odnosi się to do przewodów łączących, które muszą być ekranowane i uziemione, a także należy dobrać oscylograf oraz parametry obwodu całkującego, jeżeli zdejmuje się krzywą fazową.

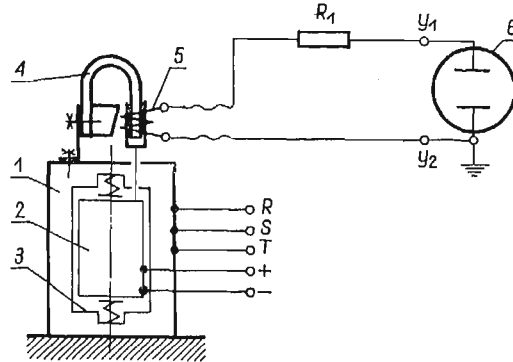
Przy badaniach maszyn wibruderzeniowych, w czasie gdy następuje uderzenie mamy raptowny spadek prędkości od  $v_1$  (prędkości tuż przed uderzeniem) do zera i następnie odbicie do  $-v_2$  (rys. 2 i rys. 4).

Część krzywej w momencie uderzenia można uważać jako przebieg funkcji o dużej częstotliwości. Częstotliwość ta zależy od czasu uderzenia. Badania czasu uderzenia opublikowane w literaturze [2] wykazały, że odcinek czasu dla dużych maszyn, w którym prędkość szybko się zmniejsza, wynosi około 0,002 sek.

Badania przeprowadzone przez autora dla posiadanej mniejszej maszyny wykazały, że czas ten był mniejszy niż podany wyżej o ok. 3—5 razy. Mierzone czasy są tego samego rzędu. Z badań tych można wnioskować, że częstotliwość części krzywej  $v = f_2(t)$ ,

na której otrzymuje się rejestrację uderzenia, ma wartość rzędu około tysiąca lub kilku tysięcy okresów na sekundę. Jest to częstotliwość, którą mogą zarejestrować normalnie używane oscylografy katodowe.

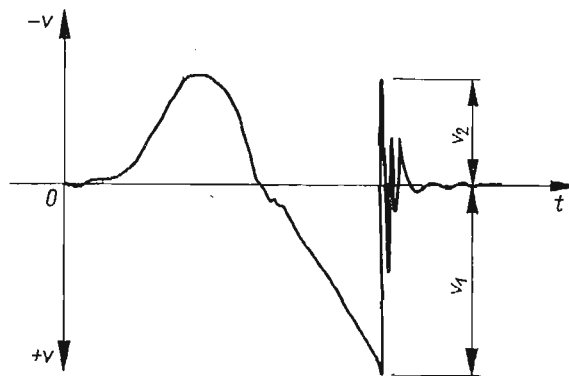
2.2. Wyznaczanie współczynnika restytucji  $R$  z krzywych zdjętych na oscyloskopie katodowym. W przypadku stosowania czujnika indukcyjnego podłączonego bezpośrednio do oscyloskopu katodowego (rys. 1) otrzymuje się na ekranie oscyloskopu przebieg krzywej



Rys. 1. Schemat połączeń elektrycznych układu pomiarowego i badanej synchronicznej maszyny wibracyjnej do zdjęcia krzywej prędkości części ruchomej maszyny w funkcji czasu  $v = f_2(t)$

1 — stojan maszyny wibracyjnej, w którym umieszczono cewki uzwojenia trójfazowego, 2 — bijak maszyny o ciężarze 7,65 kG, wykonany z całego kawałka stali, w żłobkach którego koncentrycznie nawinięte jest uzwojenie wzbudzające, 3 — stalowa podstawa, w którą uderza bijak wykonujący drgania wzdłuż pionowej osi maszyny, 4 — magnes stały czujnika indukcyjnego umocowany do stojana, 5 — ruchoma cewka pomiarowa czujnika, przymocowana do bijaka, 6 — ekran oscyloskopu

prędkości części ruchomej w funkcji czasu  $v = f_2(t)$  (rys. 2) badanej maszyny wibrouderzeniowej. Wyznaczanie skali krzywej prędkości ruchu  $v = f_2(t)$  w celu wyznaczenia współczynnika restytucji  $R$  nie jest potrzebne. Ułatwia to otrzymanie współczynnika  $R$

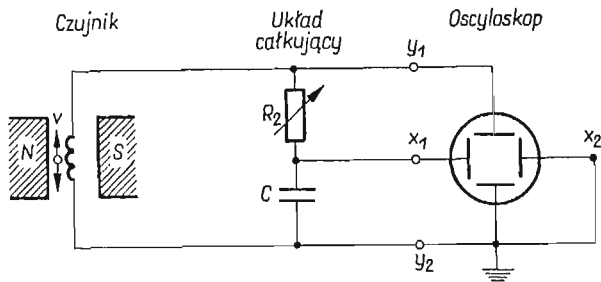


Rys. 2. Krzywa prędkości części ruchomej w funkcji czasu  $v = f_2(t)$  dla maszyny wibrouderzeniowej

jako stosunku prędkości rysunkowych  $v_2$  (w mm) do  $v_1$  (w mm). Na rys. 2 przedstawiono krzywą  $v = f_2(t)$ . W momencie tuż przed uderzeniem bijak poruszał się z prędkością  $v_1$  (z pomiaru  $v_1 = 38$  mm). W czasie uderzenia jego prędkość gwałtownie zmalała do zera i nastąpiło odbicie się bijaka do ujemnej prędkości  $-v_2$  ( $v_2 = 21$  mm). Dla krzywej, jak

na rys. 2, współczynnik  $R$  dla pierwszego uderzenia wynosi 0,55. Następne uderzenia w tym cyklu pracy są wynikiem konstrukcji maszyny. W maszynach wibrouderzeniowych napędzanych silnikami o ruchu obrotowym powtórne uderzenie w tym samym cyklu nieczęsto się zdarza.

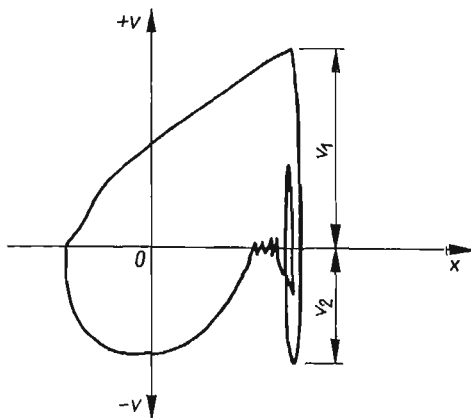
Analiza pracy maszyny wibrouderzeniowej może być dokonywana za pomocą krzywych fazowych  $F(x, v) = 0$  (rys. 4). Krzywe te otrzymuje się w przypadku, gdy w sche-



Rys. 3. Schemat połączeń elektrycznych układu pomiarowego do zdjęcia krzywej fazowej  $F(x, v) = 0$  przy badaniach maszyn wibracyjnych

macie, jak na rys. 1, włącza się dodatkowo układ całkujący, tak jak to pokazano na rys. 3. Krzywa fazowa pokazana na rys. 4 jest zdjęta dla tej samej maszyny co i krzywa przedstawiona na rys. 2. Współczynnik  $R$  otrzymany z krzywej fazowej na rys. 4 wynosi 0,57.

Uchyby pomiarowe obu układów do pomiaru współczynnika restytucji  $R$  są podobne, gdyż w danym przypadku chodzi o dokładne wyznaczenie wychylenia wzdłuż osi pręd-



Rys. 4. Krzywa fazowa  $F(x, v) = 0$  maszyny wibrouderzeniowej

kości  $v$ . Po usunięciu opornika  $R_1$  na rys. 1 możemy zauważyć, że płytki odchylające oscyloskopu na rys. 1 i rys. 3 są podłączone jednakowo. Uchyb czujnika wynosi 1%, dla uziemionych przewodów łączących przy napięciu otrzymywanym z czujnika ok. 1 V uchyb będzie wynosił także ok. 1%.

Należy nadmienić, że przy nieodpowiednio dobranych wartościach  $R_2$  i  $C$  układu całkującego można otrzymać błędne rezultaty pomiaru. Aby tego uniknąć należy pamiętać, że stała czasowa układu całkującego  $T_1 = R_2 C$  powinna być dużo większa niż jeden okres drgań  $T_2$  badanej maszyny wibracyjnej.

### 3. Przykład

Bijak maszyny wibracyjnej drga z częstotliwością 50 Hz. Należy obliczyć najmniejszą wartość oporności  $R_2$ , która zapewni dokładność układu całkującego.

Na układ całkujący podaje się napięcie  $u_1(t)$  z czujnika, natomiast z układu całkującego na płytki poziome oscylografu (punkt  $x_1$  oraz  $x_2$ ) podaje się scałkowaną funkcję w postaci napięcia  $u_2(t)$ . Równanie dla tego układu będzie następujące:

$$(3.1) \quad u_1(t) = R_2 C \frac{du_2(t)}{dt} + u_0.$$

Jeżeli kondensator nie był uprzednio naładowany to  $u_0 = 0$  i wtedy

$$(3.2) \quad u_2(\tau) = \frac{1}{R_2 C} \int_0^{\tau} u_1(t) dt.$$

Dla zachowania warunków całkowania konieczne jest, aby stała czasowa układu całkującego  $T_1$  była większa od okresu drgań bijaka  $T_2$ :

$$(3.3) \quad T_2 \ll T_1.$$

Założmy, że mamy kondensator o pojemności  $C = 4 \mu F$ . Ponieważ  $T_2 = 1/50 = 0,02$  s = 20 ms, to  $R_2 C \gg 20 \cdot 10^{-3}$  s. Zatem dla zapewnienia odpowiedniej dokładności całkowania oporność  $R_2$  powinna wynosić co najmniej:

$$(3.4) \quad R_2 > \frac{20 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-6}} = 5000 \Omega = 5 \text{ k}\Omega.$$

### 4. Wnioski

Współczynnik restytucji  $R$  można określić w sposób pomiarowy. Proponowany układ pomiarowy do określenia współczynnika  $R$  jest stosunkowo prosty i przy właściwym doborze elementów układu pomiarowego daje wystarczająco dobre wyniki, co sprawdzono na modelu maszyny wibrouderzeniowej, znajdującej się w Laboratorium Zakładu Podstaw Napędu Elektrycznego Politechniki Gdańskiej.

#### Literatura cytowana w tekście

1. M. TALL, *Czujnik indukcyjny ze stałą indukcją w szczelinie do badania maszyn o ruchu postępowo-zwrotnym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka, 82, 14, (1966).
2. ВНИИСТРОЙДОРАМАШ, *Исследования вибромеханизмов и машин ударного действия*, Москва 1959.
3. R. ZIMMERMAN, *Pomiary naprężeń i drgań metodami elektrycznymi*, PWT, Warszawa 1959.
4. А. М. Туричин, *Электрические измерения неэлектрических величин*, Госэнергоиздат, 1959.

5. B. KOWALCZYK, *Stabilność układu wibrouderzeniowego o wymuszeniu kinematycznym*, Mech. teor. i stos., 2, 4 (1966).
6. M. TALL, *Maszyna synchroniczna trójfazowa z podmagnesowywaniem o ruchu postępowo-zwrotnym. Teoria i badania*, praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1966.
7. Н. С. Кожевников, Я. М. Рлскин, *Труды второго ассесотозного совещания по основным проблемам теории машин и механизмов. Динамика машин*. Исследования виброударного механизма, Москва 1960.

#### Резюме

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДЛЯ РАБОТАЮЩЕГО ВИБРОМОЛОТА

В статье приводится способ экспериментального определения коэффициента восстановления скорости для вибромолотов работающих при обычных условиях.

#### Summary

#### EXPERIMENTAL METHOD OF ESTIMATION OF THE COEFFICIENT OF RESTITUTION FOR A VIBRATORY-IMPACT MECHANISMS

The paper deals with the experimental method of estimation of the coefficient of restitution for vibratory-impact mechanisms in usual conditions of work.

POLITECHNIKA GDAŃSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 31 lipca 1967 r.*

---