

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

ACTA AGROPHYSICA

76

Artur Boguta

**REAKCJA DYNAMICZNA NASION
NA OBCIĄŻENIE UDAROWE**
Teoretyczne i aplikacyjne podstawy

Monografia

Lublin 2002

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. rzecz. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk

prof. dr hab. J. Laskowski

prof. dr hab. I. Dechnik

prof. dr hab. P.P. Lewicki

prof. dr hab. D. Drozd

prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. F. Dubert

prof. dr hab. E. Niedźwiecki

prof. dr hab. J. Fornal

prof. dr hab. J. Siewiesiuk

prof. dr hab. E. Kamiński

prof. dr hab. W. Stępniewski

prof. dr hab. A. Kędziora

prof. dr hab. Z. Ślipek

prof. dr hab. T. Kęsik

prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. Cz. Koźmiński

Redaktor tomu

dr inż. Artur Boguta

Opiniowali do druku

prof. dr hab. inż. Wiktor Pietrzyk

prof. dr hab. Bogusław Szot

Adres redakcji

Institut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201

20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl

<http://www.ipan.lublin.pl>

Publikacja indeksowana przez

Polish Scientific Journals Contents - Life Sci. w sieci Internet

pod adresem <http://www.psjc.icm.edu.pl>

Publikacja dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2002

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz. Ark. wyd. 6,7

Skład komputerowy: dr inż. Artur Boguta

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

Spis treści

1. WPROWADZENIE	5
2. FIZYCZNE PODSTAWY TEORII UDERZENIA.....	7
2.1. Klasyfikacja uderzeń.....	7
2.1.1. Uderzenie proste i środkowe	7
2.1.2. Uderzenie ukośne	12
2.1.3. Uderzenie mimośrodowe.....	14
3. ZJAWISKO UDERZENIA W MATERIALE ROŚLINNYM.....	19
4. UKŁAD POMIAROWY	24
4.1. Przetwornik pomiarowy.....	24
4.2. Konstrukcja przetwornika pomiarowego.....	27
4.3. Stanowisko pomiarowe.....	29
5. POMIARY PARAMETRÓW PRZETWORNIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO	33
5.1. Charakterystyka przetwarzania siły uderzeniowej na napięcie wyjściowe zastosowanego przetwornika piezoelektrycznego.....	33
5.2. Badanie zachowania się przetwornika piezoelektrycznego w dziedzinie częstotliwości i czasu	35
5.3. Porównanie pasma częstotliwości pracy przetwornika piezoelektrycznego z wymaganym zakresem częstotliwości	42
6. BADANIA SYMULACYJNE	46
6.1. Model przetwornika pomiarowego	46
6.2. Pomiary parametrów schematu zastępczego przetwornika piezoelektrycznego	50
6.3. Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych i czasowych modelu przetwornika pomiarowego	54
6.4. Wyznaczanie reakcji modelu przetwornika na impuls sinusoidalny	58

7. BADANIE UKŁADU RZECZYWISTEGO	61
8. WYKORZYSTANIE UKŁADU POMIAROWEGO Z PRZETWORNIKIEM PIEZOELEKTRYCZNYM W BADANIACH UDAROWYCH	64
8.1. Badania udarowe wybranych nasion	64
8.2. Badanie wpływu miejsca uderzenia ziarniaka pszenicy na wartość współczynnika restytucji i na wielkość siły uderzeniowej	72
8.3. Badania wpływu wilgotności nasion na wartość współczynnika restytucji.....	79
9. PERSPEKTYWY WYKORZYSTANIA PRZETWORNIKÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH W BADANIACH PROWADZONYCH DLA PRZEMYSŁU ROLNO-SPOŻYWCZEGO	82
10. STRESZCZENIE.....	83
11. SUMMARY.....	84
12. LITERATURA	85

1. WPROWADZENIE

Jednym z ważnych problemów w procesach technologicznych zbioru i obróbki pozbiorowej nasion są ich mechaniczne uszkodzenia. W procesach tych mamy do czynienia z siłami uderowymi, które działając na nasiona w ciągu krótkiego przedziału czasu osiągają duże wartości, w porównaniu z siłami działającymi w sposób ciągły.

Proces zderzenia charakteryzuje się występowaniem sił oddziaływania pomiędzy zderzającymi się obiektami, które stają się źródłem intensywnej fali naprężeń. Fala ta rozprzestrzenia się w całej objętości zderzających się ciał, a następnie ulega wielokrotnym odbiciom od powierzchni granicznych, aż do całkowitego jej wytłumienia.

Można wyodrębnić efekty lokalne (odkształcenia lokalne), które powstają w obszarze bliskim miejsca uderzenia, oraz efekty globalne (odkształcenia globalne) powstające w pozostałych obszarach obiektu. Różnią się one od siebie dość znacznie, gdyż naprężenia powierzchniowe i wewnętrzne powstające w czasie zderzenia są o wiele większe w miejscach uderzenia niż poza nimi.

W kontakcie nasiona z przeszkodą, zależnie od energii uderzenia, powstają odkształcenia sprężyste lub trwałe. Rodzaj odkształcenia zależy od właściwości reologicznych nasion lub utraty ich spójności. Może zatem wystąpić przypadek, że w strefie zderzenia wystąpiły już odkształcenia trwałe, natomiast pozostała strefa uległa odkształceniom sprężystym. Wynika to z szybkości narastania siły uderzenia, która jest największa w punkcie zderzenia.

Budowa i analiza modeli obliczeniowych procesu uderzenia musi opierać się na znajomości właściwości fizycznych zderzających się ciał. W przypadku nasion roślin modelowanie jest trudne, ponieważ mają one strukturę niejednorodną. Dodatkową trudnością w analizie zjawiska jest występowanie nieskończonej liczby stopni swobody obiektu poddawanego obciążeniom dynamicznym. Prowadzi to do przyjęcia licznych uproszczeń przyjętego modelu, a tym samym do powstania znacznych błędów w odwzorowaniu przebiegu zjawiska zderzenia. Ponadto w celu wykonania obliczeń wytrzymałościowych przy obciążeniu uderowym, konieczne jest określenie powstających naprężeń i odkształceń oraz

ich wpływu na materiał. Można je znaleźć tylko w efekcie badań laboratoryjnych przy zastosowaniu odpowiednich przetworników.

Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest wykorzystanie przetworników piezoelektrycznych do pomiaru i rejestracji przebiegu siły, określenie jej maksymalnej wartości, określenie wartości współczynnika restytucji, oraz wyznaczenie i zminimalizowanie błędów wybranej metody pomiarowej. Przeprowadzone analizy mają cel poznawczy i zmierzają do opracowania metodyki badań odporności nasion na uderzenie. Mogą one znaleźć zastosowanie praktyczne w produkcji roślinnej przy hodowli materiału nasiennego.

2. FIZYCZNE PODSTAWY TEORII UDERZENIA

2.1. Klasyfikacja uderzeń

Opracowanie właściwej metody pomiarowej uderzeń i jej weryfikacja praktyczna jest skomplikowana. W celu dokonania odpowiednich obliczeń uderzeniowych konieczne jest określenie, z jakim rodzajem uderzenia mamy do czynienia, a następnie określenie naprężeń i odkształceń podczas jego występowania.

Uderzenia dzielimy na: proste i środkowe, ukośne, oraz mimośrodowe.

Wszystkie rodzaje uderzeń mogą być sprężyste, sprężysto-plastyczne i plastyczne. W uderzeniach sprężystych mamy do czynienia tylko ze zmianą wektora prędkości, nie występują tutaj żadne straty energii kinetycznej, która zamieniłaby się w ciepło. Ten przypadek nie występuje w rzeczywistości, ale ułatwia analizę zjawiska. Najczęściej występującym uderzeniem jest uderzenie sprężysto-plastyczne. W tym przypadku odkształcenia plastyczne powodują stratę energii i zmniejszenie prędkości po odbiciu. Kolejnym skrajnym przypadkiem jest uderzenie plastyczne, w którym podczas uderzenia następuje sklejenie zderzających się ciał.

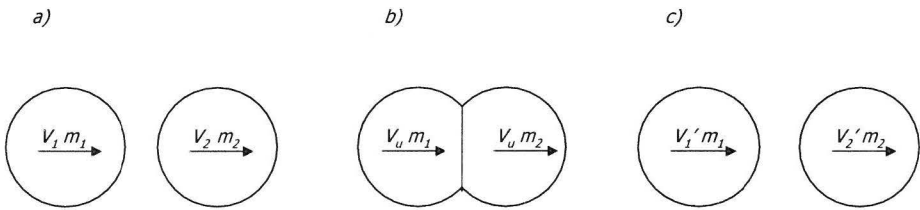
2.1.1. Uderzenie proste i środkowe

Uderzenie proste i środkowe można zilustrować na przykładzie dwóch jednorodnych kul poruszających się ruchem postępowym przy założeniu, że w chwili zderzenia prędkości ich środków mas są skierowane wzdłuż jednej prostej. Przypadek ten przedstawiono na Rys.1 Uderzenie dwóch ciał materialnych nazywamy prostym, gdy prędkości punktów, w których stykają się ciała, są skierowane wzdłuż wspólnej osi normalnej, przechodzącej przez środek masy każdego z obu ciał. Jeżeli normalna uderzenia przechodzi przez środki mas uderzających o siebie ciał, to uderzenie nosi nazwę uderzenia środkowego.

Prędkości kul przed uderzeniem wynoszą V_1 , V_2 , przy czym $V_1 > V_2$, a ich masy odpowiednio m_1 , i m_2 . Obie kule poruszają się wzdłuż jednej prostej, która przechodzi przez ich środek masy. W pewnym momencie nastąpi zetknięcie się

ich na czas, który zależy od ich właściwości mechanicznych, prędkości i masy. Doświadczenia pokazują, że czas kontaktu jest bardzo krótki.

W czasie, gdy kule stykają się ze sobą, występują duże wartości sił wzajemnego oddziaływania, które są siłami chwilowymi. Po odbiciu się kul poruszają się one z prędkościami V'_1 , V'_2 , które różnią się od prędkości przed uderzeniem.



Rys.1. Zderzenie proste i środkowe kul: a) przed zderzeniem, b) w trakcie zderzenia, c) odbicie kul po zderzeniu.

Fig.1. Spheres in straight and central impacts: a) before the impact, b) during the impact, c) reflection after the impact.

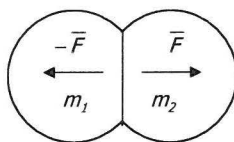
Dla układu złożonego z dwóch kul pęd nie ulega zmianie, więc musi być spełnione następujące równanie:

$$m_1 \cdot V_1 + m_2 \cdot V_2 = m_1 \cdot V'_1 + m_2 \cdot V'_2 \quad (1)$$

W przedstawionym równaniu występują dwie niewiadome V'_1 , V'_2 . W celu rozwiązania równania (1) nie można posługiwać się modelem ciała sztywnego i konieczne jest uwzględnienie odkształceń, których doznają ciała podczas uderzenia. Zjawisko uderzenia można podzielić na dwa okresy. Pierwszy rozpoczyna się w chwili kontaktu, a kończy w chwili gdy występuje maksymalne odkształcenie ciał. W tym okresie siły wzajemnego oddziaływania wzrastają od zera do wartości maksymalnej. Po tym czasie następuje drugi okres, w którym lokalne odkształcenia i siły oddziaływania maleją do zera, a obie kule poruszają się z wypadkową prędkością V_u . Po zakończeniu drugiego okresu kule rozdzielają się i poruszają z prędkościami V'_1 , V'_2 .

Na Rys.2 zaznaczono siłę F oddziaływania jednej kuli na drugą. Siła ta nie jest stała, a jej czas działania wynosi τ . W pierwszej chwili uderzenia obie kule odkształcają się, aż do uzyskania największego odkształcenia i największej siły.

W kolejnej chwili rozpoczyna się odbicie, w czasie którego obie kule poruszają się w tym samym kierunku i z tą samą prędkością V_u .



Rys.2. Zderzenie kul w chwili ich kontaktu.

Fig. 2. Spheres at the moment of contact at impacts.

Na podstawie warunku, że przyrost pędu każdej z kul równy jest impulsowi siły, można go zapisać w postaci równań:

$$m_1 \cdot V_u - m_1 \cdot V_1 = -\int_0^{t'} F dt = -S', \quad m_2 \cdot V_u - m_2 \cdot V_2 = \int_0^{t'} F dt = S' \quad (2)$$

gdzie: t - czas kontaktu kul, s;
 t' - czas kontaktu do wystąpienia maksymalnej siły, s;
 V_u - prędkość gdy obie kule pozostają w kontakcie, m/s;
 S' - impuls siły w pierwszej chwili uderzenia, Ns;
 F - siła oddziaływania kul, N.

Z tych równań można wyznaczyć prędkość wspólną kul:

$$V_u = \frac{m_1 \cdot V_1 + m_2 \cdot V_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

W drugim okresie uderzenia kule działają na siebie impulsem siły S'' , który można przedstawić w postaci równań analogicznych jak poprzednio:

$$m_1 \cdot V'_1 - m_1 \cdot V_u = -\int_{t'}^{\tau} F dt = -S'', \quad m_2 \cdot V'_2 - m_2 \cdot V_u = \int_{t'}^{\tau} F dt = S'' \quad (4)$$

Żeby rozwiązać równania (2) i (4) należy ułożyć jeszcze jedno równanie. Zgodnie z hipotezą Poissona impuls siły S'' odpowiadający drugiemu okresowi uderzenia zależy od impulsu siły S' odpowiadającemu pierwszemu okresowi uderzenia [16, 30]:

$$S'' = k \cdot S', \quad (5)$$

gdzie: k -współczynnik restytucji.

Współczynnik restytucji wyznaczany jest na podstawie doświadczeń. Jego wartość zależy od materiału, z którego są wykonane zderzające się ciała. W przypadku, gdy przy uderzeniu występują tylko odkształcenia idealnie sprężyste, przebieg sił w czasie dla drugiego okresu jest lustrzanym odbiciem pierwszego okresu uderzenia. Wynika z tego, że impulsy siły S' i S'' są jednakowe, a zatem współczynnik restytucji $k=1$. Uderzenie, dla którego $k=1$ nazywamy idealnie sprężystym. Drugi skrajny przypadek występuje wtedy, gdy zderzające się ciała łączą się ze sobą i dalej poruszają się z prędkością określoną równaniem (3). W tym przypadku impuls siły $S''=0$ co oznacza, że $k=0$. Ten drugi skrajny przypadek to uderzenie idealnie plastyczne. Wynika z tego, że współczynnik restytucji przyjmuje wartości pomiędzy zerem a jedynką:

$$0 \leq k \leq 1. \quad (6)$$

Po podstawieniu równania (5) do równań (4) i uwzględnieniu równań (2) otrzymamy:

$$\begin{aligned} m_1(V_u - V_1) &= -S', & m_1(V'_1 - V_u) &= -k \cdot S', \\ m_2(V_u - V_2) &= S', & m_2(V'_2 - V_u) &= k \cdot S'. \end{aligned} \quad (7)$$

Z równań (3) i (7) otrzymamy:

$$\begin{aligned} V'_1 &= \frac{(m_1 - k \cdot m_2)V_1 + (1+k)m_2 \cdot V_2}{m_1 + m_2}, \\ V'_2 &= \frac{(m_2 - k \cdot m_1)V_2 + (1+k)m_1 \cdot V_1}{m_1 + m_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

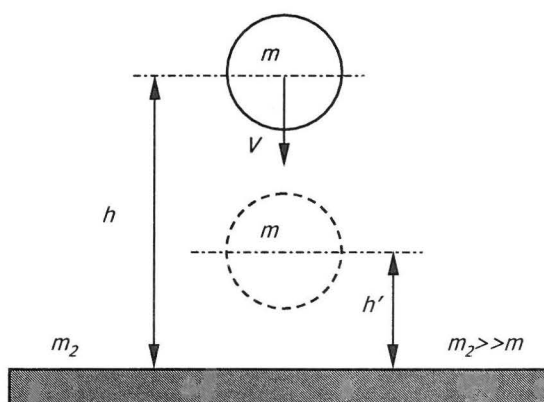
Jeżeli uderzenie jest idealnie sprężyste $k=1$ to równania (8) przyjmą postać:

$$\begin{aligned} V'_1 &= \frac{(m_1 - m_2)V_1 + 2m_2 \cdot V_2}{m_1 + m_2}, \\ V'_2 &= \frac{(m_2 - m_1)V_2 + 2m_1 \cdot V_1}{m_1 + m_2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Gdy w uderzeniu prostym i środkowym ciało o masie m_1 porusza się z prędkością V i uderza w ścianę o masie $m_2 = \infty$, wówczas z równań (8) otrzymamy:

$$V' = -k \cdot V. \quad (10)$$

Znak minus we wzorze oznacza zmianę kierunku prędkości ciała. Równanie (10) może być podstawą doświadczalnego wyznaczania współczynnika restytucji. Możemy go wyznaczyć zrzucając badane ciało z określonej wysokości na poziomą i twardą powierzchnię Rys.3.



Rys.3. Ilustracja sposobu wyznaczania współczynnika restytucji [30].

Fig.3. Presentation for the determination of the restitution coefficient [30].

Przy założeniu że opory powietrza są pomijalne, prędkość ciała w chwili uderzenia jest równa:

$$V = \sqrt{2gh}, \quad (11)$$

gdzie: g - przyspieszenie ziemskie,

h - wysokość spadania.

Po uwzględnieniu wzoru (10) otrzymamy zależność na moduł współczynnika restytucji [30]:

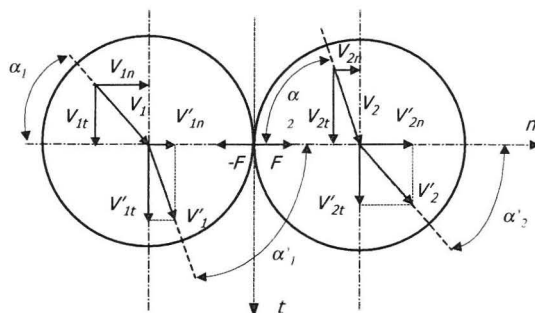
$$k = \sqrt{\frac{h'}{h}}, \quad (12)$$

gdzie: h' -maksymalna wysokość na jaką ciało odbije się od płaszczyzny.

Przedstawione powyżej wyniki dotyczą tylko uderzenia prostego i środkowego, które w praktyce występuje rzadko.

2.1.2. Uderzenie ukośne

Uderzenie ukośne występuje wtedy, gdy w chwili poprzedzającej uderzenie prędkości zderzających się ciał są skierowane dowolnie w stosunku do normalnej uderzenia (Rys.4).



Rys.4. Przykładowe uderzenie ukośne i środkowe dwóch kul [30].

Fig.4. Exemplary slope and central impacts of two spheres [30].

Na Rys.4 przedstawiono uderzenie dwóch kul. Przez V_1 , V_2 oznaczono prędkości przed uderzeniem, a przez V'_1 , V'_2 prędkości kul po uderzeniu. Prędkości V_1 , V_2 tworzą z normalną uderzenia kąty α_1 i α_2 , a prędkości po odbiciu V'_1 , V'_2 kąty α'_1 i α'_2 . Aby ułatwić rozwiązanie zagadnienia należy założyć, że całe zdarzenie rozgrywa się w jednej płaszczyźnie. Podczas zderzenia kule działają na siebie siłami \overline{F} , $-\overline{F}$. Siły te są skierowane wzdłuż normalnej uderzenia n . W kierunku prostopadłym do tej linii nie działają żadne siły chwilowe. Pęd obu kul wzdłuż osi t , prostopadłej do normalnej uderzenia nie ulega zmianie, więc muszą być spełnione równania [30]:

$$m_1 \cdot V'_1 \cdot \sin \alpha'_1 = m_1 \cdot V_1 \cdot \sin \alpha_1, \quad m_2 V'_2 \sin \alpha'_2 = m_2 \cdot V_2 \cdot \sin \alpha_2. \quad (13)$$

Po uwzględnieniu składowych prędkości wzdłuż osi t i uproszczeniu równań otrzymamy:

$$V'_{1t} = V'_1 \cdot \sin \alpha'_1 = V_1 \cdot \sin \alpha_1, \quad V'_{2t} = V'_2 \cdot \sin \alpha'_2 = V_2 \cdot \sin \alpha_2. \quad (14)$$

Jeżeli chodzi o składowe wzdłuż normalnej uderzenia n , spełniają one analogiczne związki przed i po uderzeniu tak jak we wzorach (9):

$$\begin{aligned} V'_{1n} &= V'_1 \cdot \cos \alpha'_1 = \frac{1}{m_1 + m_2} [(m_1 - km_2)V_1 \cos \alpha_1 + (1+k)m_2V_2 \cos \alpha_2] = \\ &= \frac{1}{m_1 + m_2} [(m_1 - km_2)V_{1n} + (1+k)m_2V_{2n}], \\ V'_{2n} &= V'_2 \cdot \cos \alpha'_2 = \frac{1}{m_1 + m_2} [(m_2 - km_1)V_2 \cos \alpha_2 + (1+k)m_1V_1 \cos \alpha_1] = \\ &= \frac{1}{m_1 + m_2} [(m_2 - km_1)V_{2n} + (1+k)m_1V_{1n}]. \end{aligned} \quad (15)$$

Jeżeli przy znanych wektorach prędkości V_1, V_2 , z wzorów (14) i (15) wyznaczy się składowe prędkości po uderzeniu, to można wyznaczyć kąty α'_1, α'_2 , a także wyznaczyć związek składowych prędkości wzdłuż osi n ze współczynnikiem restytucji k [30]:

$$\frac{V'_{1n} - V'_{2n}}{V_{1n} - V_{2n}} = -k. \quad (16)$$

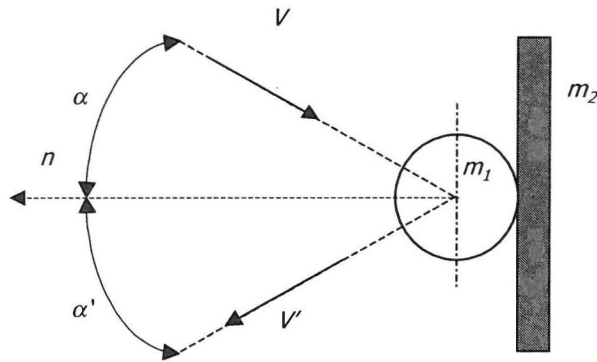
W przedstawionym równaniu znak „-” we wzorze oznacza, że składowe prędkości ciał po uderzeniu mają przeciwny znak. Stosunek różnicy prędkości po i przed uderzeniem nie zależy od masy a jedynie od materiału, z którego są wykonane.

Częściej występującym w praktyce przypadkiem jest uderzenie gładkiej i jednorodnej kuli w nieruchomą przeszkodę pod kątem α . Masa przeszkody m_2 jest dużo większa od uderzającej w nią kuli (Rys.5).

Aby rozpatrzyć ten przypadek należy do wzorów (14) i (15) wstawić $V_1=V, V_2=0, \alpha_1=\alpha$ i $m_2=\infty$, otrzymano:

$$V'_t = V' \sin \alpha' = V \sin \alpha, \quad V'_n = V' \cos \alpha' = -k \cdot V \cos \alpha. \quad (17)$$

Znak „-” we wzorze na składową normalną oznacza, że po odbiciu zmienia ona swój kierunek.



Rys.5. Uderzenie ukośne kuli w gładką i masywną przeszkodę [30].

Fig. 5. Spheres in slope collisions with a fine and massive obstacle [30].

Na podstawie równań (17) można wyznaczyć wartość całkowitą prędkości po odbiciu:

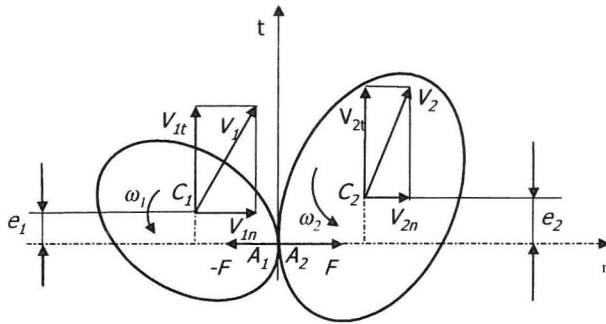
$$V' = \sqrt{V'^2_t + V'^2_n} = V \sqrt{k^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}, \quad \text{tg } \alpha' = -\frac{1}{k} \text{tg } \alpha. \quad (18)$$

Gdy współczynnik restytucji k jest równy jedności, to wartość prędkości pozostaje stała, a zmienia się jej kierunek tak, że kąt padania i odbicia są sobie równe [30].

2.1.3. Uderzenie mimośrodowe

Uderzenie mimośrodowe występuje wtedy, gdy normalna uderzenia nie przechodzi przez środek masy ciała. Na Rys.6 przedstawiono przypadek mimośrodowego uderzenia dwóch ciał przy założeniu, że ruch odbywa się w jednej płaszczyźnie, a ciała są idealnie gładkie. Przyjęto, że m_1 oznacza masę pierwszego ciała, V_1 - prędkość środka masy C_1 , ω_1 - prędkość kątową tego ciała przed uderzeniem, a V'_1 i ω'_1 - prędkości odpowiednio po uderzeniu. Punkt styku oznaczono literą A_1 . Podobnie oznaczono wielkości dla drugiego ciała przez m_2 , V_2 , ω_2 , V'_2 , ω'_2 , A_2 . Dla takiego układu można przyjąć, że impulsy siły uderzenia działające na ciała wynoszą:

$$\begin{aligned}
 m_1 \cdot (V'_{1n} - V_{1n}) &= -S, & m_2 \cdot (V'_{2n} - V_{2n}) &= S, \\
 V'_{1t} &= V_{1t}, & V'_{2t} &= V_{2t}.
 \end{aligned}
 \tag{19}$$



Rys.6. Zderzenie mimośrodkowe dwóch ciał [30].

Fig.6. Two objects in eccentric impacts [30].

Na podstawie warunku, że kręt względem środka masy ciała jest równy momentowi impulsu siły chwilowej na nie działającej otrzymujemy:

$$m_1 \cdot J_1 (\omega'_1 - \omega_1) = -S \cdot e_1, \quad m_2 \cdot J_2 (\omega'_2 - \omega_2) = -S \cdot e_2, \tag{20}$$

gdzie: J_1 i J_2 – momenty bezwładności ciał względem środka masy,
 e_1 i e_2 – odległości środków masy od osi normalnej.

Oznaczając przez V_{A1n} i V'_{A1n} składowe prędkości wzdłuż normalnej przed i po uderzeniu dla pierwszego ciała oraz analogicznie V_{A2n} i V'_{A2n} dla drugiego, otrzymamy wyrażenie podobne do (16):

$$\frac{V'_{A1n} - V'_{A2n}}{V_{A1n} - V_{A2n}} = k, \tag{21}$$

gdzie: k - współczynnik restytucji.

Prędkość punktu A_1 jest równa sumie geometrycznej prędkości środka masy oraz prędkości w ruchu obrotowym względem niego:

$$V_{A1} = V_1 + \dot{\omega}_1 |C_1 \cdot A_1|, \quad V'_{A1} = V'_1 + \dot{\omega}_1 |C_1 \cdot A_1| \quad (22)$$

Przy założeniu, że $V'_{1l} = V_{1l}$, $V'_{2l} = V_{2l}$, $|C_l A_l| = e_l$ otrzymamy:

$$V_{A1n} = V_1 + \dot{\omega}_1 e_1, \quad V'_{A1n} = V'_{1n} + \dot{\omega}_1 e_1 \quad (23)$$

Analogicznie dla drugiego ciała:

$$V_{A2n} = V_2 + \dot{\omega}_2 e_2, \quad V'_{A2n} = V'_{2n} + \dot{\omega}_2 e_2 \quad (24)$$

Po podstawieniu do równania (21) równań (23) i (24) otrzymano:

$$\frac{(V'_{1n} + \dot{\omega}_1 \cdot e_1) - (V'_{2n} + \dot{\omega}_2 \cdot e_2)}{(V_{1n} + \dot{\omega}_1 \cdot e_1) - (V_{2n} + \dot{\omega}_2 \cdot e_2)} = k \quad (25)$$

Korzystając z równań (19), (20) i (25) otrzymano:

$$S = (1+k) \frac{[(V_{1n} + \omega_1 \cdot e_1) - (V_{2n} + \omega_2 \cdot e_2)] m_1 m_2}{m_1 \left(1 + \frac{e_2^2}{i_2^2}\right) + m_2 \left(1 + \frac{e_1^2}{i_1^2}\right)},$$

$$V_{1t}' = V_{1t}, \quad V_{2t}' = V_{2t},$$

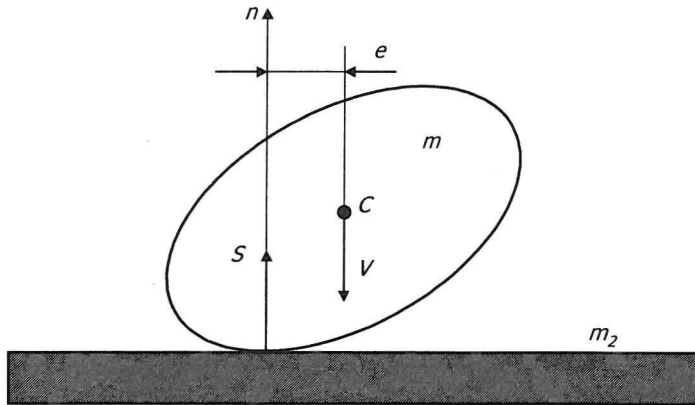
$$V_{1n}' = V_{1n} - (1+k) \frac{[(V_{1n} + \omega_1 \cdot e_1) - (V_{2n} + \omega_2 \cdot e_2)] m_2}{m_1 \left(1 + \frac{e_2^2}{i_2^2}\right) + m_2 \left(1 + \frac{e_1^2}{i_1^2}\right)},$$

$$V_{2n}' = V_{2n} + (1+k) \frac{[(V_{1n} + \omega_1 \cdot e_1) - (V_{2n} + \omega_2 \cdot e_2)] m_1}{m_1 \left(1 + \frac{e_2^2}{i_2^2}\right) + m_2 \left(1 + \frac{e_1^2}{i_1^2}\right)}, \quad (26)$$

$$\omega_1' = \omega_1 - (1+k) \frac{[(V_{1n} + \omega_1 \cdot e_1) - (V_{2n} + \omega_2 \cdot e_2)] m_2}{m_1 \left(1 + \frac{e_2^2}{i_2^2}\right) + m_2 \left(1 + \frac{e_1^2}{i_1^2}\right)} \frac{e_1}{i_1^2},$$

$$\omega_1' = \omega_1 - (1+k) \frac{[(V_{1n} + \omega_1 \cdot e_1) - (V_{2n} + \omega_2 \cdot e_2)] m_1}{m_1 \left(1 + \frac{e_2^2}{i_2^2}\right) + m_2 \left(1 + \frac{e_1^2}{i_1^2}\right)} \frac{e_2}{i_2^2}.$$

Przedstawione powyżej wzory można zastosować do uderzenia mimośrodowego ciała o masie m , poruszającego się pionowo w dół, w poziomą płaszczyznę o masie $m_2 \gg m$ (Rys.7). Uderzenie mimośrodowe w przypadku elipsoidy wydłużonej występuje najczęściej.



Rys.7. Uderzenie mimośrodkowe [30].

Fig.7. Eccentric impacts [30].

W celu przeanalizowania tego zjawiska trzeba do wzorów (26) podstawić:

$$m_1 = m, V_{1n} = V, V_{1t} = 0, \omega_1 = 0, e_1 = e, i_1 = i, m_2 = \infty, V_{2n} = V_{2t} = \omega_2 = 0.$$

Otrzymano wtedy [30]:

$$S = (1+k) \frac{mV}{1 + \frac{e^2}{i^2}}, \quad V' = V'_n = V \left(1 - \frac{1+k}{1 + \frac{e^2}{i^2}} \right), \quad (27)$$

$$V'_t = 0, \quad \omega' = -(1+k) \frac{V}{1 + \frac{e^2}{i^2}} \cdot \frac{e}{i^2}.$$

Przedstawione powyżej różne rodzaje uderzeń ciał pozwolą na dalszą analizę zjawiska uderzenia oraz na określenie strat energii wynikających z ich właściwości fizycznych, w szczególności ich współczynnika restytucji.

3. ZJAWISKO UDERZENIA W MATERIALE ROŚLINNYM

Przedstawione badania dotyczą materiałów niejednorodnych, jakimi są nasiona roślin uprawnych.

Opracowanie właściwej metodyki badań uderzeniowych takich ciał jest bardzo trudne. Są to bowiem organizmy żywe, których właściwości zależą od stopnia dojrzałości oraz warunków zewnętrznych (wilgotność, temperatura) i czasu ich przechowywania. Dodatkową trudnością w analizie zjawiska jest złożoność i niepowtarzalność budowy wewnętrznej i zewnętrznej ziaren nawet w obrębie tej samej odmiany.

Jednym z badaczy, którzy zajmowali się zjawiskami uderzenia w materiałach roślinnych był Strona [38]. W swojej pracy zwracał uwagę na wpływ wielkości ziarniaków kukurydzy na ich uszkodzenie.

Tabela 1. Wpływ wielkości ziarniaków kukurydzy na ilość uszkodzonych ziaren [38].

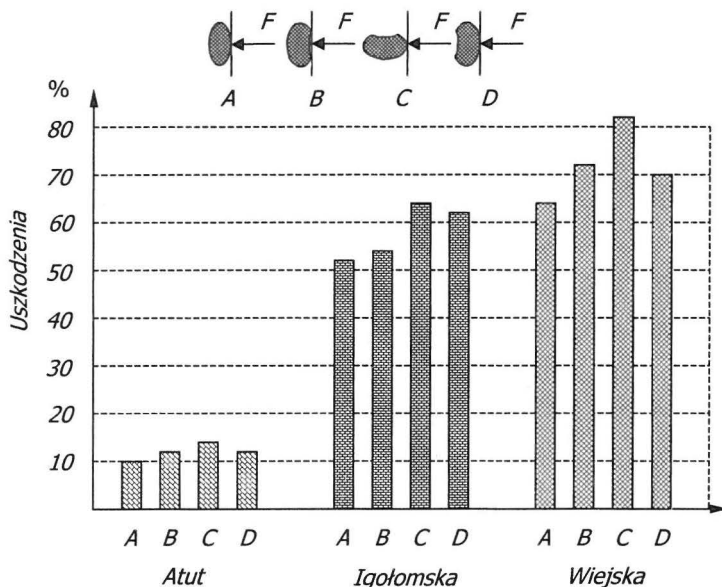
Table 1. The influence of corn seed size on the quantity of damaged seeds [38].

Fracje ziarniaków z sita o średnicy d [mm]	Zawartość ziarniaków uszkodzonych %	
	Koński ząb	Kukurydza szklista
8,0	13,8	17,1
7,0	11,4	11,9
6,5	7,9	9,2
Fracja, która przeszła przez sito o średnicy 6,5 mm	5,5	5,8

Przedstawione przez niego wyniki zamieszczono w Tabeli 1, świadczyły o tym, że większe ziarniaki były częściej uszkodzane niż mniejsze. Wraz ze wzrostem masy ziarniaka rosła bowiem energia uderzenia, proporcjonalna do jego masy i kwadratu prędkości. Przy stałej prędkości nasiona w chwili uderzenia główną przyczyną zróżnicowanych uszkodzeń jest energia uderzenia.

W pracy Sosnowskiego [37] zamieszczono wyniki badań odporności nasion fasoli na uszkodzenia mechaniczne w zależności od miejsca uderzenia. Na Rys.8

przedstawiono wyniki badań odporności nasion trzech odmian fasoli na uderzenia. Z przedstawionego rysunku wynika, że najwięcej uszkodzeń podczas uderzenia powstaje w pozycji C. Związane to jest z małą powierzchnią kontaktu podczas uderzenia, czyli wystąpieniem największych sił oddziaływania.

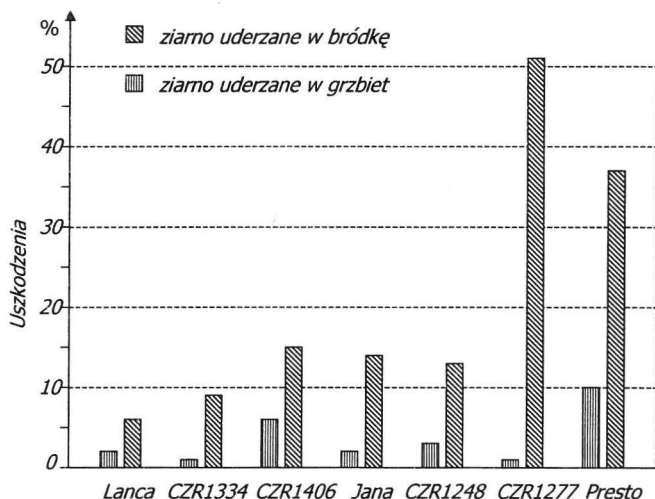


Rys.8. Odporność nasion fasoli na uszkodzenia mechaniczne w zależności od miejsca uderzenia [37].

Fig.8. Bean seed strenght to mechanical destruction in dependence on the spot of collision[37].

W pracy Szota i Kutzbacha [39] również można znaleźć wyniki badań odporności nasion rzepaku na uszkodzenia mechaniczne podczas uderzenia. Badania te pozwalają na ocenę wpływu wilgotności i prędkości uderzenia na ilość mikro i makro uszkodzeń nasion.

Badania przeprowadzone przez Szweda [41, 42, 43, 45] wykazały, że oprócz energii uderzenia o odporności nasion decyduje kształt i miejsce kontaktu. Na Rys.9 przedstawiono wyniki badań odporności nasion pszenicy i pszenżyta na uderzenie w bródkę i w grzbiet.

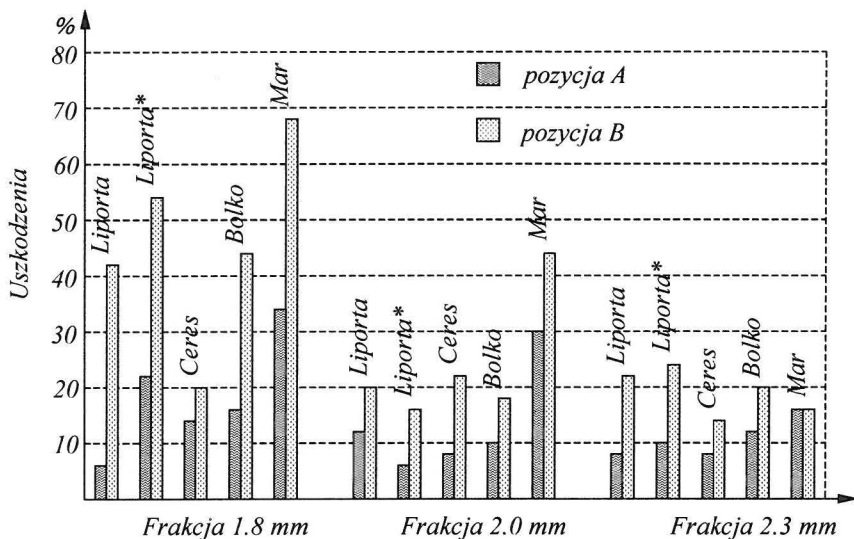


Rys.9. Wpływ miejsca uderzenia nasion pszenicy i pszenżyta na wielkość uszkodzeń [42].

Fig.9. The influence of spots of collision for wheat and rye grains on damage size [42].

Miejsce kontaktu w zasadniczy sposób wpływa na skutki uderzenia. Szczególnie narażone są punkty o dużej krzywiznie powierzchni i o dużej twardości. Odstępstwo od kształtu kulistego powoduje, że najczęściej występuje uderzenie mimośrodowe, którego większość autorów nie bierze pod uwagę bądź wykonuje pomiary tak, aby ono nie występowało.

Na Rys.10 przedstawiono wpływ orientacji nasion rzepaku podczas uderzenia na ich uszkodzenia [43]. Badania przeprowadzono przy dwóch położeniach nasion: *A* - nasiona uderzane prostopadle do płaszczyzny podziału liścieni, *B* - nasiona uderzane równolegle do płaszczyzny podziału liścieni. Z Rys.10 wynika, że największe uszkodzenia występują podczas uderzenia w pozycji *B*. Świadczy to o mniejszej odporności nasion uderzanych w tej pozycji. Zróżnicowanie odporności nasion na uderzenie w zależności od ich wielkości wynika z małej zawartości substancji oleistych w nasionach słabo rozwiniętych. Pomiary przeprowadzono przy stałej energii uderzenia [42, 43, 47, 48, 49].



Rys.10. Wpływ wielkości nasion rzepaku i ich miejsca uderzenia przy stałej energii na wielkość uszkodzeń [43].

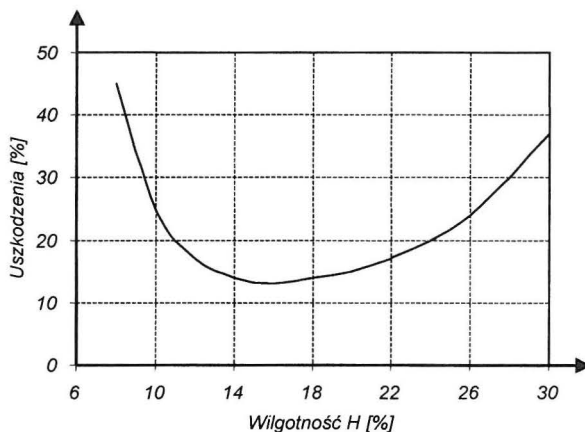
Fig.10. The influence of rape grain size and spot of collision at constant energy on damage size [43].

Fizyczne właściwości nasion zależą również od wilgotności i czasu ich przechowywania.

Badania przeprowadzone przez Szveda i Tysa wykazały zależność między stopniem wilgotności a odpornością na oddziaływanie dynamiczne. Nasiona rzepaku o niskiej wilgotności są częściej uszkodzane od nasion o większej wilgotności.

Długi czas przechowywania powoduje kilkakrotne pogorszenie odporności nasion rzepaku na oddziaływanie dynamiczne w porównaniu z nasionami poddanymi badaniu zaraz po zbiorze. Nasiona w obu przypadkach posiadały taką samą wilgotność, oraz uderzane były z taką samą energią [44, 50].

W pracy przedstawionej przez Stronę [38] przy porównywalnych energiach uderzenia nasiona wykazują zróżnicowaną odporność mechaniczną w zależności od wilgotności.



Rys.11. Wpływ wilgotności ziarniaków kukurydzy na wielkość uszkodzeń [38].

Fig.11. The influence of water content in corn seeds on damage size[38].

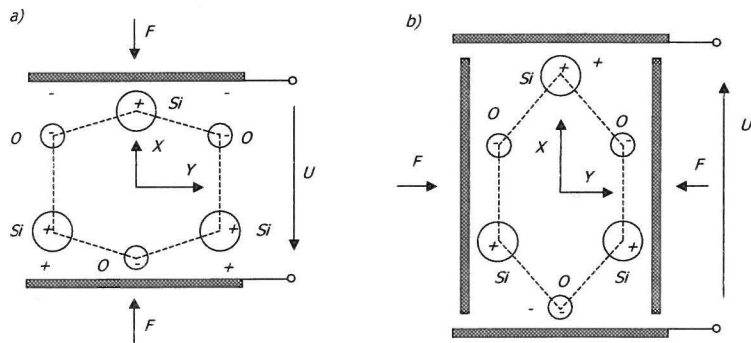
Na Rys.11 przedstawiono zależność procentowej liczby uszkodzonych ziarniaków kukurydzy od wilgotności. Wzrost wilgotności powoduje spadek liczby uszkodzeń aż do pewnej wartości, po przekroczeniu, której następuje ponowne zwiększenie podatności na uszkodzenia. Duże zmiany uszkodzalności w funkcji wilgotności świadczą o znacznej zmianie właściwości mechanicznych badanych ziaren. Z badań tych wynika, że istnieje możliwość doboru optymalnej wilgotności nasion przy której wystąpią najmniejsze uszkodzenia. Znalezienie łatwej metody pomiarowej pozwalającej na określenie optymalnych warunków zbioru może znacznie obniżyć straty powstające w czasie zbioru nasion.

4. UKŁAD POMIAROWY

4.1. Przetwornik pomiarowy

Do budowy przetwornika wykorzystano element piezoelektryczny. Charakteryzuje on się tym, że pod wpływem odkształcenia na jego zaciskach wyjściowych pojawia się ładunek elektryczny. Zjawisko piezoelektryczne pozwala określić kierunek siły wymuszającej odkształcenie. Znak ładunku otrzymywanego przy ściskaniu jest przeciwny niż znak ładunku przy rozciąganiu. Zewnętrzne pole elektryczne wywołuje z kolei naprężenia mechaniczne a tym samym zmianę wymiarów zewnętrznych. Jest to więc zjawisko odwracalne.

Do budowy przetworników piezoelektrycznych, z kryształu kwarcu wycina się płytki zorientowane prostopadłe do jednej z osi elektrycznych.



Rys.12. Ilustracja zjawiska piezoelektrycznego: *a* - podłużne zjawisko piezoelektryczne, *b* - poprzeczne zjawisko piezoelektryczne [29].

Fig.12. The illustration of a piezoelectric phenomenon: *a* - longitudinal piezoelectric phenomenon, *b* - transverse piezoelectric phenomenon [29].

Na Rys.12 przedstawiono ilustracje podłużnego i poprzecznego zjawiska piezoelektrycznego.

W przypadku poprzecznego zjawiska piezoelektrycznego ładunek elektryczny określa zależność [29]:

$$Q_x = -d_{11} \frac{l_y}{l_x} F_y, \quad (28)$$

gdzie : l_x, l_y – wymiary kryształu kwarcu w kierunku osi x i y ,
 d_{11} - stała piezoelektryczna kwarcu $2.30 \cdot 10^{-11} \text{ C/N}$.

Jak wynika z zależności (28) przy działaniu siły F_y wzdłuż osi mechanicznej y ładunek elektryczny zależy od wymiarów kryształu.

W celu zwiększenia czułości przetwornika należy zwiększyć stosunek l_y/l_x . Zbyt duża wartość tego stosunku może powodować wyboczenie boczne przetwornika.

W przypadku zjawiska podłużnego wielkość powstającego ładunku nie zależy od wymiarów geometrycznych przetwornika a ładunek ten określa zależność [20]:

$$Q = d_{11} F_x, \quad (29)$$

gdzie : F_x - siła zewnętrzna.

W celu uzyskania większej czułości przetwornika stosuje się odpowiednie połączenie mechaniczno-elektryczne. Charakteryzuje się ono połączeniem mechanicznym szeregowym i elektrycznie równoległym wielu płytek piezoelektrycznych. Układ ten ma tę zaletę, że wykorzystuje dużą rezystancję kwarcu jako izolatora elektrody środkowej. Wadą tego rozwiązania jest zwiększenie pojemności przetwornika, a tym samym wydłużenie stałych czasowych, co ma niekorzystny wpływ na jego parametry, szczególnie przy pomiarach dynamicznych.

Jeśli chodzi o efekt poprzeczny to z równania (28) wynika, że można zwiększyć czułość poprzez zwiększenie wymiaru w kierunku osi mechanicznej. Sposób ten stosuje się jednak bardzo rzadko ze względu na możliwość wyboczenia bocznego przetwornika.

Napięcie, które pojawia się na elektrodach określa zależność [20]:

$$U_{wy} = \frac{Q}{C_k} = \frac{d_{11}}{C_k} \cdot F_x, \quad (30)$$

gdzie: C_k - pojemność elektryczna przetwornika,
 Q - ładunek.

Ponieważ dla danego przetwornika wartości d_{11} i C_k są stałe, więc napięcie wyjściowe U_{wy} jest proporcjonalne do siły F . Przetwornik może być wyskalowany w jednostkach siły.

Przy wykorzystaniu przetworników piezoelektrycznych można wykonywać pomiary sił, ciśnień, drgań, przyspieszeń. Napięcie może być mierzone przy pomocy woltomierzy lub oscyloskopów.

Przetworniki piezoelektryczne odbiorcze powinny charakteryzować się dużą czułością S_p wynikającą z przemiany mechaniczno elektrycznej. Jest ona definiowana równaniem [21]:

$$S_p = \frac{U_{wy}}{P}, \quad (31)$$

gdzie: U_{wy} - napięcie wyjściowe przetwornika,
 P - ciśnienie wywierane na przetwornik.

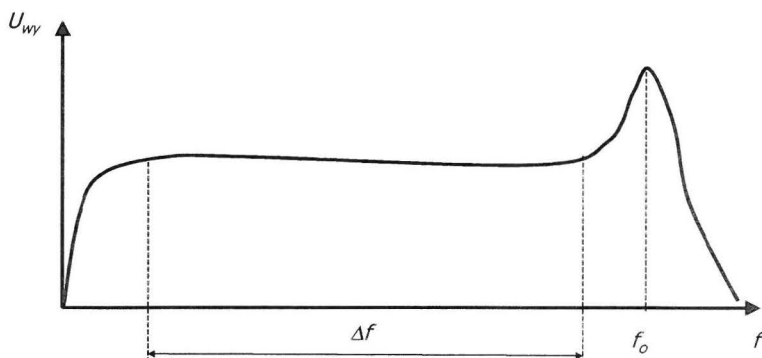
Wydawałoby się, że aby uzyskać dużą czułość, należałoby dopasować impedancję wzmacniacza pomiarowego do impedancji przetwornika. Ale w obwodzie odbiorczym nie chodzi o przekazanie energii, lecz o wykorzystanie napięcia sterującego wzmacniacz, odpowiadającego sile elektromotorycznej powstającej w przetworniku. Zgodnie z twierdzeniem Thevenin'a, każdy przetwornik odbiorczy można przedstawić jako siłę elektromotoryczną połączoną szeregowo z impedancją. Jeżeli układ taki nie jest obciążony to napięcie wyjściowe jest równe sile elektromotorycznej. Aby to w pełni wykorzystać trzeba zastosować wzmacniacz wstępny o dużej impedancji wejściowej oraz umieścić go jak najbliżej przetwornika z pominięciem długiego kabla łączącego [21, 35]. Miniaturyzacja wzmacniacza umieszczonego we wspólnej obudowie z przetwornikiem jest łatwa.

4.2. Konstrukcja przetwornika pomiarowego

Przetwornik piezoelektryczny odbiorczy jest bryłą zmieniającą wymiary (drżająca), wzbudzaną poprzez nacisk na jej powierzchnie. Odształcenie to powoduje powstanie ładunków elektrycznych na powierzchniach metalizowanych, których różnica tworzy napięcie (siłę elektromotoryczną).

Każdy przetwornik charakteryzuje się charakterystyką częstotliwościową z wyraźnym rezonansem zależnym do jego budowy. Rezonans przetwornika ogranicza jego zakres częstotliwości mierzonych.

Poniżej częstotliwości rezonansowej amplituda napięcia jest proporcjonalna do amplitudy drgań a przebieg charakterystyki jest zupełnie płaski. Warunkiem uzyskania takiej charakterystyki jest wysoko położona częstotliwość rezonansowa. Przetwornik powinien więc być dostatecznie płaski (cienki) [21]. Powyżej częstotliwości rezonansowej f_0 charakterystyka szybko opada, w kwadracie z częstotliwością. Ta część charakterystyki jest zupełnie nieprzydatna dla przetworników odbiorczych. Przykładowy przebieg charakterystyki częstotliwościowej przedstawiono na Rys.13.



Rys.13. Charakterystyka częstotliwościowa przetwornika piezoelektrycznego.

Fig.13. Frequency characteristic of a piezoelectric transducer.

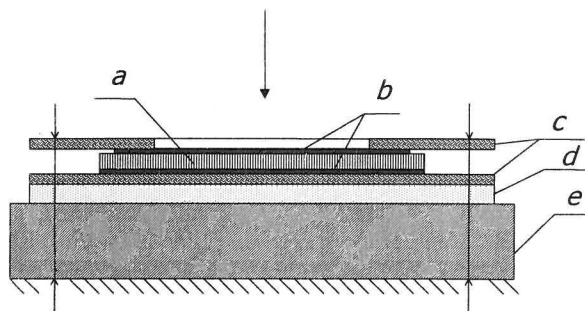
Specyficzną właściwością przetworników szerokopasmowych są często pasożytnicze drgania poprzeczne. Ten niepożądany rezonans o częstotliwości niższej od podstawowej, wyraźnie zniekształca charakterystykę przetwornika oraz zmniejsza jego zakres częstotliwości mierzonych.

Właściwości dynamiczne przetworników piezoelektrycznych ograniczone są zakresem częstotliwości mierzonych od około kilkudziesięciu Hz do kilkuset kHz. Górna granica wynika z częstotliwości drgań własnych (mechanicznych), a dolna wynika z właściwości elektrycznych przetwornika, upływności i pojemności.

Przetworniki piezoelektryczne są najczęściej wykonywane w formie płytek prostokątnych, krążków lub rurek. Rezonanse pasożytnicze występują wtedy, gdy istnieją równoległe powierzchnie odbijające, na przykład w prostopadłościanie. W krążku za rezonans fali poprzecznej odpowiada jego średnica. Ponieważ średnica krążka jest zawsze większa od jego grubości, a więc częstotliwość rezonansu pasożytniczego jest niższa od częstotliwości rezonansu podstawowego [21].

W celu eliminacji tego efektu należy unikać równoległych powierzchni. W przypadku czworokąta nie powinny występować równoległe krawędzie, a w przypadku krążka nie powinno to być koło lecz elipsa. Jednak ze względów technologicznych najczęściej stosuje się kształt kołowy.

Na rys.14 przedstawiono przekrój poprzeczny przetwornika pomiarowego. Wykonano go wykorzystując element piezoelektryczny (typ 7D-25-1600) [26] umieszczony w specjalnej obudowie. Pozwala ona na zamocowanie przetwornika, oraz zabezpiecza go przed uszkodzeniem. Duża masa obudowy w porównaniu z uderzającym obiektem zapewnia znikomy wpływ przetwornika na proces uderzenia. W obudowie przetwornika zastosowano warstwę materiału tłumiącego oscylacje powstające po uderzeniu. Zastosowanie tej warstwy powoduje zmniejszenie czułości przetwornika, ale amplituda sygnału wyjściowego jest i tak duża (kilkaset miliwoltów).

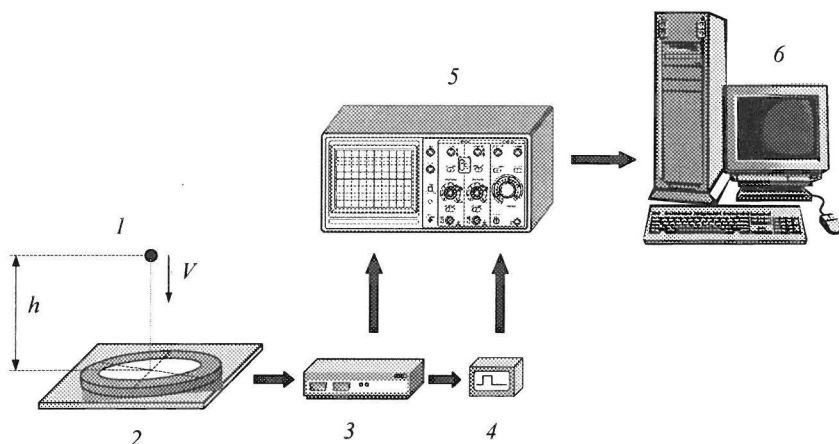


Rys.14. Przetwornik piezoelektryczny: *a* – warstwa piezoelektryczna, *b* – elektrody odprowadzające sygnał, *c* – metalowe elementy dociskające, *d* – warstwa tłumiąca drgania, *e* – masywna podstawa.

Fig.14. Piezoelectric transducer: *a* - piezoelectric layer, *b* - signal outlet electrodes, *c* - metal clamps, *d* - vibration damping layer, *e* - massive base.

4.3. Stanowisko pomiarowe

Na Rys.15 przedstawiono układ pomiarowy pozwalający rejestrować przebieg czasowy siły podczas uderzenia [4, 24].

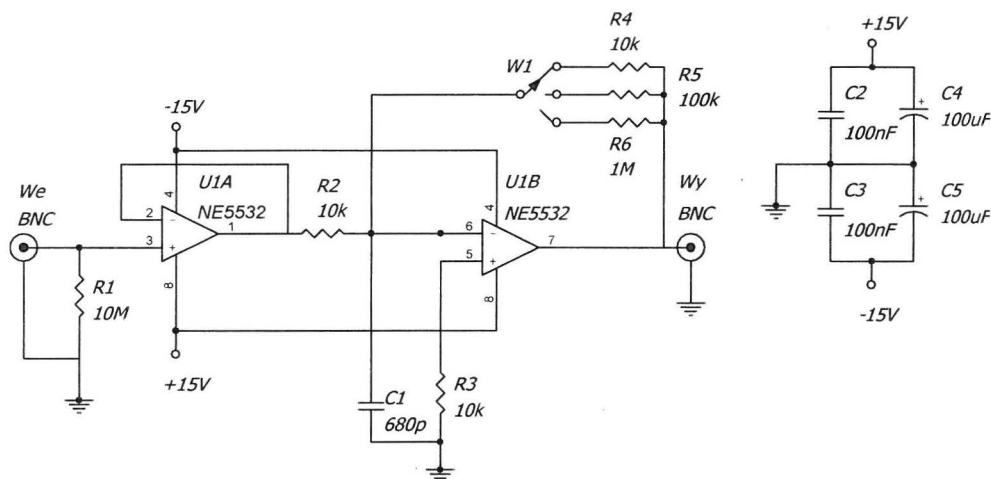


Rys.15. Schemat blokowy układu pomiarowego siły i czasu zderzenia: 1-uderzający obiekt, 2- przetwornik piezoelektryczny, 3-wzmacniacz pomiarowy, 4-układ wyzwalający, 5- oscyloskop cyfrowy, 6-komputer.

Fig.15. Flow chart for the measuring system of impact force and time of collision: 1- hitting object, 2- piezoelectric transducer, 3- measurement amplifier, 4 – release system, 5- digital oscilloscope, 6 – computer.

Uderzające obiekty umieszczano na wysięgniku z otworem, przez który spadały one na przetwornik. Wysięgnik zapewniał celność trafienia obiektu w przetwornik, którego średnica wynosiła około 20 mm. Wysokość wysięgnika można było regulować od 5 mm do 500 mm.

Na Rys.16 przedstawiono schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego. Został on skonstruowany z wykorzystaniem scalonego wzmacniacza operacyjnego NE5532 [14, 36, 40].



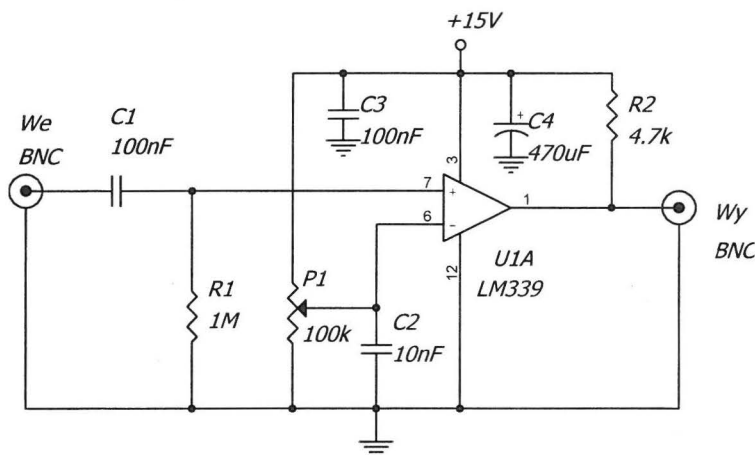
Rys.16. Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego.

Fig.16. Measurement amplifier schematic diagram.

Układ wejściowy jest wtórnikiem napięciowym charakteryzującym się dużą impedancją wejściową. Nie powoduje więc zauważalnego obciążenia przetwornika, czyli zmniejszenia sygnału napięciowego otrzymywanego z przetwornika.

Wzmacniacz pomiarowy pozwala na skokową regulację wzmocnienia sygnału ($\times 1$, $\times 10$, $\times 100$) otrzymywanego z przetwornika przy pomocy przełącznika *W1*. Posiada on filtr dolnoprzepustowy, który ogranicza pasmo przenoszenia układu w zakresie górnych częstotliwości ($R2$, $C1$). Ograniczenie pasma przenoszenia wzmacniacza w zakresie górnych częstotliwości wynika z pojawiających się rezonansów przetwornika dla częstotliwości powyżej 60 kHz, oraz zapobiega jego wzbudzeniu.

Na Rys.17 przedstawiono układ wyzwalający podstawę czasu oscyloskopu. Został on skonstruowany z wykorzystaniem scalonego komparatora LM339 [25, 46].



Rys.17. Schemat ideowy układu wyzwalającego.

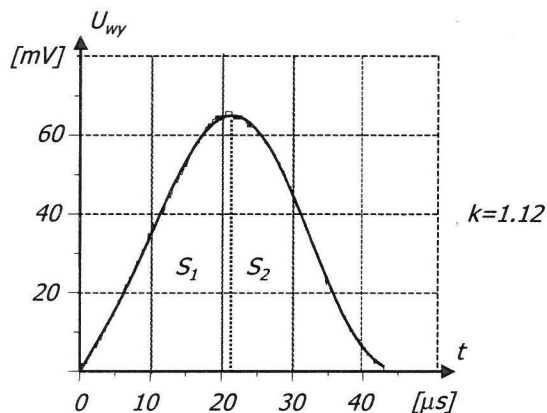
Fig.17. Release system schematic diagram.

Układ wyzwalający pozwalał na precyzyjne wyzwalanie podstawy czasu oscyloskopu w momencie pojawiającego się sygnału. Wyzwolenie podstawy czasu następowało przy odpowiedniej amplitudzie i stromości narastającego zbocza sygnału pomiarowego. Próg zadziałania nastawiano potencjometrem $P1$ w zależności od spodziewanej amplitudy sygnału, co pozwalało na uniknięcie niepotrzebnego wyzwolenia oscyloskopu.

Ustawienie odpowiedniego opóźnienia sygnału otrzymywanego z przetwornika względem sygnału wyzwalającego zapewniało, że analizowany przebieg zawsze znajdował się w całości na ekranie oscyloskopu. Odczytany i zarejestrowany na oscyloskopie cyfrowym Tektronix TDS3032 czasowy przebieg pojawiającego się napięcia (siły) był zapisywany na dysku komputera. Następnie dane były przetwarzane za pomocą programu Grapher, Excel oraz Matcad 2000 [32, 33, 51].

W programach obliczano stosunek pola S'' do pola S' , który jest współczynnikiem restytucji k .

Na Rys.18 przedstawiono przykładowy przebieg napięcia na zaciskach przetwornika, oraz obliczono wartość współczynnika restytucji.



Rys.18. Przykładowy przebieg napięcia pojawiającego się na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia.

Fig.18. Exemplary voltage waveform on transducer outlet terminals during impact.

Otrzymany przebieg siły w czasie jest sygnałem przejściowym nieokresowym (aperiodycznym) związanym z nagle zachodzącym zjawiskiem udarowym, którego widmo jest ciągłe [40].

5. POMIARY PARAMETRÓW PRZETWORNIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO

5.1. Charakterystyka przetwarzania siły uderzeniowej na napięcie wyjściowe zastosowanego przetwornika piezoelektrycznego

Wyznaczenie statycznej charakterystyki przetwarzania $U=f(F)$, dla przetwornika piezoelektrycznego jest praktycznie niemożliwe. Wynika z faktu, że przetwornik piezoelektryczny trzeba traktować jako kondensator. Każdy kondensator posiada zaś swoją upływność, a każdy układ pomiarowy ma określoną rezystancję wejściową. Powoduje ona, że ładunek powstający na okładkach przetwornika ulega rozładowaniu przez wspomniane rezystancje. Nie pozwala to na statyczny pomiar napięcia wyjściowego.

W celu wyznaczenia charakterystyki przetwarzania przyjęto, że można ją wykonać w sposób pośredni, tzn. przez wymuszenie krótkotrwałego impulsu siły o znanej wartości amplitudy.

Do doświadczenia użyto kulki stalowej o masie 0,1 g i znanych właściwościach mechanicznych. Kulka stalowa spadała swobodnie na przetwornik z określonej wysokości zmienianej od 0,5 cm do 20 cm. Każdy pomiar był rejestrowany na dysku komputera.

Pomiary wykonano wykorzystując układu pomiarowy przedstawiony na Rys.15.

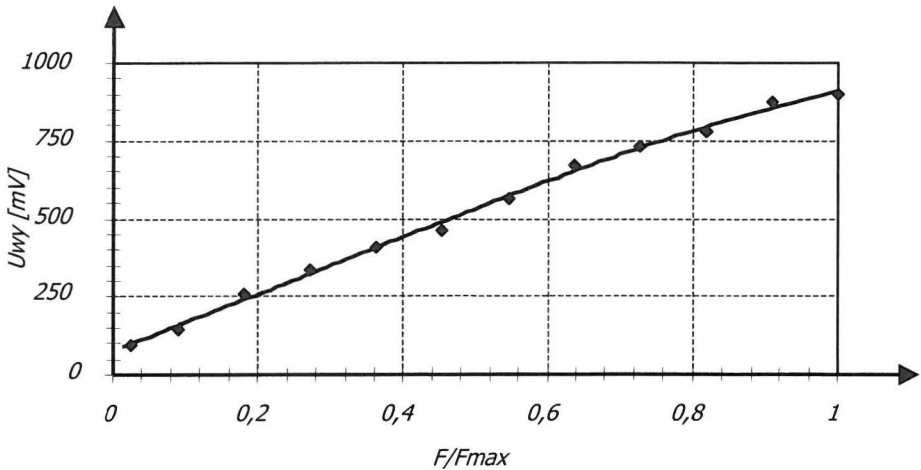
Przy pominięciu oporów powietrza siłę maksymalną podczas uderzenia można określić z zależności [34]:

$$F_{\max} = \sqrt{2 \cdot E_k \cdot k_s}, \quad (32)$$

gdzie: E_k – energia kinetyczna uderzenia,
 k_s – współczynnik sprężystości.

Zależność napięcia wyjściowego pojawiającego się na zaciskach wyjściowych przetwornika pomiarowego od siły określa zależność 30.

Na Rys.19 przedstawiono otrzymaną zależność napięcia wyjściowego od względnej wartości siły F/F_{\max} .



Rys.19. Zależność napięcia wyjściowego przetwornika pomiarowego w funkcji siły.

Fig.19. Transducer outlet voltage vs impact force.

Widać na nim, że zależność ta jest praktycznie liniowa w przedziale napięć wyjściowych od 80 mV do 900 mV. Zastosowany przetwornik piezoelektryczny nie powinien więc wprowadzać zniekształceń nieliniowych.

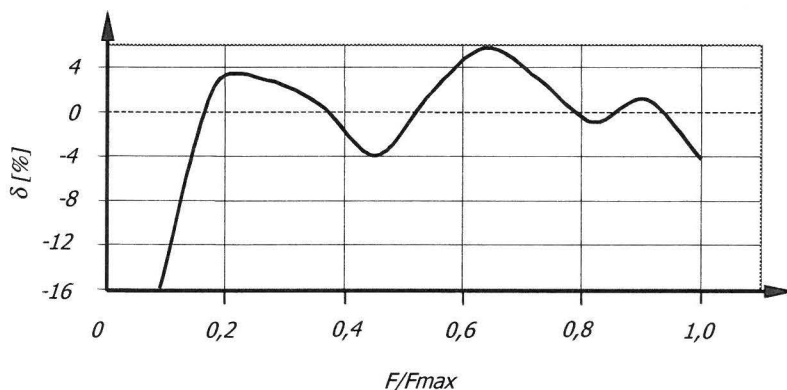
Na Rys.20 przedstawiono względny błąd nieliniowości przetwarzania przetwornika piezoelektrycznego. Błąd nieliniowości wyznaczono aproksymując krzywą z Rys.19 linią prostą. Równanie prostej wyznaczono w programie Grapher:

$$U_{wy} = 841,6 \cdot \frac{F}{F_{max}} + 97,8. \quad (33)$$

Błąd nieliniowości wyznaczono z zależności:

$$\sigma = \frac{U_{wy} - U'_{wy}}{U'_{wy}} \cdot 100\%, \quad (34)$$

gdzie: U_{wy} - zmierzona wartość napięcia,
 U'_{wy} - wartość rzeczywista napięcia wynikająca z aproksymacji liniowej.



Rys.20. Względny błąd nieliniowości przetwarzania przetwornika piezoelektrycznego.

Fig.20. Relative nonlinearity error of piezoelectric transducer conversion.

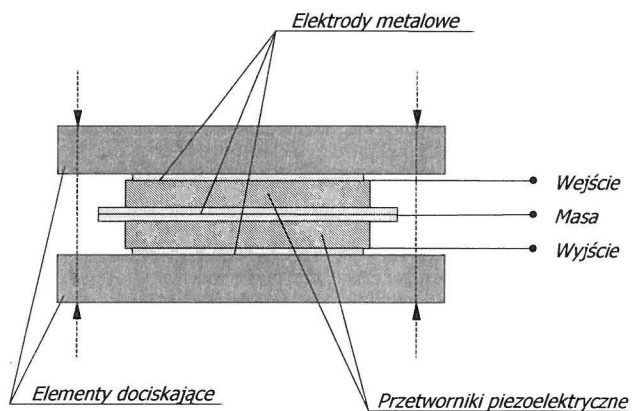
Dla małych wartości siły uderzeniowej błąd jest największy. Wynika on z konieczności zwiększenia czułości aparatury pomiarowej, oraz z trudności związanych z małą energią kulki stalowej zadającej wymuszenie z wysokości poniżej 10 mm. Dla średnich i maksymalnych wartości sił błąd nieliniowości nie przekracza 5 %.

5.2. Badanie zachowania się przetwornika piezoelektrycznego w dziedzinie częstotliwości i czasu

Na Rys.21 przedstawiono pakiet złożony z dwóch sprzężonych mechanicznie przetworników piezoelektrycznych ściśniętych pomiędzy sztywnymi płytkami metalowymi. Zastosowano go do wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej przetwornika i odpowiedzi przetwornika na skok jednostkowy [27].

Na przetwornik wejściowy podawano napięcie sinusoidalne o określonej częstotliwości, oraz o stałej amplitudzie. Napięcie to powodowało zmiany geometryczne wymiarów przetwornika wejściowego. Zmiana wymiarów przetwornika wejściowego powodowała zmianę siły działającej na przetwornik wyjściowy (zmiana wymiarów), a tym samym powstawanie napięcia na jego zaciskach.

Płaszczyzny styku wszystkich elementów zostały pokryte warstwą pasty silikonowej w celu uniknięcia pustych przestrzeni, które pogarszałyby kontakt mechaniczny.

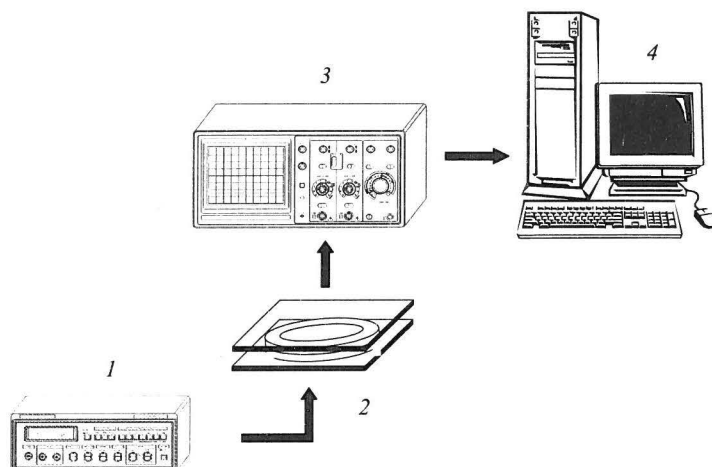


Rys.21. Pakiet dwóch przetworników do pomiarów odpowiedzi częstotliwościowych i czasowych przetwornika piezoelektrycznego.

Fig.21. Package of two transducers to measure frequency and time results of the piezoelectric transducer.

Zastosowanie takiej metody pomiarowej wynika z konieczności wymuszenia odpowiedniej zmiany naprężeń i drgań mechanicznych przetwornika pomiarowego w szerokim zakresie częstotliwości. Uzyskanie takich wymuszeń jest trudne do osiągnięcia inną metodą.

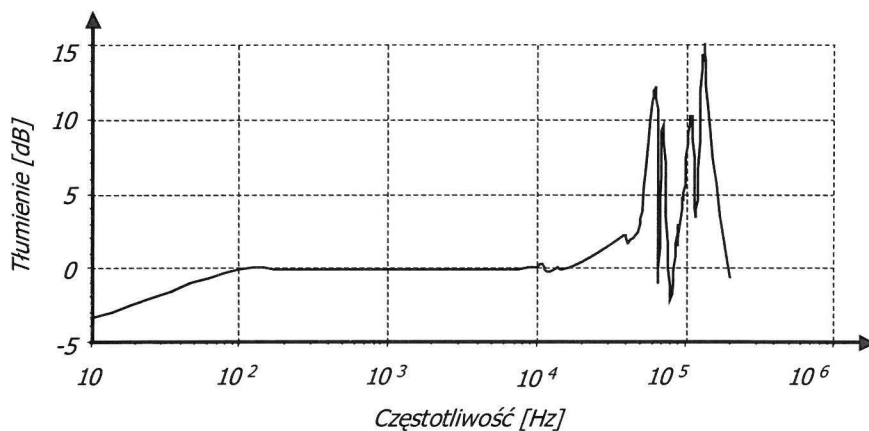
Na Rys.22 przedstawiono układ do wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej badanego przetwornika. Układ pomiarowy składa się z generatora funkcyjnego 1, MX-2020 wytwarzającego sygnał sinusoidalny, pakietu piezoelektrycznego 2, oscyloskopu cyfrowego TDS 3032 3, oraz komputera 4, zastosowanego jako rejestrator wyników badań. Charakterystyki częstotliwościowe wykonano z zagęszczeniem pomiarów w pobliżu częstotliwości rezonansowych przetwornika (60 kHz, 70 kHz). Zakres częstotliwości zmieniano od 10 Hz÷200 kHz.



Rys.22. Układ do pomiaru charakterystyk częstotliwościowych przetwornika.

Fig.22. Measuring system of transducer frequency characteristics.

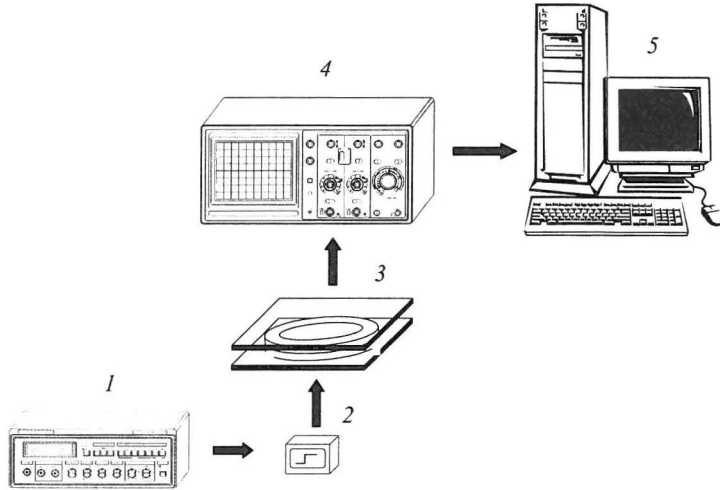
Na Rys.23 przedstawiono wyznaczoną charakterystykę częstotliwościową pakietu przetworników. Z otrzymanej charakterystyki częstotliwościowej przetwornika piezoelektrycznego wynika, że pierwsza częstotliwość rezonansowa wynosi 60 kHz. Poniżej tej częstotliwości nie zaobserwowano innych częstotliwości rezonansowych.



Rys.23. Charakterystyka częstotliwościowa pakietu przetworników piezoelektrycznych.

Fig.23. Frequency characteristics of the package of piezoelectric transducers.

Na Rys.24 przedstawiono układ do wyznaczenia odpowiedzi przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy [19].

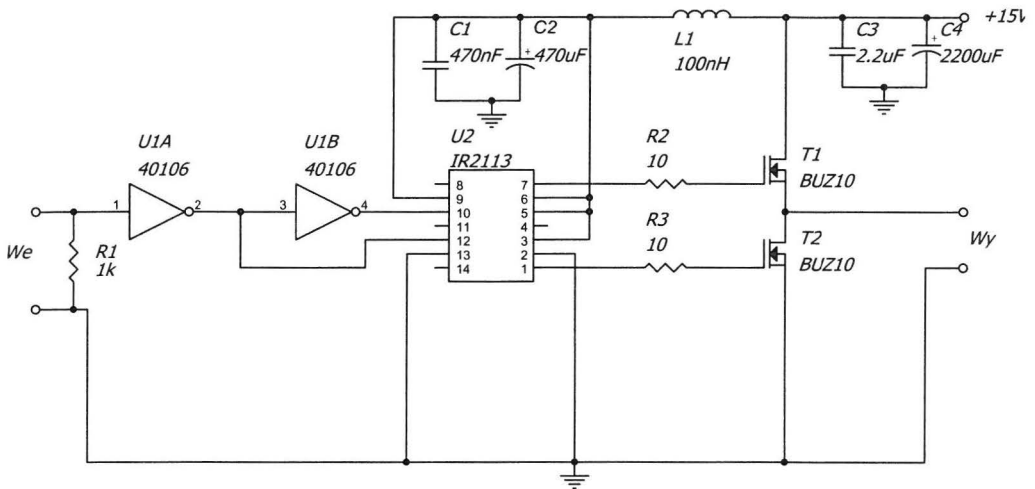


Rys.24. Schemat układu do wyznaczenia odpowiedzi przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy: 1-generator funkcyjny, 2-sterownik, 3-pakiet piezoelektryczny, 4-oscylloskop, 5-rejestrator.

Fig. 24. The diagram of the system to determine response from the piezoelectric transducer per a singular pitch: 1-function generator, 2-controller, 3-piezoelectric package, 4-oscilloscope, 5-recorder.

Znajomość tej odpowiedzi pozwoli ona na dobór parametrów modelu przetwornika piezoelektrycznego do przeprowadzenia badań symulacyjnych. Generator funkcyjny MX-2020 wytwarza falę prostokątną, która podawana jest na wejście układu oznaczonego numerem 2. Głównym zadaniem tego układu jest wytworzenie prostokątnego przebiegu napięciowego o dużej stromości zbocza narastającego oraz zbocza opadającego. Na Rys.25 przedstawiono schemat ideowy układu formującego przebieg prostokątny. Składa się on z układu wejściowego zbudowanego z inwertera z przerzutnikiem Schmitta (40106), który wstępnie formuje sygnał. Następnie jest on podawany do sterownika tranzystorów IGBT (IR2113), zapewniającego naprzemienne sterowanie tranzystorami mocy. Zastosowanie w stopniu końcowym mocy tranzystorów unipolarnych (2 x BUZ10) zapewnia małą rezystancję wyjściową układu [46]. Sygnał

o przebiegu prostokątnym podano na wejście pakietu przetworników 3. Do wyjścia dołączono oscyloskop cyfrowy 4.

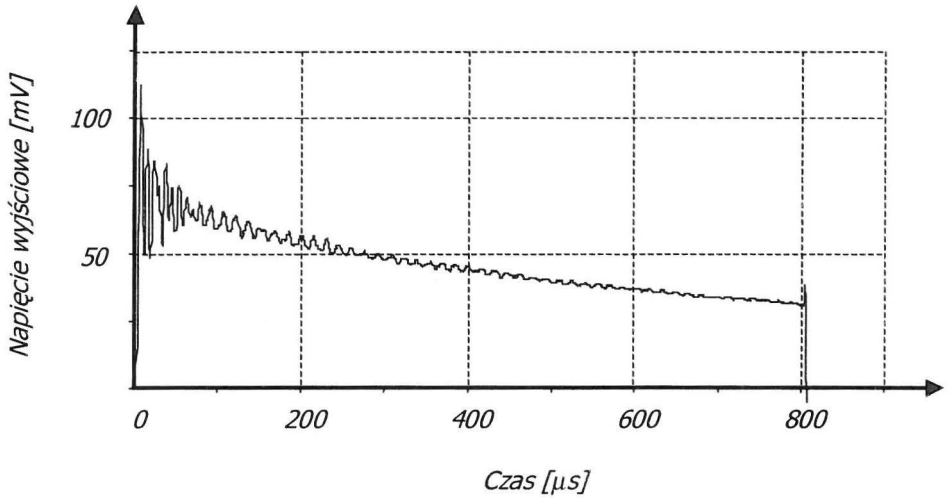


Rys.25. Schemat ideowy sterownika do generowania przebiegu prostokątnego o dużej stromości zbocza narastającego i opadającego.

Fig.25. Schematic diagram of the controller to generate rectangular waveforms of high ascending and falling slopes.

Odpowiedź przetwornika na skok jednostkowy przedstawiono na Rys.26.

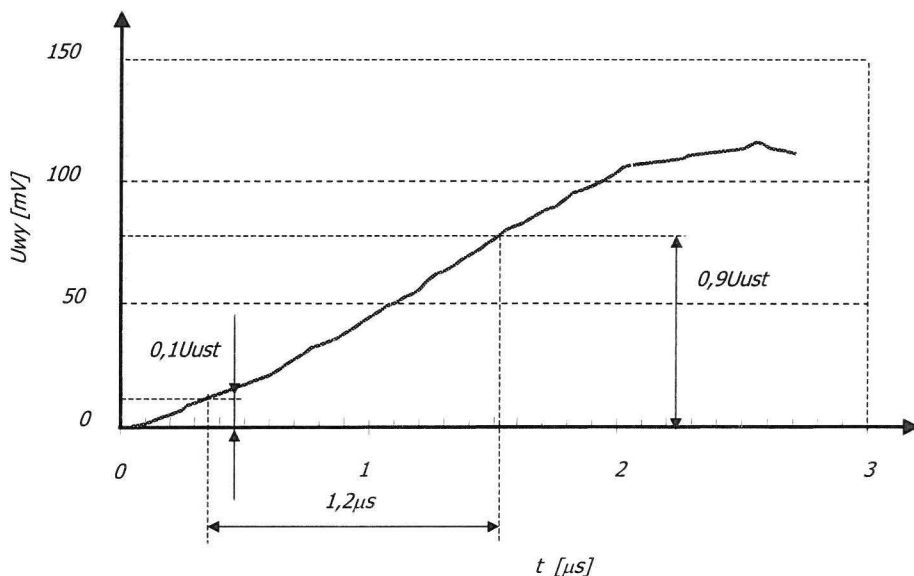
Otrzymana odpowiedź wskazuje, że przetwornik piezoelektryczny ma transmitancję drugiego rzędu o charakterze oscylacyjnym tłumionym. Występują tu co najmniej dwie częstotliwości rezonansowe, które wywołują dudnienie gasnących oscylacji. Częstotliwości rezonansowe widać również na charakterystyce częstotliwościowej przetwornika z Rys.23. Leżą one powyżej pasma częstotliwości pomiarowych i w razie konieczności mogą być odfiltrowane.



Rys.26. Odpowiedź przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy.

Fig.26. Piezoelectric transducer response to a singular pitch.

Na Rys.27 przedstawiono graficzny sposób wyznaczenia czasu narastania odpowiedzi przetwornika na skok jednostkowy [40]. Czas $T_{0,1/0,9}$ jest to czas, który mija od momentu gdy sygnał wyjściowy narasta od 0,1 do 0,9 wartości ustalonej. Wyznaczona wartość czasu narastania wynosi $1,2 \mu s$.



Rys.27. Graficzne wyznaczenie czasu narastania odpowiedzi przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy.

Fig.27. Graphic determination of piezoelectric transducer response time ascending to a singular pitch.

Z zależności (35) górna częstotliwość graniczna przetwornika wynosi 291 kHz [40].

$$T_{0,1/0,9} = \frac{0,35}{f_g}, \quad (35)$$

gdzie: f_g - górna częstotliwość graniczna,

$T_{0,1/0,9}$ - czas narastania odpowiedzi na skok jednostkowy od 0,1 do 0,9 U_{ust} .

Górna częstotliwość graniczna wyznaczona z odpowiedzi skokowej jest większa od wyznaczonej z charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej przetwornika. Wynika to z tego, że za czas narastania odpowiedzi przetwornika na skok jednostkowy odpowiada rezonans o największej amplitudzie i największej częstotliwości.

Związek pomiędzy czasem narastania odpowiedzi przetwornika na skok jednostkowy a górną częstotliwością graniczną określa wzór Shannona [27]:

$$T = \frac{1}{2 \cdot f_g} \quad (36)$$

Po wstawieniu do wzoru (36) czasu narastania odpowiedzi $T=T_{01/09}$ górna częstotliwość graniczna wynosi 416 kHz.

Obie zależności (35, 36) na górną częstotliwość graniczną są słuszne tylko dla aperiodycznej odpowiedzi przetwornika na skok jednostkowy, przy której nie występują gasnące oscylacje.

5.3. Porównanie pasma częstotliwości pracy przetwornika piezoelektrycznego z wymaganym zakresem częstotliwości

Warunkiem poprawnego i nie skażonego błędem pomiaru jest przenoszenie przez przetwornik oraz współpracującą z nim aparaturę bez zniekształceń amplitudowych i fazowych wszystkich składowych harmonicznych sygnału, zawartych w widmie amplitudowym. Spełnienie tego wymagania jest praktycznie niemożliwe. Dla drgań udarowych przyjmuje się [40], że przetwornik powinien przenosić pasmo częstotliwości od zera, do co najmniej:

$$f_g = \frac{1}{t_i} \quad (37)$$

gdzie: t_i - czas trwania pojedynczego impulsu, czas kontaktu.

Czas kontaktu jest czasem jaki upływa od chwili zetknięcia się uderzających ciał do chwili ich odbicia. W rozpatrywanym przypadku jest to czas od chwili zetknięcia badanego ciała z przetwornikiem pomiarowym do chwili ich rozdzielenia.

Ze względu na konieczność przeniesienia zarówno składowych o wielkich częstotliwościach i składowych o częstotliwościach małych, do pomiarów tego typu używa się przetworników piezoelektrycznych charakteryzujących się wielką częstotliwością drgań własnych, oraz płaską charakterystyką w zakresie małych częstotliwości [40].

Na podstawie pomiarów wykonanych podczas uderzeń wyznaczono zakresy czasów kontaktów dla różnych materiałów. Pomiaru te wykonano w układzie przedstawionym na Rys.15.

Wyniki pomiarów czasów kontaktu t_i i wynikające z nich górne częstotliwości graniczne f_g (zależność (37)) przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Czasy kontaktu podczas uderzenia różnych materiałów, oraz wynikające z nich górne częstotliwości graniczne.

Table 2. Contact time of impacts of different materials and resulting upper boundary frequencies.

Rodzaj materiału	Czas kontaktu t_i	Wymagany zakres częstotliwości f_g
	[μ s]	[kHz]
Pszenica	74,5 ÷ 26,3	13,4 ÷ 38,0
Rzepak	49,0 ÷ 26,3	20,4 ÷ 38,0
Groch	100,0 ÷ 46,0	10,0 ÷ 21,7
Wyka	83,3 ÷ 42,0	12,0 ÷ 23,0
Drewno	125,0 ÷ 40,0	8,0 ÷ 12,0
Polistyren	62,5 ÷ 31,2	16,0 ÷ 32,0
Stal	66,6 ÷ 20,8	15,0 ÷ 48,0

Podczas wykonywania pomiarów zauważono wyraźny wpływ twardości i masy uderzających materiałów na czas kontaktu, oraz na wartość amplitudy sygnału. Dla materiałów twardych czas kontaktu jest krótszy niż dla materiałów miękkich. Natomiast amplituda sygnału otrzymywanego z przetwornika zwiększa się wraz z twardością uderzających materiałów [34], co jest zgodne z równaniem (38 i 39).

$$t_i = 2.9432 \cdot \left(\frac{5 \cdot m}{4 \cdot K_k} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot v_0^{\frac{1}{5}}, \quad (38)$$

$$F_{\max} = k \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{m \cdot v_0^2}{K_k} \right)^{\frac{3}{5}}, \quad (39)$$

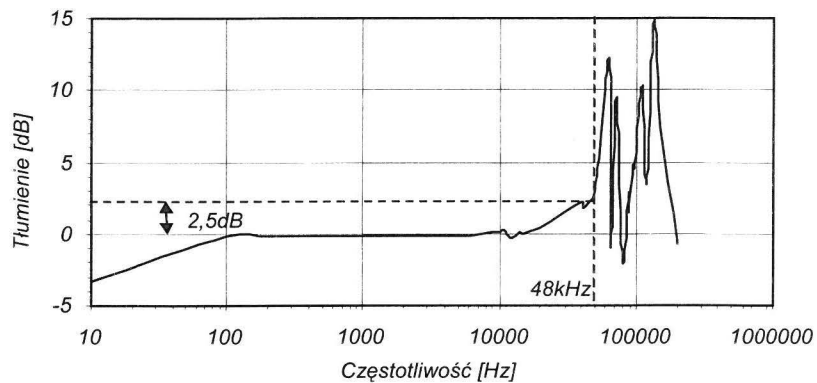
gdzie: F_{\max} - maksymalna siła stykowa [N],
 t_i - czas kontaktu podczas uderzenia [s],
 m - masa uderzającego ciała [kg],
 K_k - sztywność, współczynnik zależny od krzywizny powierzchni
w punkcie styku oraz od właściwości materiału,
 v_0 - prędkość w chwili uderzenia [m/s].

W większości przypadków zróżnicowanie czasu kontaktu wynika z niejednorodnej budowy i kształtu nasion, oraz z różnej ich masy.

Na Rys.28 widać, że zakres wymaganych górnych częstotliwości granicznych układu pomiarowego $f_g = (8 \text{ kHz} \div 48 \text{ kHz})$ znajduje się poza częstotliwościami rezonansowymi przetwornika, gdzie pierwszy rezonans występuje przy 60 kHz. Ponadto maksymalna zmiana amplitudy sygnału wyjściowego w zaznaczonym przedziale od 100 Hz do 48 kHz nie przekracza +2,5 dB.

Maksymalna częstotliwość graniczna f_g dla stali leży bardzo blisko pierwszego rezonansu, ale jest to częstotliwość skrajna, która nie była wykorzystywana w pomiarach i testach.

Przedstawione charakterystyki częstotliwościowe świadczą o tym, że przetwornik nie będzie powodował zmiany amplitudy sygnału w zależności od czasu kontaktu.



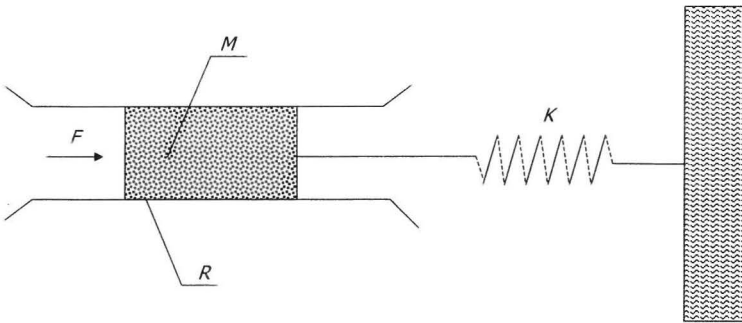
Rys.28. Charakterystyka częstotliwościowa czujnika piezoelektrycznego z zaznaczoną górną częstotliwością graniczną wynikającą z najkrótszego czasu kontaktu t_i .

Fig. 28. Piezoelectric sensor frequency characteristic with a marked boundary frequency resulting from the time of contact t_i .

6. BADANIA SYMULACYJNE

6.1. Model przetwornika pomiarowego

Przetwornik piezoelektryczny należy traktować jako bryłę drgającą pod wpływem siły zewnętrznej lub po jej zaniku. Najprościej jest rozpatrywać układ mechaniczny o stałych skupionych i jednym stopniu swobody Rys.29 [13, 31, 52].



Rys.29. Układ mechaniczny o stałych skupionych i jednym stopniu swobody, M - ciało o masie m , R - współczynnik tarcia, K - podatność sprężyny, F - siła zewnętrzna.

Fig.29. Mechanical system of concentrated constants and one degree of freedom, M - object of mass m , R - coefficient of friction, K - spring vulnerability, F - external force.

Reakcją na siłę zewnętrzną wywołującą odkształcenie przetwornika w granicach sprężystości jest siła sprężystości określana prawem Hooke'a:

$$F_k = k_s \cdot \xi, \quad (40)$$

$$k_s = \frac{1}{K} \quad (41)$$

gdzie: k_s - współczynnik sprężystości,
 ξ - odkształcenie,
 K - podatność sprężyny.

Gdy występują ruch i drgania, pojawia się siła tarcia wewnętrznego F_r :

$$F_r = R \cdot v = R \frac{d\xi}{dt}, \quad (42)$$

gdzie: v - prędkość ruchu,
 R - współczynnik tarcia.

Dodatkową siłą występującą podczas drgań jest siła bezwładności czujnika określona zależnością wynikającą z drugiej zasady Newton'a:

$$F_m = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d\xi^2}{dt^2}. \quad (43)$$

Ponieważ suma sił działających na dany obiekt jest równa zero, to można napisać równanie:

$$F_m + F_r + F_k = F_z = 0, \quad (44)$$

gdzie: F_z - siła zewnętrzna.

W przetworniku piezoelektrycznym siłę zewnętrzną F_z można zastąpić siłą strykcyjną powstającą w niektórych materiałach pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego:

$$F_z = k_{em} \cdot u, \quad (45)$$

gdzie: k_{em} - współczynnik sprzężenia elektromechanicznego,
 u - napięcie na elektrodach przetwornika.

Wstawiając do równania (44) równanie (45) otrzymamy równanie przemiany elektromechanicznej:

$$F_m + F_r + F_k = k_{em} \cdot u. \quad (46)$$

W zakresie sprężystości zjawisko piezoelektryczne jest liniowe, a ładunek elektryczny powstający na elektrodach określa zależność:

$$q = k_{em} \cdot \xi . \quad (47)$$

Dla drgań zależność (47) przybiera postać:

$$\frac{dq}{dt} = k_{em} \cdot \frac{d\xi}{dt} . \quad (48)$$

Pochodna ładunku po czasie jest wartością chwilową prądu, a pochodna drogi (odkształcenia) po czasie jest prędkością, więc:

$$i = k_{em} \cdot v . \quad (49)$$

Uwzględniając zależności (40, 41, 42, 43, 46, 49) otrzymamy:

$$\frac{m}{k_{em}^2} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{R}{k_{em}^2} \cdot i + \frac{1}{k_{em}^2 \cdot K} \int i dt = u . \quad (50)$$

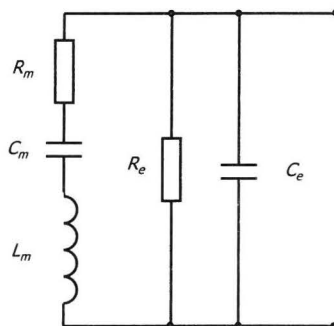
Równanie (50), jest analogiczne z sumą napięć w układzie szeregowym *RLC*:

$$L_m \frac{di}{dt} + R_m \cdot i + \frac{1}{C_m} \int i dt = u , \quad (51)$$

gdzie: L_m - indukcyjność (bezwładność),
 R_m - rezystancja (straty w obwodzie),
 C_m - pojemność (podatność układu drgającego).

Niezależnie od gałęzi szeregowej, w przetworniku występuje jeszcze pojemność równoległa C_e , która jest pojemnością powstałą po wykonaniu elektrod zewnętrznych przedzielonych warstwą piezoelektryczną [15].

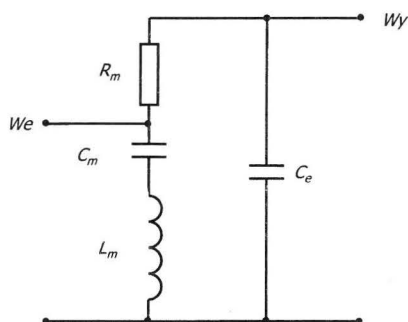
Taki model kwarcu został opracowany przez Butterwortha–Van Dyke’a [10, 15]. Jest to model elektryczny rezonatora kwarcowego nieobciążonego (bez obudowy i mocowania). Na Rys. 30 przedstawiono model rezonatora kwarcowego składającego się z pojemności C_m , indukcyjności L_m , oraz rezystancji R_m , połączonych szeregowo i dodatkowo zbocznikowanych pojemnością równoległą C_e i rezystancją R_e będącą upływnością materiału. Elementy C_m , L_m , R_m noszą nazwę parametrów dynamicznych, zaś element C_e , R_e jest parametrem statycznym modelu kwarcu. Upływność materiału R_e została pominięta ze względu na jej dużą wartość.



Rys.30. Elektryczny model kwarcu.

Fig.30. Quartz electric model.

Model kwarcu doskonale odzwierciedla właściwości rezonatora kwarcowego oraz przetwornika ultradźwiękowego. Jeśli chodzi o przetwornika sensora do symulacji to układ ten wymaga dodatkowego wyprowadzenia, które pozwala na oddziaływanie elektryczne na elementy gałęzi szeregowej np. na indukcyjność i pojemność, czyli bezpośrednio na elementy odpowiadające za mechaniczne parametry przetwornika. Na Rys.31 przedstawiono model przetwornika z odpowiednim wejściem pozwalającym na przeprowadzenie symulacji zachowania się przetwornika.

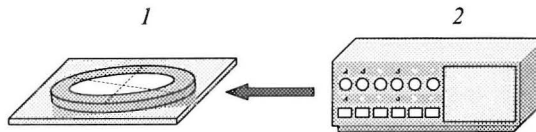


Rys.31. Schemat zastępczy przetwornika pomiarowego.

Fig.31. Measuring converter substitute diagram.

6.2. Pomiary parametrów schematu zastępczego przetwornika piezoelektrycznego

Pomiary parametrów elementów schematu zastępczego wykonano zakładając, że jego schemat elektryczny składa się z elementów przedstawionych na Rys.30. Początkowo wyznaczono parametry elementów statycznych schematu C_e , R_e . Pomiary te wykonano w układzie przedstawionym na Rys.32.



Rys.32. Schemat blokowy do pomiaru wartości elementów statycznych C_e , R_e : 1-badany przetwornik, 2-mostek pomiarowy RLC.

Fig.32. Flow chart for measurements of static elements, C_e , R_e : 1- tested converter, 2- measuring RLC bridge.

Podłączenie przetwornika do specjalnych wejść w mostku RLC (typ: E318) wykonano czterema ekranowanymi przewodami. Taki sposób pozwala na zminimalizowanie wpływu połączeń na wyniki pomiarów, szczególnie przy pomiarach małych wartości pojemności elektrycznej, oraz dużych wartości rezystancji.

W wyniku pomiarów uzyskano następujące wartości parametrów:

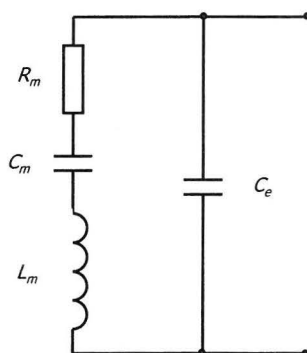
$$C_e = 19,5 \text{ nF},$$

$$R_e = 0,51 \text{ G}\Omega.$$

Wartość pojemności C_e jest znaczna. Wynika ona z dużej powierzchni elektrod przetwornika, natomiast duża stosunkowo wartość rezystancji R_e jest charakterystyczna dla przetworników piezoelektrycznych. Ze względu na tak znaczną wartość tej rezystancji, w porównaniu z rezystancjami wejściowymi stosowanych mierników ($10 \text{ M}\Omega \div 100 \text{ M}\Omega$), oraz wykorzystanie przetwornika do pomiarów dynamicznych, można ją pominąć w dalszych pomiarach i symulacjach.

Kolejnym etapem było wyznaczenie wartości parametrów dynamicznych modelu przetwornika piezoelektrycznego R_m , L_m , C_m .

W celu zmierzenia i obliczenia wartości tych parametrów posłużono się schematem zastępczym przedstawionym na Rys.33.



Rys.33. Schemat elektryczny modelu przetwornika pomiarowego.

Fig.33. Electric diagram of a measuring converter model.

Z przedstawionego rysunku wynika, że w tym układzie wystąpią dwa rezonanse. Pierwszy wystąpi w gałęzi szeregowej R_m , C_m , i L_m , który nazywamy rezonansem napięć lub mechanicznym, oraz rezonans prądów gałęzi R_m , C_m , L_m , z pojemnością C_e , zwany rezonans elektromechaniczny. Rezonans napięć ma mniejszą częstotliwość od rezonansu prądów. Za częstotliwość rezonansu napięć odpowiadają elementy C_m i L_m , natomiast za częstotliwość rezonansu prądów elementy L_m i szeregowe połączenie pojemności C_m z C_e [15, 21]. Pomiary częstotliwości rezonansowych wykonano w układzie przedstawionym na Rys.32 i otrzymano następujące częstotliwości rezonansów podstawowych, napięć i prądów:

$$f_s = 64,1 \text{ kHz} - \text{częstotliwość rezonansu napięć},$$

$$f_r = 65,5 \text{ kHz} - \text{częstotliwość rezonansu prądów},$$

co daje odpowiednio okres:

$$T_s = 1,56 \cdot 10^{-5} \text{ s} - \text{okres rezonansu napięć},$$

$$T_r = 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ s} - \text{okres rezonansu prądu}.$$

Dla gałęzi szeregowej możemy zapisać równanie pozwalające na obliczenie częstotliwości rezonansowej:

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot C_m}}. \quad (52)$$

oraz dla gałęzi równoległej [21]:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot \frac{C_m \cdot C_e}{C_m + C_e}}}. \quad (53)$$

Po podstawieniu:

$$f_s = \frac{1}{T_s}, \quad f_r = \frac{1}{T_r}, \quad (54)$$

i odpowiednim przekształceniu równań otrzymamy wzory pozwalające na obliczenie wartości C_m , L_m :

$$C_m = \frac{C_e (T_s^2 - T_r^2)}{T_r^2}, \quad (55)$$

$$L_m = \frac{T_s^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot C_m}. \quad (56)$$

Po podstawieniu wartości okresów rezonansów szeregowego i równoległego oraz wartości pojemności C_e i pominięciu rezystancji R_e otrzymano:

$$C_m = 0,77 \text{ nF}, \quad (57)$$

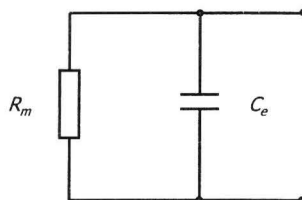
$$L_m = 8 \text{ mH}. \quad (58)$$

Kolejnym etapem było wyznaczenie wartości rezystancji dynamicznej R_m , która odpowiada za straty w obwodzie.

Jeżeli przetwornik znajduje się w rezonansie napięć to spełniona jest zależność:

$$X_{L_m} - X_{C_m} = 0. \quad (59)$$

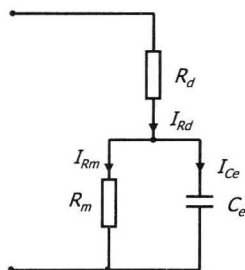
W tym przypadku schemat zastępczy Rys.33 przetwornika upraszcza się do postaci przedstawionej na Rys.34.



Rys.34. Schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego dla rezonansu napięć.

Fig.34. Substitute diagram for piezoelectric transducer for voltage resonance.

Aby wyznaczyć wartość rezystancji dynamicznej R_m trzeba dołączyć szeregowo do przetwornika znaną rezystancję zewnętrzną R_d pozwalającą na pomiar sumy prądów płynących przez elementy składowe przetwornika w czasie rezonansu szeregowego Rys.35.



Rys.35. Schemat zastępczy modelu przetwornika pomiarowego z dołączoną dodatkową rezystancją podczas rezonansu napięć.

Fig.35. Substitute diagram of measuring converter model with an additional resistance during voltage resonance.

Do układu przedstawionego na Rys.35 dołączono generator ustawiając znaną wartość amplitudy sygnału zasilającego o przebiegu sinusoidalnym. Następnie zmierzono metodą oscyloskopową spadki napięć na przetworniku oraz na rezystancji dodatkowej $R_d = 1\text{k}\Omega$.

Przy napięciu wyjściowym z $U_{wy} = 13\text{V}$ zmierzono następujące wartości napięć na przetworniku oraz na rezystancji dodatkowej:

$$U_{Rm} = U_{Ce} = 0,22\text{V},$$

$$U_{Rd} = 12,89\text{V}.$$

Na podstawie znanych spadków napięć na poszczególnych elementach oraz wartości parametrów elementów można obliczyć poszczególne wartości prądów:

$$I_{R_d} = \frac{U_{R_d}}{R_d} = 12,89mA, \quad (60)$$

$$I_{C_e} = U_{C_e} \cdot \omega C_e = 1,74mA, \quad (61)$$

$$I_{R_m} = \sqrt{I_{R_d}^2 - I_{C_e}^2} = 12,77mA. \quad (62)$$

Rezystancja dynamiczna badanego przetwornika wynosi:

$$R_m = \frac{U_{R_m}}{I_{R_m}} = 17,22\Omega. \quad (63)$$

Tak otrzymany schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego poddano wstępnej symulacji w programie SPICE 8.0 [28]. Symulacja pozwoliła na dostrojenie modelu do obiektu rzeczywistego (przetwornika pomiarowego). Polegała ona na dobraniu elementów schematu tak, aby model posiadał zbliżone częstotliwości rezonansowe oraz zbliżone stałe czasowe do przetwornika rzeczywistego, oraz elementów odpowiadających za sprzężenie modelu przetwornika (sprzężenie elektromechaniczne przetwornika rzeczywistego) ze źródłem sygnału.

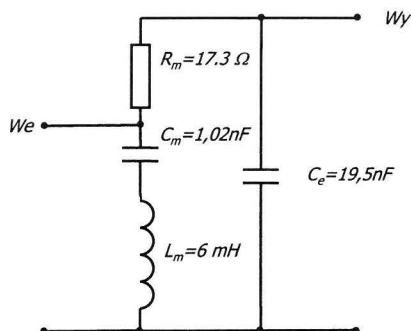
6.3. Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych i czasowych modelu przetwornika pomiarowego

Symulacje zachowania się przetwornika piezoelektrycznego przeprowadzono przy pomocy programu SPICE 8.0.

Na Rys.36 przedstawiono otrzymany model przetwornika piezoelektrycznego.

Charakterystyki częstotliwościowe modelu przetwornika piezoelektrycznego wyznaczono przy wykorzystaniu schematu z Rys.37 podłączonego do źródła napięcia sinusoidalnego w zakresie częstotliwości zmieniających od 10 Hz do 200 kHz. Połączenie modelu przetwornika z generatorem wykonano przez

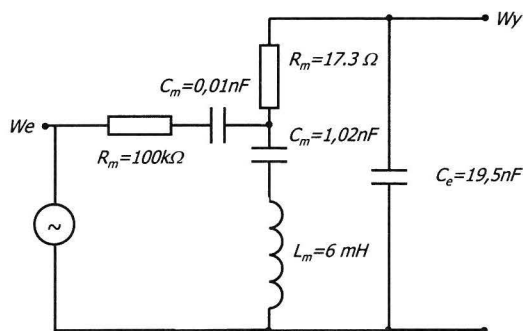
odpowiednią impedancję dobraną w czasie symulacji, która zapewni znikomy wpływ generatora na zachowanie się modelu podczas symulacji.



Rys.36. Modelu przetwornika piezoelektrycznego użyty do symulacji.

Fig.36. Transducer model diagram used for simulations with given component element values.

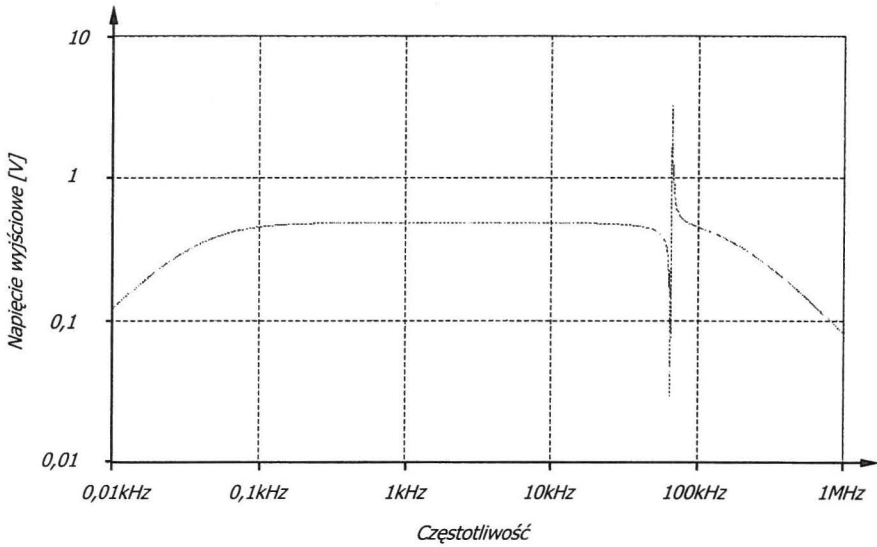
Szczególnie dotyczy to niewielkiego wpływu na amplitudy napięć w czasie rezonansów, oraz znikomego wpływu na częstotliwości rezonansowe modelu przetwornika. Impedancja ta zastępuje współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, który występuje w katalogach jako jeden z parametrów przetworników piezoelektrycznych.



Rys.37. Schemat układu pozwalającego na symulację charakterystyki częstotliwościowej przetwornika piezoelektrycznego.

Fig.37. The diagram of a system to simulate frequency characteristic of the piezoelectric transducer.

Otrzymaną charakterystykę częstotliwościową modelu przetwornika piezoelektrycznego przedstawiono na Rys.38.

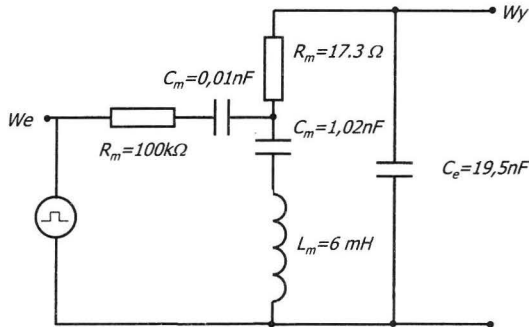


Rys.38. Charakterystyka częstotliwościowa układu modelowego.

Fig.38. The frequency characteristic of a model system.

Przedstawiona charakterystyka częstotliwościowa modelu przetwornika piezoelektrycznego uwzględnia tylko pierwszą częstotliwość rezonansową przetwornika. Widać tu wyraźnie, rezonans napięć i rezonans prądów. Leżą one bardzo blisko siebie (64 kHz, 67 kHz) tak jak ma to miejsce w przypadku przetwornika rzeczywistego (64 kHz, 65,5 kHz). Rezonans napięć na charakterystyce częstotliwościowej przetwornika rzeczywistego nie jest tak wyraźny jak na Rys.38. Do momentu pojawienia się rezonansu charakterystyka częstotliwościowa modelu niewiele odbiega od rzeczywistej charakterystyki częstotliwościowej przetwornika. W układzie rzeczywistym występują jeszcze wyższe częstotliwości rezonansowe, które widać na Rys.28. Nie należy ich uwzględniać, ponieważ pierwszy rezonans przetwornika ogranicza jego zastosowanie do tej, lub niższej częstotliwości.

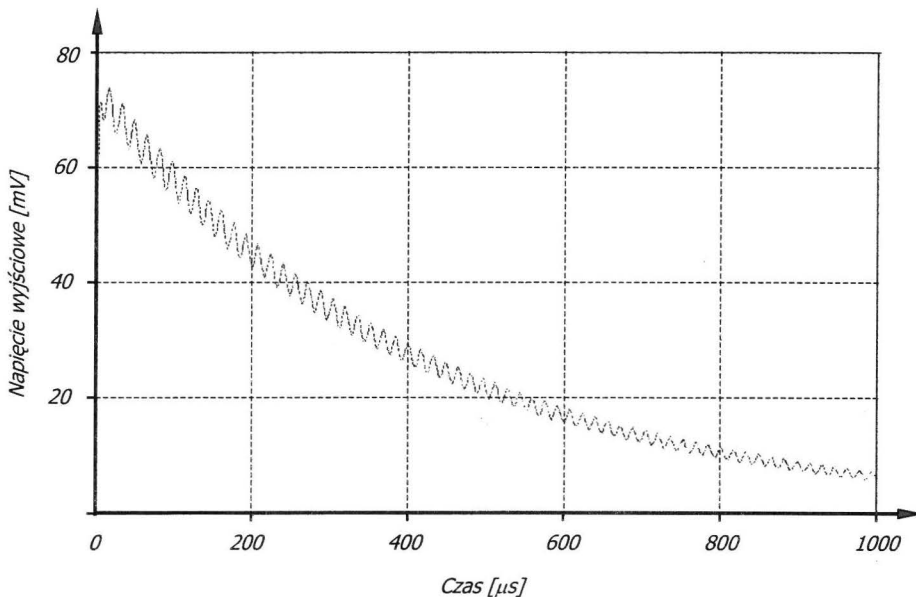
Odpowiedź modelu przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy wykonano w układzie przedstawionym na Rys.39. Do wejścia modelu przetwornika dołączono źródło napięcia o przebiegu prostokątnym za pośrednictwem impedancji złożonej z R_z i C_z .



Rys.39. Układ do symulacji odpowiedzi modelu przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy.

Fig.39. The system to simulate piezoelectric transducer model response to a singular pitch.

Odpowiedź przetwornika na skok jednostkowy przedstawiono na Rys.40.



Rys.40. Odpowiedź modelu przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy.

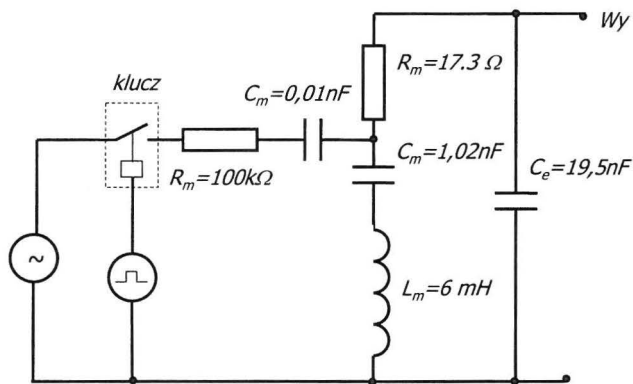
Fig.40. Piezoelectric transducer model response to a singular pitch.

Na otrzymanym przebiegu czasowym odpowiedzi przetwornika na impuls skokowy występuje gasnąca oscylacja o częstotliwości około 60 kHz,

odpowiadającej rezonansowi modelu przetwornika. W odpowiedzi modelu na skok jednostkowy nie pojawia się dudnienie gasnących oscylacji. Spowodowane to jest uproszczeniem modelu wynikającym z braku wyższych częstotliwości rezonansowych występujących w przetworniku rzeczywistym. Czas narastania sygnału w modelu przetwornika wyznaczono metodą graficzną. Jest on dłuższy od czasu narastania dla przetwornika pomiarowego i wynosi $T_{01/09}=1,6 \mu\text{s}$, dla przetwornika rzeczywistego $T_{01/09}=1,2 \mu\text{s}$. Czas opadania sygnału w modelu jest zbliżony do czasu w przetworniku rzeczywistym.

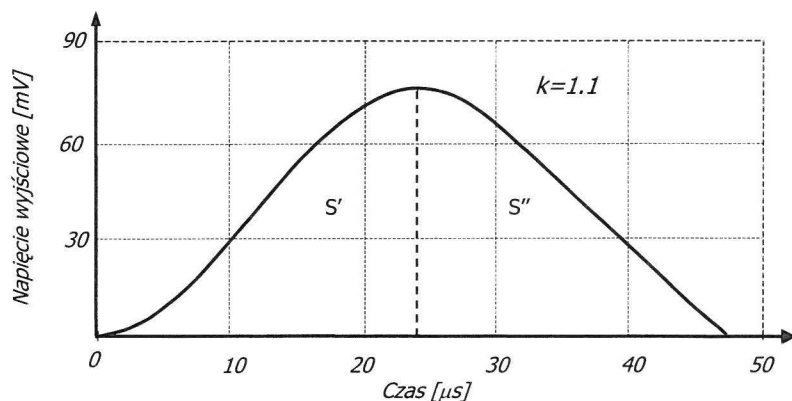
6.4. Wyznaczanie reakcji modelu przetwornika na impuls sinusoidalny

Przy sprawdzaniu odpowiedzi przetwornika na impuls sinusoidalny odpowiadający przebiegiem impulsowi siły w uderzeniu sprężystym stwierdzono odstępstwo od przebiegów teoretycznych. Polegało ono na tym, że obliczony współczynnik restytucji był większy od jedności. Świadczy to o błędzie przetwarzania modelu przetwornika, oraz sugeruje, że taki błąd może wystąpić podczas pomiarów w układzie rzeczywistym. Symulację odpowiedzi przetwornika wykonano w układzie przedstawionym na Rys.41 Przebieg odpowiedzi układu ilustruje Rys.42.



Rys.41. Układ do symulacji zachowania się przetwornika podczas uderzenia.

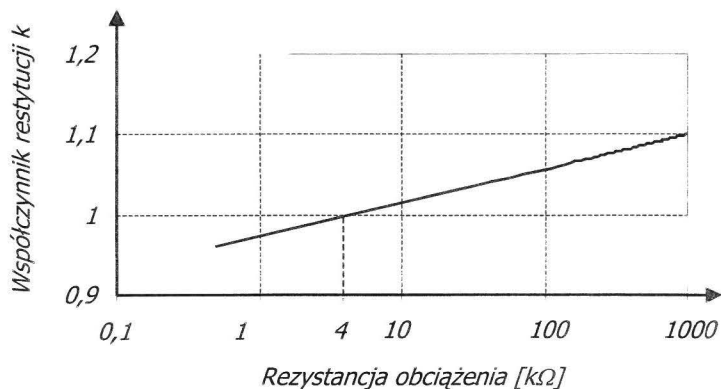
Fig.41. The system to simulate transducer behaviour during impacts.



Rys.42. Odpowiedź modelu przetwornika na impuls siły.

Fig.42. Transducer model response to force impulse.

Podczas symulacji zauważono, że zewnętrzna rezystancja podłączona równoległe do zacisków wyjściowych modelu przetwornika powoduje zmniejszenie wartości współczynnika restytucji. W celu sprawdzenia wpływu rezystancji zewnętrznej na wartość współczynnika restytucji wykonano serię symulacji. Na Rys.43 przedstawiono wpływ rezystancji obciążającej przetwornik piezoelektryczny na wartość współczynnika restytucji.



Rys.43. Wpływ rezystancji obciążającej na wartość współczynnika restytucji dla modelu przetwornika.

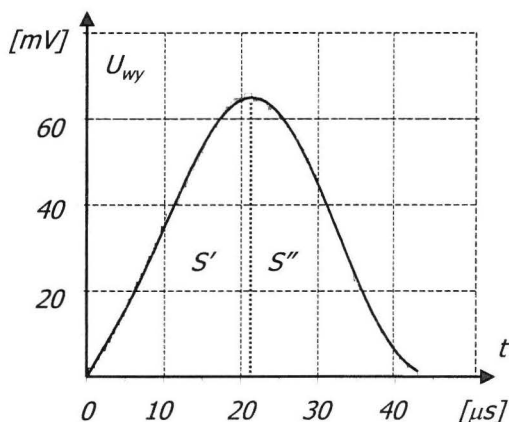
Fig.43. The influence of load resistance on restitution coefficient values for a transducer model.

Na podstawie Rys.43 można stwierdzić, że możliwe jest dobranie rezystancji zewnętrznej obciążającej przetwornik minimalizującej błąd pomiaru wartości współczynnika restytucji (dla uderzenia sprężystego $k=1$). Z przedstawionego rysunku wynika, że jej wartość powinna wynosić około $4 \text{ k}\Omega$.

7. BADANIE UKŁADU RZECZYWISTEGO

Test przetwornika piezoelektrycznego przeprowadzono wykonując serię pomiarów uderzeń kulki stalowej o masie m ze stałą energią uderzenia [3]. Na Rys.44 przedstawiono przebieg siły w czasie otrzymany przy uderzeniu sprężystą kulką.

Z otrzymanego przebiegu napięcia w czasie odpowiadającym działaniu siły wyznaczono współczynnik restytucji, który jest stosunkiem impulsu siły po wystąpieniu jej maksymalnej wartości do impulsu siły przed wystąpieniem maksymalnej wartości siły [30]. Otrzymana wartość współczynnika restytucji $k=S''/S' > 1$, świadczy o błędzie przetwarzania przetwornika.

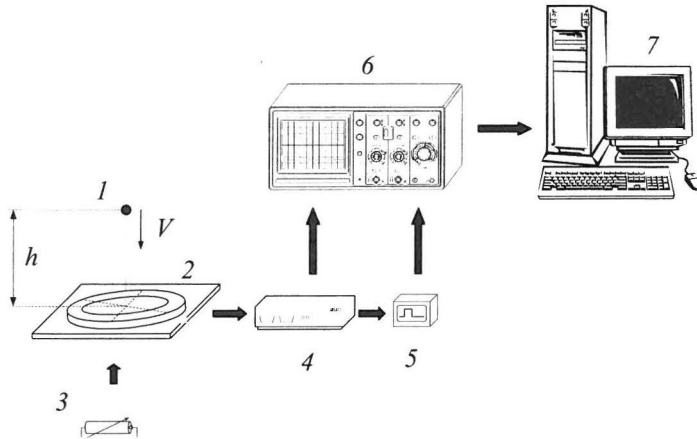


Rys.44. Przebieg napięcia U_{wy} na zaciskach wyjściowych przetwornika piezoelektrycznego uderzonego kulką stalową.

Fig.44. U_{wy} waveform on output terminals of the piezoelectric transducer hit by a steel ball.

Podczas symulacji w układzie modelowym zauważono, że na wartość współczynnika restytucji duży wpływ ma rezystancja podłączona równolegle do przetwornika pomiarowego, co prawdopodobnie wiąże się ze zmianą wartości dolnej częstotliwości granicznej przetwornika. W związku z tym wykonano szereg pomiarów uderzeniowych dla kulki stalowej o stałej energii w chwili

uderzenia, dla różnych wartości rezystancji obciążającej przetwornik pomiarowy. Pomiary przeprowadzono w układzie przedstawionym na Rys.45.

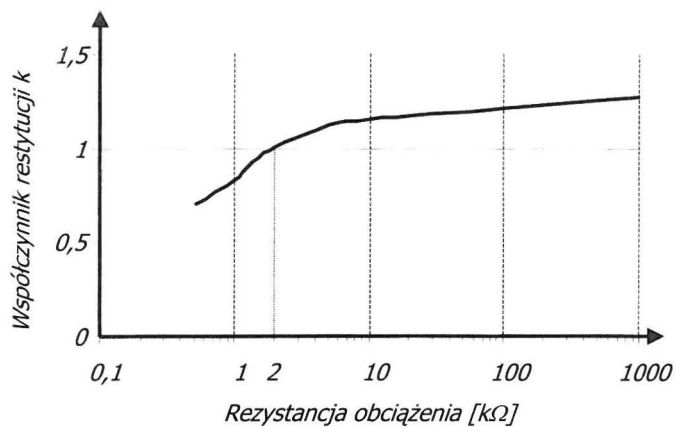


Rys.45. Układ do pomiaru wpływu rezystancji obciążającej przetwornik piezoelektryczny na wartość współczynnika restytucji: 1-kulka stalowa, 2-przetwornik pomiarowy, 3-regulowana rezystancja, 4-wzmacniacz pomiarowy, 5-układ wyzwalający, 6-oscyloskop cyfrowy, 7-komputer.

Fig.45. The system to measure the influence of piezoelectric transducer load resistance on restitution coefficient values: 1 – steel ball, 2 measurement converter, 3- adjusted resistance, 4- measurement amplifier, 5- release system, 6- digital oscilloscope, 7- computer.

Na Rys.46 przedstawiono wpływ obciążenia przetwornika na wartość współczynnika restytucji [5].

Z Rys.46 wynika, że najmniejsze błędy przetwarzania wystąpią przy obciążeniu przetwornika rezystancją $R=2\text{ k}\Omega$. Dla symulacji wartość tej rezystancji wynosi $R=4\text{ k}\Omega$. Tak mała wartość rezystancji podłączonej równoległe do zacisków wyjściowych przetwornika powoduje znaczny spadek sygnału wyjściowego, ale nie ma to większego znaczenia przy tych pomiarach, ponieważ amplituda sygnału wyjściowego jest duża. Ponadto daje się zauważyć, że za pomocą doboru wartości rezystancji R można korygować mierzoną wartość współczynnika restytucji oraz dobierać ją w zależności od zastosowanego przetwornika piezoelektrycznego podczas skalowania układu pomiarowego.



Rys.46. Wpływ rezystancji obciążenia przetwornika piezoelektrycznego na wartość mierzoną współczynnika restytucji.

Fig.46. The influence of piezoelectric transducer load resistance on measured values of restitution coefficient.

8. WYKORZYSTANIE UKŁADU POMIAROWEGO Z PRZETWORNIKIEM PIEZOELEKTRYCZNYM W BADANIACH UDAROWYCH

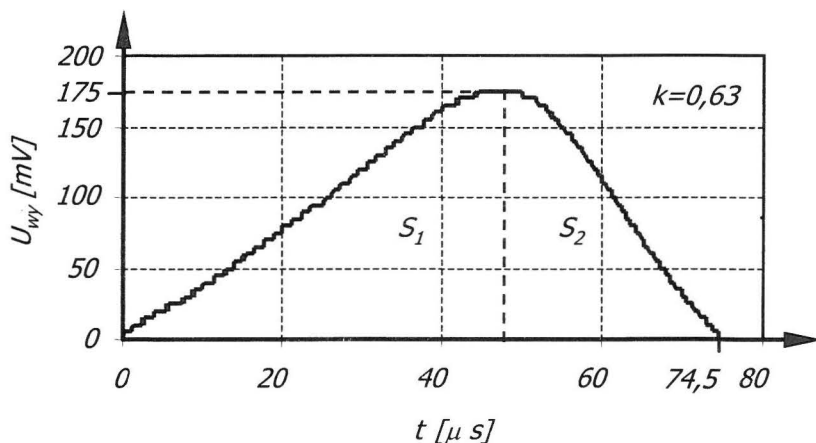
8.1. Badania udarowe wybranych nasion

Na Rys.45 przedstawiono układ pomiarowy skalibrowany przy pomocy kulki stalowej. Zastosowano go do badań udarowych wybranych nasion. Do tego celu wybrano nasiona roślin uprawnych takich jak: pszenica, rzepak, wyka i groch. Pomiarów wykonano w seriach po kilkadziesiąt uderzeń dla każdego z nasion, zrzuconych ze stałej wysokości $h=0,2\text{m}$.

Na Rys.47, Rys.48, i Rys.49, przedstawiono otrzymane przebiegi czasowe napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika piezoelektrycznego, dla trzech wybranych uderzeń ziarniaka pszenicy. Zostały one tak dobrane, aby znacznie różniły się między sobą pod względem amplitudy, czasu trwania i współczynnika restytucji.

Ponieważ ziarniak pszenicy odbiega od kształtu kulistego, oraz posiada zróżnicowane właściwości mechaniczne w zależności od miejsca uderzenia, można oczekiwać różnych odpowiedzi przetwornika piezoelektrycznego na uderzenie.

Na Rys.47 przedstawiono przebieg o najmniejszym współczynniku restytucji $k=0,63$, o najmniejszej amplitudzie napięcia wyjściowego $U_{max}=175\text{ mV}$, oraz o najdłuższym czasie kontaktu nasiona z przetwornikiem $t_i=74,5\text{ }\mu\text{s}$.

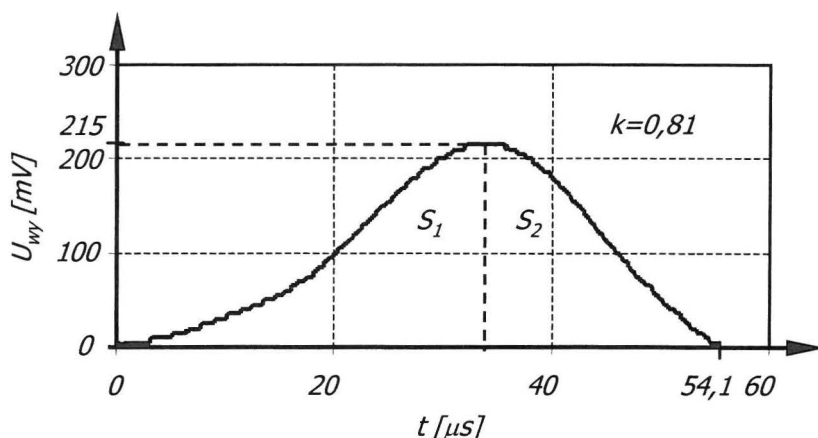


Rys.47. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia ziarniaka pszenicy dla współczynnika restytucji $k=0,63$.

Fig.47. Voltage waveform on transducer output terminals during wheat grain impacts at restitution coefficient of $k=0,63$.

Mała amplituda sygnału oraz niski współczynnik restytucji świadczą o tym, że przypadek ten jest uderzeniem w miejsce o najmniejszej twardości. Wynika z tego, że wystąpiła tu największa strata energii kinetycznej nasienia. Energia ta została pochłonięta przez tkanki badanego ziarniaka pszenicy.

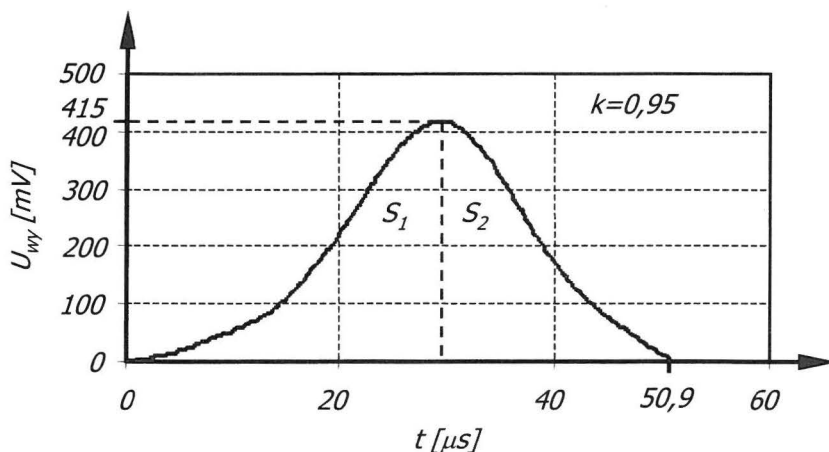
Na Rys.48 przedstawiono przebieg napięcia na zaciskach przetwornika podczas uderzenia tego samego ziarniaka pszenicy. Na otrzymanym przebiegu widać znaczny wzrost współczynnika restytucji $k=0,81$, wzrost amplitudy napięcia do wartości $U_{max}=215$ mV, oraz skrócenie czasu kontaktu do wartości $t_t=55,4$ μ s. Świadczy to o tym, że uderzenie wystąpiło w miejscu o większej twardości niż w poprzednim przypadku. Wystąpiły mniejsze straty energii. Większa wartość amplitudy napięcia świadczy o większej sile oddziaływania pomiędzy nasieniem a powierzchnią przetwornika.



Rys.48. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia ziarniaka pszenicy dla współczynnika restytucji $k=0,81$.

Fig.48. Voltage waveform on transducer output terminals during wheat grain impacts at restitution coefficient of $k=0,81$.

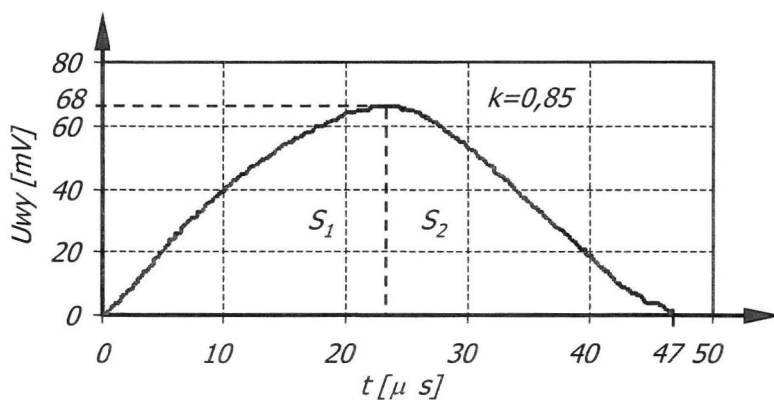
Na Rys.49 przedstawiono przebieg napięcia wyjściowego o największej amplitudzie $U_{max}=415$ mV, największym współczynnikiem restytucji $k=0,95$ oraz najkrótszym czasie oddziaływania $t_f=50,9$ μ s pomiędzy ziarniakiem a przetwornikiem. Świadczy to o największej twardości ziarniaka w miejscu kontaktu z przetwornikiem. W przypadku tym występuje największa siła oddziaływania podczas uderzenia, oraz najmniejsze straty energii. Wysoka wartość współczynnika restytucji sugeruje, że jest to uderzenie zbliżone do sprężystego. W badaniach tych nie uwzględniono efektu uderzenia mimośrodowego, którego opis zamieszczono w punkcie 2.1.4. Szczegółowe badania i analizę zależności siły i współczynnika restytucji od miejsca uderzenia ziarniaka pszenicy zamieszczono w punkcie 8.2.



Rys.49. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia ziarniaka pszenicy dla współczynnika restytucji $k=0,95$.

Fig. 49. Voltage waveform on transducer output terminals during wheat grain impacts at restitution coefficient of $k=0,95$.

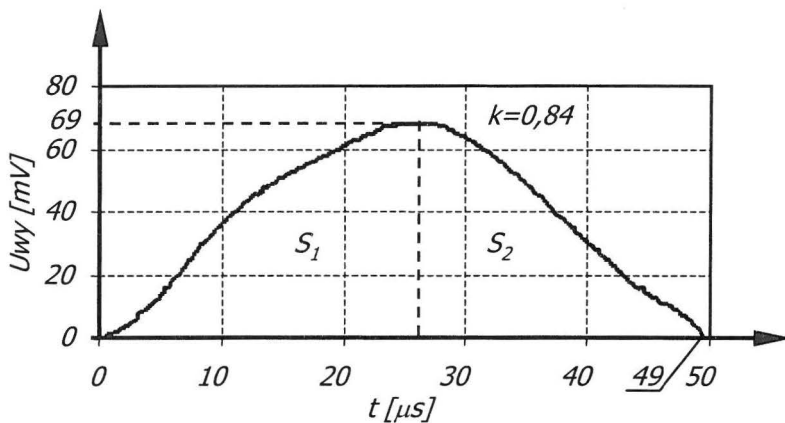
Na Rys.50, 51 i 52 przedstawiono przebiegi napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika piezoelektrycznego podczas uderzenia nasienia rzepaku.



Rys.50. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia rzepaku dla współczynnika restytucji $k=0,85$.

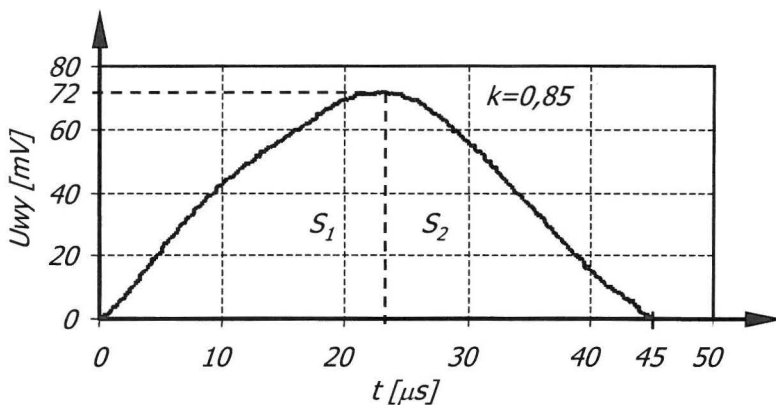
Fig.50. Voltage waveform on transducer output terminals during rape grain impacts at restitution coefficient of $k=0,85$.

Pomiary wykonano uderzając wielokrotnie tym samym nasieniem rzepaku ze stałą energią.



Rys.51. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia rzepaku dla współczynnika restytucji $k=0,84$.

Fig.51. Voltage waveform on transducer output terminals during rape grain impacts at restitution coefficient of $k=0,84$.

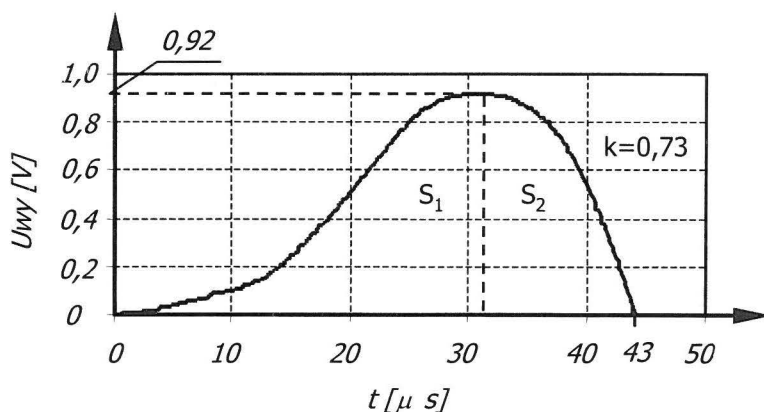


Rys.52. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia rzepaku dla współczynnika restytucji $k=0,85$.

Fig.52. Voltage waveform on transducer output terminals during rape grain impacts at restitution coefficient of $k=0,85$.

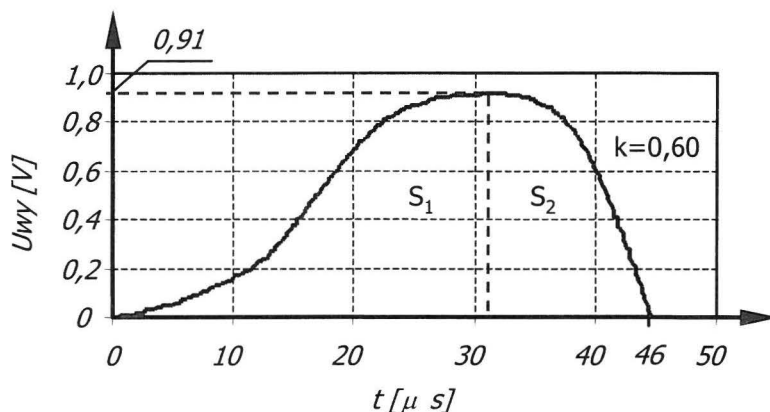
Na powyższych rysunkach widać niewielkie różnice pomiędzy poszczególnymi pomiarami uderzeniowymi. Współczynnik restytucji waha się w przedziale od $k=0,84$ do $k=0,85$, czas kontaktu zmienia się od $t_i=45 \mu s$ do $t_i=49 \mu s$. Dla tych uderzeń amplituda napięcia zmienia się od $U_{max}=68 \text{ mV}$ do $U_{max}=72 \text{ mV}$. Tak małe różnice pomiędzy poszczególnymi pomiarami wynikają z kształtu zbliżonego do kuli (nie występuje tu uderzenie mimośrodowe), oraz z mniejszego zróżnicowania twardości nasienia rzepaku w różnych miejscach na jego powierzchni. Spowodowane to jest układem liścienicy znajdujących się wewnątrz nasienia [7]. Małe wartości amplitudy napięcia wyjściowego wynikają z małej masy nasion, a zatem z małej energii uderzenia.

Na Rys.53 i 54, przedstawiono typowe przebiegi napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika piezoelektrycznego dla uderzenia nasienia grochu. Na rysunkach tych widać większe zróżnicowanie współczynnika restytucji, od $k=0,60$ do $k=0,73$, niż dla rzepaku.



Rys.53. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia grochu dla współczynnika restytucji $k=0,73$.

Fig.53. Voltage waveform on transducer output terminals during pea seed impacts at restitution coefficient of $k=0,73$.



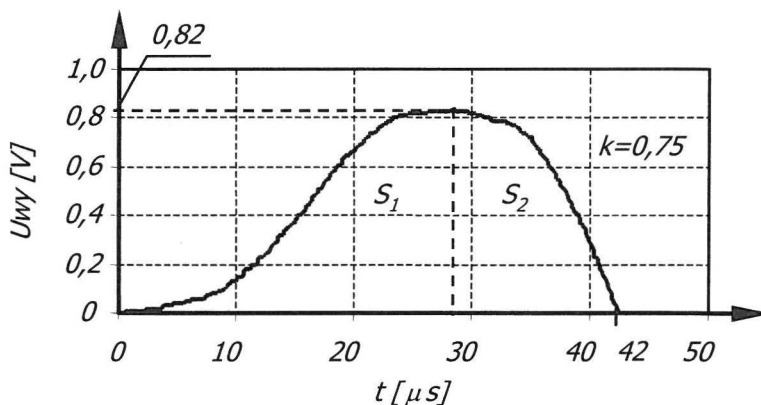
Rys.54. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia grochu dla współczynnika restytucji $k=0,60$.

Fig.54. Voltage waveform on transducer output terminals during pea seed impacts at restitution coefficient of $k=0,60$.

Tak znaczne zróżnicowanie współczynnika restytucji przy nasionach zbliżonych kształtem do kuli należy tłumaczyć budową wewnętrzną nasienia. Składa się ono z okrywy nasiennej wewnątrz której, znajdują się dwa liścienie. W zależności od miejsca uderzenia może wystąpić zróżnicowana odpowiedź przetwornika na uderzenie [2]. W szczególności można się spodziewać mniejszej wartości współczynnika restytucji dla uderzenia w boczną powierzchnię liścieni, ponieważ takie uderzenie powoduje przemieszczanie się liścieni wewnątrz okrywy nasiennej, a więc większe straty energii podczas uderzenia.

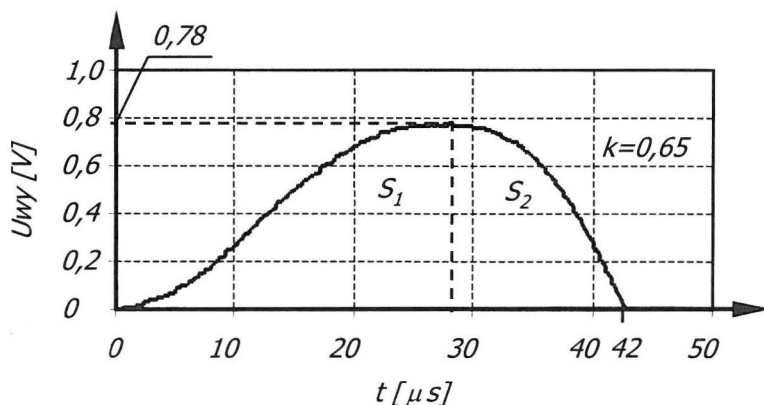
Duża amplituda napięciowego sygnału wyjściowego przetwornika wynika z dużej masy nasion grochu, co wiąże się z dużą energią uderzenia.

Na Rys.55 i 56, przedstawiono przebiegi napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika piezoelektrycznego dla uderzenia nasienia wyki. Wyniki te są podobne do przedstawionych na Rys.53 i 54. Spowodowane są one podobną budową nasion wyki i grochu. Mniejsza amplituda sygnału wyjściowego wynika z mniejszej masy nasion wyki w stosunku do grochu.



Rys.55. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia wyki dla współczynnika restytucji $k=0,75$.

Fig.55. Voltage waveform on transducer output terminals during vetch grain impacts at restitution coefficient of $k=0,75$.



Rys.56. Przebieg napięcia na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia nasienia wyki dla współczynnika restytucji $k=0,65$.

Fig.56. Voltage waveform on transducer output terminals during vetch grain impacts at restitution coefficient of $k=0,65$.

Otrzymane wyniki pomiarów przedstawione na Rys.55 i 56 wskazują, że wartość współczynnika restytucji nie przekracza jedności co jest zgodne z teorią uderzenia. Zauważono ponadto, że wraz ze wzrostem masy i energii rośnie amplituda sygnału otrzymywanego podczas uderzenia. Czas kontaktu nasienia

z przetwornikiem zależy od rodzaju uderzenia i miejsca uderzenia. Dla uderzeń mimośrodowych czas jest dłuższy niż przy uderzeniu prostym i środkowym, co sugerują badania uderzeniowe dla ziarniaka pszenicy. Ponadto znaczne zróżnicowanie budowy wewnętrznej ziarniaka pszenicy powoduje duże różnice odpowiedzi otrzymywanych dla tego ziarniaka.

Należy zaznaczyć, że w przeprowadzonych pomiarach nie wykonywano badań niszczących badane próbki. Uderzenia wykonywane przy większych energiach, a zatem większych siłach oddziaływania powinny powodować obniżenie wartości współczynnika restytucji.

Znaczne zróżnicowanie przebiegów napięcia wyjściowego, jego amplitudy, czasu trwania uderzenia, i wartości współczynnika restytucji, którego wartość nie przekracza liczby jeden, świadczą o poprawności przetwarzania przetwornika piezoelektrycznego współpracującego z układem pomiarowym.

8.2. Badanie wpływu miejsca uderzenia ziarniaka pszenicy na wartość współczynnika restytucji i na wielkość siły uderzeniowej

Stanowisko badawcze przedstawione na Rys.45 wykorzystano do badań uderzeniowych ziarniaka pszenicy odmiany Roma poddawanego wielokrotnym uderzeniom w wybrane miejsca na jego powierzchni. Pozwalało ono na rejestrację przebiegu napięcia pojawiającego się na zaciskach wyjściowych przetwornika podczas uderzenia ziarniaka [2, 1, 4].

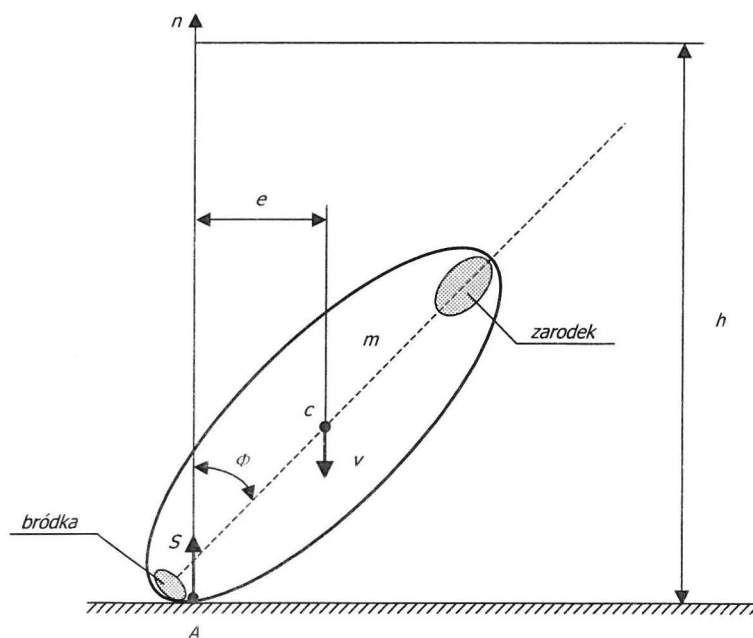
Doświadczenie polegało na tym, że na gładką metalizowaną powierzchnię przetwornika piezoelektrycznego spadał ziarniak z wysokości $h=0,3$ m. Starano się tak prowadzić doświadczenie, aby spadający ziarniak przez cały czas lotu poruszał się jedynie ruchem prostoliniowym i w momencie zderzenia przy prędkości liniowej V i obrotowej $\omega_0=0$, jego oś główna była nachylona do powierzchni uderzanej pod kątem od $\Phi=0^\circ$ do $\Phi=180^\circ$ w stosunku do powierzchni normalnej. Na Rys.57 przedstawiono widok ziarniaka podczas jego uderzenia w przeszkodę.

Spadający ziarniak uderzany był w różne miejsca na powierzchni, zależnie od wartości kąta Φ nachylenia osi głównej ziarniaka w chwili jego zetknięcia z powierzchnią uderzaną.

Do zaznaczenia miejsca uderzenia ziarniaka, wykorzystano ciekłą warstwę barwnika w postaci sadzy, którą pokryto powierzchnię przetwornika. Po uderzeniu pozostawiała ona znak na powierzchni ziarniaka w miejscu jego kontaktu z przetwornikiem.

Po uderzeniu ziarniaka w przetwornik, pozostawiony znak był porównywany ze skalą, która pozwalała określić kąt nachylenia osi głównej ziarniaka od powierzchni normalnej z rozdzielczością do 10° .

Do badań przyjęto ziarniak pszenicy odmiany Roma, średniej wielkości, wybrany z próbki o masie 200 g. Próbkę była przechowywana w komorze klimatyzacyjnej VEB Mytron typ RPW1.



Rys.57. Widok ziarniaka podczas zetknięcia z przeszkodą: S - impuls siły chwilowej, w punkcie zetknięcia A ziarniaka z przeszkodą, v - prędkość środka ciężkości c ziarniaka w ruchu przostoliniowym, Φ - kąt nachylenia osi głównej ziarniaka do osi normalnej uderzenia, e - odległość środka masy ziarniaka od normalnej uderzenia.

Fig.57. The image of grain during contact with an obstacle: S - instant force impulse in the point A of contact between grain and an obstacle, v - velocity of the centre of gravity c of the grain in translatory motion, Φ - the inclination angle of the grain main axis to the normal axis of impact in translatory motion, e - the distance of the grain mass centre from the normal of impact.

Przed pomiarami uderzeniowymi wilgotność próbki zmierzono miernikiem pojemnościowym Grainer II typ PM300 z dokładnością do $\pm 0,5\%$. Masa klimatyzowanej próbki podyktowana jest minimalną ilością mierzonego materiału niezbędnego do pomiaru wilgotności wynikającej z objętości komory pomiarowej zastosowanego miernika. Właściwości wybranego ziarniaka o symetrycznym kształcie i średniej wielkości podano w Tabeli 3.

Tabela 3. Właściwości badanego ziarniaka.

Table 3. Tested grain properties.

Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Wilgotność [%]	Masa [g]
5,90	3,60	3,05	11,0	$43,0 \times 10^{-3}$

Ziarniak pszenicy można traktować jako obiekt o kształcie elipsoidy uderzający w płaską powierzchnię. Jest to przypadek uderzenia mimośrodowego.

W analizie tego przypadku można przyjąć, że ziarniak o masie m_1 spada w ruchu postępowym z prędkością v w momencie uderzenia o gładką i płaską powierzchnię przetwornika o niewspółmiernie większej masie m_2 od masy ziarniaka.

Przez e oznaczono odległość środka masy ziarniaka od osi normalnej uderzenia przechodzącej przez punkt styku i prostopadłej do powierzchni uderzanej, a przez i promień bezwładności ziarniaka względem osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku i przechodzącej przez środek masy c .

W chwili zderzenia impuls siły chwilowej obliczamy z zależności [30]:

$$S = (1 + k) \frac{m_1 v}{1 + \frac{e^2}{i^2}} \quad (64)$$

Dla zderzeń prostych i środkowych ($e = 0$) zależność (64) upraszcza się do postaci:

$$S = (1 + k) m_1 v \quad (65)$$

Część energii uderzenia zostaje zużyta na nadanie ziarniakowi prędkości obrotowej ω :

$$\omega = -(1+k) \frac{V}{1 + \frac{e^2}{i^2}} \cdot \frac{e}{i^2}. \quad (66)$$

Strata energii kinetycznej wywołana przez uderzenie mimośrodowe zależna jest nie tylko od wartości współczynnika restytucji, lecz także od miejsca uderzenia, zgodnie z równaniem [30]:

$$\Delta E = (1 - k^2) \frac{m_1}{2} (v_s - i^2 \omega^2). \quad (67)$$

Znak minus we wzorze na ω oznacza, że po uderzeniu rozpatrywany ziarniak zacznie obracać się w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara.

Przeprowadzone badania miały wykazać, jaki jest wpływ miejsca uderzenia na wartość i przebieg impulsu siły działającej na ziarniak przy stałej energii uderzenia.

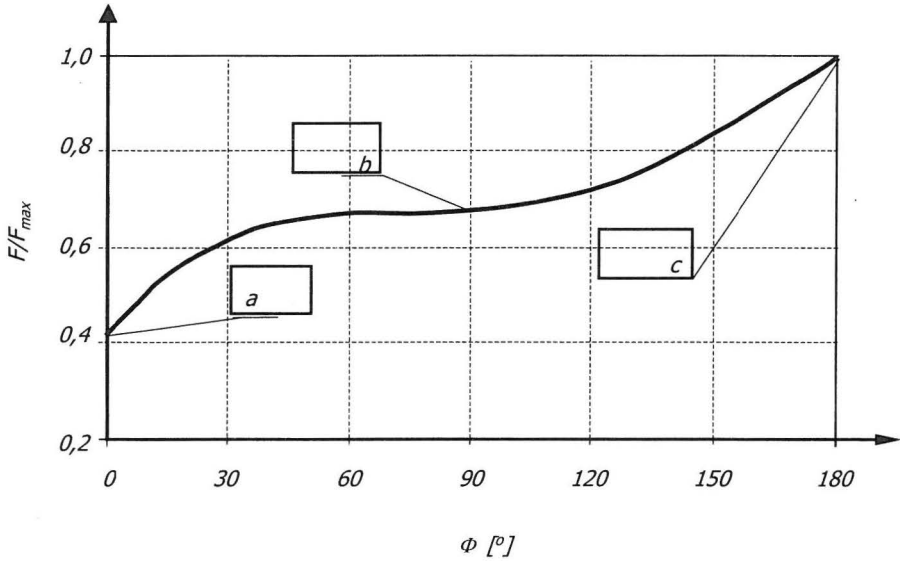
W przeprowadzonym eksperymencie występują dwa rodzaje uderzeń przedstawione i omówione w punkcie 2.1.1 i 2.1.3. Jednym z najczęściej występujących jest uderzenie mimośrodowe. Ten rodzaj uderzenia został zilustrowany na Rys.57. Uderzenie mimośrodowe wynika głównie z kształtu ziarniaka, który jest zbliżony do elipsoidy wydłużonej. Występuje ono wtedy gdy oś normalna uderzenia nie przechodzi przez środek masy ziarniaka. Powoduje ono oprócz zmiany wektora prędkości nadanie ziarniakowi prędkości kątowej ω .

Drugim rodzajem uderzenia występującym zdecydowanie rzadziej jest uderzenie proste i środkowe. Jest to ten szczególny przypadek, w którym normalna oś uderzenia przechodzi przez środek masy ziarniaka. W przypadku tym zmienia się tylko kierunek wektora prędkości oraz jego wartość, która jest zmniejszona o straty występujące podczas uderzenia. W przypadku tym nie pojawia się prędkość kątowa powodująca rotację ziarniaka.

Z analizy zależności (67) wynika, że dla ciał zwartych i izotropowych największe siły oddziaływania przy kształcie elipsoidalnym zbliżonym do badanego ziarniaka wystąpią przy zderzeniu prostym i środkowym, gdyż w tym

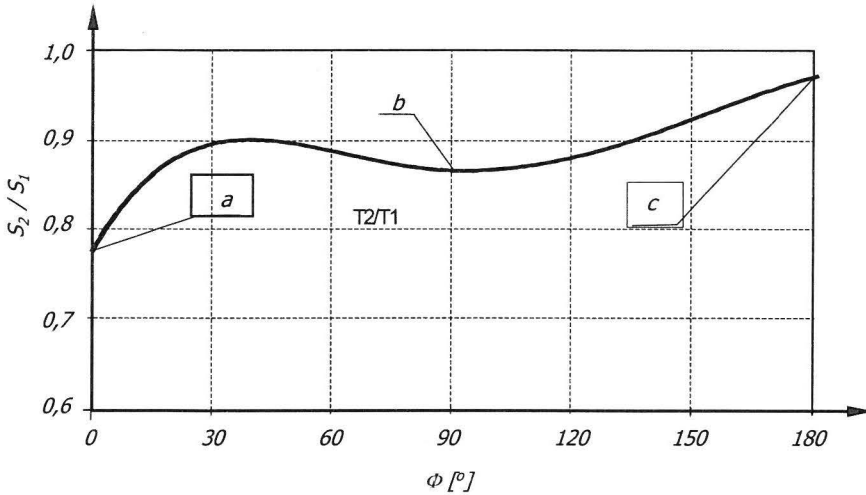
przypadku niemal cała energia kinetyczna uderzenia zamienia się na energię potencjalną. Dotyczy to uderzenia dla kąta $\Phi=0^\circ$, $\Phi=90^\circ$, $\Phi=180^\circ$.

Na podstawie doświadczeń metrologicznych należy domniemywać, że w przypadku ziaren zbóż, w większości przypadków mamy do czynienia z uderzeniem mimośrodowym.



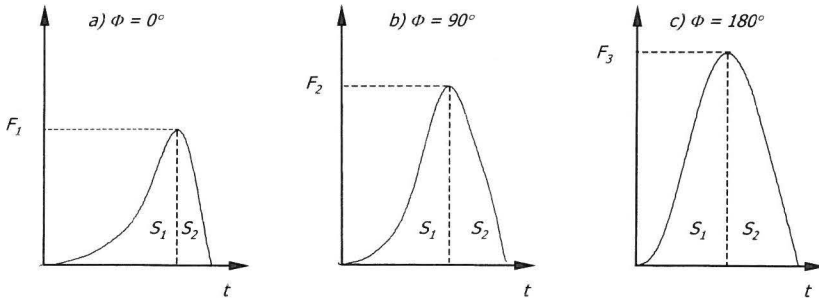
Rys.58. Przebieg wartości względnej siły F/F_{max} w funkcji kąta nachylenia osi głównej ziarniaka Φ do osi normalnej uderzenia: *a* - uderzenie w bródkę, *b* - uderzenie w grzbiet, *c* - uderzenie w zarodek.

Fig.58. The waveform of relative force values vs the inclination angle of the grain main axis to the normal axis of impact: *a*- impact in a the tip of a sea, *b*- impact in a crest, *c*- impact in a germ.



Rys.59. Przebieg współczynnika restytucji $k=S_2/S_1$ w funkcji kąta nachylenia Φ osi głównej ziarniaka do osi normalnej uderzenia.

Fig.59. The waveform of restitution coefficient $k=S_2/S_1$ vs the inclination angle of the grain main axis to the normal axis of impact.



Rys.60. Przebieg wartości siły F w czasie dla kąta $\Phi = 0^\circ$, $\Phi = 90^\circ$, $\Phi = 180^\circ$.

Fig.60. F force waveform in time for the following angles: $\Phi = 0^\circ$, $\Phi = 90^\circ$, $\Phi = 180^\circ$.

Na Rys.58 przedstawiono przebiegi zmian wartości siły $F = f(\Phi)$. Wynika z niego, że siła oddziaływania jest ściśle związana z miejscem uderzenia. Najmniejsza jej wartość występuje dla uderzenia w bródkę $F=0,42 F_{max}$, czyli dla kąta $\Phi=0^\circ$. Wynika to z właściwości mechanicznych tkanki ziarniaka, która

w tym obszarze jest miękka. Średnią wartość siły podczas uderzenia zarejestrowano dla uderzenia w grzbiet ziarniaka. Dla tego przypadku kąt nachylenia osi głównej ziarniaka do powierzchni przetwornika wynosi $\Phi=90^\circ$ a siła oddziaływania $F=0,66 F_{max}$. Maksymalna siła oddziaływania wystąpiła dla uderzenia od strony zarodka czyli dla kąta $\Phi=180^\circ$.

Na Rys.59 przedstawiono przebieg zmian wartości współczynnika restytucji w funkcji kąta Φ . Widać wyraźnie, że jest on najmniejszy dla uderzenia w bródkę $k=0,77$ czyli dla kąta $\Phi=0^\circ$. Następnie widać wzrost wartości współczynnika restytucji co należy tłumaczyć zmianą właściwości mechanicznych badanego ziarniaka. Przy uderzeniu w grzbiet $\Phi=90^\circ$ stwierdzono niewielki spadek wartości tego współczynnika w stosunku do uderzenia dla kąta $\Phi=30^\circ$, do wartości $k=0,87$. Największą wartość współczynnika restytucji otrzymano dla uderzenia od strony zarodka czyli dla kąta $\Phi=180^\circ$, dla którego $k=0,97$.

W przypadku ciała o strukturze jednorodnej w tych trzech przypadkach powinna wystąpić maksymalna siła jak to wynika z zależności (65).

Odstępstwa od przebiegu teoretycznego wynikającego z zależności (65) należy tłumaczyć zróżnicowaną budową anatomiczno-morfologiczną [17, 18] badanego ziarniaka w rozpatrywanych strefach uderzenia.

Z mechanicznego punktu widzenia, najbardziej niekorzystne z uwagi na możliwość jego uszkodzenia jest uderzenie ziarniaka od strony zarodka, gdyż w tym przypadku cała energia kinetyczna zderzenia zamienia się w energię potencjalną odkształcenia tej strefy, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo uszkodzenia tej części ziarniaka. Przedstawione wyniki badań wskazują wyraźnie na mniejszą odporność ziarniaków przy uderzeniu od strony zarodka ($\Phi=180^\circ$). Przeprowadzone badania są potwierdzeniem i wyjaśnieniem przyczyn zróżnicowanej odporności na uderzenie ziarniaków pszenicy uzyskanych przez Szweða [42] podczas niszczących badań laboratoryjnych, gdy ziarniaki zostały uderzane z taką samą energią w część grzbietową i w bródkę Rys.9.

Nie prowadzono takich badań, ale należy domniemywać, że większe dysproporcje w odporności na uderzenie ziarniaków w grzbiet i w bródkę, mają swoje odniesienie także w większej różnicy w wartościach ich współczynników restytucji k .

Przeprowadzone badania wykazały, że w materiale roślinnym jakim są nasiona, istnieje dość zróżnicowana reakcja na siły zewnętrzne powstałe w wyniku zderzenia i że zależy ona w znacznej mierze od miejsca uderzenia. Świadczy to o poprawności i celowości przeprowadzonego eksperymentu, co ma istotne znaczenie w przypadku prowadzenia badań nad odpornością nasion na uderzenie i ich uszkodzeniami.

8.3. Badania wpływu wilgotności nasion na wartość współczynnika restytucji

Właściwości mechaniczne nasion zależą również od wilgotności co przedstawiono w punkcie 3. Wynika z niego, że istnieje pewien przedział wilgotności nasion przy której są one najmniej podatne na uszkodzenia.

Znalezienie łatwego sposobu określania tej wilgotności pozwoliłoby na zmniejszenie strat powstających podczas obróbki nasion.

Do badań wybrano nasiona wyki i grochu ze względu na kształt zbliżony do kuli. Pozwoliło to na zminimalizowanie efektu uderzenia mimośrodowego.

Nasiona nawilżano sztucznie od wilgotności 10 % do 22 % w przedziałach, co 2% z dokładnością do $\pm 0,5\%$.

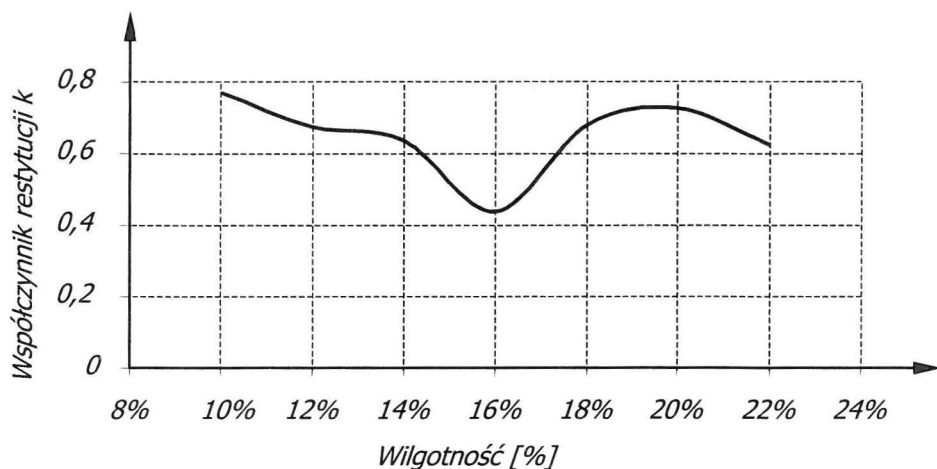
Nasiona zrzucano swobodnie na przetwornik piezoelektryczny sprzężony z układem pomiarowym z wysokości $h=20$ cm, tak jak w punkcie 8.1. Z otrzymanego przebiegu siły w czasie obliczono powierzchnię pól S_1 i S_2 a następnie współczynnik restytucji $k=S_2/S_1$.

Do każdej próby użyto 30 nasion w trzech powtórzeniach o zbliżonej wielkości i masie. Z otrzymanych pomiarów wyliczono średnią arytmetyczną wartości współczynnika restytucji.

Przeprowadzone badania jednoznacznie ujawniły wpływ wilgotności nasion na zmianę wartości współczynnika restytucji dla wybranych nasion [1, 6,]. Na Rys.61 przedstawiono zależność współczynnika restytucji k od wilgotności nasion wyki.

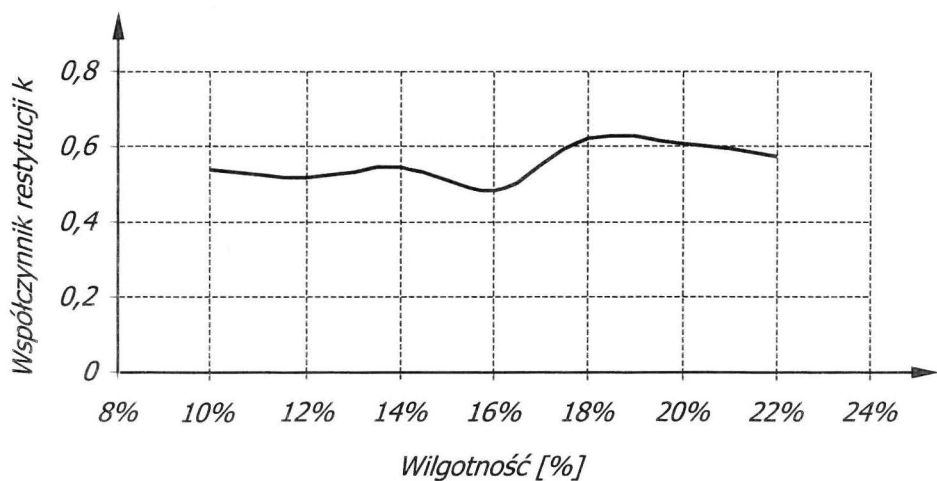
Na Rys.61 widać, że wzrost wilgotności nasion wyki do 16 % powodował spadek współczynnika restytucji k do wartości minimalnej 0,42. Dalszy wzrost wilgotności do 20 % powodował jego wzrost do wartości 0,78. Przy wzroście wilgotności w nasionach wyki powyżej 20 % zauważono spadek wartości współczynnika restytucji. Tak, więc zakres wilgotności 15 %-17 % jest dla nasion

wyki przedziałem, przy którym osiągają najmniejszy współczynnik restytucji. Zmniejszenie wartości współczynnika restytucji powoduje zmniejszenie wartości maksymalnej siły występującej podczas uderzenia.



Rys.61. Zależność współczynnika restytucji k od wilgotności w dla nasion wyki.

Fig.61. The dependence of restitution coefficient on relative water content for vetch seed.



Rys.62. Zależność współczynnika restytucji k od wilgotności w dla nasion grochu.

Fig.62. The dependence of restitution coefficient on relative water content for pea seed.

Na Rys.62 przedstawiono zależność współczynnika restytucji k od wilgotności w dla nasion grochu. Dla wilgotności 15,8 % pojawia się minimalna wartość tego współczynnika, który wynosi $k=0,47$. Dla nasion grochu zauważono mniejszy wpływ wilgotności na wartość współczynnika restytucji niż dla nasion wyki. Oznacza to mniejszą zależność siły uderzeniowej od wilgotności dla nasion grochu.

Przypuszczalnie badane nasiona wyki i grochu w zakresie wilgotności, przy której występuje najmniejsza wartość współczynnika restytucji są mniej podatne na uszkodzenia podczas oddziaływania na nie sił pochodzenia dynamicznego. Ich właściwości lepko-sprężyste dla omawianej wilgotności powodują pochłanianie energii od uderzeń. Lokalnie występują znaczne odkształcenia nie powodujące uszkodzeń. Dalsze zwiększenie wilgotności nasion powoduje że, woda wypełnia materiał biologiczny nasion zwiększając ich jędrność, zwiększa się współczynnik restytucji i prawdopodobieństwo uszkodzeń nasion podczas ich zderzenia z przeszkodą.

Z przeprowadzonych badań wynika, że można określić taką wilgotność nasion, przy której prawdopodobnie wystąpią najmniejsze uszkodzenia nasion. Przyczyniłoby się to do obniżenia strat podczas zbiorów oraz obróbki pozbiorowej.

Zmiana wilgotności nasion grochu i wyki w granicach 10%÷22% wywołuje nieliniową charakterystykę współczynnika restytucji. Wynika stąd prawdopodobnie zróżnicowana podatność nasion na uszkodzenie w zależności od ich wilgotności.

Obniżenie strat podczas zbiorów oraz obróbki pozbiorowej stwierdził Strona [38]. Najmniejsze uszkodzenia nasion kukurydzy wystąpiły przy wilgotności około 16 %. Potwierdzenie wyników otrzymanych przez Stronę świadczy o poprawności zastosowanej metody pomiarowej, oraz o możliwości jej wykorzystania podczas doboru parametrów roboczych elementów maszyn rolniczych.

9. PERSPEKTYWY WYKORZYSTANIA PRZETWORNIKÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH W BADANIACH PROWADZONYCH DLA PRZEMYSŁU ROLNO-SPOŻYWCZEGO

Mechanizacja zbioru nasion roślin uprawnych oraz mechanizacja obróbki pozbiorowej, często prowadzi do uszkodzeń mechanicznych, uniemożliwiających dalsze ich wykorzystanie do siewu lub przetwórstwa.

Przeprowadzone badania pozwolą na opracowanie metodyki badań odporności nasion na uszkodzenia mechaniczne w zależności od ich wilgotności, podczas ich zbioru oraz podczas obróbki pozbiorowej. Ich istotą jest wykorzystanie laboratoryjnej metody udarowej przy zastosowaniu przetwornika piezoelektrycznego. Przetwornik piezoelektryczny sprzężony z układem pomiarowym pozwala na rejestrację przebiegu siły w czasie uderzenia nasienia w przeszkodę.

Realizacja szeroko zakrojonych badań pozwoli na łatwe określenie wpływu wilgotności nasion na siły oddziaływania oraz na wartość współczynnika restytucji podczas uderzenia. Pozwoli także na dobór parametrów roboczych elementów maszyn rolniczych w celu minimalizacji uszkodzeń materiału siewnego w trakcie zbioru i obróbki pozbiorowej.

10. STRESZCZENIE

W prezentowanym opracowaniu przedstawiono nową metodę pomiarową sił uderzeniowych nasion o przeszkodę stałą przy wykorzystaniu przetworników piezoelektrycznych. Metoda ta pozwala na rejestrację przebiegu siły uderzeniowej nasion. Przetworniki piezoelektryczne są wykorzystywane w technice pomiarowej jako sensory drgań, przetworniki siły, oraz w hydrolokacji. Przetworniki piezoelektryczne najlepiej nadają się do szybkozmiennych pomiarów dynamicznych ze względu na ich charakterystykę częstotliwościową. Te właściwości zainspirowały autora do ich wykorzystania w mało rozwiniętych badaniach dynamicznych reakcji nasion. Pomiary prowadzone przez innych autorów ograniczały się tylko do oceny skutków uderzenia i nie pozwalały na ocenę wpływu czynników zewnętrznych na wielkości sił uderzeniowych oraz ich przebiegu w czasie.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano jeden typ przetwornika wraz z całym układem pomiarowym. Zastosowanie lepszych przetworników, modyfikacja układu może pozwolić na badania dynamiczne nasion z większą dokładnością odwzorowania przebiegu siły uderzeniowej. Automatyzacja układu pomiarowego ułatwiłaby prowadzenie pomiarów, oraz umożliwiła przeprowadzenie pomiarów na szerszą skalę.

S ł o w a k l u c z o w e: przetworniki piezoelektryczne, uderzenie, współczynnik restytucji, nasiona roślin uprawnych.

11. SUMMARY

Dynamic reaction of grain to impact load

This publication presents a new measurement method for impact force of grain on a solid obstacle with the use of piezoelectric transducers. This method makes possible to register the grain impact force waveform. Piezoelectric transducers are used in measurements as sensors of vibrations, force converters and in echo ranging. Piezoelectric transducers are the most useful for dynamic quick-variable measurements because of their frequency characteristics. These properties inspired the author to use them in not so well developed dynamic tests of grain reactions. Measurements carried by other authors were limited only to the results of impacts and did not let for the evaluation of the influence of external factors on impact forces and their time waveforms.

One type of a transducer with the whole measuring system has been used in the carried research. The application of better transducers and some modification of the system can make possible to carry out dynamic tests of grain with higher precision of representation of impact force. Automation of this measuring system could ease and extend them.

K e y w o r d s: piezoelectric transducers, impact, restitution coefficient, seeds of cultivated plants.

12. LITERATURA

1. Boguta A., Szwed G., Horyński M.: *Reflection factor changes in some seeds depending on their moisture*, TAE 99, Praga, 1999, s. 20-24
2. Boguta A., Szwed G.: *Konstrukcja i zasada działania urządzenia do oceny reakcji dynamicznych nasion podczas ich zderzenia*, VII Sympozjum im. Prof. Czesława Kanafojskiego, Płock, 1997, tom II, s.274-279
3. Boguta A.: *Identyfikacja przetwornika piezoelektrycznego jako przetwornika sił zmiennych w czasie*, ZKwE'2000 Poznań/Kiekrz, 2000, s.691-692
4. Boguta A.: *Konstrukcja systemu pomiarowego z przetwornikiem piezoelektrycznym do pomiaru sił zmiennych w czasie*, ZKwE'99 Poznań/Kiekrz, 1999, s.389-390
5. Boguta A.: *The Identyfication of piezoelectric transducers as the sensor of time dependent forces*, Proceedings of the II. International Conference of Young Scientists 2000, Nitra 2000, s. 260-265
6. Boguta A.: *Wpływ wilgotności nasion na wartość współczynnika restytucji*, Materiały konferencyjne, Maszyna-Gleba-Roślina, Wrocław, 2000, s. 41-44
7. Bulsiewicz T., Matzke W.: *Magazynowanie ziarna zbóż nasion strączkowych i oleistych*, WNT, Warszawa, 1975
8. Dinnik A.: *Ubar i szatie uprugich tel*, Izwestija Kijewskiego politechniczekogo instituta, 1909
9. Dobrogurskij S. *K woprosy o naprżażenijach i usilijach pri udare, sb, Woprosy rasczeta i konctruirowanija detalej maszin*, AN CCCP 1942
10. Eykhoff P.: *Identyfikacja w układach dynamicznych*, PWN, Warszawa, 1980
11. Fanning and Basset.: *Maesurment of impact strains by a Carbon-strip exstensometr*, Journal of applied Mechanics, Nr 3 1940
12. Findeisen W.: *Technika regulacji automatycznej*, PWN, Warszawa, 1978
13. Gajda J., Szyper M.: *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*, Jartek s.c. 1998
14. Giergiel J., Rosiński J., Uhl T. *Metoda identyfikacji układów mechanicznych przy wymuszeniu uderzeniowym*, Archiwum budowy maszyn,1986, tom XXXIII, z. 3, s. 321-337
15. Gniewińska B., Klimek C.: *Rezonatory i generatory kwarcowe*, WKiŁ, Warszawa, 1980
16. Gryboś R.: *Teoria uderzenia w dyskretnych układach mechanicznych*, PWN, Warszawa, 1969

17. Grzesiuk St., Górecki R.: *Fizjologia plonów, wprowadzenie do przechowalnictwa*, WART, Olsztyn, 1994
18. Grzesiuk St., Kulka K.: *Fizjologia i biochemia nasion*, PWRiL, Warszawa, 1981
19. Hagel R., Zakrzewski J.: *Miernictwo dynamiczne*. WNT Warszawa 1984
20. Hagel R.: *Miernictwo wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi*, Skrypt, Gliwice, 1975
21. Jagodziński Z.: *Przetworniki ultradźwiękowe*, WKiŁ, Warszawa, 1997
22. Kaczorek T.: *Teoria regulacji automatycznej*, PWN, Warszawa, 1973
23. Kaczorek T.: *Teoria sterowania*, tom I, PWN, Warszawa, 1977
24. Katalog.: AVL, Piezoelectric High Pressure Transducers, 1996
25. Katalog.: National Semiconductor Corporation Cat.No.RdR-B300M115, 1995
26. Katalog.: Piezoelectric Ceramic Sensors (Piezotitle), Murata Manufacturing Co.,Ltd, 1994
27. Krauss M., Woschni E.: *Systemy pomiarowo-informacyjne*, PWN, Warszawa, 1979
28. Król A., Moczko J.: *Pspice, Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych*, Nakom, Poznań, 1998
29. Łapiński M., Włodarski W.: *Miernictwo wielkości nieelektrycznych, Przetworniki pomiarowe*, WNT, Warszawa, 1970
30. Lejko J.: *Mechanika ogólna, Dynamika*, PWN, Warszawa, 1997
31. Lipka J.: *Wytrzymałość maszyn wirnikowych*, WNT, Warszawa, 1967
32. Mathcad 2000.: *Reference Manual*, MathSoft, 1999
33. Mathcad 2000.: *User's Guide*, MathSoft, 1999
34. Ponomarew S.: *Współczesne metody obliczeń wytrzymałościowych w budowie maszyn*, WNT, Warszawa, 1957
35. Seippel R.: *Transducers, Sensors and Detectors*, Reston Publishing Company, Virginia, 1983
36. Soclof S.: *Zastosowanie analogowych układów scalonych*, WKiŁ, Warszawa, 1991
37. Sosnowski St.: *Ocena wpływu niektórych zespołów młócących na poziom mechanicznych uszkodzeń nasion fasoli*, Zeszyty naukowe AR Kraków, 1991, Rozprawa habilitacyjna, Nr 162
38. Strona L.: *Uszkodzenia nasion, przyczyny i zapobieganie*, PWRiL, 1977
39. Szot B.,Kutzbach H.: *Rapeseed damage as influenced by the dynamic load*, International Agrophysics, 1992, 6. s. 103-115
40. Szumilewicz B., Słomski B., Styburski W.: *Pomiary elektroniczne w technice*, WNT, Warszawa, 1982

41. Szwed G., Tys J., Fałęcki A., Łukaszuk J.: *Wykorzystanie metody dynamicznej w ocenie podatności na uszkodzenia nasion zbóż i rzepaku*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 1995, z. 427, s. 87-90
42. Szwed G., Tys J., Tarkowski Cz.: *Powstawanie makro i mikrouszkodzeń w ziarniakach pszenicy w zależności od miejsca uderzenia*, Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 1997, Nr 204, s. 277-284
43. Szwed G., Tys J.: *Resistance of rape seeds to the impact of dynamic forces*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 1995, z. 427, s. 83-86
44. Szwed G., Tys J.: *Susceptibility of rape seeds to dynamic damages depending on moisture and storage time*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 1995, z. 427, s. 87-90
45. Szwed G.: *Metodyczne aspekty badań udarnościowych nasion*, maszynopis, Lublin, 1996
46. Tietze U., Schenk Ch.: *Układy półprzewodnikowe*, WNT, Warszawa, 1987
47. Tys J., Szwed G., Fałęcki A., Łukaszuk J.: *Wykorzystanie metody dynamicznej w ocenie podatności na uszkodzenia nasion zbóż i rzepaku*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 1996, z. 425, s. 265-268
48. Tys J., Szwed G., Szot B., Malicki A.: *Method of Estimation of Permissible Impact Energy for Rapeseed*, Int. Agrophysics, 1994, 8, s. 367-376
49. Tys J., Szwed G.: *Dynamic Resistance of rapeseeds*, Ag Eng, Madrid, 1996, 96F-020
50. Tys J., Szwed G.: *Rapeseed Storage and Their Mechanical Strength*, International Agrophysics 2000, 14, s. 255-257
51. Wiśniewski M., Żero A.: *Mathcad Plus 6.0*, EXIT, Warszawa, 1996
52. Zięba S.: *Analiza drgań*, tom I i II, PWN Warszawa 1957

Adres autora

Dr inż. Artur Boguta
Politechnika Lubelska
Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki Ogólnej
ul. Nadbystrzycka 38A
20-618 Lublin
tel: +48 1033 815381301
e-mail: artbog@elektron.pol.lublin.pl