

## DYNAMICZNE METODY POMIARU WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH OWOCÓW I WARZYW

*Krzysztof Gołacki, Paweł Rowiński*

Zakład Teorii Maszyn i Automatyki, Katedra Podstaw Techniki, Akademia Rolnicza  
ul. Doświadczalna 50A, 20-280 Lublin  
e-mail: krzysztof.golacki@ar.lublin.pl

**Streszczenie.** W pracy dokonano przeglądu dynamicznych metod pomiaru własności mechanicznych owoców i warzyw. Szczególną uwagę zwrócono na wskaźniki umożliwiające ocenę wrażliwości na obicia na podstawie jednoznacznie określonych cech wytrzymałościowych, a nie zmianach fizjologicznych. Zaprezentowano własną konstrukcję stanowiska, na którym możliwe jest wyznaczenie progu obicia i odporności na obicie jabłek. Zaprezentowano wyniki badań testowych.

**Słowa kluczowe:** obciążenia dynamiczne, próg obicia, energia obicia

### WSTĘP

Powszechnie wiadomo, iż znaczna część owoców i warzyw ulega mechanicznym uszkodzeniom w trakcie procesów technologicznych. Materiały te narażone są na mechaniczne uszkodzenia zarówno podczas zbioru, załadunku, transportu jak i przechowywania. Do uszkodzeń tych można zaliczyć między innymi nacięcia, otarcia i obicia. Wyeliminowanie dwóch pierwszych wymaga zastosowania odpowiednich elementów i materiałów mających styczność z materiałem roślinnym. Powstawanie obić jest o wiele bardziej skomplikowane i trudne do wyeliminowania. Możliwe jest jednak zminimalizowanie strat powstałych w wyniku obić. Do strat tych należy zaliczyć zarówno ubytki ilościowe masy uszkodzonego materiału jak i ubytki jakościowe „lekko uszkodzonych” materiałów. Ubytki jakościowe są trudniejsze do oszacowania ponieważ mogą być nie zauważone we wstępnych procesach technologicznych, a mają duże znaczenie dla producentów i przetwórców ponieważ stanowią o przydatności owoców i warzyw do przechowywania, a w rezultacie do spożycia. Należy tu zaznaczyć, że w zdecydowanej większości przypadków uszkodzenia mechaniczne są efektem obciążeń dynamicznych.

Od dziesięcioleci prowadzone są badania nad podatnością owoców na obicia. Do chwili obecnej w większości pozostają metody polegające na zadawaniu obciążenia w warunkach quasi-statycznych. W rzeczywistości materiał roślinny ulega uszkodzeniom na skutek obciążeń zadawanych z wysokimi prędkościami. Dla przykładu spadek z wysokości 5 cm powoduje uderzenie z prędkością około  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  co z kolei w przypadku owoców i warzyw wywołuje falę ciśnienia w materiale a zatem obciążenie o charakterze dynamicznym. Definicja obciążenia dynamicznego mówi bowiem, że obciążenie klasyfikujemy jako dynamiczne gdy jego przyłożenie powoduje rozchodzenie się w materiale naprężenia w postaci fali.

Przebieg jak i skutki obciążenia dynamicznego różnią się znacznie od przebiegów i skutków obciążenia zadanego w warunkach quasi-statycznych, jakie mają miejsce w szeroko stosowanych testach wytrzymałościowych. W związku z powyższym poznanie mechanizmów powstawania uszkodzenia w warunkach obciążenia dynamicznego jest istotne z punktu widzenia producentów, przetwórców i konstruktorów maszyn ponieważ może przyczynić się do zwiększenia efektywności ich pracy, co w rezultacie obniży koszty dla konsumentów.

#### WSKAŹNIKI OCENY WRAŻLIWOŚCI NA OBICIA

Skutki obciążeń dynamicznych należy rozpatrywać dwupłaszczyznowo – jako skutki o naturze fizycznej i chemicznej. Fizyczna natura rozumiana jest jako mechaniczne zniszczenie tkanek, natomiast chemiczna to brunatnienie i powstawanie ciemnych plam będące wynikiem uderzenia mechanicznego wystarczającego do zmieszania substratu i enzymu. W przypadku nieznacznego obicia nie powodującego rozległych uszkodzeń ścian komórkowych, a przez to uwolnienia płynów komórkowych, często nie dochodzi do odbarwienia. Do badań wrażliwości materiałów roślinnych na uszkodzenia najbardziej przydatne wydają się być wskaźniki bazujące na wytrzymałości, a nie na zmianach fizjologicznych w uszkodzonych tkankach.

W literaturze spotyka się niewiele prac bazujących na tego typu wskaźnikach określanych w dynamicznych warunkach obciążeń.

Rohrbach [11] określał jędrność jagód na podstawie przebiegu siły uderzenia. Skorelował jędrność jagód ze wskaźnikiem uderzenia  $c_2$  oraz całkowitym czasem kontaktu ( $t_k$ ) wg zależności:

$$c_2 = f_m \cdot t_k^{-2} \quad (1)$$

gdzie:  $f_m$  to maksymalna siła uderzenia, a  $t_k$  to czas potrzebny do osiągnięcia maksymalnej siły uderzenia.

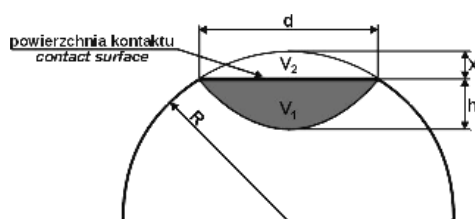
Zhang i in. [13] do określania jędrności brzoskwiń używali wskaźnika  $c_1$  i całkowitego czasu kontaktu ( $t_k$ ) wg zależności:

$$c_1 = f_m \cdot t_k^{-1} \quad (2)$$

Wskaźniki te używane zwykle do określania jędrności lub dojrzałości nie bazują na pełnym przebiegu siły reakcji owoców i warzyw podczas udaru.

Najbardziej właściwym wskaźnikiem do badania podatności na uszkodzenia mechaniczne wydaje się być wrażliwość na obicia, a dokładniej jej dwie składowe: próg obicia i odporność na obicia. Próg obicia rozumiany jako wysokość spadku, przy której pojawia się obicie próbki o określonej masie, kształcie i powierzchni udaru oraz odporność na obicia będąca stosunkiem energii obicia do objętości obicia. Do wyznaczania obydwu wskaźników stosuje się odpowiednie techniki zaproponowane przez Bajemę i in. [2]. W celu wyznaczenia progu obicia należy zastosować technikę (IHMI) polegającą na wielokrotnym (dwu lub trzykrotnym) zrzucie owocu lub warzywa z tej samej wysokości i podwyższanie tej wysokości do momentu uzyskania istotnych rozbieżności pomiędzy krzywymi odpowiedzi.

Technika (CHMI) wyznaczania odporności na obicia polega na wielokrotnym (6-10 razy) zrzucaniu owocu lub warzywa z tej samej wysokości aż do ustabilizowania się wysokości odbicia. Otrzymana w wyniku testu krzywa umożliwi wyznaczenie całkowitej energii obicia ( $E_s$ ). Sposób wyznaczania objętości obicia materiału o kształcie kulistym przedstawia rysunek 1 [7].



**Rys. 1.** Sposób szacowania objętości obicia  
**Fig. 1.** Method of bruise volume calculation

Na podstawie zmierzonych wielkości można wyznaczyć  $V_1$  jako objętość obicia poniżej powierzchni kontaktu:

$$V_1 = \frac{\pi h}{24} (3d^2 + 4h^2) \quad (3)$$

gdzie:  $h$  jest głębokością obicia poniżej powierzchni kontaktu, a  $d$  jest średnicą pola kontaktu.

Analogicznie do zależności (3) można obliczyć objętość obicia  $V_2$  powyżej powierzchni kontaktu:

$$V_2 = \frac{\pi x}{24} (3d^2 + 4x^2) \quad (4)$$

gdzie:  $x$  jest głębokością obicia powyżej powierzchni kontaktu.

Całkowita objętość obicia jest zatem sumą objętości poniżej i powyżej powierzchni kontaktu – równanie (5).

$$V = V_1 + V_2 \quad (5)$$

W oparciu o otrzymane wartości energii obicia ( $E_s$ ) i objętości obicia ( $V$ ), korzystając z zależności (6) możemy wyznaczyć odporność na obicia:

$$\text{odporność na obicia} = \frac{E_s}{V} \quad (6)$$

Metoda ta pozwala także na wyznaczenie maksymalnego nacisku przenoszonego przez tkanki bez wywoływania kolejnych uszkodzeń.

#### URZĄDZENIA I TECHNIKI STOSOWANE W TESTACH DYNAMICZNYCH

Znacząca ilość prac poświęcona jest tak zwanym badaniom udarowym, w których analizuje się skutki spadku lub uderzenia badanego materiału. Chodzi tu głównie o wyznaczenie krytycznych wartości naprężeń i odkształceń, rzadziej wpływu prędkości deformacji na wartości krytyczne tych parametrów. Dotychczasowym ograniczeniem badań dynamicznych był brak dostępu do wystarczająco precyzyjnej aparatury pomiarowej. Obecnie powszechna dostępność kart pomiarowych o wysokiej częstotliwości próbkowania, a przede wszystkim szybkich, miniaturowych czujników piezoelektrycznych o dużej sztywności pozwala na pomiar przebiegu siły reakcji podczas udaru z satysfakcjonującą dokładnością.

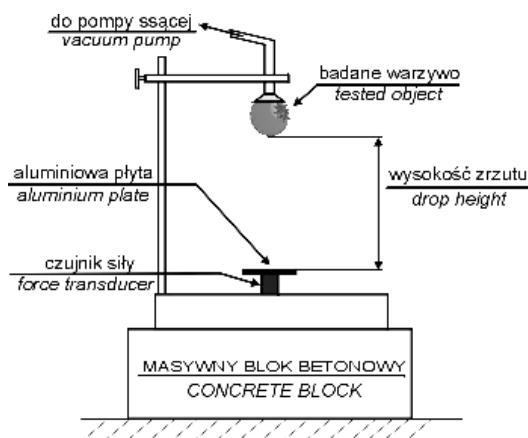
Testy dynamiczne charakteryzują się dużą różnorodnością stosowanych technik. Wynika to zarówno z różnorodności materiału roślinnego, jego rozmiaru, kształtu, gęstości, zawartości wody, itd., jak i z podejścia badaczy do sposobu osiągnięcia zamierzonego celu badań. W związku z tym, wydaje się słuszne uporządkowanie proponowanych technik i urządzeń według często stosowanego kryterium podziału a mianowicie ważności zjawiska i częstości występowania.

Sitkey [12] wyróżnił cztery typy uderzeń, na które narażony jest materiał roślinny:

1. uderzenie materiału roślinnego w sztywną, nieruchomą i płaską powierzchnię,
2. uderzenie materiału roślinnego w sztywną, nieruchomą i pochyloną powierzchnię,
3. uderzenie materiałów roślinnych o siebie, przy czym jeden z nich znajduje się w spoczynku i jego środek ciężkości nie może być przesunięty,
4. uderzenie materiału roślinnego w nieruchomą powierzchnię pokrytą amortyzującym tworzywem.

Podział metod badawczych ze względu na rodzaj i sposób zadawania obciążenia umożliwia ich porównywalność w założonych grupach.

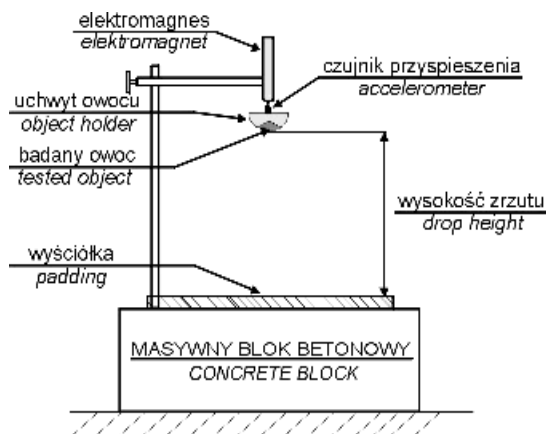
Pierwsza grupa metod to badania polegające na swobodnym spadku. Ten sposób wykorzystał w swoich badaniach Lichtensteiger i in. [8,9]. Do badań wybrał pomidory cieplarniane. Pomiar polegał na spuszczeniu badanego warzywa na piezo-elektryczny czujnik siły z ośmiu różnych wysokości zrzutu (rys. 2). Poszczególne wysokości były tak dobrane by uzyskać początkowe prędkości uderzenia w zakresie od  $44 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $243 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Czujnik siły był umieszczony na masywnym betonowym bloku, a bezpośrednio do jego powierzchni przyklejona była aluminiowa płyta w celu wyeliminowania drgań własnych czujnika i zwiększenia powierzchni kontaktu. Lichtensteiger posłużył się analizą przebiegu siły uderzenia do zweryfikowania modelu Kelvina opisującego uderzenie lepko-sprężystego ciała o kulistym kształcie w sztywną powierzchnię.



**Rys. 2.** Schemat stanowiska badawczego wg Lichtensteiger'a i in.

**Fig. 2.** Measuring position according to Lichtensteiger *et al.*

Zjawisko swobodnego spadku ciał wykorzystali także w swoich badaniach Chen i Yazdani [4]. Na zaprojektowanym przez siebie stanowisku (rys. 3) badali wpływ wysokości zrzutu i rodzaju wyściółki na stopień obicia jabłek odmiany Golden Delicious. Pomiar polegał na zrzucaniu połówek jabłek, w specjalnie zaprojektowanym uchwycie, na cztery rodzaje badanych wyściółek i rejestrowanie przyspieszenia za pomocą czujnika piezoelektrycznego. Dzięki takiemu umocowaniu owocu możliwe było wielokrotne zadawanie uderzenia dokładnie w ten sam punkt z 10 założonych wysokości zrzutu. Dodatkowo na podstawie uzyskanych przebiegów przyspieszenia i masy badanych owoców autorzy stworzyli model opisujący uderzenie jabłek badanej odmiany o sztywną, płaską powierzchnię.



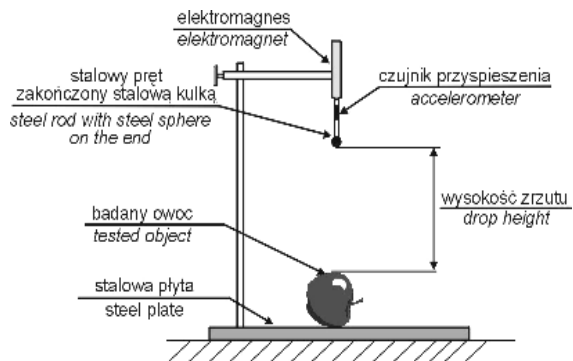
**Rys. 3.** Schemat stanowiska badawczego wg Chen'a i in. [4]

**Fig. 3.** Measuring position according to Chen *et al.* [4]

W metodach polegających na zrzucaniu ciał o kulistym kształcie na czujnik siły czy też na płaską powierzchnię pojawia się problem wynikający z faktu, że siła uderzenia w dużym stopniu zależy od masy ciała, wysokości zrzutu, promienia krzywizny ciała i jego właściwości sprężystych. Duża zmienność tych parametrów wpływa niekorzystnie na dokładność oceny jędrności.

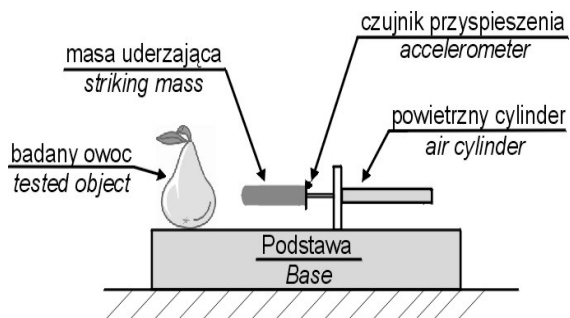
Swobodny spadek jest najczęściej wykorzystywanym sposobem zadawania obciążenia w metodach badawczych. Stwierdzono jednak, że uderzenie owocu lub warzywa o sztywną powierzchnię może być zastąpione przez uderzenie sprężystej kulki w nieruchomy owoc lub warzywo. Kolejną grupę metod stanowią więc metody polegające na uderzaniu z góry lub z boku stalowym trzpieniem w nieruchomy owoc lub warzywo [3,5,6]. Prosty system testujący jędrność owoców (rys. 4) opracowali Chen i in. [3]. Pomiar polegał na uderzaniu owocu kulką o znanej masie i promieniu krzywizny oraz pomiarze jej przyspieszenia. Głowica pomiarowa składała się ze stalowego pręta o kształcie walca, zakończonego stalową kulką o średnicy 19 mm. Do walca przymocowany był piezoelektryczny czujnik przyspieszenia, który pozwalał na pomiar przyspieszenia podczas uderzenia. Otrzymane wartości przyspieszenia i masa elementu uderzającego wykorzystane były do wyliczenia siły uderzenia podczas kontaktu. Na podstawie wyników stwierdzono, że możliwe jest segregowanie owoców ze względu na ich jędrność.

Wykorzystując podobny system Delwiche i in. [6] zaprojektowali linię sortującą gruszki na dwie grupy pod względem jędrności. Jako element uderzający zastosował sondę uderzającą badany owoc z boku wyposażoną w czujnik przyspieszenia (rys. 5). Istotnymi cechami tej metody są: duża szybkość pomiaru i nieniszczący charakter testu.



**Rys. 4.** System do testowania jędrności jabłek [3]

**Fig. 4.** Apples firmness testing system [3]

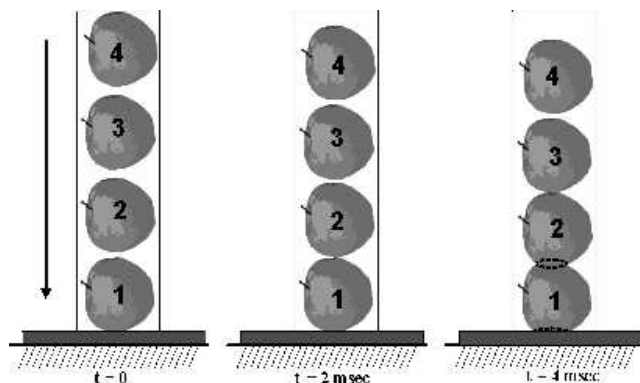


**Rys. 5.** Sonda określająca jędrność gruszek

**Fig. 5.** Tester for pear firmness determination

Metody polegające na zadawaniu obciążenia stalowym trzpieniem z góry lub z boku są proste i szybkie, stąd ich zastosowanie nie tylko w liniach sortujących, a także w przenośnych testerach. Jednak wyniki takich testów nie mogą być wykorzystane do analizy zjawiska uderzenia z udziałem warzyw i owoców. Spowodowane jest to faktem, iż podczas uderzenia trzpieniem w nieruchomy, podparty owoc, energia uderzenia rozchodzi się nie tylko w punkcie kontaktu, ale również na styku owoc – podpora. W związku z tym nie można jednoznacznie wyznaczyć odporności na obciążenie badanego materiału.

Najmniej liczną grupę stanowią metody bazujące na obserwacji uderzenia owoców lub warzyw o siebie. Taki sposób zadawania obciążenia wykorzystał w swoich badaniach Holt i Schoorl [7]. Za cel postawił sobie zbadanie zachowania się jabłek podczas wielowarstwowego przechowywania i załadunku (rys. 6). Badane jabłka zrzucano jedno na drugie na sztywną będącą w spoczynku powierzchnię. W wyniku eksperymentu obliczano energię pochłoniętą podczas uderzenia. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie rozmiaru uszkodzeń badanych jabłek w poszczególnych warstwach kolumny.



**Rys. 6.** Test uderowy jabłek wg Holta i Schroola [7]

**Fig. 6.** Apple impact test according to Holt and Schrool [7]

Również Pang i in.[10] w swoich doświadczeniach zastosował uderzenie jabłko o jabłko. Celem badań było wyznaczenie odporności na obicia jabłek na podstawie wysokości odbicia i objętości obicia. Sposób przeprowadzenia badań był prosty, jabłka zawieszono na dwóch cięgnach o długości 1m. Następnie jedno z nich było unoszone na jedną z dziesięciu wysokości i swobodnie puszczane. Przebieg doświadczenia rejestrowany był kamerą video. Na podstawie nagrań określano wysokość odbicia poprzez pomiar kąta pomiędzy cięgnami. W celu oszacowania powierzchni kontaktu jabłko pozostające w spoczynku było smarowane atramentem.

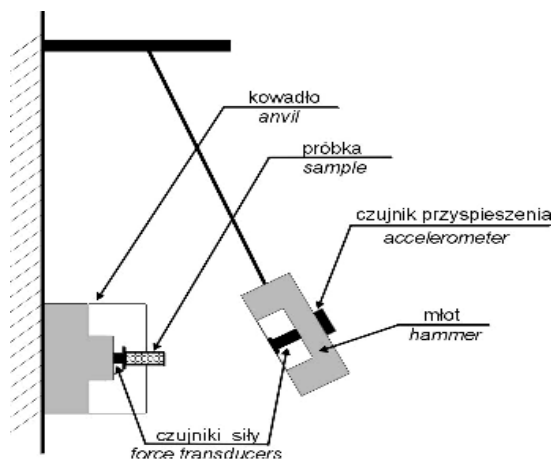
Metody z tej grupy są metodami mało obiektywnymi. Bazują one raczej na skutkach uderzenia a nie jego przebiegu. Ponadto wnioskowanie o przebiegu uderzenia na podstawie samej obserwacji zależy wyłącznie od obserwatora.

Opisane wyżej metody nie dają wystarczającej informacji na temat przebiegu uderzenia. Ograniczają się do określania jędrności owoców i warzyw, ich przydatności konsumpcyjnej czy też stopnia dojrzałości. Trudno jest także porównywać zebrane za ich pomocą wyniki. Niewątpliwymi zaletami przedstawionych metod jest łatwość oraz szybkość przeprowadzania testów, a także fakt, iż większość z metod ma charakter nieniszczący.

W ostatniej grupie metod wykorzystano wahadło jako element uderzający. Przykładem może być tu stanowisko zaproponowane przez Bayemę i in. [1,2] (rys. 7). Tor pomiarowy składał się z jednego lub dwóch bardzo czułych piezoelektrycznych czujników siły, rejestrujących przebieg siły na dwóch końcach próbki podczas uderzenia oraz jednego miniaturowego piezoelektrycznego czujnika przyspieszenia, mierzącego przyspieszenie podczas kontaktu. Stanowisko umożliwia dynamiczne obciążanie próbek o cylindrycznym kształcie oraz pomiar odkształcenia i prędkości odkształcenia będących rezultatem nacisku. Stanowisko badawcze składało się z kowadła, do którego przymocowany był piezoelektryczny czujnik siły, oraz wahadła, w głowicy którego umieszczone zostały piezoelektrycz-



ne czujniki: siły i przyspieszenia. Po umieszczeniu badanej próbki o cylindrycznym kształcie w kowadło, unoszono wahadło, a następnie swobodnie opuszczano. Jako maksymalną prędkość uderzenia przyjęto  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ponieważ taką prędkość uzyskuje większość owoców i warzyw podczas spadku z wysokości ok. 320 mm. Czujnik siły umieszczony w kowadło rejestrował siłę na lewym końcu próbki, natomiast czujnik przyspieszenia zainstalowany w wahadle mierzył przebieg siły reakcji na prawym końcu próbki. Dzięki takiemu ustawieniu czujników możliwy był pomiar prędkości przejścia fali naprężenia przez próbkę. Dodatkowo dzięki dynamicznemu, osiowemu ścisnieniu możliwy jest precyzyjny pomiar przebiegu impulsu obciążenia. Metoda ta jako jedna z pierwszych umożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników, które mogą posłużyć do weryfikacji modeli teoretycznych opisujących zjawisko uderzenia materiałów roślinnych.



**Rys. 7.** Schemat stanowiska do dynamicznego osiowego ścisnienia próbek  
**Fig. 7.** Scheme of measuring position for dynamic axial sample compression

#### PROPOZYCJA WŁASNEGO STANOWISKA BADAWCZEGO

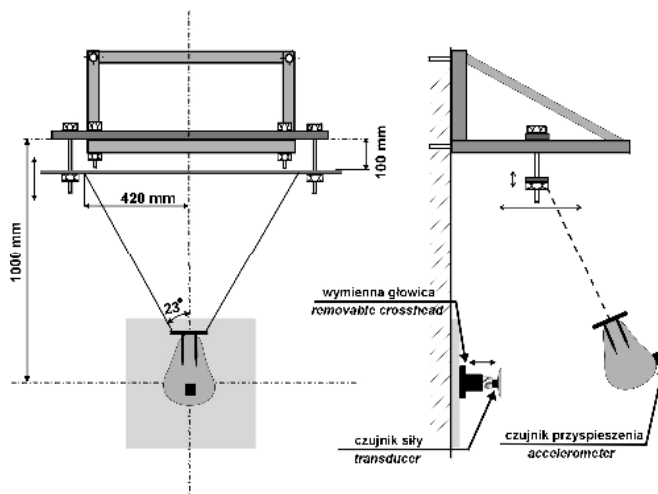
Na podstawie przeglądu literatury i dotychczasowych badań własnych zaproponowano konstrukcję stanowiska do badań dynamicznych owoców i warzyw. Stanowisko powinno zapewniać możliwość wyznaczania obiektywnych wskaźników odporności na obciążenie: progę obciążenia i wrażliwości na obciążenie.

Przyjęto następujące założenia projektowe:

- regulacja wysokości zrzutu w zakresie od 2 mm do 320 mm;
- początkowa szybkość uderzenia badanego materiału do  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- pełna rejestracja przebiegu siły reakcji podczas uderzenia;
- pomiar przyspieszenia próbki podczas uderzenia.

Schemat proponowanego stanowiska przedstawia rysunek 8. Opisywane stanowisko powinno umożliwiać:

- wyznaczenie przebiegu siły reakcji uderzenia, niezbędnej do wiernego opisu przebiegu uderzenia;
- określanie wpływu „kondycji fizycznej” (wilgotność, potencjał wody, czas i warunki przechowywania) owoców i warzyw na wskaźniki wrażliwości na obicia.



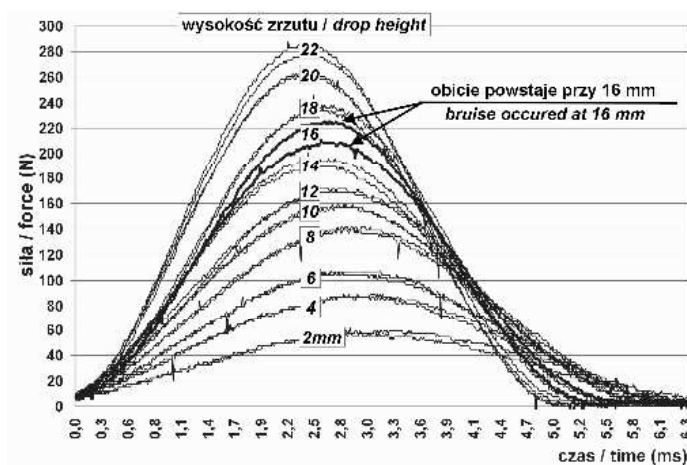
**Rys. 8.** Schemat proponowanego stanowiska  
**Fig. 8.** Scheme of suggested measuring position

Tor pomiarowy został zaprojektowany tak by można było wykonać za jego pomocą dwa różne testy dynamiczne. W podstawowej wersji przyrząd służący do symulacji uderzenia całych owoców i warzyw wykorzystany będzie w celu wyznaczenia ich progu obicia i odporności na obicia. Natomiast po zmianie głowicy i elementu uderzającego przyrząd ma służyć do dynamicznego, osiowego ściskania próbek o cylindrycznym kształcie. Podstawowa wersja umożliwia wyznaczenie progu obicia i odporności na obicia, służących ocenie wrażliwości materiału roślinnego na obciążenia dynamiczne. Oprzyrządowanie stanowiska składa się z piezoelektrycznego czujnika siły firmy ENDEVCO – model 2311-10 o czułości  $2,27 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$  o zakresie 2200 N, piezoelektrycznego czujnika przyspieszenia firmy EDEVCO – model 7259A-10 o czułości  $9,975 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$  przy 100 Hz. Oba czujniki podłączone są do czterowieściowej karty pomiarowej, która przekazuje dane do komputera. Wyniki pomiarów zapisywane są w plikach arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Częstotliwość próbkowania karty pomiarowej zmienia się w zakresie od 1 kHz do 150 kHz, maksymalna ilość pomiarów ze wszystkich kanałów 128000 punktów pomiarowych. Dane z wejść pomiarowych odczytywane są sekwencyjnie. Oprogramowanie karty umożliwia: kalibrację wejść pomiarowych, testowanie przełącznika wyzwalającego pomiar, start pomiaru oraz zapisywanie da-

nych. Do wyzwalania pomiaru zastosowano bramkę laser-detektor. Udar będzie rejestrowany na cyfrowej kamerze video w celu kontrolowania poprawności przeprowadzania pomiaru oraz w celu określenia wysokości odbicia.

Na wykonanym prototypie stanowiska zostały przeprowadzone badania testowe. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki pomiaru progów obicia dla jabłka odmiany Melarosa (technika IHMI).

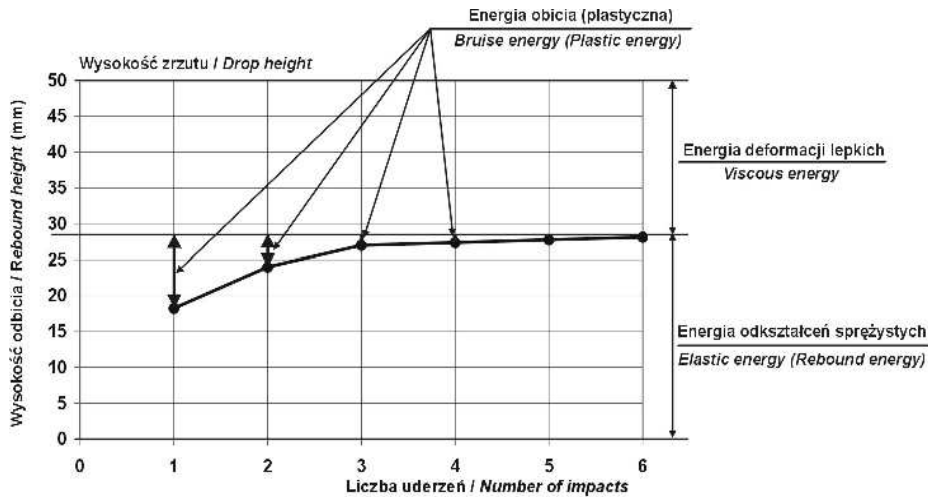
Owoce umocowane na wahadle zrzucano dwukrotnie z każdej z przyjętych wysokości w zakresie od 2 do 22 mm. Dla każdej z wysokości od 2 do 14 mm zarejestrowano niemal identyczne przebiegi krzywej siły reakcji w czasie dla każdej wysokości. Przy wysokości zrzutu 16 mm przebiegi były wyraźnie różne. Świadczy to, że próg obicia dla tego owocu znajdował się w przedziale od 14 do 16 mm.



**Rys. 9.** Technika wyznaczania progów obicia na podstawie różnic przebiegów krzywych odpowiedzi  
**Fig. 9.** Bruise threshold determining method based on the difference between force response courses

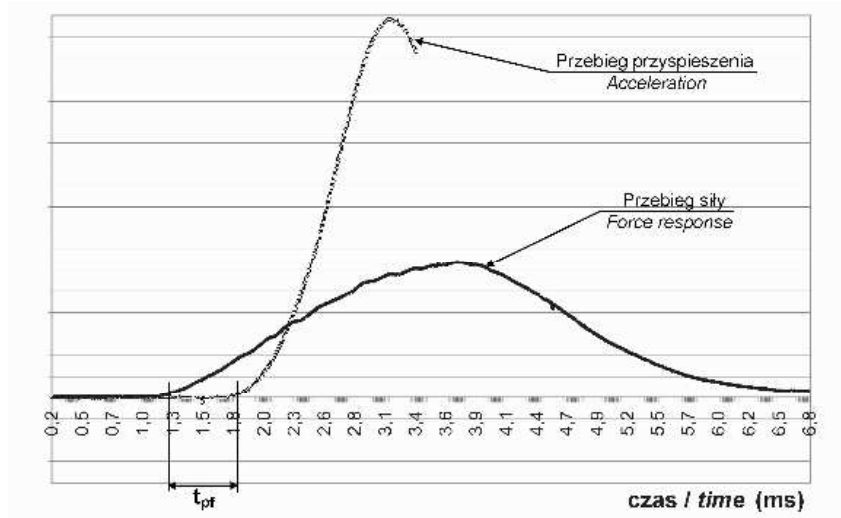
Przykładowe wyniki wyznaczania odporności na obicia przedstawia rysunek 10 (technika CHMI). Na wykresie zaznaczono sześć punktów oznaczających kolejne wysokości odbicia jabłka odmiany Melarosa podczas zrzutów z wysokości 50 mm. Jak wynika z rysunku po pięciu zrzutach nastąpiła stabilizacja wielkości deformacji o charakterze plastycznym. Z asymptoty możemy zatem odczytać wartość całkowitej energii obicia zużytej na deformacje o charakterze plastycznym. W celu określenia odporności na obicia konieczne jest także oszacowanie objętości obicia co zostało omówione wcześniej. Technika CHMI pozwala także na wyznaczenie maksymalnej wartości naprężeń, które może przenosić badany owoc nie powodując przy tym destrukcji struktury tkanek i komórek. Stabilizacja deformacji o charakterze plastycznym wiąże się z ustabilizowaniem pola kontaktu

owoc – płytka, czyli powierzchni przenoszącej naprężenia podczas uderu. Znając wartości pola tej powierzchni oraz maksymalną wartość siły możliwe jest obliczenie wartości naprężeń bezpiecznych badanego materiału.



**Rys. 10.** Technika wyznaczania energii obicia na podstawie wysokości odbicia

**Fig. 10.** Bruise energy determining method based on rebound heights



**Rys. 11.** Typowy przebieg siły i przyspieszenia w czasie

**Fig. 11.** Example of force and acceleration responses

Kolejny aspekt możliwości pomiarowych stanowiska to wyznaczanie prędkości rozchodzenia się fali naprężenia w badanym materiale. Podczas badań testowych zrzucający owoc uderzał w przetwornik siły wyposażony w płytkę tytanową, a czujnik przyspieszenia mocowany był po przeciwnej stronie owocu (rys. 8). W momencie pierwszego kontaktu owocu z płytką podczas udaru następuje inicjacja fali naprężenia, która rozprzestrzenia się w badanym jabłku w kierunku czujnika przyspieszenia. W wyniku eksperymentu otrzymuje się przebiegi siły i przyspieszenia w czasie. Nałożenie obu przebiegów i przedstawienie ich na wspólnej osi czasu pozwala określić o ile później zareagował czujnik przyspieszenia w stosunku do czujnika siły. Czas ten jest czasem przejścia fali naprężenia przez owoc o znanej średnicy (czas  $t_{pf}$  na rysunku 11).

#### WNIOSKI

1. Wykonane stanowisko spełnia wszystkie przyjęte na wstępie założenia projektowe. Przy jego użyciu możliwe są w szczególności:
  - pomiary energii obicia (energii deformacji plastycznych),
  - pomiary energii deformacji lepkich i sprężystych,
  - wyznaczenie maksymalnej wartości naprężeń przenoszonych przez materiał bez wywoływania kolejnych deformacji plastycznych,
  - wyznaczenie maksymalnej wartości spadku, przy której nie powstaje jeszcze deformacja o charakterze plastycznym.
2. Całkowity błąd torów pomiarowych sił i przyspieszeń wynikający z błędów przetworników i karty nie przekracza 1% zakresu pomiarowego.
3. Stanowisko umożliwia wykorzystanie techniki IHMI do oszacowania progu obicia na podstawie wyłącznie mierzalnych cech wytrzymałościowych. Możliwe jest zatem przeprowadzenie badań wpływu różnych czynników na przebieg i skutki udaru. Badania te pozwolą określić warunki zewnętrzne jak i stan i cechy danego produktu, przy których możliwe będzie zminimalizowanie strat na skutek udarów.

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Bajema R.W., Hyde G.M., Peterson K.:** Instrumentation design for dynamic axial compression of cylindrical tissue samples. Transaction of the ASAE, 41(3), 747-754, 1998.
2. **Bajema R.W., Hyde G.M., Baritelle A.L.:** Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tuber tissue. Transaction of the ASAE, 41(3), 733-740, 1998.
3. **Chen P., Tang S., Chen S.:** Instrument for testing the response of fruits to impact. ASAE Paper No. 85-3587, 1985.

4. **Chen P., Yazdani R.:** Prediction of apple bruising due to impact on different surfaces. Transaction of the ASAE, 34(3), 956-961, 1991.
5. **Delwichwe M.J., McDonald T., Bowers S.V.:** Determination of peach firmness by analysis of impact forces. Transaction of the ASAE, 30(1), 249-254, 1987.
6. **Delwiche M.J., Tang S., Mehlschau J.:** An impact force response fruit firmness sorter. Transaction of the ASAE, 32(1), 321-326, 1989.
7. **Holt J.E., Schoorl D.:** Bruising and energy dissipation in apples. Journal of Textures Studies, 7, 421-432, 1977.
8. **Lichtensteiger M.J., Holmes R.G., Hamdy M.Y., Blaisdel J.L.:** Evaluation of Kelvin model coefficients for viscoelastic spheres. Transaction of the ASAE, 31(1), 288-292, 1988.
9. **Lichtensteiger M.J., Holmes R.G., Hamdy M.Y., Blaisdel J.L.:** Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. Transaction of the ASAE, 31(2), 733-740, 1988.
10. **Pang D.W., Studman C.J., Banks N.H., Baas P.H.:** Rapid assessment of the susceptibility of apples to bruising. Journal of Agricultural Engineering Research, 64, 37-47, 1996.
11. **Rohrbach R.P.:** On the rapid measurement of blueberry firmness. Workshop on Design Applications of Mechanical Properties of Solid Food Materials: 7-8. University Park, Pennsylvania State University, 1975.
12. **Sitkey G.:** Mechanics of agricultural materials. Akademia Kiado, Budapest, 1986.
13. **Zhang X., Stone M.L., Chen D., Maness N.O., Brusewitz G.H.:** Peach firmness determination by puncture resistance, drop impact, and sonic impulse. Transaction of the ASAE, 37(2), 495-500, 1994.

## DYNAMIC MEASUREMENT METHODS OF FRUIT AND VEGETABLE MECHANICAL PROPERTIES

*Krzysztof Gołacki, Paweł Rowiński*

Department of Machine Theory and Automatics, Faculty of Agricultural Engineering  
Agricultural University  
ul. Doświadczalna 50 A, 20-280 Lublin  
e-mail: krzysztof.golacki@ar.lublin.pl

**Abstract.** This paper presents a review of dynamic methods of fruit and vegetable mechanical properties measurements. The text focuses on indexes which enable bruise sensitivity determination based on strength properties instead of usually used physiological changes. The authors present their own stand construction for determining bruise threshold and bruise resistance of apples. The results of test measurements are also presented.

**Keywords:** dynamic loading, bruise threshold, bruise energy