4. MECHATRONIKA W MASZYNACH ROLNICZYCH

4.1. Elementy mechatroniczne w kombajnach

Kombajn zbożowy to maszyna, która łączy procesy koszenia, zbierania, omłotu i przesiewania nasion różnych upraw zbożowych, takich jak: pszenica, owies, żyto, jęczmień, kukurydza, soja i len (siemię lniane). Zebrane zboże jest magazynowane w wewnętrznym zbiorniku, a następnie jest wyładowywane na równolegle jadące obok przyczepy, ograniczając w ten sposób przestoje technologiczne. Tradycyjnie, wszystkie wymienione wyżej operacje realizowane były bezpośrednio przez operatora – do jego obowiązków należało ustawienie parametrów pracy maszyn, a także późniejsza ich kontrola. W wyniku rozwoju systemów mechatronicznych możliwe stało się zmniejszenie udziału operatora i znaczne jego odciążenie w obsłudze kombajnu. Mechatroniczne podejście do rozwiązań konstrukcyjnych oznacza, że wszystkie dane, jako wielkości mierzalne, są przekazywane do operatora wewnątrz kabiny, a systemy diagnostyczno-wnioskujące wykonują za operatora dużą część wnioskowania.

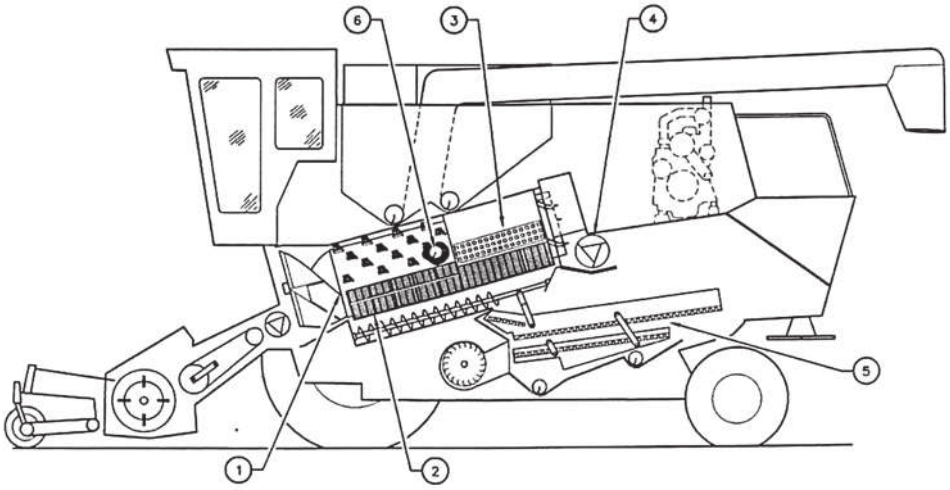
W poprzednich rozdziałach omówiono elementy mechatroniczne w układach napędowych, dlatego w tej części przedstawiono rozwiązania pomiarowe wykorzystywane w tym segmencie maszyn.

4.1.1. Czujnik strat ziarna

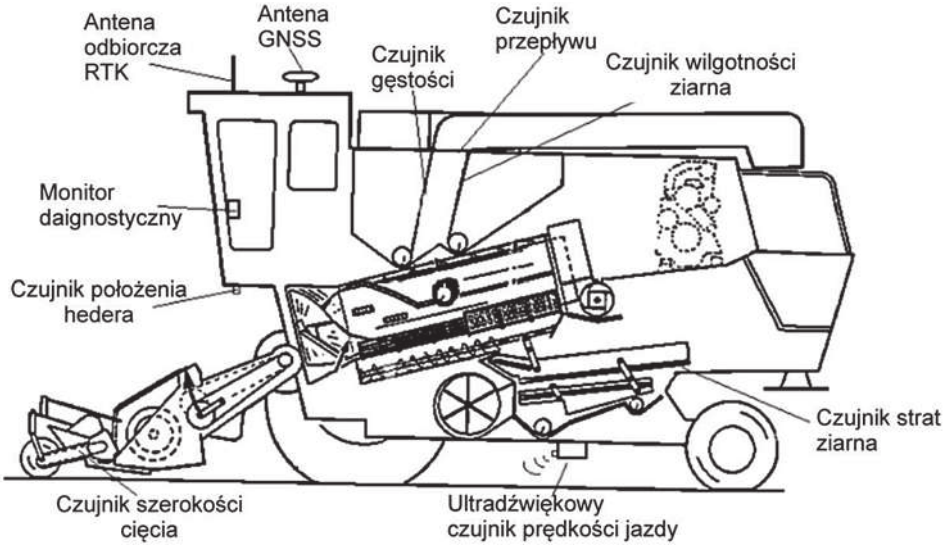
Proces pomiaru wielkości plonów oraz strat związanych z jego zbiorem jest jednym z kluczowych składników rolnictwa 4.0.

Proces zbioru ziarna obejmuje pięć podstawowych operacji jednostkowych: ścinanie, podawanie, omłot, oddzielanie i czyszczenie. Każda z tych operacji może wnosić w procesie zbioru straty ziarna. Dlatego we współczesnych kombajnach zbożowych proces zbioru i omłotu zboża jest kontrolowany przez wiele czujników (rys. 4.1.1 i 4.1.2). Czujniki rozmieszczone w kombajnie przez łącza CAN przesyłają dane do systemu monitoringu i kontroli umieszczo-

nego na monitorze wyświetlacza. Jeżeli kombajn podłączony jest do systemu telematycznego, możliwe jest przesyłanie danych do centralnej bazy danych właściciela pojazdu. W tabeli 4.1.1 przedstawiono spis czujników występujących w kombajnach zbożowych.



Rysunek 4.1.1. Rozmieszczenie elementów roboczych w kombajnach zbożowych (1 – rotor lub bęben młócący, 2 – młocarnia, 3 – separatory, 4 – wyrzutnik bijakowy, 5 – system czyszczenia).
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.1.2. Rozmieszczenie czujników pomiarowych w kombajnie.

Tabela 4.1.1. Spis przetworników montowanych w kombajnach zbożowych

Lp.	Nazwa czujnika
1	Ultradźwiękowy czujnik odległości (lewa strona)
2	Ultradźwiękowy czujnik odległości (prawa strona)
3	Czujnik położenia hedera
4	Radarowy przetwornik pomiaru prędkości rzeczywistej
5	Przetwornik wilgotności ziarna (zawartość wody)
6	Przetwornik wilgotności ziarna (pomiar temperatury)
7	Przetwornik pochylenia wzdłużnego
8	Przetwornik pochylenia poprzecznego
9	Przetwornik strat plonu (na sitach)
10	Przetwornik strat plonu (lewy czujnik wytrząsacza słomy)
11	Przetwornik strat plonu (prawy czujnik wytrząsacza słomy)
12	Czujnik prędkości teoretycznej
13	Czujnik przepływu ziarna

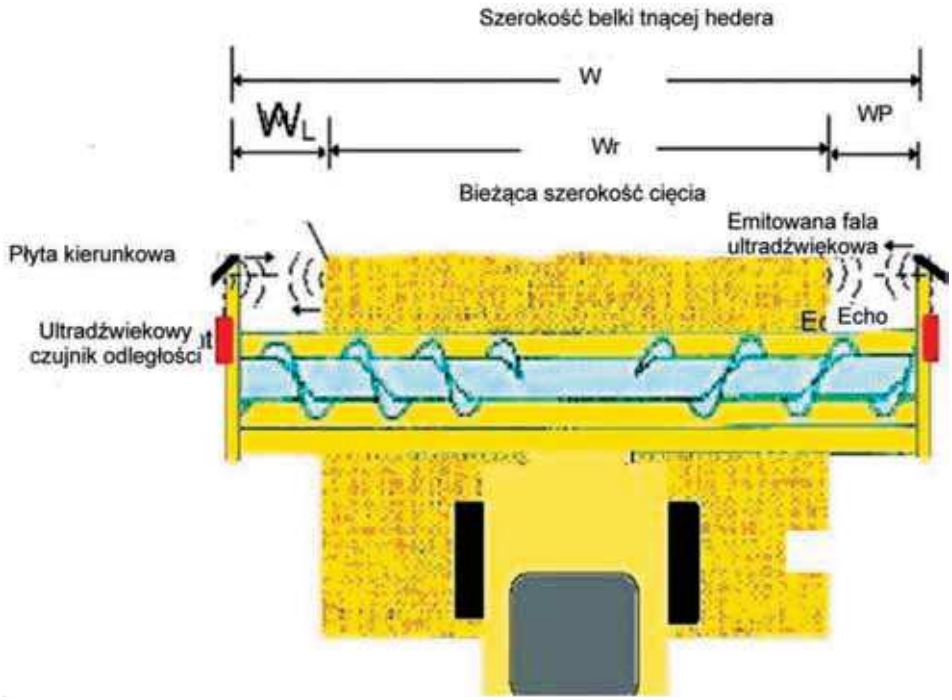
Pomiar szerokości obszaru cięcia

Kombajny są wyposażone w odczepiane i wymienne hedery, które są dedykowane dla odpowiednich roślin. Standardowy heder jest wyposażony w zestaw noży wykonujący ruch posuwisto-zwrotny. Nagarniacz z metalowymi lub wykonanymi z plastyku palcami przekazuje ścięte zboże do przenośnika. Współczesne hedery wyposażone są w czujniki szerokości koszonego łanu. Przetwornik wykrywający szerokości łanu składa się z ultradźwiękowego czujnika odległości, który zbudowany jest z piezoelektrycznego nadajnika i odbiornika. Przetworniki umieszczone są po obu stronach hedera kombajnu, umożliwiając obustronny pomiar szerokości ciętego łanu (rys. 4.1.3).

Pomiar szerokości ciętego łanu wymaga uzyskania informacji, w jakiej odległości od każdego czujnika ultradźwiękowego znajduje się zwarta ściana zboża. Każdy z czujników kilka razy w ciągu sekundy emituje sygnał akustyczny w zakresie fal ultradźwiękowych. Czas pomiędzy wysłaniem sygnału i jego odebraniem przez czujnik odbiorczy stanowi podwojoną odległość od uprawy.

Na rysunku 4.1.3 przedstawiono zasadę pomiaru szerokości cięcia zboża przez kombajn zbożowy. Czas pomiędzy odebraniem i wysłaniem sygnału liczony jest przez wewnętrzny zegar przetwornika, pozwalając na obliczenie odległości od przeszkody *S*, zgodnie ze wzorem:

$$S = a \cdot t_f \cdot V_f.$$



Rysunek 4.1.3. Pomiar szerokości za pomocą sprzężonych czujników ultradźwiękowych.

gdzie t_f – czas konieczny na pokonanie przez sygnał odległości *S, a* – stała zależna od budowy i miejsca umieszczenia czujników, np. w idealnych warunkach prostopadłego umieszczenia czujników wartość $a = 0{,}5$, V_f, – wielkość opisująca prędkość dźwięku w powietrzu. W przypadku umieszczenia dwóch czujników w hederze kombajnu, czas powrotu fali do odbiornika wynosi odpowiednio: t_{fl} dla lewego czujnika i t_{fp} dla prawego czujnika. Odległość łanu zboża od krawędzi hederu wynosi odpowiednio:

$$S_l = a \cdot t_{fl} \cdot V_f$$

$$S_p = a \cdot t_{fp} \cdot V_f$$

Szerokość ciętego przez kombajn łanu $S_c = S_h - (S_l + S_p)$.

Mocowanie i regulacja czujników piezoelektrycznych (ultradźwiękowych) w kombajnie

Pomiar odległości za pomocą czujników ultradźwiękowych opiera się na zasadzie pomiaru czasu powrotu sygnału do czujnika. Dlatego przedstawiana

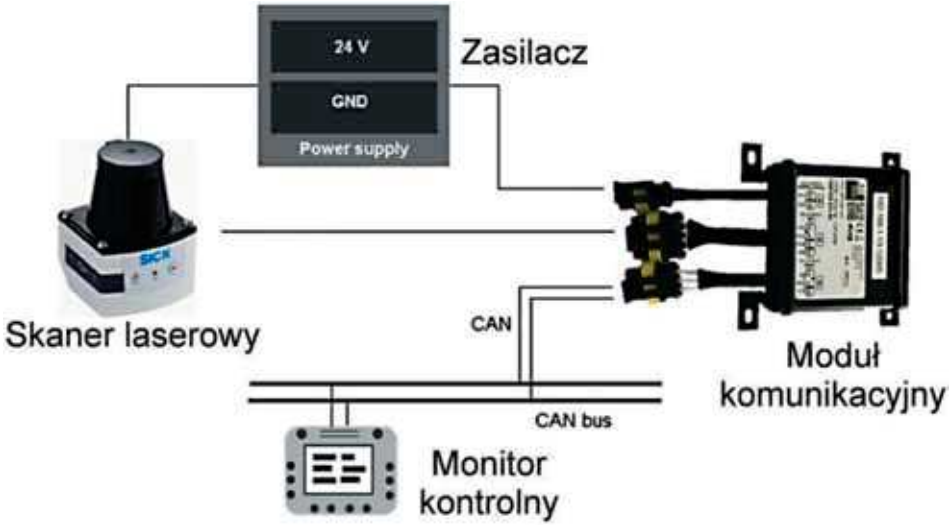
technika pomiarowa wymaga włączenia precyzyjnego pomiaru czasu. Jak przedstawiono wcześniej, odległość do obiektu jest obliczana na podstawie znanej prędkości dźwięku w powietrzu i czasu powrotu dźwięku do detektora sygnału. Ponieważ prędkość dźwięku zależy od temperatury powietrza, czujniki wykorzystują oddzielny pomiar temperatury w celu skompensowania różnicy czasu przemieszczania się dźwięku w różnych temperaturach. Istotne dla prawidłowej pracy czujników ultradźwiękowych jest ich prostopadłe ustawienie w stosunku do łanu koszonego zboża. Równe istotne jest zapewnienie czystej, bez przeszkód przestrzeni, umożliwiającej swobodną propagacje sygnału pomiędzy czujnikami oraz mierzonym łanem.

Wykrywanie krawędzi łanu

Jest to inaczej metoda oceny stopnia wykorzystania pełnej szerokości roboczej hedera w czasie pracy kombajnu, podobna do metody wykorzystującej ultradźwiękowe przetworniki odległości. W tego typu rozwiązaniu wykorzystywany jest układ dalmierzy laserowych. Dalmierz laserowy umieszczony na wysokości dachu kombajnu wysyła wiązkę, która odbita od przeszkody powraca do detektora. Detektor umieszczony jest w tym samym miejscu co emiter. Zasada pracy dalmierzy laserowych jest podobna do dalmierzy ultradźwiękowych. Różnice wynikają z odmiennego rodzaju i długości wysyłanej fali. Dalmierz laserowy nie jest w stanie mierzyć odległości od przeszkód przeźroczystych. Jeżeli w układzie dalmierza zainstaluje się element zmieniający kierunek wysyłanej wiązki, to system może skanować odległość przed urządzeniem pomiarowym. Rozbudowany w ten sposób laser nazywany jest skanerem laserowym. W dużej części laserów pracujących jako dalmierze, wykorzystywane są długości fali z dalekiej podczerwieni (905 nm). Zasięg takich laserów wynosi od 0,5 m do 200 m. Niezwykle istotnym parametrem jest częstotliwość skanowania i w przypadku typowych laserów wykorzystywanych w rolnictwie wynosi ona od 10 do 30 Hz. Na rysunku 4.1.4 przedstawiono zasadę pracy skanowania laserowego. Zmierzone odległości fal tworzą mapę zmian wysokości roślin przed kombajnem.

Zainstalowany na dachu kombajnu skaner laserowy skanuje obszar przed pojazdem prostopadle do kierunku jazdy w zakresie od 1 do około 6 m, przy kącie nachylenia około 35°. Linia profilu wyznaczonego punktu pomiarowego odzwierciedla kontur przekroju poprzecznego łanu zboża. Profil konturu przekroju jest wyznaczany z przebiegu linii wyznaczającej powierzchnię cięcia łanu. Przy tego typu pomiarach skaner wysyła do komputera pokładowego odwrotny profil głębokości niż jest to w rzeczywistości. Wysokość obserwowanego przez skaner łanu, traktowanego jako profil, jest lustrzanym odbiciem stanu rzeczywistego. Wynika to z szybszego powrotu

Rysunek 4.1.4. Pomiar krawędzi łanu za pomocą czujnika laserowego.



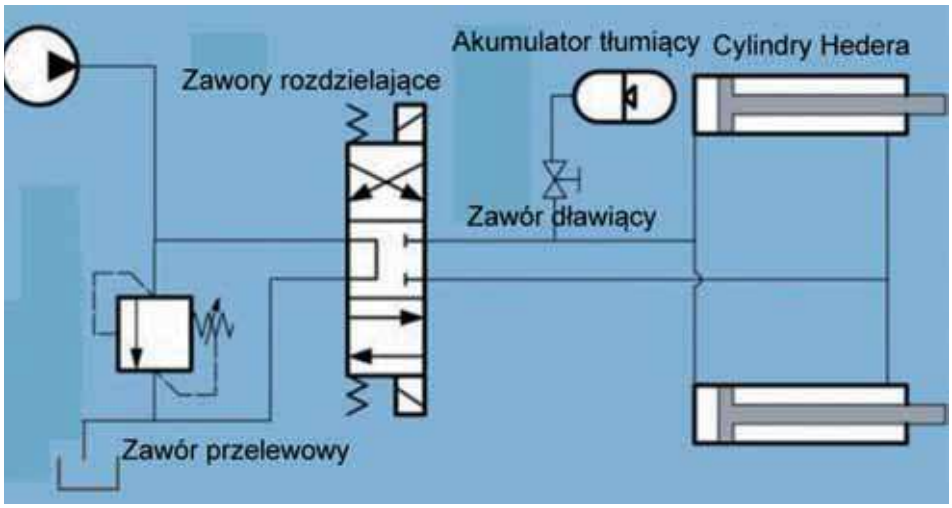
Rysunek 4.1.5. Zasada podłączenia skanera laserowego do sieci CAN.
Źródło: materiały firmy SICK

wiązki światła laserowego odbitej od uprawy na pniu, która przebywa krótszą drogę niż część wiązki odbitej od rżyska. Czułość wykrywania krawędzi łanu można skonfigurować za pomocą trzech trybów: zgrubnego, średniego i o wysokiej czułości. Tryb ustawia się za pomocą odpowiednich komend wysłanych przez protokół CAN. W trybie czułym wykrywane są profile przekrojów o niższych wysokościach profilu łanu. Ten tryb jest przydatny na przykład do koszenia wylęgniętego zboża lub o nierównomiernym wzroście roślin w łanie. Należy jednak zauważyć, że z tego ustawienia mogą wynikać błędne informacje (spowodowane np. przez ślady ciągnika, zwały gleby itp.). W trybie zgrubnym należy pracować przy równym gęstym łanie roślin. Ten tryb nadaje się na przykład do prac na dużych jednolitych obszarach. Należy pamiętać, że łan zboża o obniżonej wysokości nie zostanie przy takim ustawieniu wykryty. Podłączenie skanera laserowego w maszynach wyposażonych w szynę CAN nie stanowi specjalnego problemu. Elementy wchodzące w skład wyposażenia skanera laserowego przedstawiono na rysunku 4.1.5.

Pomiar położenia hedera w kombajnach zbożowych

Pomiar położenia hedera stosowany jest do stabilizacji zadanej wysokości koszenia zboża w kombajnach. Jeżeli heder będzie prowadzony zbyt nisko, istnieje ryzyko dostawania się zanieczyszczeń do przenośnika oraz dużej ilości słomy zmniejszającej sprawność omłotu. Zbyt wysoko uniesiony heder spowoduje pozostawienie zbyt dużej ilości słomy na polu, a w skrajnym przypadku, pozostawienie kłosów na pniu. Dlatego niezwykle ważne jest utrzymywanie optymalnej wysokości koszenia. W kombajnach do ustawienia wysokości koszenia wykorzystywany jest potencjometr umieszczony na konsoli kombajnu lub przycisk wprowadzania zadanej wartości na ekranie monitora systemu sterowania. Do pomiarów położenia hedera wykorzystywany jest również układ rezystancyjny lub czujniki wykorzystujące efekt Halla. W wielu przypadkach są stosowane systemy do automatycznego pomiaru i utrzymania odległości położenia hedera od powierzchni pola. Ze względu na konstrukcję można wyróżnić układy z przetwornikami mechatronicznymi oraz radarowe.

System regulacji położenia hedera. W wersji podstawowej układ podnoszenia i pozycjonowania hedera zbudowany jest z dwóch siłowników hydraulicznych dwustronnego działania. Do stabilizacji położenia w układzie hydraulicznym służy akumulator pneumohydrauliczny (rys. 4.1.6). Jego zadaniem jest kompensacja wstrząsów oddziałowujących na heder podczas przemieszczania się kombajnu po polu.



Rysunek 4.1.6. Schemat hydrauliczny prostego układu pozycjonowania hedera.
Źródło opracowanie własne na podstawie materiałów firmy Parker.

W wersji bardziej rozbudowanej, w dolnej części hedera znajdują się mechaniczne czujniki odległości hedera od gleby. W takim rozwiązaniu heder może być unoszony asymetrycznie przez dwa niezależne siłowniki (rys. 4.1.7).

Rysunek 4.1.7. Przykład rozwiązania w kombajnie Claas (Auto contour) do stabilizacji położenia hedera względem gleby.
Źródło: materiały prasowe firmy Claas.

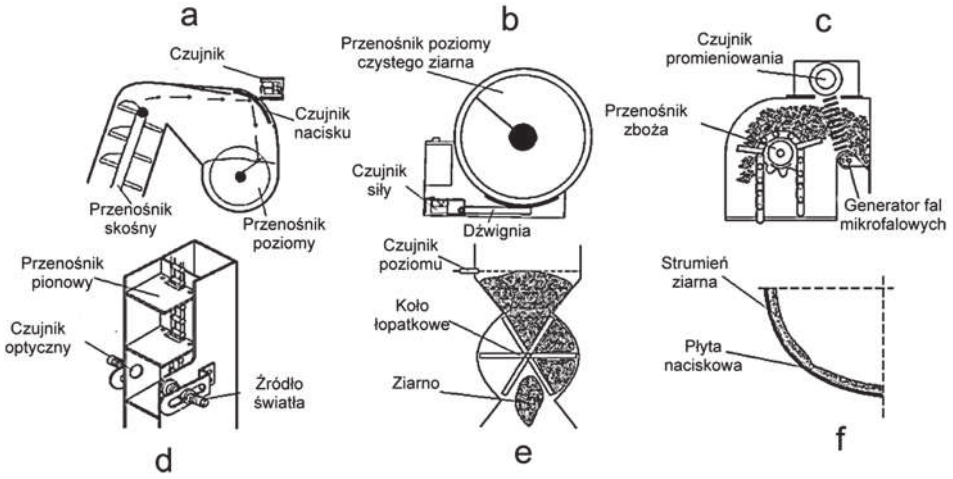
4.1.2. Czujniki plonu

Pomiar natężenia przepływu ziarna

Czujniki przepływu ziarna umożliwiają obliczenie plonu zebranego z danego obszaru pola. Czujnik przepływu masy w systemach kontroli plonowania ma za zadanie dostarczenie natychmiastowej informacji o wielkości przepływu

ziarna w kombajnie zbożowym. Obecnie na rynku użytkownicy mają możliwość wyboru spośród wielu typów czujników przepływu masowego, z których dwa są najbardziej rozpowszechnione: 1) czujniki uderzeniowe i 2) czujniki oparte na wiązce optycznej. Na rynku dostępne są również systemy elektromagnetyczne, wagowe, objętościowe i wykorzystujące promieniowanie.

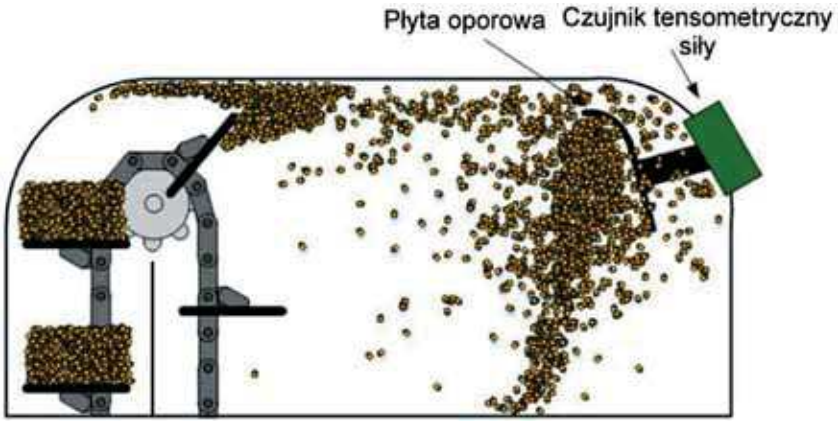
Na rysunku 4.1.8 przedstawiono podstawowe rozwiązania mierników natężenia przepływu ziarna. Ponieważ czujniki natężenia przepływu ziarna odnoszą się bezpośrednio do wielkości zbioru, stanowią one jedno z podstawowych źródeł informacji wykorzystywanych do przygotowywania map plonu. Czujniki wielkości przepływu umieszczane są najczęściej w pobliżu lub bezpośrednio w przenośniku podającym ziarno do zbiornika kombajnu. Istnieje kilka rozwiązań mierników przepływu ziarna do zbiornika.



Rysunek 4.1.8. Układy pomiaru natężenia przepływu ziarna: a) układ dynamicznego pomiaru nacisku bezwładnościowy, b) pomiar ciężaru przenośnika, c) pomiar za pomocą promieniowania elektromagnetycznego, d) system optyczny, e) pomiar objętościowy, f) pomiar wykorzystujący nacisk warstwy zboża.

Miernik bezwładnościowy. Stosowany szczególnie do pomiaru przepływu twardych cząstek, szczególnie ziarna. Przepływ ziarna jest wykrywany i mierzony przy wykorzystaniu specjalnej płyty pomiarowej. Elastycznie zawieszona płyta umieszczona jest na łuku kanału, przez który przepływają nasiona. Nasiona uderzając w płytę wywierają na nią siłę. Siła z jaką nasiona naciskają na płytę pomiarową mierzona jest za pomocą czujnika siły (rys. 4.1.9). Wartość siły jest proporcjonalna do masowego natężenia przepływu ziarna przez kanał. W niektórych rozwiązaniach, zamiast bezpośredniego pomiaru siły mierzone jest przemieszczenie płyty lub jej ugięcie. Uderzające nasiona powodują

przemieszczenie płyty, które jest proporcjonalne do masy przepływającego ziarna. W takim przypadku płyta podłączona jest do ramienia potencjometru, który zmienia swoją oporność w zależności od przemieszczenia płyty (rys. 4.1.10). Prędkość łańcucha przenośnika czystego ziarna jest mierzona za pomocą czujników prędkości wału. Na podstawie prędkości obrotowej wału przenośnika i siły wywieranej przez ziarno na płytę uderzeniową obliczane jest natężenie przepływu ziarna (kg/s). Pomiary natężenia przepływu ziarna są zapisywane przy wykorzystaniu oprogramowania współpracującego z komputerem pokładowym kombajnu. Razem z zapisem natężenia przepływu ziarna, co jedną sekundę rejestrowana jest wartość wilgotności ziarna i współrzędne położenia kombajnu na polu. Są one używane do generowania punktu danych na mapie wydajności.



Rysunek. 4.1.9. Zasada pracy bezwładnościowego pomiaru przepływu ziarna.

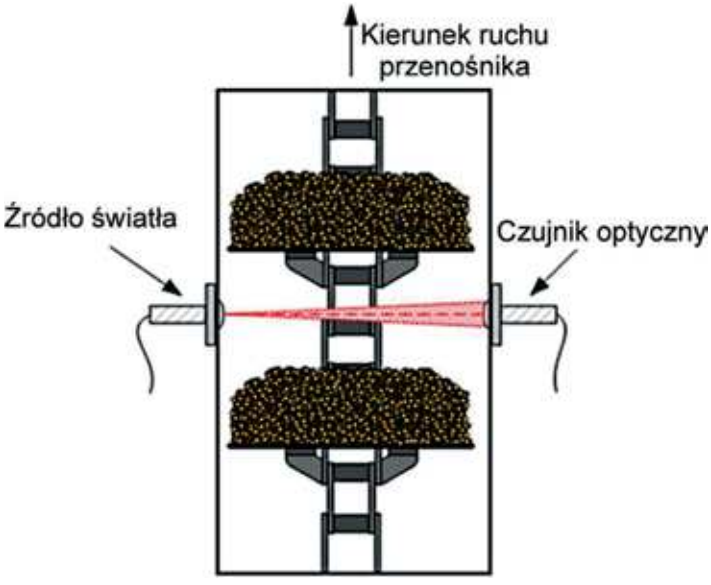
Obsługa systemu polega na kontroli czystości i poprawnej pracy wszystkich elementów systemu. Podstawowy element pomiarowy, jakim jest płyta oporowa, powinna być czysta i poprawnie połączona z czujnikiem siły.

Rysunek 4.1.10. Widok płyty oporowej czujnika pomiaru natężenia przepływu.
Źródło: materiały firmy John Deere.

Wagowy czujnik przepływu. Układ pomiarowy mierzy zmianę ciężaru przenośnika. Znając ciężar przenośnika i prędkość przemieszczania materiału, pomiar ciężaru przenośnika wraz z transportowanym ziarnem umożliwia obliczenie ilości transportowanego ziarna w jednostce czasu. Możliwe jest wykorzystanie zdalnego przekazywania sygnałów pomiędzy czujnikami tensometrycznymi i systemem monitorującym.

Czujniki radiometryczne. W skład przetwornika pomiarowego wchodzą dwa elementy: nadajnik z wbudowanym źródłem promieniowania oraz odbiornik. Nadajnik składa się ze źródła promieniowania mikrofalowego. Materiałem emitującym fale może być generator fal elektromagnetycznych lub izotop promieniotwórczy. Każdy element pomiędzy źródłem promieniowania i odbiornikiem powoduje zmniejszenie intensywności sygnału odbieranego przez odbiornik. Zmiana ta jest uzależniona od ilości ziarna przemieszczającego się pomiędzy elementami przetwornika.

Czujnik optyczny. Urządzenie to wykorzystuje objętościową metodę pomiaru. Układ pomiarowy składa się ze źródła światła i czujnika optycznego, jakim może być fotorezystor lub fotodioda. Źródło światła wytwarza falę świetlną odbieraną przez czujnik fotooptyczny (rys. 4.1.11). Ziarna przemieszczające się pomiędzy czujnikami przez chwilę zasłaniają źródło światła. Liczba impulsów ciemnych jest sumowana i na tej podstawie może być oszacowane natężenie objętościowe przepływu ziarna.



Rysunek 4.1.11. Zasada działania czujnika optycznego wykorzystywanego do pomiaru ilości zboża.

Pewną odmianą tej metody jest obliczanie liczby kubełków przenośnika przemieszczających się przed czujnikiem lub stopnia zmniejszenia intensywności oświetlania czujnika przez transportowane ziarno. Wszystkie opisane metody pomiarowe mierzą objętość przepływających nasion, dlatego aby uzyskać masę przepływającego strumienia ziarna należy wcześniej wprowadzić masę jednostkową pojedynczych ziaren lub masę ziaren znajdujących się w pojemniku transportera.

Łopatkowy czujnik objętościowy. Zasada pomiaru polega na obliczaniu liczby obrotów liczydła objętościowego. Przetwornik składa się z czujnika optycznego zaopatrzonego w źródło światła i fotorezystor oraz komory zasypowej zaopatrzonej w obrotowe zamknięcie łopatkowe. Czujniki optyczne sygnalizują napełnienie komory pomiędzy obudową i łopatkami. Jeżeli zostanie zasygnalizowane zapełnienie komory przez ziarno, silnik elektryczny obraca o pewien kąt koło łopatkowe, otwierając spływ ziarna do zbiornika. Sumaryczna liczba cykli otwierania komory,= określa objętość ziarna dostarczona do zbiornika.

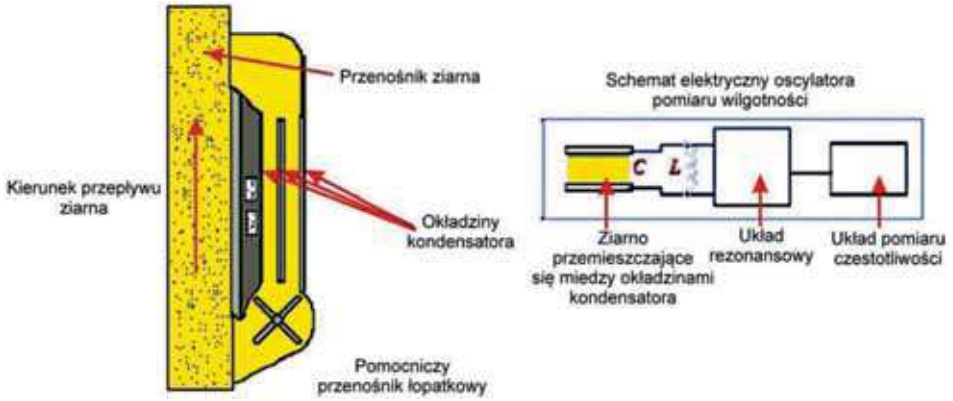
Czujnik strat ziarna

W czasie omłotu zboża nie wszystkie nasiona dostają się do zbiornika kombajnu. Ze względu na losowy ruch ziaren mogą one wypaść poza przenośnik główny. Zawsze jednak pożądane jest zminimalizowanie strat ziarna. Czujnik strat ziarna jest w stanie oszacować ilość ziarna traconego w czasie omłotu. Jednym z najczęściej wykorzystywanych rozwiązań jest umieszczenie piezoelektrycznego mikrofonu w tylnej części kombajnu, pod sitami czyszczącymi i wytrząsaczem słomy. Czujnik przymocowany jest do blaszanej płyty. Każde z ziaren znajdujących się w plewach uderza o płytę stanowiącą jednocześnie membranę mikrofonu. W ten sposób każde nasiono generuje pojedynczy pik elektryczny. Elektroniczny sumator zlicza uderzenia i przeliczając podaje wielkość strat w czasie omłotu.

Pomiar wilgotności ziarna

Wilgotność zbieranych plonów ma wpływ na masę ziaren oraz zdolność ich do przechowywania. Dlatego konieczna jest rejestracja zawartości wody w nasionach w czasie zbioru, tak aby wszystkie dane związane z wielkością plonu mogły być poprawnie wprowadzone do systemu zarządzającego i nadzorującego efektywność upraw.

Układy pomiaru wilgotności ziarna on-line mogą być układami mierzącymi wpływ ziaren umieszczonych pomiędzy elektrodami kondensatora na zmianę jego pojemności elektrycznej. Umieszczone pomiędzy elektrodami nasiona



Rysunek 4.1.12. Budowa i zasada działania pojemnościowego czujnika wilgotności ziarna.

pełnią w czasie pomiaru funkcje przekładki izolującej o pewnej wartości stałej dielektrycznej (rys. 4.1.12). Wyższa wartość stałej dielektrycznej oznacza wyższą zawartość wody w nasionach. Czujnik wilgotności zwykle podaje wynik pomiaru co 10-20 sekund. Czujnik ten wymaga kalibracji w ciągu sezonu, w przypadku gdy warunki pogodowe ulegną zmianie.

Procedura kalibracji czujnika wilgotności przebiega w większości przypadków podobnie:

1. Uruchomić pomiar wilgotności na monitorze komputera sterującego. Spowoduje to utworzenie nowego zapisu, który będzie wykorzystany do kalibracji sensora wilgotności.
2. Rozpocząć koszenie do czasu napełnienia całego zbiornika ziarnem.
3. Zatrzymać koszenie i pobrać losowe próbki ziarna z różnych miejsc zbiornika.
4. Zapisać wilgotność ziarna odczytaną z monitora komputera pokładowego.
5. Obliczyć wilgotność zboża pobranego ze zbiornika kombajnu, wykorzystując metodę suszarkową lub dokładny miernik wilgotności. Warto zauważyć, że ręczne mierniki wilgotności nie są urządzaniami o dostatecznie wysokiej dokładności, aby wykonywać nimi wzorcowanie czujnika. Chyba że wcześniej były kalibrowane za pomocą miernika o wyższej klasie dokładności. W celu zwiększenia dokładności kalibracji pomiar wilgotności ziarna ze zbiornika powinien być wykonany trzykrotnie. Następnie z wyników tych pomiarów powinna być wyciągnięta średnia arytmetyczna.
6. Wprowadzić do pamięci komputera obliczoną poprawkę (rys. 4.1.13).

Przykład 1: Obliczyć wilgotność ziarna pobranego ze zbiornika kombajnu. Pomiar wilgotności polegał na umieszczeniu próbki w suszarce w temperaturze 95°C przez 19 godzin. Masa początkowa próbki wynosiła m_m = 120 g. Po wyjęciu próbki z suszarki masa suchej próbki wynosiła m_s = 95 g.

Wilgotność próbki wynosi:

$$W(\%) = \frac{m_m - m_s}{m_m} \cdot 100$$

Z warunków zadania wynika, że wilgotność ziarna wynosi:

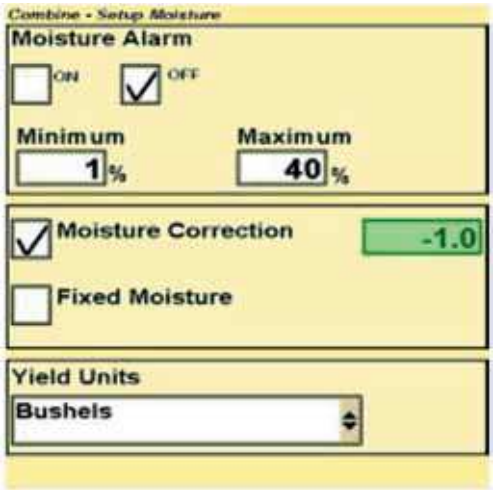
$$W(\%) = \frac{120-95}{120} \cdot 100 = \frac{25}{120} \cdot 100 = 20{,}8\%$$

Przykład 2: Jaką wartość poprawki należy wprowadzić do systemu pomiaru wilgotności, jeżeli wilgotność zboża zmierzona przez czujnik wilgotności zainstalowany w kombajnie wynosiła W_q = 19,5%.

Wartość poprawki (*offset*) Δ_m dla układu liczącego miernika wilgotności jest informacją, o jaką wartość powinien on zmienić wartość zmierzoną przez czujniki pokładowe. Wartość poprawki liczona jest według wzoru:

$$\Delta_m = W - W_q$$

Dla warunków zadania wartość poprawki wynosi: Δ_m = 20,8 – 19,5 = 1,3%



Rysunek 4.1.13. Przykładowy panel wyświetlacza z możliwością korekcji wilgotności.