

Praca Dyplomowa.

WYBRANE ZAGADNIENIA TENSOMETRII OPOROWEJ.

SPIS TREŚCI.

- Wstęp
- 1. Podstawowe wiadomości o tensometrii oporowej
 - 1.1. Zasada działania
 - 1.2. Czujniki tensometryczne
 - 1.3. Mocowanie tensometrów do powierzchni
 - 1.4. Kompensacja wpływu temperatury
 - 1.5. Parametry tensometrów
 - 1.6. Mostki tensometryczne
- 2. Tensometryczne czujniki siły stosowane w wagach
 - 2.1. Rodzaje tensometrycznych czujników siły stosowane w wagach elektronicznych
 - 2.2. Parametry tensometrycznych czujników siły
- 3. Podstawowe wiadomości o wagach
 - 3.1. Podział wag
 - 3.2. Parametry wag. Definicje
 - 3.3. Legalizacja i zatwierdzenie typu
 - 3.4. Podstawy budowy i działania wag elektronicznych z czujnikami tensometrycznymi
 - 3.5. Nośność wagi a ilość czujników
 - 3.6. Inne rodzaje czujników stosowane w wagach elektronicznych
 - 3.6.1. Czujniki indukcyjne
 - 3.6.2. Czujniki magnetoelektryczne
 - 3.6.3. Czujniki magnetosprężyste (pressduktorowe)
 - 3.6.4. Czujniki pojemnościowe
- 4. Wzmacniacze tensometryczne stosowane w wagach
 - 4.1. Proces przetwarzania sygnału z czujnika
 - 4.2. Programowanie i kalibracja
 - 4.3. Wzmacniacz tensometryczny firmy RADWAG
- 5. Projekty wag elektronicznych wykonanych przez autora pracy
 - 5.1. Waga pomostowa z jednym czujnikiem siły
 - 5.2. Waga kolejkowa o nośności 500kg z dwoma czujnikami siły
 - 5.3. Waga pomostowa o nośności 3000kg z czterema czujnikami siły
- 6. Zastosowanie wagowego wzmacniacza tensometrycznego do pomiaru sił na prasie
- 7. Literatura

Wstęp.

Tematem tej pracy dyplomowej są wybrane zagadnienia elektrycznej tensometrii oporowej. Jest to technika umożliwiająca pomiar odkształceń fizycznych za pomocą czujników rezystancyjnych zwanych tensometrami. Są to elementy rezystancyjne wykonane w formie elastycznych pasków o małej powierzchni dzięki czemu można je nakleić na prawie każdy materiał. Dzięki temu odkształcenia występujące w materiale mają swoje dokładne odzwierciedlenie w zmianie oporu czujnika. Pomiar odkształceń umożliwia pośredni pomiar wielkości pochodnych takich jak siła, naprężenie i ciężar. Tensometry już od blisko 70 lat stanowią podstawowe źródło sygnału określającego wartość wielkości mechanicznych, mierzonych metodami obróbki sygnału elektrycznego. Są szeroko stosowane od wielu lat wszędzie tam, gdzie istnieje potrzeba mierzenia sił i naprężeń np. w konstrukcjach mostów, zbiorników, budynków, statków i samolotów itp. Często wykorzystuje się tą technikę w pracach prototypowych i badaniach naukowych. Jest pomocna w monitorowaniu różnych procesów przemysłowych, np. w procesach obróbki skrawaniem (tokarki, frezarki) do odczytu sił skrawania lub w procesach obróbki plastycznej (prasy, młoty) do odczytu sił występujących podczas procesów. Innym zastosowaniem tensometrii jest budowa różnego rodzaju czujników, na przykład: dynamometrów, czujników masy, momentomierzy, ciśnieniomierzy, czujników drgań i czujników przemieszczenia. Ich zadaniem jest zamiana wielkości mechanicznej na sygnał elektryczny.

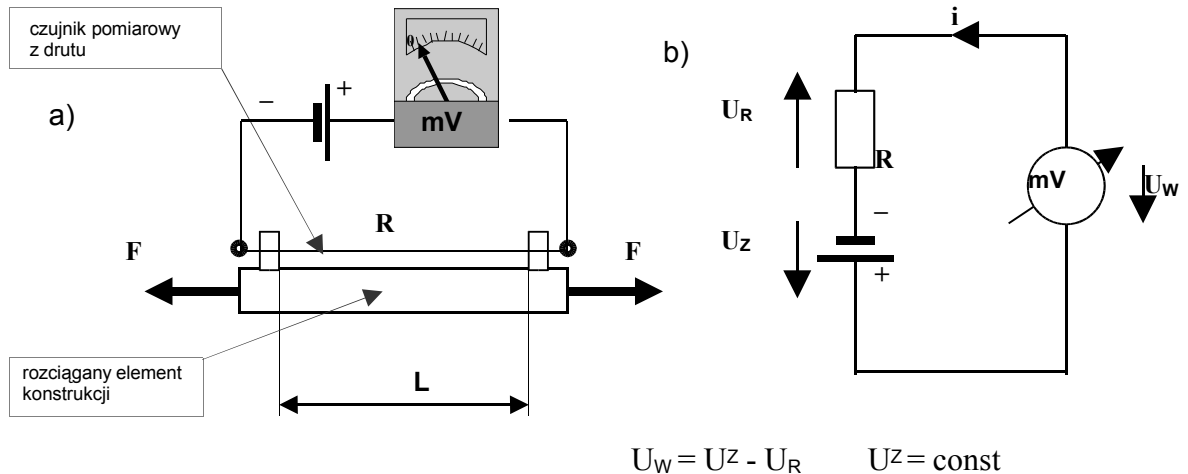
Zagadnienia pomiarów wykonywanych w laboratorium obróbki plastycznej są związane z tensometrią oporową ze względu na potrzebę mierzenia sił występujących podczas procesów. Autor pracy jest specjalistą z zakresu zastosowania tensometrów w budowie wag elektronicznych. W związku z tym w pracy jest zawarta wiedza z zakresu konstrukcji wag na przykładzie wag skonstruowanych przez autora pracy. Dodatkowo zostaną opisane wzmacniacze tensometryczne stosowane w wagach. Ich podstawową zaletą w stosunku do profesjonalnych wzmacniaczy jest stosunkowo niski koszt i duża dokładność. Jest to związane z dużym postępem w miniaturyzacji układów elektronicznych i z masową produkcją tego typu wzmacniaczy. Autor podejmie się próby zastosowania takich wzmacniaczy do mierzenia sił występujących na prasach podczas procesów obróbki plastycznej.

1. Podstawowe wiadomości o tensometrii oporowej

Technika ta wykorzystuje zjawisko odkryte przez Lorda Kelvina w 1856 roku polegające na zmianie oporności metalowego drutu pod wpływem działającej na niego siły rozciągającej. Właściwe wykorzystanie tej wiedzy do pomiaru siły nastąpiło dopiero w 1937r. w USA. W roku 1939 zaczęto produkować na skalę przemysłową pierwsze na świecie tensometryczne czujniki siły zbliżone formą do stosowanych obecnie. Technika ta ma już kilkadziesiąt lat i nadal jest udoskonalana.

1.1. Zasada działania tensometru

Zastosowanie tensometru do pomiaru odkształceń polega na pomiarze rezystancji czujnika naklejonego lub przymocowanego w inny sposób do badanego elementu konstrukcji. Istotę pomiaru odkształcenia tą metodą przedstawia rys.1a.



Rys. 1. Pomiar siły działającej na rozciągany pręt wg metody stosowanej wiele lat temu.
a) schemat poglądowy, b) schemat elektryczny.

Na rys.1b przedstawiono schemat elektryczny omawianego układu. Metalowy element badany jest poddany działaniu rozciągającej siły F w zakresie odkształceń sprężystych. Do jego końców jest przymocowany czujnik z cienkiego drutu o oporności R połączony szeregowo w zamkniętym obwodzie ze źródłem napięcia i woltomierzem.

Pod wpływem sił działających na rozciągany element rozciągnięciu ulega czujnik – jego długość L wzrasta a pole przekroju A zmniejsza się. Wpływ tych zmian na rezystancję drutu opisuje wzór (1),

$$(1) \quad R \uparrow = \rho \frac{L \uparrow}{A \downarrow}$$

gdzie:
 R – rezystancja drutu oporowego w Ω ,
 ρ – rezystywność, opór elektryczny właściwy w $\Omega \cdot m$,
 L – długość przewodnika w m ,
 A – powierzchnia przekroju przewodnika w m^2 ,

Jak wynika z powyższego wzoru rezystancja drutu wzrasta pod wpływem siły. Powodując wzrost napięcia U_R na odcinku pomiarowym zgodnie z prawem Ohma, wzór (2).

$$(2) \quad U_R \uparrow = R \uparrow \cdot I$$

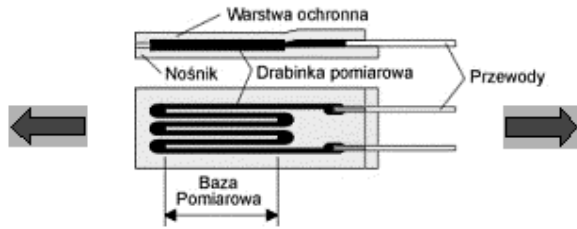
Ponieważ w obwodzie jest stałe napięcie zasilające U^Z zmiana napięcia na czujniku U_R powoduje zmianę wskazań napięcia U_W wskazywanego przez miernik, wzór (2a).

$$(2a) \quad U_W = U^Z - U_R$$

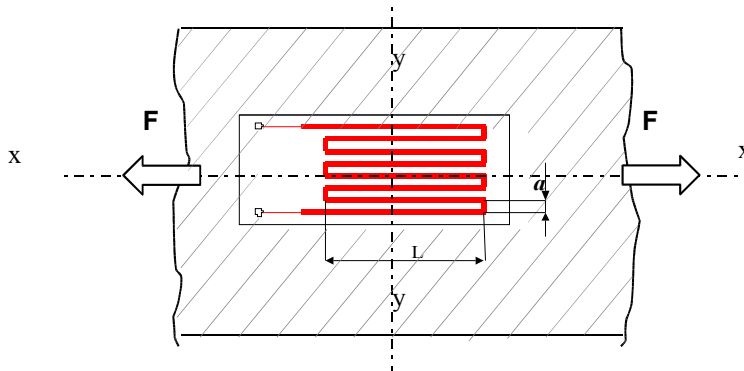
gdzie:
 $U^Z = \text{const}$ – napięcie zasilania,
 U_R – napięcie na czujniku,
 U_W – napięcie wskazywane na mierniku.

Napięcie U_W maleje a jego zmiana jest proporcjonalna do odkształcenia elementu rozciąganego. Przy zapewnieniu proporcjonalności (liniowości) przyrostu oporu elektrycznego do przyrostu wydłużenia otrzymujemy proste lecz precyzyjne narzędzie zamiany odkształceń mechanicznych na sygnał elektryczny. Zakres siły działającej na drut pomiarowy musi zawierać się w zakresie odkształceń sprężystych materiału z którego jest wykonany, gdyż po jednorazowym przekroczeniu granicy plastyczności rozciąganego drutu jego parametry nie powróciłyby do pierwotnych wartości - czujnik uległby uszkodzeniu. Dlatego przez wiele lat rozwoju tensometrii naukowcy dobierali odpowiednie stopy metali aby uzyskać jak najlepsze parametry użytkowe czujników.

Nowoczesne czujniki tensometryczne działają w taki sam sposób jak pierwowzór złożony z jednego rozciąganego drutu ale ich wymiary zmniejszono poprzez zastosowanie innego kształtu drutu oporowego ułożonego w charakterystyczną wężykowatą mozaikę zwaną też drabinką pomiarową (rys.2).



Rys. 2. Czujnik tensometryczny.
a) zasada działania,
b) siły działające na czujnik tensometryczny



Dzięki umieszczeniu na nośniku z papieru (lub tworzywa sztucznego) wielokrotności małego odcinka pomiarowego L wymiary gabarytowe czujnika są mniejsze a zmiany oporności są w przybliżeniu takie same jak drutu wyprostowanego. Zmniejsza się dzięki temu wielkość czujnika (tzw. baza pomiarowa) a jego użycie staje się łatwiejsze.

Czujnik mocuje się do powierzchni badanej za pomocą kleju, tak aby jego oś symetrii pokrywała się z osią działania siły $x-x$ (rys.2b). Dzięki temu największe zmiany oporności uzyskujemy w kierunku zgodnym z położeniem odcinków pomiarowych o długości L .

Każdy tensometr charakteryzuje się tzw. stałą tensometryczną, opisującą bezwymiarowo własności metrologiczne czujnika (zależne od materiału i technologii). Zawarte są w niej wymiary i własności materiału z którego wykonany jest czujnik. Liczba ta wyraża stosunek przyrostu względnej rezystancji do wydłużenia względnego przewodnika pod wpływem działania siły według wzoru (3):

$$(3) \quad \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = k \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \cdot k \quad \text{podstawiając:} \quad \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$$

Otrzymujemy wzór : (4)
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

gdzie:
 k – stała tensometryczna
 ε – wydłużenie względne przewodnika

, z którego wynika że względna zmiana oporu tensometru jest wprost proporcjonalna do wydłużenia względnego przewodnika.

Zastosowanie tensometrów do pomiaru naprężeń w konstrukcjach bazuje na prawie Hooke'a, które mówi że naprężenie σ (dla jednoosiowego stanu małych naprężeń) jest wprost proporcjonalne do wydłużenia względnego ε oraz do współczynnika sprężystości wzdłużnej E (tzw. modułu Young'a), zgodnie ze wzorem:

$$(5) \quad \sigma = \varepsilon \cdot E$$

, gdzie:

σ – naprężenie $\sigma = F/A$ (gdzie: F - siła osiowa - ściskająca lub rozciągająca, A - pole powierzchni przekroju poprzecznego)

ϵ – wydłużenie względne $\epsilon = \Delta L/L_0$ (gdzie: L_0 - długość początkowa, ΔL - przyrost długości wywołany działaniem siły F)

E – współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Young'a)

Jak łatwo zauważyć, znając moduł Young'a (informacja dostępna w każdym poradniku) oraz wymiary poprzeczne badanego elementu, wystarczy zmierzyć wydłużenie względne (przez pomiar odkształcenia) aby określić wielkość działającej siły. Jest to jedno z podstawowych zadań tensometrii. Ponieważ względny przyrost oporu tensometru jest wprost proporcjonalny do wydłużenia względnego (współczynnik k to stały parametr charakterystyczny dla każdego tensometru) pozostaje go tylko zmierzyć.

Przy pomiarze siły tą metodą należy przykleić tensometr na badaną powierzchnię, w miejscu gdzie występuje odkształcenie charakterystyczne dla danego rodzaju konstrukcji. Przykład: jeśli chcemy określić siłę wywieraną przez prasę na odkówkę podczas procesu obróbki plastycznej, tensometr lub zespół tensometrów możemy nakleić na korpus prasy, gdyż naprężenia występujące w korpusie są proporcjonalne do siły nacisku prasy.

Zastosowanie techniki tensometrycznej skupia się wokół trzech zastosowań :

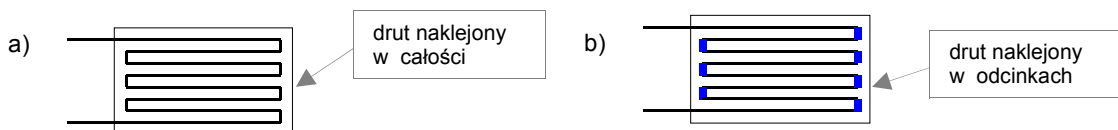
- analiza naprężeń powstających w elementach konstrukcji podczas ich pracy w obiekcie lub podczas prób w laboratorium,
- analiza naprężeń własnych w elementach konstrukcji nie poddanych obciążeniom, (np. metodą wierconego otworu. Metoda jest stosowana i propagowana przez firmę HBM)
- budowa przetworników wielkości mechanicznych – wówczas tensometry naklejone są na materiał o znanych parametrach wytrzymałościowych i o określonym kształcie (np. belka zginana - przetworniki siły lub wagi, membrana – przetworniki ciśnienia).

1.2. Rodzaje tensometrów

Rozróżniamy trzy podstawowe typy tensometrów ze względu na technologię wykonania:

- drucikowe (druć o średnicy od 0,02 do 0,05mm) – odporne na wysoką temperaturę (wężykowe lub kratowe),
- foliowe (folia metalowa o grubości od 0,002 do 0,02mm) – używane najczęściej,
- półprzewodnikowe (wysoka stała k , od 100 do 150), silny wpływ temperatury, delikatne.

Pierwsze czujniki tego typu były produkowane przez nałożenie drutu oporowego na podkładkę z papieru (w późniejszym czasie na podkładki z tworzyw – np. z poliamidu lub żywicy fenolowych). Czujniki tego typu nazwa się tensometrami drucikowymi. Druć oporowy jest mocowany do podkładki w całości (czujniki wężykowe – rys.3a) lub w odcinkach (czujniki kratowe - rys.3b).



Rys. 3. Czujniki tensometryczne drucikowe: a) typu wężykowego, b) typu kratowego .

Technologia wykonania jest dość pracochłonna z uwagi na to, iż podstawowym warunkiem stworzenia dobrej jakości czujnika jest nie tylko jego ułożenie w wężykowaty kształt ale i odpowiednie napięcie (wyprostowanie) drucika przed naklejeniem na podłoże.

Nowocześniejszym rozwiązaniem są częściej stosowane czujniki foliowe, gdzie drut oporowy zastąpiono cienkim paskiem ze specjalnego stopu (np. miedzi, konstantanu lub nichromu). Pasek oporowy jest trwale połączony z podłożem z tworzywa sztucznego a jego kształt ułożony jest również w charakterystyczną wężykowatą mozaikę (rys.4).



Rys. 4. Foliowy czujnik tensometryczny firmy HBM.

Ten rodzaj czujnika wytwarzany jest m.in. metodą trawienia warstwy metalu na podkładzie z tworzywa sztucznego – metoda ta jest analogiczna do sposobu produkcji elektronicznych obwodów drukowanych. Kształt siatki oporowej na folii jest otrzymywany metodą fotochemiczną. Inną metodą produkcji jest napawanie kształtu paska na tworzywo lub wprasowanie paska metalu na tworzywo sztuczne z udziałem klejów i żywic.

Czujniki foliowe w porównaniu z czujnikami drucikowymi wykazują następujące zalety:

- możliwość wykonania siatki oporowej o dowolnym kształcie (również dla wieloosiowego stanu naprężeń),
- lepszym powiązaniem z badanym podłożem (przez znacznie większą powierzchnię przylegania do podłoża),
- lepszą zdolnością do odprowadzania ciepła a co za tym idzie większym dopuszczalnym prądem pomiarowym (maksymalny prąd w czujniku foliowym może być zwiększony co najmniej półtorakrotnie w stosunku do odpowiadającego mu czujnika drucikowego – wg poz.6.1. patrz literatura),
- mniejszą skłonnością do pełzania pod obciążeniem,
- mniejszą histerezą (brak zależności sygnału wyjściowego od kierunku zmian wielkości mierzonej),
- oraz większą stałością punktu zerowego (po odciążeniu tensometru jego rezystancja wraca do pierwotnej wartości).

Zalety te wynikają między innymi z faktu, że przy obciążeniu tą samą siłą czujnika foliowego i drucikowego w czujniku foliowym naprężenia styczne pomiędzy przewodnikiem a podłożem są mniejsze ze względu na większą powierzchnię przylegania (rys.4b).

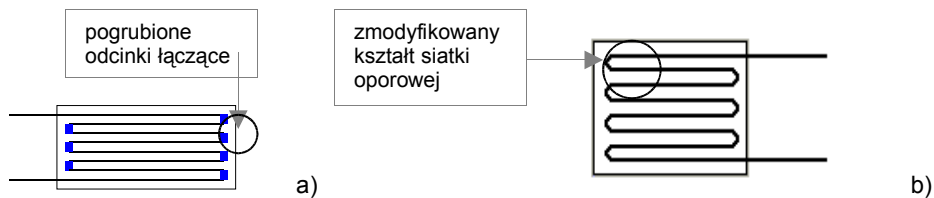


Rys. 4b. Powierzchnia przylegania ma wpływ na naprężenia styczne pomiędzy przewodnikiem a podkładem.

Wadą czujników foliowych w stosunku do drucikowych jest ich mniejsza odporność na temperaturę. W pomiarach w wysokich temperaturach zdecydowanie prym wiodą czujniki drucikowe.

Jedną z wad czujników tensometrycznych jest ich wrażliwość na wpływ odkształceń poprzecznych w stosunku do kierunku odkształceń mierzonych oraz zależność ich stałej k od długości pomiarowej, czynnej czujnika, a ściślej od stosunku długości podłużnych części drutu oporowego czujnika do części poprzecznych (oznaczonych na rys. 2b jako "a"). W tym celu w budowie tensometru stosuje się różne zabiegi technologiczne zmniejszające wpływ tych odcinków na jakość pomiaru:

- zwiększa się długość odcinków podłużnych w stosunku do poprzecznych
- eliminuje się wpływ odcinków poprzecznych przez ich pogrubienie lub zwiększenie powierzchni (mniejsze zmiany oporu), (rys.4c - a)
- stosuje się zmodyfikowany kształt siatki oporowej (rys.4c – b)



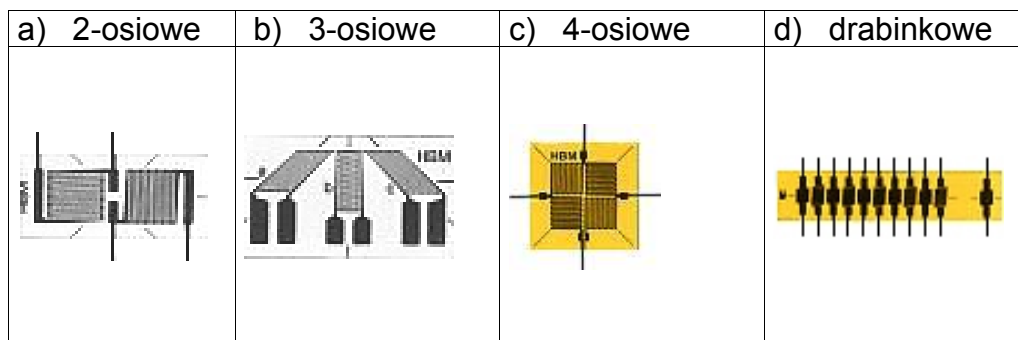
Rys. 4c. Eliminowanie wpływu odcinków łączących przez modyfikację kształtu tensometru.

Wady tej nie mają czujniki drucikowe typu kratowego, (z zasady działania są nie czułe na odkształcenia prostopadłe rys.3b)

Trzecim rodzajem czujników tensometrycznych są czujniki półprzewodnikowe. Wykorzystuje się tu zjawisko zmiany oporu w domieszkowanych monokryształach krzemu pod wpływem odkształceń. Czujniki tego typu zapewniają większy sygnał wyjściowy i są bardziej czułe na odkształcenia. Z uwagi na to, że są stosunkowo rzadko stosowane w wagach elektronicznych zostały w tej pracy pominięte.

Podział czujników tensometrycznych ze względu na ilość osi pomiarowych:

- tensometry 1-osiowe opisane powyżej,
- tensometry 2-osiowe, stosowane tam gdzie istnieje potrzeba mierzenia sił w dwóch kierunkach - np. powierzchnia zewnętrzna płaszcza naczyń cylindrycznych – rozstaw osi 90° (rys.5a), do pomiaru momentu skręcającego przenieszonego przez wały pędne - rozstaw osi 45° względem osi wału,
- tensometry 3-osiowe (rys.5b), tzw. rozety tensometryczne – pomiar trzech sił w osiach co 120 stopni – np. do pomiaru odkształceń na membranach lub stosowane doświadczalnie w polu naprężeń o nieznanym kierunku,
- tensometry 4-osiowe (rys.5c), do pomiaru naprężeń stycznych, do pomiaru odkształceń i ugięć membran poddanych działaniu ciśnienia,
- tensometry drabinkowe (rys.5d), do pomiaru niejednorodnych naprężeń występujących na małej powierzchni (np. na powierzchni spawu)



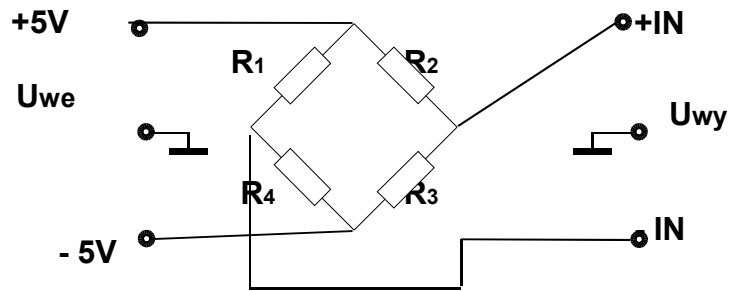
Rys. 5. Rodzaje czujników tensometrycznych – podział ze względu na ilość osi pomiarowych.

Konstruktorzy i naukowcy mają do wyboru wiele typów tensometrów. Mając dostęp do katalogów można zrealizować prawie każdy projekt pomiarowy.

1.3. Mostki tensometryczne

Zmiana rezystancji pojedynczego tensometru pod wpływem odkształceń jest stosunkowo mała i trudna do zmierzenia dlatego do pomiarów stosuje się znany z elektrotechniki układ mostka elektrycznego (tzw. mostek Wheastona) (rys.8) złożone z 4 elementów rezystancyjnych. W miejsce oporników włącza się elementy czynne - tensometry. Rodzaj mostka zależy od ilości elementów czynnych tzn. tych na które działa mierzona siła. W ćwierćmostku jest to 1 element czynny, w półmostku 2 a w pełnym mostku 4 elementy czynne. Zaletą dwóch ostatnich rozwiązań jest samokompensacja temperaturowa i większa czułość pomiarowa. W układzie pełnego mostka 4 elementy tensometryczne są połączone i naklejone na badany materiał lub na czujnik w taki sposób, że w mostku panuje równowaga elektryczna tzn. na wyjściu mostka jest napięcie zerowe.

Rys. 8. Mostek tensometryczny.



Tensometry mają taki sam opór lub są dobrane parami w taki sposób, że pomiędzy rezystancjami mostka zachodzi zależność:

$$(6) \quad R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

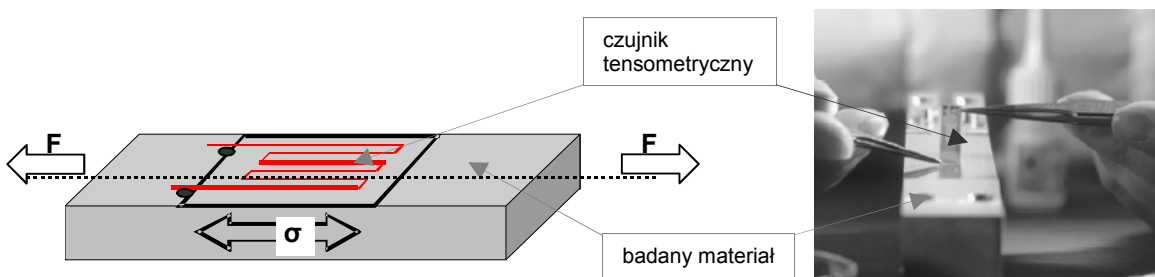
Czujniki są umieszczone na badanym materiale w taki sposób, że podczas działania siły na układ oporności R_1 i R_3 wzrastają a oporności R_2 i R_4 maleją (lub odwrotnie jeśli kierunek siły jest ujemny). Powoduje to wyjście mostka ze stanu równowagi i powstanie napięcia na wyjściu mostka. Sposób połączenia i rozmieszczenie tensometrów ma wpływ na czułość czyli na wielkość napięcia wyjściowego mostka. Prawidłowe rozmieszczenie i połączenie czujników musi zaważyć pomiar tylko do wielkości badanej (eliminacja sił zakłócających – nie mierzonych) oraz zapewnić jak największy sygnał wyjściowy o liniowej charakterystyce.

Jednym ze sposobów na zwiększenie sygnału wyjściowego jest zastosowanie podwójnych tensometrów w każdej gałęzi mostka.

Mostek tensometryczny jest zasilany najczęściej napięciem stałym w zakresie od 0,5V do kilkudziesięciu volt. Najczęściej stosowane napięcia to 5 i 10 V.

1.3. Mocowanie tensometrów do powierzchni

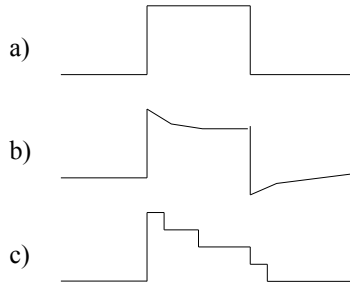
Montaż tensometrów na powierzchni pomiarowej polega na ich przyklejaniu w odpowiednim miejscu konstrukcji tak aby oś pomiarowa czujnika pokrywała się z osią działania sił (rys.6a). Można je naklejać na różne materiały celem określenia ich odkształceń. Do tego celu stosuje się specjalne kleje oraz specjalne techniki klejenia tak aby zapewnić jak najlepszą dokładność oraz wytrzymałość przyklejonego czujnika (rys.6b).



Rys. 6a. Usytuowanie czujnika temperatury względem osi działania siły.

Rys. 6b. Naklejanie czujnika tensometrycznego na belkę tensometryczną.

Jakość przyklejenia tensometru do podłoża ma decydujący wpływ na dokładność pomiaru. Można to stwierdzić przy obciążeniach dynamicznych tensometrów trwających sekundy. Na rys.7 pokazano wykresy sygnału wyjściowego z trzech przykładowych tensometrów w odpowiedzi na jednostkowy „impuls” odkształcający materiał na którym są naklejone. Sygnał z prawidłowo naklejonego tensometru odzwierciedla siłę działającą na badany materiał (wykres a), natomiast wykresy (b) i (c) to sygnał z wadliwie naklejonego tensometru.



Rys. 7. Wpływ poprawności przyklejenia czujnika na sygnał z czujnika.

- a) poprawny sygnał,
- b) wyraźne płynięcie – świeży klej lub za gruba warstwa,
- c) uskoki sygnału – pęknięcia i kieszenie powietrzne w spoinie.

Jeżeli nie ma możliwości prawidłowego przyklejenia tensometru do powierzchni badanej (np. ze względu na dużą chropowatość powierzchni) stosuje się tensometry naklejone na cienkie paski stali i w takiej formie przylutowuje się na właściwą powierzchnię (np. firma HBM stosuje również zgrzewanie do powierzchni).

Kleje tensometryczne i technologia klejenia są rozległą dziedziną tensometrii. Na przestrzeni lat opracowano wiele nowych klejów i technologii. Kleje tensometryczne powinny spełniać następujące warunki:

- a) idealnie odwzorować oddziaływanie powierzchni badanej na czujnik (brak pełzania, brak histerezy, b. dobra przyczepność do podłoża)
- b) być odpornymi na czynniki zewnętrzne takie jak temperatura, wilgoć, chemikalia, opary i gazy
- c) nie wpływać negatywnie na własności czujników i podłoża (wysokie własności izolacyjne, obojętność chemiczna, brak wpływu na charakterystykę czujnika przed i po zaschnięciu spoiny)

Trudno jest dobrać klej, który spełniałby wszystkie w/w warunki, dlatego stosuje się różne kleje w zależności od warunków w jakich mają pracować czujniki. Stosuje się również połączenie różnych klejów np. do przyklejenia tensometru stosuje się jeden klej a jako warstwę ochronną drugi klej tworzący po wyschnięciu ochronną warstwę gumy.

1.4. Kompensacja wpływu temperatury

Podczas pracy czujników tensometrycznych, duży wpływ na wynik pomiaru ma temperatura otoczenia. Do kompensacji tego wpływu stosuje się następujące sposoby:

- zastosowanie tensometrów samokompensujących zawierających element kompensujący zintegrowany z czujnikiem, do ścieżki oporowej tensometru jest dodany odcinek z innego metalu, np. z platyny (rys.ad2)



Rys. ad2. Tensometr samokompensujący z elementem platynowym.

- dobór tensometrów o większej rezystancji lub zastosowanie mniejszego napięcia zasilania - ponieważ jednym z czynników wpływających na dokładność jest samonagrzewanie czujnika podczas pracy – można to wyeliminować przez zmniejszenie prądu płynącego przez czujnik zmniejszając napięcie lub zwiększając rezystancję, zgodnie ze wzorem na moc:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2 / R$$

- dobranie czujników o współczynniku rozszerzalności cieplnej równej lub zbliżonej do materiału badanego (np. innych dla stali, aluminium, żeliwa czy betonu),
- zastosowanie mostka tensometrycznego,
- poprzez eliminację wpływu rezystancji doprowadzeń (np. dodatkowe przewody kompensujące),
- zastosowanie termometru w czujniku pomiarowym podłączonego oddzielnymi przewodami do wzmacniacza pomiarowego (kompensacja następuje we wzmacniaczu pomiarowym),
- zastosowanie ochronnej warstwy lub obudowy na czujniki lub mostki np. pokrycie czujnika ochronną taśmą, klejem, zabudowanie metalową puszką ochronną z izolacją termiczną. W niektórych przypadkach stosuje się podgrzewanie czujników wraz z elementem badanym np. gdy element pracuje w bardzo niskiej temperaturze.

1.5. Parametry tensometrów

Do podstawowych parametrów technicznych tensometrów należą:

- Baza pomiarowa - jest to długość czujnika oznaczona literą L (rys.2b).
- Rezystancja – opór elektryczny czujnika . Rezystancje typowych czujników wynoszą np. 120, 270, 350, 1000Ω. Wartości te są dobrane wg typoszeregów w zależności od tego w jakiej dziedzinie tensometrii są stosowane.
- Stała tensometryczna *k* – opisuje bezwymiarowo własności metrologiczne tensometru (zależne od materiału i technologii). Wartość standardowa wynosi od 2 do 3. Czym wyższa stała tensometryczna tym wyższa czułość tensometru.
- Zakres pomiarowy - definiuje zdolność pomiarową czujnika pomiędzy minimalną a maksymalną wartością odkształceń przy których czujnik nie dozna uszkodzenia.
- Czułość pomiarowa - wyraża przyrost napięcia na rezystancji czujnika podczas odkształcenia równego maksymalnej wartości (przypadającego na 1V zasilania). Na charakterystyce możemy ją zdefiniować jako nachylenie charakterystyki czujnika. Czułość tensometru wyraża się w mV/V.
- Dopuszczalny prąd pomiarowy – określa wartość prądu dla prawidłowej pracy czujnika (zbyt duża wartość prądu powoduje samonagrzewanie czujników co ma istotny wpływ na dokładność pomiaru, w ekstremalnym przypadku może nastąpić zniszczenie czujnika np. poprzez przypadkowe podłączenie zbyt dużego napięcia). Standardowe wartości zawierają się w granicach od kilku do kilkudziesięciu mA (specjalne wykonania pracują nawet z prądem kilkuset mA).
- Zakres temperatur pracy w którym tensometr zachowa swoje własności metrologiczne (specjalne wykonania dopuszczają temperatury nawet do 1000 ° C).

2. Tensometryczne czujniki siły stosowane w wagach

Charakterystycznym przykładem zastosowania mostka tensometrycznego jest produkcja czujników siły stosowanych w wagach elektronicznych (zwanymi też potocznie belkami tensometrycznymi, czujnikami tensometrycznymi lub przetwornikami tensometrycznymi). Są to gotowe elementy czujnikowe służące do produkcji różnego rodzaju wag elektronicznych. Czujniki te wykorzystywane są

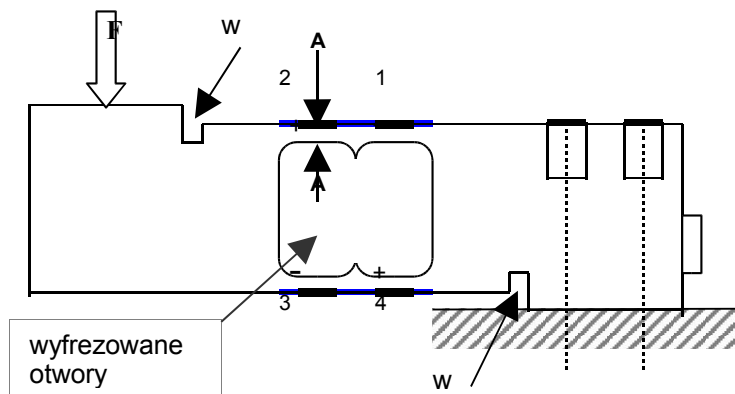
między innymi w produkcji wag sklepowych, pocztowych, lekarskich, platformowych oraz w systemach dozowania i pakowania.

Korpus czujnika jest wykonany z metalu a jego kształt jest dobrany w taki sposób aby przenosił tylko wybrany zazwyczaj jednokierunkowy rodzaj naprężeń. Na rys.9 przedstawiono typową belkę tensometryczną firmy HBM służącą do zastosowania w wadze elektronicznej platformowej.

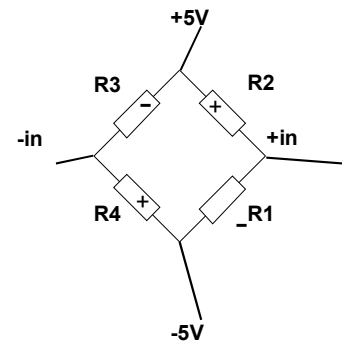


Rys. 9. Belka tensometryczna.

Jak widać na fotografii rzeczywiście jest to metalowa belka z wyfrezowanymi otworami. Na rys.10 pokazano przekrój boczny takiej belki. Miejsca oznaczone **1**, **2**, **3** i **4** to miejsca przyklejenia elementów tensometrycznych do belki, które są połączone w mostek tensometryczny. Schemat ich połączenia pokazano na rys.11.



Rys. 10. Belka tensometryczna – rysunek poglądowy.



Rys. 11. Schemat elektryczny.

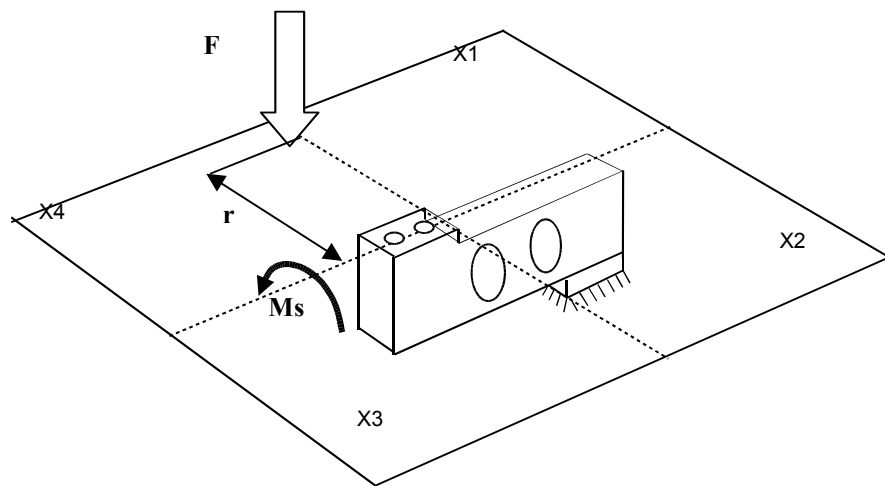
Sposób połączenia tensometrów wynika ze sposobu odkształceń sprężystych, jakie występują podczas obciążenia belki. Podczas jej obciążania siłą F tensometry **2** i **4** są ściskane a tensometry **1** i **3** rozciągane. Jak widać znajdują się one w miejscach o najmniejszym przekroju – są to przekroje w których belka ugina się przy obciążeniu (przewężenie oznaczone na rysunku jako przekrój A-A). Kształt belki oraz wyfrezowane otwory w korpusie belki zapewniają dokładnie w tych miejscach jednokierunkowy i jednorodny rozkład naprężeń oraz największe odkształcenie. Wycięcia oznaczone na rysunku symbolem w służą do wyeliminowania wpływu śrub mocujących na wskazania.

Wyfrezowanie otworów powoduje również większą wytrzymałość belki na momenty skręcające powstające przy niewspółśrodkowym obciążeniu pomostu.

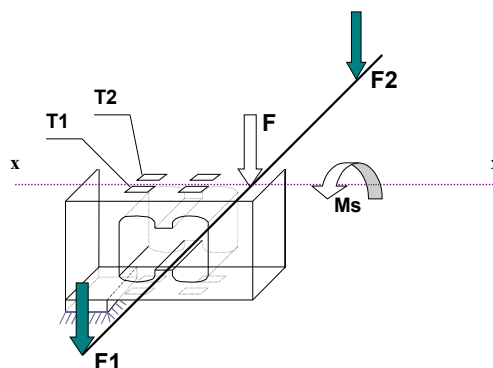
Belki tego typu nazywane są angielskim terminem „single point” co oznacza możliwość podparcia platformy wagi (nawet o znacznych rozmiarach) na jednym takim czujniku (rys.12). Ta niewątpliwa zaleta wynika ze specjalnej konstrukcji prostej

belki zginanej, której charakterystyczny kształt otworu zapewnia redukcję skalarną wartości momentu siły nacisku, przyłożonej w dowolnym punkcie platformy, do wartości siły tnącej odpowiadającej ciężarowi ważonego produktu. Podstawowym warunkiem uzyskania takiej zalety jest zachowanie symetrii przy naklejaniu tensometrów na powierzchnię czujnika. Ich osie muszą pokrywać się z osią symetrii czujnika. Dzięki temu momenty skręcające wywołane w ten sposób mają znikomy wpływ na ich odkształcenie a ich wpływ na wynik pomiaru jest rzędu 0,01%. Pomimo wszystko często belka wymaga końcowej kalibracji mechanicznej. Polega ona na równoważeniu mostka przez piłowanie korpusu belki w miejscach najmniejszego przekroju (oznaczone A-A) ale tylko od strony wyfrezowanych otworów. Pomost obciąża się odważnikiem wzorcowym np. w 4 różnych miejscach pomostu (na rysunku oznaczono X1, X2, X3 i X4). Czujnik musi dawać w każdym miejscu taki sam sygnał na wyjściu.

Rys. 12. Niesymetryczne obciążenie belki tensometrycznej i powstanie momentu skręcającego M_s działającego na belkę.



Innym sposobem uniknięcia wpływu niesymetrycznych obciążeń na wskazania z czujnika jest zastosowanie podwójnych tensometrów. Przykładem może być czujnik MC-3 hiszpańskiej firmy Epel Industrial.



Rys. 13. Czujnik siły stosowany w wagach jednoczujnikowych z układem tensometrów kompensujących wpływ momentów skręcających.

Charakterystyczną cechą tego typu czujników jest zastosowanie specjalnego układu tensometrów w belce tensometrycznej, eliminującego wpływ momentów skręcających na wielkość sygnału wyjściowego. Dzięki temu do wag z tym czujnikiem można stosować pomosty o wymiarach 800x800mm przy nośności 150, 300 i 500kg. Jak

widać na rys.13 na belce czujnika w miejscu, gdzie typowo znajduje się jeden tensometr, są naklejone dwa tensometry T1 i T2 (połączone szeregowo). Takie rozwiązanie powoduje, że siła działająca niesymetrycznie (np. F1 lub F2) powodująca powstanie momentu skręcającego działającego w osi x-x nie zmienia wypadkowej rezystancji tensometrów T1 i T2 a więc nie wpływa na wynik pomiarów. Jest to również sposób na zwiększenie sygnału wyjściowego, gdyż przyrost rezystancji w każdej gałęzi mostka jest dwukrotnie większy.

Przez dobór wartości pola przekroju pod tensometrami, dobór kształtu otworów oraz materiału belki otrzymuje się odpowiednią nośność belki, charakterystykę i czułość. Należy zastosować odpowiednie tensometry i technologię klejenia. Stosuje się również wiele sposobów kompensacji wpływu temperatury. Dobrze zaprojektowany czujnik siły powinien charakteryzować się następującymi cechami:

- liniowością charakterystyki,
- dokładnością i powtarzalnością pomiarów,
- odpornością na zmiany temperatury i wilgotności.

Wszystko to powoduje, że jest to zagadnienie dość trudne wymagające wielu obliczeń i prób. Omówiony rodzaj czujnika jest tylko jednym z wielu stosowanych w wagach. Jest jednak najbardziej rozpowszechniony.

Na dokładność pomiaru duży wpływ ma temperatura oraz jakość i długość przewodów połączeniowych. Przykładowo przewód o długości kilkunastu metrów może mieć nawet 1-procentowy wpływ na czułość układu pomiarowego.

Dla zmniejszenia tego wpływu można :

- stosować podłączenia z kablem 6-żyłowym (ale wtedy potrzebny wzmacniacz z wejściem kompensującym),
- w przypadku kabli 4-żyłowych stosować oryginalne kable producentów (ich skrócenie lub wydłużenie może pogorszyć charakterystykę termiczną),
- stosować zasilanie napięciem zmiennym.

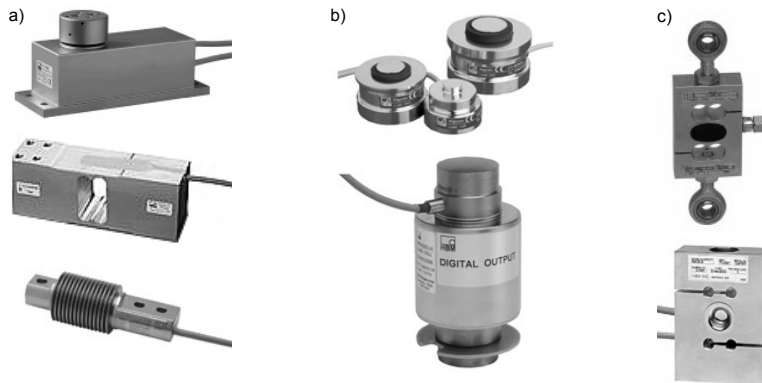
Zasilanie czujnika napięciem zmiennym (tzw. częstotliwością nośną) ma zasadniczy wpływ na eliminację zakłóceń i niepożądanych wpływów. Przykładowo dla czujnika HBM typ:DMP40 jest to 225Hz. Ważną konsekwencją zastosowania „nośnej” w miejsce napięcia stałego może być ograniczenie dynamiki pomiaru oraz zachowanie reżimów technologicznych związanych z pomiarami napięć zmiennych (np. specjalne kable, filtry odkłócające). Jest to rozwiązanie zalecane dla bardzo dokładnych pomiarów statycznych rozciągniętych w czasie.

W mostkach na skutek ich niedoskonałości pojawia się dryft temperaturowy. Można go wyeliminować poprzez wprowadzenie dodatkowych elementów kompensujących wpływ temperatury (tensometr bierny zbocznikowany rezystorem, element nietensometryczny „wpięty” w mostek ale o odwrotnej charakterystyce termicznej, drut z odpowiedniego metalu lub stopu, dodatkowe oporniki itp.)

2.1. Rodzaje tensometrycznych czujników siły stosowane w wagach elektronicznych.

Do wag elektronicznych stosuje się wiele rodzajów czujników tensometrycznych. Z punktu widzenia różnorodności konstrukcji mechanicznej jest to najliczniejsza grupa czujników tensometrycznych. Są to czujniki o różnych kształtach i wymiarach. Praktycznie są często używane w innych celach np. do pomiaru siły. Poniżej przedstawiam podział tego rodzaju czujników na przykładzie czujników produkowanych przez firmę HBM, która jest jedną z wiodących firm w tej dziedzinie. Ich działanie wynika z tensometrycznego pomiaru odkształceń takich elementów jak belka (zginanie, ścinanie), pierścień, tuleja lub kolumna (ściskanie). Zasadniczo można tu wyróżnić trzy rodzaje czujników (rys.14): belkowe, okrągłe i s-kształtne. Nowością ostatnich lat jest zastosowanie tzw. czujników zespolonych czyli czujników ze wzmacniaczem w jednej obudowie. Na wyjściu takiego czujnika otrzymujemy sygnał analogowy lub cyfrowy. Najnowsze trendy to czujniki z wyjściem w postaci

interfejsu RS 485 zapewniającego transmisję pomiaru na duże odległości bez pogorszenia jakości.



Rys. 14. Tensometryczne czujniki siły: a) belkowe b) okrągłe c) S-kształtne

2.2. Parametry tensometrycznych czujników siły

- Zakres pomiarowy lub ciężar znamionowy (potocznie nośność) w kg lub tonach (również w N lub KN – rzadko stosowane). Określa zakres mierzonych wartości.
- Liczba działek – standardowe wartości to 1000, 2000, 3000, 6000 aż do kilku milionów w czujnikach najwyższej klasy z wyjściem cyfrowym.
- Klasa dokładności w jednostkach bezwymiarowych np. 0.2 lub 0.1 albo symbolicznie np. D1 C2 C3
- Czułość znamionowa w mV/V np. 2,054 mV/V (oznacza wielkość sygnału wyjściowego z czujnika przypadającego na 1V zasilania przy pełnym obciążeniu).
- Błąd nieliniowości w % np. $< \pm 0,0333\%$
- Oporność wejściowa w omach np. 340 Ω
- Oporność wyjściowa w omach np. 350 Ω
- Zalecane napięcie zasilania w voltach np. 5 V
- Zakres napięć zasilających w voltach np. 0,5...12 V (oznaczający napięcie zasilania które zapewnia prawidłową pracę i zachowanie nominalnych parametrów)
- Maksymalna siła robocza lub maksymalny ciężar znamionowy – po przekroczeniu tej wartości następuje uszkodzenie czujnika - wyrażona w % np. 130% oznacza możliwość przeciążenia czujnika o 30% w stosunku do ciężaru znamionowego.
- Stopień ochrony IP (zwany też klasą szczelności np. wodoodporna, bryzgoszczelna, np. wg DIN EN 60529 - IP67 lub IP68) – określa warunki pracy czujnika
- Podstawowa częstotliwość rezonansowa f_0 w kHz np. 4.4 kHz.
Częstotliwość rezonansowa korpusów czujników jest zależna m.in. od ich masy i sztywności. Sygnały wibracji i mechanicznego udaru wpływają na efekt pomiaru. Obciążenia wibracyjne muszą leżeć w paśmie częstotliwości zdecydowanie poniżej częstotliwości rezonansowej.
- Ilość przewodów doprowadzających (cztery lub sześćżyłowe w ekranie – dodatkowe 2 kable służą do kompensacji wpływu długości przewodów na dokładność pomiaru)
- Długość przewodu przyłączeniowego – określa długość przewodu dołączonego fabrycznie do czujnika
- Powtarzalność pomiaru: np. 0,1%
- Materiał z którego wykonany jest czujnik np. ze stali nierdzewnej lub ze stali wysokostopowych, stosuje się również aluminium i jęgo stopy.

- Odporność na warunki zewnętrzne (np. przez zastosowanie obudów zewnętrznych z gazem ochronnym, zaspawanie tensometru w metalowym mieszk)
- Zakres bezpiecznych temperatur pracy np. od 10 do 120°C.
- Sposób mocowania (ilość otworów mocujących, średnica czopów itp.)
- Wielkość pomostu jaki można przymocować do czujnika – definiowane tylko do czujników typu „single point”.

3. Podstawowe wiadomości o wagach

Wielkością fizyczną charakterystyczną dla każdego ciała materialnego jest jego masa. Jest to wielkość niezależna od przyciągania ziemskiego ale charakteryzuje miarę bezwładności danego ciała. Natomiast ciężar stanowi wynik oddziaływania przyciągania ziemskiego na masę. Ponieważ przyciąganie ziemskie związane z przyspieszeniem ziemskim jest różne w różnych miejscach kuli ziemskiej dlatego np. ciężar ciała na równikach jest około 0,5% większy. Między masą a ciężarem danego ciała istnieje zależność wynikająca z prawa Newtona:

(7)

$$F = m \cdot g$$

gdzie:

F - ciężar ciała w N
m - masa ciała w kg
g - przyspieszenie ziemskie (dla Polski przyjmuje się 9,81227 m/s²)

Proces wyznaczania masy ciała przy wykorzystaniu sił ciężkości działających na to ciało nazywa się ważeniem, a stosowany w tym procesie przyrząd pomiarowy – wagą.

Pierwsze wagi mechaniczne pojawiły się około 4 tysięcy lat temu w starożytnym Babilonie. Były to wagi równoramienne wiszące działające na zasadzie porównania z masą wzorcową (odważniki kamienne, ziarna itp.). Konstrukcje wag były stopniowo udoskonalane. Odważniki zostały zastąpione wewnętrznymi wzorcami zintegrowanymi z wagą. Do mechanizmów zostały dodane elementy przełącznikowe umożliwiające rozszerzenia zakresów ważenia. Przez długi czas stosowano różne jednostki ciężaru. Dopiero w 1790 roku we Francji ustalono międzynarodowy metryczny system miar, według którego za jednostkę masy przyjęto kilogram. System ten obowiązuje w Polsce od 1919 roku.

W obecnych czasach wagi mechaniczne są wypierane przez wagi elektroniczne. Nadal jednak w wielu krajach w handlu i przemyśle funkcjonują stare sprawdzone konstrukcje wag mechanicznych. Należy przyznać, że nadal najdokładniejszymi wagami w urzędach metrologicznych w Polsce i za granicą są precyzyjne wagi mechaniczne o prostej konstrukcji (ale o bardzo dużej dokładności wykonania) służące do wzorcowania najdokładniejszych odważników. Wzorce te są następnie używane do regulacji wag elektronicznych, które są jednak wygodniejsze i otwierają nowe możliwości w procesach automatyzacji ważenia.

3.1. Podział wag

Pomiary masy obejmują zakres od 1 mikrograma (1/1000 000 g - wagi mikroanalityczne stosowane w chemii) aż do 1000 megagramów (1000 ton – wagi kolejowe stosowane w hutnictwie). W tak szerokim zakresie stosuje się bardzo wiele typów wag. Prócz nowych typów są jeszcze stare wagi sprzed kilkunastu a nawet kilkudziesięciu lat, które pracują nadal. Poniżej przedstawiono podział wag pod względem ich cech konstrukcyjnych i własności użytkowych:

Ze względu na dokładność pomiaru.

- klasa specjalna (klasa I) obejmująca wagi dla bardzo małych obciążeń lub specjalnych zastosowań, np. wagi wzorcowe, wagi mikroanalityczne.

- klasa wysoka (klasa II) obejmująca wagi analityczne i inne o błędach względnych rzędu od $1 \cdot 10^{-4}$ do $1 \cdot 10^{-5}$.
- klasa średnia (klasa III) obejmująca wagi powszechnego użytku (szczególnie wagi stosowane w celach rozliczeniowych) o błędach względnych rzędu od $1 \cdot 10^{-3}$ do $1 \cdot 10^{-4}$.
- klasa zwykła (klasa IV) obejmująca wagi powszechnego użytku (szczególnie wagi stosowane do kontroli procesów technologicznych) o błędach względnych rzędu od $5 \cdot 10^{-3}$ do $1 \cdot 10^{-3}$.

Ze względu na konstrukcję i sposób działania.

- Wagi mechaniczne – wagi, których podstawowym elementem jest mechaniczny element pomiarowy (np. dźwignia, sprężyna, tłok) lub układ tych elementów, służący do wyznaczania masy ciała (np. waga dźwigniowa uchylna, sprężynowa, hydrauliczna, pneumatyczna).
- Wagi elektroniczne – wagi w których ważona masa oddziałuje bezpośrednio (poprzez pomost lub zawieszenie) na czujnik lub zespół elektronicznych czujników siły połączonych mechanicznie lub elektrycznie, w których wytwarza się sygnał proporcjonalny do wielkości ważonej. Wartość tego sygnału jest wskazywana przez miernik odczytowy wywzorcowany w jednostkach masy.

W ostatnich latach praktycznie wszystkie konstrukcje wag opierają się na odczycie elektronicznym. Wagi mechaniczne są nadal produkowane ale w bardzo małych ilościach lub do specjalnych zastosowań. Zalety wag mechanicznych to: długowieczność i brak zasilania prądem. Wadą jest mała dokładność.

Ze względu na sposób pomiaru:

- do pomiarów statycznych (do ważenia ładunków będących w spoczynku)
- do pomiarów dynamicznych (np. do ważenia samochodów w ruchu, kolejowe – do ważenia wagonów podczas jazdy)

Ze względu na zastosowanie (ze względu na dużą ilość rodzajów wag można wymienić tylko te najbardziej istotne):

- handlowe (kalkulacyjne), laboratoryjne, apteczne, jubilerskie, precyzyjne, techniczne, platformowe, pomostowe, najazdowe, paletowe, płozowe, kolejkowe, hakowe, wiszące, suwnicowe, weterynaryjne, pocztowe, liczące, inwentarzowe, samochodowe, wagi do wyznaczania gęstości, wagi do wyznaczania wilgotności (wagosuszarki), wagi hybrydowe, silosowe, wagopakarki, dozujące, taśmociągowe, zbiornikowe, etykietujące, samoobsługowe, kontrolne, wagi dla służby zdrowia (niemowlęce, łóżkowe, krzeselkowe, osobowe), wagoskanery, wagi do pomiaru nacisku sił na osie.

3.2. Parametry wag. Definicje

Do podstawowych parametrów wag należą:

Obciążenie maksymalne wagi, oznaczane **Max**, wyraża największą masę ładunku, jaka może być na wadze wyznaczona, powyżej której ważenie jest niemożliwe lub zabronione. Inne stosowane nazwy to udźwig lub nośność wagi.

Obciążenie minimalne, oznaczane **Min**, wyraża masę ładunku, poniżej której ważenie nie powinno być wykonane z powodu zbyt dużego błędu względnego.

Zakres ważenia, czyli zakres pomiarowy wagi, to różnica między obciążeniem maksymalnym i minimalnym. W tym zakresie obciążeń waga powinna spełniać wymagania ustalone przepisami legalizacyjnymi.

Działka odczytowa, oznaczana **d**, wyraża najmniejszą elementarną wartość odczytowaną wagi (zwana też działką elementarną).

Działka legalizacyjna, oznaczana **e**, jest to wielokrotność działki odczytowej oznaczającej dokładność wagi, która jest podstawą do klasyfikacji wag i określania błędów granicznych dopuszczalnych wagi. Wartość działki legalizacyjnej może być równa lub większa od działki elementarnej.

Liczba działek wagi, oznaczana **n**, określa liczbę działek odczytowych zawartych w zakresie od zera do obciążenia maksymalnego i wyraża się wzorem:

$$(8) \quad n = \frac{\text{Max}}{d}$$

W nazewnictwie elektronicznym zwana też rozdzielczością, przykładowo waga o zakresie Max = 1kg i d = 0,1g ma rozdzielczość 10.000.

Granica wytrzymałości wagi, oznaczana **Lim**, wyraża graniczne obciążenie statyczne, dopuszczalne ze względu na wytrzymałość wagi. Obciążenie to nie powinno wywierać ujemnego wpływu na własności metrologiczne wagi, mimo że jego wartość może być większa od obciążenia maksymalnego wagi.

Dokładność wskazań, charakteryzuje zdolność wagi do wskazywania wartości masy ładunku bliskiej jej rzeczywistej wartości. Dokładność wyraża się wartością granicznego dopuszczalnego błędu wskazań (**B**). Błąd wagi (**b**) w jej zakresie pomiarowym jest równy różnicy między wskazaniem wagi (**w**) a poprawną wartością masy (**m**), tj. masą wzorców stanowiących obciążenie wagi i wynosi:

$$(9) \quad b = w - m \leq B$$

Czułość wagi wyraża się wielkością zmian wyniku ważenia pod wpływem określonej zmiany obciążenia, równej na ogół granicy błędów wskazań. Dla wagi elektronicznej czułość wyraża się ilorazem długości działki elementarnej przez wartość tej działki.

Pobudliwość wagi (ruchliwość) charakteryzuje jej zdolność do zmiany położenia równowagi pod wpływem małych zmian obciążenia. Pobudliwość wyraża się progiem pobudliwości, tj. wartością obciążenia, pod wpływem którego otrzymuje się zauważalną zmianę położenia równowagi.

Rozrzut wskazań wagi (zmienność) charakteryzuje zdolność wagi do wykazywania identycznych wyników ważenia przy wielokrotnym ważeniu tego samego ładunku. Rozrzut wyraża się zakresem rozrzutu określonym jako maksymalna różnica między wskazaniami wagi otrzymanymi w danej serii ważeń tego samego ładunku. Dla wag wysokiej dokładności rozrzut wyraża się odchyleniem średnim kwadratowym **s** pojedynczego wskazania w danej serii ważeń, obliczonym z wzoru:

(10)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

gdzie:

x_i – rezystancja drutu oporowego,

n – liczba wskazań,

\bar{x} – średnia arytmetyczna z powyższych wskazań.

Powtarzalność, oznacza że ta sama masa położona wielokrotnie na szalce powinna dać ten sam (lub prawie ten sam) odczyt za każdym razem, w warunkach stałych.

3.3. Legalizacja i zatwierdzenie typu

Od kilkudziesięciu lat wszystkie produkowane wagi są znakowane przez państwowe instytucje metrologiczne (przez Urzędy Miar).

Obowiązkiem producenta jest wyznaczenie i opisanie wszystkich parametrów wagi na tabliczce znamionowej i w specyfikacji technicznej. Wszystkie wagi służące do obrotu towarowego muszą przejść przez tzw. legalizację. Jest to okresowe badanie sprawności technicznej wagi mające na celu określenie czy dana waga zachowuje w dalszym ciągu swoje prawidłowe własności metrologiczne. Badania te polegają na sprawdzeniu wagi legalizowanymi wzorcami masy oraz określeniu sprawności technicznej danego urządzenia ważącego. Okres ten standardowo wynosi w Polsce 25 miesięcy dla powszechnie stosowanych wag i wzorców masy (odważników). Dodatkowo są stosowane tzw. zatwierdzenia typu określające czy dany podzespół wagi (czujnik siły lub miernik odczytowy) lub waga w całości mogą być dopuszczone do produkcji i powszechnego użytku. atwierdzenia typu są wydawane tylko przez Główny Urząd Miar w W-wie. Jest to decyzja Prezesa Głównego Urzędu Miar dopuszczająca przyrządy pomiarowe danego typu do legalizacji, uwierzytelnienia lub użytkowania w kraju. Decyzja ta podejmowana jest na podstawie badań prototypów lub egzemplarzy produkcyjnych tych przyrządów, po stwierdzeniu, że spełniają wymagania określone w przepisach.

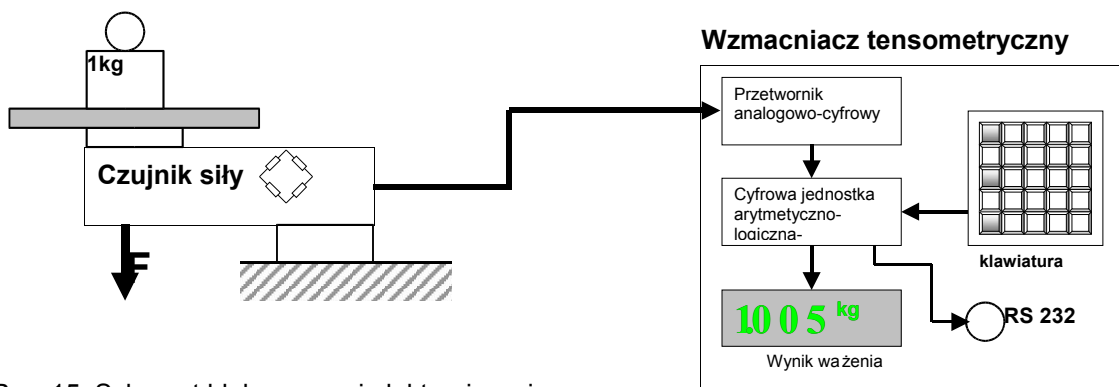
Obowiązkowi zatwierdzenia typu podlegają produkowane w kraju lub sprowadzane z zagranicy przyrządy pomiarowe podlegające legalizacji lub obowiązkowemu uwierzytelnieniu.

Do legalizacji na terenie całego kraju są wyznaczone tzw. Obwodowe Urzędy Miar. Dział związany z ważeniem i wagami jest tylko częścią ich działalności. W urzędach sprawdza się bardzo wiele innych urządzeń takich jak tachografy, taksometry, dystrybutory paliw, liczniki i urządzenia biorące udział w mierzeniu i „przepływie” wielkości fizycznych. Instytucje te mają na celu utrzymanie rzetelności pomiarów i rozliczeń we wszystkich działach gospodarki.

3.4. Podstawy budowy wag elektronicznych z czujnikami tensometrycznymi

Wagi elektroniczne są to wagi, w których ciężar ważonego ładunku działa na elektroniczny czujnik siły, wytwarzając w nim proporcjonalny do ciężaru sygnał elektryczny, którego wartość wskazywana jest przez miernik elektroniczny wywzorcowany w jednostkach masy. Tensometryczne wagi elektroniczne znalazły szerokie zastosowanie jako wagi przemysłowe, włączane w układy automatycznej regulacji i kontroli procesów technologicznych z uwagi na szereg zalet, jakimi są:

- duża szybkość ważenia,
- małe wymiary gabarytowe wagi,
- możliwość rejestrowania i przekazywania na odległość wyników ważenia oraz wykorzystania sygnału pomiarowego do sterowania innymi urządzeniami,
- minimalne przemieszczenie pionowe układu pomiarowego,
- prosty montaż, wzorcowanie i kontrola.



Rys. 15. Schemat blokowy wagi elektronicznej.

Wagi elektroniczne wykonywane są w klasie dokładności zwykłej lub średniej jako wagi pomostowe, zbiornikowe, dźwigowe lub przenośnikowe. Obciążenia maksymalne tych wag wahają się od kilku kilogramów do 2000 t.

Budowę wszystkich wag elektronicznych można przedstawić za pomocą jednego wspólnego schematu blokowego. Głównymi elementami wagi są: czujnik siły i wzmacniacz tensometryczny.

Pomiar ważonej masy polega na jej umieszczeniu na pomoście wagi, który jest mechanicznie sprzężony z czujnikiem siły. Jak wiadomo na masę położoną na szalce oddziałuje siła przyciągania ziemskiego a więc wywiera ona określoną siłę na czujnik umieszczony pod szalką wagi. Ponieważ w danym miejscu siła przyciągania ziemskiego jest stała, to masa danego ciała jest wprost proporcjonalna do siły jaką wywiera ona na czujnik. Tą właściwość wykorzystuje się we wszystkich rodzajach wag. Praktycznie wagi mierzą siłę przyciągania ziemskiego działającą na ważony przedmiot a wynik jest wskazywany w jednostkach masy (np. w kilogramach).

Sygnal z czujnika siły jest wzmacniany we wzmacniaczu wstępnym bloku przetwornika analogowo-cyfrowego (rys.15) i w postaci cyfrowej trafia do cyfrowej jednostki arytmetyczno – logicznej, gdzie następuje przekształcenie wyniku ważenia na postać cyfrową (wyświetlacz).

Obecnie większość wag posiada bardzo dużo dodatkowych funkcji np. liczenie elementów, wprowadzanie przelicznika cenowego, funkcje tworzenia receptur, funkcje przemysłowe itp. Wagi o większych nośnościach wymagają zastosowania wielu czujników siły oraz sumatora sygnałów ale ich schemat blokowy nie ulega zmianie. Na standardowym wyposażeniu współczesnych wag znajduje się również interfejs komputerowy (najczęściej RS232).

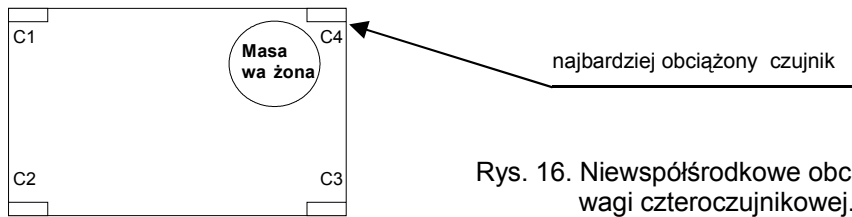
Nośność wagi podaje się zawsze w jednostkach masy wg jednostek występujących w danym kraju (np. w Polsce w g, kg, t). Nowoczesne wagi mają wbudowane opcje przeliczania na inne jednostki masy (np. karaty, uncje, funty itp.) lub siły (N, kN). Nośność czujników stosowanych w wagach podaje się w jednostkach masy. Rzadko występują oznaczenia nośności w jednostkach siły.

3.5. Nośność wagi a ilość czujników

W wagach jedno-czujnikowych nośność czujnika wyznacza nośność wagi. Często do takich wag są zakładane czujniki o większej nośności ze względu na większą wytrzymałość na niewspółosiowe obciążenia. Wzmacniacze pomiarowe są na tyle dokładne, że praca do połowy zakresu nie wpływa istotnie na jakość pomiarów. Inaczej ma się sprawa jeżeli jest potrzebny duży pomost wagi. Stosuje się wtedy cztery czujniki zamontowane symetrycznie na rogach pomostu gdyż wymiary pomostu wykluczają zastosowanie jednego czujnika (moment gnący byłby zbyt duży). Pomost wagi podparty jest w kilku punktach (w tym wypadku w czterech). Ciężar rozkłada się na cztery czujniki a siły skręcające mają bardzo małe wartości. Zasadniczo nośność takiej wagi powinna być równa nośności jednego czujnika pomnożonej przez cztery. Taka sytuacja ma miejsce w wagach w których obciążenie pomostu występuje dokładnie na środku (np. wagi silosowe lub zbiornikowe – środek ciężkości ważonego ziarna ze względu na kształt silosu zawsze pokrywa się z osią symetrii silosu, w wagach zbiornikowych własności płynów zapewniają również symetryczne obciążenie zbiornika).

Jednak w wagach pomostowych platformowych nie można przewidzieć w jakim stopniu użytkownik obciąży niewspółosiowo wagę (rys.16). Dlatego w tego typu wagach stosuje się czujniki o dwukrotnie większej nośności niż wynikałoby z potrzeb konstrukcji. Np. firma AXIS stosuje do wagi o nośności 1000 kg cztery czujniki o nośności 550kg.

Obciążenie nominalne czujników powinno być dobrane odpowiednio do warunków pracy wagi i sposobu jej obciążania tak, aby przy obciążeniach w zakresie pomiarowym wagi nie następowało przeciążenie żadnego z czujników.



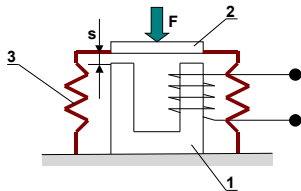
Rys. 16. Niewspółrodkowe obciążenie wagi czteroczujnikowej.

3.6. Inne rodzaje czujników stosowane w wagach elektronicznych

W wagach elektronicznych stosuje się też inne rodzaje czujników siły. Poniżej zostaną omówione tylko te najczęściej stosowane.

3.6.1. Czujniki indukcyjne

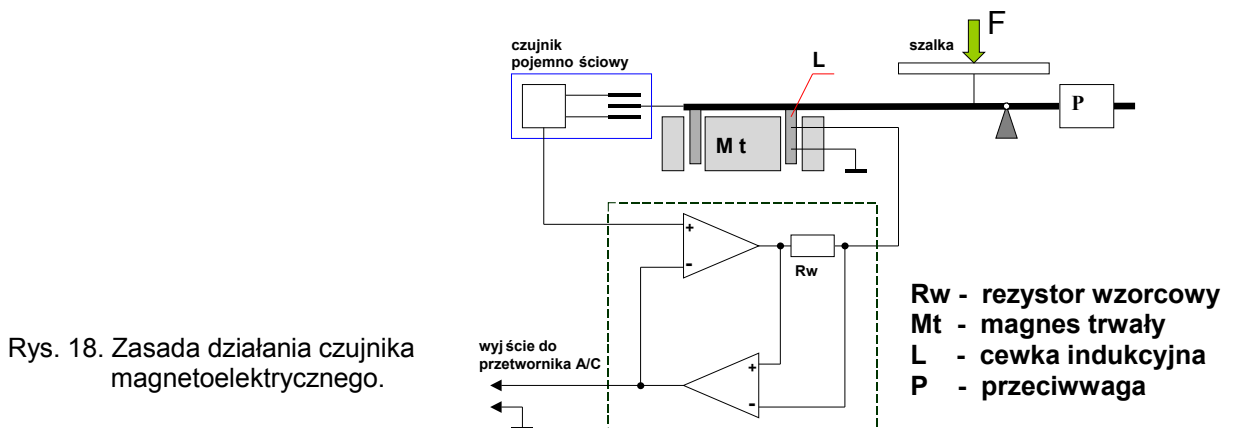
Wykorzystują zmianę oporu indukcyjnego. Przykładowy czujnik (rys.17) składa się z cewki z rdzeniem ferromagnetycznym **1**, zwory **2**, oraz ze stalowej obudowy sprężynującej z pierścieniowymi żeberkami **3**. Wykorzystano w nim zjawisko dużych zmian indukcyjności cewki i rdzenia przy niewielkich zmianach szczeliny **s** na skutek nacisku na zworę magnetyczną **2**.



Rys. 17. Zasada działania czujnika indukcyjnego.

3.6.2. Czujniki magnetoelektryczne

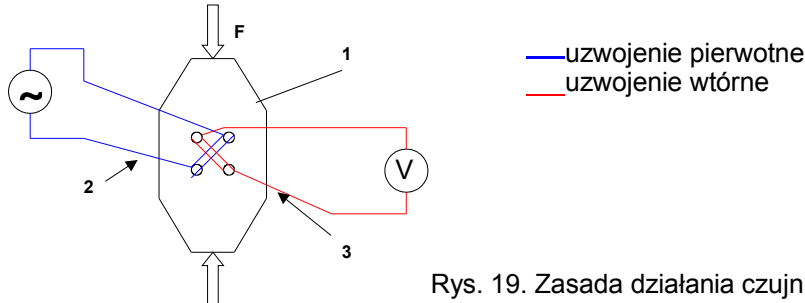
Bardziej dokładne, stosowane w wagach wysokiej dokładności. Zasada działania: ważona masa ciała jest zawieszona w polu magnetycznym, wytworzonym zwykle przez elektromagnes i magnes stały, a pomiar masy odbywa się metodą pośrednią przez pomiar zmian natężenia prądu zasilającego elektromagnes.



Szalka wagi (rys.18) jest zawieszona w polu magnetycznym wytworzonym przez cewkę **L** znajdującą się we wnętrzu pierścieniowego magnesu trwałego (**Mt**). Po zmianie obciążenia następuje zakłócenie tego stanu i szalka dąży do zmiany położenia równowagi. Powoduje to przemieszczenie przesłonki w czujniku pojemnościowym. Sygnał z czujnika po wzmacnieniu powoduje powstanie prądu kompensacyjnego w uzwojeniu selenoidu i układ wraca ponownie do położenia równowagi. Natężenie prądu kompensacyjnego jest więc funkcją ważonej masy.

3.6.3. Czujniki magnetosprężyste (pressduktorowe)

Zalety: możliwość pomiaru bardzo dużych mas, prosta konstrukcja, małe wymiary gabarytowe, duża odporność na niekorzystne warunki pracy (zanieczyszczenia, wilgotność, temperaturę), elektryczny sygnał wyjściowy (o stosunkowo dużej wartości), odporność na przeciążenie.



Rys. 19. Zasada działania czujnika magnetosprężystego.

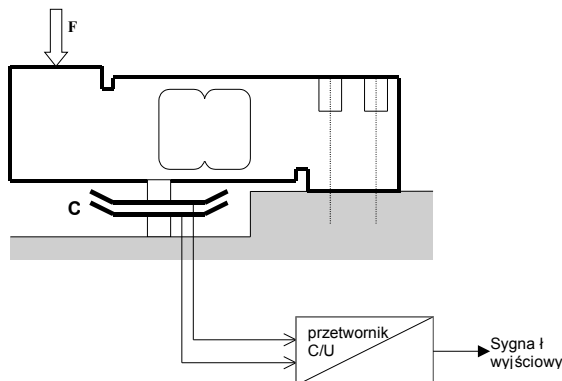
Zasada działania (rys.19): czujnik składa się z pakietu blach (1) transformatorowych z symetrycznie wykonanymi czterema otworami, w których umieszczone są dwa uzwojenia, skrzyżowane wzajemnie pod kątem prostym. Uzwojenie pierwotne (2) zasilane jest prądem zmiennym. Jeżeli na czujnik działa siła ściskająca F, to na skutek sprężystego odkształcenia pakietu zmienia się przenikalność magnetyczna (zmniejsza się w kierunku działania siły, a zwiększa w kierunku poprzecznym), przez co w uzwojeniu wtórnym (3) zaindukuje się napięcie proporcjonalne do działającej siły. Uzyskiwane z czujnika napięcie z uwagi na stosunkowo dużą wartość nie wymaga wzmocnienia. Cechą charakterystyczną czujnika jest jego niewrażliwość na zakłócające pola zewnętrzne, co wynika z niskiej impedancji czujnika.

3.6.4. Czujniki pojemnościowe

Wartość masy wpływa na zmianę pojemności. Jednym z rozwiązań jest połączenie belek czujników tensometrycznych (część mechaniczna) z czujnikiem pojemnościowym (część elektryczna). Takie rozwiązanie zastosowała niemiecka firma RHEWA w mniej dokładnych wagach (rys.20)

Zalety – niska cena

Wady – mała dokładność, mała odporność na wilgoć i zanieczyszczenia,



Rys. 20. Zasada działania czujnika pojemnościowego.

4. Wzmacniacze tensometryczne stosowane w wagach

Wzmacniaczem tensometrycznym (miernikiem) wag elektronicznych jest kompensator analogowy lub cyfrowy, wskazujący w jednostkach masy wynik ważenia, proporcjonalny do wartości przejmowanego sygnału. Jest to wzmacniacz

z automatyczną regulacją stanu równowagi układu pomiarowego.

Wzmacniacze tensometryczne służą do odczytu wskazań z czujników siły znajdujących się w wadze. Ich odmienność w porównaniu z urządzeniami laboratoryjnymi polega na tym, że wszystkie zabiegi mające na celu zrównoważenie podłączonego czujnika są przeprowadzone tylko raz podczas produkcji lub instalacji wagi (jest to tzw. kalibracja wagi).

Urządzenia te na przestrzeni wielu lat rozwoju elektroniki podlegały różnym przemianom. Pierwsze z nich to praktycznie bardzo czułe galwanometry.

Wynalezienie elementów wzmacniających (lampy i tranzystora) przyczyniło się do ulepszenia tych urządzeń. Jednak największego skoku jakościowego w miernictwie dokonała technika cyfrowa – zastosowanie algorytmów matematycznych przy odczycie i obróbce sygnałów bardzo zwiększyło dokładność pomiaru.

Inne nazwy wzmacniacza tensometrycznego stosowanego w wagach to: miernik wagowy, moduł wagowy, głowica pomiarowa, miernik odczytowy, moduł pomiarowy lub terminal wagowy.

Większość wzmacniaczy stosowanych w wagach elektronicznych ma taki sam schemat blokowy. Różnice w dokładności pomiarowej polegają jedynie na zastosowaniu mniej lub bardziej dokładnych komponentów elektronicznych (kwestia doboru układów scalonych). Ze względu na daleko idący postęp w elektronice funkcje dodatkowe zostały mocno rozbudowane. Praktycznie cechy wzmacniacza jako takiego ograniczyły się do jednego lub dwóch układów scalonych z elementami dodatkowymi. Wynika to z faktu, że rozdzielczość wzmacniaczy już dawno wyprzedziła rozdzielczość pomiarową czujników siły. Ze względu na rozbudowę dodatkowych funkcji nazwa wzmacniacz tensometryczny stała się nieadekwatna. Powszechnie stosowana nazwa to moduł wagowy lub terminal wagowy.

Do najważniejszych cech modułów wagowych zaliczamy:

- praca z dowolnym tensometrycznym czujnikiem siły,
- możliwość podłączenia kilku czujników siły,
- programowanie wszystkich parametrów wagi,
- możliwość wprowadzenia i edycji funkcji dodatkowych,
- zaawansowane funkcje matematyczne,
- zaawansowane funkcje kalkulacyjne do celów handlowych,
- wydruki (paragony, kody kreskowe, raporty sprzedaży, etykiety),
- sterowanie innymi urządzeniami (wyjścia analogowe i cyfrowe),
- wejścia dodatkowe (czytniki kodów, sygnały zezwalające itp.)
- współpraca z innymi modułami,
- niezależna obsługa kilku wag,
- praca w sieci komputerowej,
- rozbudowana pamięć wyników pomiarów.

Inne rodzaje wzmacniaczy tensometrycznych to:

- komputerowe wzmacniacze tensometryczne – tylko do współpracy z komputerem,
- wagi komputerowe (wzmacniacz umieszczony w czujniku lub na karcie PC np. typowa DAQ wraz z oprogramowaniem).

4.1. Proces przetwarzania sygnału z czujnika

Budowa wagowych wzmacniaczy tensometrycznych jest dość skomplikowana. Producenci stosują wiele różnych rozwiązań. Proces obróbki sygnału z czujnika siły na przestrzeni lat ulegał kolejnym udoskonaleniom. Wiele wzmacniaczy wagowych jest tak skonstruowanych, że można do nich podłączyć prawie każdy mostek tensometryczny – stawia to duże wymagania algorytmom obsługującym elektronikę wagową. Rozrzut parametrów czujników siły, różne długości kabli, zmiany temperatury, zakłócenia elektromagnetyczne, ciężkie warunki pracy to tylko niektóre z problemów z jakimi musi sobie poradzić tego typu wzmacniacz. Praktycznie nie byłoby to możliwe bez zaawansowanej techniki cyfrowej.

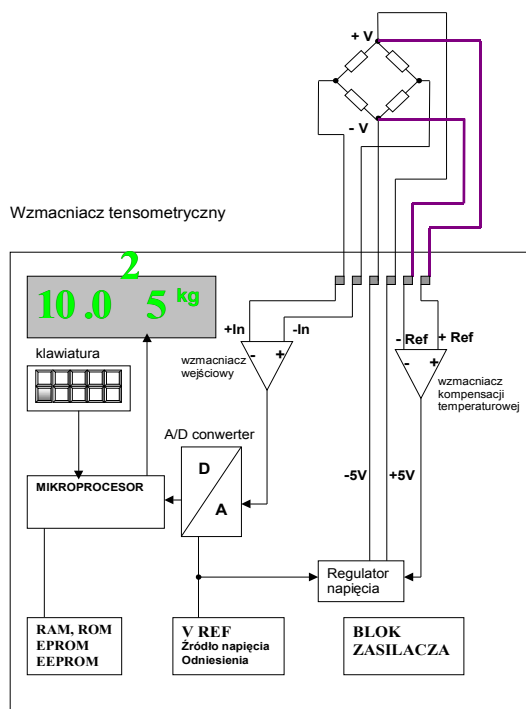
Wzmacniacz stanowi integralną całość. Do jego działania potrzebny jest czujnik i napięcie zasilania. W jego wnętrzu znajdują się zasilacz, wyświetlacz, klawiatura

i płyta elektroniki, na której się znajdują: wzmacniacz, przetwornik A/D, mikroprocesor, pamięci (EPROM, RAM i EEPROM). Schemat blokowy przedstawiono na rys.21. Wzmacniacz spełnia następujące zadania:

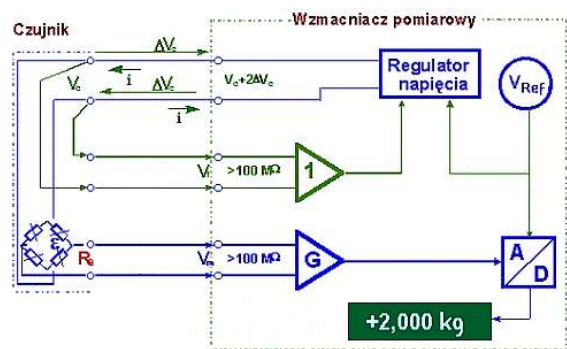
- zasila czujnik siły,
- zawiera bardzo dokładne źródło napięcia odniesienia tzw. napięcie referencyjne od którego zależy dokładność pomiaru,
- mierzy sygnał z czujnika,
- kompensuje długość przewodów doprowadzających,
- kompensuje wpływ temperatury na wynik pomiaru,
- wyświetla wynik pomiaru,
- przechowuje w pamięci dane dotyczące czujnika (ma wpisane do pamięci wszystkie parametry potrzebne do współpracy z czujnikiem),

Jak widać na rys.21 wzmacniacz jest zbudowany z kilku podstawowych części. Do czujnika podłączone są cztery przewody główne i dwa dodatkowe (oznaczone kolorem fioletowym). Przewody te służą do kompensacji wpływu długości przewodu na wynik pomiaru. Przewody czujnika zmieniają właściwości podczas pracy, gdyż nagrzewają się. Są one zwarte w czujniku z przewodami zasilającymi. Sposób kompensacji pokazano na rys.22 .

Powrotne napięcie z czujnika jest pomniejszone o wartość spadku napięcia na przewodzie zasilającym równym ΔV i wzmocnione we wzmacniaczu **1** . Napięcie wyjściowe z tego wzmacniacza jest porównywane z napięciem wzorcowym V_{Ref} w regulatorze napięcia.



Rys. 21. Schemat blokowy miernika wagowego.



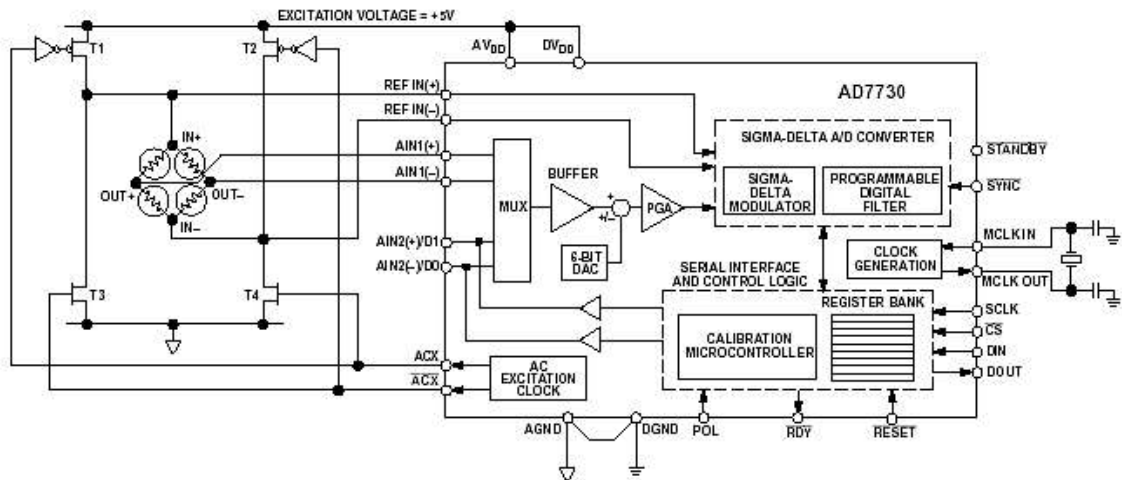
Rys. 22. Zasada działania.

Dzięki temu napięcie zasilające mostek ma zawsze taką samą wartość niezależną od długości i temperatury kabla (jest odpowiednio powiększone).

Sygnał z mostka wzmocniony przez wzmacniacz **G** jest skompensowany i podany na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego **A/D**. Po przeliczeniu wartości i uwzględnieniu współczynników kalibracji zapamiętanych w pamięci EEPROM wynik jest wyświetlany na wyświetlaczu cyfrowym.

Postęp techniki sprawił, że wszystkie bloki pokazane na rysunku 22 są zawarte w jednym układzie scalonym. Jednym z popularnych układów scalonych nowej

generacji jest układ AD7730 (stosowany m.in. w wagach polskiej produkcji). Układ jest bardzo uniwersalny. Schemat blokowy układu przedstawiono na rys.23.



Rys. 23. Zasada działania. Układu kompensacji AD7730.

Jest to nowoczesny układ analogowo-cyfrowy, wszystkie parametry pracy układu są programowane za pomocą magistrali szeregowej - można zmieniać czułość wejściową, rozdzielczość pomiarową przetwornika A/D, parametry filtrów cyfrowych i wiele innych parametrów. Zawiera wyspecjalizowany wzmacniacz kompensacyjny z analogowo-cyfrowym konwerterem typu „sigma-delta” służący do kompensacji wpływu temperatury oraz długości i jakości kabli. Układ zapewnia automatyczną kompensację mostka uniezależniając ją od wpływu warunków zewnętrznych rozłożonych w czasie takich jak zmiana punktu zerowego mostka, dryft temperaturowy, zakłócenia z sieci zasilającej. Rozdzielczość wewnętrzna układu wynosi 230.000, temperatura pracy od -40°C do 85°C a dryft temperaturowy układu to zaledwie $5\text{nV}/^{\circ}\text{C}$ (tzw. offset drift).

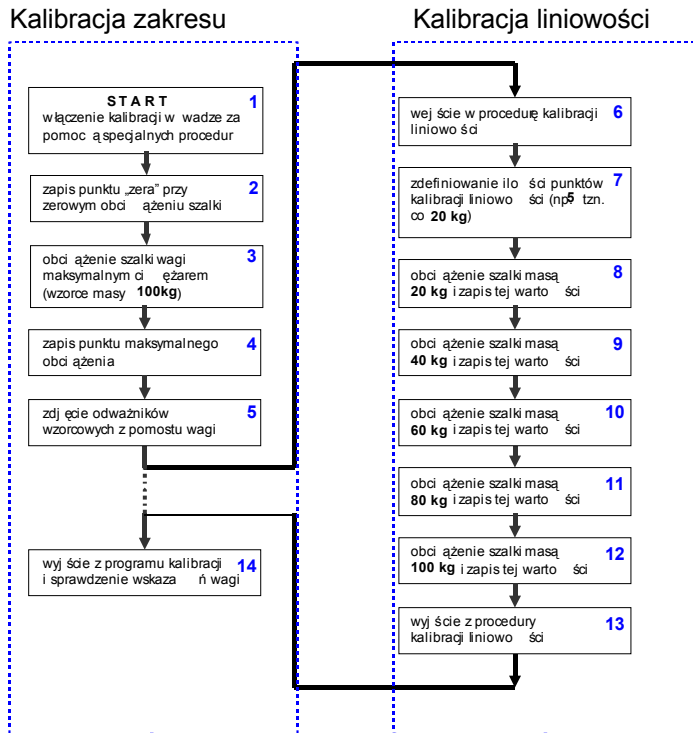
4.2. Programowanie i kalibracja

Programowanie wzmacniacza tensometrycznego polega na wprowadzeniu do jego pamięci kilku podstawowych parametrów takich jak:

- zakres ważenia,
- wewnętrzna działka odczytowa,
- jednostka pomiarowa (g, kg, N),
- zaokrąglenie wyniku (1, 2, 5),
- ilość działek odczytowych wagi (rozdzielczość pomiaru np. 5000 działek),
- masa odważników do kalibracji, oraz parametrów dodatkowych:
- ilości punktów korekcji liniowości,
- włączenie kompensacji temperaturowej,
- rodzaj i parametr filtru cyfrowego (szybkość ważenia, stabilność pomiaru, sposób uśredniania wyników),
- rodzaj i parametry transmisji na wyjściu cyfrowym,
- włączenie funkcji dodatkowych i zdefiniowanie ich parametrów (liczenie, sumowanie, sterowanie urządzeń zewnętrznych, sygnalizowanie przekroczenia progów, drukowanie wyników, automatyczne przesyłanie wyników pomiarów itp.)

Po wstępnym zaprogramowaniu parametrów wzmacniacza należy go skalibrować. Czynność ta polega na wpisaniu charakterystyki czujnika do pamięci wzmacniacza. Do kalibracji są potrzebne precyzyjne odważniki i fachowa wiedza.

Typowy algorytm kalibracji przedstawiono na rys.24. Jest to przykład dla wagi o nośności 100kg.



Rys. 24. Typowy algorytm kalibracji wagi elektronicznej.

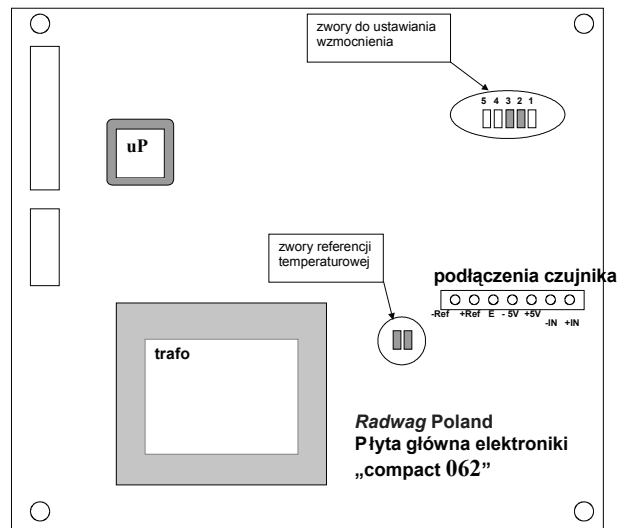
Jak wynika z algorytmu, kalibracja wagi elektronicznej jest dość złożona i staje się problemem jeśli kalibracja dotyczy wagi o dużej nośności. Składa się z dwóch części: kalibracji zakresu i kalibracji liniowości.

4.3. Wzmacniacz tensometryczny firmy RADWAG

Na rys.25 przedstawiono fotografię modułu firmy RADWAG (Radom). Jest to prosty wzmacniacz tensometryczny posiadający tylko podstawowe funkcje.



Rys.25. Wzmacniacz tensometryczny firmy RADWAG.



Rys.26. Opis płyty głównej wzmacniacza firmy RADWAG.

Dla prawidłowej pracy tego wzmacniacza z dowolnym czujnikiem siły należy wykonać następujące czynności:

- podłączyć prawidłowo czujnik siły do pinów na płycie głównej (rys.26),
- ustawić odpowiednie wzmacnienie na płycie głównej wzmacniacza za pomocą zworek (rys.26),
 - zdefiniować i zaprogramować 12 parametrów wagi (tabela z rys.27),

- przeprowadzić kalibrację zakresu i liniowości wg instrukcji serwisowej.

Nr	Parametr	Wartość	Opis
1	Poi	4	Ustawienie punktu dziesiętnego
2	Aue	0 lub 1	Wartość uśredniania – wpływa na prędkość ważenia
3	Con	5	Kryterium stabilny pomiar
4	Uni	2	Jednostki 1 - g, 2 - kg
5	Aut	1	Ustawienie kontroli autozera
6	Zon	8	Ustawienie przedziału autozera
7	Bod	5	Prędkość transmisji 4800
8	Nu	2	Ustawienie wartości ostatniej cyfry 1- 1, 2- 2, 3- 5
9	D	7509 (działki)	Ustawienie ilości działek wagi
10	C	7500 (działki)	Ustawienie wartości odważnika kalibracyjnego
11	C	5	(bo „e” jest różne od „d”)
12	L	2500 (działki)	Co ile działek krok przy ustawianiu liniowości? ... (co 50 kg)

Rys. 27. Przykładowe parametry wzmacniacza dla wagi o nośności 150 kg z działką odczytową d=e=20g.

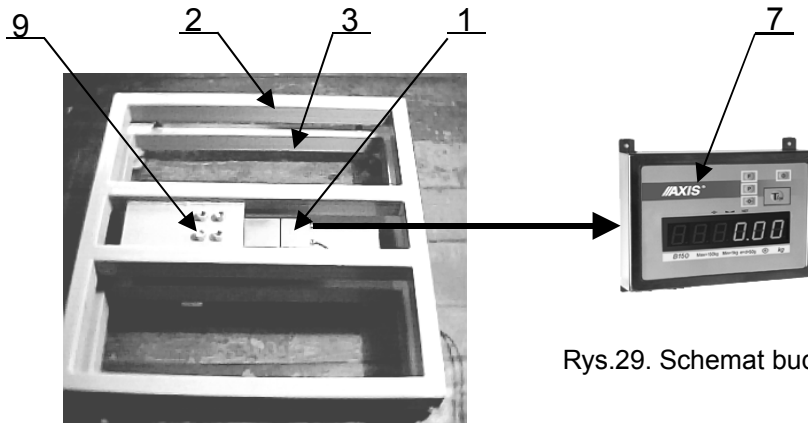
5. Projekty wag elektronicznych wykonanych przez autora pracy

5.1. Waga pomostowa z jednym czujnikiem siły

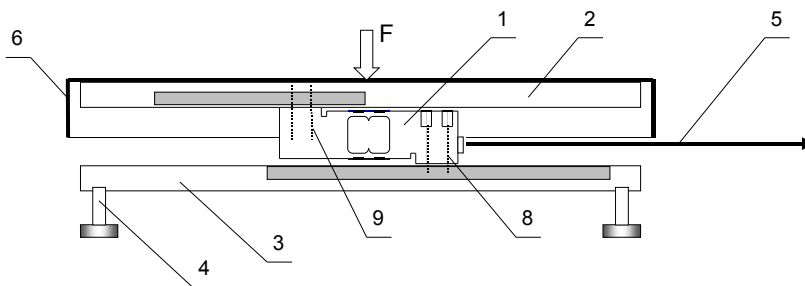
Jest to typowa waga pomostowa składająca się z części mechanicznej (konstrukcja metalowa z tensometrycznym czujnikiem siły) oraz części elektronicznej (wagowy wzmacniacz tensometryczny jednej z polskich firm). Nośność wagi wynosi od 300 do 500 kg w zależności od użytego czujnika. Wielkość pomostu wynosi 600x600mm. Ze względu na prostą konstrukcję nie dokonano żadnych obliczeń sprawdzających, a wytrzymałość sprawdzono doświadczalnie. Na rys.28 przedstawiono fotografię wagi ze zdjętą szalką a na rys.30 pokazano rysunki wykonawcze kratownic pomostu i podstawy wagi. Schemat budowy wagi pokazano na rys.29. Oznaczenia detali na rysunkach są takie same. Czujnik (1) jest przymocowany do podstawy (3) śrubami (8). Od góry, za pomocą śrub (9) jest przymocowany pomost (2). Do podstawy są spawane wzmocnienia z otworami na nóżki regulacyjne (4) oraz poziomica. Sygnały z czujnika są przekazywane do wzmacniacza tensometrycznego (7) za pomocą sześciopżyłowego kabla (5). Są to sygnały:

- zasilania (**+5V** i **-5V**),
- wyjściowy (**+in** i **-in**),
- referencyjne (**+Ref** i **-Ref**).

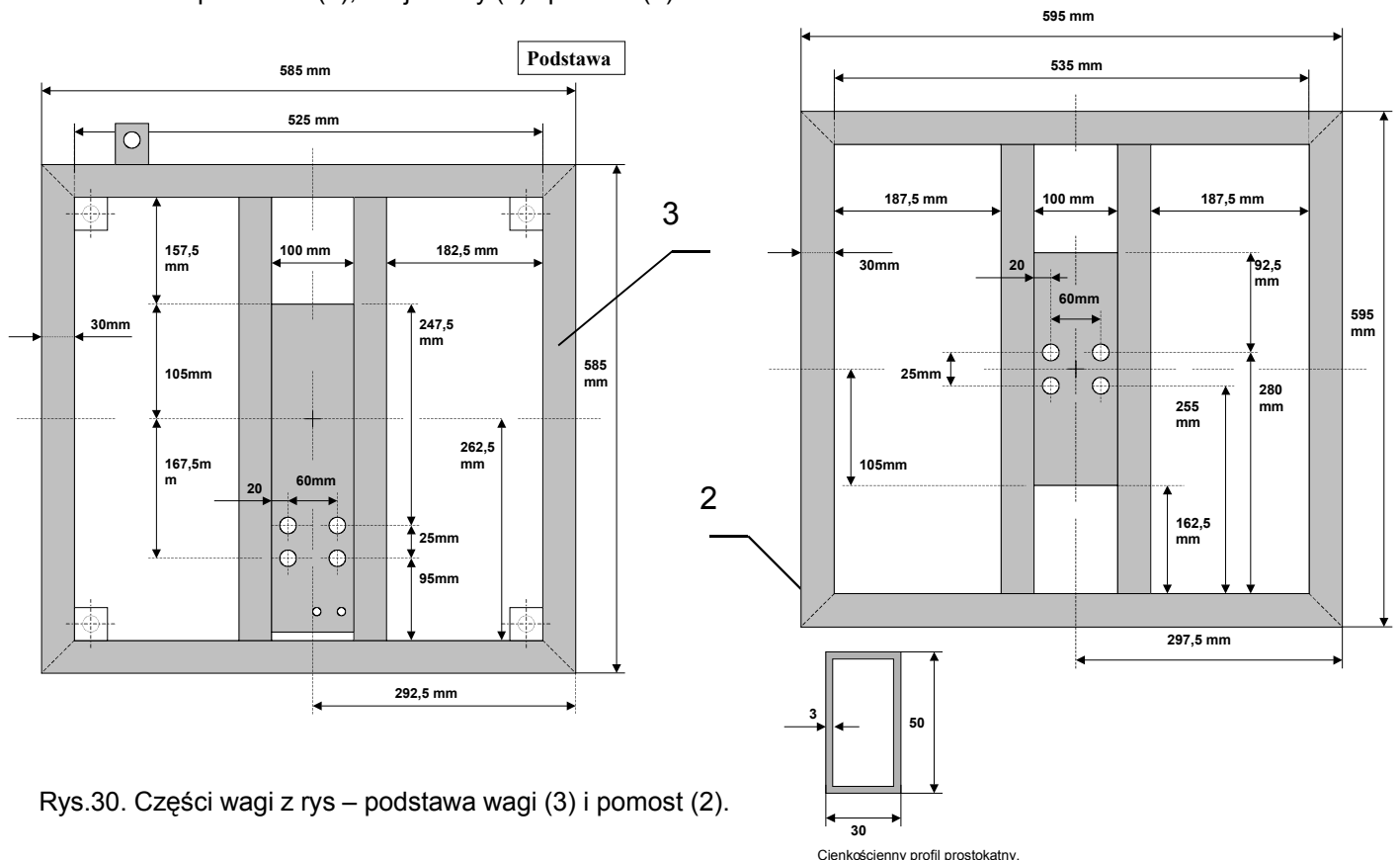
Podstawowym półfabrykatem stosowanym w konstrukcji tych wag jest kształtownik prostokątny cienkościenny o wymiarach 30x50x3 mm z typowej stali konstrukcyjnej. Jedynym problemem przy montażu wagi było zapewnienie wzajemnej równoległości podstawy i pomostu po ich skręceniu z czujnikiem. Niedokładności połączeń spawanych rzędu 0,5 mm powodowały, że waga po zmontowaniu była „zwichrowana” a zniwelowanie błędu wymagało prostowania konstrukcji, która z zasady była bardzo sztywna. Dobrze pospawana konstrukcja nie stwarzała żadnych problemów. Również kalibracja i regulacja elektroniczna przebiegała w takim wypadku bez trudności. W wadze zastosowano czujnik MC-3 hiszpańskiej firmy EPEL.



Rys.29. Schemat budowy wagi.



Rys.28. Waga jednoprzetwornikowa pomostowa ze zdjętą szalką. Są widoczne fragmenty konstrukcji: podstawa (3), czujnik siły (1) i pomost (2).



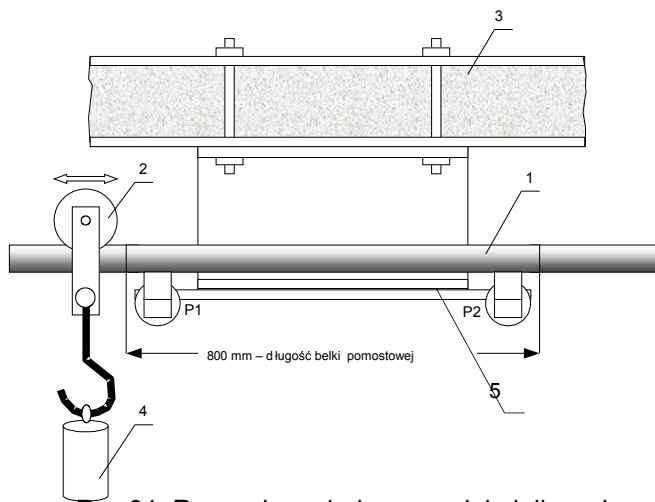
Rys.30. Części wagi z rys – podstawa wagi (3) i pomost (2).

5.2. Waga kolejkowa o nośności 500kg z dwoma czujnikami siły

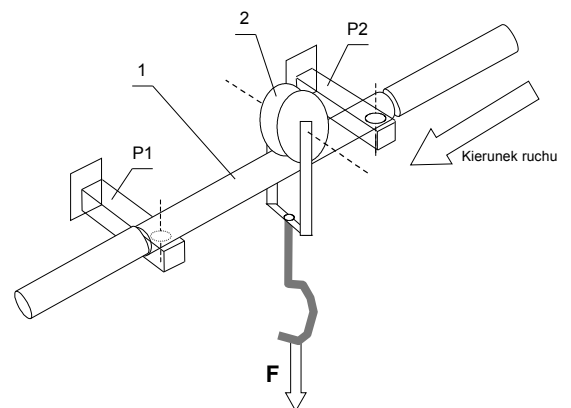
Od wielu lat w przemyśle mięsnym do transportu półwyrobów stosuje się tzw. transport kolejkowy, polegający na przesuwaniu różnych wyrobów zawieszonych na hakach po torze jezdnym podwieszonym do stropu budynku. Do ich ważenia służy tzw. waga kolejkowa.

Na rys.31 przedstawiono konstrukcję takiej wagi a na rys.32 przedstawiono jej zasadę działania. Szalką tej wagi jest odcinek toru jezdnego (1) (grubościenne rura). Całość konstrukcji jest podwieszona do stropu budynku za pomocą dwóch nośnych dwuceowników (3). Wążenie wyrobów, symbolizowanych odważnikiem (4) polega na ich przeciąganiu na ruchomym haku (2) po odcinku pomiarowym (1). Wyroby najeżdżają kolejno na odcinek pomiarowy o długości 80cm i średnicy 60 mm. W tym czasie, podczas krótkiego postoju wynik jest wyświetlany na panelu wzmacniacza tensometrycznego. Dane te mogą być przekazane np. do terminala wagowego za pomocą złącza RS232. Odcinek pomiarowy jest niezależnym fragmentem toru jezdny, zawieszonym sztywno tylko na dwóch czujnikach: P1 i P2. Ich sygnał jest sumowany elektrycznie, dlatego nie ma znaczenia w którym miejscu odcinka pomiarowego jest zawieszony odważnik.

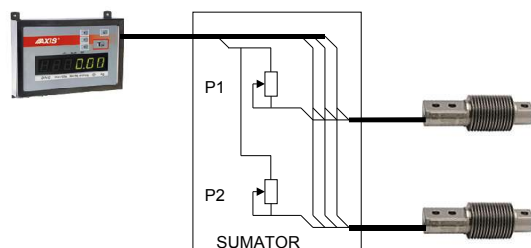
Waga została zbudowana w jednym egzemplarzu. W prototypie stosowano różne konstrukcje, m.in. oddzielne zamocowanie czujników do stropu. Zamocowania były jednak za słabe i uginały się razem z czujnikami. Powodowało to duże błędy - wynik pomiaru był różny dla różnych miejsc obciążenia szalki. Zasadniczym zwrotem było zamocowanie dwóch czujników do jednej konstrukcji nośnej – płaskownika (5) o grubości 14mm (rys.31). Waga działała od razu prawidłowo.



Rys.31. Rysunek poglądowy wagi kolejkowej.



Rys.32. Zasada działania.

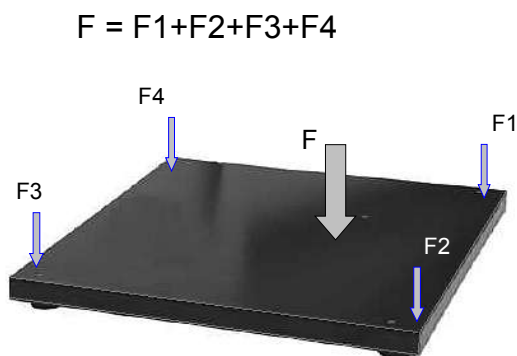


Rys.33. Schemat blokowy wagi kolejkowej.

Schemat blokowy tej wagi przedstawiono w sposób uproszczony na rys.33. Zastosowano typowy wzmacniacz pomiarowy. Sygnały z czujników są zsumowane w sumatorze poprzez równoległe połączenie przewodów. W sumatorze znajdują się dwa potencjometry o rezystancji 50Ω, które służą do regulacji wagi. Prawidłowe ustawienie potencjometrów zapewnia taki sam wynik pomiaru dla ciężaru zawieszonoego w dowolnym miejscu odcinka pomiarowego.

5.3. Waga pomostowa o nośności 3000kg z czterema czujnikami siły

Waga o dużych wymiarach pomostu i dużej nośności wymaga zastosowania czterech czujników. Rozmiary i ciężar pomostu wykluczają zastosowanie jednego czujnika. Pomost wagi jest jej konstrukcją nośną, która opiera się na podłożu stojąc na czterech czujnikach, do których są przykręcone podpory wagi. Ważony ciężar rozkłada się na cztery czujniki (rys.34). Waga została wykonana w jednym egzemplarzu (rys.35)

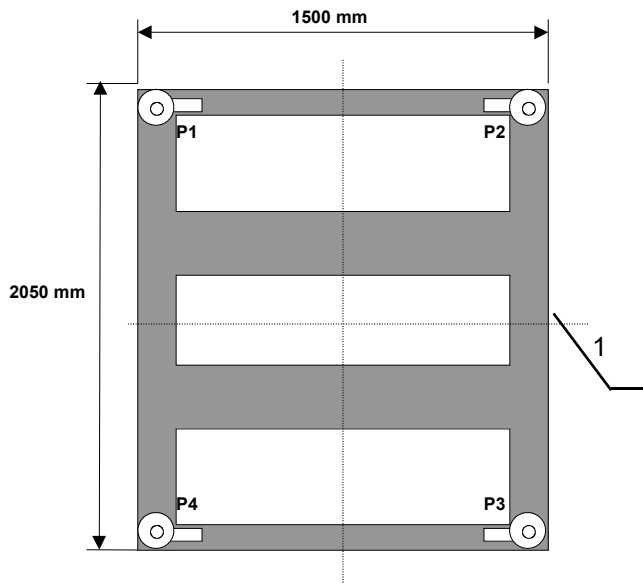


Rys.34. Fotografia wagi z czterema czujnikami siły.

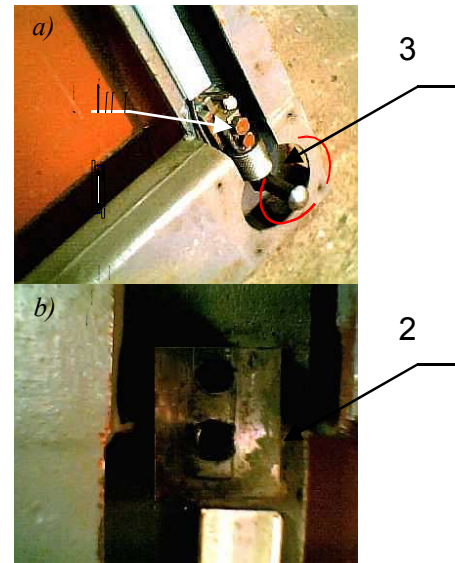


Rys.35. Fotografia wagi. Widok od spodu.

W pomoście (1) o wymiarach 2050x1500x130mm wykonano 4 otwory o średnicy 120mm (zaznaczone czerwonym kolorem na rys.37a) i przyspawano kostki dystansowe (2) (rys.37b) będące podstawami mocowania czujników (3).

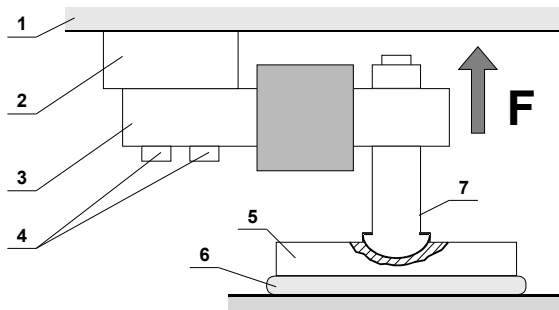


Rys.36. Rysunek poglądowy wagi 4-czujnikowej.



Rys.37. Sposób zamontowania czujników :
a) widok na zamontowany czujnik
b) kostka dystansowa do mocowania czujnika

Zastosowano czujniki hiszpańskiej firmy EPEL S.A. (rys. 38 i 39) mocowane do kostek montażowych dwoma śrubami (4). Nośność każdego z czujników wynosi 3000 kg. Są to czujniki belkowe przeznaczone do przenoszenia jednego rodzaju naprężeń.



Rys.38. Rysunek czujnika i nóżki wagi.



Rys.39. Fotografia czujnika i stopy wagi.

Do każdego czujnika (3) przykręcono nóżkę (7) zakończoną półkulą tworzącą przegub kulowy z krążkiem podstawy wagi (5). Cała konstrukcja waży około 200 kg a jej nośność wynosi 5000kg. Konstrukcja wydawała się stabilna i pozbawiona błędów jednak po zmontowaniu waga nie ważyła poprawnie.

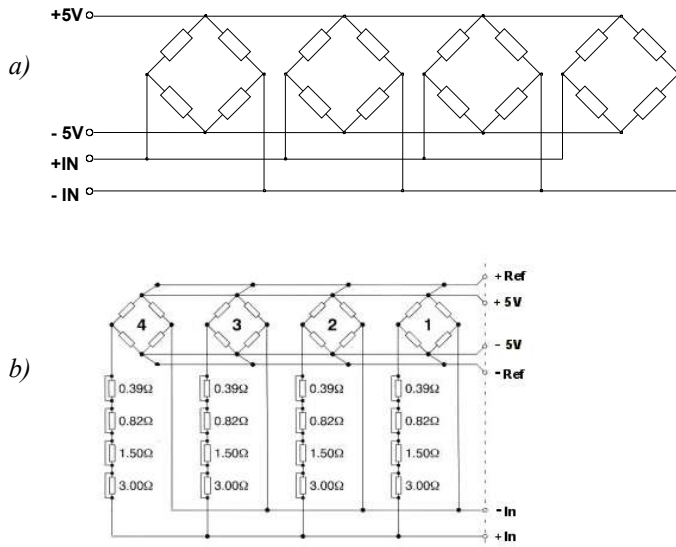
Do kalibracji użyto dokładne wzorce pomiarowe po 25kg. Wagę kalibrowano na nośność 3000kg. Dopuszczalny błąd każdego odważnika wynosi około 1 g a więc maksymalny błąd dla 3000 kg (120 wzorców) wynosi $\pm 120g$. Jednak waga wskazywała błąd dochodzący do 3kg. Dodatkowo wskazania różniły się w zależności od miejsca położenia odważników na pomoście. Po kilkunastu próbach kalibracji okazało się, że błędy wagi wynikały z następujących przyczyn:

- złe sumowanie mechaniczne sił wynikające z braku podkładek sprężystych pod podporami wagi. Waga ma dużą sztywność – bez podkładek równomierny docisk do gruntu następował dopiero przy znacznym obciążeniu wagi,
- złe sumowanie elektryczne sygnałów (różne czułości czujników, różne długości

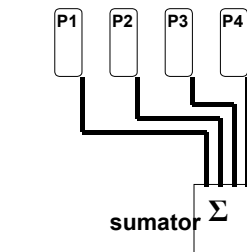
kabli),

- zbyt małe obciążenie podczas kalibracji wagi – czujniki były obciążone za małą masą (po 750kg tzn. mniej niż 1/3 zakresu)

W związku z tym pod każdą z nóżek podłożono podkładkę gumową (6) o grubości kilkunastu mm i zastosowano sumator wg schematu z rys.40b. Wagę skalibrowano masą 5000kg. Waga działała prawidłowo.



Rys.40. Schemat połączenia czujników – a) bez regulacji b) z regulacją



moduł pomiarowy

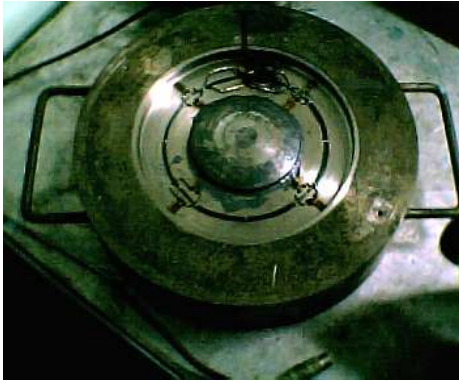
P1 , P2 , P3 i P4 – przetworniki tensometryczne

Rys.41. Schemat blokowy wagi.

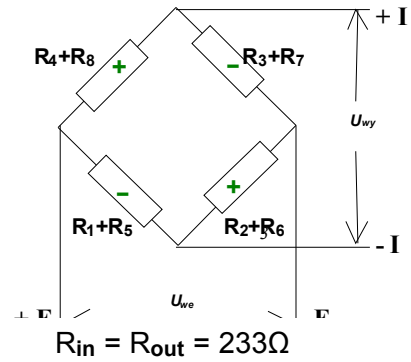
Schemat sumatora zaczerpnięto z dokumentacji firmy HBM. Do dodatnich wyjść mostków są podłączone drabinki rezystorowe umożliwiające korekcję sygnałów wychodzących z czujników siły.

6. Zastosowanie wagowego wzmacniacza tensometrycznego do pomiaru sił na prasie

W związku z potrzebą pomiaru sił nacisku na prasach stosowanych w Laboratorium Obróbki Plastycznej na Wydziale, powstał projekt zastosowania do tego celu wzmacniacza pomiarowego stosowanego w wagach elektronicznych. Pomiar sił występujących podczas procesu na prasie można zrealizować różnymi metodami. Jedną z metod jest tensometryczny pomiar naprężeń na korpusie prasy. Inną jest zamontowanie siłomierza tensometrycznego pomiędzy przyrząd a suwak prasy. Obie metody wykorzystują tensometry. Zastosowanie tego typu wzmacniacza do takich pomiarów jest możliwe ale tylko do celów dydaktyczno-kontrolnych, gdyż z zasady urządzenia te są przeznaczone do odczytu stabilnych wartości. Dokładność odczytu jaką można osiągnąć jest wystarczająca, gdyż zakres można podzielić na kilka tysięcy działek pomiarowych. Natomiast dokładne pomiary dynamiczne są niemożliwe ze względu na duży czas ustalania się wyniku pomiaru (w zakresie od kilkunastu do kilkuset milisekund).

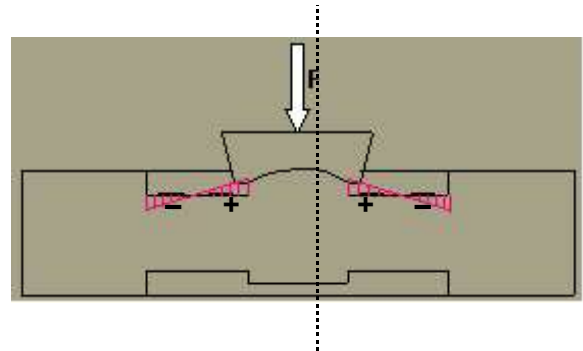
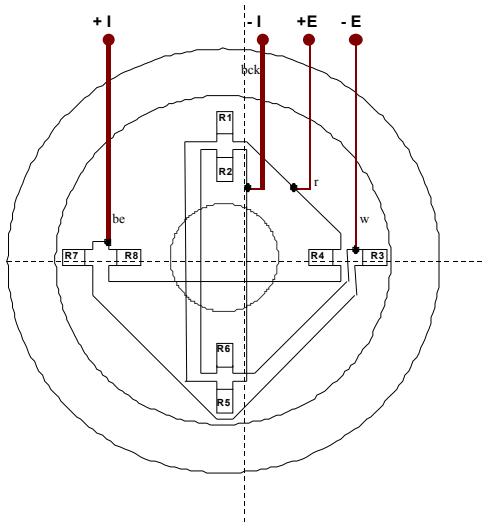


Rys.42. Fotografia dynamometru.



Rys.43. Schemat.

Do badań użyto dynamometru produkcji polskiej (rys.42) o zakresie 2,5 MN (250ton) oraz wzmacniacza firmy RADWAG (opisanego wcześniej). Podczas badań ustalono, że czułość tego typu wzmacniacza jest wystarczająca. Obciążenie dynamometru o zakresie 2,5 MN (250ton) masą 100kg spowodowało zmianę wskazań o jedną działkę pomiarową.



Rys.44. Rozmieszczenie tensometrów i rozkład naprężeń.

Na rys.43 przedstawiono schemat elektryczny czujnika. Tensometry oznaczone znakiem „+” (bliżej środka) są ściskane a tensometry ze znakiem „-” (dalej od środka) są rozciągane. Rozmieszczenie tensometrów na korpusie jest związane z rozkładem naprężeń jakie występują pod wpływem działania siły (rys.44). Dużym problemem wynikającym z zastosowania wagowego wzmacniacza jest jego wzorcowanie (kalibracja). Ze względu na nieznaną charakterystykę czujnika należy zastosować kalibrację zakresu i liniowości. Kalibracja zakresu polega na wprowadzeniu do pamięci wzmacniacza dwóch najbardziej charakterystycznych punktów pomiaru („zero” i „maksimum”). Dla zwiększenia dokładności pomiaru trzeba wprowadzić też punkty zawarte pomiędzy punktem „zera” i maksymalnym obciążeniem – nazywa się to kalibracją liniowości. Ze względu na bardzo duże siły wymagane do kalibracji zespołu pomiarowego: wzmacniacz- dynamometr, jedynym miejscem gdzie można to zrobić jest Główny Urząd Miar w Warszawie. Znajduje się tam maszyna wytrzymałościowa, która wytwarza siłę w zakresie od 0 do 300 ton z dokładnością 0,05%. Wynika z tego, że dokładność pomiarowa zespołu po wzorcowaniu będzie wynosić tyle samo. Dokładność wskazań modułu wagowego wynika z ilości działek pomiarowych zalecanych przez producenta (standardowo wynosi 3000). Zakładając zakres pomiarowy wynoszący 250ton możemy obliczyć dokładność pomiaru ze wzoru:

$$(11) \quad e = \frac{Z}{d} = \frac{250000}{3000d} = 83,33\text{kg}$$

gdzie:
 e – dokładność pomiaru
 Z – zakres pomiarowy czujnika
 d – ilość działek pomiarowych

Jest to dokładność zalecana, ale rzeczywista wewnętrzna ilość działek pomiarowych przetwornika A/C może wynosić nawet do 60000. Jest to kwestia zaprogramowania wzmacniacza. Przy założeniu pięciu podzakresów kalibracji liniowości 50, 100, 150, 200 i 250 ton dokładność wzorcowania wynosi od 25kg (zakres 50ton) do 125kg (zakres 250ton). Działka odczytowa dla całego zakresu powinna wynikać z błędu dla najmniejszego podzakresu kalibracji, czyli powinna wynosić nie więcej niż 25kg. W praktyce trzeba zastosować zaokrąglenie do 20kg. Otrzymujemy wtedy liczbę działek równą 12500, co wynika z wzoru:

$$(12) \quad d = \frac{Z}{e} = \frac{250000\text{kg}}{20\text{kg}} = 12500d$$

Przykładowo rozdzielczość wewnętrzna w module firmy AXIS wynosi 60000 (dla 3000 działek legalizacyjnych) co w zupełności wystarczy. Początkowo do podłączenia wybrano moduł firmy RADWAG (Radom) ale okazało się, że program kalibracji liniowości ma ograniczenia czasowe (algorytm narzuca krótki czas obciążania czujnika – co w warunkach laboratorium GUMu jest kłopotliwe).

7. Literatura

1. *Zygmunt Roliński.*: Zarys elektrycznej tensometrii oporowej.
WNT W-wa 1966r. wydanie II
2. *Janusz Jankowski.*: Pomiary masy. Wagi i ważenie wysokiej dokładności.
WNT W-wa 1982r.
3. *Janusz Jankowski.*: Pomiary masy. Wagi i ważenie w przemyśle i handlu.
WNT W-wa 1983r.
4. *Kazimierz Kacprzak.*: Wagi. Konserwacja i naprawa.
Zakład Wydawnictw CZSR – W-wa 1977r.
5. Katalog firmy HBM – 2004.