

1. WPROWADZENIE

We współczesnym przemyśle zbożowo-młynarskim buduje się elewatory zbożowe o coraz większej pojemności. Składowanie dużych ilości ziarna zbóż spowodowało wystąpienie nowych, nieznanych lub nierozważanych wcześniej problemów. Zachodzi zatem konieczność bieżącej kontroli stanu magazynowanych produktów oraz otaczającej je atmosfery. W pierwszych stosowanych układach kontroli proste układy pomiarowe zdominowane przez pomiary temperatury i wilgotności zastąpione zostały przez wyspecjalizowane systemy monitorowania. Atmosfera elewatorów zbożowych jest środowiskiem zagrożonym wybuchem z powodu silnego zapylenia dlatego niektóre elementy systemu monitorowania, narażone na bezpośredni wpływ tego zapylenia, muszą posiadać odpowiednie certyfikaty dopuszczające je do pracy w tych warunkach.

W celu zapewnienia prawidłowej budowy systemu monitorowania i jego projektowania konieczna jest dokładna znajomość wielu czynników, a w tym procesów metabolicznych występujących w masie składowanego ziarna. Procesy metaboliczne są przyczyną generacji energii cieplnej, której nadmiar jest szkodliwy i powoduje wzrost strat magazynowych. W przypadku braku kontroli temperatury ziarna może nastąpić jej wzrost prowadzący do samo-zapłonu wywołując wybuch w magazynie. Zjawisko jest groźne w skutkach. Eksplozje zdarzają się statystycznie raz w roku w skali europejskiej i w skali wielokrotnie większej na kontynencie amerykańskim.

Badania rozkładu pól temperaturowych w masie ziarna pozwalają na optymalne rozmieszczenia czujników temperatury w przestrzeni elewatorów. Wyniki badań oddziaływań mechanicznych ziarna na elastyczne sondy wieloczujnikowe są podstawą określenia wytrzymałości mechanicznej tych sond i ich konstrukcji. Analiza oddziaływań sond temperatury i innych czujników na ziarno umożliwią ich ocenę pod względem toksyczności, co jest niezmiernie istotne ze względu na pracę w produktach żywnościowych.

W ostatnim dziesięcioleciu opracowano nowe normy i wymagania międzynarodowe określające oraz precyzujące wymagania na metody składowania ziarna zbóż i kontrolę parametrów temperatury i wilgotności podczas ich magazynowania. Niektóre z tych wymagań budzą zastrzeżenia ponieważ na obecnym etapie konstrukcyjnym i projektowym nie można ich spełnić, a tym bardziej wymagać obligatoryjnie. Powinny zatem

one ulec znacznej modyfikacji do której powinny się przyczynić badania symulacyjne modelowe i obiektowe a także statystyka obserwowanych w praktyce zjawisk.

Systemy monitorowania muszą spełniać zadania specyficzne dla tego przemysłu i oprócz wymagań środowiskowych muszą być odporne na wysokie zakłócenia napięciowe, oddziaływania pól magnetycznych itp. wynikające z pracy urządzeń technologicznych i napędów transportu wewnętrznego. Ma to wpływ na struktury systemu, rozkład przestrzenny aparatury pomiarowej oraz trasy transmisji sygnałów pomiarowych.

Badanie podanych wyżej zagadnień i problemów powinno się przyczynić do lepszego rozeznania metod projektowania systemów monitorowania przeznaczonych do elewatorów zbożowych. Magazynowanie zbóż jest kierunkiem strategicznym w gospodarce żywnościowej kraju. Zboża przechowuje się w okresie do 5 lat z założeniem jak najniższych strat magazynowych. Można to spełnić również przez projektowanie i konstruowanie odpowiednich systemów monitorowania. Projektowanie dotyczy nowego systemu i jego przeznaczenia z wykorzystaniem gotowych elementów oraz konstruowanie nowych elementów i urządzeń opracowanych specjalnie na potrzeby tego systemu.

2. ANALIZA STANU WIEDZY I TECHNIKI

Stan wiedzy i techniki określono na podstawie przeglądu literatury z następujących dziedzin:

- Technologii przechowywania ziarna zbóż,
- Pomiarów temperatury składowanego ziarna,
- Czujników i sond temperatury przeznaczonych do materiałów sypkich,
- Systemów pomiarowo-kontrolnych,
- Budowy aparatury kontrolno-pomiarowej w wykonaniu przeciwwybuchowym,
- Systemów jakości.

Aktualne materiały z tych dziedzin pochodzą z uczelni, instytutów i centralnych laboratoriów. Zostały także zebrane w szwedzkim Instytucie Techniki Rolniczej w Uppsali i w Instytutach Techniki Rolniczej w Niemczech (Poczdami), w Rosji (Moskwa) i w Norwegii (Ås/Oslo). Najnowsze rozpatrywane publikacje pochodzą z trzech ostatnich Kongresów IMEKO. W ramach *study tour* zebrano również materiały informacyjne od kilku ważniejszych producentów europejskich i japońskich.

Według ustaleń komitetu redakcyjnego ostatniego Kongresu IMEKO w Japonii [58] z czerwca 1999 r. tematyka monitorowania w elewatorach zbożowych została zakwalifikowana do „Bezpiecznych Pomiarów w Ochronie Środowiska”. W instytutach i uczelniach japońskich istnieją już odpowiednie zespoły zajmujące się „Bezpiecznym Monitorowaniem i Bezpiecznymi Układami Pomiarowymi” przeznaczonymi do obiektów o szczególnym zagrożeniu wybuchowym. Obecnie zakres prac tych ośrodków zostaje powiększony o zagadnienia jakości pomiarów.

2.1. Przegląd literatury

Z przeglądu literatury poświęconej technologii przechowywania ziarna zbóż wynika, że problemy wzrostu temperatury i zmian wilgotności ziarna przedstawiono są w wielu publikacjach. Wyjaśniany jest w nich mechanizm występowania procesów metabolicznych i w konsekwencji tworzenia źródeł samozagrzewania. W pracy Sergunowa [81] założono

kształt twórczego się źródła w postaci kilku podstawowych figur geometrycznych. Dla tych źródeł rozpatrywano rozkład teoretyczny pól temperaturowych oraz porównano go z rozkładami rzeczywistymi wyznaczonymi doświadczalnie. Okazało się, że kształt źródeł ma znaczenie tylko w obszarze o najwyższej temperaturze. W dalszej odległości od źródła uwidaczniają się, w obszarze pól temperaturowych, oddziaływania deformujące, wynikające z oddziaływań chłodzących elementów konstrukcji zbiorników ziarna i położenia warstwy lub przestrzeni grzejnej [50]. Są to stwierdzenia ogólne i wymagają uściślenia dla rozpatrywanych konkretnych zbiorników.

Wymagania dotyczące parametrów ziarna podczas jego przechowywania znajdują się w licznych publikacjach z dziedziny produkcji roślinnej. W starszych publikacjach podawane są tylko zalecane wartości temperatury i wilgotności ziarna [1, 89], w nowszych, Szyszły i Łysaka [4, 67] parametry te odniesione są do okresu składowania. W normach [94], raportach [93] i uzgodnieniach międzynarodowych [38] podawane są wykresy precyzujące jakość ziarna w funkcji jego temperatury i wilgotności oraz otaczającego powietrza. W badaniach zgodności normatywnej nowych konstrukcji [50] wystąpiły duże różnice, których przyczyną było ujednolicenie wymagań na sondy temperatury o różnym przeznaczeniu: do magazynów płaskich i do dużych elewatorów.

Aktualna wartość parametrów ziarna i mikroklimatu magazynu pozwala ocenić intensywność procesów metabolicznych. Najnowsze badania intensywności tych procesów prowadzone były na podstawie pomiarów wydzielania CO i CO₂ oraz analizy mikrobiologicznej, chromatograficznej i jakościowej prowadzonej pod kierownictwem Kamińskiego i Fornalowej [9, 10, 20, 21, 22]. Te dość wyczerpujące badania wskazują również na przyczyny źródeł samogrzania, ale nie wnoszą zasadniczych zmian dotyczących przedziału zalecanych wartości temperatury i wilgotności. Dlatego w dalszej analizie ograniczono się tylko do danych przedstawionych w Raporcie FAO [93] oraz w pracach Łysaka i Szyszły [4, 67].

Układy pomiaru temperatury ziarna zbóż przedstawiane zostały w publikacjach specjalistycznych z suszarnictwa opracowanych przez Pabisa [72] i przechowalnictwa zbóż [1, 3, 81]. Opisywane układy pomiarowe wyposażono tam w sondy temperatury ze zdalnym odczytem. Sondy jedno i wieloczuJNIkowe o przeznaczeniu uniwersalnym w nowszych opracowaniach zastąpione zostały przez wysokowyspecjalizowane wieloczuJNIkowe sondy elastyczne. Konstrukcja wytrzymałych sond, wybór miniatur-

wych czujników temperatury oraz metody rozmieszczenia czujników i sond stanowiły trudny problem rzutujący na powszechne stosowanie układów pomiarowych w magazynach rolniczych [30, 38]. Ta sytuacja spowodowała, że mimo przekonania o ich niezbędności zainstalowano tylko w 30 % ogólnej liczby magazynów. Ważną rolę odgrywa niewielka średnica sondy i jej wysoka wytrzymałość mechaniczna. Badania analityczne zweryfikowane na podstawie wyników badań eksperymentalnych i obiektowych, wykonanych pod kierownictwem Rossa, Horabika i Molendy [16, 70, 79, 80] pozwoliły określić wytrzymałość mechaniczną w zależności od średnicy sondy, zbiornika, miejsca zawieszenia w zbiorniku itp. Badania te prowadzone były przy założeniu, że składowane zboże jest suche. W praktyce zboże nie zawsze jest suche, a zboże ze zbiorów kombajnowych jest często bardzo wilgotne. Należy więc spodziewać się znacznego wzrostu obciążeń dynamicznych działających na sondy pomiarowe, co potwierdziły badania autora [56]. Badania Kusińskiej odnośnie do rozkładu sił i ich wartości działających na ściany silosów [63] wykazały również duży wpływ wilgotności ziarna zwiększającej te wartości.

Pierwsze układy pomiarowe temperatury wykonane były w technice analogowej. Według Żuvela [92] można tę technikę jeszcze stosować w małych obiektach. W dużych układach i systemach monitorowania kontrolujących wiele innych parametrów jak wilgotność, wysokość zasypu ziarna i parametry mikroklimatu magazynu stosowane są obecnie systemy mikroprocesorowe z magistralą sygnałową [6, 88]. Czujniki i sondy pomiarowe pracują w strefie o największym zapyleniu to jest wewnątrz komory elewatora, muszą więc spełniać wymagania iskrobezpieczeństwa potwierdzone odpowiednimi atestami [84, 117]. Ponieważ sondy z przetwornikami i koncentratorami sygnałów pracują bezpośrednio w strefie o podwyższonym zapyleniu, muszą również posiadać odpowiednią konstrukcję dostosowaną do pracy w strefie niebezpiecznej. Sondy z miniaturowymi czujnikami temperatury osiągnęły już kres konstrukcyjny, ponieważ nie mogą mieć mniejszej średnicy, limitowanej wymiarami miniaturowych czujników, przy założonej wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Dlatego czynione są próby z nowymi czujnikami optoelektronicznymi i liniami światłowodowymi [58], które w przyszłości będą mogły zastąpić dotychczasowe sondy „klasyczne”.

Układy pomiarowe w elewatorach z komorami z wymuszoną wentylacją współpracują z układami regulacyjnymi. Dlatego bardzo ważne są badania identyfikacji obiektu wyznaczające charakterystyki skoko-

we i częstotliwościowe. Pierwsze takie badania wykonane zostały przez zespół pod kierownictwem Mullera. Zastosowano w nich oryginalną, izotopową metodę pomiaru przepływu powietrza przez warstwę ziarna [24]. Badania te mogą być przydatne przy kompleksowym projektowaniu systemów pomiarowo-kontrolnych.

Wartości i zakresy parametrów układów i systemów pomiarowych do elewatorów zbożowych podawane są w monografiach analizujących ich pracę [50, 54]. Błędy podstawowe (w tym dokładność i powtarzalność) są podawane w prospektach firmowych [116]. Trudniej znaleźć informacje dotyczące wartości błędów dodatkowych, granicznych. Są one pomijane również ze względów konkurencyjnych. Dlatego własne badania autora dotyczyły sprawdzania charakterystyk funkcjonalnych i właściwości metrologicznej oraz odporności i wytrzymałości na narażenia środowiskowe, a także kompatybilności elektromagnetycznej (KEM). Doprowadziły one do określenia rzeczywistych wymagań środowiskowych, pomiarów różnego rodzaju zakłóceń i ich wpływu na pracę układów pomiarowych. Następnie przeprowadzono testy porównawcze różnych konstrukcji. Na tej podstawie zostały określone wymagania na elementy systemu monitorowania: czujniki i sondy pomiarowe oraz przyjęto struktury systemu.

Na podstawie wieloletnich doświadczeń projektowania, instalowania i eksploatacji wielu układów pomiarowych i monitorowania zaproponowano kilka procedur projektowania systemów w obiektach magazynowych przemysłu zbożowego. Zwrócono szczególną uwagę na dobór właściwych parametrów układu i systemu oraz na przygotowanie obiektu do zainstalowania poszczególnych elementów. Szczególną uwagę zwrócono na montaż elastycznych sond temperatury [42, 45]. System monitorowania przeznaczony jest do pracy w atmosferze wybuchowej magazynu zbożowego i dlatego musi spełniać dodatkowe wymagania potwierdzone odpowiednimi atestami i certyfikatami [95-99].

Większość publikacji autora mieści się w pierwszych z 6-ciu grup tematycznych, wymienionych na początku niniejszego rozdziału. Publikacje indywidualne autora dotyczą różnych metod pomiarowych, czujników i przetworników temperatury oraz systemów monitorowania. Publikacje zespołowe z zakresu technologii przechowywania ze współudziałem autora obejmują różne metody oceny intensywności procesów metabolicznych składowanego ziarna. W opublikowanych pracach autor zajmował się opracowaniem i wdrożeniem odpowiedniej aparatury pomiarowej do prowadzonych badań.

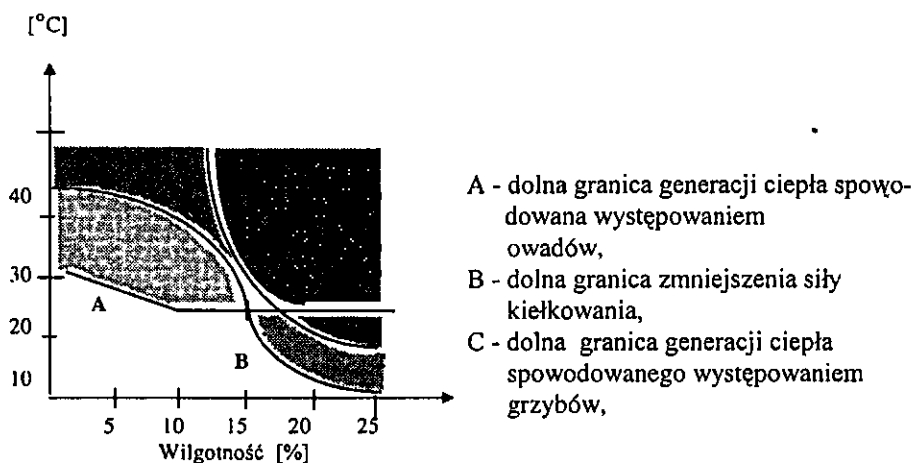
Najnowsze publikacje autora dotyczą techniki optoelektronicznej stosowanej w konstrukcji sond temperatury przeznaczonych do dużych elewatorów zbożowych [54, 58].

2.2. Systemy magazynowania materiałów sypkich – korzyści i zagrożenia

W ziarnie zbóż w wyniku procesów metabolicznych występują ilościowe i jakościowe, straty przechowywania, które powodują obniżenie wartości użytkowej oraz ubytek masy ziarna. Wartość strat zależy od generowania energii cieplnej i zmian wilgotności składowanego ziarna: im wyższa temperatura i wilgotność ziarna, tym straty te są wyższe. Według informacji z CLTPiPZ straty magazynowe wahają się w granicach od jednego do kilku procent w zależności od warunków składowania. W dużych magazynach i elewatorach przechowuje się zaledwie 15 % całkowitej produkcji roślinnej i w tym przypadku straty są pod kontrolą. Znaczna część zboża jest jednak źle składowana i straty magazynowe są znacznie większe. Przyczyna tkwi w małej liczbie magazynów zbożowych.

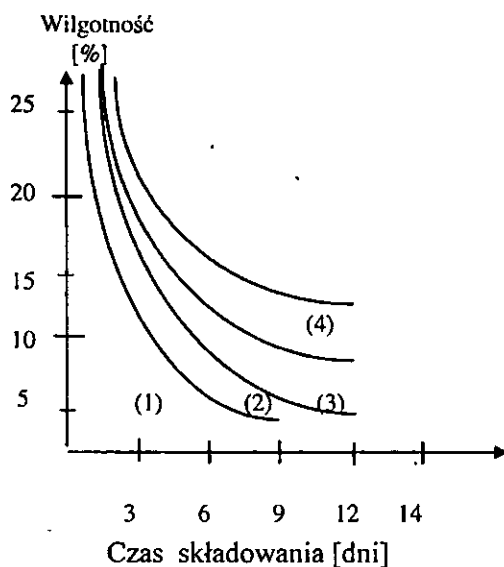
Polska jest liczącym się producentem zbóż. W 1998 r. zebrano 8919 tys. ton pszenicy (dziewiąte miejsce w skali światowej), 6166 tys. ton żyta (pierwsze miejsce w świecie) oraz jęczmienia i kukurydzy na poziomie ósmego miejsca w świecie [118]. Eksport produkcji roślinnej i jej przetworów stanowi kilkanaście procent całego eksportu krajowego i jest prawie trzykrotnie większy niż węgla, dlatego dąży się do jak najmniejszych strat magazynowych.

Przebieg w czasie wydzielania ciepła z masy ziarna ma charakter wykładniczy, tzn. przy małych wartościach temperatury i wilgotności (podawanej w % zawartości wody w masie ziarna) wydziela się niewiele energii, ale w miarę ich wzrostu intensywność (rys. 1b) wydzielania gwałtownie rośnie, co w ekstremalnych przypadkach prowadzi do samozapłonu masy ziarna i eksplozji w magazynie. W Raporcie FAO [93] podawany jest wykres stref zależnych od temperatury i wilgotności określających jakość procesów składowania ziarna. W stałej temperaturze składowania wzrost wilgotności obniża dozwolony czas przechowywania dla czterech stref przedstawionych na rys. 1a.



- | | | | |
|--|---|--|---|
| | (1) - bezpieczne składowanie | | (3) - zmniejszenie zdolności kiełkowania |
| | (2) - generacja ciepła wywołana obecnością owadów | | (4) - generacja ciepła spowodowana obecnością grzybów |

Rys.1 a) Zakres stref wyróżnionych dla procesu przechowywania ziarna [93]



Rys.1 b) Czas dopuszczalny składowania dla różnych wilgotności i zdefiniowanych stref w stałym przedziale temperatury 24-27 °C [4]

Zagrożenia wynikające ze składowania ziarna w elewatorach zbożowych wynikają z generacji energii cieplnej, która jest wynikiem procesów metabolicznych. W atmosferze silnego stężenia pyłu ziarna brak kontroli temperatury lub zły nadzór może przyczynić się do groźnych eksplozji. Statystyki podają następujące informacje, że w ostatnich 10 latach zanotowano w kraju kilka groźnych eksplozji między innymi w krajowych elewatorach : w Wąbrzeźnie i Ujazdowie Górnym [90].

W Stanach Zjednoczonych, w kraju o największej liczbie elewatorów, w latach 1957-1990 miało miejsce 1085 eksplozji pyłu zbożowego. Zginęło 640 osób. Straty szacowane są na ponad 100 mln USD. W Europie szacuje się liczbę wybuchów na jeden w roku w skali kontynentu. Energia wydzielona podczas eksplozji 1 kg pyłu zbożowego w mieszaninie powietrza jest od 3 do 5 razy większa niż energia eksplozji 1 kg TNT-trotylu, a podatność eksplozyjna jest 20-50 razy większa niż pyłu węglowego. W tabl. 1 przedstawiono parametry pyłów najważniejszych zbóż. Wynika z niej że najbardziej podatna do wybuchu jest pszenica, ryż a następnie jęczmień, owies i kukurydza.

Tablica 1. Ważniejsze parametry pyłów zbóż [90]

Typ pyłu	Min. energia zapłonu [mJ]	Min.temperatura zapłonu [K]	Min. stężenie zapłonu [mg/dm ³]	Maks. ciśnienie wybuchu [Mpa]
1. pszenica	30	723	125	0,75
2. żyto	80	532	56	0,41
3. jęczmień	60	573	693	0,52
4. owies	60	623	750	0,60
5. kukurydza	60	673	60	0,78
6. ryż	40	505	60	0,60

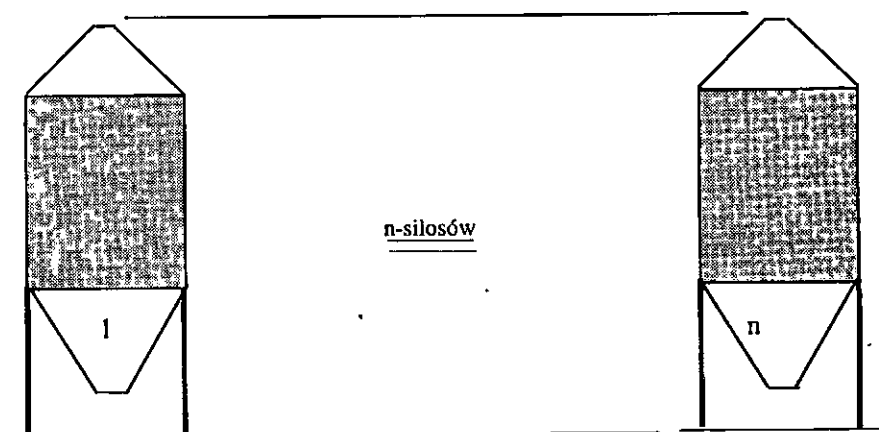
PRZYCZYNY EKSPLOZJI PYŁU W ELEWATORACH ZBOŻOWYCH:

- wytworzenie pól temperaturowych w masie składowanego ziarna w wyniku zachodzących w niej procesów metabolicznych,
- powstanie punktów i przestrzeni zapłonowych spowodowane wadliwą pracą urządzeń: transportowych, technologicznych, suszarni itp.,

- zaproszenie ognia przez obsługę np. podczas spawania, cięcia metali, otwarty ogień,
- wady urządzeń elektrycznych (iskwienie lub nadmierna temperatura),
- elektryczność statyczna,
- ogniska tłącego się pyłu lub innych materiałów.

Ziarna zbóż i nasion są przechowywane w następujących rodzajach magazynów: w silosach, w elewatorach i w magazynach płaskich.

Silosy o charakterystycznym kształcie, przedstawione na rys. 2, ustawiane są pojedynczo lub rzędowo w bateriach składających się z kilku lub kilkudziesięciu pojedynczych silosów. Mogą być umieszczane wewnątrz hali lub na otwartej przestrzeni. Wykonywane są z blachy aluminiowej, stalowej, betonu. Baterie silosów mogą być wyposażone w aktywną wentylację. Buduje się również całkowicie szczelne silosy gazowe, w których materiał jest składowany w atmosferze azotu, dwutlenku węgla itp. Baterie silosów budowane są w kraju od niedawna, w niewielkich przedsiębiorstwach produkcji roślinnej.



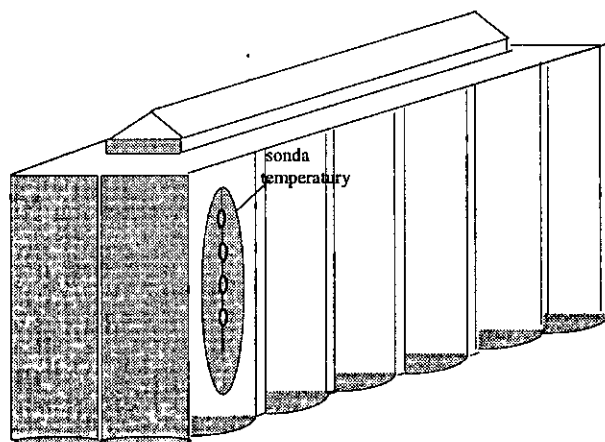
Rys. 2. Magazyn złożony z n-silosów

Najważniejsze magazyny zbożowe to elewatory (rys. 3). W dokumentach międzynarodowych elewatory określane są nazwą magazynów wysokich. Elewatory składają się z komór o różnych kształtach, często zbliżonych do silosów. Wysokość komór zbudowanych z żelbetu sięga do kilkudziesięciu metrów. W skład jednego elewatora może wchodzić do kilkudziesięciu komór. Komory mają wspólne zadaszenie tworząc samo-

dzielny budynek, często ustawiony w pobliżu młyna. Zboże przechowuje się w nich okresowo, przez kilka miesięcy. Elewatory najczęściej nie mają wentylowanych komór i w przypadku stwierdzenia przechowywania zboża w nieodpowiednich warunkach, objawiających się za wysoką temperaturą, wilgotnością itp., przeprowadza się odpowiednie zabiegi technologiczne. Z reguły zboże jest przesypywane do wolnych komór rezerwowych. Nowsze elewatory są wyposażone w agregaty wentylacyjne przesuwane na szynach kolejowych. Są one przeznaczone do okresowej wentylacji wielu komór.

W niewielkich silosach i magazynach płaskich pomiar temperatury przeprowadza się za pomocą wbijanych w ziarno sond laskowych. Odczyt temperatury może być miejscowy na mierniku zabudowanym w sondzie. W nowszych rozwiązaniach odczyt jest zdalny, bezprzewodowy.

W komorach elewatorów zbożowych zawiesza się elastyczne sondy wieloczułnikowe temperatury (rys.3). Sygnały z sond doprowadzone są do jednostki centralnej—komputera umieszczonego w wydzielonym pomieszczeniu. Odległość od sond do komputera wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset metrów. Na monitorze można odczytać wartości temperatur w poszczególnych komorach, przyrosty dzienne, tygodniowe itp. Poza pomiarem temperatury, który jest tu najważniejszy, w systemach monitorowania mierzone są również wartości wilgotności ziarna i otaczającego powietrza, wysokości zasypu (ciężaru) ziarna w komorach elewatora itp. Jeśli w obiektach stosowana jest aktywna wentylacja, to systemy pomiarowo— kontrolne rozbudowane są o funkcje regulacyjne.



Rys. 3. Pomiar temperatury w elewatorze za pomocą zawieszanych sond elastycznych

2.3. Kierunki światowych badań naukowych i realizacji technicznej

Badania naukowe, które są przedmiotem analizy w niniejszej pracy obejmują następujące problemy:

- metabolizmu w składowanym ziarnie i metod ograniczenia jego intensywności,
- badania identyfikacji obiektu i budowa modeli symulacyjnych,
- ustalenia metod pomiarowych,
- projektowania i konstrukcji elementów, układów i systemów pomiarowych i informatycznych.

Badania metabolizmu w procesie przechowywania ziarna zbóż prowadzone są w wielu ośrodkach naukowych europejskich, amerykańskich i rosyjskich. Ponieważ rezultatem przemian metabolicznych jest zmiana temperatury składowanego ziarna, więc analizowano tylko badania, w wyniku których wyznaczano rozkład temperatury w masie ziarna. W pracach rosyjskich, których wyniki opublikował Sergunow, przedstawione są analitycznie wyznaczone pola temperaturowego w składowanym ziarnie, które są następnie weryfikowane w badaniach na obiektach rzeczywistych. Zakładano, że pola te generowane były przez źródła samogrzania o różnym kształcie geometrycznym i następnie wyznaczano izotermę.

Badania niemieckie prowadzone w kilku uniwersytetach przyczyniły się do stworzenia modelu obiektu. Wyznaczono charakterystyki skokowe i częstotliwościowe ziarna składowanego w rzeczywistym silosie z wymuszoną wentylacją. Oryginalna metoda badania przepływu powietrza z izotopem umożliwiła optymalizację systemu wentylacji.

Amerykanie w Kanadzie i USA prowadzą badania rozkładów przestrzennych temperatury wewnątrz silosów. Zespół prof. Rossa [79] oprócz badań temperaturowych ustalił również wpływ oddziaływania ziarna na zawieszoną w niej sondę temperatury. Badania symulacyjne i w warunkach rzeczywistych pozwoliły ustalić zależności analityczne wpływu zawieszenia sondy temperatury w silosie w zależności od odległości od osi symetrii silosu. Ustalono również wpływ wartości średnicy sondy na działające na nią siły zrywające. Te bardzo interesujące badania przyczyniły się również do zmian konstrukcji silosów i elewatorów.

Szwedzi prowadzili próby z różnymi metodami pomiarowymi temperatury w elewatorze. Badano telemetryczny system pomiaru temperatury. Czujniki temperatury z nadajnikami radiowymi umieszczone były w niewielkich kulach wrzucanych do silosów podczas ich załadunku zbożem. Problemem był przypadkowy rozkład przestrzenny kul—trudno było je potem zlokalizować oraz odzyskać podczas rozładunku zboża, dlatego nie rozpowszechniono tej metody. Podejmowano również próby z pomiarami termowizyjnymi. Zdały one egzamin w małych silosach ale nie sprawdziły się w dużych komorach elewatora, gdzie nie można było spenetrować kamerą wewnętrznej warstwy zboża. Dzięki pomiarom termowizyjnym określono zewnętrzny przebieg pól temperaturowych otaczających komory elewatora, w których występuje intensywne grzanie ziarna. Powtarzalność pomiarowa jest niewielka, ponieważ zależy ona od pozycji źródła samogrzania wewnątrz zbiornika, dlatego też ta metoda nadaje się do małych zbiorników.

W kraju stosowano powszechnie metodę zdalnego pomiaru za pomocą sond elastycznych. Początkowo instalowano w elewatorach zbożowych układy pomiarowe duńskiej firmy Foss Electric, a później już układy i systemy krajowe. Prowadzono prace badawcze (w kilku ośrodkach krajowych) nad uzyskaniem wysoko wytrzymałych sond temperatury w wykonaniu iskrobezpiecznym oraz komputerowych systemów monitorowania i ich realizacji technicznej. Zostaną one przedstawione w dalszej części pracy.

2.4. Stan normalizacji na świecie i w kraju

Układy pomiarowe temperatury do elewatorów zbożowych objęte są międzynarodową normą ISO 4112 [94] wydaną w roku 1990 pt. *„Cereal and pulses. Guidance on measurement of the temperature of grain stored in bulk. Second edition”* - Rośliny zbożowe i ich badania, Wytyczne przeprowadzenia pomiarów temperatury składowanego ziarna, drugie wydanie. Norma ta została opracowana przez Komitet Techniczny ISO/TC 34 „Rolnicze produkty Żywnościowe”. Zastępuje ona pierwsze wydanie normy ISO 4112 z 1979 r. Powstała przy ścisłej współpracy z IEC.

W normie przedstawiono wytyczne dotyczące pomiarów temperatury ziarna zbóż składowanego w silosach lub w innych magazynach (w magazynach płaskich, w elewatorach itp.), w których ziarno jest nie opakowane i znajduje się w dużych ilościach. Przewiduje się rozmieszczenie

w masie ziarna sond temperatury w celu wykrycia i monitorowania zmian jej temperatury. Do małych magazynów (magazynów płaskich) przeznaczona jest aparatura przenośna lub stacjonarna, do dużych magazynów (elewatorów) –aparatura stacjonarna specjalnego przeznaczenia. Sondy mogą być laskowe, zbudowane ze sztywnej rury i zanurzone w masie ziarna w silosach lub w pryzmę w magazynach płaskich lub wieloczułnikowe w kształcie elastycznych kabli, przeznaczone do dużych zbiorników horyzontalnych (elewatorów i wysokich silosów). Sondy te muszą mieć wysoką wytrzymałości mechaniczną ze względu na duże obciążenia występujące podczas załadunku i rozładunku zboża. Powinny też być zakotwiczone elastycznie w komorze elewatora tak, aby przesunięcia sondy nie były znaczne. Dla sond elastycznych norma przewiduje maksymalną wartość siły rozciągającej dochodzącej do 50 kN.

Procedura pomiarowa podana w normie przewiduje spełnienie następujących kryteriów:

- * Do pomiaru temperatury powinno się stosować czujniki termistorowe, termoelementy lub czujniki rezystancyjne,
- * Czułość temperaturowa powinna być na tyle wysoka aby zapewnić wykrycie zmian temperatury o $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ w zakresie temperatury pracy do $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wartości dolnej ograniczonej do lokalnej temperatury zewnętrznej.
- * Po zanurzeniu sondy w masie ziarna czas osiągnięcia ustalonej temperatury nie powinien przekroczyć 3 min.
- * Punkty pomiarowe w masie ziarna (czujniki temperatury) powinny być w odległości 3 m od siebie w każdym kierunku.
- * Górne punkty pomiarowe, dla magazynów wysokich, powinny znajdować się w odległości 1-2 m poniżej powierzchni pryzmy ziarna.
- * Górne punkty pomiarowe dla magazynów płaskich mogą być obniżone poniżej 0,3 m poniżej powierzchni ziarna.
- * Punkty pomiarowe powinny być umieszczone w regularnych odstępach wzdłuż długości sondy pomiarowej i przy uwzględnieniu odpowiednich odległości od ścian, podłogi i górnego sklepienia komory elewatora, zbiornika itp. i przy zachowaniu stałej odległości w stosunku do osi symetrii magazynu (silosu, komory elewatora itp.).

Norma podaje również wymagania na pracę systemów regulacyjnych silosów z wymuszoną wentylacją. Przewiduje się ściśle określony

czas pracy wentylatorów nie dłuższy niż 30-45 min. Dłuższy czas pracy może spowodować uszkodzenie ziarna.

Dla dużych instalacji pomiarowych norma przewiduje wydzielone pomieszczenie kontroli w którym znajdują się przyrządy pomiarowe, komputer itp. za pomocą których prowadzi się następujące pomiary:

- * analogowy lub cyfrowy pomiar ręczny lub automatyczny z rejestracją temperatury,
- * sygnalizacja zmian temperatury w stosunku do wartości zadanych,
- * synoptyczny schemat magazynu z zaznaczeniem sond i punktów pomiarowych, z których odczytuje się aktualnie temperaturę,
- * automatyczną kontrolę temperatury ze skanowaniem punktów pomiarowych,
- * rejestrację temperatury co np. 6, 12, i 24 godziny.

Przedstawiona norma w stosunku do pierwszej wersji z 1979 r. uściśliła niektóre wymagania stawiane sondom pomiarowym, zwiększając wytrzymałość mechaniczną na zrywanie sond elastycznych z 30 kN do 50 kN.

W kraju brak jest odpowiedniej normalizacji i korzysta się z podanego, w rozdziale 2.2 niniejszego opracowania, Raportu FAO oraz ww. normy ISO. Opisy wymagań i realizacji układów pomiarowych w elewatorach zbożowych znajdują się w publikacjach J. Łysaka z Centralnego Laboratorium Przetwórstwa i Przechowywania Zboż [67]. W Instytucie Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa zostały również wydane dwie monografie z dziedziny pomiarów w przechowywaniu rolniczym [30, 38]. W PIAP wydano również dwie publikacje monograficzne z zakresu pomiarów w elewatorach zbożowych [50, 54]. W ramach komisji RWPG dot. automatyzacji i robotyzacji rolnictwa powstał z wiodącym udziałem Polski, dokument międzynarodowy [38] ustalający wymagania na parametry mikroklimatu w przechowywaniu rolniczym oraz wymagania na aparaturę. Dokument ten różni się nieznacznie od raportu FAO. Przyjęto większy zakres temperatury przechowywania produktów rolniczych ze względu na duże różnice klimatyczne występujące w obszarach krajów RWPG, oraz uściślano wymagania na zunifikowaną aparaturę kontrolno-pomiarową.

Tematyka budowy aparatury kontrolno-pomiarowej do pomieszczeń zagrożonych wybuchem ujęta jest przepisami podanymi w licznych normach krajowych i międzynarodowych. Wykaz norm, wymagań i komentarzy znajduje się w książce J. Frączka [11]. Z publikacji zagranicznych należy wyróżnić „Przewodnik konstrukcji obwodów iskrobezpiecznych” wydany przez brytyjską firmę MTL [117]. Znajdują się w nim

przepisy budowy oraz wymagania dotyczące budowy aparatury i urządzeń iskrobezpiecznych wraz z wykazem ważniejszych instytucji światowych, które wydają atesty iskrobezpieczeństwa. Z podanego tu wyciągu norm i przepisów wynika, że klasyfikacja pyłów zbożowych znajduje się tylko w normach amerykańskich (USA, Kanada). W krajach europejskich istnieją niewielkie różnice między normami IEC a brytyjskimi i niemieckimi w zakresie niektórych parametrów atmosfery wybuchowej, dlatego w przypadku analizy konkretnych rozwiązań wskazana jest konsultacja krajowego ośrodka GIG w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”.

Stosowanie norm krajowych i międzynarodowych ma charakter dobrowolny. W krajach europejskich, a także w niedługim czasie w Polsce podstawowymi dokumentami dopuszczającymi produkty do obrotu i użytkowania są obligatoryjne regulacje prawne zawarte w Dyrektywach Nowego Podejścia. Zawierają one podstawowe wymagania w zakresie bezpieczeństwa wyrobów oraz podają sposoby prowadzenia oceny zgodności w tym zakresie.

Dla urządzeń automatyki i pomiarów obowiązują następujące Dyrektywy Nowego Podejścia:

- * Dyrektywa Niskonapięciowa 73/23/EEC,
- * Dyrektywa Kompatybilności Elektromagnetycznej 89/336/EEC,
- * Dyrektywa Maszynowa 98/37/EEC,
- * Dyrektywa 94/9/EEC (ATEX100A).

Szczegółowe wyznaczanie bezpieczeństwa wyrobów zawarte są w tzw. europejskich normach zharmonizowanych z określoną Dyrektywą. Obowiązuje przy tym naczelną zasadą, że jeżeli wyrób spełnia wymagania norm zharmonizowanych z określoną Dyrektywą, to przyjmuje się zawsze domniemanie spełnienia przez wyrób wymagań podstawowych Dyrektyw, których dotyczy ta harmonizacja. Wyrób spełniający wymagania podstawowe tych Dyrektyw, pod które podlega, ma wystawioną przez dostawcę Deklarację Zgodności i jest znakowany „CE”. W niniejszej pracy szczególną uwagę zwrócono na Dyrektywę ATEX 100A [113], ze względu na pracę urządzeń pomiarowych w atmosferze o silnym zapyleniu. Dyrektywa ta będzie miała moc obowiązującą od roku 2002. Ponadto istnieją krajowe materiały dotyczące bezpieczeństwa pracy maszyn i ich elektrycznego wyposażenia wydane w postaci podręcznika metodycznego przez Ośrodek Certyfikacji PIAP. Obejmują one urządzenia w obszarze automatyki i robotyki. Można je również uwzględniać w układach pomiarowych pracujących w atmosferze wybuchowej.

3. CEL, ZAKRES I ZADANIA ROZPRAWY

Obecnie w świecie obserwuje się powstawanie nowych, większych magazynów zbożowych. Wraz ze wzrostem składowanej masy zbożowej wzrasta zagrożenie wybuchowe. Dlatego powstała konieczność opracowania wydajniejszych systemów wentylacji, a także nowych systemów monitorowania. Problematyce monitorowania poświęcona jest niniejsza praca. Na podstawie dotychczasowych badań zjawisk temperaturowych opracowano założenia i metodykę pomiarów temperatury, wilgotności, stopnia napełnienia komór elewatorów i silosów. Badania przyczyn pożarów i eksplozji, a także występujących strat ilościowych i jakościowych magazynowanego ziarna dowodzą, że zjawiska termiczne nie są wystarczająco poznane, a coraz bardziej złożone systemy kontrolne nie zawsze spełniają swoje funkcje.

Istotnym elementem systemów monitorowania są elastyczne sondy temperatury. W okresie ostatnich 20 lat ich wytrzymałość zwiększono trzykrotnie i wydaje się, że jest to granica możliwości technicznej dla dotychczasowych sond. Dlatego powinno się zapoczątkować badania nad wykorzystaniem nowych, współczesnych technik pomiarowych, np. z czujnikami optoelektronicznymi pracującymi w paśmie podczerwieni i z wykorzystaniem światłowodów.

Jednym z celów niniejszej pracy jest także rozpoznanie zjawisk występujących w ziarnie zbóż, oddziałujących na właściwości metrologiczne systemu monitorowania i jego podzespołów, co umożliwi zmodyfikowanie metodyki prowadzenia pomiarów.

Zadaniem pracy nie jest opracowanie vademecum projektanta lecz uzyskanie szerokich informacji w wybranych obszarach projektowania. Cel ten realizowano w następujących etapach:

- * Określenie wartości parametrów metrologicznych układów pomiarowych i systemów monitorowania dla rzeczywistych warunków pracy oraz ich wpływ na konstrukcję obiektu,
- * Opracowanie kryteriów doboru systemu monitorowania temperatury w zależności od kształtu pola temperaturowego oraz właściwości metrologicznych i wytrzymałościowych sond pomiarowych,
- * Określenie wymagań iskrobezpieczeństwa sond pomiarowych pracujących w strefie największego zapylenia,

- * Syntezę badań metrologicznych jako podstawy do projektowania systemów monitorowania,
- * Zalecenia i uwagi do projektowania elewatorów i baterii silosów, uwzględniające wyniki badań metrologicznych i środowiskowych systemów monitorowania,
- * Zaproponowanie nowej metodyki badań bezstykowych pomiarów temperatury w magazynach zbożowych.

Teza pracy sformułowana jest następująco:

Systemy monitorowania wyposażone w elastyczne sondy pomiarowe wystarczająco zabezpieczają ziarno zbóż od wzrostu temperatury, spowodowanego występującymi w ziarnie procesami metabolicznymi, a elewator zbożowych chronią przed eksplozją, która może wystąpić w atmosferze wysokiego zapylenia.

Projektowanie systemów monitorowania spełniających ww. zadanie powinno uwzględniać:

- * przebieg pól temperaturowych wewnątrz masy ziarna,
- * rozmieszczenie czujników i sond temperatury w masie ziarna,
- * możliwości metrologiczne i konstrukcyjne elastycznych sond,
- * realizację nowoczesnych struktur systemów pomiarowo-kontrolnych,
- * wymagania środowiskowe systemów i szczególnie sond pomiarowych,
- * uniwersalność oprogramowania użytkowego systemu z komputerem PC, efektywność kosztową aparatury pomiarowej i jej instalacji na obiekcie.

Zakres pracy obejmuje projektowanie ważniejszych układów pomiarowych i systemów monitorowania do baterii wysokich silosów i elewatorów zbożowych oraz dostosowanie ich do zabudowy w istniejących i projektowanych obiektach. Przedstawione zostaną zagrożenia spowodowane intensywnymi procesami metabolicznymi w masie ziarna oraz metody przeciwdziałania tym zjawiskom. Prawidłowe funkcjonowanie układów pomiarowych powinno zabezpieczyć składowane ziarno przed nadmiernymi stratami, a obiekt przed uszkodzeniem.

Systemy pomiarowe przeznaczone do pracy w atmosferze wybuchowej muszą mieć konstrukcję potwierdzoną odpowiednimi atestami, gwarantującą bezpieczną ich pracę. Nie może występować w nich nadmierne nagrzewanie, elektryzacja obudów itp., które mogłoby się przyczynić do spowodowania wybuchu. Dlatego zakres pracy będzie poszerzony o badanie wpływu środowiska na bezpieczną pracę układu pomiarowego.

Zadania szczegółowe pracy obejmują dobór miniaturowych czujników temperatury do zabudowy w wieloczujnikowych elastycznych sondach pomiarowych. Przedstawiono również strukturę systemu komputerowego wraz z programami komputerowymi, które spełniają założenia metrologiczne i są odporne na zagrożenia środowiskowe. W ramach tych zadań zaproponowano metodykę rozmieszczenia czujników i sond temperatury w masie składowanego ziarna, która powinna zapewnić z dużym prawdopodobieństwem wykrywalność wzrostu temperatury i wskazać obszary intensywnych procesów metabolicznych. Zadania szczegółowe dotyczą konkretnego obiektu, na którym prowadzono badania pilotowego układu monitorowania w wykonaniu przeciwwybuchowym.

4. PROJEKTOWANIE SYSTEMÓW POMIAROWO-KONTROLNYCH

4.1. Cele i zadania systemów pomiarowo-kontrolnych

Pod pojęciem *systemów* przyjęto uporządkowany wewnętrznie układ elementów mający określoną strukturę [111].

Klasyki filozofii polskiej prof. Kotarbiński i Tatarkiewicz [61, 85] w rozważaniach dotyczących metodologii nauk określili systematyzację pojęć i zadania systemów uznając je jako kluczowe w nauce. W naukach technicznych pojęcia te wymagają uściślenia.

W metrologii stosowana jest nazwa *systemów pomiarowych* dotycząca rozbudowanych układów pomiarowych. Zestaw elementów, przyrządów pomiarowych spełniający określoną funkcję traktowany jest jako *układ pomiarowy*.

W nowym, międzynarodowym słowniku terminów metrologii [109], nie ma rozróżnienia na układy i systemy pomiarowe. Angielską i francuską nazwę *measuring system*, *système de mesure* tłumaczy się na język polski jednym wspólnym określeniem: *układ pomiarowy*. Ze względu jednak na dużą liczbę krajowych publikacji wyróżniających systemy pomiarowe i układy pomiarowe oraz zwyczajowo używane określenia, w niniejszej pracy, zachowano rozróżnienie na układy i systemy pomiarowe.

System pomiarowy można określić jako odpowiednio zorganizowany zestaw elementów, stanowiących całość organizacyjną i objętych wspólnym sterowaniem, przeznaczonym do wydobycia informacji pomiarowej z obiektu badanego i przekazania jej obserwatorowi w użytecznej formie [88].

Urządzenia połączone przez standardowy system sprzęgający (interfejs) do komputera PC przeznaczone do zbierania, przetwarzania i prezentacji danych pomiarowych tworzą *komputerowy system pomiarowy*. System ten można podzielić na system badawczy przeznaczony do badań naukowych, system pomiarowo-kontrolny z dużą liczbą czujników i kontrolowanych parametrów rozmieszczonych przestrzennie występujących w przemyśle oraz system pomiarowo-diagnostyczny do identyfikacji lub predykcji uszkodzeń obiektu.

System monitorowania to system pomiarowo-kontrolny zbierający sygnały od znacznej liczby czujników (np. kilka tysięcy), określający wiele istotnych dla procesu parametrów. W niniejszej pracy systemem

monitorowania nazwano układ pomiarowo-kontrolny przeznaczony do obiektów magazynowych przemysłu zbożowego.

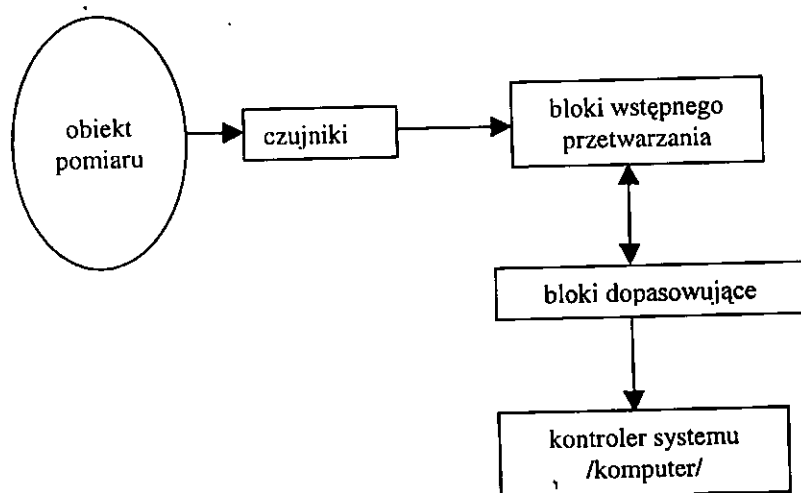
Działanie systemu polega na kontroli parametrów składowanego ziarna. Informuje on o aktualnych wartościach temperatury i wilgotności ziarna, a także o ich zmianach w określonym przedziale czasowym. Na tej podstawie realizuje się odpowiednią technologię przechowywania ziarna, która polega na utrzymywaniu zadanych optymalnych wartości parametrów mikroklimatu magazynu zbożowego stosując przewietrzanie ziarna, przesypywanie, suszenie itp. Za optymalne uważa się takie warunki, w których występują minimalne straty jakościowe i ilościowe w ziarnie. Biorąc pod uwagę duże ilości składowanego zboża, nawet kilku procentowe straty powodują wysokie straty finansowe.

Koszty finansowe poniesione na wdrożenie systemów monitorowania w elewatorach zbożowych łącznie z kosztami aparatury zwracają się w krótkim czasie. Nie przekracza on trzech lat [13, 45] i jest krótszy od wielu innych systemów stosowanych w przemyśle spożywczym. Procesy technologiczne stosowane w przechowywaniu ziarna są wysoce energochłonne. Urządzenia wykorzystywane w przechowywaniu, są zasilane energią elektryczną, ciepłą z różnych źródeł (z gazu, ropy naftowej, węgla itp.). Są one znaczącymi odbiornikami energii. Czas ich pracy zależy od informacji uzyskanych z pomiarów. Dlatego funkcjonowanie systemów monitorowania musi być niezawodne i zapewniające wiarygodną informację pomiarową. System monitorowania może współpracować z innymi systemami np. regulacyjnymi. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów podejmowane są decyzje realizowane automatycznie (np. w systemach z wymuszonym przewietrzaniem) lub przy sterowaniu ręcznym, uruchamiające odpowiednie procesy technologiczne. Błędne decyzje powodują wysokie straty energetyczne a także straty składowanego produktu itp.

Drugim problemem wymuszającym niezbędność stosowania systemów monitorowania jest ochrona przeciwwybuchowa, która polega na kontroli przed nadmiernym wzrostem temperatury składowanego ziarna. Wybuch pyłu zbożowego, który może nastąpić w tych warunkach jest groźny nie tylko dla obsługi, zniszczeniu ulec może też obiekt i składowane ziarno. System musi więc spełnić podstawowe zadania, a w czasie swojej normalnej pracy oraz pracy awaryjnej nie może przyczynić się do powstania wybuchu spowodowanego np. nadmiernym wzrostem temperatury aparatury pomiarowej, wyładowaniem elektrostatycznym na obudowach czujników pomiarowych i pozostałej aparatury pracującej w warunkach silnego zapylenia.

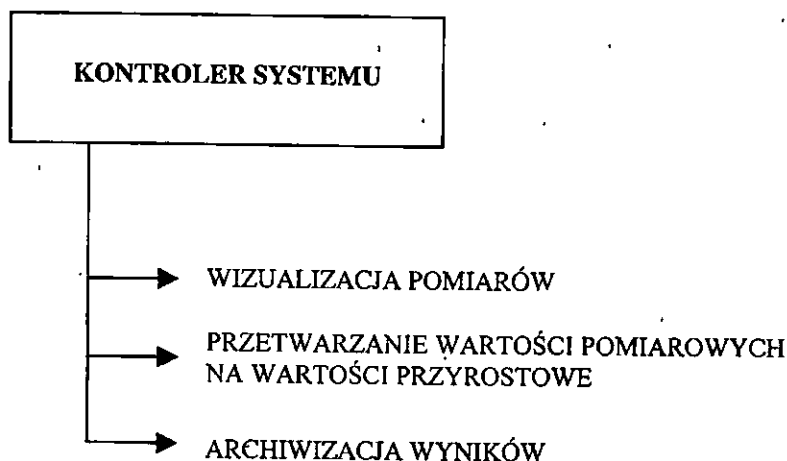
4.2. Ogólna struktura systemów pomiarowo-kontrolnych

System pomiarowo-kontrolny przedstawiony na rys. 4 składa się z jednostek funkcjonalnych. Czujniki temperatury, wilgotności i innych parametrów umieszczone są w ziarnie zbóż i w jego pobliżu. Wartości parametrów mierzonych są następnie przetworzone na sygnały elektryczne i przesłane linią przesyłową do części centralnej, w której jest prowadzony ich zdalny odczyt. Przyrosty temperatury i zmiany wilgotności mogą być odniesione do przedziałów czasowych dobowych i wielodobowych w celu lepszego rozpoznania intensywności procesów metabolicznych.



Rys. 4. Ogólna struktura systemu pomiarowo-kontrolnego

Czujniki pomiarowe znajdują się w strefie niebezpiecznej o wysokim zapyleniu i są umieszczone w masie ziarna lub w jego bliskiej odległości. W ich pobliżu są montowane przetworniki pomiarowe. Pozostałe elementy układu lub systemu pomiarowego znajdują się w pomieszczeniach, w których atmosfera nie jest już wybuchowa. Na rys. 5 przedstawiono funkcje pomiarowe kontrolera systemu zwanego również w literaturze jednostką centralną.



Rys. 5. Funkcje pomiarowe kontrolera systemu

4.3. Podział układów i systemów pomiarowych

Systemy pomiarowo-kontrolne w magazynach zbożowych dzieli się na:

- * specjalistyczne układy zdalnego pomiaru temperatury,
- * systemy pomiarowe o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych,
- * systemy monitorowania o połączeniu jednostek funkcjonalnych za pomocą magistrali interfejsu.

Dotychczas specjalistyczne układy pomiarowe wykonywane były do ściśle określonego zastosowania np. do pomiaru temperatury ziarna zbóż. Układy takie montowano w małych magazynach płaskich i bateriach silosów oraz w pojedynczych binach (małych silosach).

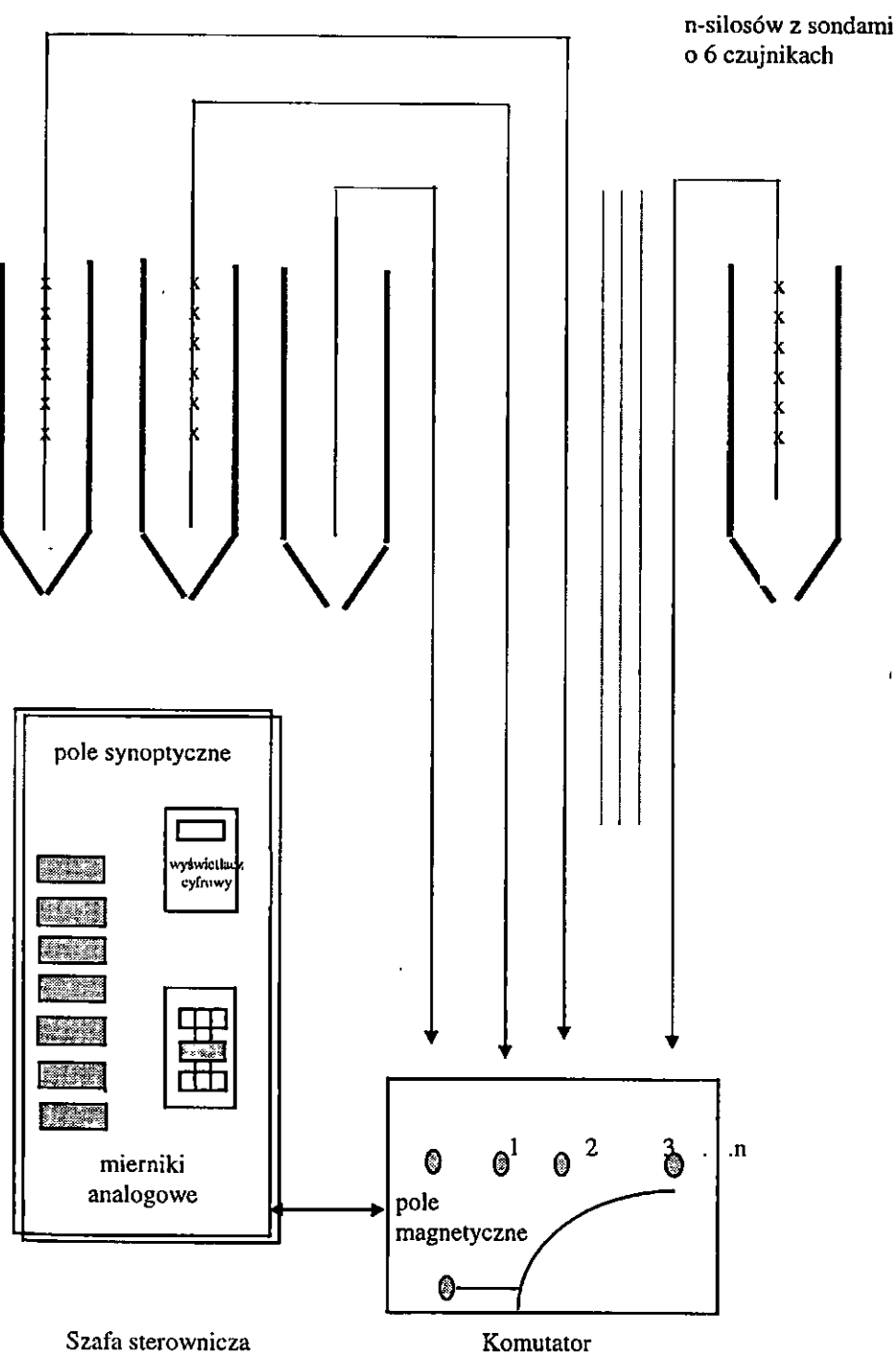
Pierwsze systemy o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych składały się z bloków zabudowanych w jednej lub kilku szafach sterowniczych. Szafa z miernikami temperatury znajdowała się w sterowni elewatora. Do niej doprowadzone były kable łączące z poszczególnymi sondami temperatury. Sygnał z sond był, w pierwszych systemach, analogowy-napięciowy z odpowiednią kompensacją spadku napięcia na przewodach łączących. W nowszych układach pomiarowo-kontrolnych jest

stosowany standardowy sygnał przesyłowy prądu stałego. Wartość sygnału można odczytywać na miernikach analogowych i cyfrowych przedstawionych na mapach synoptycznych całego obiektu. Wybór odpowiednich komór i przyporządkowanych im punktów pomiarowych prowadzony jest za pomocą komutatorów elektromechanicznych, przekaźnikowych, a ostatnio mikroprocesorowych-multiplekserów.

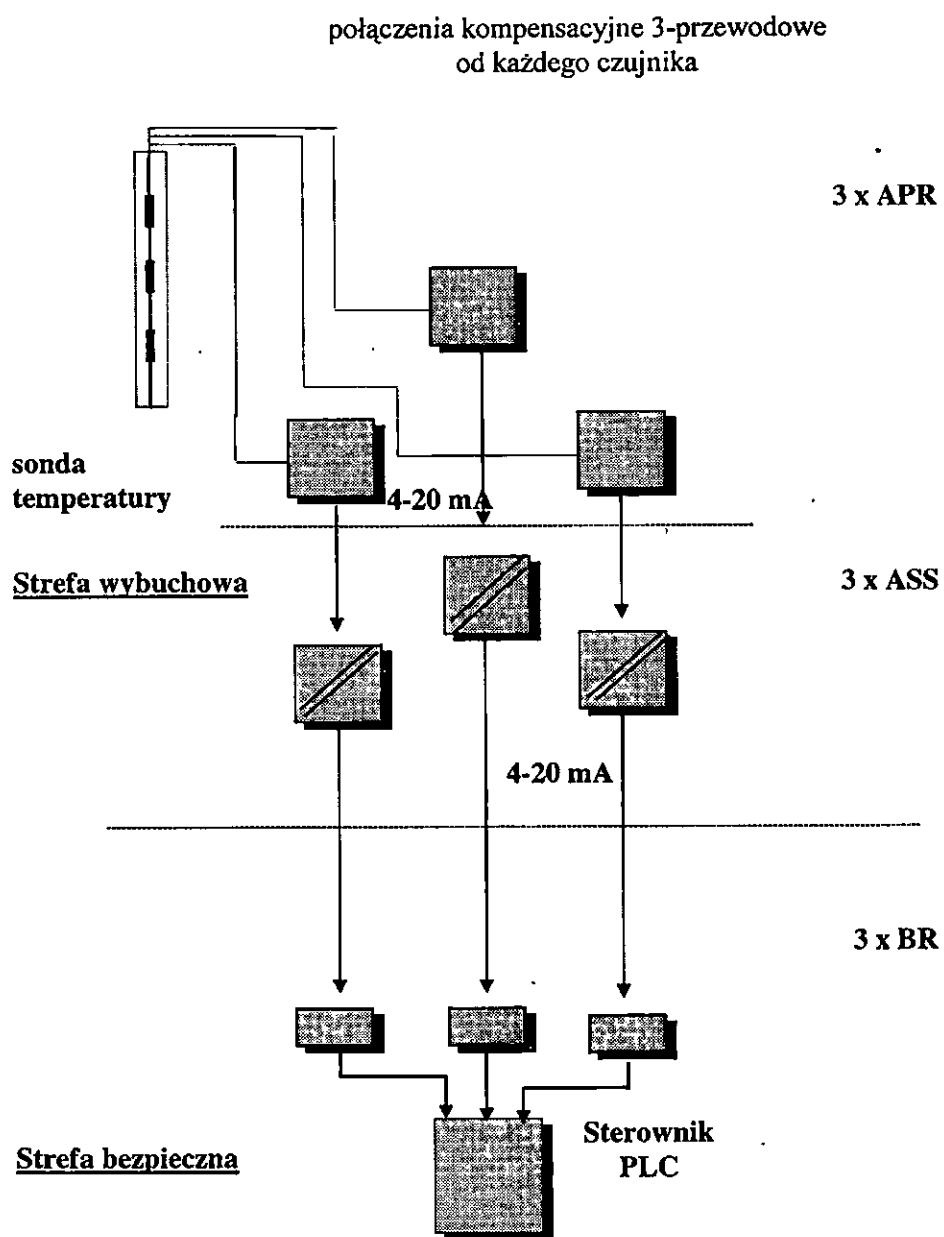
W systemach krajowych nowszej generacji (z początku lat 80.) elementami dopasowującymi były bloki systemu Inteldigit PI. Tworzyły one system „TELETERM MC” wchodzący w skład systemu „POLMATIK”.

Większość zainstalowanych w kraju systemów jest wykonanych na zasadzie bezpośredniego połączenia jednostek (rys. 6). Obecnie tę zasadę stosuje się tylko w niedużych układach pomiarowych, natomiast w dużych obiektach przechodzi się na nowocześniejsze rozwiązania ze standardową magistralą interfejsu.

Na rys. 7 przedstawiono przykładowo układ pomiarowy analogowo-cyfrowy o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych. Został on zrealizowany dla baterii silosów przeznaczonych do składowania mączki kakaowej. Każdy z silosów jest wyposażony w elastyczną sondę pomiarową o trzech czujnikach pomiarowych typu Pt 100. Sygnał z czujnika jest przetworzony w bloku APR na sygnał standardowy prądowy. Z przetwornikiem współpracuje separator ASS, którego zadaniem jest oddzielenie galwaniczne sygnału ze strefy niebezpiecznej do bezpiecznej. Jest to blok zespołów iskrobezpiecznych. Bariery ochronne BR chronią przed zbyt wysokim napięciem (przebiegiem) od strony obciążenia. Wszystkie zastosowane aparaty mają odpowiednie atesty bezpieczeństwa. Sygnały standardowe z ASS są następnie doprowadzane do analogowych kart wejściowych sterownika mikroprocesorowego. Wartości tych sygnałów są wyświetlane na monitorze i przedstawione na rysunku synoptycznym baterii silosów.



Rys. 6. System o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych

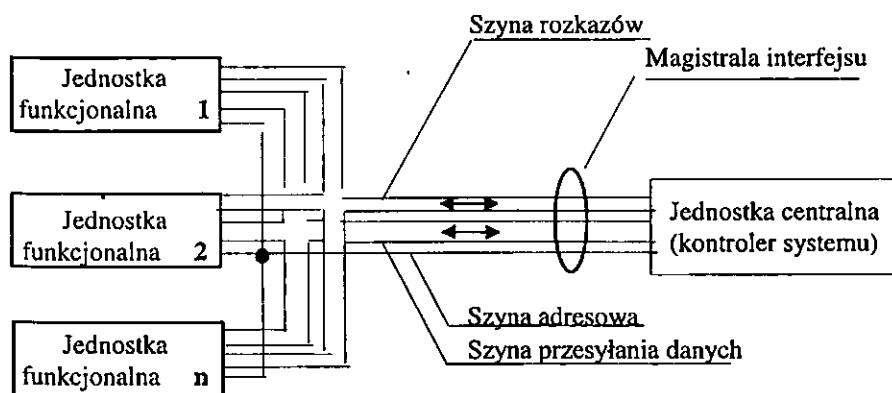


Rys. 7. Schemat ideowy pomiaru temperatury w systemie analogowo-cyfrowym o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych (wg koncepcji autora)

4.4. System pomiarowo-kontrolny z magistralą interfejsu

System z magistralą interfejsu jest systemem strukturalnie bardziej rozbudowanym w porównaniu do systemu o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych, ale jego konfiguracja przestrzenna jest podobna. Zastosowano w nim dużo większą liczbę czujników pomiarowych. Połączenie magistralowe znacznie uprościło okablowanie systemu. Ze względu na swoje wysokie właściwości metrologiczne, a zwłaszcza na dużą odporność na zakłócenia przemysłowe, dokładność i niezawodność działania jest szczególnie przydatny tam, gdzie występują: duże rozproszenia przestrzenne i znaczne odległości między jednostkami funkcjonalnymi i jednostką centralną. W systemie te odległości mogą dochodzić do 3 km. Konfiguracja systemu odpowiada więc wymaganiom na systemy przeznaczone do pomiaru, kontroli i sterowania w magazynach zbożowych.

Połączenie między jednostkami funkcjonalnymi, a jednostką centralną wykonane jest za pomocą magistrali interfejsu, złożonej z szyny rozkazów, szyny adresowej i szyny przesyłania danych (rys. 8). Magistrala jest linią czteroprzewodową, którą przy zachowaniu tylko funkcji pomiarowych (bez regulacyjnych) można ograniczyć do linii dwuprzewodowej. Prowadzenie linii dwuprzewodowej zamiast wieloprzewodowej jest znaczącym ułatwieniem w montażu i serwisie połączeń.



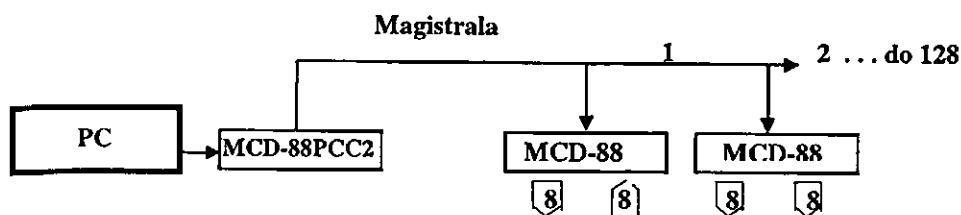
Rys. 8. Struktura systemu połączenia jednostek funkcjonalnych za pomocą magistrali interfejsu [6]

System z magistralą interfejsu wymaga kompatybilności jednostek funkcjonalnych oraz znormalizowanych sygnałów przesyłowych i interfejsów wejściowych i wyjściowych sterującego komputera. Niestety, nie ma w tym zakresie pełnej zgodności między głównymi producentami, brak jest odpowiedniej normalizacji i praktycznie istnieją magistrale standardowe i jednostki związane z konkretnym wytwórcą. Obecnie czyniona jest próba znormalizowania magistrali przez zalecenie stosowania magistrali RS 485 ze względu na jej wyraźne zalety w stosunku do innych magistral. W kraju daleko posunięta normalizacja była w systemie CAMAC, w aplikacjach systemów TELETERM MC, TELETERM PC i METROTERM DAC-20 oraz ostatnio METROTERM DAC-30Ex [116]. Prace prowadzone pod kierownictwem autora w PIAP, dotyczące projektowania systemów z magistralą dla magazynów zbożowych, koncentrowały się nad aplikacją elementów w systemie i przebadaniu pilotowych systemów na obiektach rzeczywistych.

Były to następujące systemy:

- * system złożony z bloków firmy niemieckiej Heiland,
- * system Teleterm MC (ZAP-PIAP),
- * system złożony z bloków firmy amerykańskiej Advantach,
- * system Metroterm DAC-20 (PIAP),
- * system złożony z bloków firmy angielskiej MTL,
- * system Metroterm DAC-30 Ex (PIAP),

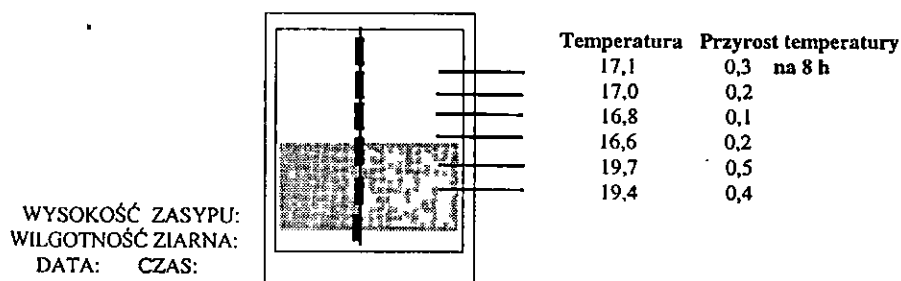
System z wykorzystaniem bloków Heiland składa się ze stacji pomiarowych współpracujących z sondami temperatury, wilgotności i wysokości zasypu, z własnej magistrali i komputera. W części centralnej komputer zawiera moduł interfejsu MCD-88PCC2 w postaci karty wejwy. Pozwala on na dwukierunkową komunikację z poszczególnymi stacjami sieci, których może być 128. Odległość między ostatnią stacją a komputerem może wynosić 3 km. W skład poszczególnych stacji wchodzi blok MCD-88 przedstawiony na rys. 9, który ma 7-bitowy adres ustawiany za pomocą 7-segmentowego przełącznika dip-switch. Adres ten pozwala na jednoznaczny dostęp do ustawiania 8 wyjść binarnych lub na jednoznaczny odczyt 8 wejść binarnych. Umożliwia to komunikowanie się w sieci dwuprzewodowej tylko z wybranymi blokami, bez konieczności sprawdzania-wszystkich znajdujących się w sieci.



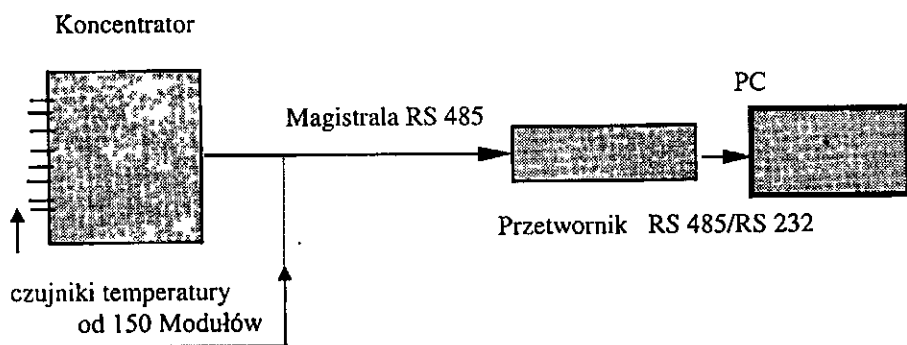
Rys. 9. Struktura systemu z blokami Heiland (wg koncepcji autora)

Stacja 8-wejściowa dla jednej sondy temperaturowej 6-czujnikowej i 2 wejść dodatkowych z blokiem MCD-88 została zaprojektowana przez autora w PIAP (rys. 9). Dla komputera PC wykonano specjalnie program. Na ekranie monitora (rys.10) jest przedstawiony widok komory z zaznaczeniem punktów pomiarowych. Dodatkowe wejścia wykorzystano do pomiarów wilgotności ziarna w komorze i wysokości zasypu ziarna. Wysokość zasypu ziarna może być też przeliczona na jego ciężar. System ten został opracowany w połowie lat 80. Wymagał własnego interfejsu złożonego z bloków dostarczonych przez producenta.

Nowszy system z blokami Advantech dostosowany jest już do magistrali RS 485/232. Bloki systemu mają wejścia analogowe prądowe i napięciowe oraz są dostosowane do czujników rezystancyjnych temperatury i termoelementów. Nie ma więc konieczności tworzenia stacji pomiarowych, ponieważ są one zastąpione przez bloki koncentratorów. Wyjścia są połączone z magistralą, która jest obecnie uznawana za najlepszą w tego typu aplikacjach. Firma dostarcza również uniwersalne programy komputerowe umożliwiające szybką modyfikację programu do zastosowań w magazynach zbożowych. Schemat tego systemu jest przedstawiony na rys.11.



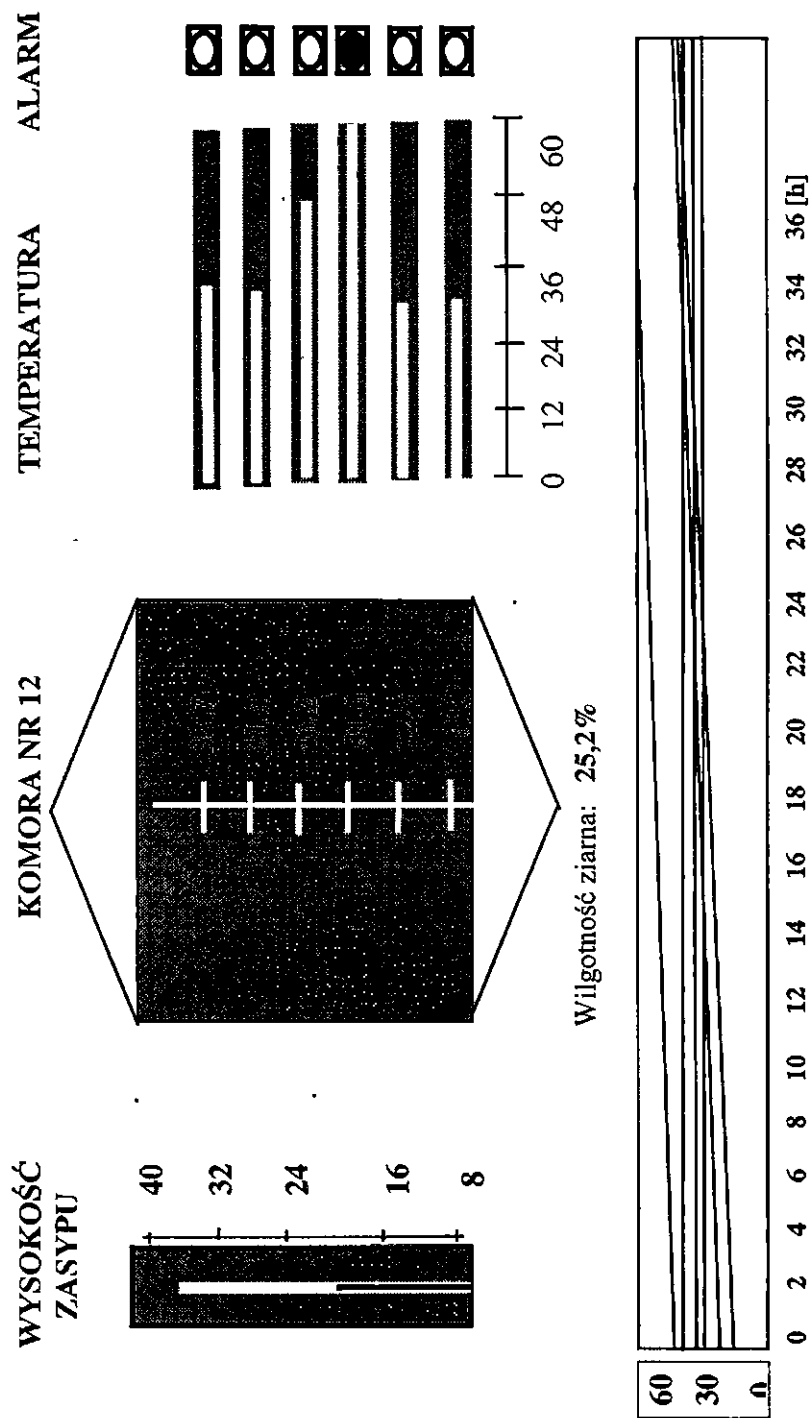
Rys. 10. Widok ekranu monitora systemu z blokami Heiland (wg koncepcji autora)



Rys. 11. Schemat strukturalny systemu wykonanego z bloków Advantech (wg koncepcji autora)

Elewatory zbożowe są najczęściej jednym z obiektów zakładów zbożowych, w skład których mogą wchodzić również młyn, kaszarnie, mieszalnie pasz, budynki administracyjne z personelem obsługującym produkcję, kupno, sprzedaż itp. Obecnie w samej administracji pracuje już kilkanaście komputerów, a w całym przedsiębiorstwie nadzorującym produkcję liczba komputerów i sterowników mikroprocesorowych sięga, na obecnym etapie, do kilkudziesięciu sztuk. Celowe jest zatem łączenie komputerów w sieci np. typu Novell lub H1F0 Siemens. Zasada pracy *sieciowego systemu pomiarowo-kontrolnego*, realizowanej w PIAP z udziałem autora, dla zakładów zbożowych jest przedstawiona na rys. 12.

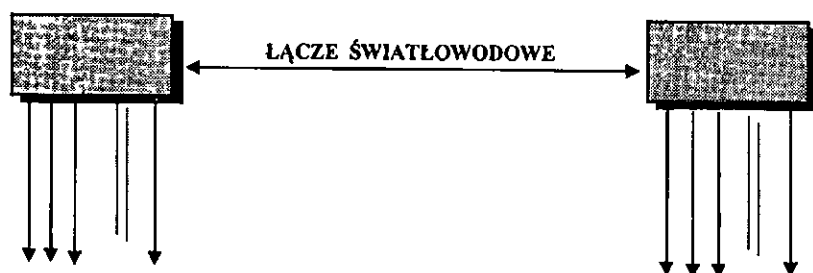
Pomiary w elewatorze są tylko jedną z funkcji tego systemu realizowanego w sieci zakładowej i są dostępne do odczytu z każdej stacji (komputera) sieci.



Rys.12. Widok ekranu monitora systemu z blokami Advantech i z programem „Genie”

**SERWER ADMINISTRACYJNY
PRODUKCYJNY**

SERWER

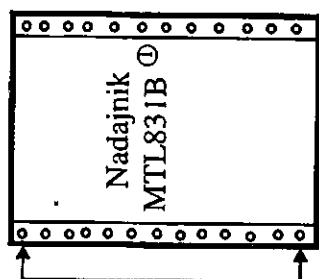


STANOWISKA PC

Rys. 13. Sieciowy system pomiarowy

W PIAP pod kierunkiem autora zrealizowano dwa systemy monitoringu. Pierwszy o nazwie METROTERM DAC-20 składa się z bloków „Adam” firmy Advantach. Został on dostosowany do sond elastycznych z czujnikami rezystancyjnymi i z wyjściem prądowym. System spełnia większość wymagań metrologicznych, które powinny mieć tego typu systemy. Ma jednak poważną wadę a mianowicie, nie posiada atestów dopuszczających bloki (koncentratory) „Adam” do pracy w atmosferze niebezpiecznej o silnym zapyleniu. Mimo zapewnień firmy o szybkim wystąpieniu w sprawie uzyskania odpowiedniego atestu, jak dotąd nie uzyskano go. Dlatego powstał drugi system METROTERM DAC-30 Ex przedstawiony na rys. 13. Działanie systemu jest identyczne do systemu poprzedniego, ale zastosowane bloki firmy Measurement Technology Limited (MTL) [117] mają atesty iskrobezpieczeństwa i dopuszczenie do pracy w atmosferze o wysokim zapyleniu. Bloki mają atesty międzynarodowe (BSI, BVS itp.) oraz polskie, wydane przez ZD GIG Kopalnia „Barbara”. System z bloków MTL został w PIAP dostosowany do nowo opracowanych sond elastycznych o wysokiej wytrzymałości mechanicznej (90 kN). Sondy te wraz ze współpracującymi blokami MTL, na wniosek PIAP, uzyskały również odrębny atest ZD GIG Kopalnia „Barbara”. Mogą więc być stosowane w elewatorach zbożowych, a szczególnie w tych obiektach, które są dopuszczone lub planuje się przystosowanie ich do współpracy międzynarodowej.

Strefa niebezpieczna



T₁

T₂

T₆

T₇

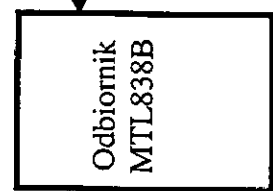
Sonda temperatury EST-11

①

Multiplexer MTL831B

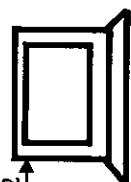
ma orzeczenie KDB-Nr 95.221W
i może być instalowany w strefie
niebezpiecznej [Exi, IIC T4]

Strefa bezpieczna



Magistrala RS 485

RS 232



Komputer
PC

Separator
MTL3052 ②

②

Separator MTL3052

ma orzeczenie KDB Nr 91.025W
i ma zewnętrzny obwód iskrobezpieczny
[Exi, IIC]

Rys. 14. Schemat ideowy systemu METROTERM DAC 30 Ex

Podsumowanie i wnioski

- * Przedstawione układy pomiarowe i systemy monitorowania są sklasyfikowane etapowo, od układów najstarszych do współczesnych magistralowych systemów monitorowania.
- * W systemach monitorowania przedstawiono zasadę działania, wymagania oraz kompletację elementów.
- * Dla obecnie szeroko stosowanego systemu magistralowego i interfejsem RS 485 i RS 232 przedstawiono jego konfigurację oraz przykładowy program komputerowy.
- * Widok ekranu monitora zawiera specyficzne elementy takie jak symbole termometrów klasycznych (analogowych) i cyfrowych z wartościami temperatury, wkomponowane w rysunek synoptyczny elewatora. Takie przedstawienie graficzne wyniku bardziej z tradycji stosowania dotychczasowych systemów, niż z potrzeb metrologicznych.
- * Zaprezentowano również układ pomiarowy dla niewielkich silosów wykonanych w technice analogowo-cyfrowej wraz z programatorem komputerowym.
- * Przedstawiono również atestowany system monitorowania w specjalnym wykonaniu do pomieszczeń z zagrożeniem wybuchowym.
- * Obecnie uważa się magistralowy system monitorowania jako najodpowiedniejszy do magazynów zbożowych ze względu na możliwości jego konfiguracji przestrzennej, odporności na zakłócenia, współpracę z innymi systemami oraz jego wysokimi parametrami metrologicznymi.
- * Interfejs RS 485 jest obecnie popularnym interfejsem, mimo że nie jest jeszcze znormalizowany i zdarzają się trudności współpracy elementów różnych firm w ramach ich kompletacji. Można również stosować inne interfejsy przy założeniu, że będą spełniały tę samą funkcję.

4.5. Podstawowe parametry systemu monitorowania

Zadaniem rozbudowanych systemów pomiarowo-kontrolnych jest pomiar różnych wielkości fizycznych w sposób spełniający kryteria: metrologiczne, funkcjonalne, niezawodnościowe, bezpieczeństwa i kosztowe.

Taki pomiar w sensie metrologicznym jest to proces przyporządkowania jednoznacznego wektorów wielkości wejściowych (mierzonych) wektorom wielkości wyjściowych (wyników pomiarów).

$$Y_m(X_n) = \int_m [X_n(t)]$$

w której:

$Y_m(X_n)$ - wektor wielkości wyjściowa systemu będące funkcjami X_n ;

$m = 1, 2 \dots k$;

$X_n(t)$ - wektor wielkości wejściowe będące funkcją czasu t ;

$n = 1, 2 \dots l$.

Najbardziej rozpowszechniony system pomiarowo-kontrolny polega na pomiarze temperatury w kilkuset lub nawet kilku tysiącach punktów pomiarowych.

Obecnie system jednoparametryczny temperatury jest rozszerzany o pomiar i kontrolę następujących wielkości:

- * wysokości zasypu,
- * ciągłego pomiaru wilgotności ziarna podczas załadunku komór,
- * pomiaru wilgotności wewnątrz komór.

System pomiarowo-kontrolny temperatury powinien zapewnić pomiar i przetwarzanie danych [35, 54, 89] realizując następujące funkcje:

- * zdalny wielopunktowy pomiar temperatury przedstawiony w postaci cyfrowej i/lub analogowej,
- * pomiar w cyklu automatycznym wszystkich punktów pomiarowych oraz pomiar w dowolnie wybranej komorze elewatora,
- * monitorowanie i archiwizację pomiarów,
- * wizualizację punktów pomiarowych na rysunkach synoptycznych,
- * skanowanie punktów pomiarowych w określonych odcinkach czasowych, np. co 6, 12, lub 24 h,
- * określenie przyrostów temperatury w ciągu jednej doby lub jednego tygodnia,
- * nastawę wartości granicznych temperatur oraz sygnalizację akustyczną i optyczną ich przekroczenia.

Układy pomiarowe, przeznaczone do mniejszych obiektów, takich jak magazyny płaskie czy baterie silosów, mogą spełniać mniej funkcji niż duże systemy pomiarowe. Z systemem pomiarowo-kontrolnym mogą również współpracować układy regulacyjne i sterujące aktywną wentylacją, jeśli taka istnieje w elewatorze. W odróżnieniu od wielu rozwiązań przemysłowych, w których przewidywany jest stały nadzór i serwis, systemy kontrolne w magazynach powinny pracować w znacznie dłuższym czasie i z minimalną obsługą okresową.

Na podstawie wymagań międzynarodowych [93, 94] i doświadczeń krajowych [4, 67] oraz własnych autora [50, 54], ważniejsze parametry metrologiczne systemów pomiaru i kontroli są następujące:

- * zakres pomiarowy temperatury: 0-60 °C,
- * dokładność pomiaru: $\pm 0,5$ °C,
- * powtarzalność pomiaru: $\pm 0,2$ °C,
- * rozdzielczość: 0,1 °C,
- * zakres nastawy temperatury granicznej: 20-80 °C,
- * długość sond temperatury: do 60 m,
- * wytrzymałość mechaniczna elastycznych sond temperatury: 30 kN, 50 kN, 90 kN,
- * liczba czujników w jednej sondzie: od 3 do 12 (w zależności od jej długości),
- * czas odczytu wszystkich punktów pomiarowych: od 3 do 5 min,
- * czas oczekiwania na odczyt temperatury z wybranej komory—mniejszy niż 30 s,
- * warunki znamionowe użytkowania: czujników i przetworników 0÷60 °C, jednostki centralnej 15 °C÷25 °C.

4.6. Zadania projektowania systemów monitorowania

Połączenia między jednostką centralną-PC a jednostkami funkcjonalnymi: koncentratorami sygnałów (multiplexerami), nadajnikami i odbiornikami (przetwornikami) są realizowane przez magistralę sygnałową. Ostatni system oznaczony „Ex” [116] ma już certyfikaty dopuszczające do pracy w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem. Przedstawiony jest on na schemacie ideowym (rys. 14).

Jeśli przyjąć, że znane są założenia techniczno-ekonomiczne, to procedurę projektowania systemu można zdefiniować w trzech podstawowych grupach, jak przedstawiono na rys. 14.

W pierwszej grupie zostanie ustalony przedział dopuszczalnych zmian temperatury dla poszczególnych etapów składowania ziarna [1, 3, 15]. Będzie to temperatura w funkcji czasu (tygodni, miesięcy) zalecana jako optymalna dla określonego rodzaju zbóż. Można ją sprawdzić przeprowadzając badania symulacyjne i obiektowe, a następnie ocenić wyniki na podstawie opublikowanych analiz przedstawionych w pracach pod kierownictwem E. Kamińskiego [20, 21, 22] oraz Ł. Fornalowej [9, 10].

Znając budowę magazynu wyznacza się strefy kontroli temperatury, w których może wystąpić wzrost temperatury. Będą to obszary, w których oddziaływanie chłodzące elementów konstrukcyjnych magazynu będzie małe lub można je pominąć. Określone zostaną również obszary o dużym zapyleniu, w których istnieje zagrożenie wybuchowe. W tych obszarach montaż urządzeń, wykonywanie instalacji oraz sama praca elementów układów pomiarowych muszą być poddane dodatkowej inspekcji ze względu na możliwość inicjacji wybuchu.

Obniżenie temperatury do wartości dopuszczalnych można osiągnąć w elewatorach przez przesypywanie ziarna do wolnej komory. W mniejszych obiektach-silosach i magazynach płaskich stosowana jest aktywna wentylacja. Sterowanie wentylacją wymaga znajomości parametrów obiektu i przeprowadzenie jego identyfikacji wyznaczając charakterystyki skokowe i częstotliwościowe. Pierwsze takie charakterystyki otrzymano stosując metodę radiacyjną z domieszkowaniem radioaktywnego jodu [24] w powietrzu wentylacyjnym.

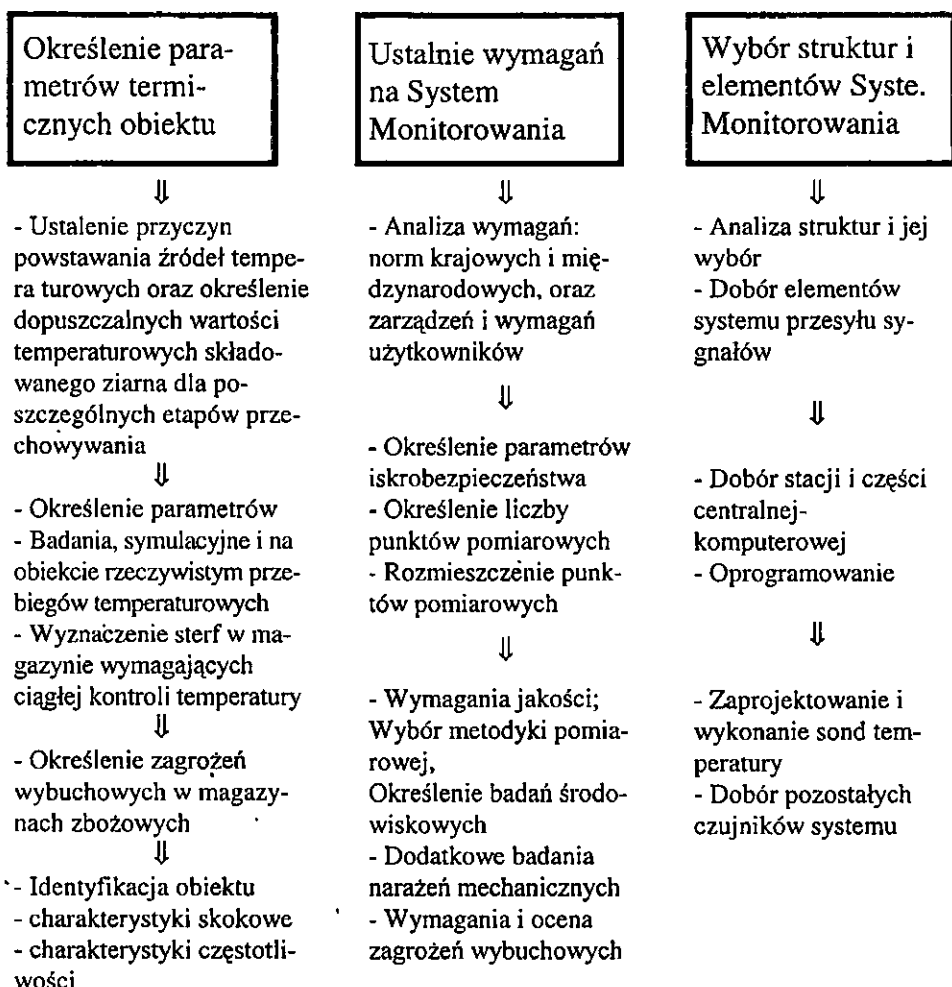
W drugiej grupie procedury projektowania przewiduje się analizę wymagań normalizacyjnych oraz ustaleń i zarządzeń normatywnych, które wymagają aktualizacji. W ciągu ostatnich 20 lat uległy one kilkakrotnie zmianom spowodowanym uściśleniem parametrów, wprowadzeniem nowych metod pomiarowych, a także zmianom gatunków zbóż. W ostatnim 5-leciu zwrócono szczególną uwagę na jakość zbóż i wymagania jakościowych wynikających z norm ISO. Obecnie tworzone są procedury jakości, które będą obowiązywały w magazynach państw UE i do których nasz kraj będzie się musiał dostosować.

W skład systemu monitorowania wchodzi sondy pomiarowe, czujniki itp. zanurzone w ziarnie i na które ziarno mechanicznie oddziałuje. Muszą one mieć odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, a także

spełniać wymagania środowiskowe. Ponieważ ziarno jest produktem spożywczym, osłony czujników, sond itp. nie mogą być toksyczne.

Liczba i rozmieszczenie czujników pomiarowych są obecnie określone normami międzynarodowymi. Analiza tych przepisów wskazuje jednak na różne uchybienia, dlatego najlepiej wybrać metodę opartą na znajomości procesu rozchodzenia się ciepła wewnątrz masy ziarna [79].

Na podstawie konfiguracji przestrzennej czujników, stacji pomiarowej itp. można przystąpić do wyboru struktury układu pomiarowego. Wymaga to również opracowania programów komputerowych sterujących systemem monitorowania w celu realizacji pomiarów, przetwarzania danych oraz ich archiwizacji.



Rys. 15. Procedura projektowania systemu monitoringu

4.7. Procedura prac instalacyjnych i uruchomieniowych

Na rys.16 i rys.17 przedstawiono procedury doboru elementów i urządzeń systemu monitorowania oraz ich instalacji.

W elewatorach występują komory o różnych pojemnościach, ustawione rzędowo w kształcie walców. Między dwoma rzędami walców występują komory gwiazdkowe o mniejszej pojemności, dlatego w elewatorze przeprowadza się dobór czujników i sond pomiarowych dla kilku grup komór o różnych pojemnościach. Głowice sond mocowane są w stropie nad komorami, gdzie są zainstalowane również urządzenia transportu wewnętrznego. W starych elewatorach zainstalowanie głowic sond wymagało wzmocnienia stropu dodatkowymi kratownicami, ponieważ nie przewidywano obciążenia ziarna działającego na sondy. W nowszych stropy są już dostosowane do zawieszenia sond temperatury i mają dużo większą wytrzymałość. W niewielkich odległościach od sond na elementach nośnych-konstrukcyjnych elewatora lub na ścianach podwiesza się skrzynki z koncentratorami sygnałów. Połączone są one kablowo z sondami oraz z magistralą systemu. Przebieg magistrali sygnałowej do stacji pomiarowej wymaga ochrony mechanicznej.

Stosuje się również zabezpieczenia przed gryzoniami, które potrafią niszczyć okablowanie. Jeżeli system monitorowania będzie współpracował z UAR sterujący wymuszoną wentylacją to procedura doboru urządzeń musi uwzględnić zawieradła wentylacyjne (kłapy, zasuw, przepustnice) nawilzacze, i urządzenia sterownicze wentylatorów.

4.8. Projektowanie aparatury do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem

Procedura projektowania przewiduje ocenę stanu zagrożenia przeciwybuchowego (rys. 15) obiektu oraz zabudowanego w nim systemu monitoringu. Poniżej zostaną podane ważniejsze definicje i klasyfikacje zagrożeń wybuchowych występujących w elewatorach zbożowych [11, 12, 84, 95-98] na podstawie obowiązujących obecnie norm i dyrektyw „Starego Podejścia” oraz dokumentów, które są obecnie w trakcie opracowania w krajach UE tzw. „Nowego Podejścia” [113].

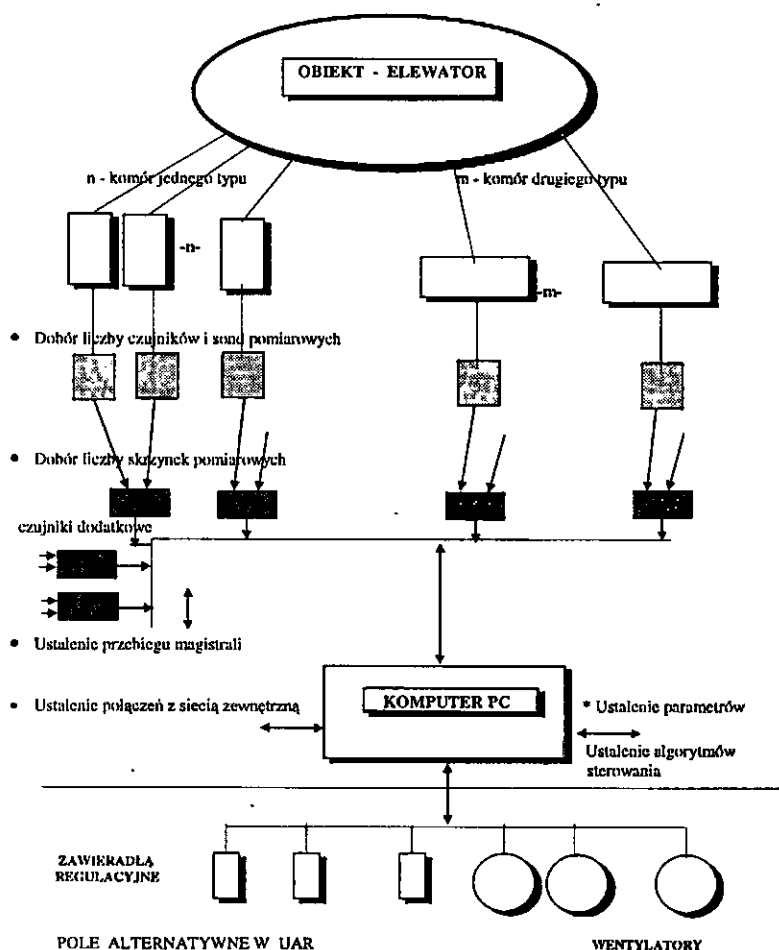
Mieszanina wybuchowa, charakterystyczna dla magazynów zbożowych, jest mieszaniną pyłów i włókien z powietrzem w odpowiednim

stężeniu, która pod wpływem energii cieplnej ulega gwałtownemu spalaniu. Towarzyszy temu gwałtowny wzrost ciśnienia. Mieszaninę wybuchową można określić *minimalną energią zapłonu*, po przekroczeniu której wystąpi zapłon. Minimalna energia zapłonu charakteryzuje się *dolną granicą wybuchowości* i *górną granicą wybuchowości*.

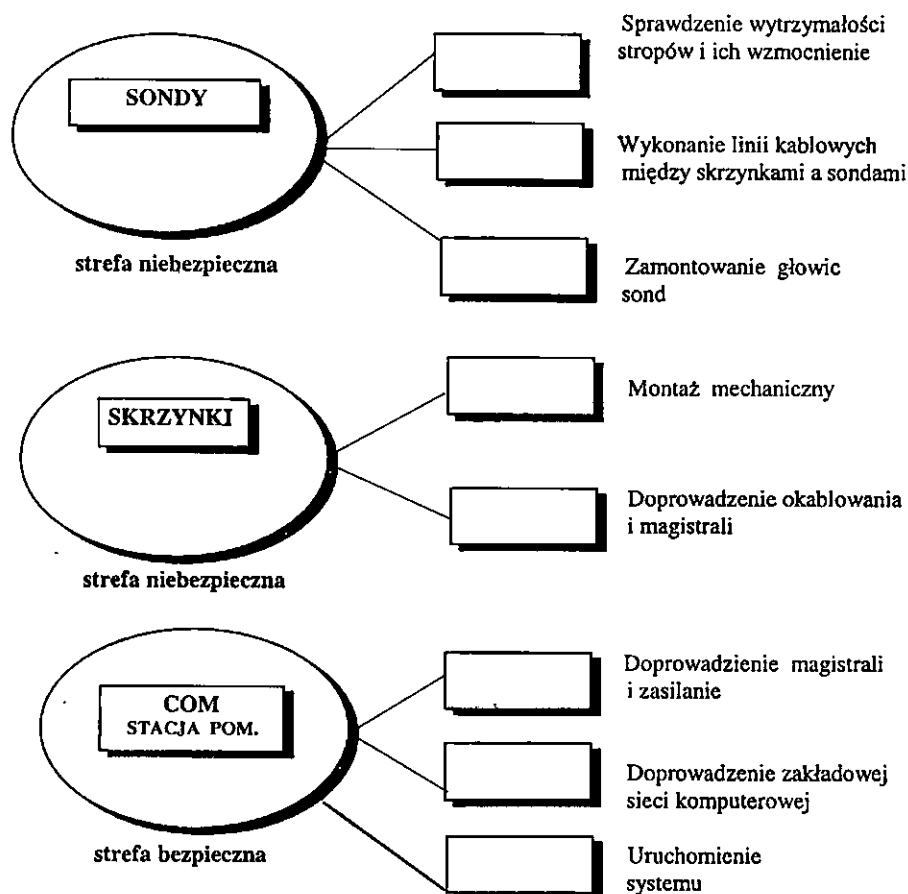
Dolna granica wybuchowości $C_{\min}$ (g/m^3) –najniższe stężenie pyłów w mieszaninie z powietrzem powyżej którego możliwe jest samorzutne rozprzestrzenianie się płomienia w mieszaninie.

Górna granica wybuchowości $C_{\max}$ (g/m^3) –najwyższe stężenie pyłu w mieszaninie z powietrzem powyżej którego mieszanina przestaje być wybuchowa.

Temperatura samozapłonu jest najniższą temperaturą, po której następuje zapalenie mieszaniny z powietrzem w sposób samorzutny,



Rys. 16. Procedura projektowania Systemu Monitorowania



Rys. 17. Wykaz ważniejszych prac instalacyjnych i procedury uruchomieniowej

Minimalna temperatura zapłonu obłoków pyłu T_{cl} ($^{\circ}C$) jest minimalną temperaturą powierzchni, przy której nastąpi zapłon obłoków pyłu.

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu T_{5mm} ($^{\circ}C$) jest minimalną temperaturą powierzchni, przy której nastąpi zapłon warstwy pyłu po długim czasie (o standardowej grubości warstwy - 5 mm).

Minimalna temperatura samozapalenia pyłu składowanego $T_o = f(V)$ ($^{\circ}C$).

Minimalna energia zapłonu obłoków pyłu W_{min} (mJ) jest minimalną temperaturą powierzchni, przy której nastąpi zapłon obłoków pyłu.

Maksymalne ciśnienie wybuchu pyłu $p_{\max}$ (bar).

Wskaźnik wybuchowości pyłu $K_{st,\max}$ (m bar/s) – maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu w objętości 1m^3 .

Graniczne dla wybuchu stężenie tlenu LOC (% obj.).

Strefy zagrożone wybuchem występujące w magazynach zbożowych:

Z10 – strefa, w której mieszanina wybuchowa pyłów występuje często lub długotrwale w normalnych warunkach pracy,

Z11 – strefa, w której zalegające pyły mogą krótkotrwale stworzyć mieszaninę wybuchową wskutek przypadkowego zawirowania powietrza.

W USA rozróżnia się klasyfikację gazów i pyłów i w ramach Klasy II dotyczącej pyłów i wprowadza się wydzieloną grupę G - pyłów zbożowych.

Do dyrektywy „Nowego Podejścia” ATEX 100A [113]] i norm zharmonizowanych po raz pierwszy włączono zagrożenia wybuchowe pyłów. Przewiduje się w niej zastąpienie stref przez kategorie, jak przedstawiono w tabl. 4.

Definicje stref zagrożenia wybuchem wg dokumentów „Nowego Podejścia” są następujące:

Strefa 20: przestrzeń, w której pył palny w postaci obłoków występuje w sposób ciągły lub często w ilości wystarczającej do wytworzenia mieszaniny wybuchowej z powietrzem,

Strefa 21: przestrzeń, w której pył palny w postaci obłoków może wystąpić w ilości wystarczającej do wytworzenia mieszaniny wybuchowej z powietrzem,

Strefa 22: przestrzeń, w której pył palny w postaci obłoków może wystąpić rzadko i na krótki czas, w której jednak ilość nagromadzonego pyłu wystarcza do wytworzenia mieszaniny wybuchowej z powietrzem.

Tablica 4. Relacja między strefami zagrożenia wybuchem pyłów a kategorią wyrobów grupy II

Strefa	Kategoria wyrobów
20	1
21	1 lub 2
22	1 lub 2 lub 3

Minimalne stężenie wybuchowe jest minimalnym stężeniem pyłu palnego, który w przypadku zapłonu spowoduje wybuch o małej sile.

Minimalna, niebezpieczna grubość warstwy pyłu jest to grubość, która musi być przekroczona, aby była możliwa propagacja płomienia lub żaru w osiadłym pile.

Pyły zbóż podobnie jak pyły węgla i metali dzieli się na :

- * bardzo drobne, od 0,1 do 1 μm tworzące aerozole,
- * drobne, od 2 do 10 μm , długo unoszące się w powietrzu,
- * średnie, od 60 do 100 μm ,
- * grube, powyżej 100 μm , szybko opadające

Klasyfikacja mieszanin wybuchowych gazów, pyłów i par z powietrzem zgodnie z normą IEC [11] oznaczona jest grupą wybuchowości IA, IB, i II.

Tablica 5. Parametry wybuchowości pyłów zbożowego i węglowego

	M_{in} (gm.)	m_{ax} (bar),	$K_{st,max}$ (m bar/s)	LOC (% obj.),
Pył węglowy	$40 < C_{min} < 50$	8,4	120	13
Pył zbożowy	$30 < C_{min} < 40$	8,3	110	9

Aparatura, która spełnia wymagania odpowiednich dyrektyw i zharmonizowanych norm, powinna być zbadana i uzyskać certyfikat w notyfikowanej stacji badawczej. Można ją wówczas oznaczyć **CE** i **Ex** w odpowiedniej formie graficznej, oraz podać symbol grupy I i lub II litery **G** (gaz) i/lub **D** (pył) oraz inne ważne symbole zgodnie z procedurą cechowania obowiązującą w Polsce [11].

4.9. Dokładność pomiaru

Na błędy pomiarowe systemu pomiarowego–monitorowania składają się:

- błędy czujników pomiarowych,

- błędy przetwarzania złożone z błędów koncentratorów, multiplexerów, przetworników magistralowych,
- błędy układu przesyłowego spowodowane błędami przesyłu w magistrali (sygnałowej i adresowej),
- błędy stacji pomiarowe: komputera, zespołów dopasowujących, przetworników,
- programowania i realizacji interfejsów, odwzorowania i przetwarzania pomiarów.

Błąd całkowity składa się z błędów podstawowych wynikających z założonych parametrów i warunków pracy oraz z błędów dodatkowych.

Błędy dodatkowe spowodowane są wpływami dużych zmian temperatury otoczenia, oddziaływaniem przepięć i przetężeń elektrycznych, zakłóceniami impulsowymi atmosferycznymi, oddziaływaniem pól magnetycznych itp. Wartość tych błędów powinna być określona dla podzespołów systemu monitorowania. Projektant powinien mieć tylko świadomość doboru właściwych parametrów na poszczególne elementy.

Na podstawie analizy dokładności podawanej dla całego systemu monitorowania dla elewatorów zbożowych przez producentów można stwierdzić:

wymagana jest dokładność pomiaru temperatury $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ przy równoczesnej powtarzalności pomiarów $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Firmy amerykańskie dopuszczają nawet mniejszą dokładność: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, ale przy tej samej powtarzalności pomiarów wynoszącej $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Z dyskusji z technologami przechowalnictwa wynika, że błędy podstawowe aparatury pomiarowej i błędy dodatkowe (graniczne) [109] powinny być minimalizowane, za to błędy powtarzalności są dla nich ważniejsze i muszą być najniższe. Ziarno zbóż potrafi być bardzo niejednorodne. Wpływa to na rozbieżności wartości pomiarowych i jeżeli ta rozbieżność wartości temperatury początkowej składowanego ziarna nie przekroczy kilku stopni, to wyniki są wiarygodne. Musi być jednak zachowana powtarzalność pomiarowa.

Badania porównawcze wzorców zagranicznych prowadzone były w celu określenia rzeczywistych wartości dokładności i powtarzalności. W tym celu przy zainstalowanym systemie pomiarowym wyciągano sondy z komór elewatora i wkładano do termostatu, w którym utrzymywano temperaturę 40°C przez 12 godzin. Odczytywano wartość temperatury wskazaną przez miernik stacji pomiarowej. Badania powtarzano po rocznej eksplo-

atacji. Następnie uproszczono procedurę sprawdzania sond wyjmując tylko z zawieszonego pancerza sondy sam rdzeń z czujnikami temperatury.

Zadaniem systemu pomiarowo-kontrolnego jest również przetwarzanie danych np. określenie przyrostów temperatury w określonych przedziałach czasowych. Funkcje te określane są jako akwizycja danych. Obliczenia prowadzono na podstawie pomiarów aktualnej temperatury i porównania jej z wcześniej wartościami wcześniej zarchiwizowanymi.

Mogą również powstać błędy przetwarzania, które można określić metodą graficzną lub tabelaryczną stosując metody Lagrange'a, Newtona itp. Ocenę błędów można przeprowadzić oceniając charakter rozkładu, liczebność badań oraz charakter mierzonej wielkości (oceny odchylenia standardowego i określenia wartości prawdziwej).

5. POLA TEMPERATURY W ZIARNIE ZBÓŻ

Pola temperaturowe w ziarnie zbóż powstają w wyniku procesów metabolicznych i mniej znaczących oddziaływań bakterii, grzybów, gryzoni itp. Intensywność procesów metabolicznych zależy od temperatury i wilgotności, w których znajduje się ziarno i jest podmiotem szeregu badań [9, 10, 20, 21, 22], dlatego pomiar tych parametrów jest ważnym zadaniem technologii przechowywania. Opracowanie metody pomiarowej w ziarnie wymaga zbadania i oszacowania stref podwyższonej temperatury oraz umieszczenie w nich czujników i sond pomiarowych.

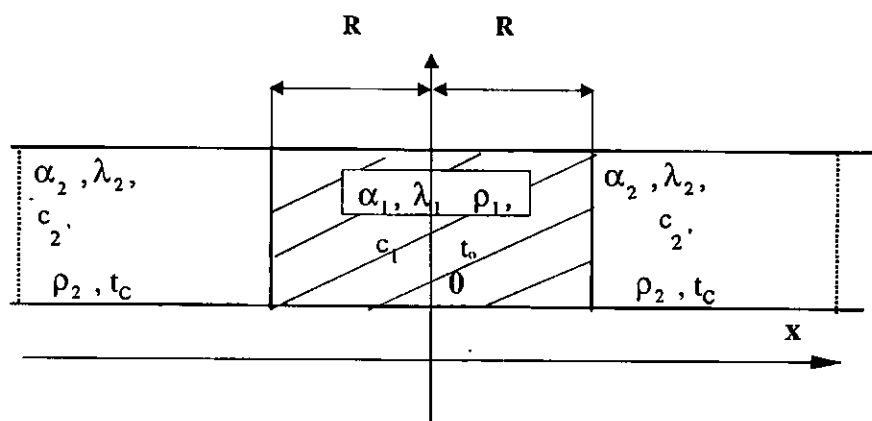
5.1. Proces generacji temperatury w masie ziarna

Ziarno zbóż jest złym przewodnikiem ciepła. Jego przewodność cieplna wynosi 0,54-0,63 kJ/mh i jest porównywalna z przewodnością powietrza lub azbestu. Taka wartość przewodności jest zarówno wadą jak i zaletą [7]. Do zalet można zaliczyć długotrwałe utrzymywanie przez ziarno niskiej temperatury, jeśli było ono wstępnie schłodzone. Wadą jest słabe odprowadzanie przez ziarno ciepła i gdy powstanie w ziarnie źródło samozagrzewania, to osiąga ono w warstwach bezpośrednio przylegających do źródła wysoką temperaturę trudną do wykrycia. Występuje równocześnie duży gradient temperatury w funkcji odległości od źródła.

Przekazywanie ciepła w nieruchomej warstwie odbywa się zarówno przez przewodność na zasadzie dotyku powierzchni ziarna do ziarna, jak i przez konwekcje. Konwekcja polega na przemieszczeniu się ogrzanych cząstek powietrza w przestrzeni międzyziarnowej do wyżej położonych warstw ziarna i przekazaniu mu ciepła przez powietrze. Pole temperaturowe ma charakter pola źródłowego (grawitacyjnego). Można również wymusić kierunek i prędkość przemieszczania pola temperaturowego stosując aktywną wentylację. Powietrze wentylacyjne ochładza również samo źródło ograniczając intensywność jego działania. Najczęściej zboże jest przechowywane w komorach, w których istnieje możliwość oceny intensywności samozagrzewania się masy za pomocą układów pomiarowych. Przerwanie procesu groźnego wzrostu temperatury przeprowadza się przez wydzielenie zanieczyszczeń luźno związanych z ziarnem i przesypywanie ziarna do innej komory elewatora. Dalsze rozważa-

nia będą więc ograniczone do samoistnych pól temperaturowych i poświęcone ich wykrywaniu.

W pracy Sergunowa [81], powstałej w latach siedemdziesiątych, określono analityczną formułę rozprzestrzeniania pola temperaturowego w masie ziarna, wytworzonego w wyniku samoistnego procesu samozagrzewania. Przyjęto założenie, że źródło samozagrzewania może mieć kształt znanych figur geometrycznych: płaszczyzny, walca i kuli lub wzajemnie połączonych konfiguracji.



Rys. 18. Fragment warstwy ziarna w obszarze źródła grzejącego w postaci płaszczyzny $2R$ - jest grubością płaszczyzny, a dla kuli i walca - średnica

Przyjęto również następujące założenia upraszczające:

- * temperatura źródła w chwili początkowej dla $t = 0$ jest jednakowa w całym obszarze,
- * przestrzeń otaczająca jest teoretycznie nieograniczona,
- * wymiana ciepła między źródłem a masą otaczającego ziarna następuje tylko przez przewodzenie,
- * wartość strumienia cieplnego źródła i otaczającej przestrzeni są stałe w czasie, a ciepło właściwe c_1 i c_2 są sobie równe,
- * intensywność generacji ciepła przez źródło q_u i otaczającą przestrzeń q_a , są stałe w czasie,
- * współczynniki przewodności ciepła źródła λ_1 , i otaczającej przestrzeni λ_2 są sobie równe,
- * ziarno podczas załadunku ma stałą temperaturę początkową,

- * przestrzeń otaczająca, podobnie jak samo źródło jest całkowicie wypełniona ziarnem o gęstości ρ_1 i ρ_2 .

Przy tych założeniach równanie przewodnictwa cieplnego dla grzejącej płaszczyzny ma postać:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \right) + q_u \quad (1)$$

dla warstw otaczających grzejącą płaszczyznę:

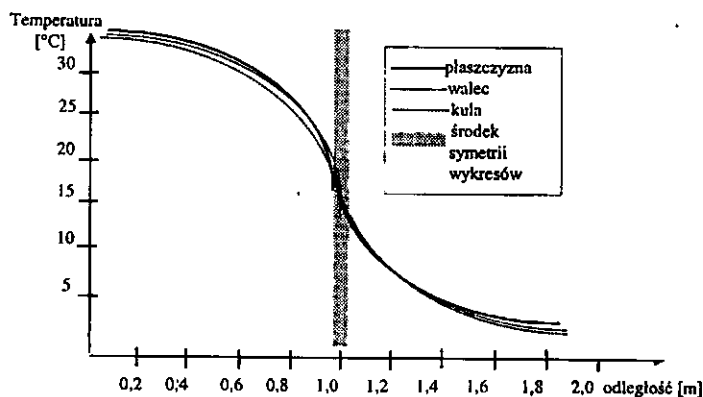
$$\rho_2 c_2 \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \right) + q_o, \quad (2)$$

Podobne rozważania przeprowadzono również dla źródeł w postaci walca i kuli.

Rozwiązując równania dla grzejących figur sporządzono tablicę nomogramów do szybkiego wyznaczania temperatur w funkcji odległości. Na podstawie podanych w pracach Sergunowa [81] wykresów (rys.19), potwierdzonych przez autora w pracach CU-Moskwa, różnice w poszczególnych przebiegach ilustrujących przebieg temperatury w funkcji odległości od źródeł o różnych kształtach nie są wielkie. Są one widoczne przy niewielkich odległościach od centrum grzania i zanikają powyżej 0,6 m.

5.2. Przebieg pól temperaturowych

Pole temperaturowe wyznaczone w warunkach rzeczywistych ma rozkład bardzo złożony. Składa się z całej rodziny krzywych o bardzo dużym nachyleniu przy niewielkiej odległości od źródła, które następnie maleje. Przy odległościach dochodzących do 1,5 m od źródła temperatura otaczającego ziarna zbliża się do 25 °C. W tym czasie źródło osiąga już temperaturę 70 °C. Przebiegi teoretyczne (rys. 19) nie różnią się zasadniczo, chociaż nie uwzględniają oddziaływań warstw dolnych, bocznych, kształtu zbiornika itp.

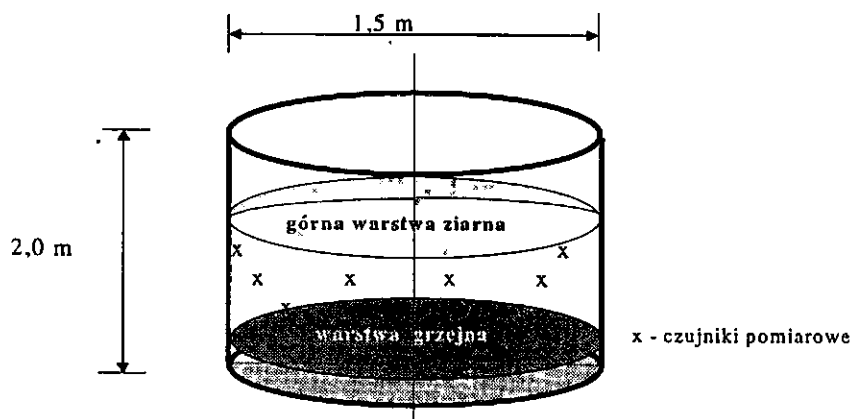


Rys. 19. Teoretyczny rozkład temperatury w ziarnie zbóż, wytwarzanej przez źródła o różnym kształcie [81]

Rzeczywisty rozkład temperatury w masie ziarna wyznaczano na podstawie badań symulacyjnych [50] i badań obiektowych [56, 60].

5.3. Badania symulacyjne

Do celów doświadczalnych został wykonany model komory elevatora w kształcie stalowego walca o wysokości 2 m i średnicy 1,5 m. Gabaryty walca (bina) zostały tak dobrane, aby odwzorowały w odpowiedniej skali wymiar rzeczywistego zbiornika.



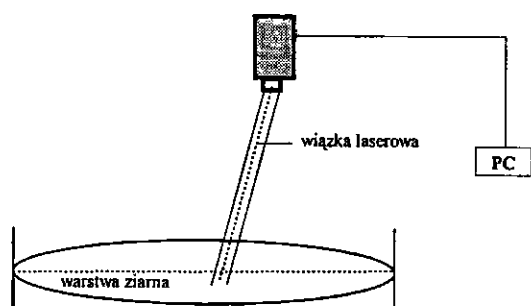
Rys. 20. Model zbiornika z ziarnem oraz rozmieszczenie sond temperatury dla jednej z konfiguracji wyznaczania pola temperaturowego (wg badań autora)

Za pomocą modelu określano obszar największych zmian temperatury w funkcji odległości od źródła ciepła. Źródło umieszczone jest w podstawie walca i przedstawione za pomocą mocno zaciemnionej płaszczyzny (rys. 20). Jest to aluminiowa płytka cienkościenna z napyłoną ceramiczną warstwą grzejną. Źródłem kulistym jest mały elektryczny grzejnik cylindryczny. Do pomiaru temperatury ziarna stosowano przenośne laskowe sondy temperaturowe z miejscowym cyfrowym odczytem, współpracujące z komputerem PC. Sondy umieszczano w różnych warstwach i w różnych konfiguracjach w celu wyznaczenia rzeczywistego pola temperaturowego i porównania go z polem teoretycznym.

Wyznaczanie pól temperaturowych dla poszczególnych warstw zboża przeprowadzano określając przebieg temperatury wzdłuż linii średnicy zbiornika. Wysokość warstwy pomiarowej określono stosunkiem wysokości zbiornika do jego średnicy H/D umożliwiającym uogólnienie wyników. Ten sposób odnoszenia wyników pomiarów do H/D jest stosowany w publikacjach [70, 79, 80]. Podobnie odnoszono przebiegi sił działających na sondy temperatury, podane w dalszej części pracy.

Do określenia pól temperaturowych wykorzystano również metodę bezstykową, opartą na badaniach w paśmie podczerwieni. Metoda ta jest przydatna do pomiarów temperatury na dostępnej, powierzchniowej warstwie ziarna, dlatego badania wykonywano na powierzchni poszczególnych warstw ziarna podczas ich przechowywania. Badania przeprowadzono miernikiem temperatury w paśmie promieniowania podczerwonego, z celownikiem zorientowanym na punkt pomiarowy za pomocą wiązki laserowej. Dokładność pomiarowa tego miernika w zakresie $0-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ wynosiła $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, a czas przeprowadzenia pomiaru ok. 100 ms od momentu ustawienia miernika na punkt pomiarowy. Na komputerze typu PC otrzymywano wartości poszczególnych temperatur w formie tabelarycznej oraz w postaci wykresów temperatur w funkcji czasu i odległości od źródła grzania.

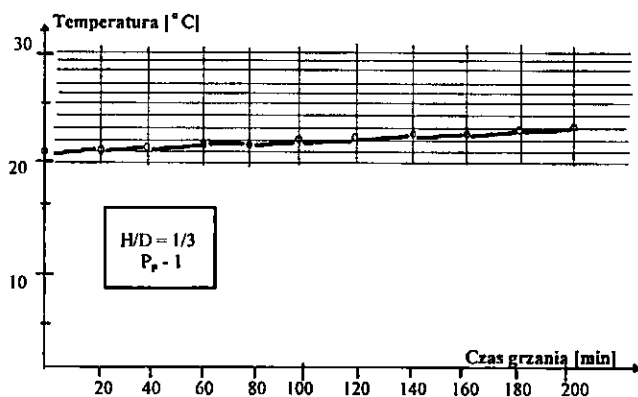
Kilka przebiegów wyznaczono również za pomocą aparatury termowizyjnej z wirującym zwierciadłem, umożliwiającej pomiary ciągłe na powierzchni i w przestrzeni (nie tylko punktowe). Badania te przeprowadzono w laboratoriach skandynawskich podczas stażu autora. Do badań stosowane było ziarno suche oraz nawilżone do 25 %.



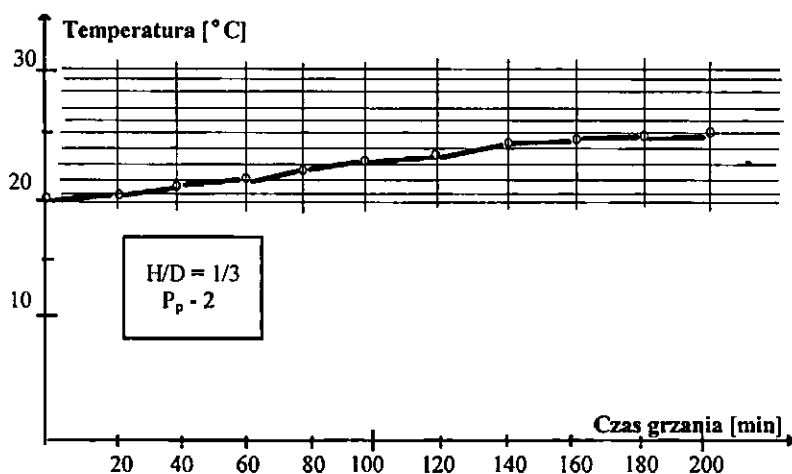
Rys. 21. Skanowanie temperatury na powierzchni warstwy ziarna za pomocą miernika promieniowania podczerwonego z celownikiem laserowym (wg badań autora)

Wyniki pomiarów przedstawione są dla trzech warstw: $H/D = 1/3$, $H/D = 1/2$ i $H/D = 2/3$ i dla czasu grzania do 200 min. Punkty pomiarowe P – położone są na promieniu warstwy w następujących odległościach od środka zbiornika: 1 – przy ścianie zbiornika, 2 – w odległości $1/4$ średnicy zbiornika od jego środka, 3 – w odległości $1/8$ średnicy od środka zbiornika, 4 – w środku warstwy zbiornika

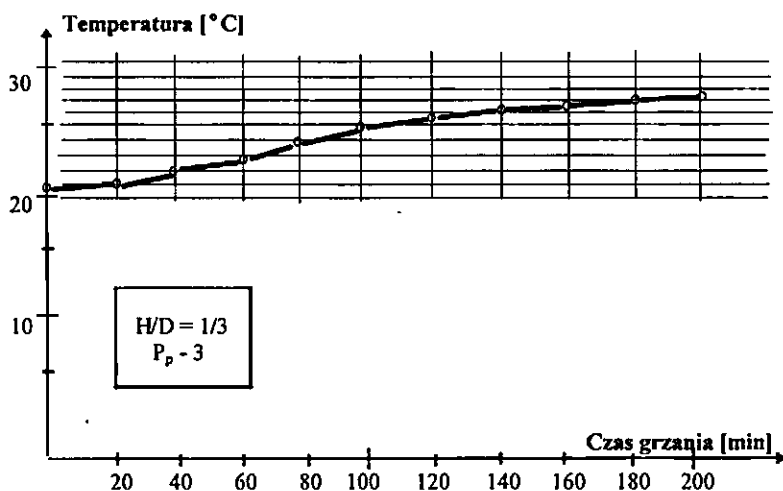
Dla niskiej warstwy ($H/D = 1/3$) badania prowadzono dla 4 punktów pomiarowych P, dla pozostałych w punktach 3 i 4, ponieważ zmiany temperatury dla P – 1 i 2 były małe i spowodowane tylko chłodzącym działaniem ściany zbiornika. Ważniejsze przebiegi przedstawione są na rys. 22–29. Na podstawie tych badań wykonano wykres rozkładu temperatur dla trzech badanych warstw po 200 min grzania (rys. 30).



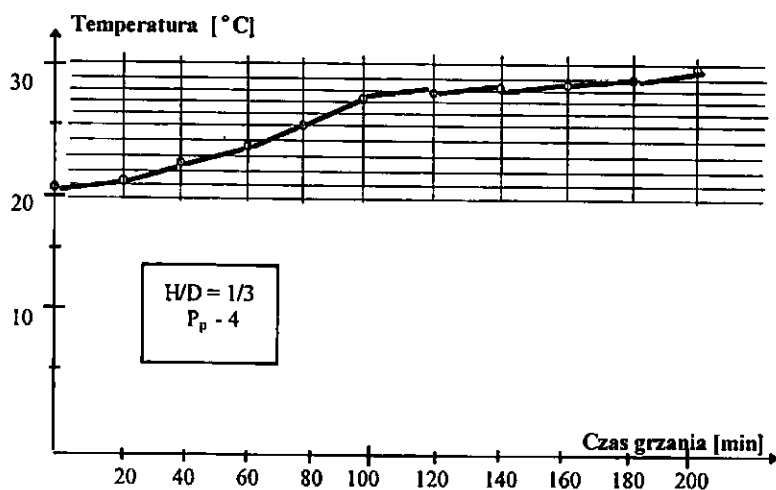
Rys. 22. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{gr} = 60^\circ\text{C}$ (wg badań autora)



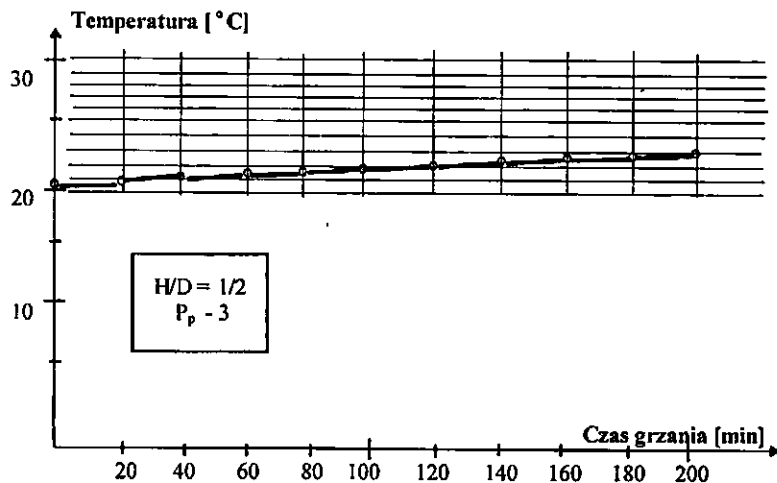
Rys. 23. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{\text{zr}} = 60^{\circ}\text{C}$ (wg badań autora)



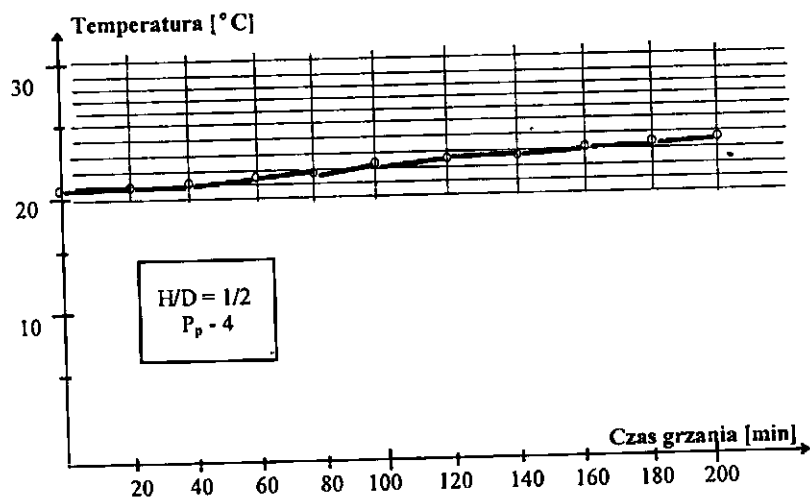
Rys. 24. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{\text{zr}} = 60^{\circ}\text{C}$ (wg badań autora)



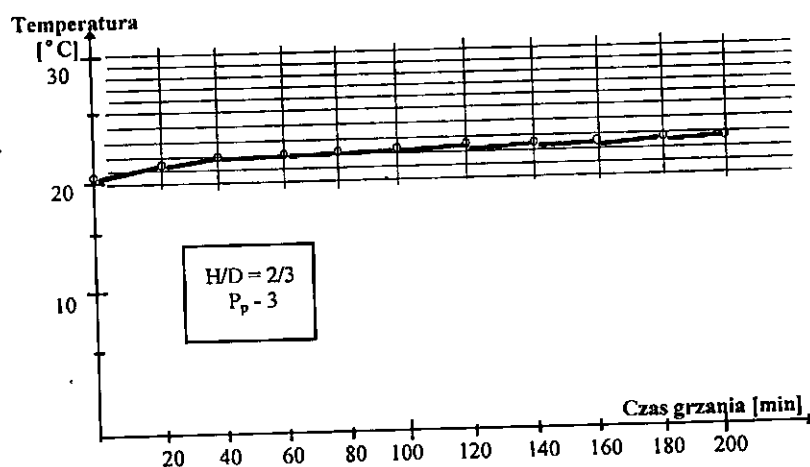
Rys. 25. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{zr} = 60^\circ\text{C}$ (wg badań autora)



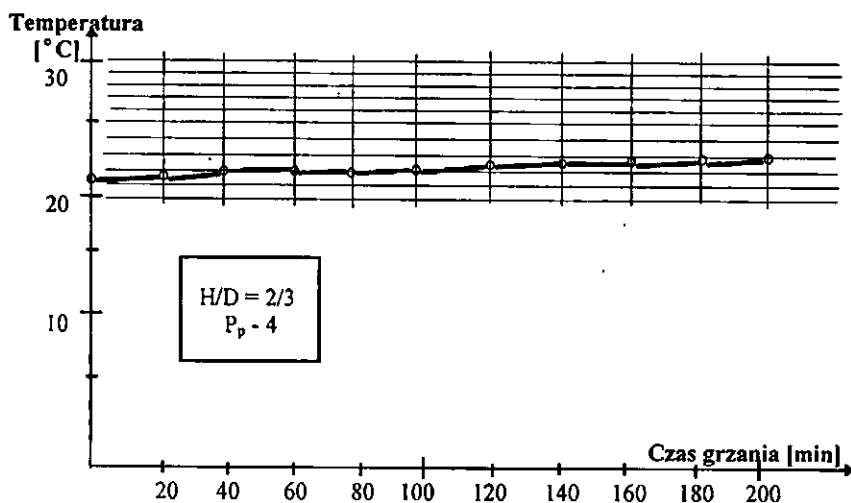
Rys. 26. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{zr} = 60^\circ\text{C}$ (wg badań autora)



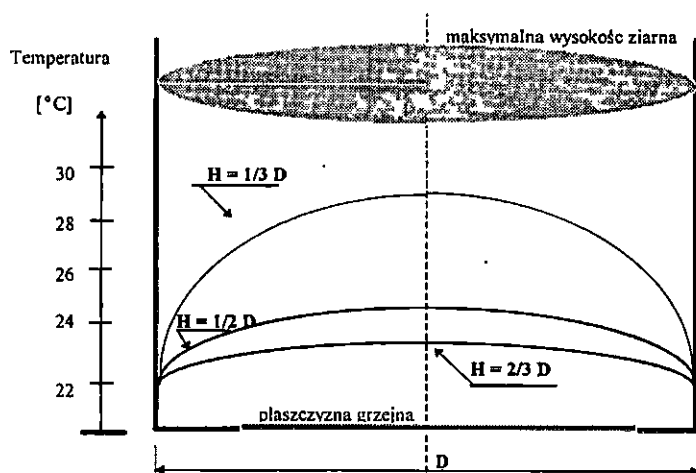
Rys. 27. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{zt} = 60^\circ\text{C}$ (wg badań autora)



Rys. 28. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{zt} = 60^\circ\text{C}$ (wg badań autora)



Rys. 29. Wzrost temperatury w funkcji czasu dla $T_{gr} = 60^\circ\text{C}$ (wg badań autora)



Rys. 30. Wzrost temperatury w zbiorniku z ziarnem, dla 3 poziomów zasytu, wywołany przez płaszczyznę grzejną o $T_{gr} = 60^\circ\text{C}$, po 200 min. grzania (wg badań autora)

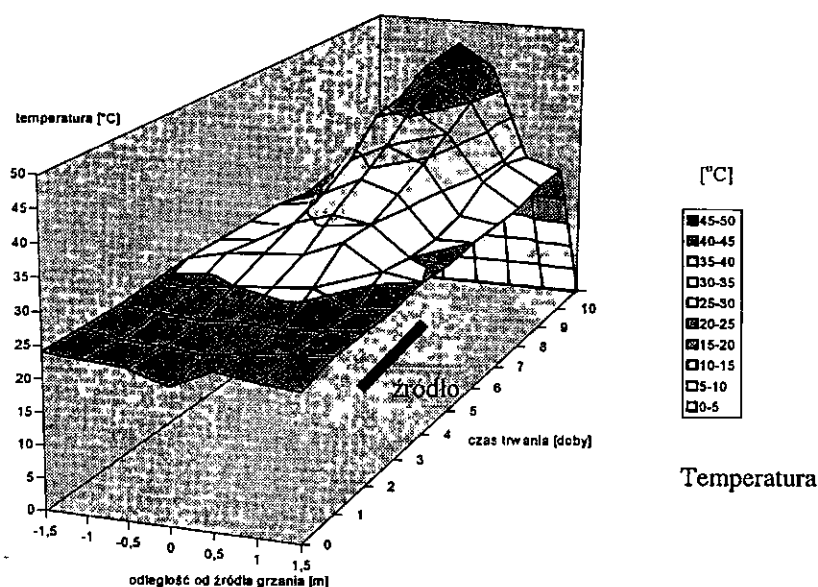
Podsumowanie

Pomiary bezstykowe, w paśmie podczerwieni, warstwy ziarna wewnątrz stalowego zbiornika wykazały, że:

- * najwyższa temperatura wywołana źródłem grzania przez 16 godzin występuje w warstwach przylegających do źródła do wysokości $H=1/2D$, następnie mocno maleje, na wysokości $2/3D$ oddziaływanie temperaturowe źródła można praktycznie pominąć,
- * wpływ chłodzącego działania ścian zbiornika na ogrzaną warstwę ziarna jest duży, tak że przy ścianie i w odległości do $1/4 D$ średnicy, liczonej od ściany można go traktować jako dominujący. W tej przestrzeni, wzdłuż wszystkich warstw nie powinny być umieszczane czujniki temperatury (sondy elastyczne), ponieważ ich wskazania nie będą odwzorowywały temperatury badanej, lecz temperaturę uśrednioną z temperaturą ściany zbiornika.

5.4. Badania obiektowe

Obiektem pilotowym, na którym prowadzono badania rzeczywistych pól temperaturowych była komora elewatora. Umieszczono w niej dużą liczbę czujników temperatury. Zboże było specjalnie zawilgocone, aby procesy grzejne, w krótkim czasie były odczuwalne i zmiana temperatury możliwa do rejestracji. Na podstawie wyników pomiarów opracowano wykres przestrzenny (rys. 31). Źródło samozagrzewania znajduje się w podstawie i ma kształt prostokąta. Z wykresu wyraźnie wynika, jaki jest kształt pola temperaturowego wewnątrz masy ziarna. Maksymalna wartość temperatury występuje w funkcji trwania okresu składowania ziarna. Będzie ona również zależała od odległości od źródła. Na wykresie intensywność koloru czarnego wskazuje na wysokość temperatury ziarna i jest najwyższa w przedziale temperatury 45- 50 °C.

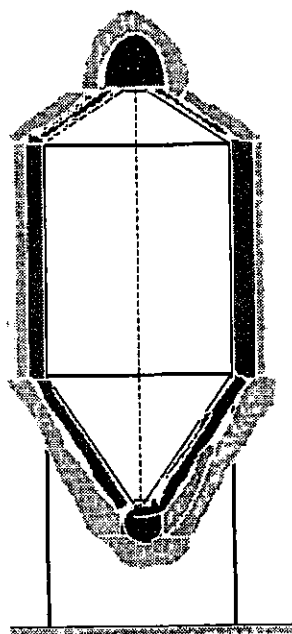


Rys. 31. Rozwój pola temperaturowego w funkcjach czasu i odległości od źródła (wg badań autora)

5.5. Obiektowe badania termowizyjne

Badania termowizyjne obiektów magazynowych prowadzone są również w skandynawskich ośrodkach badawczych. Na uniwersytecie w Uppsali otrzymano obrazy termowizyjne elewatorów zbożowych i baterii silosów. Mają one na celu nie tylko lokalizację źródeł grzania, lecz także wykrycie w magazynie obszarów o dużych stratach ciepła. W magazynach płaskich badano również obszary przemarzania ścian zewnętrznych i wewnętrznych w celu poprawy ich konstrukcji i technologii budowlanej. Ma to szczególne znaczenie w warunkach surowego klimatu skandynawskiego.

Z punktu widzenia wykrywalności źródeł ciepła w masie ziarna metoda termowizyjna jest mało przydatna, ponieważ wskazuje jedynie temperaturę na całej powierzchni zewnętrznej silosu. Na podstawie dyskusji z krajowymi technologami przechowywania można jednak tę metodę uznać za wystarczającą do ochrony baterii silosów o pojemności 150-300 t. W większych obiektach należy jednak penetrować przestrzeń wewnętrzną zbiornika za pomocą dokładniejszych metod pomiaru temperatury z sondami elastycznymi lub sondami z nadajnikami radiowymi i ze zdalnym odczytem.



Rys. 32. Obraz termowizyjny silosu stalowego w grafice jednobarwnej, trzymany we współpracy ze specjalistami z Instytutu Budownictwa „LI” Gävle (Szwecja)[50] (wg badań autora)

6. SONDY TEMPERATURY

Sondy są najtrudniejszym elementem konstrukcyjnym układu pomiarowego temperatury i systemów monitorowania w elewatorach zbożowych. W stosunku do typowych sond przemysłowych różnią się od nich długością i obudową.

Sondy do elewatorów mają długość od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, zależną od wysokości komory w której zostaną zawieszone. Sondę można porównać do wahadła z unieruchomionym punktem, którym jest jej głowica.

Obudowa sond jest elastyczna, umożliwiającą niewielkie jej odchylenia od osi pionowej wyznaczonej położeniem grawitacyjnym. Kształtem podobne są do kabli energetycznych i stąd stosuje się często do nich nazwę angielską *temperature cables*. Do wnętrza obudowy sondy wsuwany jest wieloprzewodowy rdzeń z miniaturowymi czujnikami temperatury. Rdzeń można wymienić i czujniki kontrolować nawet po zawieszeniu sondy w komorze elewatora. Zasada ta jest ściśle utrzymywana w sondach elastycznych przeznaczonych do komór elewatorów. Sondy do silosów, o mniejszej wytrzymałości mechanicznej, są naogół nierozbieralne – bez oddzielnego wsuwanego rdzenia.

Pierwsze krajowe sondy elastyczne do elewatorów powstały pod koniec lat siedemdziesiątych [30, 53] i od tego czasu opracowano już trzy następne typy tych sond. Różnica między poszczególnymi typami polega na znacznym zwiększaniu ich wytrzymałości mechanicznej przy zachowaniu tych samych wymiarów gabarytowych. Założono, że średnica zewnętrzna sondy nie powinna być większa od 17 mm. Początkowo miały one wytrzymałość mechaniczną na zerwanie rzędu 30 kN, a ostatnie trzykrotnie większą.

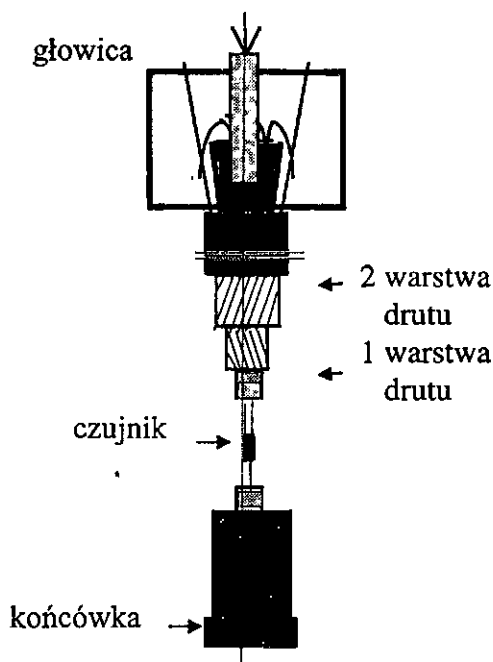
Konieczność zwiększenia wytrzymałości mechanicznej wynikała z awaryjności sond o wytrzymałości 30 kN. Jest to spowodowane m.in. coraz częstszymi przypadkami składowania zboża pokombajnowego o dużej wilgotności zwiększającej obciążenie działające na sondy. Podobny, niepożądany wpływ mają też nowe konstrukcje komór elewatorowych szczególnie z bocznym zasypem.

Sondy o długości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów mają zamontowane miniaturowe czujniki temperatury, rozmieszczone wzdłuż ich długości. Odległość między czujnikami zależy od kształtu i pojemności komory i dobiera się ją indywidualnie do konkretnego obiektu.

6.1. Konstrukcja sond temperatury

W stosunku do sond sztywnych: rurowych, laskowych itp. sondy elastyczne mają zdolność do zmiany swojego położenia pod wpływem intensywnego ruchu ziarna. Bez tej właściwości musiałyby ulec uszkodzeniu. Zwykle sondy są jednym końcem sztywno zamocowane w swojej głowicy, a drugi koniec sondy jest zupełnie wolny lub uchwycony do boków zbiornika za pomocą elastycznych linek. Elastyczność sondy i sposób jej zawieszenia oraz montażu w zbiorniku powodują, że sondy mogą wytrzymywać bardzo duże obciążenia statyczne i dynamiczne. Obciążenia dynamiczne występują w przypadkach spowodowanych zablokowaniem zsypu ziarna w różnych przestrzeniach zbiornika lub tąpnięciom ziarna podczas opróżniania zbiornika. Próby zastosowania innych rodzajów sond (sztywnych) w elewatorach i silosach kończyły się szybkim ich uszkodzeniem. W pierwszych wykonaniach sond czujniki temperatury były zalane powłoką wzmocnioną opłotem z drutów stalowych lub płaszczem z włókien szklanych [36]. Taką technologię stosuje się jeszcze w sondach instalowanych w małych obiektach. Później opracowano technologię sondy dwuskładnikowej, rozbieralnej, z wsuwany rdzeniem z czujnikami. Pancierz sondy zawieszony zostaje w komorze elewatora a następnie wsuwa się do niego rdzeń z czujnikami. Wymiana nieprawidłowo działającego czujnika nie przedstawiająca dużej trudności, podobnie jak kalibracja sondy, ponieważ odbywa się bez demontażu całej sondy. Na tej zasadzie wykonuje się obecnie 90 % sond produkcji światowej przeznaczonych do dużych magazynów zbożowych. W latach 70. montowano w kilku krajowych elewatorach systemy pomiarowe z sondami elastycznymi firmy duńskiej Foss El. typu *Heavy Duty Temperature cables HD* o wytrzymałości 30 kN i średnicy $\phi=16$ mm.

Pierwsza krajowa sonda typu **HD**, powstała pod koniec lat siedemdziesiątych. Została ona opracowana i opatentowana pod kierunkiem autora [115]. Od tego czasu powstały kolejne typy sond **HD** o coraz wyższej wytrzymałości mechanicznej i przy zachowaniu tej samej średnicy 16 mm. Zasada budowy sond **HD** przedstawiona jest na rys. 33 na przykładzie sondy opracowanej przez zespół pod kierunkiem autora w PIAP w 1996 r.



Rys. 33. Elastyczna sonda temperatury typu HD (wg koncepcji autora)'

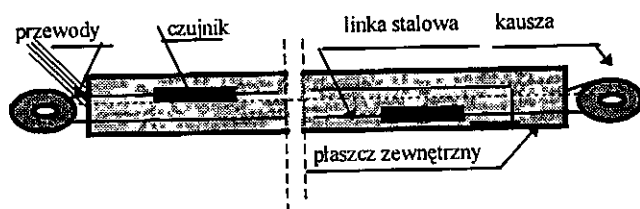
Pancerz sondy wykonany jest z rury polietylenowej średnicy wewnętrznej 8,5 mm, na którą nawinięto przeciwsobnie 2 oploty z drutów stalowych o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej. Zewnętrzną powierzchnię pancerza stanowi płaszcz z polietylenu z odpowiednim wypełniaczem odprowadzającym ładunki elektrostatyczne. Materiał ten jest nietoksycznego w stosunku do środków żywności, jakim jest ziarno zbóż. Pancerz ma średnicę zewnętrzną 16 mm z dopuszczalną tolerancją ± 1 mm. W górnej części znajduje się głowica z tuleją samo zaciskającą, w dolnej części pancerza umieszczona jest końcówka rozpierająca, do której można zamocować linki bocznego uchwytu. Rdzeniem jest wsuwany kabel telefoniczny z zamontowanymi w nim czujnikami temperaturowymi ze stalowym drutem usztywniającym. Ze względu na opory wsuwania kabel telefoniczny jest wzmocniony stalowym drutem usztywniającym, a zewnętrzną warstwą jest tylko powłoka estrofalowa z bardzo małym współczynnikiem tarcia. Sonda w zależności od przeznaczenia ma długość do 60 m, a czujniki temperatury zamontowane są na całej jej długości. W puszcze zaciskowej sondy, umieszczonej w stropie, oprócz głowicy znajduje się listwa zaciskowa, do której podłączony jest kabel telefoniczny rdzenia i kabel zewnętrzny łączący sondę z szafą pomiarową i z kon-

centratorami systemu monitorowania. Sonda wytrzymuje siłę zrywającą równą 90 kN.

Pierwsze krajowe sondy **HD** miały tylko jedną warstwę drutu i inaczej skonstruowaną rurkę w którą wsuwany był rdzeń z czujnikami. Wytrzymałość sondy wynosiła 30 kN i była wówczas porównywalna do wzorców zagranicznych. Stanowiła duże osiągnięcie konstrukcyjne, ponieważ dzięki zakupie z renomowanych firm odpowiednich maszyn kablowych i inwencji własnej można było takie sondy wykonać.

Sondy **HD** są przeznaczone zasadniczo do elewatorów zbożowych. Mogą być jednak wykorzystywane w mniejszych obiektach, w silosach o ciężkich warunkach pracy np. w silosach z granulatami.

Do silosów z ziarnem zbóż przeznaczone są sondy **MD Medium Duty Temperature Cable** o wytrzymałości 10 kN i średnicy $\phi=10$ mm. Sonda **MD** jest nierozbieralna. Czujniki zostały wmontowane w przewody nawinięte wzdłuż linki nośnej i zalane warstwą polietylenową lub wykonane z włókna szklanego rys. 34. Linka zakończona jest po obu stronach kauszami (żeglarskimi). Na górnej zawiesza się sondę, a na dolnej ją kotwicz, tzn. za pomocą dodatkowej linki przytwierdza do dolnej lub bocznej powierzchni zbiornika, uniemożliwiając w ten sposób obrót lub przesunięcie.



Rys. 34. Sonda do silosów typu **MD** (wg koncepcji autora)

W sondach typu **MD** czujników jest kilka (2-3). Zawiesza się je w górnej części silosa pod lejem zasypowym. Przez przepusty w płaszczu silosa wyprowadza się okablowanie sondy do połączeń zewnętrznych. Montaż sondy nie jest łatwy i prowadzi się go w pustym silosie. Od prawidłowego montażu w znacznym stopniu zależy żywotność sondy.

6.2. Czujniki temperatury

W sondach stosowane są miniaturowe czujniki temperatury. Zmiana temperatury powoduje zmianę jednego z parametrów elektrycznych czujnika parametrycznego: napięcia, prądu lub rezystancji. Zależności te powinny być liniowe w funkcji temperatury. Wyjątek stanowią czujniki termistorowe typu NTC, w których rezystancja maleje nieliniowo w funkcji temperatury [30, 36, 62, 68]. Utrudnieniem w zastosowaniu tych czujników w systemach wieloczujnikowych jest rozrzut charakterystyk poszczególnych czujników, wymagający indywidualnego wzorcowania. Wprawdzie od niektórych producentów można otrzymać termistory po dokładnej selekcji charakterystyk, ale koszt ich jest bardzo wysoki. Niewątpliwą zaletą tych czujników jest ich miniaturyzacja i duże zmiany rezystancji w funkcji temperatury. Wcześniejsze układy termistorowe wchodziły w skład układów mostkowych z bezpośrednim zasilaniem. Nie stosowano układów wzmacniających, które były zawodne i wprowadzały dodatkowe błędy linearyzacyjne. Po wprowadzeniu wzmacniaczy scalonych o wysokich parametrach metrologicznych układy termistorowe stosowane są w prostych systemach pomiarowych z niewielką liczbą czujników, ze względu na konieczność indywidualnej kalibracji czujników. Dotychczas, w blisko 80 % ogólnej liczby wieloczujnikowych sond pomiarowych wyprodukowanych w Europie zainstalowane są czujniki termistorowe.

Na kontynencie amerykańskim sytuacja jest inna. Sondy amerykańskie mają fabrycznie zamontowane czujniki termoelektryczne.

Podsumowanie

Obecna sytuacja ulega zmianie z kilku powodów:

- * Została opanowana technologia napyłania warstw metalowych na ceramike, dzięki czemu uruchomiono produkcję miniaturowych czujników metalowych z platyny, miedzi i niklu. Opracowano również nowe układy przetwornikowe LSI współpracujące z czujnikami metalowymi, które zamieniają sygnały rezystancyjne na sygnały standardowe prądowe. Zasilanie „aktywne” tych przetworników umożliwia stosowanie sieci dwuprzewodowej z kompensacją rezystancji przewodów łączących czujnik z przetwornikiem,

- * Czujniki półprzewodnikowe, które pojawiły się w ostatnich 10 latach począwszy od prostych struktur krzemowych do LSI, okazały się bardzo dobre szczególnie w temperaturach -55°C do 150°C . Według przewidywań [5] zastąpią one wkrótce czujniki metalowe i termistorowe. Na ich bazie pojawiły się już czujniki inteligentne (smart sensors), które przejmują również szereg dotychczasowych funkcji przetworników i innych układów mikroprocesorowych współpracujących z czujnikami.
- * W sondach elastycznych i laskowych, opracowanych w PIAP w ciągu 3 lat, zastosowano już czujniki półprzewodnikowe typu LM i AD wyprodukowane przez firmy amerykańskie, oraz KTY i TC – przez firmy europejskie.

Najważniejsze parametry czujników półprzewodnikowych podane są w tabl. 6. Ponieważ są to czujniki, które będą powszechnie stosowane w miernictwie temperaturowym, podano i ważniejsze parametry dla typów LM i AD:

Sygnał wyjściowy:

dla AD $1\ \mu\text{A}/\text{K}$

dla LM $10\ \text{mV}/\text{K}$

Zakres pracy: -55°C – 150°C

Nieliniowość: $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$

Napięcie zasilania: $+4\ \text{V}$ – $+30\ \text{V}$

Powtarzalność: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Charakterystyki czujników (rezystorów) termometrycznych: Pt 100, Ni 100, Cu 100 przedstawione są w odpowiednich normach przedmiotowych [99] i publikacjach [45, 86].

- * Pojemność cieplna czujników półprzewodnikowych jest mała ze względu na ich rozmiary. Inercję czujników, zależną od pojemności cieplnej i intensywności wymiany ciepła z otoczeniem, dla czujników wbudowanych w sondy elastyczne praktycznie można pominąć. W pewnych jednak warunkach, przy intensywnym wzroście temperatury w niekontrolowanym procesie samozagrzewania, inercja cieplna czujnika będzie powodowała opóźnienie w działaniu części regulacyjnej współpracującej z systemem monitorowania. Dlatego wskazane jest przy doborze czujników do obiektów przewidzianych do regulacji, aby ich bezwładność cieplna (inercja) była niska.

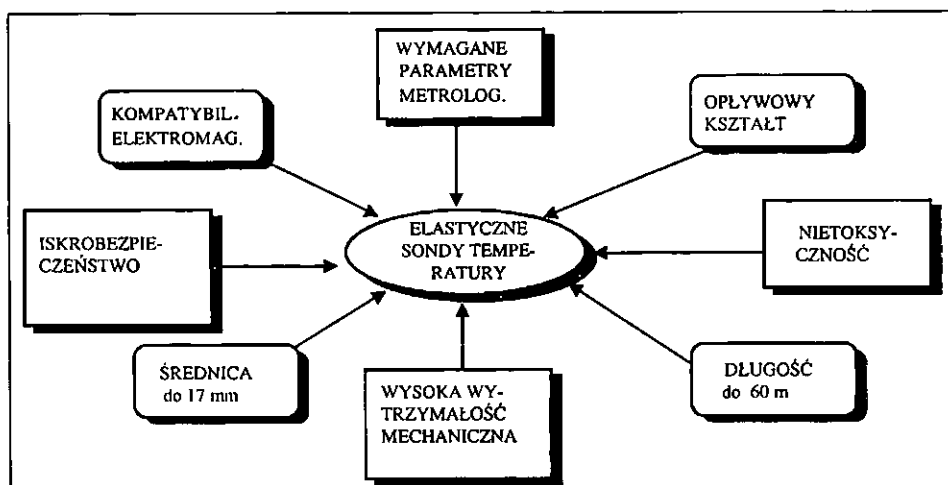
Tablica 6. Półprzewodnikowe czujniki temperatury

Lp.	Typ	Budowa	Firma (kraj)	Zakres pomiarowy [°C]	Sygnał wyjściowy	Współczynnik temperaturowy	Liniowość [°C]	Stała czasowa [s]
1.	LM 135 LM 235 LM 335	IC	National Semicond. (USA)	-55 + 150	400 μ A, +5 mA zalecany - 1 mA	10 mV/K 1 μ A/K	0,3 + 0,5	80 s na wolnym powietrzu 1 s w oleju
2.	AD 580 AD 590	IC	Analog Dev. (USA)	-40 + 150	298,2 μ A dla 25 °C	11 μ A/K	+0,3	0,6 s z płytą alumiową 1,4 s w oleju 60 s w powietrzu
3.	B 511N	IC	RFT (Niemcy)	-55 + 150	298,2 μ A dla 25 °C	0,8 + 1,2 μ A/°C	+0,1	brak danych
4.	MTS 102 MTS 103 MTS 105	T	Motorola (USA)	-40 + 150	0,01 + 10 mA 580 + 620 mV $I_c = 0,1 \mu$ A 25 °C	od 2,26 od 2,28 mV/°C	+0,1 w tempe- raturze -20 do 140	3 s w cieczy 8 s w powietrzu
5.	KTY 11 KTY 81 KTY 84	D	Valvo (Niemcy)	-50 + 150 -50 + 150 -60 + 300	2000 Ω dla 1 mA 1000 Ω dla 1 mA 600 Ω dla 1 mA	0,79 %/K 0,79 %/K 0,61 %/K	+1,0	3 s w cieczy
6.	TC 1	D	Instytut Tech- nologii Elektr. (Polska)	-55 + 150 -55 + 150	2450 mV przy -55 °C 1200 mV przy 150 °C 58 Ω przy -55 °C 1850 Ω przy -50 °C	5,95 mV/°C 0,62 %/°C	+1,5	30 s w powietrzu 3,5 s w cieczy

Oznaczenia: IC – obwód scalony, T – tranzystor, D – dioda

6.3. Ważniejsze wymagania na sondy

W konstrukcji sond pomiarowych należy uwzględnić szereg wymagań przedstawionych na rys. 35. Szczególnie istotne są wymagania iskrobezpieczeństwa, ponieważ atmosfera otaczająca sondy charakteryzuje wysokie zapylenie panujące w silosach i komorach elewatora. Układ sterowania czujników sond jest małej mocy rzędu kilku mW, a prąd zwarcia nie przekracza 10 mA [54]. Nie ma więc zagrożenia powstania iskry. Takie zagrożenie może jednak powstać podczas rozładowania pola elektrostatycznego, które może wystąpić na pancerzu zewnętrznym sondy.



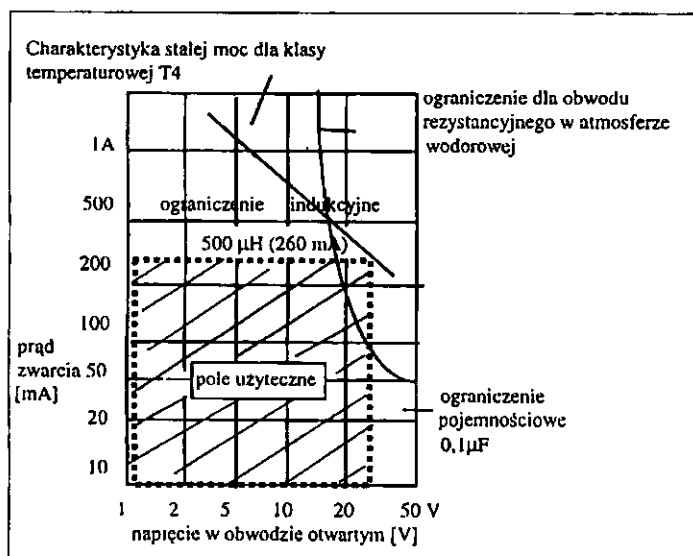
Rys. 35. Wymagania stawiane sondom temperatury (wg koncepcji autora)

Podczas załadunku i rozładunku komór oraz w stanach awaryjnych (po odblokowaniu zaczopowań zsypu ziarna) występuje intensywny ruch ziarna, który generuje ładunek elektrostatyczny [50]. Ładunek ten musi być odprowadzany, tak aby nie powstało wyładowanie iskrowe. Spełnienie wymagań iskrobezpieczeństwa sond powinno być potwierdzone atestem iskrobezpieczeństwa wydanym przez notyfikowaną stację badawczą. Odpowiedni certyfikat wydaje się nie tylko dla sondy, ale dla współpracującego z nią przetwornika, multipleksera (rys.14) itp. Dlatego występując o atest dla sondy należy podać istniejące już atesty na aparaturę współpracującą. Sondy iskrobezpieczne powinny spełniać kryteria wymagane od tego rodzaju aparatury. Dlatego przedstawione zostaną ważniejsze parametry iskrobezpieczeństwa..

Parametrami iskrobezpieczeństwa odniesionymi do obwodów elektrycznych jest *minimalny prąd zapalający* I_{zm} oraz *minimalne napięcie zapalające* U_{zm} , które charakteryzują wartości poniżej których iskrzenie lub nagrzewanie nie spowoduje zapalenia mieszaniny wybuchowej w dowolnych stanach pracy. Obwody iskrobezpieczne dzieli się na trzy kategorie: i_a , i_b oraz i_c [11]. Przynależność do odpowiedniej kategorii jest uzależniona od liczby uszkodzeń w awaryjnych stanach pracy.

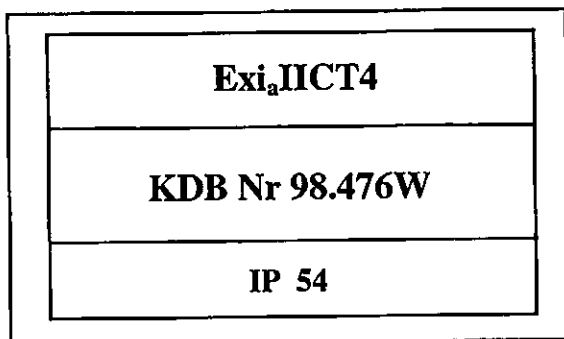
Maksymalna temperatura powierzchni wszystkich kategorii iskrobezpiecznych badanej aparatury w stanach pracy normalnej i awaryjnej dla elementów konstrukcyjnych obwodów iskrobezpiecznych umieszczonych w przestrzeni zagrożonej wybuchem nie może przekroczyć wartości podanej w normach i podanych w publikacji MTL [117] i zaliczanej do odpowiedniej klasy temperaturowej. Dla większości zastosowań systemów monitorowania (sond) do magazynów zbożowych jest to *klasa T4*, dla której temperatura zapalenia w ($^{\circ}\text{C}$) jest większa od 135 do 200, a maksymalna temperatura powierzchni elementów i podzespołów aparatury wynosi 135°C .

Przyjmuje się jako obwód iskrobezpieczny, obwód elektryczny o parametrach do 30V i 50 mA. Traci tą właściwość obwód, w którym napięcie ma wartość powyżej 50V i prąd powyżej 250 mA lub moc jest większa od 30W z ograniczeniami zależnymi od charakteru obwodu – pojemnościowego lub indukcyjnego jak to przedstawiono na rys.36 [60].



Rys. 36. Ograniczenie prądu i napięcia dla obwodu iskrobezpiecznego [117]

Sondę opracowaną w PIAP wykonano w technice iskrobezpiecznej. Może współpracować w obwodzie przedstawionym na rys. 14. Zarówno głowica jak i końcówka sondy mają stopień szczelności obudowy IP 54. Obwód zewnętrzny sondy wraz z nadajnikiem i separatorem muszą mieć niezależne atesty KDB. Dopiero na tej podstawie przystąpiono w KDB do badań atestacyjnych iskrobezpieczeństwa sondy. Badania trwały kilka miesięcy, sonda uzyskała atest w KDB i może być oznaczana:



Sondy pracują w otoczeniu produktów spożywczych jakim jest ziarno zbóż i dlatego przynajmniej płaszcz zewnętrzny nie powinien wchodzić w reakcję chemiczną, w wyniku której powstają produkty szkodliwe, toksyczne dla konsumentów ziarna.

Kompatybilność elektromagnetyczna KEM sondy pomiarowej jest rozpatrywana łącznie z jej bezpośrednim sterowaniem. Sondy pracują w otoczeniu dużych urządzeń energetycznych, zwłaszcza urządzeń transportowych, których pola elektromagnetyczne mogą na nie oddziaływać. Muszą więc być odporne na tego typu zakłócenia, podobnie jak ich zasilanie i sterowanie oraz nie mogą przenosić zakłócenia na system monitoringu. KEM sondy i systemu monitoringu powinna być sprawdzona przez jednostkę certyfikującą lub notyfikowaną [106–108]. Dla obszaru automatyki taką jednostką jest PIAP. Ważniejsze badania KEM przeprowadzone w ramach oceny na znak bezpieczeństwa „B” w PIAP przedstawione są w tabl. 7.

Tablica 7. Ważniejsze badania KEM

Lp.	Nazwa badania
1.	Sprawdzenie odporności na wyładowanie elektrostatyczne ESP
2.	Sprawdzenie odporności na zakłócenia polami elektromagnetycznymi wypromieniowanymi
3.	Sprawdzenie odporności na serie szybkich elektrycznych zakłóceń impulsowych
4.	Sprawdzenie poziomu emisji zakłóceń radioelektronicznych promieniowanych
5.	Sprawdzenie poziomu emisji zakłóceń radiowych prowadzonych w obwodzie zasilania i interfejsowym
6.	Sprawdzenie odporności na obniżenie napięcia zasilania
7.	Sprawdzenie odporności na zawartość trzeciej harmonicznej
8.	Sprawdzenie odporności na serię zmian napięcia zasilania
9.	Sprawdzenie odporności na zakłócenia impulsowe dużej energii (przebiegi w zasilaniu)
10.	Sprawdzenie odporności przy niewłaściwym dołączaniu zasilania

6.4. Rozmieszczenie czujników i sond temperatury

Na przyczyny samozagrzewania ziarna zbóż mamy niewielki wpływ, natomiast od nas zależy dokładność jego lokalizacji i szybkość przeciwdziałania, a w związku z tym wielkość poniesionych strat przechowalniczych. Z badań Sergunowa [81] i z przedstawionych w nich wykresów wynika, że wyraźny wzrost temperatury występuje w odległości $R = 1,5$ m w każdym kierunku od źródła samozagrzewania. Obszar podwyższonej temperatury występuje także w większej odległości sięgającej nawet do 3 m. Zakładając, że w przestrzeni zbiornika, wypełnionej ziarnem, powstaną źródła samozagrzewania, to będzie można je wykryć, jeśli czujnik temperatury będzie umieszczony wewnątrz lub na powierzchni kuli o średnicy równej $2R$ (czyli 6 m) zgodnie z rys. 37. Na tym

założeniu oparto metody projektowania rozmieszczenia punktów pomiarowych [50], oraz międzynarodowe przepisy dotyczące procedury pomiarowej [94].

Pierwsza metoda projektowania punktów pomiarowych polegała na podziale całej powierzchni użytkowej zbiornika komory na prostopadłością o podstawie 6 m x 6 m, lub na kule średnicy 6 m. Powstaje siatka prostopadłościów, szczególnie przydatna w przypadku zbiorników o podstawie prostokąta, oraz siatka złożona z kul, przydatna do zbiorników o kształcie walca. W środku każdej z figur siatki umieszczono czujnik pomiarowy (rys. 37). Metoda ta nie była zbyt dokładna, ponieważ zakładała wykrywalność źródła podwyższonej temperatury w odległości 3 m, a obszar najlepszej wykrywalności jest w odległości o połowę krótszej. Kierunek poprawy wykrywalności stref niebezpiecznych, o podwyższonej temperaturze, teoretycznie mógł polegać na zmniejszeniu wymiarów figur geometrycznych siatki o połowę. Przeszkodą była przyjęta wówczas technologia wytwarzania sond pomiarowych i trudności w umieszczeniu w nich dużej liczby czujników pomiarowych. Założono, że średnica sond elastycznych nie będzie większa od 16-17 mm, przy długości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów. Można więc było w sondach zabudować nie więcej niż kilkanaście miniaturowych czujników. Strop, do którego zamocowane są sondy, ma ściśle określoną wytrzymałość, dostosowaną do przewidywanych obciążeń tych sond, dlatego zmiany rodzaju sond wymagają dużych zmian w konstrukcji budowlanej magazynów. W Rosji i Mołdawii zastosowano w magazynach sondy o średnicy 25 mm i w konsekwencji stropy musiały być blisko trzykrotnie wytrzymalsze.

Norma międzynarodowa [94] w swoim drugim wydaniu przewiduje jednak, że punkty pomiarowe powinny być umieszczane w odległości nie większej niż 3 m od siebie w każdym kierunku, czyli ogólna liczba czujników wzrasta dwukrotnie w stosunku do zaleceń normy pierwszego wydania, a siatka figur geometrycznych jest dwa razy gęstsza. Taki układ czujników jest obecnie możliwy do zrealizowania, ponieważ udało się zmienić konstrukcję sond temperatury. Górne punkty pomiarowe, zgodnie z normą, powinny się znajdować w odległości od 1 m do 2 m poniżej spodziewanej powierzchni ziarna i 0,5 m powyżej powierzchni dolnej (podłogi w magazynach płaskich). Ponadto norma precyzuje czas osiągnięcia gotowości pomiarowej i zalecaną dokładność pomiarową. Po zanurzeniu sondy w masie ziarna czas osiągnięcia ustalonej temperatury nie powinien przekroczyć 3 min. Czujniki pomiarowe umieszczone w sondzie temperatury, powinny wykrywać zmianę temperatury 0,5 °C w zakresie

temperatury pracy od 0 do 70 °C. W tabl. 7 i 8 przedstawiono również zalecenia firmy Foss El. [116] dotyczące liczby sond temperatury w komorze oraz liczby czujników pomiarowych w sondzie.

Tablica 8. Optymalna liczba czujników w jednej sondzie temperatury [116]

Długość sondy (m)	Liczba czujników temperatury (sztuk)
0 - 5	1
5 - 10	2
10 - 15	3
15 - 20	4
20 - 25	5
25 - 30	6
30 - 35	7
35 - 40	8
40 - 45	9
45 - 50	10

Tablica 9. Zalecana liczba sond temperatury w komorach elewatora zbożowego [116]

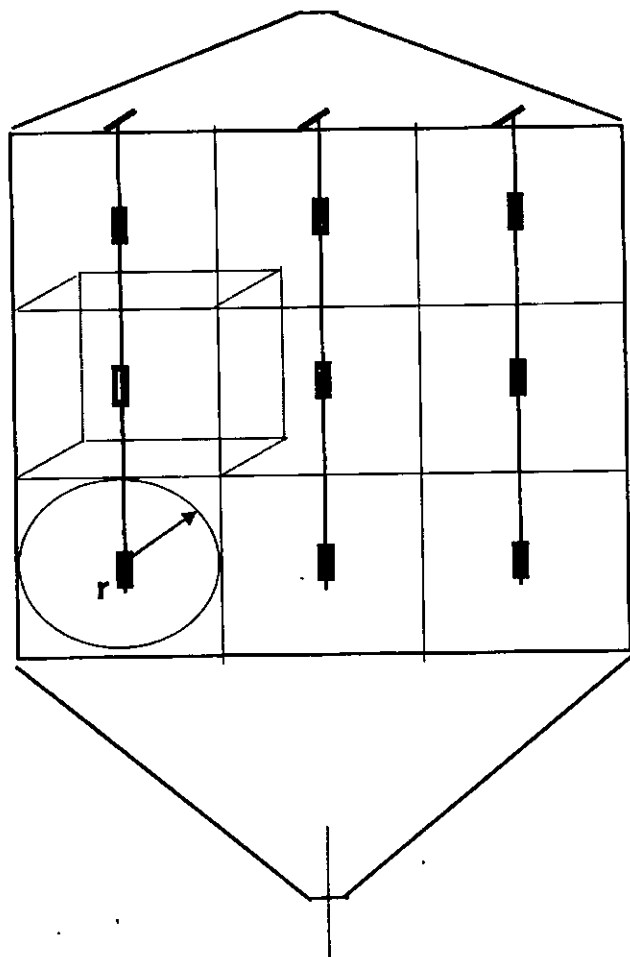
Komora o średnicy w (m)	7	10	13	176	19
Pole przekroju w (m ²)	<35	35-70	70-110	110-150	>250
Liczba sond w komorze (szt.)	1	3	4-5	5-6	12

6.5. Czujniki optoelektroniczne temperatury

Czujniki optoelektroniczne zostały opracowane i spopularyzowane w ciągu ostatniej dekady XX wieku. Początkowo znalazły one zastosowanie w urządzeniach pracujących w silnych polach elektromagnetycznych, w technice jądrowej, przy wysokim napięciu itp. Wstępne prace, zainicjowane przez autora, dotyczyły zbadania możliwości wykonania w

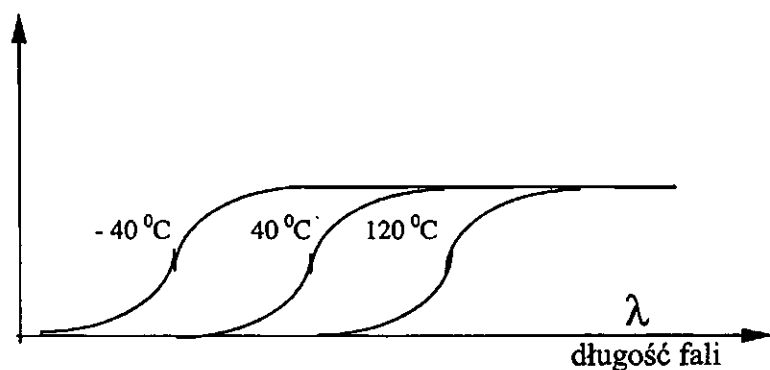
kraju czujnika z płytki półprzewodnikowej z arsenku galu – GaAs. Dalsze prace powinny doprowadzić do umieszczenia czujnika w światłowodzie, a następnie wykonanie wieloczujnikowych sond do zdalnego pomiaru temperatury [74, 74].

Zasada pracy oparta jest na analizie ramanowskiej i ocenie zmiany intensywności pasm stokesowskich i antystokesowskich [2, 17, 66]. W ramach tych prac najbardziej obiecująca okazała się metoda oparta na zmianie progu absorpcji w funkcji temperatury, jak to przedstawiono na rys. 38. Transmitancja optyczna dla płytki półprzewodnikowej zmienia się ze zmianą długości fali (temperatury).



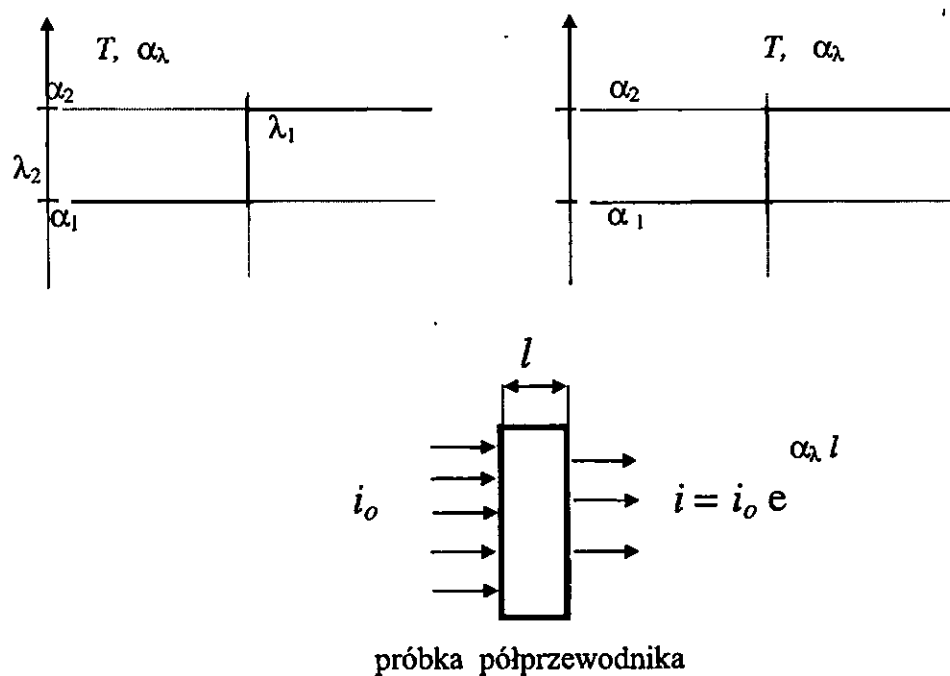
Rys. 37. Rozmieszczenie sond temperatury w komorze elewatora z siatką elementarną prostopadłościenną i kulową (wg badań autora)

transmitancja „ T ”



Rys. 38. Wpływ temperatury na transmitancję optyczną płytki półprzewodnikowej (wg badań autora)

Zakładamy, że współczynnik absorpcji α zmienia się skokowo dla różnych długości fali (rys. 39).



próbka półprzewodnika

Rys. 39. Skokowa zmiana transmitancji (progu absorpcji) w funkcji temperatury [66]

Obszar widma zawarty między λ_1 i λ_2 nazywamy *spektralnym oknem pomiarowym* i w tym obszarze mierzymy natężenie światła przechodzącego przez próbkę.

Jest on na tyle szeroki, aby objąć interesujący nas obszar zmian położenia krawędzi absorpcji. Zmiana położenia samej krawędzi niech będzie opisana funkcją:

$$\lambda_s = \lambda_0 + k(t - t_0)$$

Jeśli przyjąć, że natężenie światła padającego nie zależy od długości fali, to całkowite natężenie za próbką wyrazi się wzorem:

$$\begin{aligned} I &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_s} i_0 e^{-\alpha_1 l} d\lambda + \int_{\lambda_s}^{\lambda_2} i_0 e^{-\alpha_2 l} d\lambda = \\ &= i_0 \left[(e^{-\alpha_2 l} (\lambda_s - \lambda_1)) + e^{-\alpha_1 l} (\lambda_s - \lambda_1) \right] = \\ &= i_0 \left[(e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l}) \lambda_s - e^{-\alpha_2 l} \lambda_1 + e^{-\alpha_1 l} \lambda_2 \right] = \\ &= i_0 \left\{ (e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l}) [\lambda_0 + k(t - t_0)] - e^{-\alpha_2 l} \lambda_1 + e^{-\alpha_1 l} \lambda_2 \right\} \end{aligned}$$

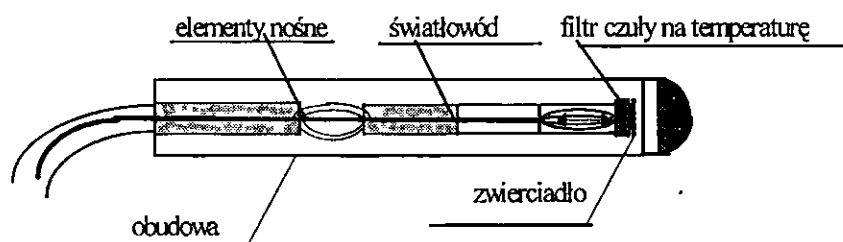
Widać, że I jest funkcją temperatury t .

Względna czułość (temperaturowa) czujnika wykonanego z takiego materiału wynosi:

$$C_t = \frac{dI}{dt} = \frac{i_0 (e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l}) k}{i_0 (\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{k}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l})$$

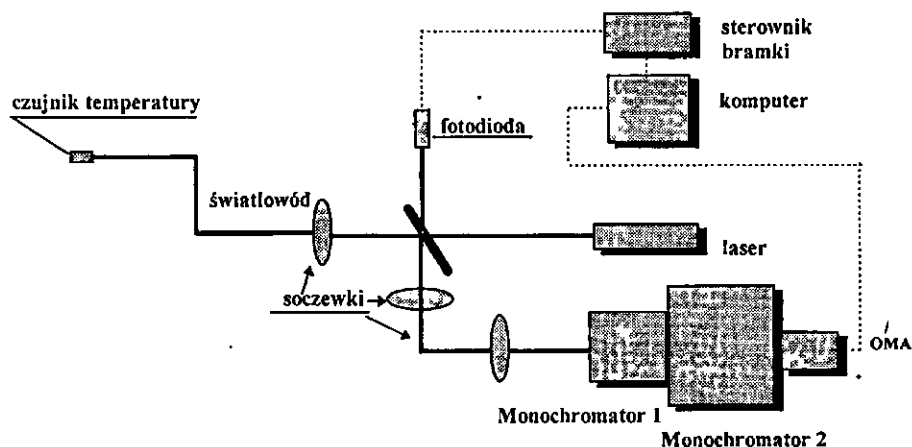
Czujnik temperatury wykonano z GaAs. Początkowo płytka GaAs była oświetlana jednym światłowodem, a po przejściu strumienia świetlnego (w pasmie podczerwieni) przez płytkę mierzono jego intensywność.

Kolejnym etapem była analiza strumienia odbitego przez płytkę, jak to przedstawiono na rys. 40.

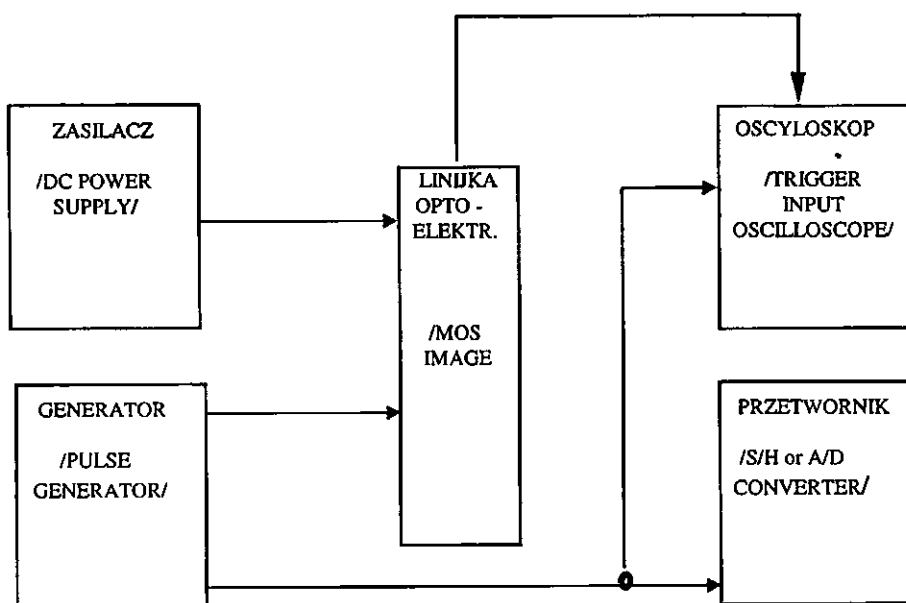


Rys. 40. Światłowodowy czujnik temperatury (wg koncepcji autora)

Czujnik światłowodowy jest elementem układu pomiarowego (rys. 41). Realizacja tego układu wymaga zastosowania monochromatorów pracujących w paśmie podczerwieni.



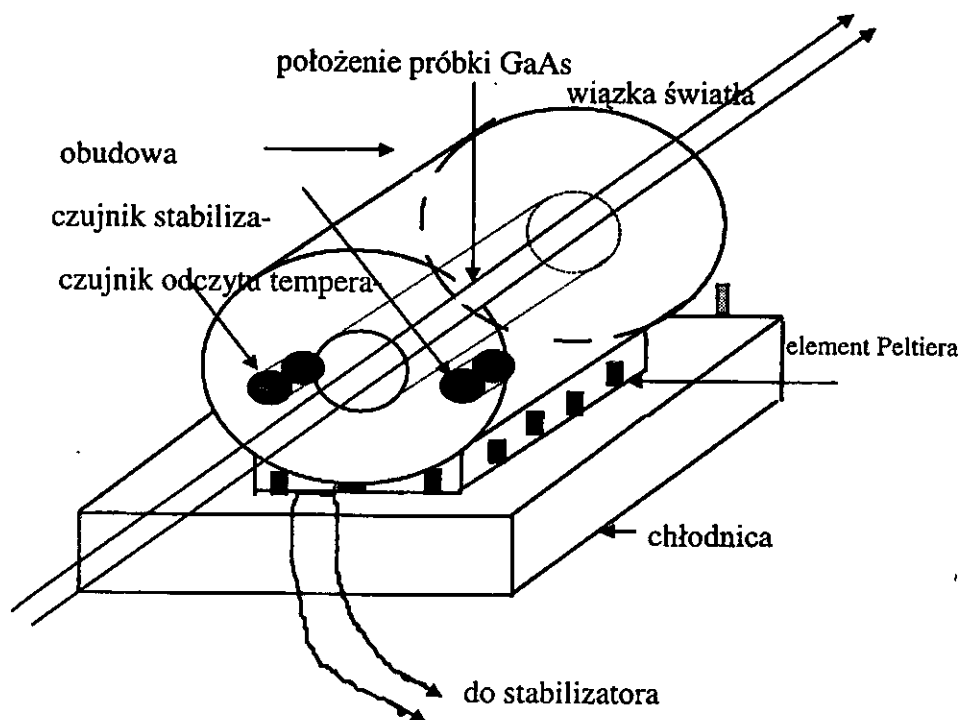
Rys. 41. Układ pomiarowy temperatury ze światłowodem [8]



Rys. 42. Sterownik do czujnika optoelektronicznego (wg koncepcji autora)

Układ przedstawiony na rys. 41 jest stosowany w laboratoriach – w układach doświadczalnych itp., natomiast układ z rys. 42 może być stosowany w układach przemysłowych. Model układu powstał w PIAP i zbudowany jest z bloków firmy japońskiej Hamamatsu. Odbity w czujniku strumień świetlny jest doprowadzony do liniiki optycznej. Odchylenie strumienia spowodowane zmianą temperatury w stosunku do strumienia wzorcowego w określonej temperaturze jest miarą aktualnej temperatury. Temperaturę można odczytać na ekranie oscyloskopu lub na monitorze komputera przez przetwornik A/D i odpowiedni interfejs.

Wyznaczanie charakterystyki temperaturowej w zakresie od -10 do 60°C przeprowadzono w termostacie opartym na grzejniku wykonanym z elementu Peltiera (rys. 43). Termostat ten wykonano specjalnie do badań czujników optoelektronicznych w PIAP. Okazał się również przydatny do badań innego rodzaju czujników temperatury. W stosunku do termostatów z grzejnikami oporowymi znacznie szybciej osiąga temperaturę zadaną i z większą dokładnością ją utrzymuje, jest przy tym bardziej energooszczędny.



Rys. 43. Stanowisko termostatyczne z elementem Peltiera do badań czujników temperatury (wg koncepcji autora)

Wnioski

- * Uzyskana dokładność czujników optoelektronicznych była gorsza od tradycyjnych czujników temperatury i wynosiła $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, ale powtarzalność pomiarowa była wysoka, porównywalna z czujnikami np. Pt 100. Można je zabudować w elastycznych sondach wieloczujnikowych. Czujniki te mogą być również stosowane w magazynach płaskich do pomiarów temperatur ekstremalnych np. $40-50^{\circ}\text{C}$,
- * Stanowisko termostatyczne z elementem grzejno-chłodzącym Peltiera może zastąpić dotychczasowe termostaty ze względu na lepsze parametry i energooszczędność pracy.

7. BADANIA SOND

Badania miały na celu potwierdzenie wymagań normatywnych i podawanych w katalogach, parametrów sond traktowanych jako wzorce oraz ustalenie rzeczywistych parametrów nowoopracowanych sond. Wymagało to opracowania metod pomiarowych i stanowisk badawczych, a także określenie analitycznych zależności np. oddziaływań mechanicznych i porównania z wartościami rzeczywistymi. Jest również szereg cech charakterystycznych dla sond dotychczas nie ujętych wymaganiami. Mogą być one przedmiotem zainteresowania konstruktorów i eksploataatorów zarówno sond, jak i systemów monitorowania. Zaliczono do nich inercję cieplną sondy oraz obojętność chemiczną sondy w stosunku do ziarna zbóż, które są produktem spożywczym. Obojętność tą można określić nietoksycznością osłony zewnętrznej sondy i nietworzeniem z ziarnem trujących toksyn. Przedstawiono również wyniki badań sond, wykonanych przez ZD GIG „Kopalnia Barbara”, które stanowiły podstawę wydania certyfikatu iskrobezpieczeństwa.

7.1. Obciążenie mechaniczne sond

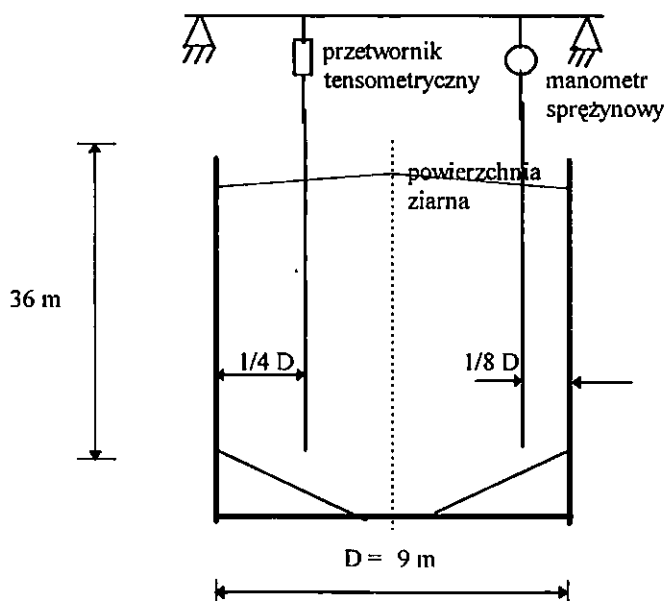
Wytrzymałość mechaniczna sondy na zrywanie jest bardzo ważnym parametrem, ponieważ od niej zależy przydatność sondy do konkretnego obiektu. Dąży się do zainstalowania sond o wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Nie zawsze jest to uzasadnione konstrukcją elewatora, w którym można zastosować sondy o np. niższej wytrzymałości i niższym koszcie. Producenci sond traktują ten parametr jako gwarancję długotrwałej pracy, a jego sprawdzenie stanowi duży problem wymagający specjalistycznej aparatury i ustalenie właściwej metodyki badań.

W kilku odwiedzanych skandynawskich i niemieckich biurach konstrukcyjnych [37, 49] zastosowano różne metody pomiarowe. Wyniki pomiarów wytrzymałości mechanicznej sond były zbieżne, ale obarczone innymi błędami. Dlatego wartość tego parametru, bez podania metodyki jego sprawdzania, może być traktowana jako element walki konkurencyjnej producentów sond. Opublikowane wyniki badań dotyczą sond zawieszonych w obiektach doświadczalnych z wyselekcjonowanym ziarnem. Z tego powodu, dla większości zastosowań, nie są one miarodajne. Podjęcie

własnych badań (przedstawionych poniżej) miało na celu określenie przydatności wyników zagranicznych do warunków krajowych.

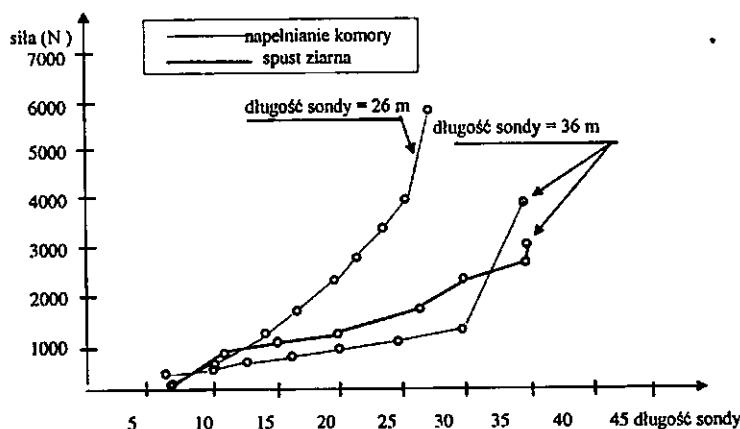
• Badania sił działających na sondę

Badania przeprowadzono w warunkach rzeczywistych, w wydzielonej komorze, w czasie normalnej eksploatacji elewatora [38, 63, 91]. Badania wykonano na stanowisku składającym się z czujników tensometrycznych, manometrów sprężynowych i ze statywu (rys. 44). Manometr sprężynowy umożliwiał przeprowadzenie pomiarów orientacyjnych. Dokładne pomiary wykonywano za pomocą czujnika tensometrycznego. Głowica sondy została zawieszona przez czujnik tensometryczny do sztywnej belki poprzecznej. Badania prowadzone były podczas zasypu, zsypu ziarna i podczas długotrwałego okresu przechowywania ziarna. Sondy były zamocowane w komorze w kilku pozycjach równoległe do osi symetrii. Wykresy obciążeń wyznaczono dla sond o długości 26 m i 36 m, przy zmiennym zanurzeniu w ziarnie. Średnica zewnętrzna tych dwóch sond wynosiła 16 mm.



Rys. 44. Stanowisko do badań sond pomiarowych pracujących w warunkach rzeczywistych (wg badań autora)

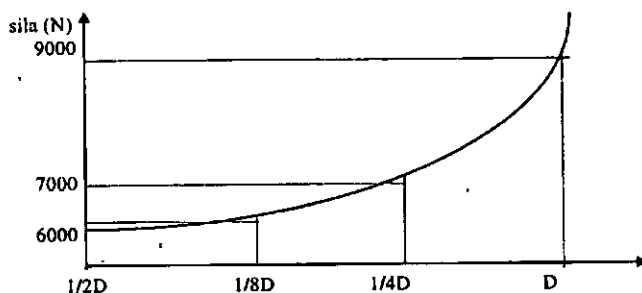
Wykresy tego eksperymentu, potwierdzające niską wartość sił statycznych, przedstawiono na rys. 45.



Rys. 45. Siły działające na sondy podczas napełniania i zsypu ziarna jęczmienia [116]

- **Badania sił działających na sondę w funkcji odległości od środka komory**

Badania przeprowadzono na obiekcie rzeczywistym dla trzech zamocowań sondy w środku komory w $1/2 D$, w odległości $1/4 D$ i $1/8 D$ od powierzchni bocznej i przy ścianie (gdzie D jest średnicą komory). Wykres sił obciążających jest przedstawiony na rys. 46. Siła wykładniczo wzrasta w funkcji odległości od osi symetrii zbiornika, osiągając wartości maksymalne w pobliżu jego ściany. Informacja ta jest istotna przy projektowaniu punktów zawieszenia sond w komorze elewatora.

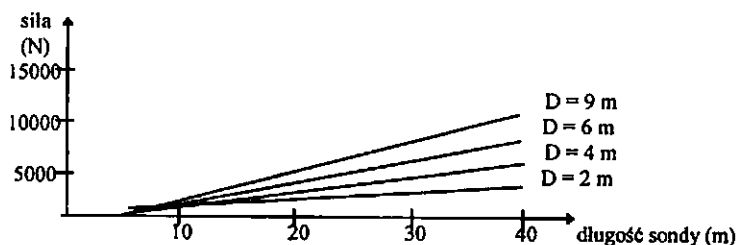


Rys. 46. Siły działającej na sondę w funkcji odległości [116] od środka komory

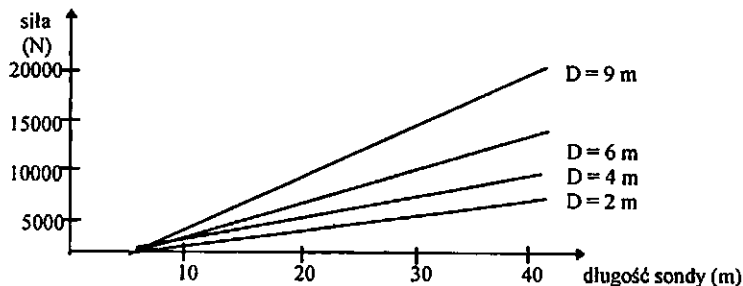
*** Badania sił działających na sondę w zależności od średnicy komory lub silosu**

Badania prowadzono dla kilku średnic komór elewatora wykonanych z żelbetu oraz dla tych samych średnic silosów stalowych. Sondę zawieszono w osi symetrii zbiornika.

Wyniki są przedstawione na rys. 47, 48. Wynika z nich, że sondy zawieszane w silosach stalowych są narażone na większe siły.



Rys. 47. Przebieg sił działających na sondę w funkcji długości sondy dla różnych średnicy D komór żelbetowych wg Foss El.[116]

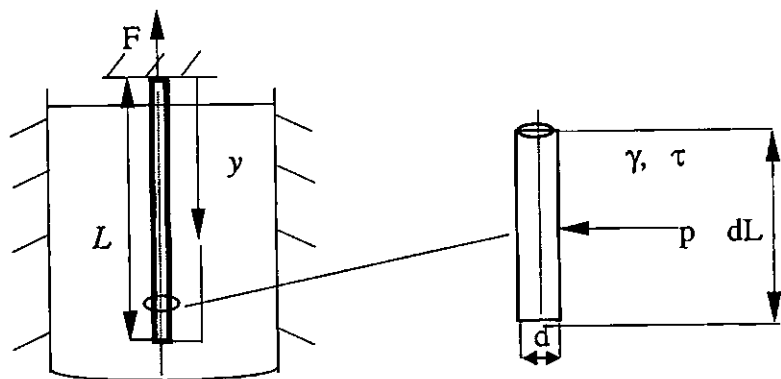


Rys. 48. Przebieg sił działających na sondę w funkcji funkcji długości sondy dla różnych średnicy D silosów stalowych wg Foss El.[116]

Badania wytrzymałości sond elastycznych (zrywające) przeprowadzono w Laboratorium Centralnego Ośrodka B-R Przemysłu Kablowego oraz w Instytucie Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa (wg koncepcji autora). Badania wykonywano na zrywarkach. Do badań pobierano pancierz sondy o długości 3 m. Wyniki były pozytywne. Sondy wytrzymały 80 kN.

- **Analityczne określenie sił działających na sondy i badania porównawcze**

Zakładamy quasi-statyczne obciążenie sondy siłą tarcia ziarna. Przy założeniu zawieszenia sondy w osi symetrii zbiornika-komory elewatora, ziarno zbóż o współczynniku tarcia μ oddziałowuje na sondę wzdłuż osi y . Na sondę działa ciśnienie ziarna p .



Rys. 49. Oddziaływanie ziarna na sondę zawieszoną w komorze: p – ciśnienie ziarna, μ – współczynnik tarcia, τ – naprężenie styczne, γ – ciężar właściwy ziarna, d – średnica sondy (wg badań autora)

F - siła wzdłużna działająca na sondę

$$\tau = \mu p$$

$$p(y) = \gamma y$$

$$F = \int_0^L \pi d \mu \gamma y dy = \pi d \mu \gamma l^2 \frac{1}{2} \quad (3)$$

W ostatnich 5 latach pojawiło się kilka publikacji amerykańskich zespołu pod kierunkiem I. J. Rossa [79, 80], określających wartość obciążenia działającego na sondy oraz badań krajowych określających rozkład obciążeń mechanicznych działających na ściany w zbiorniku z ziarnem [23, 63]. W pracach I.J. Rossa określono przybliżone równanie, precyzu-

jące siłę oddziaływania ziarna na zanurzoną w nim sondę pomiarową. Równanie to określa siłę działającą na sondę pomiarową, spowodowaną tarcie ziarna zbóż wzdłuż długości zawieszanej sondy. Siłę F_s precyzuje się jako obciążenie *load* sondy. Oblicza się ją z wzoru:

$$F_s = F_{tc} \frac{\pi \mu_{tc} D_{tc} R_h \gamma}{\mu} \left\{ y + \frac{R_h}{\mu k} [\exp(-\frac{k \mu y}{R_h}) - 1] \right\} \quad (4)$$

gdzie:

F_s - siła wzdłużna działająca na sondę [N]

F_{tc} - współczynnik proporcjonalności

μ - współczynnik tarcia ziarna o ściany zbiornika stalowego

μ_{tc} - przybliżony współczynnik tarcia ziarna zboża o sondę

D_{tc} - współczynnik odpowiadający średnicy sondy ($D_{tc} = \sqrt{4 \text{ pow.} / \pi}$)

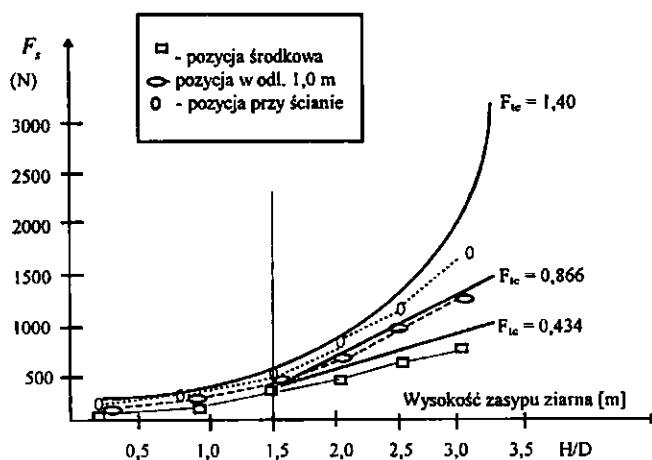
R_h - promień hydrauliczny zbiornika (powierzchnia dzielona przez obwód)

k - stosunek ciśnienia przy bocznych ścianach do ciśnienia działającego pionowo

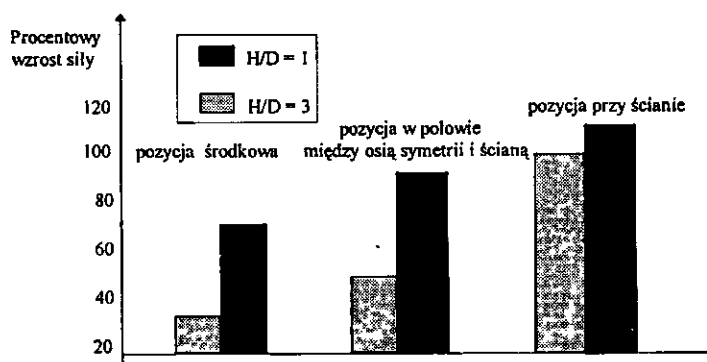
y - głębokość zanurzenia sondy w pryzmie ziarna

Przeprowadzono badania porównawcze tych samych wartości, obliczonych wcześniej wg (5) oraz występujących w warunkach rzeczywistych. W tym celu zbudowano zbiornik o kształcie walca średnicy podstawy równej 4,1 m i maksymalnej wysokości zasypu ziarna równej 14,3 m (wysokość zbiornika ok. 16 m). Sondy były zawieszane w trzech odległościach od środka podstawy, a mianowicie: 0,1 m (czyli w niewielkiej odległości od pozycji środkowej – w osi symetrii), w odległości 1,0 m (pozycja pośrednia) i 1,6 m - w pobliżu ściany bocznej zbiornika. Wyniki badań są przedstawione na rys. 50 i 51 wraz z krzywymi wykreślonymi na podstawie wzoru 4.

Dla tego doświadczalnego zbiornika przeprowadzono również badania sił dla różnych stopni napełnienia zbiornika, czyli dla różnych wysokości zasypu ziarna określonych przez H/D. Wykresy procentowego wzrostu siły obciążenia w funkcji położenia punktu zawieszenia sondy przedstawione są na rys. 51.



Rys. 50. Porównanie przebiegów obliczonych wg (4) dla różnych współczynników F oraz przebiegów wyznaczonych doświadczalnie wg I. Rossa [79]. Dla pozycji przy ścianie $F = 1,4$, dla pozycji środkowej $F = 0,434$



Rys. 51. Porównanie procentowego wzrostu siły obciążenia działającego na sondę pomiarową dla dwóch różnych wysokości zasypu ziarna wg I. Rossa [79]

Zależność (4) określa przybliżoną siłę obciążenia, wywołaną tarciem ziarna na sondę pomiarową. Ziarno to jest wysuszone w stacjonarnych, ustalonych warunkach przechowywania.

W ziarnie wilgotnym wzrasta jego siła tarcia na sondę i dlatego, dla warunków polskich autor zaproponował modyfikację zależności (4) Rossa i wprowadzenie drugiego współczynnika proporcjonalności uzależnionego od wilgotności ziarna F_w :

$$F_s = F_{tc} \frac{\pi \mu_{tc} D_{tc} R_h \gamma}{\mu} \left\{ y + \frac{R_h}{\mu k} [\exp(-\frac{k \mu y}{R_h}) - 1] \right\} F_w \quad (5) \quad (\text{wg badań autora})$$

gdzie:

F_w - współczynnik proporcjonalności zależny od wilgotności ziarna:

do 10 % $F_w = 1$, do 20 % $F_w = 2$ i do 30 % $F_w = 3$

Wyznaczanie współczynnika F_w przeprowadzono w zbiorniku doświadczalnym, w którym zawieszono w ziarnie próbkę sondy o średnicy 17 mm i długości 1 m. Na dynametrze mierzono siłę początkową podczas wyciągania próbki z ziarna o różnej wilgotności i na tej podstawie zaproponowano wartość współczynnika proporcjonalności F_w w (5).

• badania sił dynamicznych

Badania sił dynamicznych, działających na sondę prowadzono przez ok. 5 lat w komorze elewatora o pojemności 240 t. Zależą one od wielu czynników: średnicy sondy i jej długości, miejsca zamontowania sondy, materiału powlekającego pancierz sondy, kształtu pancierza sondy itp. Nie udało się wyznaczyć sił dynamicznych spowodowanych zablokowaniem zasypu lub zsypu ziarna. Dlatego ograniczono się do badania przyczyn uszkodzenia pancierza sond o wytrzymałości 30 kN.

Zrywanie pancierza występowało w sondach zawieszonych w pozycji pośredniej i z bocznym zasypem. W sondach zawieszonych w pozycji środkowej komory w czasie blisko 15-letniej eksploatacji nie zauważono żadnej nieprawidłowości. Początkowo zakładano, że obciążenie dynamiczne jest 5-krotnie większe od obciążenia statycznego (6 kN). Ponieważ uszkodzenia występowały nadal, przeprowadzono badania w kilku krajach. Chcąc sprostać nowym wymaganiom konstruktorów komór i silosów, zdecydowano się na podwyższenie wytrzymałości sond do 80 kN, podobnie jak to zrobiło kilka firm światowych [95]. Rozważania te dotyczą sond $\phi = 16$ (17) mm. W przypadku opracowania sond o mniejszych średnicach (przy tej samej liczbie czujników temperatury), siły

zgodnie z wzorem (5) mogą być znacznie mniejsze przy tym samym zapasie bezpieczeństwa, tzn. wielokrotności wzrostu obciążeń dynamicznych w stosunku do obciążeń statycznych.

Wnioski

- * Elastyczne sondy temperatury, zawieszone w silosach i komorach elewatora, są przedmiotem oddziaływań sił tarcia ziarna o powierzchnię zewnętrzną pancerza sond i wzdłuż ich średnic. Siły te powstają podczas zasypywania ziarna, podczas jego normalnego cyklu składowania oraz podczas operacji rozładunku. Sytuacja staje się szczególnie groźna wówczas, gdy ziarno zawiesza się w komorze i nagle kilkaset ton samoistnie, lub wskutek operacji przepychającej spada w dół komory. Mamy więc do czynienia z siłami statycznymi podczas normalnego składowania i dynamicznymi spowodowanymi awarią załadunku i rozładunku oraz siłami występującymi podczas prac przeładunkowych. Siły statyczne można stosunkowo łatwo wyznaczyć. Wyznaczenie sił dynamicznych wymaga specjalistycznego oprzyrządowania i badań w czasie, w którym zjawisko występuje. Zgodnie z dotychczasowymi przepisami projektowania wytrzymałości sond zakładano, że siły dynamiczne mogą wynosić 5-krotną wartość sił statycznych, np. dla sond o obciążeniu statycznym 6 kN wartość siły dynamicznej nie powinna przekroczyć 30 kN. Takie wymagania zostały podane w międzynarodowych normach [94].

Z analizy uszkodzeń przeprowadzonej przez autora w latach 85-93 w elewatorach krajowych wynikało, że wytrzymałość sond w wielu przypadkach jest za niska (stwierdzono w kilku sondach pęknięcia pancerza). Powinna ona wynosić co najmniej 50 kN, co znalazło potwierdzenie w nowej edycji normy przewidującej zastosowanie sond właśnie o tej wytrzymałości.

- * Z wzoru (4) wynika, że siła działająca na zawieszoną sondę pomiarową zależy proporcjonalnie do jej średnicy. Im więc większa średnica tym siła większa. Ponieważ standardem jest obecnie średnica zewnętrzna $\phi=17$ mm, dla sond HD więc przyjęto, na podstawie analizy parametrów innych firm, wytrzymałość jej na poziomie 80 kN. Dla takiego obciążenia buduje się stropy w elewatorach do których zawiesza sondy. Jeśli zmniejszymy średnicę sondy do 10 mm, to siła działająca na nią

będzie mniejsza o ok. 1/3. W konsekwencji zmniejsza się obciążenie stropu. Problemem jest tylko wykonanie elastycznej sondy wieloczułnikowej o średnicy nie większej od 10 mm. Tradycyjne konstrukcje sondy z czujnikami rezystancyjnymi i z pancerzem stalowym konstrukcyjnie wydają się wyczerpane, ponieważ nie dysponujemy już oplotem stalowym o większej wytrzymałości drutu, który ma decydujący wpływ na jej średnicę. Zastosowany podwójny drut stalowy „fortepianowy”, o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej, umożliwił wytworzenie sond o wytrzymałości porównywalnej do wzorców wiodących firm.

- * Prowadzone badania w PIAP nad konstrukcją czujników optoelektronicznych pozwoliły na zabudowanie ich w znacznie mniejszym pancerzu niż stosowane dotychczas. Średnica tej sondy wynosi obecnie 10 mm. Prace są już zakończone już na etapie opracowania modeli sond optoelektronicznych ze światłowodami.
- * Sondy z czujnikami optoelektronicznymi średnicy 10 mm i wytrzymałości 50 kN będzie można również stosować w elewatorach, w których dotychczas nie można było montować sond o średnicy 17 mm i wytrzymałości 80 kN, ponieważ stropy nie nadawały się do przebudowy wzmacniającej. Takich elewatorów jest w skali kraju kilkanaście. Powiększa się, tym samym, obszar zastosowania systemu monitorowania. W pozostałych elewatorach, w których montowane będą te sondy, obniżone również będą koszty adaptacji stropów pod sondy o mniejszej wytrzymałości. Wniosek ten jest na tyle istotny, ponieważ obecnie koszty zabudowy systemu monitorowania na obiekcie są wyższe od kosztów samej aparatury pomiarowej.
- * Prowadzone badania w PIAP nad konstrukcją czujników optoelektronicznych pozwoliły na zabudowanie ich w znacznie mniejszym pancerzu niż stosowane dotychczas. Średnica tej sondy wynosi obecnie 10 mm. Prace są już zakończone już na etapie opracowania modeli sond optoelektronicznych ze światłowodami.
- * Sondy z czujnikami optoelektronicznymi średnicy 10 mm i wytrzymałości 50 kN będzie można również stosować w elewatorach, w których dotychczas nie można było montować sond o średnicy 17 mm i wytrzymałości 80 kN, ponieważ stro-

py nie nadawały się do przebudowy wzmacniającej. Takich elewatorów jest w skali kraju kilkanaście. Powiększa się, tym samym, obszar zastosowania systemu monitorowania. W pozostałych elewatorach, w których montowane będą te sondy, obniżone również będą koszty adaptacji stropów pod sondy o mniejszej wytrzymałości. Wniosek ten jest na tyle istotny, ponieważ obecnie koszty zabudowy systemu monitorowania na obiekcie są wyższe od kosztów samej aparatury pomiarowej.

7.2. Wzorcowanie sond

Czujniki temperatury, po zamontowaniu w rdzeń sondy, są wzorcowane. Następnie rdzeń jest wsuwany w pancerz sondy zawieszony w komorze elewatora. Warunki techniczne pracy systemów monitorowania wymagają okresowej kontroli dokładności sond i jej czujników. Jest to możliwe dzięki wyjmowanemu rdzeniowi sondy. Znane metody kontroli pojedynczych czujników w komorze termostatycznej powinny być zweryfikowane ze względu na badania długiego rdzenia z zamontowanymi czujnikami przy zadanych wartościach temperaturowych.

Opracowano własną metodę badań temperaturowych stosowanych do wzorcowania sond. Polega ona na wykorzystaniu do badań komory termostatycznej. Do pierwszych badań wykorzystano unikatową *komorę termicznych uderzeń*. Komora ta jest stosowana do badań środowiskowych w laboratorium akredytowanym PIAP-LAB. Dotychczasowe badania w komorze były prowadzone dla typowego sprzętu pomiarowego, automatyki i robotyki. Komora zapewnia wysoką stabilność temperatury w całej jej przestrzeni. Rdzeń sondy z czujnikami jest zupełnie nowym przedmiotem badań ze względu na obszar jaki wypełnia w komorze. Z tego powodu, przydatność komory do wzorcowania sondy, wymaga sprawdzenia rozkładu temperatury wewnątrz komory.

Badania rozkładu temperatury przeprowadzono metodą porównawczą [53, 74], z zastosowaniem miernika podczerwieni i multimetru z czujnikiem platynowym. Temperaturę wyznaczano na podstawie rezystancji czujników zmierzonej na mierniku typu 196DD (rok produkcji 1993) firmy Keithley (USA), ze Świadectwem Uwierzytelnienia GUM nr M42-35/99. Komorę podzielono na trzy poziomy (płaszczyzny) zgodnie z rys. 52. Na każdym poziomie, na przecięciu siatki prostokątnej, oznaczono dwanaście punktów i w każdym punkcie dokonano pomiaru tempera-

tury co najmniej kilkanaście razy. Badania przeprowadzono metodą „A” z wykorzystaniem miernika klasycznego oraz metodą „B” z miernikiem bezdotykowym pracującym w paśmie podczerwieni (tabl. 10). Tak uzyskane wyniki pozwoliły określić wartość średnią temperatury w mierzo-nym punkcie z jej wariancją, odchyleniem średniej kwadratowej średniej arytmetycznej nazwanej dalej *błędem standardowym* [103, 109]. Określono również *rozstęp* rozumiany jako różnica między wartościami maksymalnym i minimalnym danej serii pomiarów.

Dodatkowo w wybranych punktach określono charakter rozkładu wyników, wykorzystując siatkę laplaso-regularną oraz przeprowadzono sprawdzenie zgodności rozkładu empirycznego z założonym rozkładem normalnym na podstawie testów χ^2 Pearsona dla kilku punktów pomiarowych [101, 102, 103]. Do badań porównawczych wykorzystano miernik do pomiarów bezdotykowych z detektorem podczerwieni typ Rayrpm 30L2TRG - Raytek /USA/ ze Skróconym Raportem nr.317/2000/SCT PIAP- LAB. Miernik ten ma celownik laserowy umożliwiający lokalizację punktów pomiarowych. W punktach 1-12 (rys. 52) ustawiono miniaturowe płytki z poczernionego aluminium, na które kierowano strumień laserowy.

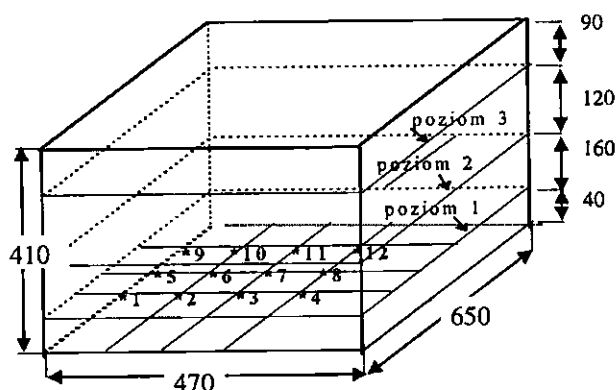
Tablica 10. Wyniki z porównania dwóch metod pomiaru dla wybranych 3-ch punktów pomiarowych (wg badań autora) [53]

Punkty pomiaru	Metoda pomiaru A [°C]			Metoda pomiaru B [°C]		
	Wart.	Błąd	Rozstęp	Wart.	Błąd	Rozstęp
1	18,68	4.93E-3	0,15	18,67	6,04E-3	0,3
2	18,78	4.99E-3	0,09	18,72	0,01	0,3
3	18,85	5,21E-3	0,12	19,12	0,01	0,3

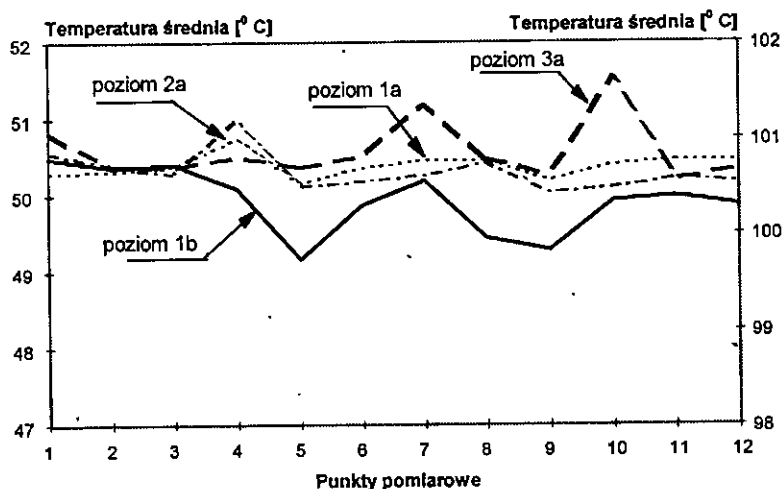
Ważniejsze parametry komory:

- wymiary przestrzeni probierczej: 470x 410x 650 mm
- zakres temperatur „gorąca”: +50 °C do 220 °C
- zakres temperatur „zimna”: -80 °C do +70 °C
- stabilność zmian temperatury w czasie (statyczna): 1 °C
- specjalna stabilność temperaturowa w koszu ruchomym: 2 °C
- szybkość narastania temperatur: 11 °C/min

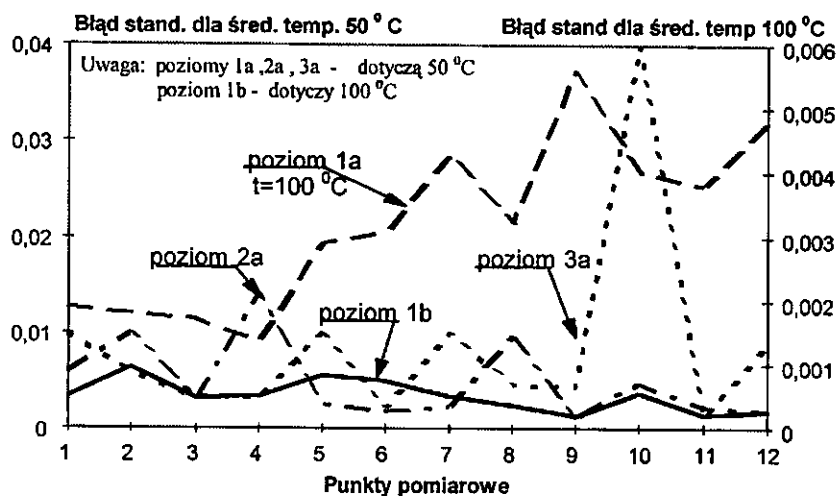
- szybkość chłodzenia w zakresie $+70\text{ }^{\circ}\text{C} \div -75\text{ }^{\circ}\text{C}$: $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$
- szybkość grzania w zakresie $-80\text{ }^{\circ}\text{C} \div 65\text{ }^{\circ}\text{C}$: $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$



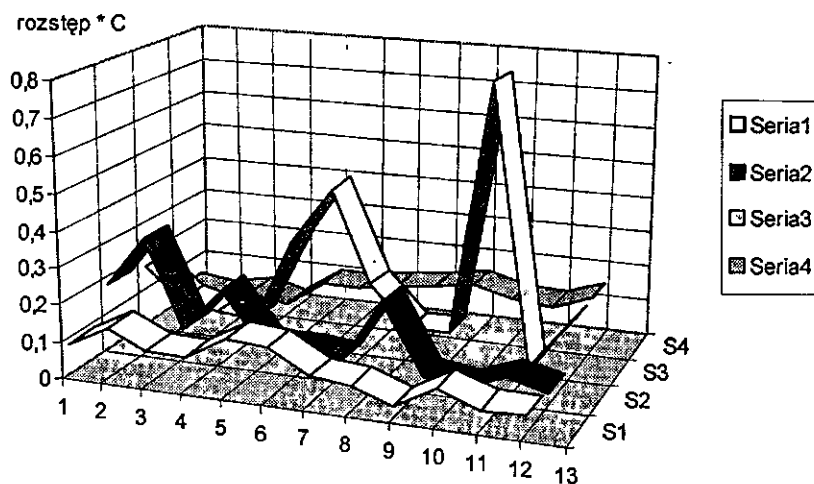
Rys. 52. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w termicznej komorze dla poziomu 1 [53]



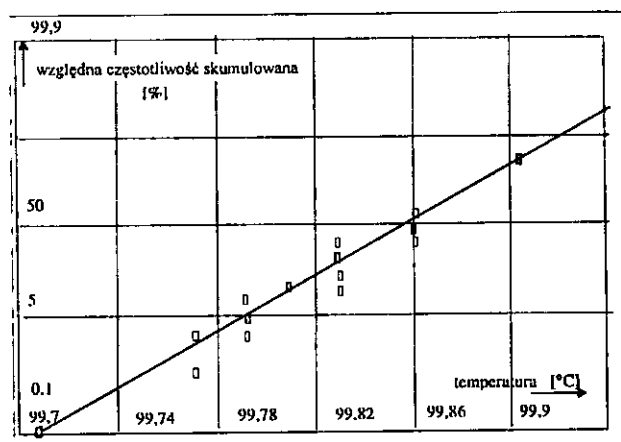
Rys. 53. Zmiany wartości średniej temperatury dla różnych poziomów w komorze przy ustalonych punktach pomiarowych. Wykresy 1a, 2a, 3a zmieniają się w przedziale temperatur $50\text{--}52\text{ }^{\circ}\text{C}$ – lewa oś temperatury, dla poziomu 1b - od $99\text{--}101\text{ }^{\circ}\text{C}$ – prawa oś temperatury [53]



Rys. 54. Zmiany wartości błędu standardowego temperatury średniej dla różnych poziomów w komorze przy ustalonych punktach pomiarowych [53]



Rys. 55. Zmiany rozstępu wartości średniej temperatury dla $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ serii S1, S2, S3 (dla trzech poziomów) oraz dla $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ serii S4 (dla czwartego poziomu) (wg badań autora)



Rys. 56. Sprawdzenie rozkładu normalnego dla jednego z punktów po miarowych na siatce rozkładu normalnego [53]

Podsumowanie i wnioski

- * Obserwacja zmian temperatury na różnych poziomach w komorze wykazuje wzrost tych zmian od poziomów 1 do 3. Podobne uwagi nasuwają się przy obserwacji zmian błędów. Zmiany błędów w temperaturze 50 °C mieszczą się w przedziale $(0 \div 0,05)$ °C natomiast dla temperatury 100 °C zmiany występują w przedziale $(0 \div 0,008)$ °C.
- * Zmiany rozstępu wyników podane na rys. 45 dotyczą różnych poziomów, temperatur i punktów pomiarowych. Dla poziomu 3a i $T = 50$ °C zmiany te są największe. Najmniejsze występują dla poziomu 1b i $T = 100$ °C. Wynika z tego, że nierównomierność temperatury komory spada wraz ze wzrostem temperatury w komorze i poziomem badanym.
- * Z przeprowadzonych badań i ich wyników należy zalecić prowadzenie pomiarów rdzenia sond temperatury, objętych procedurą wzorcowania, na najniższym dostępnym poziomie w przestrzeni probierczej komory.
- * Pomiary temperatury w komorze za pomocą miernika z czujnikiem Pt 100 i wykonywane miernikiem bezdotykowym pracującym w paśmie podczerwieni wykazały wyższą przydatność miernika bezdotykowego. Ma on wprowadzić mniejszą dokład-

ność, ale wysoką powtarzalność i dzięki sterowaniu laserowemu można przestrzeń probierczą komory lepiej zbadać docierając do każdego punktu w jej przestrzeni.

- * Sprawdzenie rozkładu normalnego dla jednego z wybranych punktów pomiarowych przedstawiony jest na rys. 56. Kolejne badania potwierdziły również charakter rozkładu normalnego. Dlatego jest to podstawa do oceny niepewności pomiarów. Przeprowadzono również badania wg testów χ^2 Pearsona, które potwierdziły przyjęte założenia,
- * Badania czujników temperatury w stałych warunkach temperaturowych w komorze termicznych udarów, podane w tabl. 10, wykazały wartość rozstępu równą 0,3 °C dla badań wg metody pomiaru „B”. Wartość błędu odchylenia średniego wynosi 0,01 i jest pomijalna w porównaniu z dokładnością sondy $\pm 0,5$ °C. Procedury badań sond są podane w normach przedmiotowych na systemy monitorowania z sondami elastycznymi.

7.3. Badania bezwładności cieplnej sond

Pomiar za pomocą sond temperatury obarczony jest błędem wynikającym z bezwładności cieplnej sond. Norma międzynarodowa [94] precyzuje czas od włożenia sondy do ziarna do czasu uzyskania wiarygodnych pomiarów temperatury. Wymagany 1 min jest bardzo krótki czas i mimo braku sprecyzowania rodzaju sond może dotyczyć sond laskowych stosowanych w magazynach płaskich. W dużych elewatorach, w których stosowane są sondy elastyczne *czas odpowiedzi* jest znacznie dłuższy. W katalogach sond nie podaje się żadnych informacji na ten temat. Prawdopodobnie projektanci systemów monitorowania założyli, że bezwładność cieplna samej sondy jest pomijalnie mała w porównaniu z bezwładnością cieplną całego obiektu.

Można się z tą tezą zgodzić. Podczas prac nad konstrukcją nowych sond oraz w badaniach porównawczych różnych sond będzie to jednak parametr bardzo istotny. Dlatego zaproponowano metodykę badań oraz wykonano pomiary porównawcze, które mogą być w przyszłości wykorzystane przy formułowaniu wymagań normalizacyjnych.

Całkowita bezwładność cieplna składa się z bezwładności ośrodka w którym znajduje się źródło samozagrzewania oraz z bezwładności cieplnej samej sondy, jak to przedstawiono na rys. 57. Temperatura ze

źródła przekazywana jest przez masę ziarna do sondy przez dotyk i konwekcję. Wartość temperatury w sondzie ulega obniżeniu na poszczególnych jej warstwach, i osiąga temperaturę zewnętrzną czujnika temperatury.

Spadek temperatury między źródłem i czujnikiem sondy można wyrazić:

$$T_A - T_j = P(Q_{T_1} - Q_{T_2} - Q_{T_3} - Q_{T_j}) \quad (6)$$

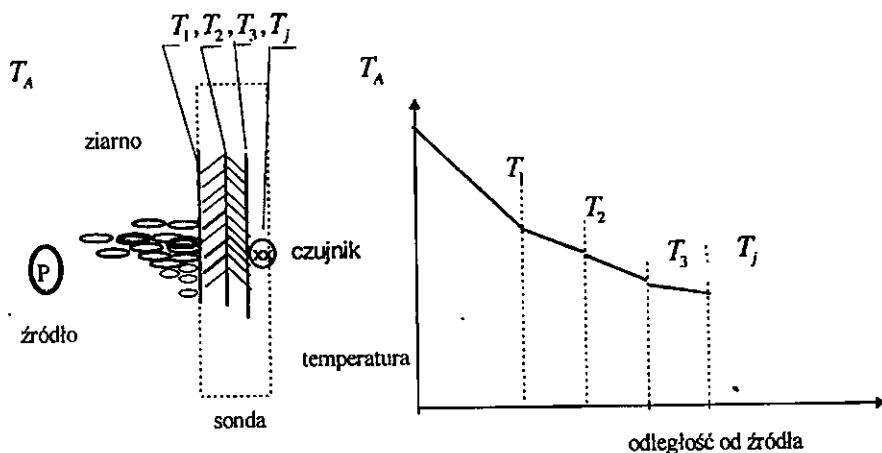
$$dQ = \alpha A (T_A - T_j) d\tau$$

z drugiej strony:

$$dQ = m c dt_{cz} \quad (7)$$

Rozwiązując otrzymujemy:

$$t(\tau) = t(1 - e^{-\tau/\theta_s}) \quad (8)$$

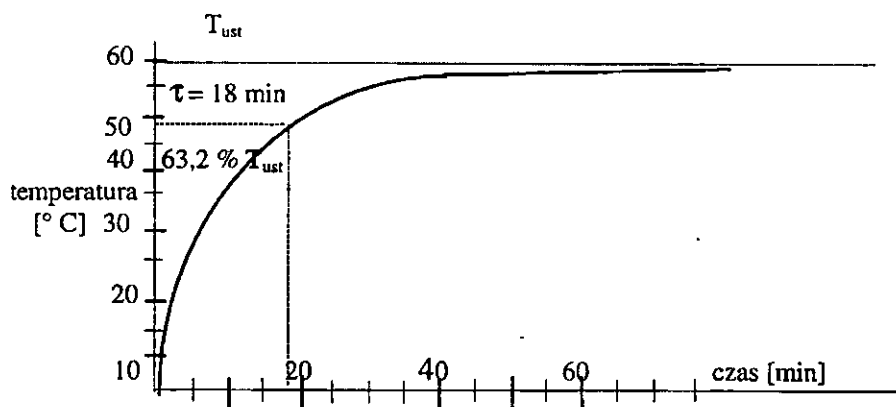


Rys. 57. Przebieg temperatury w stanach nieustalonych od źródła do czujnika sondy (wg badań autora).

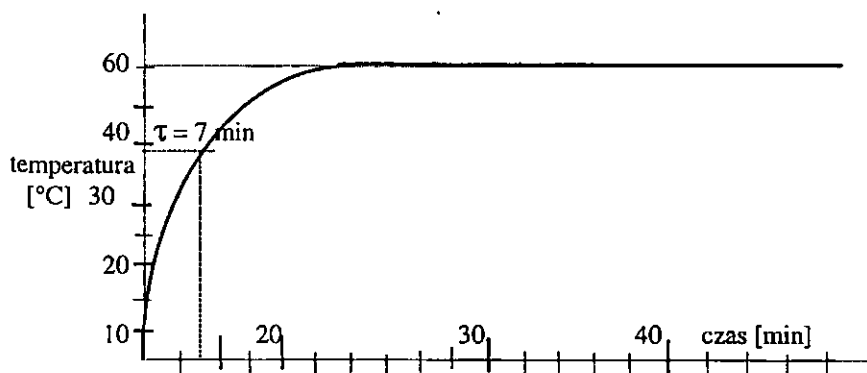
Stałą czasową sond pomiarowych wyznaczono w sposób następujący: próbkę sondy z czujnikiem temperatury o długości 50 cm i temperaturze początkowej 0°C umieszczono w komorze uderów termicznych, ze stałą cyrkulacją powietrza, w której temperatura jest stała [54] i wynosi

60 °C. Wartość ta odpowiada górnej wartości temperatury pracy systemu monitorowania. Po umieszczeniu sondy w tej temperaturze wyznacza się przebieg zmian temperatury i określa się z wykresu stałą czasową dla samej sondy.

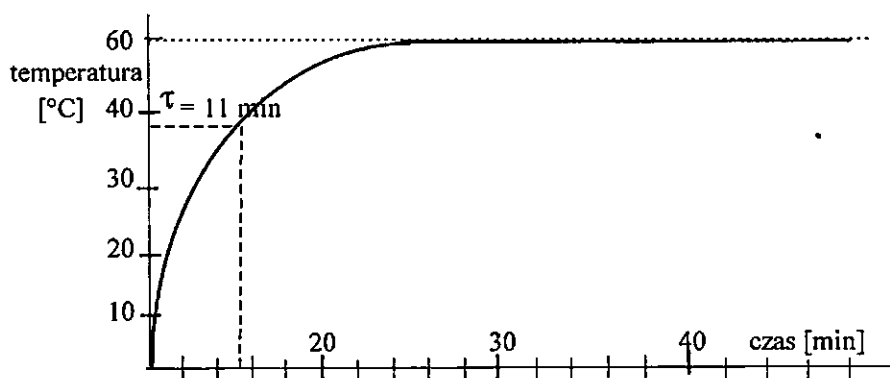
Stałą czasową wyznaczono dla trzech sond MD i HD $\phi = 10, 14$ i 17 mm i wytrzymałości mechanicznej odpowiednio: 10 Nm, 30 Nm, i 80 Nm, zgodnie z przebiegami przedstawionymi na rys. 58, 59, 60.



Rys. 58. Przebieg zmiany temperatury odwzorowanej przez sondę MD średnicy 10 mm, przy skoku temperatury od 0 do 60 °C (wg badań autora)



Rys. 59. Przebieg zmiany temperatury odwzorowanej przez sondę HD średnicy 14 mm, przy skoku temperatury od 0 do 60 °C (wg badań autora)

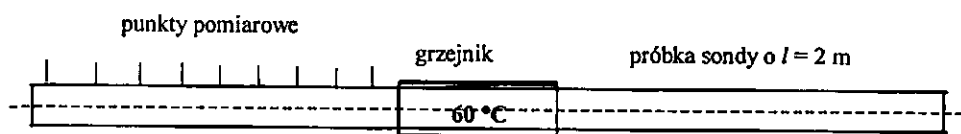


Rys. 60. Przebieg zmiany temperatury odwzorowanej przez sondę HD o średnicy 17 mm, przy skoku temperatury od 0 do 60 °C (wg badań autora)

Przebieg temperatury odwzorowanej przez sondy przy zadanym skokowym wymuszeniu równym 60 °C zależy od budowy sondy a nie od jej średnicy. Dla sondy o najmniejszej średnicy równej 10 mm stała czasowa τ jest największa i wynosi 18 min, a dla sondy prawie dwukrotnie grubszej średnicy 17 mm, wynosi tylko 11 min. Sonda ta ma pancerz z opłotem z dwóch warstw drutów stalowych, który dobrze przewodzi ciepło do jej rdzenia z czujnikami. Sonda o najmniejszej średnicy pancerza stalowego ma płaszcz z polietylenu źle przewodzący ciepło i dlatego dla niej stała czasowa jest najdłuższa.

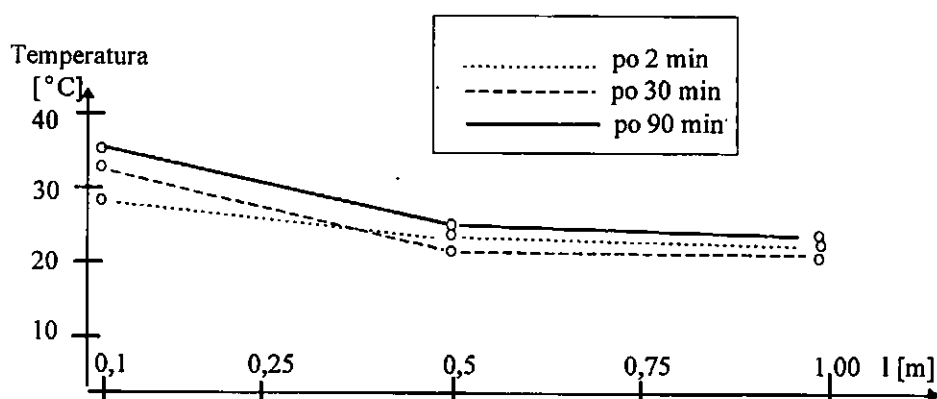
Z rys. 32 wynika, że podczas samozagrzewania wzrost temperatury w ziarnie o 60 °C następuje w okresie większym niż osiem dób, a więc czas ustalenia pomiaru równy 4τ (dla sondy średnicy 10 mm), wynoszący 1 godz. 12 min, nie powinien mieć negatywnego znaczenia, ponieważ system pomiarowy będzie wykrywał już zmiany o wartości 0,5 °C.

Na bezwładność cieplną sond pomiarowych ma również wpływ przewodność cieplna wzdłuż długości pancerza (płaszcz) sondy przy założeniu quasi-punktowego źródła ciepła. Przyjęto, że odcinek sondy znajdzie się w źródle samozagrzewania. Wpływ ten badano umieszczając środek próbki sondy w grzejniku cylindrycznym długości 10 cm, a następnie miernikiem promieniowania podczerwonego wyznaczono rozkład temperatury wzdłuż długości sondy (rys. 61).

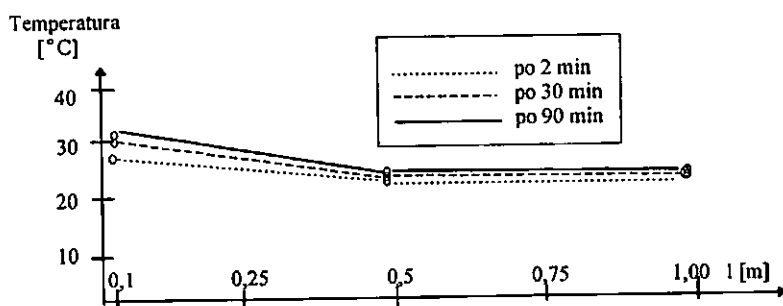


Rys. 61. Wyznaczanie wzrostu temperatury wzdłuż długości próbki sondy, wywołanego działaniem grzejnika cylindrycznego długości 10 cm (wg badań autora)

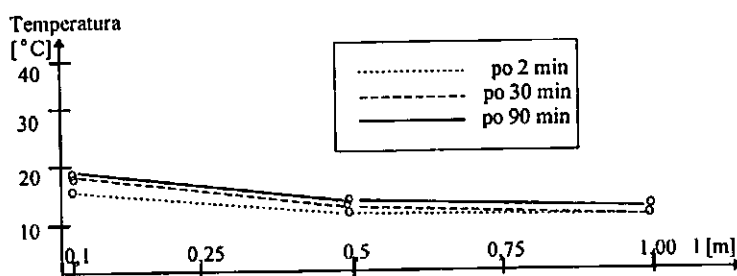
Przebiegi temperaturowe wzdłuż długości sond pomiarowych przedstawione są na rys. 62, 63, 64. Sonda o najmniejszej średnicy 10 mm (bez pancerza stalowego) odwzorowuje dobrze temperaturę bezpośrednio w źródle grzania, po czym następuje znaczny spadek temperatury i w odległości równej ok. 10ϕ , co jest równe 10 cm, nie występuje już wyraźne oddziaływanie podwyższonej temperatury. Inaczej jest w sondach o pancerzu z opłotem stalowym. Maksymalna temperatura źródła jest odwzorowana również z dużą dokładnością, ale oddziaływanie zewnętrznej, podwyższonej temperatury wzdłuż długości jest większe i może dochodzić nawet do odległości równej 40ϕ (40x ϕ).



Rys. 62. Przyrost temperatury dla sondy $\phi = 17$ mm i $l/2 = 1$ m, $t_0 = 20$ °C (wg badań autora)



Rys. 63. Przyrost temperatury dla sondy $\phi = 14$ mm i $1/2 l = 1$ m, $t_o = 20$ °C (wg badań autora)



Rys. 64. Przyrost temperatury dla sondy $\Phi = 10$ mm i $1/2 l = 1$ m, $t_o = 20$ °C (wg badań autora)

Wnioski

- * Odzworowanie rzeczywistej temperatury przez sondy pomiarowe w ośrodku ziarnistym następuje z opóźnieniem czasowym związanym z niskim przewodnictwem cieplnym samego ośrodka, z inercji sondy (co wynika z jej wielowarstwowej budowy) i z bezwładności cieplnej czujnika temperatury.
- * Wartość temperatury wskazana przez sondę, która jest umieszczona w źródle warstwowym, jest niższa od temperatury rzeczywistej. Wynika to z budowy pancerza sondy, a szczególnie uśredniającego działania opłotu z drutów stalowych.
- * Stała czasowa badanych sond, o niedużych różnicach w ich średnicach (od 10 mm do 17 mm), zależy od budowy sondy, a nie od wielkości ich średnic. Dla sondy o najmniejszej średnicy,

bez pancerza stalowego, stała czasowa była najdłuższa (18 min), a dla sondy grubszej (z pancerzem) stała czasowa była niższa (7 min).

7.4. Wpływ oddziaływań środowiskowych

Badania prowadzone były w specjalistycznym laboratorium. Miały na celu ocenę toksykologiczną elastycznej sondy iskrobezpiecznej średnicy $\phi = 17$ mm i wytrzymałości mechanicznej 30 kN i 90 kN w zakresie kontaktu z ziarnistymi i granularnymi produktami spożywczymi. W skład produktu spożywczego jakim jest ziarno zbóż wchodzi węglowodany, skrobia, błonnik, oleje roślinne i woski.

Wykonano dwa rodzaje badań:

- Oznaczono przekazywanie zapachu i smaku przez warstwę powietrza otaczającego sondę.
- Oznaczono migrację do powietrza z sondy lotnych substancji chemicznych.

Badanie przekazywania zapachu i smaku wykonano wg. procedury i metody sensorycznej objętej odpowiednią PN. Umieszczono kilkumetrową próbkę sondy w komorze szklanej. Stwierdzono, że zapach jest bardzo słabo wyczuwalny.

W drugim badaniu przeprowadzono analizę próbek powietrza z komory laboratoryjnej. Wykonano ją metodą chromatografii gazowej z detektorami FID oraz ECD. Oznaczalność metody dla węglowodorów alifatycznych wynosiła $0,002 \text{ mg/m}^3$ dla węglowodorów aromatycznych $0,001 \text{ mg/m}^3$ oraz dla chlorowców pochodnych węglowodorów: $0,0005 \text{ mg/m}^3$.

Stwierdzono, że badana sonda nie wydziela substancji zapachowych oraz lotnych substancji szkodliwych dla zdrowia. Polietylen oraz grafit, które są komponentami płaszcza (pancerza) sondy nie stanowią zagrożenia dla otaczającego sondę produktu spożywczego jakim jest zboże. Komponenty te są odporne na działanie olejów roślinnych, a ponadto woski zawarte w zbożu tzw. kutyna powodują impregnację zewnętrzną warstwy płaszcza sondy.

7.5. Badania atestacyjne wykonane w ZD GIG „Kopalnia Barbara”

Badania dotyczące bezpieczeństwa przeciwwybuchowego prowadzone były dla potwierdzenia iskrobezpieczeństwa elastycznej sondy i wydania Orzeczenia Atestacyjnego. Badania prowadzone były w specjalistycznym laboratorium ZD „Kopalni Barbara” zgodnie z wymaganiami PN i EN wyszczególnionymi w odpowiednich procedurach badawczych jednostki certyfikującej (notyfikowanej).

Wykonano badania objęte następującymi procedurami:

- Pomiar oporu powierzchniowego obudów lub ich części wykonanych z tworzyw sztucznych,
- Badanie zdolności zapłonowej wyładowań elektrostatycznych z powierzchni obudów z tworzyw sztucznych, tkanin lub odzieży.

Przedmiotem badań była próbka pancerza sondy z głowicą i końcówką dolną.

Opór powierzchniowy wynosił: $8,5 \times 10^{12} \Omega$

Rezystancja upływu do drutu stalowego (między zewnętrzną warstwą pancerza a warstwą drutów stalowych) wynosiła: $2,5 \times 10^{12} \Omega$

Badania zdolności zapłonowej iskrowych wyładowań elektrostatycznych wykonano dla strefy zagrożenia Z10 i ZII i grupy wybuchowości II przy wilgotności względnej w pomieszczeniu wynoszącej 54 %. Zastosowano próbierną gazową mieszaninę wybuchową H_2 -50 % + powietrze 50 %. Elektroda zbierająca była elektroda sferyczna 1-punktowa komórki przenośnej. Elektryzacja sondy wykonywana była poprzez pocieranie jej tkaniną drelichową.

Potencjał ładunku elektrycznego V_p (kV) dla kilku próbek wynosił: $V_{pmax} = 0,880$ kV i $V_{p\acute{s}r} = 0,801$ kV.

Na podstawie tych wyników badań otrzymano Orzeczenie Atestacyjne sond na okres 5 lat. Stwierdzono w nim, że sonda jest elementem biernym. Iskrobezpieczeństwo jej uzyskuje się przez współpracę z iskrobezpiecznymi obwodami zasilająco-pomiarowymi współpracujących z nią bloków (multipleksa). Bloki te również powinny posiadać odpowiednie atesty bezpieczeństwa przeciwwybuchowego (iskrobezpieczeństwa).

7.6. Weryfikacja eksperymentalna

- * Przedstawiono 4 rodzaje badań sond temperatury: badań mechanicznych i bezwładności cieplnej wg koncepcji i uzgodnień autora oraz dwa badania obligatoryjne wykonane po raz pierwszy dla sond temperatury wg. przyjętej metodyki i po dyskusjach z autorem.
- * Celowość przeprowadzenia badań porównawczych wytrzymałości mechanicznej sond wynikała z przeprowadzonych rozważań analitycznych i otrzymanych wyników badań eksperymentalnych oraz z badań eksploatacyjnych
- * Z wyników badań wytrzymałości mechanicznej można ocenić przydatność sond do konkretnego obiektu i stanu przechowywanego ziarna.
- * Zaproponowana przez autora modyfikacja zależności analitycznej siły oddziaływującej na sondy w funkcji wilgotności ziarna daje lepsze przybliżenie jej do wartości rzeczywistej i może być wykorzystywana przy projektowaniu sond temperatury.
- * Badania inercji cieplnej sond elastycznych wykazały, że jest ona zależna w największym stopniu od budowy sondy, a nie tylko od jej średnicy.
- * Badania czasu odpowiedzi wykazały, że dotychczasowa normalizacja międzynarodowa w tym zakresie dotyczy tylko sond przeznaczonych do małych „horyzontalnych” magazynów płaskich.
- * W normalizacji międzynarodowej, dotyczącej układów pomiarowych temperatury w magazynach „wertykalnych-wysokich” rozumianych jako elewatory, należy wprowadzić wymagania dotyczące czasu odpowiedzi dla sond elastycznych.
- * Badania toksyczności sond przeprowadzono tylko dla jednego typu sond elastycznych. Ze względu na ich znaczenie dla składowania „zdrowej żywności” powinny być one obligatoryjne i wykonywane dla każdego typu sond przeznaczonych do pomiarów w produktach spożywczych.
- * Badania atestacyjne obejmowały tylko dwa typy pomiarów wykonanych po raz pierwszy w jednostce notyfikacyjnej. Powinny być one obowiązujące dla aparatury pomiarowej we wszystkich magazynach zbożowych.
- * Przeprowadzone badania atestacyjne wykonywane były na podstawie dotychczasowych procedur. Będą one musiały być w przyszłości rozszerzone o badania wynikające z Dyrektyw Unii Europejskiej ATEX 100A [113].

8. ZAKŁÓCENIA DZIAŁAJĄCE NA SYSTEMY POMIAROWE

Systemy pomiarowe stosowane w elewatorach zbożowych zainstalowane są, w większości w starych – kilkudziesięcioletnich obiektach. Magazyny te były wcześniej projektowane bez systemów monitorowania, dlatego teraz powstają, wcześniej nie przewidywane, zagrożenia przepięciowe, przetężeniowe i inne [106].

Zapewnienie prawidłowości pracy systemów pomiarowych wymaga, często, pokonania wielu problemów. Z doświadczeń obiektowych wynika, że dobre efekty pracy systemów pomiarowych osiągnięto, w kilku przypadkach, dopiero po wymianie całej instalacji elektrycznej obiektu wraz z transformatorem zasilającym, dlatego prowadzoni się badania zakłóceń w elewatorach przeznaczonych do modernizacji i zabudowy systemu pomiarowego. Ponieważ są to jedne z pierwszych badań tego typu wykonywanych w kraju, wyniki mogą być istotne dla projektantów systemów monitoringu w elewatorach zbożowych.

8.1. Rodzaje zakłóceń

Zakłócenia, które powstają w pracy systemów pomiarowych w obiektach magazynowych są następujące:

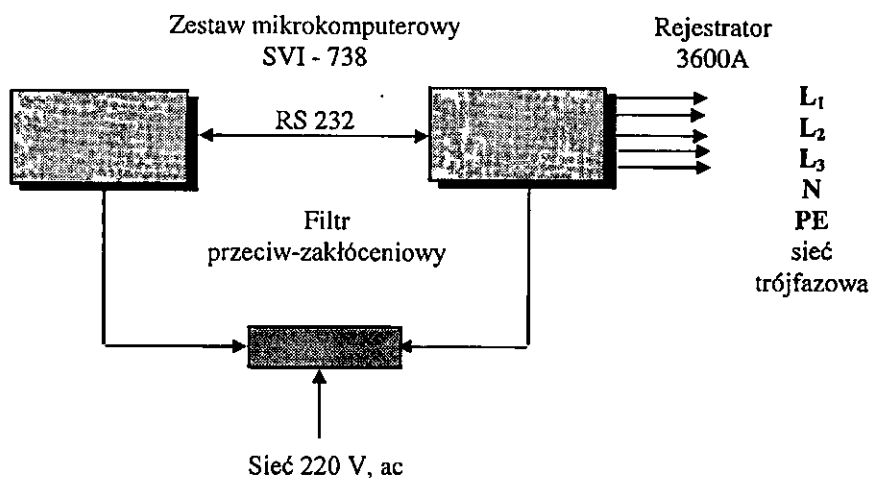
- * zakłócenia elektryczne sieciowe,
- * zakłócenia mechaniczne,
- * zakłócenia wywoływane przez obsługę,
- * zakłócenia wywoływane przez gryzonie.

Pierwszy rodzaj zakłóceń oddziałujący na aparaturę kontrolno-pomiarową jest spowodowany przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi w elektrycznych obwodach zasilających. Duża liczba napędów elektrycznych wyposażonych w silniki elektryczne o mocy rzędu 30 kW i więcej podczas rozruchu, chwilowych przeciążeń i wyłączeń generuje w sieć zasilającą przepięcia i przetężenia, które mogą wpływać ujemnie na inne podłączone do sieci urządzenia, w tym szczególnie czułe urządzenia elektroniczne impulsowe (pomiarowo-regulacyjne). Napędy elektryczne

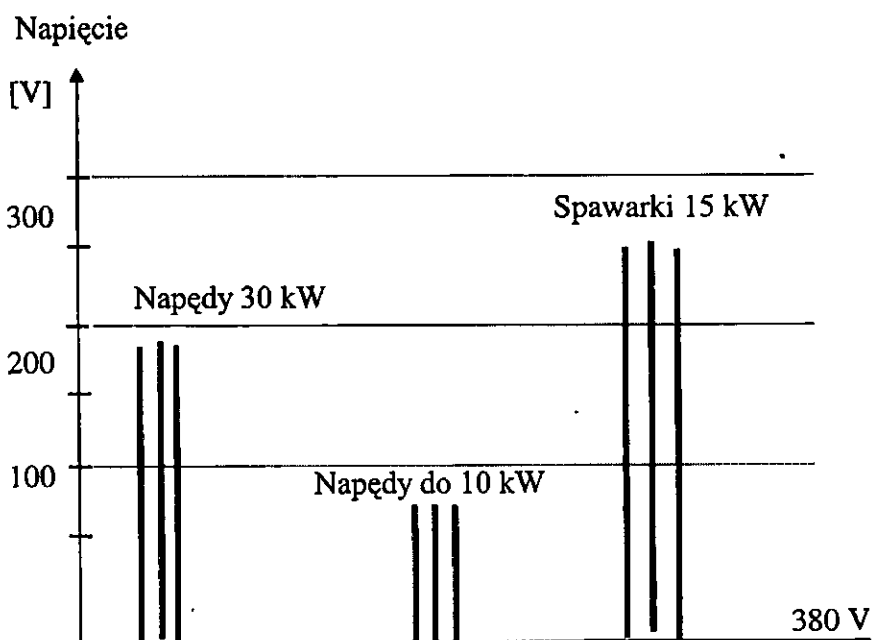
stosowane są we wszystkich urządzeniach technologicznych, w tym w urządzeniach transportowych. Pracują one okresowo, w dowolnym okresie czasu, dlatego przyczyn zakłóceń nie można wyeliminować, należy jednak przewidywać odpowiednią odporność aparatury na działanie zakłóceń.

8.2. Wyniki badań

Badania prowadzone na obiekcie rzeczywistym miały na celu określenie wielkości występujących w magazynach przepięć łączeniowych. Przepięcia w sieci energetycznej trójfazowej L_1 , L_2 , L_3 , N, PE (zgodnie z Oznaczeniami - str. 140) rejestrowano na specjalistycznym stanowisku komputerowym PIAP (rys. 65). W skład stanowiska wchodzi zestaw komputerowy do wykrywania chwilowych przepięć sieciowych oraz rejestrator ultra-szybkich przebiegów. Okres badań wynosił ok. 1 tygodnia, w czasie którego załączano poszczególne napędy oddzielnie i grupowo symulując najgorsze warunki pracy. Włączano również kolejne dodatkowe przenośne urządzenia, które mogą być stosowane okresowo w magazynie, takie jak np. spawarki, małe betoniarki itp. Badania były prowadzone w związku ze zdarzającymi się przypadkami złej pracy nowo-zainstalowanych robotów przemysłowych stosowanych w pracach transportowych. Wyniki badań są przedstawione na rys. 66 i w tabl.11.



Rys. 65. Stanowisko do określania przepięć łączeniowych



Rys. 66. Wartości zakłóceń w elektrycznej sieci zasilającej, w stosunku do sinusoidy podstawowej 50 Hz, (wyniki trzech pomiarów), (wg badań autora)

Tablica 11. Wartości przepięć łączeniowych, przewyższających amplitudę pierwszej harmonicznej i czas ich trwania w elewatorze zbożowym (wg badań autora)

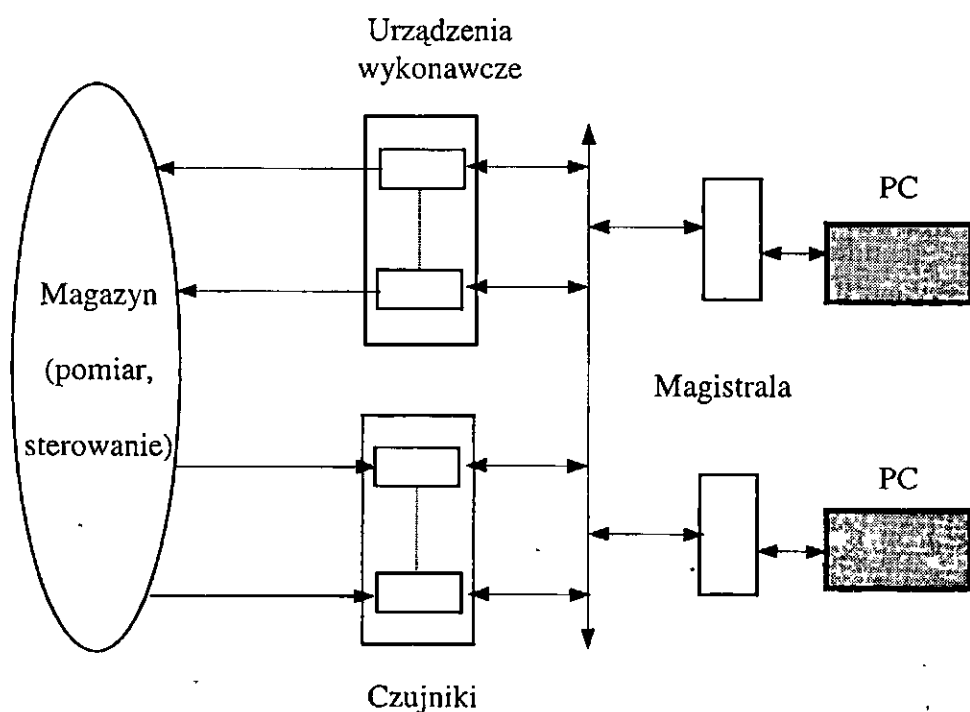
Lp.	Wartość impulsu [V]	Czas trwania [μ s]
1.	58	38
2.	63	42
3.	177	24
4.	224	9
5.	260	16
6.	312	24

8.3. Metody eliminacji zakłóceń

- * Wartości przepięć określono dla jednego konkretnego obiektu, trudno więc je uogólniać. Można jednak założyć, że w tym obiekcie aparatura będzie pracować poprawnie, jeśli przepięcia o wartości amplitudy 1,5 kV nie będą powodowały zakłóceń w jej pracy. Do obniżenia przepięć, w większości podobnych aplikacji, wystarczyło zastosowanie dławików oraz baterii kondensatorowej. W nowszych systemach zastosowano dwustopniowe układy ochronne z ogranicznikami gazowymi i półprzewodnikowymi ogranicznikami przepięciowymi.
- * Jeśli pomiary wykazały, że wartość przepięć jest jeszcze za wysoka, można przeprowadzić dodatkowy eksperyment. Przyniósł on dobre rezultaty. Zredukowano przepięcia wprowadzając bardzo dokładne uziemienia i zerowanie. Radykalne obniżenie nastąpiło również w momencie zastosowania innego transformatora zasilającego. Dotychczasowy transformator był obciążony w granicach 80–90 % mocy znamionowej. Po jego zamianie na dużo większy, zgodnie z planowanymi nowymi obciążeniami, wartość przepięć obniżyła się o połowę.
- * Zakłócenia mechaniczne spowodowane są np. drganiami i wibracją konstrukcji budowlanej. Wywołane są one przenoszeniem drgań z urządzeń technologicznych tam gdzie są jeszcze nastawiane wartości zadane za pomocą potencjometrów, należy szczególnie uważnie je instalować. W najnowszych systemach pomiarowych, ze strojeniem komputerowym, ten przypadek nie powinien mieć miejsca.
- * Przyczyną wielu awarii w pracy było również wysokie zapylenie i nieprzestrzeganie przez obsługę zaleceń użytkowania w tych warunkach, kiedy np. mysz komputera poprawnie pracowała tylko ok. 1 miesiąca, a po tym okresie nadawała się tylko do remontu ze względu na zanieczyszczenie styków. Szczególnie trudne jest do wykrycia przerwanie połączeń kablowych przez gryzonie. Na długich odcinkach instalacja elektryczna jest prowadzona w rurkach pancernych, i tu nie ma z nią problemu.
- * Znacznie gorzej jest na przepustach kablowych w szafkach sterowniczych w których temperatura jest wyższa niż otoczenia i gryzonie chcą tam dotrzeć. Można zastosować odpowiednie materiały uszczelniające przepusty z włóknem szklanym lub tzw. elektroniczne odstraszacze gryzoni. Aparatura taka, pracująca na zasadzie ultradźwiękowej, opracowana w PIAP, jest obecnie stosowana w wielu magazynach.

9. UKŁADY AUTOMATYCZNEJ REGULACJI TEMPERATURY

W warunkach klimatycznych Polski sterowanie mikroklimatem w magazynach płaskich materiałów ziarnistych, okopowych oraz warzyw i owoców polega na wentylacji produktów powietrzem atmosferycznym. Odbyna się ona w określonych porach roku, miesiącach oraz w niektórych godzinach dnia i nocy. Czynione są również próby wentylacji niektórych komór w elewatorach zbożowych.



Rys. 67. Struktura systemu programowanego [19]

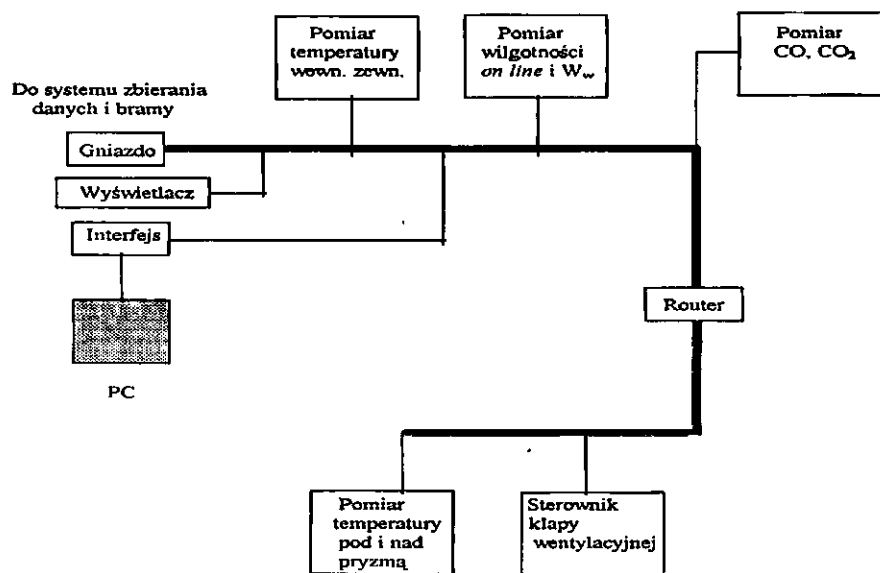
Do sterowania wentylacją stosowane są autonomiczne układy automatycznej regulacji – UAR, a także systemy programowe współpracujące z systemami monitorowania jak to przedstawiono na rys. 67. W stosunku do struktury przedstawionej na rys. 4. system rozbudowany jest o komputer lub sterownik PLC bezpośrednio oddziaływujący na urządzenia

wykonawcze. Ostatnio sterowniki PLC zastępuje się wieloprocessorowymi sterownikami typu *gateway*. Wcześniej opracowano układy autonomiczne współpracujące z układami i systemami monitorowania [38, 68]. Kilka takich układów zostało zainstalowanych w magazynach płaskich. W skład układów weszły nowe automatyczne zawieradła regulacyjne specjalnie opracowane do tych aplikacji.

W celu utrzymania zadanych temperatur przechowywanych produktów (ziarna itp.) należy mierzyć szereg parametrów, a mianowicie:

- * temperaturę przechowywanych materiałów,
- * temperaturę powietrza nad materiałem,
- * wilgotność produktów,
- * wilgotność powietrza wentylacyjnego nad i pod przyzmą,
- * temperaturę powietrza wentylacyjnego pod przyzmą
- * temperaturę powietrza na zewnątrz magazynu,
- * prędkość przepływu powietrza wentylacyjnego,
- * intensywność procesów metabolicznych przez pomiar CO, CO₂, zawartości alkoholu itp.

Współzależność tych wielkości i ich wartości wynikają z technologii przechowywania, okresów magazynowania, rodzaju i gatunków produktów itp. i są omówione w wielu publikacjach [27, 35, 57].



Rys. 68. Kanał doświadczalny zestawu Lon Works [14]

Nowym rozwiązaniem jest przedstawiona na rys. 68 autonomiczna stacja rozproszona wchodząca w skład sieci neuronowej. Takich stacji może być kilkadziesiąt. System doświadczalny składa się z bloków Lon Works control Network firmy Echelon, USA [14, 43]. Sterowanie dużej liczby klap wentylacyjnych przez stacje rozproszone odciąża komputer systemu i upraszcza przepływ sygnałów. Sygnały mogą być prowadzone skrętką dwuprzewodową, a także siecią energetyczną i innymi mediami. Przez router kanał jest połączony z bramą do sieci PROFIBUS. Badania zestawu doświadczalnego potwierdziły ogromne możliwości funkcjonalne systemu złożonego z bloków i urządzeń Lon Works. Pochodzą one już z ponad 100 firm na świecie. W jednej sieci transmisyjnej mogą bezzakłócenowo pracować różne grupy urządzeń z własnymi sterownikami komunikując się ze sobą. Systemy neuronowe będą mogły w przyszłości być stosowane w magazynach zbożowych i innych produktów w zależności od pozyskanych środków na modernizację obiektów. W niniejszej pracy ograniczono się tylko do badań nowo opracowanych zawierań regulacyjnych, które niezależnie od rodzaju systemu monitorowania i sterowania pełnią funkcję wykonawczą.

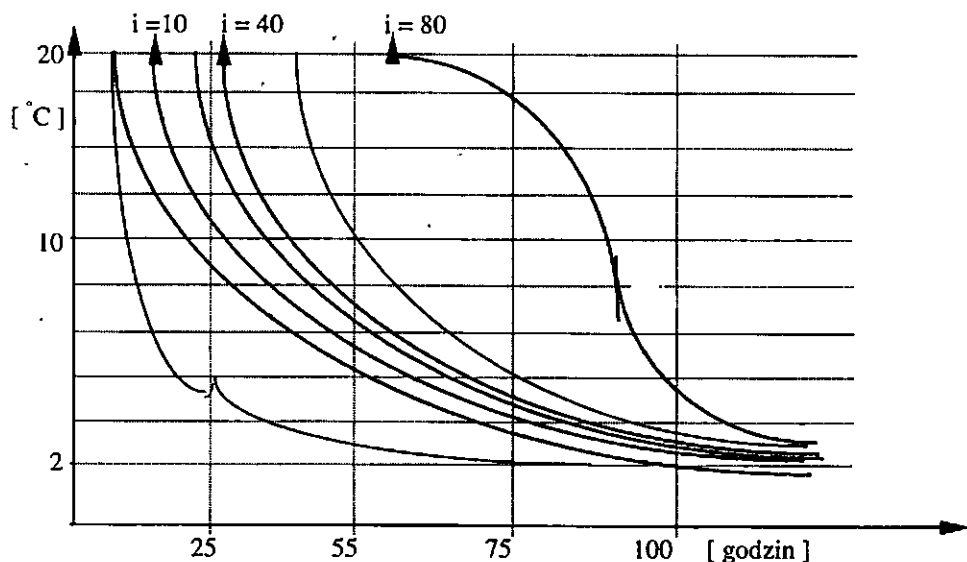
9.1. Charakterystyki skokowe i częstotliwościowe

Algorytm sterowania obejmuje regulację P, PI i PID. Obiekt jest inercyjny, o długiej stałej czasowej, zależnej od kształtu i rodzaju magazynu. Identyfikacja obiektu prowadzona była w połowie lat 70. Powstały modele matematyczne, które były podstawą do badań symulacyjnych i obiektowych [30]. Na tej podstawie opracowano specjalistyczną aparaturę regulacyjną. Dalszy etap polegał na stosowaniu aparatury uniwersalnej, a prace projektowe polegały na jej doborze. Ponieważ spełnienie założonych procedur regulacyjnych części centralnej UAR wymaga odpowiedniego zaprogramowania sterownika PLC lub zespołu PC i dobór elementów, w dalszej części pracy będzie to pominięte jako zagadnienia znane. Przedstawione zostaną natomiast metody identyfikacji obiektu oraz rezultaty prac dotyczące elementów wykonawczych.

Większość obiektów przemysłowych to obiekty szybkozmiennne i wolnozmiennne. Czas zwłoki wynosi od kilku sekund do kilku godzin. Wyznaczanie charakterystyk skokowych i charakterystyk częstotliwościowych prowadzi się odpowiednią aparaturą, np. w PIAP analizatorem przebiegów dynamicznych – *Process response analyser*. Niestety aparatura ta nie jest on przydatna do obiektów z tak dużą inercją. Dlatego nawią-

zono współpracę z Niemiecką Akademią Nauk i z Instytutem Mechanizacji Rolnictwa w Poczdamie, gdzie przeprowadzono pierwsze badania identyfikacyjne magazynów rolniczych [24, 37, 38].

Charakterystykę czasową wyznaczono dla pryzmy doświadczalnej złożonej z wielu warstw, w których znajdują się czujniki temperatury. Początkowo pryzma nie była wentylowana i miała temperaturę otoczenia rzędu 20°C . Następnie skokowo włączono wentylację skierowując powietrze od warstwy dolnej 1 do n. Powietrze wentylacyjne powinno mieć temperaturę nie niższą niż o 5°C w stosunku do temperatury w dolnej warstwie, ponieważ niższe temperatury mogłyby powodować tzw. przeziębienie produktu i jego niszczenie. Wilgotność powietrza wynosiła 80%. Z wykresu przedstawionego na rys. 69 wynika, że stopniowo wszystkie warstwy ulegają ochłodzeniu. W pierwszej warstwie, bezpośrednio narażonej na oddziaływanie powietrza wentylacyjnego, występuje silne odparowanie wody. W wyższych warstwach występuje pobieranie wilgotności z powietrza wentylacyjnego. Widoczne zakrzywienia w charakterystykach temperaturowych są wynikiem efektu psychrometrycznego. Dla pryzmy doświadczalnej czas opóźnienia dochodzi do ok. 20 godzin. W rzeczywistych obiektach jest on znacznie większy, w zależności od masy wentylowanego ziarna.



Rys. 69. Przebieg zmian temperatury w przewietrzanej warstwie ziarna pryzmy przy skokowym załączeniu powietrza wentylacyjnego (wg badań autora) [24]

Charakterystykę częstotliwościową wyznaczono dla kilku przepływów powietrza rzędu $60 \text{ m}^3/\text{t, h}$. Powietrze wentylacyjne o tych samych parametrach, jak przy wyznaczaniu charakterystyki skokowej, zmieniano w funkcji cosinusoidalnej (rys. 70), w celu zapewnienia maksymalnego przepływu, rejestrując temperaturę w poszczególnych warstwach. Sprawdzano również rozptył powietrza. W celu umożliwienia obserwacji, powietrze było domieszkowane radioaktywnym jodem i innymi środkami koloryzującymi.

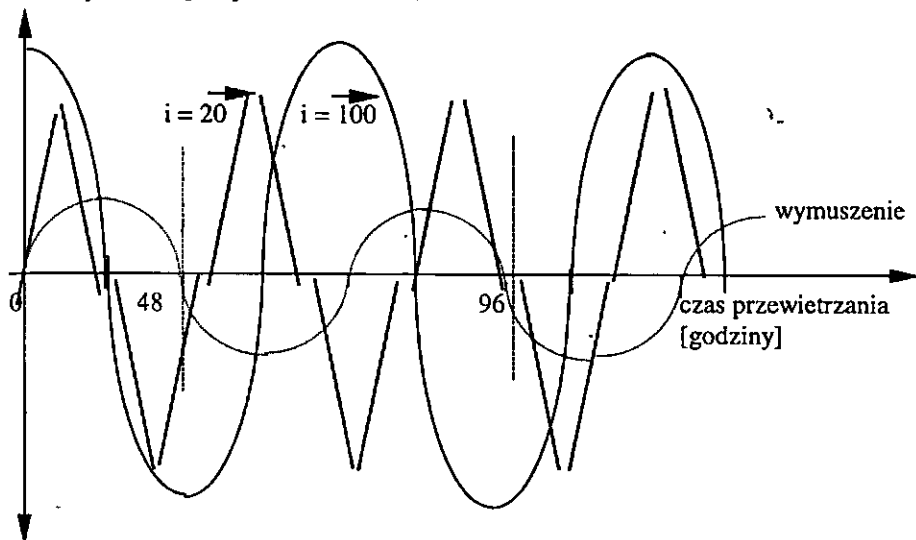
W przebiegach przedstawionych na rys. 70 jest widoczna asymetria przebiegu temperaturowego między wzrostem charakterystyki temperaturowej a jej spadkiem. Przyczyną jest zjawisko kondensacji pary wodnej. Przesunięcie fazowe ostatniej obserwowanej warstwy wynosi ponad 20 h. Przy zmniejszonym strumieniu powietrza występuje zmniejszenie amplitudy przebiegów wymuszonych tym silniejsze, im zwiększa się odległość od warstwy dolnej (1).

9.2. Zawieradła regulacyjne

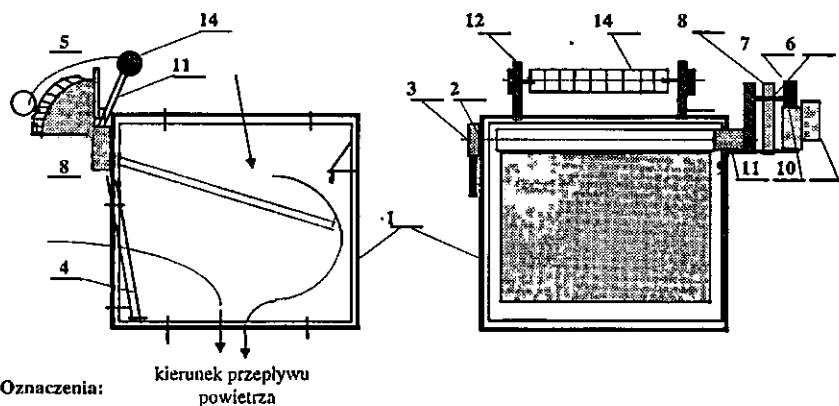
Do zawieradeł regulacyjnych zalicza się kłapy wentylacyjne, przepustnice, zasuwę a także żaluzje. Założoną i stałą temperaturę powietrza wentylacyjnego otrzymuje się mieszając w odpowiednim stosunku powietrze atmosferyczne (na zewnątrz magazynu) z powietrzem tworzącym mikroklimat wewnątrz. Realizacja praktyczna polega na sterowaniu położeniem zawieradeł regulacyjnych, doprowadzających powietrze wejściowe do wentylatorów.

Od zawieradeł wymaga się spełnienia następujących funkcji i rozwiązań konstrukcyjnych szczelności zamykania otworów wentylacyjnych, niezawodnego ustawienia w każdym położeniu regulacyjnym, izolacji termicznej między powietrzem zewnętrznym i wewnętrznym magazynu, zdalnego sterowania ręcznego i w układzie UAR, w zespole sterownik-zawieradło elektryczny sygnał wejściowy powinien spowodować ściśle określone położenie zawieradła, sterowania ręcznego w przypadku uszkodzenia własnego napędu, samohamowności w przypadku zaniku sygnału sterującego lub przerwy w zasilaniu, odporności na warunki pracy w magazynie tzn. w dużej wilgotności względnej do 92 %, odporności na drgania i wstrząsy mechaniczne spowodowane pracą sprzęgniętych z kłapami wentylatorów, odporności na wysokie zapylenie środowiska itp., energooszczędności napędu.

temperatura powietrza
warstwy ziarna [$^{\circ}\text{C}$]



Rys. 70. Przebieg zmian temperatury w przewietrzanych warstwach ziarna przy sinusoidalnych zmianach powietrza wentylacyjnego (wg badań autora) [24]



Oznaczenia:

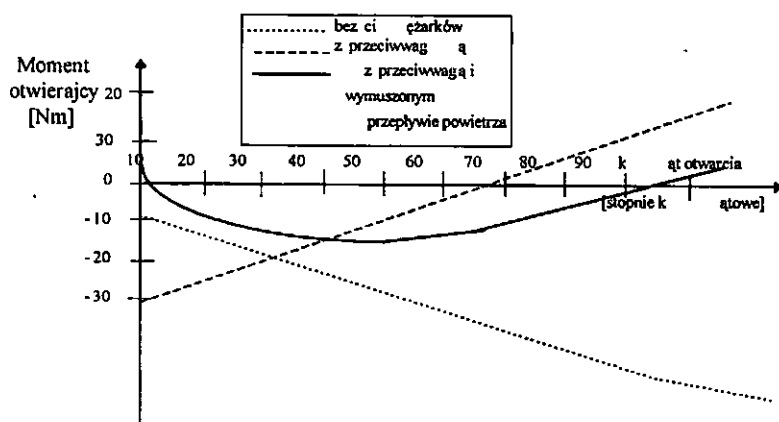
- 1 - klatka
- 2 - łożyska
- 3 - wał
- 4 - kłapa
- 5 - dźwignia
- 6 - uchwyt do ster. ręcznego
- 7 - sprężyna

- 8 - grzebień zębaty
- 9 - wspornik siłownika
- 10 - siłownik
- 11 - dźwignia siłownika
- 12 - wieszak
- 13 - pręt
- 14 - ciężarki

Rys. 71. Kłapa wentylacyjna z napędem elektrycznym (wg badań autora) [114]

Na podstawie powyższych wymagań opracowano dokumentację i wykonano klapę wentylacyjną (przepustnicę powietrza), której badania pełne przeprowadzone w IBMER. Badania wypadły pozytywnie. Kilka tego typu klap zostało zainstalowanych w obiektach magazynowych i w ciągu długiego okresu pracy nie stwierdzono nieprawidłowości w ich działaniu.

Konstrukcja klapy jest następująca (rys. 71): w stalowej klatce (obudowie) jest osadzony wał na łożyskach tocznych. Do wału przymocowana jest klapa prostokątna (4), złożona z dwóch blach aluminiowych, wewnątrz których znajduje się warstwa termoizolacyjna. Na wale osadzona jest dźwignia uruchamiająca klapę (5), zakończona uchwytem do napędu ręcznego z zapadką (6) i sprężyną (7). Do klatki jest zamocowany grzebień zębaty (8) i wspornik napędu. Klapę o wymiarach gabarytowych 1 m x 1 m napędza elektryczny siłownik małogabarytowy wahliwy, wyposażony w silnik Ferrarisa o $P = 6$ W, sterowany bezpośrednio z sieci wg koncepcji autora [114] oraz przez sterownik typu ADF [28-34]. Ponadto w siłowniku zastosowano bezstykowy-indukcyjny nadajnik położenia korby w celu zwiększenia jego żywotności i odporności na wysoką wilgotność. Na wale siłownika (10) osadzona jest dźwignia (11) zakończona nacięciem widełkowym do zazębienia z zapadką (6) i z klapą. Przestawienie z napędu ręcznego na siłownikowy wymaga więc zmiany położenia zapadki, którą przeprowadza się w sposób technicznie prosty. Ciężar klapy jest zrównoważony za pomocą dobieranych ciężarków (14) w celu zmniejszenia momentu koniecznego do napędu klapy. Zastosowanie zrównoważenia przeciwwagą umożliwiło zastosowanie małego siłownika zasilanego z sieci jednofazowej zamiast wcześniej projektowanego napędu z siłownikiem trójfazowym o mocy 1500 W. Zysk energetyczny jest tu oczywisty. Sterownik i napęd zapewniają ściśle odwzorowanie sygnału wejściowego, którym jest zunifikowany sygnał stałoprądowy. W zależności od wartości tego sygnału klapa ustawiona jest w odpowiednim kątowym położeniu.



Rys. 72. Przebieg momentu otwierającego klapę wentylacyjną (wg badań autora)

Na rys. 72 przedstawiono przebieg momentu otwierającego klapę wentylacyjną bez ciężarków, ze zrównoważoną przeciwwagą oraz z tą przeciwwagą i z wymuszonym przepływem powietrza. Przebieg wymuszony powietrza jest wytwarzany przez wentylator umieszczony na klapie wentylacyjnej lub w jej pobliżu [32].

Z przedstawionych przebiegów widać wyraźnie zmniejszanie się momentu otwierającego klapę przy zastosowaniu ciężarków i wymuszonego obiegu powietrza. Wpływa to na poprawność działania oraz na oszczędności energii elektrycznej, zużywanej do napędu jednej tylko kłapy. Licząc, że w magazynie średniej wielkości zainstalowanych jest kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt kłap, oszczędność energetyczna będzie już wyraźnie widoczna.

Podsumowanie

Zawierała regulacyjne stanowią bardzo istotny element UAR i, niezależnie od struktury UAR, powinny spełnić przedstawione wymagania. Napęd elektryczny zawierał regulacyjnych, przeznaczonych do magazynów na produkty sypkie i ziarniste, jest znacznym odbiornikiem energii elektrycznej i dlatego konstrukcja kłap powinna być tak wykonana zgodnie z ww. przykładem, aby spełnić wymaganie energooszczędności.

10. KOSZTOWO ZORIENTOWANE PROJEKTOWANIE SYSTEMÓW MONITOROWANIA

Projektowanie systemów monitorowania oraz specjalistycznych, elastycznych sond temperatury jest zagadnieniem, któremu poświęca się ostatnio wiele uwagi. Przy znacznej konkurencji na rynku szansę przetrwania mają producenci, którzy potrafią się elastycznie dostosować do reguł rynkowych. Strategia ta uwzględnić musi odpowiedni zysk dla producentów oferujących wyroby spełniające najnowsze wymagania normatywne, a zwłaszcza wymagania w zakresie jakości i bezpieczeństwa pracy w atmosferze zagrożonej wybuchem.

10.1. Efektywność wprowadzania systemów monitorowania w elewatorach

W elewatorach, w których nie ma jeszcze zainstalowanych systemów monitorowania temperatury dokonuje się okresowo profilaktycznych przerzutów ziarna z komory do komory. Nawet jeśli elewator ma urządzenia do aktywnej wentylacji, to bez pomiaru temperatury i wilgotności nie można określić potrzebnego czasu wietrzenia powietrzem atmosferycznym. Przerzuty zboża oraz aktywna wentylacja są procesami technologicznymi wysoce energochłonnymi, dlatego powinny być stosowane z pełnym uzasadnieniem wynikami odpowiednich pomiarów. Niestosowanie tych zasad powoduje straty w zużyciu energii elektrycznej, gazu, paliw itp. a także w magazynowanym produkcie.

Po wprowadzeniu systemów monitorowania poprawiają się warunki magazynowania. Można również składować ziarno o większej wilgotności niż jest dopuszczone do magazynowania w elewatorach bez kontroli temperatury. Według szacunku Centralnego Laboratorium - CLTPiPZ, po wprowadzeniu systemów monitorowania dopuszcza się składowanie ziarna o wilgotności kilka procent większej niż to wynika z aktualnie obowiązujących technologii przechowywania.

Obliczenia efektywności przeprowadzono dla bardzo ostrożnego zwiększenia wilgotności składowanego ziarna tylko o 1 % [13]. Wykonano je w 1995 r. (z udziałem autora) i zaktualizowano w 1999 r. (przez

autora). Obecnie zmieniły się wartości kosztów energii i paliw w większym stopniu niż relacje między nimi. Wynik obliczeń ma jednak wartość poglądową. Oszczędności wynikła z magazynowania ziarna o wilgotności większej o 1 % odniesiono do zmniejszonego zużycia energii elektrycznej i obniżonego zużycia oleju napędowego.

Przykład

Przyjęto następujące założenia cenowe:

- * Cena 1 Mg zboża: 520 zł
- * Ilość elewatorów w których należałoby wprowadzić systemy monitoringu: 120
- * Średnia wielkość elewatora: 30 tys. Mg,
- * Ilość zboża przechowywanego przez elewatory w skali roku 3 600 Gg
- * Cena 1 kWh = 0,3 zł
- * Cena 1 litra oleju napędowego = 2,0 zł
- Ubytek naturalny ziarna zbóż (rozkurcz) wynikający z profilaktycznego przerzutu wynosi ok. 0,014 % masy składowanego ziarna, co przy średnio 3 przerzutach daje:

$$3 \times 0,014 = 0,042 \%$$

$$600 \text{ Gg} \times 0,042 \times 10^{-2} = 1,512 \text{ Gg}$$

w przeliczeniu na zł.

$$\text{Mg} \times 520 \text{ zł} / 1 \text{ Mg} = 786\,240 \text{ zł.}$$

- Zwiększenie ilości zanieczyszczeń w ziarnie w wyniku przerzutów szacowane jako

$$0,34 \% \times 3 \text{ przerzuty} = 1,02 \%$$

$$600 \text{ Gg} \times 1,02 \times 10^{-2} = 36,72 \text{ Gg}$$

- w przeliczeniu na zł.

$$720 \times 520 = 19\,094\,400 \text{ zł.}$$

- Możliwość podwyższenia wilgotności składowanego ziarna o 1 %, (oszczędności wynikające z mniejszego zużycia oleju napędowego szacowane na 1,8 litra / Mg). Średnio zużywa się 11 litrów oleju napędowego na 1 Mg wysuszonego ziarna o wilgotności o 6 % mniejszej np. z 20 % do 14 %):

$$600\,000 \times 1,8 = 6\,480\,000 \text{ litrów}$$

w przeliczeniu na zł.

$$480\,000 \times 2,0 = 12\,960\,000 \text{ zł.}$$

- Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej na przerzuty wewnętrzne magazynu (przy założeniu kWh na 1 Mg ziarna dla 3 przerzutów):

$$600\,000 \times 3,14 \times 3 = 33\,912\,000 \text{ kWh}$$

w przeliczeniu na zł.

$$912\,000 \times 0,3 = 10\,173\,000 \text{ zł}$$

- Łączne roczne efekty ekonomiczne dla założonej ilości elewatorów (1+2+3+4) $240 + 19\,094\,400 + 12\,960\,000 + 10\,173\,000 = 43\,013\,640 \text{ zł.}$
- Roczny zysk w przeliczeniu na jeden elewator
 $43\,013\,640 : 120 = 358\,447 \text{ zł.}$

Zysk ten jest wysoki mimo, że jest liczony bardzo ostrożnie i wynika z dopuszczenia do przechowywania ziarna o wilgotności większej tylko o 1%. W rzeczywistości zysk ten może być jeszcze większy, zwłaszcza jak się weźmie pod uwagę obniżenie zagrożenia wybuchowego i skutki ewentualnej eksplozji. Zwrot kosztów na zakup systemu monitorowania oraz jego zainstalowanie, szacowanych na ok. 500 000 zł, powinien nastąpić w ciągu 2 lat.

10.2. Minimalizacja kosztów produkcji sond temperatury

Elastyczne sondy temperaturowe wykonywane są do konkretnego zastosowania w elewatorach zbożowych. Pod względem elektrycznym ich konstrukcja nie przedstawia zasadniczych problemów. Wytrzymałość mechaniczna sond jest wielokrotnie wyższa niż produkowane o tej samej średnicy kable energetyczne. Problemy techniczne ich wytwarzania zostały już rozwiązane. Pozostaje zagadnienie minimalizacji kosztów produkcji, a następnie eksploatacji sond. Można je rozpatrywać analogicznie jak przy analizie projektowania elementów maszynowych i koncepcji metody *Target costing* [18]. Klasyczna i rynkowa filozofia w stosunku do wyrobu przedstawiona jest w tabl. 12.

<i>Filozofia Klasyczna</i>	<i>Filozofia Rynkowa</i>
⇓	⇓
Inwestycje	Strategiczna cena rynkowa
⇓	⇓
Koszty własne	Długoterminowe koszty własne
⇓	⇓
Cena rynkowa	Inwestycja

Tabela 12. Klasyczna i rynkowa filozofia rozwoju nowego wyrobu

Niezawodność sond może być opisywana przez trwałość zewnętrznej pancerza sondy. Zależy ona również od odpowiedniej konstrukcji nośnej do której zamontowana jest sonda. W koszty eksploatacji sond wchodzi koszty wykonania konstrukcji nośnej oraz jej konserwacji. Zależą one od okresu budowy i eksploatacji magazynu. W starych elewatorach koszty te są wysokie, bo wymagają odpowiednich wzmocnień stropowych nad komorami. W nowszych wytrzymałość stropu jest większa ponieważ inwestorzy już na etapie projektowania magazynu przewidywali montaż sond pomiaru temperatury i innych czujników systemu monitorowania np. czujników pomiaru wysokości.

11. PODSUMOWANIE WYNIKÓW PRACY

Praca ma na celu przybliżenie zagadnień i problemów dotyczących projektowania systemów monitorowania elewatorów zbożowych. Tematyka ta jest istotna dla gospodarki żywnościowej, ponieważ ok. 80 % magazynów nie ma układów pomiarowych, a w pozostałych magazynach układy są przestarzałe i technicznie wyeksploatowane. Zgodnie z wymaganiami normatywnymi obowiązującymi w UE magazyny muszą posiadać systemy monitorowania, ze względu na niższe straty w przechowywalnictwie, lepszą jakość składowanego zboża i mniejsze zagrożenia wybuchowe w elewatorach zbożowych. Dlatego należy już obecnie przystąpić do instalowania odpowiednich systemów monitorowania, ponieważ bezpośrednio wpływają na efektywność ekonomiczną magazynowania. Zainstalowanie systemów monitorowania lub ich brak może poważnie rzutować na polskie aspiracje unijne.

11.1. Porównanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych

W niniejszej pracy przedstawiono układy pomiarowe temperatury ziarna zainstalowane w starszych, małych elewatorach i magazynach płaskich, a także współczesne, wieloparametrowe systemy monitorowania. Porównanie tych układów i systemów między sobą jest ryzykowne, ponieważ dotyczą innego poziomu technicznego wynikającego z ewolucji technicznej. Dlatego analizowano tylko systemy z magistralą przesyłową i z elastycznymi sondami temperatury, które pojawiły się w ostatnich 10 latach.

Zastosowano następujące kryteria wg których oceniano systemy i zastosowane czujniki pomiarowe:

- Porównanie liczby parametrów i wartości metrologicznych systemu.
- Porównanie właściwości metrologicznych i wytrzymałości mechanicznej elastycznych sond temperatury.
- Porównanie wymagań wynikających z zapobieganiu przez system eksplozji w elewatorach.
- Określenie spełnienia wymagań iskrobezpieczeństwa czujników - sond pomiarowych i pozostałych elementów systemu w atmosferze zagrażającej wybuchem.

- Określenia rzeczywistych obciążeń statycznych i dynamicznych elastycznych sond oraz spełnienie założonych wymagań ze szczególnym uwzględnieniem KEM sond i systemu pomiarowego.
- Określenie rzeczywistych wartości inercji temperaturowej sond i porównanie z wymaganiami normatywnymi.
- Ocena wymagań środowiskowych w odniesieniu do sond i czujników pomiarowych.
- Ocena nowoczesności konstrukcji sond na podstawie zastosowanych czujników temperatury.
- Ocena odporności systemu i poszczególnych elementów na przepięcia łączeniowe i atmosferyczne.
- Ocena możliwości współpracy systemu monitorowania z UAR.
- Ocena realizacji zadań informatycznych: przetwarzania, archiwizacji wyników pomiarowych itp.
- Ocena sond temperatury na podstawie przyznanych certyfikatów, oraz przeprowadzonych badań, które były podstawą do ich wydania.
- Ocena efektywności ekonomicznej zakupu sprzętu pomiarowego wchodzącego w skład systemu monitorowania i jego instalacji na obiektach rzeczywistych.

Na podstawie analizy realizacji ww. kryteriów można stwierdzić, że obecnie systemy krajowe, ale także i zagraniczne zainstalowane w kraju nie spełniają wszystkich założeń i wymagań. Wynika to z dostępności do odpowiednich publikacji oraz z tworzenia wymagań normatywnych w ostatnim okresie czasu, jak np. opublikowaniu Dyrektywy ATEX 100A [113] i norm zharmonizowanych. Dlatego zadaniem pracy jest popularyzacja wymagań i możliwość ich wypełnienia w warunkach krajowych. Nowe rozwiązania czujników i optoelektronicznych sond temperatury wybiegają już w przyszłość i stanowią wynik prac teoretycznych i badań podstawowych objętych zakresem projektu badawczego. Wyniki tych prac były już przedmiotem publikacji krajowych i międzynarodowych.

11.2. Podsumowanie wyników poszczególnych rozdziałów

Rozdział 1 i 2 zawiera opis zjawisk fizycznych występujących w przechowywanym ziarnie w elewatorach zbożowych. Zjawiska metabo-

liczne, które towarzyszą składowaniu produktów biologicznych mogą oddziaływać ujemnie na jakość ziarna i okres jego składowania. Stwarzają również zagrożenie wybuchowe. Na podstawie dokumentów międzynarodowych, doświadczeń krajowych oraz badań własnych zostały określone warunki temperaturowe i wilgotnościowe zalecane jako optymalne. Odchylenie od nich prowadzi do zwiększenia strat jakościowych i ilościowych w ziarnie. Zagadnienia te znajdują odbicie w dokumentach normatywnych. Analiza tych dokumentów przeprowadzona również w dalszych rozdziałach pracy wykazuje na konieczność ich korekty i uściślenia.

W rozdziale 3 sformułowano cel i zakres rozprawy. Praca przedstawia zasady projektowania systemów monitorowania temperatury i innych parametrów elewatorów zbożowych. Praca nie jest vademecum projektanta, ale powinna dostarczyć możliwie szerokich informacji w wybranych obszarach projektowania. Spełniając te założenia zaproponowano kilka etapów zawierających zagadnienia identyfikacji obiektu, doboru systemu monitorowania do założonych parametrów oraz określenia metodyki badań rozkładu pól temperaturowych w masie składowanego ziarna. Wymagania iskrobezpieczeństwa elastycznych sond temperatury, ich określenie i badania powinny stanowić jeden z istotnych celów niniejszej rozprawy.

W rozdziale 4 przedstawiono zadania projektowania systemów monitorowania. Struktura systemów zmieniała się wraz z rozwojem systemów i podzespołów systemów (sond). Zadania są wielostopniowe i dotyczą nie tylko systemu ale również otoczenia tego systemu. Dostosowanie obiektu do zabudowy systemu wymaga wykonania wielu zadań budowlano-mechanicznych itp. Dla realizacji sprecyzowanych parametrów systemu wykonano wiele rozwiązań systemowych. Te, które znalazły zastosowanie obiektowe są zaprezentowane jak np. system analogowo-cyfrowy o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych i systemy z magistralą przesyłową. Zaproponowano również procedury projektowania systemów z magistralą, przeznaczonych do elewatorów jako obiektów z zagrożeniem wybuchowym. Wyszczególniono ważniejsze parametry, które charakteryzują elewator jako obiekt z zagrożeniem wybuchowym oraz klasyfikacje dotyczące pyłów i ich stężeń, które precyzuje nowa Dyrektywa międzynarodowa ATEX 100A [113]. Do tych klasyfikacji należy przeprowadzić dobór aparatury pomiarowej. Ustosunkowano się również do wymagań dotyczących tak ważnego parametru jak dokładność i powtarzalność pomiarów.

W rozdziale 5 rozpatrywano teoretyczny przebieg pól temperaturowych w masie ziarna wytwarzany przez źródła samozagrzewania o kształcie trzech podstawowych figur geometrycznych. Przebiegi teoretyczne były następnie porównywane z przebiegami rzeczywistymi. Ich wyznaczenie wymagało przeprowadzenia badań symulacyjnych i obiektywnych. Zastosowano oryginalną metodę pomiarów temperaturowych, orientowanych wiązką laserową, w paśmie podczerwieni. Przedstawiono obraz termowizyjny silosu, wykonany przez autora w instytucie szwedzkim i dyskutowany na konferencjach w Japonii.

W rozdziale 6 opisano konstrukcję sond elastycznych o wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Niektóre rozwiązania sond objęte są ochroną patentową. W sondach zainstalowano miniaturowe czujniki temperatury. Stosowane były czujniki termistorowe, później miniaturowe ($\phi=3$ mm) Pt, Ni, a ostatnio czujniki elektroniczne i przetworniki inteligentne. Opracowano i zamieszczono tabelę czujników elektronicznych z podaniem ich najważniejszych parametrów. Przedstawiono również budowę nowo opracowanych modeli czujników optoelektronicznych i zasady ich budowy oraz oryginalne stanowisko termostatyczne do wyznaczenia charakterystyk temperaturowych z ogniwem Peltiera. Obecnie wyznacza się na nim charakterystyki większości czujników miniaturowych, tzn. metalowych, elektronicznych i optoelektronicznych. Dla sond opracowano zestawienie wymagań, które powinny one spełniać. Zwrócono szczególną uwagę na wymagania mało spopularyzowane, np. wymagania iskrobezpieczeństwa i wymagania KEM.

Rozmieszczenie czujników temperatury w elewatorze i w sondzie było przedmiotem analizy na podstawie spodziewanego rozkładu pól temperaturowych w masie ziarna. Zaproponowano oryginalną metodę rozmieszczenia czujników. Kilka lat po tej propozycji znalazła ona uznanie w zespołach opracowujących normę ISO i została w niej zamieszczona. Obecnie uściślono położenie pierwszego i ostatniego czujnika w sondzie w zależności od kształtu komory elewatora. Do tego celu wykorzystano wyniki badań w paśmie podczerwieni.

Rozdział 7 poświęcono badaniu sond temperatury. Są to badania specyficzne dla sond przeznaczonych do konkretnego zastosowania w elewatorach zbożowych. Z analiz porównawczych wynikało, że sondy muszą mieć wysoką wytrzymałość mechaniczną spowodowaną tarciem statycznym i dynamicznym ziarna o pancerz zewnętrzny sondy. Opracowano stanowisko tensometryczne do badań rzeczywistych sił występujących w zawieszonych sondach i przeprowadzono badania sił rzeczywi-

stych. Określono również wartość analityczną tych oddziaływań statycznych. Publikacje amerykańskie, które pojawiły się w ciągu ostatnich 6 lat podały po raz pierwszy znacznie precyzyjniejsze zależności siły w funkcji odległości zawieszenia sondy od osi symetrii. Autor spróbował zweryfikować otrzymane zależności przeprowadzając własne badania na obiekcie rzeczywistym. Okazało się, że na wartość siły oddziaływującej na sondę ma znaczny wpływ wilgotność ziarna. Po wprowadzeniu modyfikację wzoru Rossa, wprowadzeniem odpowiedniego współczynnika, otrzymane wyniki zbliżyły się do wartości rzeczywistych. Szczegółowe wnioski z tych badań znajdują się na zakończeniu ich cyklu.

Wzorcowanie sond wymagało stworzenia stanowiska pomiarowego. Zaproponowano badania w komorze termostaticznej. Szczegółowe badania wykazały nierównomierny rozkład pola temperaturowego w przestrzeni probierczej komory, który może spowodować dodatkowe błędy kalibracji. Na podstawie badań dwoma typami przyrządów: miernika temperatury z czujnikiem Pt 100 oraz miernika bezdotykowego pracującego w paśmie podczerwieni wyznaczono optymalną przestrzeń, w którym błędy te są najmniejsze.

Kolejne oryginalne badania dotyczyły bezwładności cieplnej sond. Odwzorowanie rzeczywistej temperatury przez sondy wymaga długiego czasu ustalenia temperatury mierzonej. Czas ten wynika z budowy sondy i ze stosowanych materiałów konstrukcyjnych sondy. Wyjaśnienie bezwładności poprzedzone zostało opracowaniem metod pomiarowych i wykonaniem stanowisk laboratoryjnych. Bezwładność sond nie jest cechą szkodliwą, ponieważ w porównaniu z parametrami obiektu może być pomijalna. Tam jednak, gdzie system monitorowania współdziała z UAR, bezwładność cieplna sondy musi być uwzględniana na etapie projektowania sterowania. Na podstawie przeprowadzonych w niniejszej pracy badań poznawczych można stwierdzić, że istnieje konieczność korekty normy międzynarodowej ISO w zakresie wymagań wartości tego parametru. Wnioski znajdują się w tekście na zakończeniu tego cyklu badań.

Badania środowiskowe sond mają na celu dopuszczenie sond do pracy w styczności z produktem spożywczym, jakim jest ziarno zbóż. Wartość użytkowa tych badań jest oczywista i powinny to być badania obligatoryjne. Metoda badań przedstawiona w niniejszym rozdziale, może będzie przydatna przy konstrukcji nowych sond elastycznych.

Badania certyfikacyjne iskrobezpieczeństwa sond wymagały współpracy z ZD GIG „Kopalnia Barbara”, gdzie je wykonano. Badania te

są okresowe z ważnością kilkuletnią. Procedury badawcze podano orientacyjnie, ponieważ pozytywne wyniki badań są podstawą otrzymania a następnie przedłużenia atestu. Przedstawienie ich ma na celu ujednolicenia badań elektrostatycznych, które budzą wiele kontrowersji wśród fizyków i elektryków.

Zakłócenia działające na systemy pomiarowe były przedmiotem wielu badań obiektowych. Opisane są one w rozdziale 8. Badania przeprowadzone były za pomocą unikatowego analizatora komputerowego przepięć. Badania wykazały występowanie zakłóceń łączeniowych, które były przyczyną błędnych, przypadkowych wskazań systemu monitorowania. Przedstawiono również metody wyeliminowania zakłóceń, które mogą być przydatne dla projektantów systemów monitorowania.

W rozdziale 9 przedstawiono zadania UAR stosowane do aktywnej wentylacji ziarna zbóż. Układy te obecnie stosowane są sporadycznie. Widać jednak tendencję poszerzenia zastosowań z magazynów płaskich do dużych elewatorów. Dlatego przedstawiono metody i wyniki identyfikacji obiektu. Badania te były prowadzone we współpracy ze specjalistami niemieckimi. Autor odpowiadał za udział polskiego zespołu. Oryginalne charakterystyki skokowe i częstotliwościowe wykorzystano następnie przy budowie UAR, który współpracuje z systemem monitorowania. Na szczególne podkreślenie zasługują opisane, energooszczędne zawieradła regulacyjne stosowane do mieszania powietrza wentylacyjnego przy aktywnej wentylacji. Rozwiązanie konstrukcyjne zawieradeł regulacyjnych jest chronione patentowo. Na zawieradła zostały opracowane wymagania techniczne i założenia energooszczędności.

W rozdziale 10 przeprowadzono analizę ekonomiczną wprowadzenia systemów monitorowania w elewatorach zbożowych. Została ona opracowana we współpracy z technologami przechowalnictwa z CLTPiPZ. Metoda oryginalna w której ocenia się kosztowo możliwość składowania ziarna o wilgotności o 1 % większej niż to jest obecnie stosowane. Okazuje się, że zysk, który tu osiągnięto szybko zrekompensuje koszty poniesione na aparaturę monitorowania i jej instalację i to w ciągu kilku lat. Rozpatrzono również minimalizację kosztów produkcji i eksploatacji elastycznych sond temperatury. Informacje te mogą być przydatne dla projektantów, którzy rozpoczynają działalność w obszarze aparatury pomiarowej w przemyśle spożywczym.

11.3. Uwagi końcowe

Do zasadniczych rezultatów tej pracy można zaliczyć opracowanie:

- * ważniejszych zagadnień projektowania systemów monitorowania z magistralą przesyłową: struktur, wymagań, odporności, procedur projektowania, współdziałania z systemami UAR oraz kompletacji elementów systemu,
- * wymagań, konstrukcji i zakresu badań, oraz wykonanie unikatowych stanowisk badawczych elastycznych sond temperatury,
- * zależności analitycznych zweryfikowanych badaniami doświadczalnymi i na obiekcie rzeczywistym dotyczących oddziaływań mechanicznych na elastyczne sondy temperatury, określenie ich inercji temperaturowej, wpływu środowiska,
- * wymagań wynikających z nowych Dyrektyw Unijnych dotyczących aparatury pomiarowej przeznaczonej do pracy w warunkach zagrożenia wybuchowego,
- * wymagań dotyczących KEM,
- * uzasadnienia ekonomicznego wprowadzenia systemów monitorowania w elewatorach oraz kosztowo uzasadnionego projektowania sond temperatury i ich eksploatacji,
- * propozycji kierunku dalszych prac rozwojowych dotyczących sond światłowodowych z czujnikami optoelektronicznymi.

O wartościach poznawczych świadczą uzyskane rezultaty oraz ich analiza i dyskusja na zakończeniu poszczególnych rozdziałów. Główne wartości poznawcze w zakresie analizy zjawisk, wyników badań, nowych koncepcji są podane w punktach: 5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 6.4, 6.4, 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 8.2, 9.1, 9.2.

Na użyteczność wykonanych prac wskazują następujące okoliczności:

- * zostały zaproponowane nowoczesne struktury systemów monitorowania, które spełniają wymagania dokumentów normatywnych i spełniają wymagania użytkowników, przedstawione w punktach: 4.4, 4.8, 6.1, 7.1, 7.5, 8.3, 10.1, 10.2,
- * opracowano nowe konstrukcje wysokowytrzymałych elastycznych sond temperatury, energooszczędnych zawieradeł regula-

cyjnych, przedstawionych w rozdziałach 6 i 9, oraz nowe czujniki optoelektroniczne, których celowość zastosowania w sondach wykazano w punkcie 7.1.

- * opracowano unikatowe stanowiska do kilku badań czujników i wieloczujnikowych sond elastycznych, które są przedstawione w punktach 6.5 i 7.2.
- * opracowano pakiety programów komputerowych systemów monitorowania, które mogą być użyteczne w dalszych aplikacjach, punkt 4.6.
- * opracowano nowe procedury projektowania systemów monitorowania w aspekcie ich zabudowy na obiekcie, punkty 4.6, 4.7.
- * w niniejszej monografii wykorzystano ważniejsze rezultaty szeregu prac autora dotyczące systemów pomiarowych i automatycznej regulacji przedstawione w tabl. 13.

Tabela 13. Wykaz prac autora dotyczących systemów pomiarowych i automatycznej regulacji z których cytowane są ważniejsze rezultaty

Lp.	Nazwa pracy	Udział autora	Instytucja opiniująca, wdrażająca
1.	Systemy blokowe: ASKANIA, USB-60, URS	Stanowiska badawcze części wykonawczej i przetwornikowej	PIAP, ZAP, IASE, ELWRO
2.	Systemy modułowe: SIEMENS, HONEYWELL	Stanowiska badawcze części centralnej Stanowisko do badań dynamicznych Uruchomienie systemów na obiekcie Montaż w fińskich papierniach	PIAP, MERA /nagroda Min.PC./ /nagroda Mł.Mistrza Techniki/
3.	System ROM	Opracowanie 8 bloków i koncepcja systemu	PIAP, H.CEGIELSKI, ZAP WITPiS /Nagroda MON/
4.	System POLMATIK	Dobór czujników, konstrukcja przetworników i elementów wykonawczych	PIAP, ZAP, KFAP, CN, PZZ, IBMER /2 nagrody Min.Rol, L.i G.Ż./ /nagroda RWPG/
5.	System magistralowy TELETERM MC	Koncepcja systemu, opracowanie elastycznych sond, badania obiektowe	ZAP, IBMER, TECHNOMONT /wdrożenia w ok. 25 PZZ/
6.	System magistralowy METROTERM „DAC-20”	Koncepcja systemu, opracowanie dwuwarstwowych sond, montaż na obiekcie	PIAP, PZZ, CLTPIPZ, KBN
7.	System magistralowy METROTERM „DAC-30Ex”	Koncepcja systemu do obiektów zagrożonych wybuchem, opracowanie sond iskrobezp., badania obiektowe	PIAP, KBN, MASTER FOODS /dyplom IMEKO/
8.	System magistralowy Advantach „ADAM”	Opracowanie struktur i programów komputerowych	PIAP, PZZ
9.	System magistralowy MTL „831,838B”	Dobór i dostosowanie bloków systemu do sond z atestem iskrobezpieczeństwa	PIAP, PZZ, KBN ZD KDB-GIG
10.	System transportu wewnętrzznego	Współpraca w opracowaniu zrobotyz. stanowisk, zastosowanie syst. neuron.CIM	IMRC-PW, PAN

12. LITERATURA

- [1] Bulisiewicz T., Matzke W., Smaryński E., Świątek H.: *Magazynowanie ziarna zbóż, nasion strączkowych i oleistych*, WNT, Warszawa 1975.
- [2] Bock W. J., Urbanczyk W.: *Selected application of fibre-optic sensors based on highly birefringent fibers*, Application of Photonics Technology, G.A. Lampropoulos et al., Plenum Press, New York, str 315-316, 1996.
- [3] Ciećko Z. i in.: *Ocena jakości i przechwalnictwo produktów rolnych*, ART, Olsztyn 1993.
- [4] Chotkowski J., Szyszło J.: *Produkcja roślinna, technologia przechwalnictwa zbóż, ziemniaków i pasz*, Fundacja Rozwoju SGGW, Warszawa 1994.
- [5] Cleaveland P.: *Temperature monitoring and control: What's hot, what's not?*, Ia.CS nr 6, 1987.
- [6] Chwaleba A., Pomiński M., Siedlecki.: *Metrologia elektryczna*, WNT, Warszawa 1994.
- [7] Długoszewski B. i in.: *Pomiary cieplne*, WNT, Warszawa 1993.
- [8] Elias M.C., Strach S.J.: *OSNET™ - an engineered fibre-optic sensing system for industrial applications*, Ind. Journal of Optoelectronics, Vol. 6 nr 1/2, 1991.
- [9] Fornal Ł., Majewska K., Gudaczewski W., Kobosko A.: *Jakość technologiczna ziarna z górnej i dolnej warstwy komory przechwalniczej*, Przegląd Zbożowo-Młynarski XLII(4): 6-8, 1998.
- [10] Fornal Ł., Majewska K., Gudaczewski W., Kobosko A.: *Jakość technologiczna ziarna pszenicy w czasie przechowywania*, Biuletyn Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie nr. 4, 1998.
- [11] Frączek J.: *Aparatura przeciwwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym*, Katowice 1995 ŚWT.
- [12] Frączek J.: *Rozwój normalizacji w zakresie przeciwwybuchowości spowodowany wprowadzeniem nowej dyrektywy Unii Europejskiej*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 12, 1997.
- [13] Górniak W.: *Opracowanie systemu pomiaru temperatur w komorach elewatora*, Wyd. Centralnego Laboratorium Technologii Przetwórstwa i Przechwalnictwa Zbóż, str. 25, 1985.

- [14] Goszczyński T., Jaszek M.: *Zestaw sieci Lon Works o zdecentralizowanej inteligencji do pomiarów i sterowania*, Konf. nt.: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle - WSI, str. 79-88, Zielona Góra 1996.
- [15] Grzesiuk S., Górecki R. i inni (praca zbiorowa): *Fizjologia plonów. Wprowadzenie do przechowalnictwa*, Wydawnictwo ART, Olsztyn 1994.
- [16] Horabik J.: *Wpływ właściwości mechanicznych ziarna pszenicy na rozkład obciążenia w zbiorniku*, Acta Agrophysica nr 1, Wyd. Inst. Agrofizyki-PAN, 1994.
- [17] Iida O., Iwamura T., Yamamoto S.: *Expansion of measurement range of a fibre-optic distributed temperature sensor and application to commercial plants*, Proceeding of the XIII IMEKO World Congress, Vol. 2, Turyn 1994.
- [18] Jakubczak H.: *Kosztowo zorientowane projektowanie konstrukcji nośnych maszyn*, Problemy Maszyn Roboczych KBM PAN, str 23-29, Z.6.Vol.6, 1995.
- [19] Jakubiec J.: *O pewnych kierunkach rozwoju programowanych przetworników pomiarowych*, ZNPCE-Elektryka, z.165, str. 5-20, Gliwice 1999.
- [20] Kamiński E., Jeleń H., Kobosko A., Wiewiórowska M.: *Ocena mikrobiologiczna ziarna zbóż dostarczonego do punktów skupu w latach 1996, 1997 i 1998 r.*, Biuletyn nr 1 Akademii Rolniczej w Poznaniu i Dodatek w Przeglądzie Zbożowo-Młynarskim 8/99, str. 28-30, 1999.
- [21] Kamiński E., Jeleń H., Kobosko A., Wąsowicz E., Wiewiórowska M.: *Związki lotne wykrywane w ziarnie zbóż po zbiorach*, Biuletyn nr 1 Akademii Rolniczej w Poznaniu i Dodatek w Przeglądzie Zbożowo-Młynarskim 8/99, str. 30-32, 1999.
- [22] Kamiński E., Jeleń H., Kobosko A., Wiewiórowska M.: *Badanie składu mikroflory przechowywanego ziarna zbóż*, Biuletyn nr 1, Akademii Rolniczej w Poznaniu i Dodatek w Przeglądzie Zbożowo-Młynarskim 8/99, str. 25-27, 1999.
- [23] Kamiński M., Zubrzycki M.: *Badania sił działających na przewody odciążające w silosach*, Inż. i Bud., nr 8, 1980,
- [24] Kaul P., Maltry W., Muller H., Winter U.: *Wissenschaftliche Grundlagen zur Klimagestaltung in Tierproduktionsanlagen und Lagerräumen*, Akademie Nauk Rolnych, Potsdam, 1975.

- [25] Kobosko A.: *Elektryczny układ automatycznej regulacji w przechowalni ziemniaków*, Konf. w Inst Ziemniaka nt. "Techniczne i technologiczne problemy w przechowalnictwie ziemniaków, 1979.
- [26] Kobosko A.: *Zastosowanie krajowego systemu automatyki i pomiarów w rolnictwie*, Mechanizacja Rolnictwa nr 15, 1979.
- [27] Kobosko A.: *Izmeritielnaja sistema dlja awtomatycznego regulowanija klimata w chraniliszczach sielskochozjajstwiennych produktow*, Konf. CSVTS-RWPG, Praga-Czechosłowacja. Opubl. w pracy pt. "O novych metodach zkousek zemedelskich a lesnickych stroju", 1979.
- [28] Kobosko A.: *Opracowanie i wykonanie przenośnej aparatury do pomiaru temperatury ziarna w zbiornikach metalowych*, Biul. IBMER 1979 nr 5, Biul. SITR nr 10/37, 1980.
- [29] Kobosko A.: *Aparatura kontrolno-pomiarowa w magazynach płodów rolnych*, Mech. Rolnictwa nr 5-6, 1982.
- [30] Kobosko A.: *Wybrane zagadnienia sterowania procesami przechowywania ziemniaków i ziarna zbóż w magazynach rolniczych*, str 149, nakład 100 egz., Wyd. IBMER, Warszawa 1983.
- [31] Kobosko A.: *Measuring systems for controlling atmospheric conditions in grain and potato storages*, Konf. nt. „Mikroprocessors in systems for agricultural applications”, Agr. Univ., As/Oslo-Norwegia 1984.
- [32] Kobosko A.: *Pomiary i regulacja temperatury w przechowalnictwie rolniczym*, Mech. Rolnictwa 1985 nr 8.
- [33] Kobosko A.: *Zdalny pomiar temperatury i wilgotności*, Przegląd Zbożowo-Młynarski nr 4, 1985.
- [34] Kobosko A.: *Układ pomiarowy temperatury do silosów typu SZG-200/400*, Biul. IBMER nr 13, 1985.
- [35] Kobosko A. i in.: *Kontrola warunków magazynowania w przechowalnictwie rolniczym*. Oprac. Stałej Komisji RWPG dot. Automatyzacji i Robotyzacji Rolnictwa, Moskwa, Mat. RWPG, Min. Roln. Leśn. i Gosp. Żywn., IBMER, Warszawa 1986.
- [36] Kobosko A.: *Metody pomiaru temperatury i wilgotności ziarna składowanego w silosach zbożowych*, Mat. z Kraj. Konf. nt. „Aparatura kontrolno-pomiarowa w rolnictwie”. Biul. IBMER nr 6, 1986.
- [37] Kobosko A.: *Temperatur-Messungen in Schuttmaterialien mittelst der Mikroprozessortechnik*, Mat. z Konf.: „Kammer der Technik, Berlin 1986.

- [38] Kobosko A.: *Wybrane układy pomiarowe i automatycznej regulacji stosowane do kształtowania mikroklimatu w magazynach rolniczych*, str. 186, nakład 100 egz., IBMER, Warszawa 1986.
- [39] Kobosko A.: *Program rozwoju elektronizacji automatyzacji i robotyzacji w rolnictwie, leśnictwie i gospodarce żywnościowej*, Mat. z X Krajowej Konf. Automatyki. T. 2. Lublin 1988.
- [40] Kobosko A.: *Zdalny pomiar i regulacja temperatury w materiałach sypkich*. Mat. z X Krajowej Konf. Automatyki, T. 3. Lublin 1988.
- [41] Kobosko A.: *The temperature measuring and registration system for small and large grain storages*. Mat. z VI Symp. „Polioprivredno masinstvo i nauka”. Belgrad, Jugosławia 1988.
- [42] Kobosko A., Jórczak J., Leśkiewicz H.: *Komputerowy system kontroli do elewatorów zbożowych obniżający straty w składowanym ziarnie oraz zmniejszający zużycie energii i paliw*. Mat. z Konf. nt.: „Racjonalizacja użytkowania energii i środowiska”, Poręбка-Kozubnik 1993.
- [43] Kobosko A.: *Metody sterowania komputerowego w aspekcie oceny jakości i diagnostyki na przykładzie zrobotyzowanego stanowiska transportu wewnętrznego*, Referat opublikowany w Materiałach z Seminarium nt. Wybrane zagadnienia automatyzacji i robotyzacji elastycznych systemów transportu wewnętrznego, str.71-75, Wyd. Politechnika Warszawska, Warszawa 1994.
- [44] Kobosko A.: *Computer system of control for the largest grain storages*, Proceed. of the XIII IMEKO World Congress. Vol.3. Turyn 1994.
- [45] Kobosko A., Leśkiewicz H.: *Aparatura kontrolno-pomiarowa dla przechowywania zbożowego*, Biul. PIAP nr 2, 1995.
- [46] Kobosko A., Leśkiewicz H.: *Kontrola składowanego ziarna w magazynach zbożowych*, Cz. I i II Przegląd Zbożowo-Młynarski nr 7 i 8, 1995.
- [47] Kobosko A.: *Accuracy of measurement and vertical loading of temperature cables in grain storages*, Konf. IMEKO pn. „METROMATIKA” i „6-Congreso International de METROLOGIA INDUSTRIAL-CIMI 95”, Saragossa 1995.
- [48] Kobosko A.: *Thermal distribution analyse on material storages realised by noncontact measurement*, Konferencja ISMT II 96, Hayama, Tokyo Institute of Technology-Japonia, str.113-118, 1996.

- [49] Kobosko A., Leśkiewicz H.: *Komputerowy system pomiarowo-kontrolny w magazynach produktów sypkich i ziarnistych*, Konf. nt.: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle-WSI, Zielona Góra 1996.
- [50] Kobosko A.: *Systemy pomiarowo-kontrolne stosowane w magazynach materiałów sypkich i ziarnistych*, Wyd. PIAP, str. 92, nakład 200 egz., 1996.
- [51] Kobosko A.: *System zdalnego pomiaru i rejestracji podstawowych parametrów ziarna zbóż podczas jego magazynowania*, referat wygłoszony i opublikowany w materiałach z Konferencji „AUTOMATION 97” Warszawa, str. 275-279, 1997.
- [52] Kobosko A.: *Computer system for thermal measurement with optoelectronic sensors in grain elevators*, XIV IMEKO World Congress, Tampere-Finlandia, 1997, str.185-190 T.VI, Materiały: CD-ROM i Internet, 1997.
- [53] Kobosko A., Sawicki A.: *Rozkład pola temperatury w komorze termicznych udarów*, referat wygłoszony na XXIX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'97 i opublikowany w materiałach z Konferencji, str. 267-274, Naęczów 1997.
- [54] Kobosko A.: *Monitoring procesów termicznych w atmosferze wybuchowej obiektów przemysłu zbożowego*, Wyd. PIAP, str.67, nakład 100 egz., 1997.
- [55] Kobosko A.: *Komputerowy system METROTERM DAC 20 do monitorowania temperatury w silosach i elewatorach zbożowych oraz iskrobezpieczne sondy pomiarowe temperatury dla tego systemu*, Konferencja KNT „AUTOMATICON 98” Warszawa, str. 6, 1998.
- [56] Kobosko A.: *Systemy monitoringu przeznaczone do obiektów przechowywania produktów zbożowych z zagrożeniem wybuchowym*, referat wygłoszony i opublikowany w materiałach z Konferencji KNT „AUTOMATION 99”, Warszawa, str. 69-81, 1999.
- [57] Kobosko A.: *Monitoring procesów termicznych w składowanych materiałach sypkich*, referat wygłoszony i opublikowany w materiałach z IV Szkoły-Konferencji MWK'99, Rynia k/Warszawy, str. 209-216, t.3, 1999.
- [58] Kobosko A.: *Optoelectronic sensors for protection against grain dust explosions*, Proceedings of XV IMEKO World Congress, CD-ROM, Osaka, Japonia, 1999.

- [59] Kobosko A.: *Systemy monitoringu temperatur do obiektów magazynowych produktów zboż z silnym zapyleniem*, Konferencja KNT „AUTOMATICON 2000” str. 7, Warszawa 2000.
- [60] Kobosko A.: *Monitoring systems for protection against dust explosions*, XVI IMEKO World Congress, Vien 2000, Austria (referat przyjęty do publikacji i do wygłoszenia na Kongresie), Wiedeń, wrzesień 2000.
- [61] Kotarbiński T.: *Elementy teorii poznania, logiki formalnej i metodologii nauk*, Warszawa 1929.
- [62] Kulesza J. i in.: *Pomiary cieplne - Cz. I*, WNT, Warszawa 1993.
- [63] Kusińska E.: *Efect of moisture content of cereal grains layer on pressure distribution on silo wall*, Int. Agrophysics, str.: 199-204, 1998.
- [64] Leśkiewicz H., Kobosko A.: *Aparatura kontrolno-pomiarowa dla przechowywania zbożowego*, Biuletyn PIAP nr 2-178, str.1-37, 1995.
- [65] Leśkiewicz H., Kobosko A.: *Komputerowy system pomiarowo-kontrolny w magazynach produktów sypkich i ziarnistych*, Materiały z KN.: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemśle SP'96-WSI Zielona Góra, PAN, str.143-152, 1996.
- [66] Long D.A.: *Raman spectroscopy*, Mc Graw-Hill, Londyn 1977.
- [67] Łysak J.: *Układ punktów pomiarowych i sposób zdalnego pomiaru temperatury zboża składowanego w komorach spichrzowych*, Biul. CLTPiPZ nr 207, 1977.
- [68] Michalski L., Eckersdorf K.: *Pomiary temperatury*, WNT, Warszawa 1986.
- [69] Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J.: *Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych*, WNT, Warszawa 1981.
- [70] Molenda M., Horabik J., Ross I.J.: *Loads in model grain bins as affected by filling methods*, Trans. of ASAE Vol. 36 Nr 3, 1993.
- [71] Ooms M., Roberts A.W., Johnke B.L.: *The use antidynamic inserts for the control of flow pressures during concentrics and eccentric discharge from grain silos*, Intern. Symp. on Reliable Flow Particulate Solids by The University of Newcastle-Australia. Bergen, 1985.
- [72] Pabis St.: *Suszenie płodów rolnych*, Warszawa PWRiL, 1965.
- [73] Piotrowski J.: *Podstawy metrologii*, PWN, Warszawa 1977.

- [74] Piotrowski J., Rogalski A.: *Półprzewodnikowe detektory podczerwieni*, WNT, Warszawa 1985.
- [75] Pociask U.: *Procedury doboru aparatury pomiarowej do kontroli obiektów o strukturze sieciowej*, Wyd. Politechniki Śląskiej, 1989.
- [76] Romaniuk M.: *Zastosowanie techniki światłowodowej w metrologii*, Mat. z V Konf. , Instytut Lotnictwa, Warszawa 1981.
- [77] Sawicka M., Sawicki A.: *Błędy multiplikatywne i addytywny pod wpływem narazeń*, referat wygłoszony na XXIX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'97 i opublikowany w materiałach z Konferencji, str. 499-506, Nałęczów 1997.
- [78] Stabrowski M.: *Miernictwo elektryczne - cyfrowa technika pomiarowa*, WPW, Warszawa 1994.
- [79] Schwab C.V., Curtis R.A., Thompson S.A., Ross I.J.: *Vertical loading of temperature cables*, Paper No. 89-4002 ASAE/CSAE. Trans. of the ASAE Vol. 34(1), 1991.
- [80] Schwab C.V., Thompson S.A., Williams A., Ross I.J.: *Temperature cable loads comparison between model and full-scale experiments*, ASAE nr 90-4016, 1990.
- [81] Sergunow W.S.: *Distancjonnyj kontrol temperatury ziarna w elevatorach*, Kołos, Moskwa 1977.
- [82] Szaragut T.: *Teoria procesów cieplnych*, PWN, Warszawa 1973.
- [83] Szyszło J.: *Modelowa technologia suszenia i przechowywania ziarna zbóż przeznaczonego na paszę*, Biul. IBMER - CODK nr 13, Kłudzienko 1980.
- [84] Śliz J.: *Wymagania dotyczące urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem pyłów*, Materiały szkoleniowe GIG dot. Dyrektywy 94/9/WE, Katowice 1999.
- [85] Tatarkiewicz Wł.: *Historia filozofii*, Warszawa wyd. 7. 1970.
- [86] Tichy M, Houwalt A.: *Dynamiczne właściwości czujników termometrycznych*, PAK nr 11, 1976.
- [87] Turzeniecka D.: *Analiza dokładności pewnych przybliżonych metod oceny niepewności*, IV Szkoła - Konferencja MWK'99, tom 1, str. 59-88, Rynia k/Warszawy 1999.
- [88] Winiecki W.: *Organizacja komputerowych systemów pomiarowych*, OWPW, Warszawa 1997.

- [89] Tomczyk S.: *Magazyny ziarna i innych nasion*, PWRiL, Warszawa 1970.
- [90] Wolański P.: *Grain dust explosion and control*, Final Report Grant, str. 258, Warsaw 1993.
- [91] Zubrzycki M.: *Badanie efektów dynamicznych w silosach metalowych podczas ich eksploatacji*, Inż. i Bud. nr 4, 1988.
- [92] Žuvela Z.: *System za nadzor mierenja temperature u celjema silosa*, SPT-Jugosławia 1979.

NORMY I PUBLIKACJE NORMATYWNE

- [93] FAO Agricult. Dev. 1990. Paper No. 90.: *Handling and storage of food grains*.
- [94] ISO 4112:1990 *Cereal and pulses - Guidance on measurement of the temperature of grain stored in bulk*.
- [95] PN-84/E-08119 Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe. Mieszalniny wybuchowe. Klasyfikacja i metody badań.
- [96] PN-84/E-08107 Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe. Urządzenia i obwody iskrobezpieczne. Wymagania i badania, PN-84/C-01200/01- Zagrożenia pożarem i wybuchem. Parametry zapalności i wybuchowości. Nazwy i określenia.
- [97] PN-84/C-01200/08 - *Parametry zapalności i wybuchowości. Oznaczenia dolnej granicy wybuchowości pyłów*.
- [98] PN-84/C-01200/09 - *Parametry zapalności i wybuchowości. Oznaczenia minimalnej energii zapłonu iskrowego pyłów*.
- [99] PN-83/M-53852 - *Termometry elektryczne. Charakterystyki czujników (rezystorów) termometrycznych*.
- [100] PN-93/E-05009/443. *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Zapewnienie bezpieczeństwa. Ochrona przed przepięciami. Ochrona przed przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi*.
- [101] PN-90/N-01040 - *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Terminologia*.
- [102] PN-ISO 2854:1994 - *Statystyczna interpretacja danych. Technika estymacji oraz testy związane z wartościami średnimi i wariancjami*.

- [103] PN-84/N-01052.05 - *Statystyka matematyczna. Badania statystyczne. Porównanie wariancji dwóch populacji o rozkładach normalnych.*
- [104] PN-83/N-01052.07 - *Statystyka matematyczna. Badania statystyczne. Badania zgodności rozkładu właściwości w populacji z rozkładem teoretycznym.*
- [105] PN-71/N-02050 - *Metrologia. Nazwy i określenia.*
- [106] PN-EN 50065:1999 - *Transmisja sygnałów w sieciach elektrycznych niskiego napięcia w zakresie częstotliwości od 3 kHz do 148,5 kHz. Wymagania ogólne, Zakresy częstotliwości i zaburzenia elektromagnetyczne.*
- [107] PN-EN 61000-4-6:1999 - *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Odporność na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej.*
- [108] PN-61000-3.2:1997 - *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Dopuszczalne poziomy. Dopuszczalne poziomy harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornik ≤ 16 A).*
- [109] *Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii, GUM 1996.*
- [110] *Wyrażanie niepewności pomiaru, Przewodnik, GUM 1999.*
- [111] *Leksykon naukowo-techniczny z suplementem, WNT, 1989.*

ROZPORZĄDZENIA

- [112] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 3 listopada 1992 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów. Dziennik Ustaw RP nr 92 z dnia 10 grudnia 1992 r. Rozdz. 5. Instalacje i urządzenia techniczne.
- [113] Dyrektywa Unii Europejskiej ATEX 100A dotycząca urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem nr 94/9/EC.

PATENTY

- [114] Kobosko A., Paszkowski W., Marszałek T.: *Przepustnica powietrza.*, nr 43707.
- [115] Kobosko A., Marszałek T., Górniak W.: *Sonda do pomiaru temperatury*, nr 39269.

KATALOGI

- [116] FOSS EL., SWEMA, AUTRONIC, DICKEY JOHN, TELETERM MC, NS, AN. DEV, METROTERM DAC-20", PIAP 1995, METROTERM DAC30Ex, PIAP 1999.
- [117] Application Note AN9003: *A user's guide to intrinsic safety*, Measurement Technology Limited, Wielka Brytania, 1989.
- [118] Mały rocznik statystyczny 1999.

13. SKRÓTY LITEROWE

- PIAP – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa,
PIAP – LAB, PIAP – OCW – Oddział Certfikacji Wyrobów PIAP,
ART – Akademia Rolniczo-Techniczna, Olsztyn (obecnie: Uniwersytet
Warmińsko- Mazurski),
AR – Akademia Rolnicza w Poznaniu,
IBMER – Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa,
Warszawa,
CLTPiPZ – Centralne Laboratorium Technologii Przetwórstwa i
Przechowywania Zboż, Warszawa,
CN – Centrala Nasienna,
IASE – Instytut Automatyzacji Systemów Energetycznych,
IMEKO – Międzynarodowa Organizacja Metrologiczna,
IMRC-PW – Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich Politechniki Warszaw-
skiej,
KBN – Komitet Badań Naukowych,
JTI - Szwedzki Instytut Techniki Rolniczej, Uppsala,
LI - Instytut Techniki Budowlanej, Gävle, Szwecja,
MIA - Instytut Mechanizacji Rolnictwa, Poczdam, Niemcy,
L₁, L₂, L₃, N, PE – nowe znormalizowane w UE i Polsce oznaczenia sieci
trójfazowej z zerowaniem i uziemieniem,
MERA – Zjednoczenie Mera (już nie istnieje),
MIA – Instytut Mechanizacji Rolnictwa, Poczdam, Niemcy,
MTL – Measurement Technology Limited, Wielka Brytania,
Min. Rol., L. I G. – Ministerstwo Rolnictwa, Leśnictwa i Gospodarki Ży-
wnościowej,
Min. PC – Ministerstwo Przemysłu Ciężkiego,
MON – Ministerstwo Obrony Narodowej,
KFAP – Krakowska Fabryka Aparatury Pomiarowej,
UAR – Układ Automatycznej Regulacji,

KEM – Kompatybilność elektromagnetyczna,
KBM – Komitet Budowy Maszyn (PAN),
PZZ – Polskie Zakłady Zbożowe,
UE – Unia Europejska,
WISM – Instytut Mechanizacji Rolnictwa, Moskwa, Rosja,
WITPiS – Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej,
ZD GIG - „Kopalnia Barbara” - Zakład Doświadczalny
Głównego Instytutu Górnictwa w Kopalni Doświadczalnej
„Barbara”,

14. STRESZCZENIE

Systemy kontrolno-pomiarowe i systemy automatycznej regulacji, przeznaczone do materiałów sypkich i ziarnistych, spełniają ważną funkcję zapobiegającą niszczeniu tych materiałów w trakcie ich przechowywania. Zapobiegają także groźnym w skutkach wybuchom pyłów w magazynach, prowadzącym do ich częściowego zniszczenia.

Określono parametry metrologiczne systemów i ich ważniejszych elementów, a także kryteria doboru sond w zależności od analizowanych pól temperaturowych wewnątrz materiałów. Wyraźny wzrost temperatury w ognisku wewnętrznego grzania ziarna wskazuje na możliwość potencjalnego wystąpienia zjawiska samogrzania. Dzienna kontrola temperatury pozwala zabezpieczyć ziarno przed poważną groźbą jego zniszczenia.

Elastyczne sondy temperatury oraz wchodzące w ich skład czujniki i pancerze nośne wprowadzają do systemów pomiarowych szereg ograniczeń dotyczących m.in. inercji cieplnej, wytrzymałości mechanicznej, liniowości itp., które były szczegółowo analizowane.

Starano się zminimalizować ujemny wpływ tych ograniczeń. Sprezycowano również zależności analityczne, określające rzeczywiste obciążenia sond temperatury i porównano otrzymane wyniki z rezultatami badań doświadczalnych. Błędy były niewielkie, zaś rozważania prowadzono zarówno dla ziarna suchego jak i zawilgoconego.

Uwzględniając szereg przedstawionych uwarunkowań, powstała propozycja nowych systemów pomiarowych na współczesnym poziomie. Wykonano kilka systemów magistralowych i przebadano je laboratoryjnie oraz na obiekcie pilotowym.

Na bazie dotychczasowych doświadczeń została określona procedura projektowania systemu kontrolno-pomiarowego oraz procedura dostosowania obiektu (elewatora, baterii silosów) do przewidzianych do zainstalowania w nim elementów i całego systemu. Przedstawiono również wyniki prac dotyczących konstrukcji nowych obwodów iskrobezpiecznych wykorzystanych w aparaturze przeznaczonej do pracy w silnym zapaleniu.

Zaproponowano również kierunki dalszych prac rozwojowych z dziedziny metodyki badań bezstykowych temperatury oraz nowych rozwiązań temperaturowych czujników światłowodowych.

15. SUMMARY

Monitoring and automatic control systems are very important for dry and grain materials preventing damage during storage. They also prevent explosion of dust in building of storage which may lead to their damage.

Technical parameters of the systems and their elements have been defined, as well as temperature cable selection depending upon temperature source inside grain mass of stored.

Distinctive increases of the local temperature in the grain are a good indication of potential spoilage problems. Daily inspection of the internal temperature of the stored grain can detect the presence of a „hot spot” before any grain is seriously deteriorated.

Temperature cables and their sensors and very strong housing put in the system some negative limiting (for example in thermal inertia, mechanical strength material, linearity) have been analyzed in details.

We tried to reduce negative influence of those limits as well as define the analytic law of real loads. We compare the results of laboratorial tests. The errors are not so high. The test was made for dry and humidity grain.

On the base of a few limitations the proposition of modern measuring systems was established. Magistrale systems was tested in laboratory and experiment object. According to experiment made so far there is a new procedure of design the monitoring systems and the procedure assemblable in object (elevator, battery of silos) defined. The result of design intrinsic safety are presents for equipment used in hazardous atmospheres in grain dust.

Further directions for development of the analyse shown non-contact temperature measuring system with fibro cable and sensors.