

## 1. WSTĘP

Atmosfera magazynów zbożowych charakteryzuje się wysokim zapyleniem cząstek składowanego ziarna. Przy dużym zapyleniu i przypadkowej inicjacji temperaturowej może nastąpić eksplozja w magazynie. Statystycznie w ciągu roku występuje jedna eksplozja w Europie. W Stanach Zjednoczonych zarejestrowano dużo więcej wybuchów. W latach od 1957 do 1990 zarejestrowano tam 1085 wybuchów pyłów w elewatorach zbożowych. Zginęło 640 osób. Straty wyniosły ponad 100 mln USD. Liczba wybuchów w elewatorach zbożowych przekroczyła tam 50% ogólnej liczby wszystkich wybuchów przemysłowych. W Polsce najgroźniejsza eksplozja nastąpiła w 1992 r. w elewatorze w Ujazdowie Górnym gdzie wybuch spowodowany był zatarciem łożyska w podajniku kubelkowym i przeniósł się na wieżę elewatora [22]. Było również kilkanaście pożarów w mniejszych obiektach. W lecie 1997 r. największa eksplozja wystąpiła we Francji gdzie prawie całkowitemu zniszczeniu uległ duży elewator. Przyczyną było zapalenie pyłów zbożowych od iskry, która wytworzyła się podczas wyładowania elektrostatycznego. Zagrożenie wybuchowe w elewatorach jest realne, a zdarzające się groźne wybuchy i pożary tych obiektów, wskazują na konieczność opracowania lepszych środków prewencyjnych, a szczególnie aparatury kontrolno-pomiarowej. Aparatura ta nie tylko musi spełniać zasadnicze swoje zadanie informując o aktualnych zagrożeniach, ale swoją pracą w atmosferze magazynu zbożowego, nie może przyczynić się do powstania dodatkowego zagrożenia wybuchowego. Dlatego projektowanie systemów monitoringu, dobór aparatury są zadaniami trudnymi i wyjątkowo odpowiedzialnymi.

Temperatura zapłonu pyłu zbożowego zależy od jego stężenia, które jest groźne gdy stężenie przekroczy  $100 \text{ g/m}^3$ . W tabelicy 1 przedstawiono wartości temperatury zapłonu pyłów i minimalnej energii zapłonu 4 zbóż, w zależności od minimalnego stężenia pyłów [22].

Tablica 1. Temperatura zapłonu pyłów zbóż

| Typ pyłu  | Min. energia zapłonu | Min. stężenie    | Temperatura zapłonu |
|-----------|----------------------|------------------|---------------------|
|           | mJ                   | g/m <sup>3</sup> | K                   |
| pszenica  | 30                   | 125              | 753                 |
| kukurydza | 60                   | 60               | 673                 |
| jęczmień  | 60                   | 750              | 693                 |
| ryż       | 290                  | 60               | 666                 |

Energia eksplozji 1 kg pyłu zbożowego w połączeniu z powietrzem jest od 3 do 5 razy większa niż energia eksplozji 1 kg TNT (trotylu) i zdolność do eksplozji jest około od 20 do 50 razy większa niż np. pyłu węglowego.

Zagrożenie wybuchowe określane przez wybuchowość jest więc duże, a zdarzające się eksplozje powodują nie małe straty materialne. Zdarzają się okaleczenia, a nawet śmiertelne wypadki wśród obsługi. Widać więc, że duża odpowiedzialność spoczywa na wyposażeniu obiektów w odpowiedni sprzęt i sprawnym działaniu zapobiegawczym aparatury pomiarowej.

Aparatura kontrolno-pomiarowa stosowana w elewatorach zbożowych wchodzi w skład Systemów Monitoringu temperatury, wilgotności i innych parametrów. W krajowych elewatorach systemy te są dopiero wprowadzane, dlatego ważne jest zanalizowanie wielu problemów, które są bardzo specyficzne dla tego przemysłu i niewystarczająco rozeznane.

Wieloletnie prace autora w tej dziedzinie przyczyniły się do opracowania podstawowych elementów Systemu Monitoringu oraz do wdrożenia systemu w wielu obiektach, których liczba szacowana jest na ok. 30% elewatorów krajowych.

Mimo wyraźnego postępu, stan obecny nie jest zadowalający, ponieważ nie podąża za możliwościami jakie stwarza rozwój wielu innych dziedzin np. elektroniki i optoelektroniki, mechaniki itp. Rysują się perspektywy zastosowania nowych elementów i systemów

pomiarowych, których propozycje oraz wyniki badań podstawowych zostaną przedstawione w niniejszym opracowaniu.

Reasumując, zasadniczy cel pracy polegający na analizie występujących problemów w przechowywaniu zbożowym poprzedził opracowanie metodyki pomiarowej oraz nowej, specyficznej aparatury kontrolno-pomiarowej.

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

Cel ten realizowano w następujących etapach:

- Określenie wartości parametrów metrologicznych systemów kontrolnych przeznaczonych do atmosfery zagrożonej wybuchem oraz ich wpływ na konstrukcję obiektu,
- Opracowanie kryteriów doboru układu kontrolnego temperatury w zależności od obszaru zbiornika z ziarnem w którym tworzą się pola temperaturowe oraz właściwości metrologicznych i wytrzymałościowych sond pomiarowych,
- Syntezę badań metrologicznych jako podstawy do projektowania systemów kontroli,
- Wytyczne do projektowania elewatorów i baterii silosów, uwzględniające wyniki badań metrologicznych systemów kontrolnych,
- Zaproponowanie nowej metodyki badań bezstykowych temperatury w magazynach zbożowych.

Tematyka pracy przedstawiona została w 3 książkach autora powstałych na przestrzeni 14 lat. Ostatnia książka została wydana przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów - PIAP w roku 1966. Była również prezentowana na 4 kongresach międzynarodowych i przedstawiona w przeszło 30 publikacjach krajowych i zagranicznych.

Niektóre badania, ze względu na brak możliwości krajowych, wykonywane były w Szwedzkim Instytucie JTI oraz na Uniwer-

sytecie w Upsali oraz konsultowane ze specjalistami z Uniwersytetu Quebec z Kanady i kilku uniwersytetów z USA. Dotyczyły one szczególnie badań termowizyjnych źródeł samo-zagrzewania w masie ziarna i rozchodzenia ciepła w elewatorach oraz nowych optoelektronicznych metod pomiarowych.

Badania prowadzone na obiektach rzeczywistych, w elewatorach zbożowych, jest trudne ze względu na ich okresowość i dostępność ich wykonywania. Wiarygodność ich potwierdza się dopiero po kilku sezonach przechowalniczych, a często trwają wiele lat, jak np. badania niezawodności sond pomiarowych. Dlatego konieczne było również prowadzenie badań symulacyjnych i analitycznych, związanych z określaniem przebiegów termicznych oraz określaniem różnych oddziaływań mechanicznych, na sondy pomiarowe zawieszono w komorze elewatora i silosa.

W niniejszym opracowaniu zostaną przedstawione tylko syntetycznie wyniki badań i doświadczeń z podaniem materiałów źródłowych. Przywołane będą w większym zakresie wykresy i wyniki badań analitycznych, które miały istotny wpływ na rozwój metod pomiarowych lub zasad konstrukcji nowoopracowanej aparatury. Najnowsze prace dotyczące sond optoelektronicznych trwają i zakończone są tylko na etapie badań podstawowych, dlatego omówione zostaną szerzej.

Tematyka była realizowana w dwóch projektach badawczych finansowanych przez KBN oraz w dwóch projektach celowych finansowanych przez KBN i PIAP. Niektóre prace były finansowane przez kilku zleceniodawców przemysłowych w zakresie wykonywanych dla nich zleceń.

## 2. PROBLEMY TECHNIKI POMIAROWEJ W MONITORINGU PROCESÓW TERMICZNYCH

Problemy techniki pomiarowej w magazynach zbożowych są przedmiotem wieloletniej pracy autora i zostały opublikowane w książkach i wielu publikacjach a szczególnie [6÷17].

W większości były to pierwsze prace z tej dziedziny, które musiały być poprzedzone analizą procesów technologicznych z zakresu technologii przetwórstwa i przechowalnictwa ziarna zbóż i ustaleniem metodyki badań i wymagań na aparaturę kontrolno-pomiarową. Następnie powstały odpowiednie układy pomiarowe, a ostatnio Systemy Monitoringu.

Autor uczestniczył w pracach międzynarodowych organizacji zajmujących się automatyzacją i robotyzacją w przemyśle rolno-spożywczym. Były to początkowo różne ogniwa RWPG, później FAO a ostatnio Kongresy i Konferencje IMEKO. Pierwsze jednolite dokumenty dot. wymagań środowiskowych dla aparatury pomiarowej w magazynach rolniczych, którego autor był głównym referentem, powstały w Instytutach resortowych i akademiach nauk w Poczdamie i Moskwie.

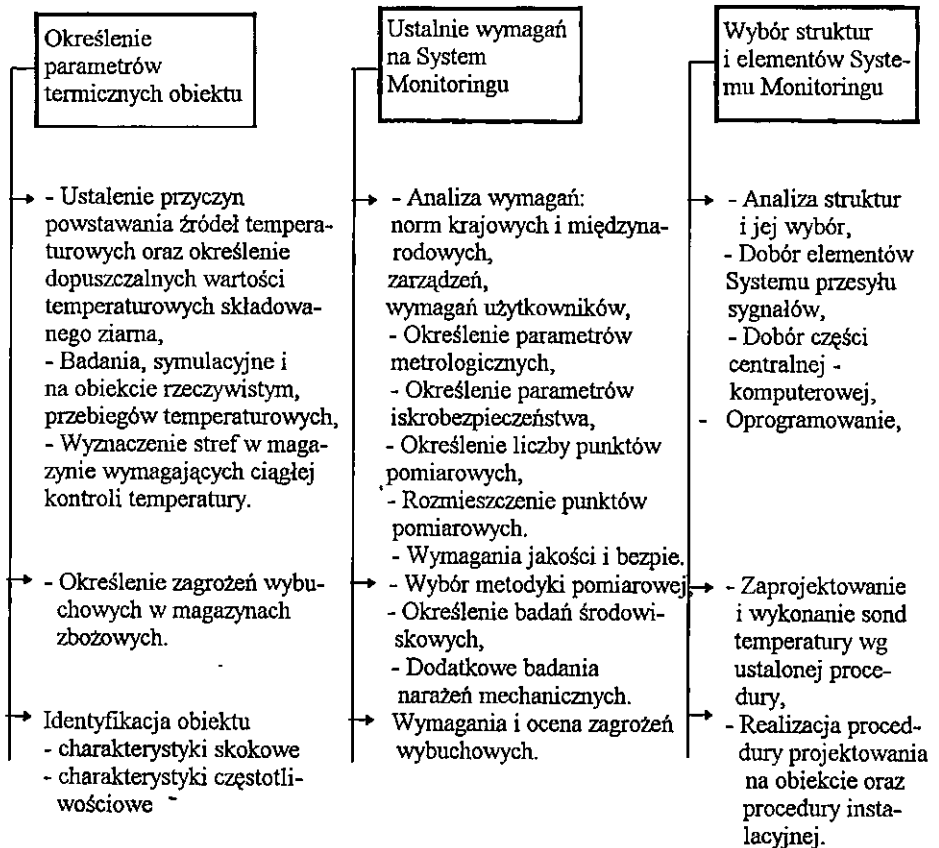
Równocześnie w kraju powstawały pierwsze niewielkie serie aparatury dla przechowalnictwa krajowego (np. Kombinatu Mazury), wykonywane już na podstawie wymagań RWPG i eksportowane do krajów współpracujących.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń powstały procedury projektowania sprawdzone w elewatorach zbożowych. Do istotnych rozwiązań konstrukcyjnych można zaliczyć sondy pomiarowe wykonywane pierwszy raz w krajach RWPG w Fabryce Kabli w Ożarowie Maz. Problemy technologiczne w ich wytwarzaniu znacznie przekroczyły zakres spodziewanych prac wdrożeniowych i dotyczyły nie tylko budowy samych sond pomiarowych, ale również głowic maszyn kablowych do produkcji pancerzy (płaszczy zewnętrznych) tych sond.

Stan obecny można scharakteryzować natępująco. Powstały układy i Systemy Monitoringu. Po okresie monopolistycznym, w którym brak było producentów oprócz Zakładów Doświadczalnych Instytutów, jest już kilku dostawców przeprowadzających montaż aparatury na obiektach krajowych. W dalszym ciągu montowane są sondy wg patentu [35], ale trwają również prace nad nowymi

systemami i elementami, które będą w zarysach przedstawione w niniejszym opracowaniu.

Ze względu na alarmistyczne informacje dochodzące z USA oraz z Europy Zachodniej dotyczące wybuchów i pożarów w elewatorach zbożowych podjęto nowe prace związane z dostosowaniem istniejących rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w Systemach Monitoringu do wymagań iskrobezpieczeństwa. Trwają również w kraju badania przyczyn i analizowanie charakteru wybuchów w zapyłonej atmosferze magazynów zbożowych. Prace te są zlecane przez KBN, ale również przez władze USA [22]. Przygotowywane są normy krajowe i wymagania dotyczące aparatury przeciwwybuchowej do magazynów zbożowych. Najważniejsze prace związane z projektowaniem i wdrażaniem Systemu Monitoringu są przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Zagadnienia techniki monitoringu w magazynach zbożowych

### 3. ZJAWISKA TERMICZNE W SKŁADOWANEJ MASIE ZIARNA

Źródła ciepłe w elewatorach zbożowych, które przyczyniły się do powstania wybuchu, generowane były przez urządzenia zewnętrzne np. urządzenia energetyczne - technologiczne, spawalnicze. Przyczyną eksplozji były również przypadki zaproszenia ognia przez obsługę, wyładowania iskrowe ładunków elektrostatycznych itp. Można te przyczyny ograniczyć, ale nie wyeliminować całkowicie. Bardzo groźne były również źródła ciepłe powstałe w wyniku procesów biologicznych - metabolicznych w procesie przechowywania ziarna zbóż. Podobnie w ekstremalnych, niekontrolowanych warunkach prowadziły do samozapłonu i inicjacji eksplozji. Intensywność tych źródeł można jednak znacznie ograniczać kontrolując temperaturę i wilgotność ziarna. Stosowane są odpowiednie systemy monitoringu. W małych obiektach stosowane są również układy automatycznej regulacji wentylacji, w dużych elewatorach stosowana jest tylko technologia przesypywania ziarna z komory do komory.

Procesy metaboliczne, które zachodzą w ziarnie zbóż podczas ich składowania powodują pobór przez ziarno tlenu z otoczenia, wydzielanie dwutlenku węgla oraz tworzenie wielu innych substancji. Procesom tym towarzyszy wydzielanie określonej ilości ciepła spowodowane rozerwaniem łańcucha węglowego podczas spalania cukru lub tłuszczu oraz tworzeniem się  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . W wyniku tych procesów występują zmiany fizykochemiczne i ubytek suchej masy ziarna określane jako ubytek naturalny charakteryzujący straty ilościowe i jakościowe ziarna. Intensywność procesów metabolicznych określana jest przez energię oddychania. Wzrasta ona w funkcji temperatury i wilgotności wagowej ziarna określanej przez procentową zawartość wody w próbce ziarna. Najkorzystniejsze warunki przechowywania ziarna występują w temperaturze do  $20^\circ\text{C}$  i wilgotności do 20%, a najgorsze przy tej samej wilgotności w temperaturach wyższych od  $20^\circ\text{C}$ . Im wyższa temperatura i większa wilgotność ziarna, tym bardziej stromo i wykładniczo wzrasta energia oddychania. Przy braku kontroli tych parametrów składowane ziarno może całkowicie stracić wartość użytkową (powyżej  $70^\circ\text{C}$ ) i dalej zamienić się w płynną substancję o

wysokiej temperaturze. Proces ten łatwo może stać się przyczyną wybuchu w zapyłonej atmosferze elewatora.

W publikacjach [8÷12] przedstawiane są przebiegi wpływu temperatur i wilgotności ziarna na proces składowania. Szczególnie ważne jest odniesienie tych parametrów w funkcji czasu.

Badania prowadzone w ramach dwóch krajowych projektów badawczych i przedstawione na ostatnich konferencjach [6,11,12,14] uzupełniły dotychczasową wiedzę na temat przebiegów metabolicznych. Przeprowadzono również z udziałem autora, badania chromatograficzne i wartości użytkowej ziarna w funkcji podstawowych parametrów (temperatury, wilgotności i okresu przechowywania). Szczególnie ważna była metodyka badań intensywności procesów metabolicznych, skonstruowanie, przez zespół z wiodącą rolą autora, aparatury do pobierania prób w masie ziarna, a także oczujnikowanie i oprzyrządowanie badań. Przeprowadzono również badania zawartości CO<sub>2</sub>, alkoholi, rozwoju bakterii, pleśni i grzybów itp.

#### 4. ROZKŁAD TEMPERATURY W MASIE ZIARNA

Procesy metaboliczne występują w całej masie ziarna, ale ze względu na niejednorodność ziarna, (zanieczyszczenia, wilgotność itp.) tworzą się obszary o zdecydowanie wyższej temperaturze od temperatury warstw otaczających. Takie obszary zwane źródłami samozagrzewania osiągają temperatury wyższe ze względu na słabe odprowadzanie ciepła przez ziarno. Przewodność cieplna ziarna jest bardzo mała i porównywalna z przewodnością azbestu, uważanego za doskonały izolator. Badając rozkład temperatury w masie ziarna można określić strefy o niebezpiecznych wzrostach temperatury i w razie przekroczenia dozwolonych wartości temperatur zastosować odpowiednie zabiegi technologiczne.

Rozkład temperatury w masie ziarna wyznaczano następującymi metodami:

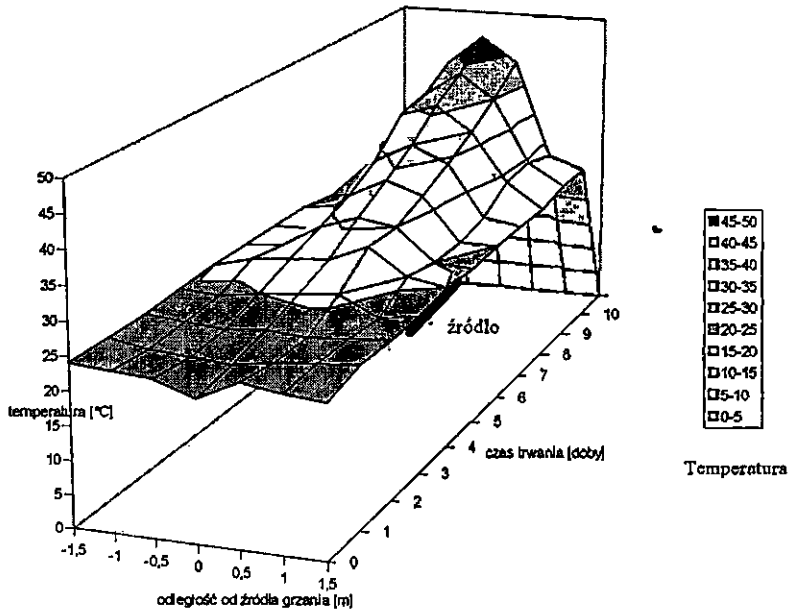
- badaniami symulacyjnymi [9, 10],
- badaniami analitycznymi [8, 21],
- badaniami obiektowymi [9, 10].



Najtrudniejsze były badania obiektowe, ponieważ trudno było umieścić odpowiednią liczbę czujników w przestrzeni samozagrzewania. Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań wzrostu temperatury od źródła przestrzennego, które przedstawiono w podstawie wykresu [12].

Badania przeprowadzono za pomocą kilkudziesięciu czujników umieszczonych w ziarnie w pobliżu rzeczywistego źródła samozagrzewania [8÷10]. Pole temperaturowe wzrasta wolno ponieważ proces jest długotrwały, ale już po 10 dobach temperatura osiąga ponad 45°C i dalszy brak reakcji obsługi spowoduje nieodwracalne straty nie wyłączając opisanych zagrożeń.

Z rysunku widać również duży gradient temperatury w funkcji odległości od źródła. Duże wartości temperatur wewnątrz źródła są już prawie niewyczuwalne w odległości ponad 1,5m od źródła. Właściwość ta ma szczególnie duże znaczenie przy projektowaniu rozmieszczenia punktów pomiarowych wewnątrz elewatorów [8÷10]. Na rozmieszczenie ma również wpływ chłodzący ścian zbiornika elewatora i zewnętrznych warstw ziarna. Badania symulacyjne umożliwiają prześledzenie różnych ww. wpływów.

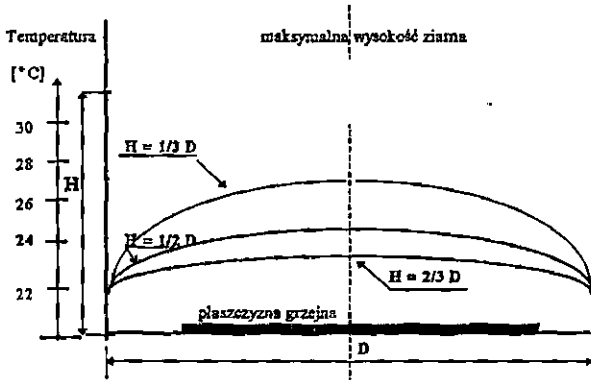


Rys. 2. Rozwój pola temperaturowego w funkcjach czasu i odległości od źródła

Badania symulacyjne prowadzone były z wykorzystaniem następujących technik:

- pomiary temperatury za pomocą czujników Pt 100 umieszczonych wewnątrz doświadczalnego zbiornika - binu i źródła w postaci płaszczyzny grzejnej [8,9],
- badania termowizyjne [10],
- badania punktowe i płaszczyznowe laserowym miernikiem podczerwieni [10].

Wyniki badań za pomocą tych trzech uzupełniających się technik pozwoliły na stworzenie modelu pola wnętrza zbiornika, w którym istnieje równomierne pole temperaturowe rys. 3.



Rys. 3. Przebieg pola temperaturowego w doświadczalnym zbiorniku typu bin

W celu nadania uniwersalności temu przebiegowi odniesiono go do wysokości  $H$  i średnicy  $D$  zbiornika. W dolnych warstwach ziarna, otaczających płaszczyznę grzejną, przebiegi są płaskie i im wyżej tym bardziej zbliżone do parabolicznych. Najwyższe temperatury, od równomiernego pola źródłowego, panować będą w pobliżu osi zbiornika, a im bliżej ścian tym ich oddziaływanie chłodzące jest większe i temperatura niższa.

Badania analityczne doprowadziły do stworzenia modelu matematycznego opisanego równaniami przy następujących założeniach:

- rozwijające się pole temperaturowe pochodzi od znanych w kształcie figur geometrycznych: płaszczyzny, kuli i walca,
- źródło i otaczająca przestrzeń ma charakter jednorodny.

Rozwiązanie powyższych równań jest przedstawione w postaci nomogramów [21].

Badania porównawcze przebiegów rzeczywistych i teoretycznych potwierdziły przydatność rozważań analitycznych [8,9].

## 5. SYSTEM MONITORINGU W MAGAZYNACH ZBOŻOWYCH

Systemy monitoringu wprowadzane są dopiero od niedawna i szacuje się, że w kraju tylko 30% elewatorów zbożowych ma sprawnie działające systemy. Wcześniejsze wprowadzanie uzależnione było od możliwości zakupów importowych, ponieważ, przez wiele lat, nie można było opanować w kraju produkcji elastycznych wieloczujnikowych sond pomiarowych. 15 lat temu uruchomiono pierwszą produkcję sond, na podstawie własnego patentu [35], i od tego czasu wystąpił wyraźny postęp we wdrażaniu systemów.

Systemy monitoringu realizują zdalny pomiar temperatury, wilgotności i innych istotnych parametrów przechowywanego zboża w elewatorze. Rozkład przestrzenny komór elewatora wymaga zdalnego odczytu z odległości dochodzącej do 1 km. Konieczny jest okresowy pomiar nawet z kilku tysięcy punktów pomiarowych.

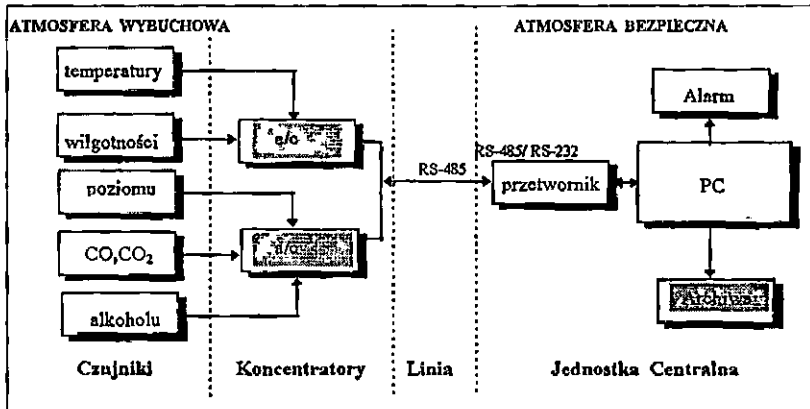
Stosowane i nowo opracowywane systemy monitoringu można podzielić na następujące:

- systemy z wybieraniem ręcznym [8, 9],
- systemy z komutacją elektroniczną [10],
- systemy magistralowe [10].

Każdy z tych systemów był analizowany i badany obiektowo, a obecnie rozwijane są nowe konstrukcje sond i czujników i podzespołów na bazie systemu magistralowego. System ten przedstawiony jest na rys.4. Czujniki umieszcza się w ziarnie lub w jego pobliżu w strefie o najwyższym zagrożeniu wybuchowym. Sygnały z czujników ze strefy niebezpiecznej doprowadzane są do nieodległych koncentratorów. Sygnał do części centralnej przesyłany jest za pomocą magistrali RS-485, a następnie przez przetwornik RS-485/RS-232 do komputera typu PC. Znajduje się on w pomieszczeniu biurowym obsługi magazynu, w strefie bezpiecznej, oddalonej od czujników pomiarowych o kilkaset metrów.

W komputerze realizowana jest wizualizacja i archiwizacja wyników pomiarowych, przeliczenia na wartości przyrostowe dzienne i tygodniowe, sygnalizacja wartości granicznych np. przekroczenia temperatur zadanych, granicznych itp. System ten może także

współpracować z układami automatycznej regulacji włączając np. wentylację, nagrzewanie itp. [10].



Rys. 4. Schemat blokowy Systemu Monitorowania

System alarmowy informuje o przekroczeniu dopuszczalnych wartości temperaturowych. Pomiary i rejestracje wyników przeprowadza się w cyklu automatycznym w określonych porach dnia np. rano-wieczór. W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych można natychmiast zidentyfikować awaryjną komorę i zastosować w stosunku do niej ciągłą kontrolę temperatury.

System przeznaczony jest do obsługi przez jeden zestaw komputerowy. W związku z rozwojem światłowodowych sieci komputerowych wewnątrz zakładów przemysłu zbożowego: elewatora, młyna i innych magazynów i urządzeń technologicznych układ może także być włączony do tej sieci. Umożliwi to obserwacje wyników pomiarowych praktycznie z każdego komputera włączonego do tej sieci, niezależnie od komputera zlokalizowanego na stanowisku kierownika elewatora.

## 6. PODSTAWOWE PARAMETRY SYSTEMU MONITORINGU

System Monitoringu zapewnia pomiar i przetwarzanie danych realizując następujące funkcje:

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

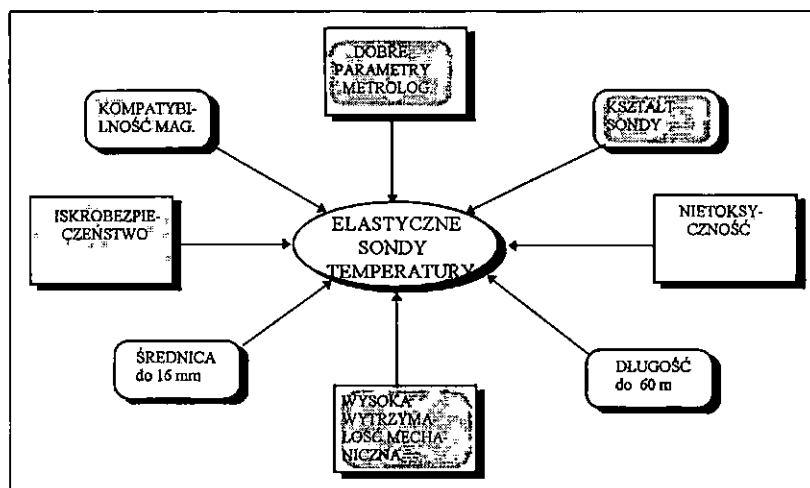
Na podstawie wymagań międzynarodowych wyszczególnionych w [9,10] i doświadczeń krajowych ważniejsze parametry metrologiczne Systemu są następujące:

- \* zakres pomiaru temperatury: 0 - 60°C;
- \* dokładność pomiaru:  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;
- \* powtarzalność pomiaru:  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ,
- \* zakres nastawy temperatury granicznej: 20 ÷ 80°C;
- \* długość sondy pomiaru temperatury: do 60 m,
- \* wytrzymałość mechaniczna elastycznych sond temperatury:  
z przedziału: 30 kN, 90 kN,
- \* liczba czujników w jednej sondzie: w zależności od jej długości od 3 do 12;
- \* czas odczytu wszystkich punktów pomiarowych: od 3 do 5 min;  
czas oczekiwania na odczyt temperatury z wybranej komory -  
mniejszy od 0,5 min.

## 7. SONDY POMIAROWE TEMPERATURY

Sondy są najtrudniejszym elementem konstrukcyjnym Systemu Monitoringu. W stosunku do znanych czujników przemysłowych w obudowach rurowych różnią się zasadniczo budową elastyczną, która jest podobna do kabla energetycznego. Wewnątrz kabla wsuwany jest wieloprzewodowy rdzeń z miniaturowymi czujnikami temperatury. Rdzeń można wysuwać i czujniki wymieniać i kontrolować nawet po montażu sondy w załadowanej komorze elewatora. Zasada ta jest ściśle utrzymywana w sondach dla przemysłu zbożowego. Pierwsze krajowe elastyczne sondy powstały pod koniec lat siedemdziesiątych [8] i od tego czasu powstały już trzy kolejne typy tych sond. Różnica między poszczególnymi typami polega na znacznym zwiększaniu ich wytrzymałości mechanicznej przy tych samych wymiarach gabarytowych, przede wszystkim średnicy zewnętrznej, która nie powinna być większa od 16 mm. Początkowo miały one wytrzymałość mechaniczną na zerwanie rzędu 30 kN, a ostatnio trzykrotnie większą. Konieczność zwiększenia wytrzymałości mechanicznej wynikała z dużej awaryjności sond o wytrzymałości 30 kN. Jest to spowodowane między innymi coraz częstszymi przypadkami składowania zboża o dużej wilgotności a także różnorodnością konstrukcji komór w elewatorach i nierównomiernością naprężeń mechanicznych w komorach. Sondy o długości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów mają czujniki rozmieszczone w odległości 3 m wzdłuż ich długości. Stosowane są w nich różne czujniki temperatury, np. czujniki rezystancyjne typu Pt 100 [30,31], Ni 100, czujniki termistorowe [8], a ostatnio czujniki scalone z wyjściem stałoprądowym. W konstrukcji sond pomiarowych należy uwzględnić szereg wymagań przedstawionych na rys. 5.

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 [15]. Nie ma zagrożenia powstania iskry. Takie zagrożenie może jednak powstać podczas zjawiska elektrostatycznego występującego na pancerzu zewnętrznym sondy.



Rys. 5. Wymagania stawiane sondom temperatury

Podczas załadunku i rozładunku komór oraz w stanach awaryjnych (po odblokowaniu zaczopowań zsypu ziarna) występuje duży ruch ziarna, który generuje ładunek elektrostatyczny [10]. Ładunek ten musi być odprowadzany tak aby nie powstało wyładowanie iskrowe. Spełnienie wymagań iskrobezpieczeństwa sond powinno być potwierdzone atestem iskrobezpieczeństwa.

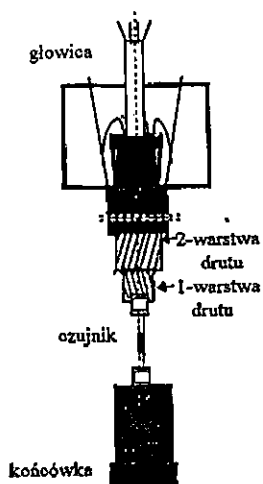
Sondy pracują w otoczeniu produktów spożywczych jakim jest ziarno zbóż i dlatego przynajmniej płaszcz zewnętrzny nie powinien wchodzić w reakcję chemiczną w wyniku której powstają produkty szkodliwe, toksyczne dla konsumentów ziarna.

Kompatybilność magnetyczna 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.

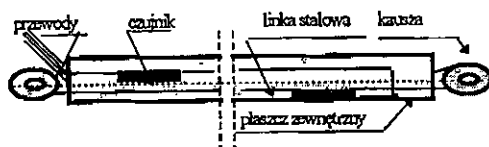
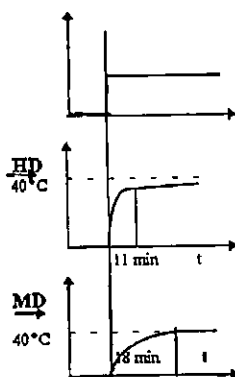
Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono dwa typy sond pomiarowych: do elewatorów zbożowych typu „heavy duty temperature cables” (ang.)



**HD** o wytrzymałości 80 kN i  $\phi=16$  mm oraz do małych i średnich silosów zbożowych (medium duty-**MD**) o wytrzymałości 10 kN i  $\phi=10$  mm. Sonda **HD** składa się z pancierza do którego wsuwany jest rdzeń złożony z miniaturowych czujników temperatury i przewodów łączących. Pancierz otrzymano nawijając na wysokociśnieniową rurkę polietylenową dwa oploty z drutów stalowych o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej. Kierunek nawinięcia warstw oplotu jest przeciwny, tak aby siły skrętne kompensowały się. Zewnętrzną powierzchnię pancierza stanowi płaszcz polietylenowy z wypełniaczem grafitowym, który jest nietoksyczny w stosunku do ziarna zbóż i nie stanowi dużej rezystancji dla przepływu ewentualnego ładunku elektrostatycznego.



Rys. 6. Sonda temperatury typu HD



Rys. 7. Sonda temperatury typu MD i odpowiedzi skokowe sond MD i HD

Sonda MD składa się z wielożyłowego kabla z miniaturowymi czujnikami równomiernie umieszczonymi wzdłuż jej długości. Kabel owinięty jest wzdłuż linki stalowej, która naciągnięta jest między dwoma kauszami uchwytyowymi. Decyduje ona o wytrzymałości mechanicznej sondy. Kabel ten wraz z linką jest obłany tworzywem polietylenowym stanowiącym płaszcz zewnętrzny. Sonda ta jest nierozbieralna. Stosowana jest z powodzeniem do baterii silosów stalowych, betonowych itp. [10].

Główce sond umieszczane są w otworach stropowych nad komorami. Stropy muszą więc mieć odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, a w obiektach w których stropy nie były projektowane do zawieszania sond, stosuje się dodatkową konstrukcję wzmacniającą. Sondy mogą być również zakotwiczone w dolnej części komory, za pomocą elastycznych linek.

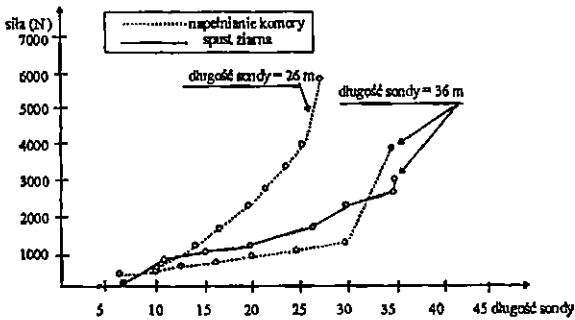
Przedstawiono również odpowiedź sondy na skok temperaturowy od 0 do 40°C. Okazuje się, że sonda o znacznie mniejszej średnicy i wytrzymałości mechanicznej ma znacznie dłuższy czas odpowiedzi niż sonda o budowie pancerniej (HD). Wynika to z przenikalności ciepła ziarna do wnętrza pancerza sondy, gdzie znajdują się czujniki pomiarowe temperatury.

Ma to duży wpływ na projektowanie Systemów i Układów Monitoringu i Układów automatycznej regulacji. Dokładne wyniki badań znajdują się w kilku publikacjach: [9,10].

## 8. ODDZIAŁYWANIA MECHANICZNE NA SONDY POMIAROWE

### \* badania sił działających na sondę

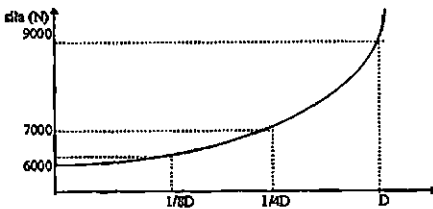
Badania przeprowadzono w warunkach rzeczywistych, w wydzielonej komorze, w czasie normalnej eksploatacji elewatora [8, 9]. Sonda była zamocowana w komorze w pozycji środkowej wzdłuż osi symetrii. Wykresy obciążeń wyznaczono dla sond o długości 26 m i 36 m i przy zmiennym zanurzeniu w ziarnie. Średnica zewnętrzna tych dwóch sond wynosiła 16 mm. Wykresy tego eksperymentu, potwierdzają niską wartość sił statycznych, jak przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Siły działające na sondy podczas zasypu, składowania w okresie 70 godzin, napełniania i zsypania ziarna jęczmienia

**\* badania sił działających na sondę w funkcji odległości jej zamontowania od środka komory**

Badania przeprowadzono na obiekcie rzeczywistym dla trzech zamocowań sondy w środku komory, w odległości  $1/4 D$  i  $1/8 D$  od powierzchni bocznej i przy ścianie ( $D$  jest średnicą komory). Wykres sił obciążających, statycznych jest przedstawiony na rys. 9. 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.

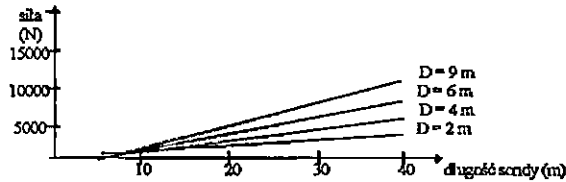


Rys. 9. Siły działającej na sondę w funkcji odległości od środka komory

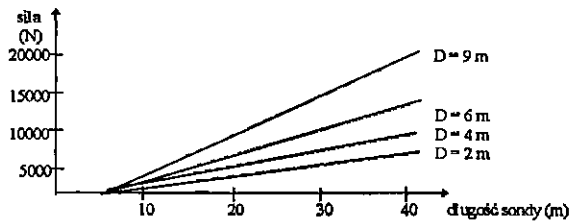
**\* badania sił działających na sondę w zależności od średnicy komory lub silosu**

Badania prowadzono dla kilku średnic komór elewatora wykonanych z żelbetu oraz dla tych samych średnic silosów stalowych [9,10]. Sondę zawieszono w osi symetrii zbiornika.

Wyniki są przedstawione na rys. 10 i 11, wynika z nich, że sondy zawieszono w silosach stalowych są narażone na większe siły.



Rys.10. Przebieg sił działających na sondę w funkcji średnicy D komory żelbetowej



Rys.11. Przebieg sił działających na sondę w funkcji średnicy D silosu stalowego

**\* analityczne określenie sił działających na sondy pomiarowe**

Analityczne ujęcie zjawisk i oddziaływań w ziarnie zbóż jest trudne, ponieważ zależy od wpływu zbyt wielu czynników, takich jak gatunek i rodzaj zboża, wilgotność, temperatura i ciśnienie ziarna, kształt i budowa zbiornika, stopień napełnienia zbiornika, liczby przegród w zbiorniku, sposobu zasypu, średnicy, kształtu, budowy sondy, sposobu jej montażu itp.

W ostatnich 5 latach pojawiło się kilka publikacji, w których określono przybliżone równanie, precyzujące siłę oddziaływania ziarna na zanurzoną w nim sondę pomiarową. Równanie to określa siłę działającą na sondę pomiarową, spowodowaną tarciem ziarna zbóż wzdłuż długości zawieszanej sondy. Siłę tę precyzuje się jako obciążenie (load-ang.) sondy. Oblicza się ją ze wzoru [19, 20]:

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

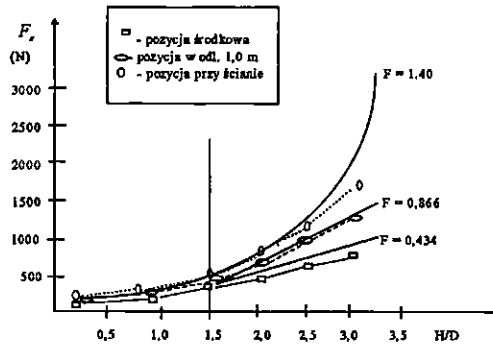
gdzie:

- $F_s$  - siła wzdłużna działająca na sondę [N]
- $F_{tc}$  - współczynnik proporcjonalności
- $F_w$  - współczynnik proporcjonalności wilgotności ziarna
- $\mu$  - współczynnik tarcia ziarna o ściany zbiornika stalowego
- $\mu_{tc}$  - przybliżony współczynnik tarcia ziarna zboża o sondę
- $\mu_{est}$  - gęstość powierzchniowa ładunku elektrostatycznego
- $D_{tc}$  - współczynnik odpowiadający średnicy sondy  
( $D_{tc} = \sqrt{4 \text{ pow. } t \pi}$ )
- $R_h$  - promień hydrauliczny zbiornika (powierzchnia dzielona przez obwód)
- $k$  - stosunek ciśnienia przy bocznych ścianach do ciśnienia działającego pionowo
- $k_{st}$  - współczynnik proporcjonalności, uwzględniający zewnętrzny materiał sondy
- $k_w$  - współczynnik ładunku elektrostatycznego w zależności od wilgotności ziarna
- $l$  - długość sondy temperatury
- $y$  - głębokość zanurzenia sondy w pryzmie ziarna

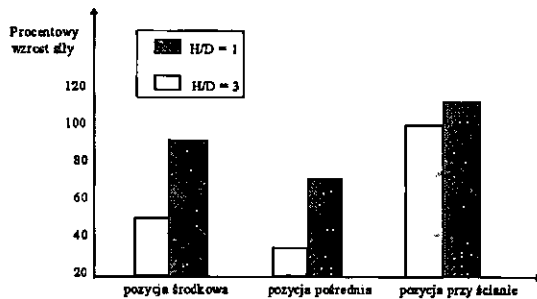
Przeprowadzono badania porównawcze tych samych wartości, obliczonych wcześniej. W tym celu zbudowano zbiornik o kształcie walca o średnicy podstawy równej 4,1 m i maksymalnej wysokości zasypu ziarna równej 14,3 m (wysokość zbiornika ok. 16 m). Sondy były zawieszane w trzech odległościach od środka podstawy, 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. 12.

Dla tego doświadczalnego zbiornika przeprowadzono również badania sił 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. 13.



Rys. 12. Porównanie przebiegów obliczonych w równaniu (1) dla różnych współczynników  $F$  oraz przebiegów wyznaczonych doświadczalnie



Rys. 13. Porównanie procentowego wzrostu siły obciążenia działającego na sondę pomiarową w funkcji wysokości zasypu ziarna

Równanie (1) określa przybliżoną siłę obciążenia, wywołaną tarciem ziarna sondę pomiarową. Ziarno to jest wysuszone w stacjonarnych, ustalonych warunkach przechowywania. Dla ziarna wilgotnego wzrasta jego siła tarcia na sondę i dlatego proponuje się modyfikację równania (1) i wprowadzenie drugiego współczynnika proporcjonalności uzależnionego od wilgotności ziarna  $F_w$ , jak to przedstawiono w równaniu (2):

$$F_s = F_{tc} \frac{\pi \mu_{tc} D_{tc} R_h \gamma}{\mu} \left\{ y + \frac{R_h}{\mu k} [\exp(-\frac{k \mu y}{R_h}) - 1] \right\} F_w \quad (2)$$

gdzie:

$F_w$  - zależy od wilgotności ziarna

dla ziarna o wilgotności do 10 %  $F_w = 1$

dla ziarna o wilgotności do 20 %  $F_w = 2$

dla ziarna o wilgotności 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 dynamometrze wyznaczono siłę początkową podczas wyciągania próbki z ziarna o różnej wilgotności i na tej podstawie zaproponowano wartość współczynnika proporcjonalności  $F_w$  w równaniu (2).

#### \* 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 zsypania 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 wzrost obciążenia dynamicznego jest 5-krotnie większy od obciążenia statycznego (6 kN). Ponieważ uszkodzenia występowały nadal, co potwierdzono niezależną analizą w kilku krajach, wprowadzono nowe wymagania normalizacyjne [10] zwiększające wytrzymałość sond do 50 kN. Chcąc sprostać nowym wymaganiom konstruktorów komór i silosów, zdecydowano się na podwyższenie wytrzymałości sond do 80 kN, podobnie jak to zrobiło kilka firm światowych [36]. Rozważania te dotyczą sond o  $\varnothing = 16$  (17) mm. W przypadku opracowania sond o mniejszych średnicach (przy tej

samej liczbie czujników temperatury), siły zgodnie z wzorem (2) mogą być znacznie mniejsze przy tym samym zapasie bezpieczeństwa, tzn. krotności wzrostu obciążeń dynamicznych w stosunku do obciążeń statycznych.

## 9. ZAGADNIENIA ISKROBEZPIECZEŃSTWA W PROJEKTOWANIU UKŁADÓW I SYSTEMÓW MONITORINGU

Układy i Systemy Monitoringu przeznaczone są do pracy w strefach zagrożonych wybuchem. Układy przeznaczone są do baterii silosów i do magazynów płaskich, a Systemy do dużych obiektów - elewatorów zbożowych. Układ podobnie jak System składa się z czujników i urządzeń elektronicznych małej mocy. Gwarancję największego bezpieczeństwa otrzymuje się jeśli wszystkie podzespoły lub elementy (czujniki i sondy) pracujące w strefie zagrożonym wybuchem mają budowę przeciwwybuchową [25÷29, 32÷34] i iskrobezpieczną potwierdzoną odpowiednimi atestami np. Kopalni Doświadczalnej „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa.

W projektowaniu układów pomiarowych stosowano następujące metody:

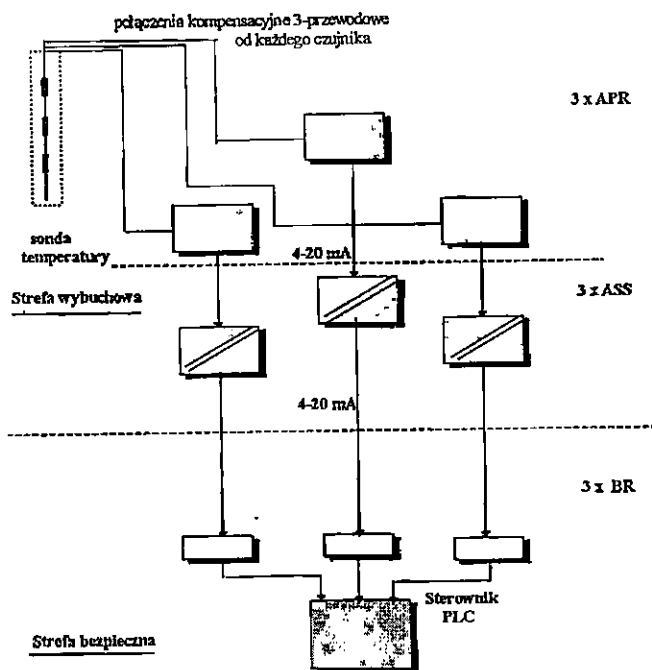
- \* metodę barier Zenera dla Układów i małych Systemów Monitoringu,
- \* z zastosowaniem magistralowych systemów i atestowanych sond pomiarowych do Systemów Monitoringu.

Przykład wdrożonego Układu pracującego w kilku obiektach jest przedstawiony na rys. 13 [10].

Układ składa się z bezpośrednio połączonych jednostek funkcjonalnych. W strefie bezpośredniego zagrożenia wybuchowego znajdują się sondy pomiarowe 3-czujnikowe i przetworniki z sygnału rezystancyjnego na standardowy wraz z separatorami stanowiącymi oddzielenie galwaniczne obwodów strefy wybuchowej



i bezpiecznej. Po przejściu sygnału przez bariery Zenera BR, wchodzimy w strefę bezpieczną, gdzie można stosować dowolną aparaturę. Bariery stanowią tutaj zapórę dopływu energii do strefy wybuchowej. Ich zastosowanie umożliwia realizację systemu iskrobezpiecznego bez konieczności łącznego atestu na cały układ monitoringu. Atesty wymagane są tylko na bloki typu APR, ASS i sondy pomiarowe oraz oddzielny zasilacz tych bloków (pominięty na rys. 14) i bariery ochronne - Zenera.



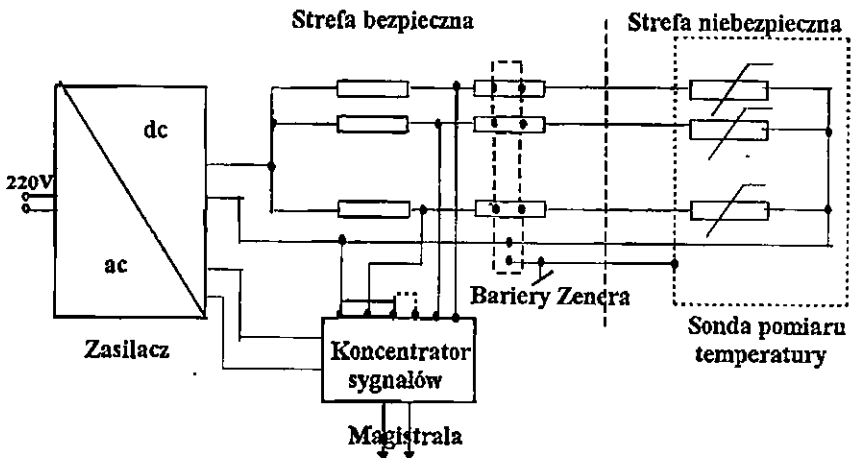
Rys. 14. Schemat ideowy układu monitoringu temperatury o bezpośrednim połączeniu jednostek funkcjonalnych

Układ monitoringu został zrealizowany dla baterii silosów przeznaczonych do składowania mączki kakaowej. Każdy z silosów wyposażony jest w elastyczną sondę pomiarową o trzech czujnikach pomiarowych typu Pt 100. Sygnały standardowe są doprowadzane do analogowych kart wejściowych sterownika mikroprocesorowego.

Wartości tych sygnałów są wyświetlane na monitorze i wkomponowane w rysunek synoptyczny baterii silosów.

Pomiarowy system magistralowy, który jest przedstawiony na rys. 4, złożony jest z czujników pomiarowych, koncentratorów przetworników i zespołu komputerowego. W strefie niebezpiecznej pracują tylko czujniki. Rolę barier ochronnych - Zenera przejęły koncentratory, które wyposażone są w bariery galwaniczne - transoptory, oddzielające optoelektronicznie obwody znajdujące się w strefie zagrożonej wybuchem od strefy bezpiecznej. W systemach, w których koncentratory nie zapewniają iskrobezpieczeństwa można stosować również bariery Zenera jak to przedstawiono na rys. 15.

Sondy pomiarowe, a szczególnie ich głowice powinny być wykonane przeciwwybuchowo. Iskrobezpieczny powinien być również obwód elektryczny zasilający czujniki sond oraz obwód sygnałowy z czujników do koncentratorów. Na obudowie i powierzchni zewnętrznej sond nie powinien występować niebezpieczny ładunek elektrostatyczny. Przesył sygnałów w magistrali do oddalonej jednostki centralnej odbywa się siecią dwu lub czteroprzewodową, która wymaga analizy ze względu na wymagania iskrobezpieczeństwa.



Rys.15. Schemat ideowy iskrobezpiecznego System magistralowego z barierami Zenera

Linia jest czwórnikiem o parametrach rozłożonych charakteryzującym się maksymalną dopuszczalną indukcyjnością  $L_{max}$  oraz maksymalną pojemnością  $C_{max}$  i rezystancją na jednostkę długości. Wartości te obliczane są zgodnie z IEC 79-11, UL 913 itp. [5] i wynikają też z parametrów zastosowanego okablowania. Linia powinna być ekranowana i zabezpieczona mechanicznie. Narażona jest na pracę przy drganiach mechanicznych wywołanych pracą wielu urządzeń technologicznych w magazynie zbożowym oraz wpływ wielu czynników środowiskowych: zmiennych temperatur, dużej wilgotności, silnego zapylenia itp. Ocenę iskrobezpieczeństwa linii przy powyższych założeniach przeprowadza się stosując jedną z trzech znanych metod [5].

Pozostałe elementy Systemu Monitoringu - elementy części centralnej (zespół komputera), ze względu na pracę w strefie bezpiecznej, nie wymagają specjalnej budowy.

Opracowywana ostatnio konstrukcja elastycznej sondy pomiarowej w której wykorzystuje się wielopunktowe pomiary temperatury za pomocą światłowodów musi uwzględniać nowe zagrożenia wybuchowe. Zachodzi potrzeba oceny, czy natężenie promieniowania laserowego w zakresie bliskiej podczerwieni może spowodować zapalenie mieszaniny wybuchowej oraz oceny iskrobezpieczeństwa nowych sond i współpracujących urządzeń. Badania prowadzone będą wg. zaleceń OSCA (Optical Sensors Collaborative Association) z Wielkiej Brytanii.

Ponieważ, przyczyną ostatniej eksplozji w elewatorze francuskim, było wyładowanie elektrostatyczne, więc szczególnej uwadze poświęca się dobremu odprowadzaniu ładunku elektrostatycznego z powierzchni zewnętrznej sondy. W tym celu przewiduje się badania rezystancji płaszcza polietylenowego sondy. Powierzchniowy ładunek elektrostatyczny musi być doprowadzony do uziemionej warstwy drutów stalowych sondy. Ważne jest, aby rezystancja płaszcza polietylenowego była jak najmniejsza. Polietylen jest odpowiednio spreparowany z masą przewodzącą. Badania odbiorcze sond będą musiały opierać się na pomiarze rezystancji odcinka, np. 1m długości pancerza. Obecnie nie ma jeszcze obowiązku jej sprawdzenia, ale wymagania dotyczące rezystancji sondy i jej uziemienia, podobnie jak jej atestu iskrobezpieczeństwa muszą być w niedługim okresie ustalone i rozwiązane [15]. Nie jest

to zaniedbanie konstruktorów, ponieważ odpowiednie sondy zagraniczne [36] podobnie, nie mają jeszcze odpowiednich atestów. Problem pojawił się niedawno i dlatego prace w tym zakresie wymagają intensyfikacji.

Założenia Systemu Monitoringu związane z wymaganiami przeciwwybuchowości:

- \* kategoria obwodów iskrobezpiecznych -  $i_a$ ,
- \* praca w strefach zagrożonych wybuchem: Z2, Z10, Z11,
- \* grupy mieszanin wybuchowych: pył zbożowy wg Tabl. 1[5],
- \* kategorie niebezpieczeństwa wybuchu: wg Tabl. 2.6[5],
- \* grupy mieszanin wybuchowych wg Tabl.1,
- \* klasy temperaturowe wg [25,29].

## 10. PROCEDURY PROJEKTOWANIA SYSTEMÓW MONITORINGU

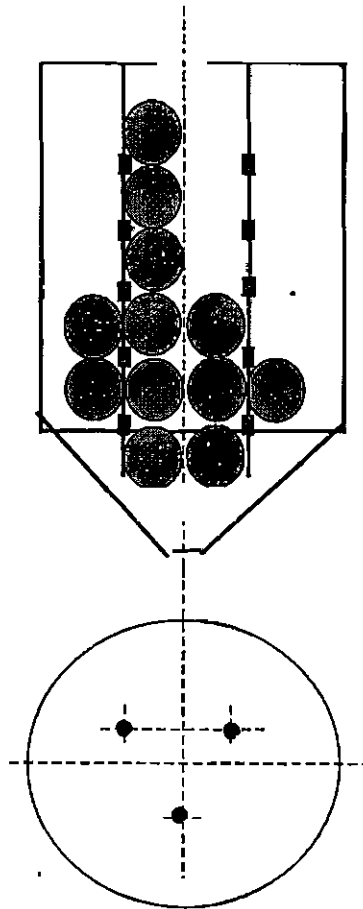
Procedury, opracowane przez autora, przedstawione są w wielu dotychczasowych publikacjach [10] i sprowadzają się do następujących zagadnień:

- przyjęcie koncepcji budowy Systemu dla strefy zagrożonej wybuchem,
- rozmieszczenie czujników w sondach pomiarowych i określenie liczby sond przypadających na poszczególne komory elewatora i na cały obiekt,
- określenia koniecznej wytrzymałości stropów, w których zamocowane będą sondy pomiarowe,
- określenie rozkładu przestrzennego rozmieszczenia elementów Systemu Monitoringu oraz okablowania.

Rozmieszczenie czujników pomiarowych wynika z budowy elewatora oraz z badań rozkładu temperaturowego wewnątrz masy ziarna przedstawionego w punkcie 3. Procedura polega na podziale przestrzennym komory elewatora lub silosa siatką, której podstawowym ogniwem jest kula o promieniu 1,5 m. Zakładając, że źródło samozagrzewania będzie w środku kuli, czujnik będzie mógł reagować na zmianę temperatury już na powierzchni zewnętrznej tej kuli. W innych przypadkach reakcja czujnika będzie wyraźniejsza. Wynika z tego, że czujniki muszą być rozmieszczone w odległości nie większej od 3m. Ograniczenia rozmieszczenia czujników wynikają z przyjętej przestrzeni napełnień, chłodzących oddziaływań ścian bocznych stropu nad komorą i leju spustowego. Na rys.15 zaproponowano rozmieszczenie czujników i sond. W stosunku do rzeczywiście występujących komór model ten różni się wysokością oraz umieszczeniem punktów zsyłu. Zasada jednak pozostaje ta sama.

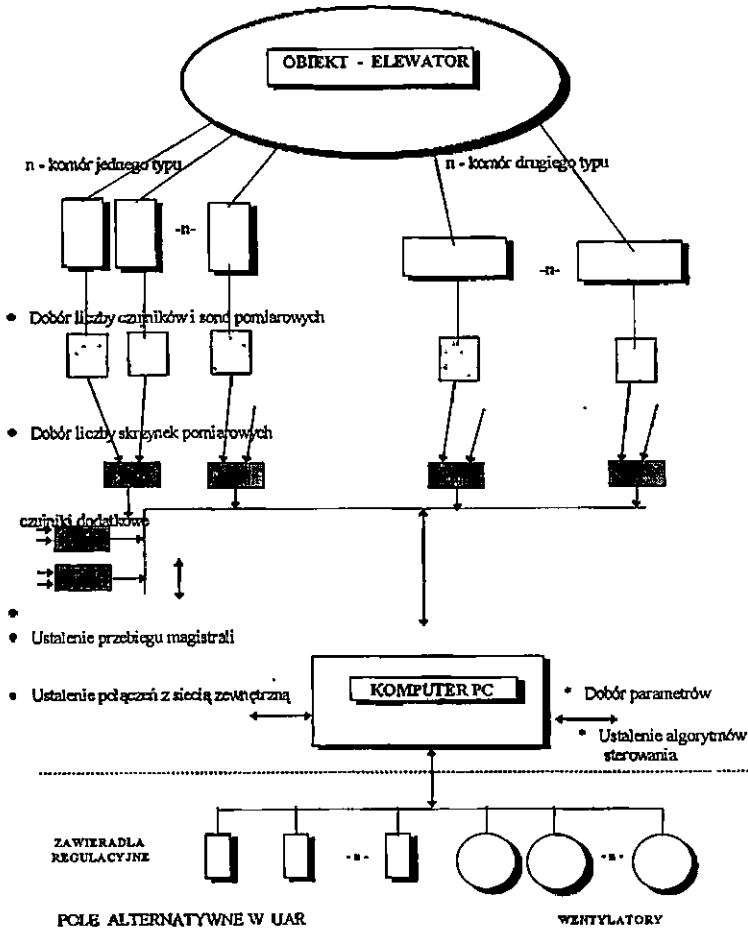
Wcześniejsze metody ustalania rozmieszczenia punktów pomiarowych [8] różniły się kształtem siatek przestrzennych i w konsekwencji stosowano mniejszą liczbę czujników temperatury.

Największe problemy ograniczające szybkie wprowadzanie Systemów Monitoringu na obiekty związane są z odpowiednią wytrzymałością stropów, w których montowane są sondy pomiarowe. Starsze obiekty muszą mieć specjalne wzmocnienia, a w niektórych przypadkach nie jest możliwe ich wykonanie. Koszt wykonania wzmocnień jest porównywalny z całkowitym kosztem całej aparatury pomiarowej, dlatego nie można go pominąć.

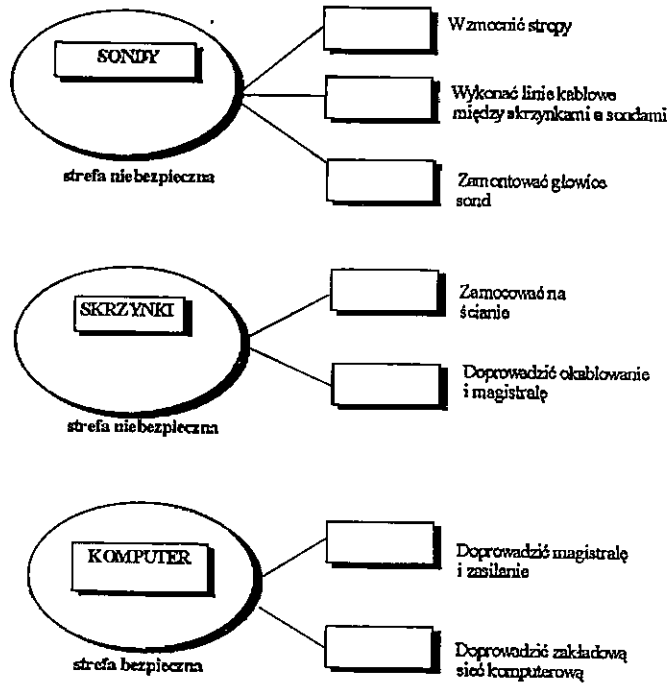


Rys. 16. Przykład podziału przestrzeni wewnątrz komory na siatkę kulistą i rozmieszczenia czujników w trzech sondach pomiarowych

Na rys.17. i rys. 18 przedstawione są procedury projektowania i instalowania Systemów Monitoringu.



Rys. 17. Procedura projektowania Systemu Monitoringu



Rys. 18. Wykaz ważniejszych prac instalacyjnych koniecznych do uruchomienia obiektowego Systemu Monitoringu



## 11. OPTOELEKTRONICZNY POMIAR TEMPERATURY

Pomiar temperatury w wielu przypadkach, jak na przykład w urządzeniach wysokiego napięcia, w układach poddanych działaniu promieniowania mikrofalowego lub silnego pola magnetycznego stwarza duże problemy techniczne i poddany jest licznym oddziaływaniom zmniejszającymi dokładność pomiaru i wprowadzającym inercję w odczycie. W tych dziedzinach rozwija się ostatnio pomiar temperatury za pomocą światłowodów, który zapewnia dobrą izolację galwaniczną, i ma dużą odporność na inne oddziaływania środowiskowe. Ponadto, układ pomiarowy: czujnik i sieć światłowodowa można stosować w pomieszczeniach wybuchowych, przy łatwym spełnieniu wymagań iskrobezpieczeństwa. Przesyłana energia do celów pomiarowych jest wielokrotnie mniejsza, w tym układzie, od energii zapłonu mieszaniny lub pyłów wybuchowych. Dlatego zespół, z wiodącą rolą autora, zdecydował się na budowę sond pomiaru temperatur [10,15]. Można również spodziewać się, że światłowodowe sondy będą miały mniejszą średnicę niż sondy klasyczne. Tym samym oddziaływanie mechaniczne ziarna będzie mniejsze.

### 10.1. Teoretyczne podstawy wybranych metod pomiaru temperatury w technice światłowodowej

Pomiar temperatury przy wykorzystaniu metody światłowodowej w oparciu o wiele zjawisk fizycznych jest teoretycznie możliwy. Praktycznie każde zjawisko fizyczne związane z oddziaływaniem promieniowania z materią, które jest zależne od temperatury naświetlanej próbki może zostać wykorzystane do wyznaczenia jej temperatury. Doprowadzenie za pomocą światłowodu promieniowania mającego oddziaływać z próbką, której temperatura będzie wyznaczona, a następnie odprowadzenie za pomocą światłowodu (często jest to ten sam światłowod) promieniowania będącego efektem takiego oddziaływania, jest tylko utrudnieniem technicznym, mogącym obniżyć czułość metody, ale nie wpływającym na możliwości wykonania eksperymentu.

Pierwszym etapem badań zjawisk fizycznych były prowadzone w PIAP i na Uniwersytecie Warszawskim - UW [14] badania podstawowe kilku opisanych w literaturze metod optycznych pomiaru temperatury. Na podstawie przeprowadzonej analizy, za najbardziej obiecujące metody uznano metodę opartą na pomiarze stosunku intensywności pasm stokesowskich i antystokesowskich w widmie ramanowskim, metodę polaryzacyjną, fotoluminescencyjną i metodę opartą na przesuwaniu się położenia pasma absorpcyjnego półprzewodnika. Warto podkreślić, że wyżej wymienione metody były już testowane przez różne zespoły badawcze pod kątem przydatności do pomiarów temperatury przy wykorzystaniu techniki światłowodowej, ale wyniki kończyły się na etapie eksperymentu, ponieważ ich wdrożenie przemysłowe wymagało dużych nakładów finansowych rzutujących na wysokie koszty aparatury. Celem badań jest opracowanie pomiaru światłowodowego, który będzie się nadawać, w pierwszym zastosowaniu, do nowych sond temperatury w elewatorach zbożowych.

Rozeznano następujące światłowodowe metody pomiaru temperatury:

#### \* Metoda ramanowska

Według teorii Smekala [18] możliwe są następujące typy zderzeń pomiędzy fotonem i molekułą:

1) zderzenie elastyczne, w wyniku którego energia fotonu  $h\nu_0$  pozostaje nie zmieniona. Taki typ zderzeń odpowiedzialny jest za rozpraszanie Rayleigha, tzn. rozpraszanie bez zmiany energii fotonów rozpraszanych.

2) zderzenie nieelastyczne, podczas którego foton oddaje molekułą część swojej energii, molekuła przechodzi z jednego stanu stacjonarnego o niższej energii ( $E_1$ ) do stanu o energii wyższej ( $E_2$ ), w rozproszonym zaś promieniowaniu pojawia się foton o energii  $h\nu_0 - (E_2 - E_1)$ , wobec czego w widmie tego promieniowania powstaje linia stokesowska przesunięta ku niższym częstotliwościom w stosunku do linii Rayleigha.

3) zderzenie nieelastyczne, podczas którego foton zwiększa swoją energię kosztem energii molekuly, molekula w stanie wzbudzonym o energii  $E_2$  przechodzi do niższego stanu stacjonarnego o energii  $E_1$ , a różnica tych energii powoduje wystąpienie w rozproszonym promieniowaniu fotonu o energii  $h\nu_0 + (E_2 - E_1)$ , czyli pojawienie się w widmie promieniowania rozproszonego linii antystokesowskiej o częstotliwości wyższej w stosunku do częstotliwości linii Rayleigha.

Na podstawie stosunku intensywności pasm stokesowskich i antystokesowskich można obliczyć temperaturę ciała rozpraszającego promieniowanie [18]. W przypadku rozpraszania promieniowania w nierezonansowym efekcie ramanowskim (tzn. gdy energia fotonów wzbudzających jest zdecydowanie różna od energii fotonów pasm absorpcyjnych danej substancji) temperatura ciała może być obliczona ze stosunku intensywności pasma stokesowskiego ( $I_{st}$ ) i antystokesowskiego ( $I_{ast}$ ) na postawie wzoru:

$$T = -A / \{B + \ln(I_{ast}/I_{st})\}$$

gdzie:  $A = h \nu k^{-1}$

$$B = \ln[(\nu_0 - \nu)^4 / x_p(\nu_0 + \nu)^4]$$

oraz  $T$  oznacza temperaturę ciała w skali Kelvina,  
 $h$  jest stałą Plancka,  
 $k$  stałą Boltzmanna,  
 $\nu_0$  oznacza częstotliwość promieniowania wzbudzającego,  
 $n$  częstotliwość drgania normalnego odpowiadającego mierzonej parze pasm ramanowskich,  
 $x_p$  jest stosunkiem czułości aparatury pomiarowej na promieniowanie pasma antystokesowskiego i stokesowskiego.

**\* Zastosowanie światłowodów o właściwościach anizotropowych (pomiar polaryzacyjne)**

Światłowod anizotropowy jest to światłowod dla którego można zaobserwować różnice właściwości wzdłuż różnych kierunków prostopadłych do głównego kierunku (Z) propagacji sygnału. Prostym przykładem takiego światłowodu będzie światłowod, którego przekrój poprzeczny ma kształt elipsy. W przypadku przesyłania przez taki światłowod promieniowania o odpowiednio dobranej dla danego światłowodu częstotliwości możemy zaobserwować znaczne różnice w parametrach propagacji światła o różnych kierunkach polaryzacji. Może to być w zależności od ciśnienia, któremu jest poddany światłowod i jego temperatury. Porównanie intensywności światła o różnych kierunkach polaryzacji (często jest to realizowane jako pomiar kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła) służy do określenia ciśnienia lub temperatury.

**\* Pomiar temperatury oparty na fotoluminescencyjnych sensorach**

Fotoluminescencją nazywamy ogólnie promieniowanie emitowane przez atomy albo cząsteczki powracające do stanu podstawowego z elektronowego stanu wzbudzonego, w którym znalazły się dzięki absorpcji fotonów o odpowiedniej energii. Intensywność promieniowania fotoluminescencyjnego zmniejsza się zazwyczaj eksponencjalnie w funkcji czasu. Mierzony w danym przedziale czasu zanik promieniowania fotoluminescencyjnego jest wtedy opisywany równaniem:

$$I(t) = A e^{-t/\tau} + \varepsilon(t) + B \quad (0 < t < w)$$

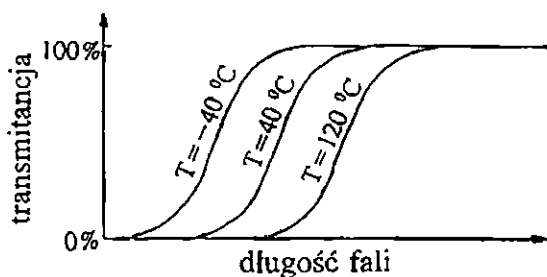
- gdzie: **I** - intensywnością promieniowania fotoluminescencyjnego,  
**t** - zmienną oznaczającą czas,  
**w** - długość przedziału czasu w którym dokonujemy pomiarów,  
 **$\varepsilon(t)$**  - współczynnik opisujący różne szумы w układzie,

- B** - poziom linii bazowej za występowanie której jest odpowiedzialny na przykład prąd ciemny detektora,  
**A** - początkowe natężenie promieniowania fotoluminescencyjnego,  
 $\tau$  - średni czas życia stanów wzbudzonych odpowiedzialnych za zjawisko fotoluminescencji.

Na podstawie numerycznej analizy otrzymanych zależności  $I(t)$  można wyznaczyć średni czas życia stanów wzbudzonych. Ponieważ, można w przybliżeniu założyć, że logarytm z czasu życia stanu wzbudzonego jest odwrotnie proporcjonalny do temperatury, na podstawie numerycznej analizy otrzymanych zależności  $I(t)$  można wyznaczyć temperaturę układu.

#### \* Metoda oparta na określaniu progu absorpcyjnego półprzewodnika

Transmitancja cienkiej płytki kryształu półprzewodnika w pewnym obszarze częstości zmienia się od wartości równej niemal 100% do wartości bliskiej 0% (rys.19). Liczba falowa promieniowania, dla którego obserwowany jest tak gwałtowny skok transmitancji jest liniowo zależna od temperatury (wzrost temperatury kryształu pociąga za sobą przesunięcie progu absorpcyjnego w stronę promieniowania o mniejszej energii fotonów).



Rys. 19. Wpływ temperatury na transmitancję płytki półprzewodnikowej

Pomiar temperatury kryształu odbywa się więc przez dokładne określenie liczby falowej promieniowania dla którego następuje gwałtowna zmiana transmitancji płytki półprzewodnikowej.

## 10.2. Analiza metod pomiaru temperatury ze względu na czułość i koszty pomiarów

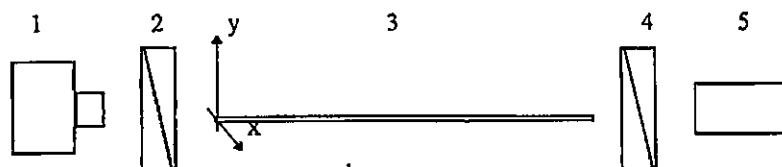
### \* Metoda ramanowska

Praktyczną przydatność metody ramanowskiej do pomiaru temperatury sprawdzaliśmy używając jako próbek substancji rozpraszających światło: krzem (Si), azotek krzemu ( $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), czterochlorek węgla ( $\text{CCl}_4$ ) i trójchlorooctan sodu ( $\text{CCl}_3\text{COONa}$ ). Rejestrację widm ramanowskich w obszarze pasm stokesowskich i antystokesowskich wykonano za pomocą spektrometru Cary 82 (spektrometr Wydziału Chemii UW) zaopatrzonego w jonowy laser argonowy ( $\lambda_{\text{exc}}=514.5 \text{ nm}$ ). Największą precyzję pomiarów udało się nam uzyskać przy użyciu jako próbek rozpraszających światło czterochloroku węgla (osiągniętą precyzję pomiaru szacujemy na  $6^\circ\text{C}$ ) i trójchlorooctan sodu (precyzja pomiaru rzędu  $3^\circ\text{C}$ ). Ponieważ czterochlorek węgla i trójchlorooctan sodu należą do substancji o bardzo dużym przekroju czynnym w procesie nieelastycznego rozpraszania oraz ich najsilniejsze pasmo ramanowskie znajduje się w optymalnym pod względem precyzyjnego wyznaczania stosunku intensywności pasma stokesowskiego i antystokesowskiego w obszarze, poszukiwania innych substancji, które służyłyby jako media rozpraszające promieniowanie. Mogłyby one jedynie nieznacznie poprawić czułość tej metody. Niestety zderzenia nieelastyczne fotonów z molekułami zachodzą bardzo rzadko (jedno zderzenie nieelastyczne przypada na wiele miliardów zderzeń elastycznych). Konieczne jest więc używanie specjalistycznego i bardzo kosztownego oprzyrządowania. Na podstawie rozmowy z przedstawicielami firmy produkującej spektrometry ramanowskie [Jobin Yvon-Spex] stwierdzono, że koszt zakupu niezbędnych przyrządów do wykonania pomiaru temperatury za pomocą metody ramanowskiej znacznie przekroczy 200 tys. PLN (dane z 1997 roku).

Oznacza to, że z przyczyn ekonomicznych ramanowska metoda pomiaru temperatury ma małe szanse na wdrożenie.

### \* Metoda polaryzacyjna

Wyznaczenie temperatury metodą polaryzacyjną związane jest z koniecznością użycia jako sensorów specjalnych światłowodów o właściwościach anizotropowych. Ponieważ nie dysponujemy takimi światłowodami przy analizie tej metody opierano się na badaniach Bock'a, Urbańczyka i Voet'a wykonanych na Uniwersytecie Quebec w Kanadzie [1,2]. Celem badań Bock'a i współpracowników była konstrukcja światłowodowych czujników do pomiaru ciśnienia. Wpływ zmian temperatury i ciśnienia na właściwości optyczne anizotropowych światłowodów jest generalnie analogiczny, dlatego zestawy pomiarowe do mierzenia ciśnienia i temperatury będą wyglądać podobnie. Zestaw wykorzystywany przez Bock'a i współpracowników jest przedstawiony na rysunku 20.



Rys. 20. Zestaw pomiarowy wykorzystywany przez Bock'a i współpracowników.

- 1 - laser półprzewodnikowy,
- 2 - polaryzator,
- 3 - światłowod anizotropowy (sensor);
- 4 - polaryzator (analizator);
- 5 - miernik natężenia promieniowania.

Jak widać na rysunku elementy tworzące układ pomiarowy są za wyjątkiem specjalnego anizotropowego światłowodu łatwo dostępne i dość tanie. Dlatego też, w przypadku niepowodzenia w

opracowaniu innych tanich metod światłowodowego pomiaru temperatury warto będzie podjąć próbę konstrukcji układu opartego na pomiarach polaryzacyjnych.

#### \* Sensory fotoluminescencyjne

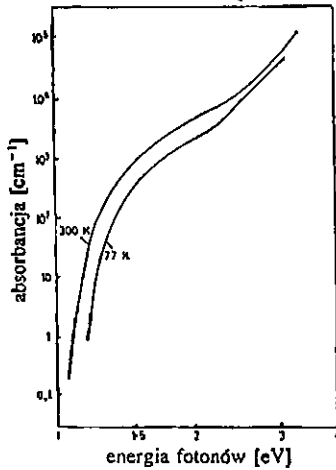
Temperaturę próbki w metodzie fotoluminescencyjnej wyznacza się przez matematyczną analizę zaniku w czasie intensywności promieniowania fotoluminescencyjnego. Średni czas życia "stanów wzbudzonych" w temperaturze pokojowej jest bardzo krótki, na przykład dla naftalenu w 300 K wynosi on 114 ns [18]. Dodatkowym utrudnieniem jest konieczność umieszczania w zestawie pomiarowym elementu chroniącego detektor przed oślepieniem przez "błysk wzbudzający". Oznacza to, że zestaw eksperymentalny jest dość złożony. Poza tym, obserwuje się odstępstwa od prostego eksponentyjnego zaniku w funkcji czasu promieniowania fotoluminescencyjnego. Na przykład dla wysoce domieszkowanego jonami  $\text{Cr}^{3+}$  chryzoberylu, zanik ten jest opisywany jako suma dwóch krzywych eksponentyjnych z dwoma różnymi "czasami życia" [18]. Dlatego sądzi się, że kolejna opisywana metoda pomiaru temperatury, tzn. metoda oparta na wyznaczeniu progu absorpcyjnego półprzewodnika, okaże się metodą o wiele lepszą i tańszą.

#### \* 3.4. Metoda absorpcyjna

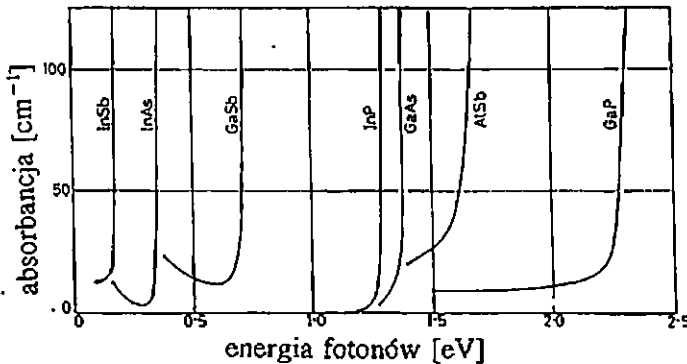
Na rys. 21 i rys. 22, przedstawiono zależności absorpcji półprzewodnika od energii fotonów dla Si, InSb, InAs, InP, GaSb, GaAs, AlSb i GaP [6]. Wartości szybkości przesuwania się "skoku absorpcyjnego" pod wpływem zmiany temperatury  $\{d(h\nu)/dT\}$  są różne dla wymienionych półprzewodników [3]. Jak widać z rysunków 21,22 najbardziej przydatne do naszych celów powinny okazać się płytki fosforu indu (InP) oraz arsenku galu (GaAs). Związane jest to z tym, że półprzewodniki te zachowują się niemal jak związki modelowe (transmitancja cienkiej płytki kryształu półprzewodnika zmienia się w wąskim zakresie częstości od wartości równej niemal 100% do wartości bliskiej 0%) oraz z tym, że



gwałtowna zmiana absorpcji półprzewodnika następuje na granicy widna widzialnego i bliskiej podczerwieni, co jest bardzo korzystne ze względu na łatwość pomiarów optycznych (duża dostępność odpowiednich źródeł promieniowania i detektorów, małe straty podczas przesyłania promieniowania przez światłowód itp.).

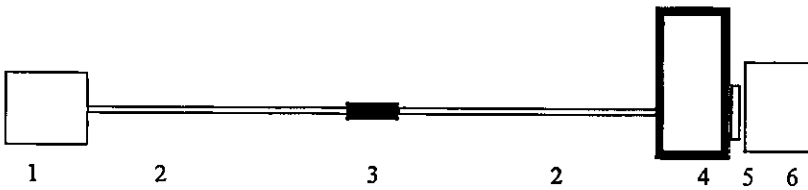


Rys. 21. Zależność absorpcji krzemu od energii fotonów w temperaturze 300 K i 77 K [3]



Rys. 22. Zależności absorpcji różnych półprzewodników od energii fotonów [3]

Ponieważ arsenek galu jest bardziej dostępny niż fosforek indu, we wszystkich wykonanych przez autora pomiarach używane były płytki GaAs. Schemat światłowodowego układu mierzącego temperaturę opartego na pomiarze położenia progu absorpcyjnego półprzewodnika jest przedstawiony na rys.23. Elementy składowe takiego układu są obecnie kompletowane przez nasz zespół [14]. Koszt zakupu niezbędnych elementów szacujemy na około 6-9 tys. PLN.



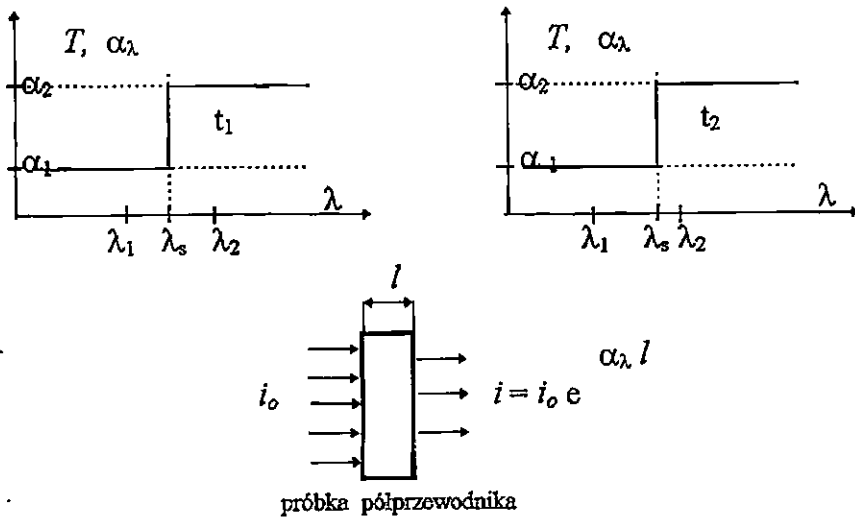
Rys. 23. Schemat blokowy światłowodowego układu mierzącego temperaturę w oparciu o przesuwanie się progu absorpcyjnego półprzewodnika.

1 - źródło światła; 2 - światłowód; 3 - czujnik do pomiaru temperatury (płytką półprzewodnika umieszczona pomiędzy końcówkami światłowodu); 4 - monochromator; 5 - detektor (linijka diodowa); 6 - komputer.

Podjęto również próby konstrukcji prostych układów mierzących temperaturę przy wykorzystaniu metody absorpcyjnej. Postanowiono sprawdzić, czy byłby możliwy pomiar temperatury bez przeprowadzania analizy spektralnej promieniowania. Przy założeniu, eliminacji monochromatora i linijki diodowej (koszt tych elementów to ponad 90% kosztów całości) układ pomiarowy bardzo się uprości.

Parametry metody absorbcyjnej można określić następująco:

Zakładamy, że transmitancja  $T$  a zatem i współczynnik absorpcji  $\alpha_\lambda$  zmieniają się skokowo w funkcji długości fali jak to przedstawiono na rys. 24 [14].



Rys. 24. Skokowa zmiana transmitancji (progu absorpcji) w funkcji temperatury

Obszar widma zawarty między  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  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:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_s} i_0 e^{-\alpha_1 l} d\lambda + \int_{\lambda_s}^{\lambda_2} i_0 e^{-\alpha_2 l} d\lambda =$$

$$\begin{aligned}
 &= i_o [(e^{-\alpha_2 l} (\lambda_s - \lambda_1) + e^{-\alpha_1 l} (\lambda_s - \lambda_1))] = \\
 &= i_o [(e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l}) \lambda_s - e^{-\alpha_2 l} \lambda_1 + e^{-\alpha_1 l} \lambda_2] = \\
 &= i_o \{ (e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l}) [\lambda_o + k(t - t_o)] - e^{-\alpha_2 l} \lambda_1 + e^{-\alpha_1 l} \lambda_2 \}
 \end{aligned}$$


---

Widać, że  $I$  jest funkcją temperatury  $t$ .

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

$$\underline{C_t} = \frac{dI}{dt} \bigg/ I_o = \frac{i_o (e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l}) k}{i_o (\lambda_2 - \lambda_1)} =$$

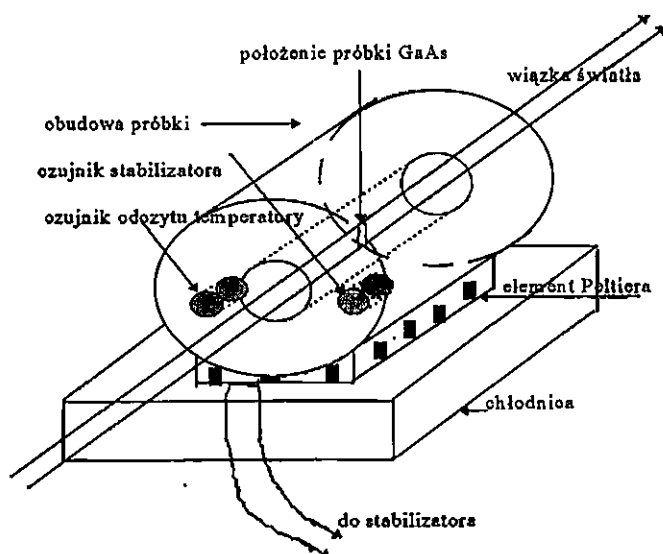
$$= \frac{k}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\alpha_2 l} - e^{-\alpha_1 l});$$

Współczynnik  $C_t$  jest funkcją własności materiałowych  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $k$  oraz grubości płytki  $l$ . Dla  $l_{opt}$  osiąga on wartość maksymalną (co do wartości bezwzględnej).

Przyrównując pochodną  $C_t$  po  $l$  do zera otrzymujemy:

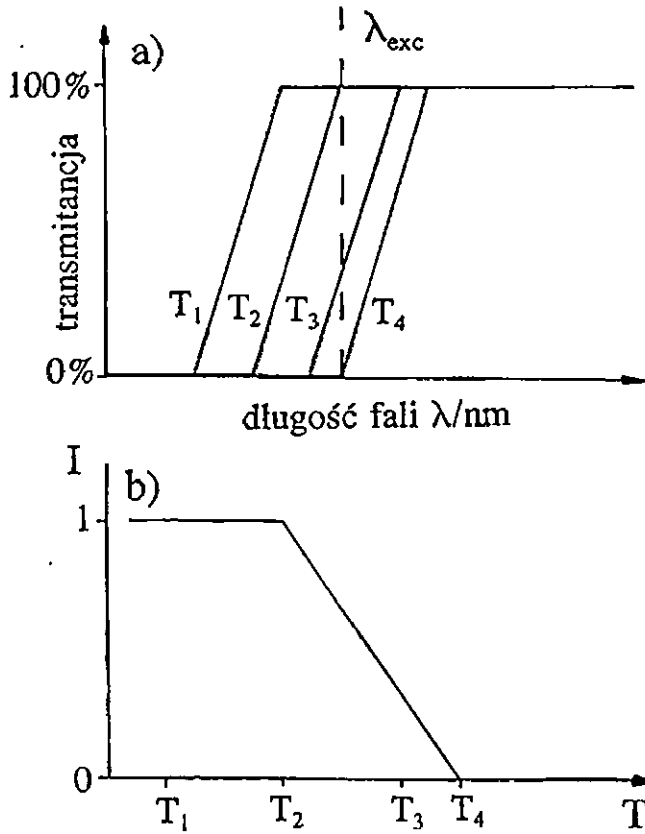
$$l_{opt} = \frac{\ln \alpha_2 - \ln \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

Oprócz testowanego zestawu do pomiaru temperatury został również zbudowany układ pomocniczy służący do termostatowania płytki półprzewodnika w zadanej temperaturze. Układ pomocniczy zrealizowany z wiodącą rolą autora, był złożony z kształtki aluminiowej z wbudowanym elementem Peltiera i elektronicznym układem mierzącym temperaturę. Kształtka była osłonięta pianką poliuretanową i teflonem. Praca elementu Peltiera była kontrolowana przez regulator temperatury sprzężony z elektronicznym termometrem (rys. 25).



Rys. 25. Stanowisko optyczne do badań temperaturowych

W naszych pierwszych eksperymentach z uproszczonym zestawem do pomiaru temperatury postanowiono sprawdzić jego zachowanie przy użyciu monochromatycznego źródła światła produkującego fotony o energii leżącej w obszarze progu absorpcyjnego półprzewodnika. Przewidywane, schematyczne zachowanie takiego układu, ilustruje rys. 26.

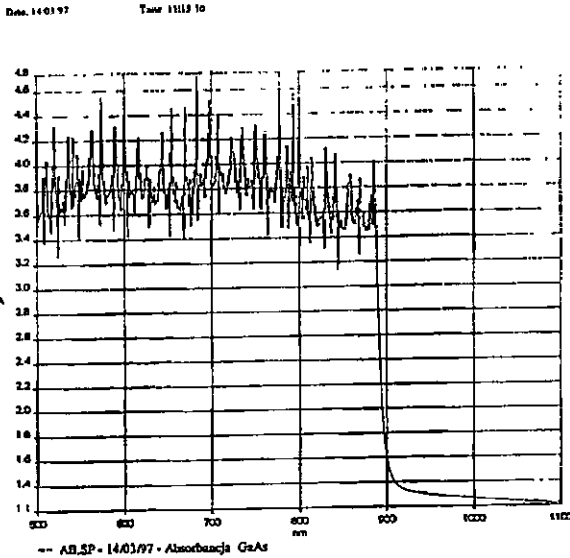


Rys. 26. Schematyczne zachowanie się układu mierzącego temperaturę z monochromatycznym źródłem światła.

- a) zmiany absorbancji płytki półprzewodnika;  
 b) zmiany natężenia promieniowania docierającego do detektora

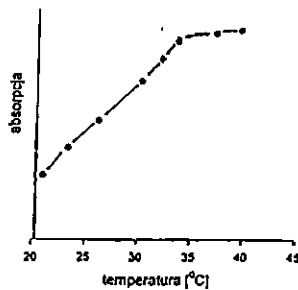
Widmo absorpcyjne używanej przez nas płytki GaAs pokazane jest na rys. 27. Źródłem prawie monochromatycznego promieniowania ( $\lambda=895$  nm, spektralna szerokość linii 1 nm) był użyty przez Wydział Chemii UW spektrofotometr Perkin Elmer Lambda 12.

Docelowo, źródłem promieniowania byłby odpowiednio dobrany tani laser półprzewodnikowy.



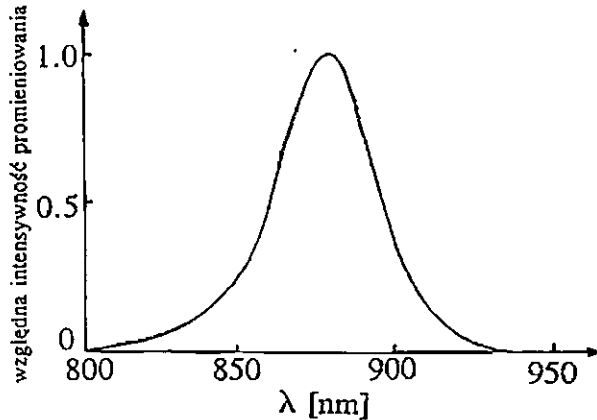
Rys. 27. Widmo absorpcyjne używanej przez nas płytki GaAs.

Zmierzone zmiany absorpcji optycznej części układu w funkcji temperatury są pokazane na rys. 28. Jak widać na rysunku absorpcja układu zmienia się dość wyraźnie w pewnym zakresie temperatur, a następnie powyżej pewnej temperatury osiąga stałą wartość.



Rys. 28. Zmierzona zależność absorpcji optycznej części układu od temperatury.

Wadą takiego zestawu, z czego zdawaliśmy sobie sprawę, jest wąski zakres roboczy. W celu rozszerzenia tego zakresu postanowiliśmy zastosować inne źródła światła. Na przykład gdy jako źródło światła zastosujemy diodę, której charakterystyka jest pokazana na rys.29, znacząca zmiana intensywności światła docierającego do detektora będzie zachodziła w szerokim zakresie temperatur.



Rys. 29. Widmo promieniowania wysyłanego przez wybraną diodę pracującą w paśmie podczerwieni

Pewnym niebezpieczeństwem związanym z opisanym sposobem pomiaru temperatury jest ewentualna zmiana parametrów optycznych diody pracującej w podczerwieni w trakcie jej długotrwałej eksploatacji. Może to powodować wystąpienie błędów pomiarowych temperatury. W celu oszacowania wielkości ewentualnych błędów, przewiduje się długotrwałe testy omawianego układu.

### 10.3. Ocena dotychczasowych wyników prac oraz wybór metody pomiarowej i dalsze kierunki działania

Porównując stopień złożoności układów niezbędnych do wyznaczenia temperatury na podstawie pomiarów ramanowskich, polaryzacyjnych, fotoluminescencyjnych i absorpcyjnych możemy

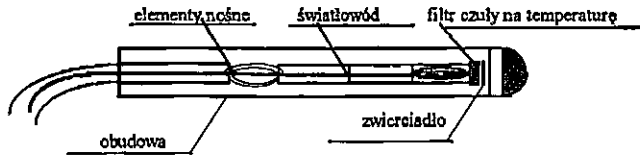


stwierdzić, że metoda oparta na pomiarze położenia pasma absorpcyjnego półprzewodnika i polaryzacyjna są metodami zdecydowanie tańszymi od dwu pozostałych. Ze względu na łatwość w zdobyciu komponentów niezbędnych do budowy zestawów pomiarowych metodą absorpcyjną, zdecydowano się na skoncentrowanie wysiłków na budowie prototypowych urządzeń wykorzystujących zależność położenia pasma absorpcyjnego półprzewodnika od temperatury.

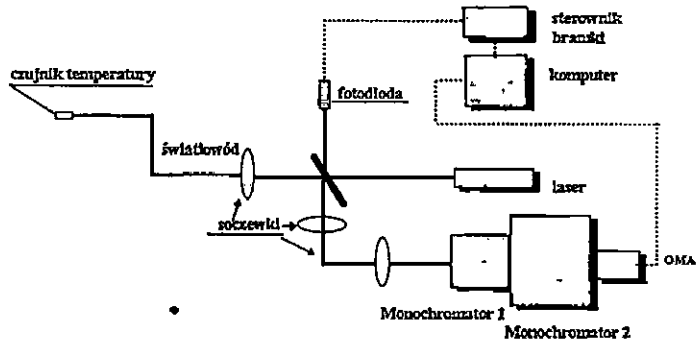
Opracowano dwa różne sposoby wykonania pomiaru temperatury metodą absorpcyjną. Zaproponowane rozwiązania znacznie różnią się niezbędnymi nakładami na ich uruchomienie, co jest związane z różną ich odpornością na zakłócenia zewnętrzne i odpornością na ewentualną zmianę parametrów elementów składowych systemu w trakcie ich długotrwałego użytkowania. W celu wybrania optymalnego rozwiązania należy jeszcze przeprowadzić długotrwałe testy. Nie wyklucza się, że obydwa zaproponowane rozwiązania będą mogły być wykorzystywane praktycznie, gdy zostanie osiągnięty kompromis pomiędzy czułością metody, odpornością na zakłócenia i kosztami układu.

Przeprowadzone badania wymagały wykonania oryginalnych stanowisk badawczych łącznie z wyposażeniem ich w unikatową aparaturę. Opracowanie aparatury, z dominującym udziałem autora, takiej jak spektrofotometr z optoelektroniczną linijką świetlną oraz stanowisko optyczne do badań temperaturowych z elementem Peltiera, przyczyniło się do ukierunkowania badań i otrzymania już pozytywnych rezultatów.

Dalsze prace będą się koncentrowały nad konstrukcją czujników temperatury z wykorzystaniem przebadanych półprzewodników. Czujniki dostosowane będą do współpracy z jedną tylko linią światłowodową, tak jak to przedstawiono na rys. 30. Przesył sygnału i odbiór sygnału odbitego w zwierciadle czujnika po przejściu przez półprzewodnik prowadzony jest jedną linią, rys. 31, a system sterowania pozwala wysłać wiązkę świetlną inicjującą i analizować odpowiedź układu.



Rys. 30. Światłowodowy czujnik temperatury [4]



Rys. 31. Układ pomiarowy temperatury ze światłowodem [4]

## 12. DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Zadaniem Systemów i Układów Monitoringu, stosowanych w magazynach zbożowych, jest kontrola parametrów składowanego ziarna w celu obniżenia strat przechowalniczych i sygnalizowanie przekroczenia dopuszczalnych wartości parametrów. W ekstremalnych warunkach, przy wadliwym funkcjonowaniu Systemów kontrolnych lub niedostatecznej pracy obsługi może dojść do eksplozji w elewatorze. Sprzyja temu wysokie zapylenie atmosfery elewatorów. Statystycznie, wybuchy w elewatorach występują rzadko, ale skutki bywają katastrofalne, prowadzą do zniszczenia nie tylko magazynowanego ziarna, ale uszkodzenia budynków, strat w obsłudze itp. Częściej występują straty jakościowe i ilościowe w ziarnie, mniej widoczne, ale przynoszące duże straty finansowe. Szacuje się, że straty te sięgają w kraju nawet do 6% wartości składowanego ziarna. Na podstawie analizy ekonomicznej [7] koszt zakupu i zainstalowania odpowiedniej aparatury kontrolnej amortyzuje się już po 3-letach. Dlatego celowe jest szerokie wprowadzanie Systemów Monitoringu. Obecnie, zainstalowany jest on tylko w 30% elewatorów krajowych. Liczba ta nie jest wystarczająca. Sytuacja była jeszcze gorsza do czasu opracowania, przez zespół pod kierunkiem autora, pierwszych elastycznych sond pomiarowych. Kolejne prace, prezentowane w niniejszym opracowaniu, powinny się przyczynić się do rozpowszechnienia Systemów.

Budowa Systemu Monitoringu dla magazynów zbożowych różni się od systemów znanych z innych dziedzin przemysłu: rodzajem zadań, różnorodnością struktur i stosowaniem specyficznych elementów. U podstaw zasadniczych różnic leżą metody pomiarowe, z których wynikają również konstrukcje aparatury. Systemy składają się z dużej liczby czujników różnych parametrów i przetworników, sięgającej kilku tysięcy sztuk. Ograniczono się tylko do rozpatrywania czujników i sond temperatury, podając równocześnie materiały źródłowe omawiające szerzej problemy konstrukcji i badań itp. dalszych czujników [11]

W niniejszej pracy sformułowano wymagania stawiane systemom w oparciu o wcześniej opracowane zalecenia i wytyczne specjalistów krajowych i zagranicznych, a także przedstawione w odpowiednich dokumentach normalizacyjnych. Dokumenty RWPG z tego zakresu [9], opracowane przy współudziale autora, w dalszym ciągu nie straciły aktualności, mimo że nie są już obligatoryjne. Obecnie, zwraca się uwagę na dokumenty FAO oraz zalecenia ISO podane w [23,24], a także na ustalenia i dyskusje w różnych organizacjach międzynarodowych, zwłaszcza IMEKO.

W tej ostatniej organizacji, autor pełnił funkcję, wiceprzewodniczącego sekcji pomiarów w rolnictwie.

Przedstawiono również przykłady realizacji systemów przeznaczonych głównie do pomiarów i kontroli trzech tylko parametrów a mianowicie: temperatury ziarna, jego wilgotności i wysokości zapełnienia (stopnia załadowania) magazynu, silosu, komory elewatora w oparciu o współczesne elementy i podzespoły. Zgodnie z tendencją rozwojową, w obrębie jednego przedsiębiorstwa dąży się obecnie do centralizacji systemów pomiarowo-kontrolnych z systemami regulacyjnymi, systemami i układami sterowania transportem oraz różnymi ciągami technologicznymi. Na tym tle omówiono systemy elastyczne, wyposażone w zrobotyzowane węzły [10].

W ciągu ostatnich 20 lat obserwuje się zmiany w konstrukcji układów i systemów sterowania: pomiarowo-kontrolnych i regulacyjnych. Początkowo była to aparatura analogowa z elementami elektromagnetycznymi-stykowymi, przełączającymi czujniki pomiarowe. Następnie wprowadzono technikę cyfrową z bezstykowymi przełącznikami. W oparciu o bloki mikroprocesorowe powstały układy uniwersalne równoległe z układami autonomicznymi, bazującymi na mikroprocesorach jednoukładowych [8, 9]. Obecny etap można scharakteryzować upowszechnieniem komputerów personalnych PC i sterowników programowalnych PLC oraz przejściem przez nich funkcji sterowniczych. Tym podstawowym członem pełniącym funkcje jednostek centralnych towarzyszy rozwój bloków współpracujących - koncentratorów, przetworników, sygnalizatorów itp. Dąży się również do znormalizowania przesyłu sygnałów za pomocą magistrali RS 232, a

ostatnio RS 232 i RS 485. W systemach magistralowych występuje istotna redukcja połączeń kablowych. Można je lepiej zabezpieczyć przed przepięciami łączeniowymi i elektromagnetycznymi, a przy tym ich serwis jest prosty. W dużych obiektach magazynowych typu: elewator i młyn, instaluje się własne zakładowe sieci komputerowe, za pomocą których prowadzone są prace administracyjne, nadzorcze, a także sterowanie procesami technologicznymi. W tym przypadku systemy pomiarowo-kontrolne współpracują z siecią. Przesyłanie sygnałów, ze względu na odległość przestrzenną na obiekcie, może być prowadzone za pośrednictwem sieci światłowodowej o dużo większej odporności na zakłócenia przemysłowe. Stacje systemu mają połączenia kablowe tylko na niewielkie odległości.

Zaletą sieci jest dostępność, z każdej stacji, do informacji określającej stopień załadowania komór elewatora, wartości pomiarowej wilgotności i temperatury ziarna, itp. W przyszłości przewiduje się również stosowanie sieci neuronowych i nowych systemów wynikających z realizacji etapu „V” czyli „wszechstronności”.

Najlepsze jednak rozwiązanie sieciowe nie rozwiąże problemów wynikających z konstrukcji czujników, sond pomiarowych i przetworników. W pracy ograniczono się do przedstawienia tylko jednego problemu związanego z konstrukcją i ze stosowaniem elastycznych sond pomiaru temperatury. Szczególnie istotne są badania rzeczywiste i symulacyjne przebiegu pól termicznych powstałych od samo zagrzewania składowanego ziarna. Prawidłowe ich wyznaczenie ma wpływ na metodykę rozmieszczenia punktów pomiarowych wewnątrz kontrolowanej masy ziarna.

Inne problemy, dotyczące pomiarów wilgotności i ultradźwiękowego pomiaru wysokości, były już analizowane i publikowane w pracach autora wykonywanych w ramach projektów badawczych i projektu celowego [6,7,14,15].

Właściwości metrologiczne sond pomiarowych wynikają często z ich konstrukcji możliwej do zrealizowania. Sondy muszą być pancerne i jednocześnie elastyczne, żeby wytrzymać obciążenia mechaniczne: statyczne i dynamiczne. Taka budowa wpływa niekorzystnie na ich inercję temperaturową, a więc na szybkość

odwzorowania mierzonej temperatury. Zastosowanie sond poprzedzone było omówieniem zjawisk temperaturowych w masie ziarna. Przyjęto również metodykę wykrywania pól temperaturowych. Początkowo opierano się na doświadczeniach różnych zagranicznych ośrodków naukowych badających to zjawisko, a także na praktycznych zaleceniach znanych producentów aparatury pomiarowej. Później, po uruchomieniu w PIAP komputerowego stanowiska do pomiarów temperatury, działającego na zasadzie pomiarów emisji promieniowania ciał w paśmie podczerwieni, można było te badania zweryfikować. W efekcie metodyka została zmodyfikowana, w niektórych punktach zaostrożona - np. w rozmieszczeniu punktów pomiarowych i zmniejszeniu odległości czujników w sondzie, a w niektórych złagodzona - np. wyłączono ze strefy pomiarowej duży obszar w pobliżu górnej warstwy przyny oraz w pobliżu ścian zbiornika (komory elewatora lub silosu). Przeprowadzono analizę przydatności kilku typów czujników temperatury pod względem dokładności, liniowości, powtarzalności i charakterystyk dynamicznych. Wybrano do zabudowy w sondach, czujniki nowej generacji - miniaturowe obwody scalone z prądowym sygnałem wyjściowym. Czujniki te, wg. opinii ekspertów amerykańskich cytowanej w [10], w zakresie temperatur od 0-100°C są już obecnie bezkonkurencyjne i wyprą dotychczas stosowane czujniki - termistorowe, metalowe (rezystancyjne) itp.

Interesujące wyniki badań otrzymano wyznaczając stałe czasowe sond za pomocą miernika podczerwieni z kierunkowym wskaźnikiem laserowym [10]. Okazało się, że dotychczas wykonywane sondy o małej średnicy - 10 mm mają znacznie dłuższe stałe czasowe niż duże sondy o znacznie większej średnicy - 17 mm. Wynika to z ich konstrukcji, mimo iż panowało przekonanie, że jest dokładnie odwrotnie. Wyniki tych badań powinny być uwzględnione w modyfikacji istniejącej normy [24].

Po opracowaniu w PIAP nowych konstrukcji sond o wytrzymałości mechanicznej 3-krotnie większej niż dotychczas produkowanych, dalsze ich ulepszanie zostało wyczerpane.

Im mniejsza średnica sondy tym mniejsze oddziaływanie mechaniczne. Można więc radykalnie zmienić zasadę pracy sond i czujników w celu obniżenia średnicy z 16 do 14 mm lub nawet do

10 mm. Zaproponowano, na podstawie literatury [18] konstrukcję sond z wykorzystaniem światłowodów z półprzewodnikowymi czujnikami temperatury. Zagadnienie to jest już badane na etapie badań podstawowych w ramach realizowanego projektu badawczego.

Zastosowanie aparatury kontrolno-pomiarowej w magazynach o wysokim stopniu zapylenia wymaga spełnienia przez nią odpowiednich wymagań iskrobezpieczeństwa oraz uzyskania odpowiednich atestów itp. W systemach tych stosuje się ze względów bezpieczeństwa również dodatkowe bloki, jak np. bariery ochronne. Przedstawienie wszystkich kryteriów przeciwwybuchowości nie jest intencją tej pracy, chodzi jednak o zasygnalizowanie tego ważnego problemu, którego rozwiązanie jeszcze trwa. W podobny sposób poruszono zagadnienie zjawisk elektrostatycznych, w skutkach bardzo niebezpiecznych, wywołanych ruchem ziarna wzdłuż sond pomiarowych.

Większość badań prowadzono dla ziarna suchego o niskiej wilgotności, odpowiadającej cechom ziarna przeznaczonego do przechowywania. Mniej poznanym jest oddziaływanie na system pomiarowy (sondy i czujniki) ziarna o podwyższonej wilgotności. Wilgotność bowiem wpływa zarówno na wielkość sił dynamicznych, jak również na tworzenie się warunków sprzyjających do ich powstania. Zwiększa się również stała czasowa masy ziarna poddanego wietrzeniu, co uzasadnia stosowanie odpowiednich algorytmów sterowania [8,9] zaproponowanych i przebadanych doświadczalnie. Przewiduje się również, w niedalekiej przyszłości, lepsze wyposażenie magazynów we właściwą liczbę czujników i sond pomiarowych, co umożliwi ocenę intensywności procesów metabolicznych. Zastosowane będą m. in. następane czujniki, np. CO, CO<sub>2</sub>, stężenia par alkoholu itp.

Na podstawie analizowanych uwarunkowań konstrukcyjnych zaproponowano wytyczne do projektowania systemów pomiarowo-kontrolnych w wykonaniu przeciwwybuchowym, przeznaczonych do istniejących elewatorów oraz metody dostosowania obiektu do zabudowy w nich tych systemów.

### 13. Wnioski

1. Siły wzdłużne, spowodowane siłami tarcia i działające na zawieszony w masie ziarna (materiałów sypkich) elastyczne sondy pomiarowe temperatury, są najmniejsze wzdłuż osi pionowej zbiornika. Wartość ich wzrasta w funkcji przesunięcia sond od środka w kierunku ścian zbiornika, zgodnie z przedstawionym w pracy równaniem określającym wartość sił. Wilgotność ziarna powoduje również wzrost sił wzdłużnych, zgodnie z zaproponowanym równaniem, uwzględniającym procentową zawartość wody w masie ziarna. Równania (1) i (2) mogą być podstawą projektowania miejsca zawieszenia sond pomiarowych w zbiorniku, uwzględniając właściwości rozchodzenia się samoistnych pól temperaturowych i sposób ich wykrywania oraz wpływu wilgotności masy ziarna.
  
2. Stała czasowa sondy elastycznej ( $8 \text{ mm} \leq \phi \leq 20 \text{ mm}$ ) zależy głównie od budowy sondy, a w mniejszym stopniu od jej grubości. Sondy o średnicy 17 mm i budowie pancerza złożonej z dwóch warstw drutów stalowych mają stałą czasową dużo mniejszą niż sondy o średnicy 10 mm o budowie przedstawionej w pracy. Najczęściej stosowane sondy o 16 mm uśredniają mierzoną temperaturę. Czujniki wskazują temperaturę niższą o około  $1^{\circ}\text{C}$  od temperatury rzeczywistej, mierzonej na zewnątrz sondy. Z założeń i wymagań na sondy pomiarowe wynika, że w celu wykrycia pól temperaturowych czujniki w sondzie powinny być umieszczone w odległościach 3 m w każdym kierunku, zgodnie z proponowaną metodyką badań. Ze względu na wykryty błąd wskazań, czujniki wykrywają źródła temperaturowe o wyższej temperaturze, mogące już uszkadzać ziarno. Proponuje się zmniejszenie odległości między czujnikami do 3 m i wprowadzenie tego zalecenia do istniejącej metodyki badań. Z kolei czas gotowości sond do odczytu temperatury, który wynosi wg. norm ISO [24] 1 min, jest nierealny do spełnienia przez sondy elastyczne (jak wynika to z ich dłuższych stałych czasowych). Wymaganie to może dotyczyć tylko sond przenośnych (laskowych). Obecne wymagania normy ISO



[24] muszą ulec zmianom. Pozostałe wymagania metodyki pomiarowej nie ulegają zmianom.

3. W algorytmach UAR systemów wentylacyjnych należy uwzględnić właściwości masy ziarna suchego i wilgotnego. Stała czasowa ziarna wilgotnego jest znacznie większa od stałej czasowej ziarna suchego, jak to wyznaczono na podstawie prowadzonych badań [8]. Dla zbiorników z ziarnem, o wysokości zasypania  $H$  do wysokości średnicy, czyli  $H = D$ , stała czasowa ziarna wilgotnego jest większa o 50 % od stałej czasowej ziarna suchego. Pomiar stałej czasowej masy ziarna może być zastąpiony przez pomiary różnicy w wilgotności powietrza wentylacyjnego nawiewowego i wychodzącego z przemy. Wartość tej różnicy powinna wpływać na algorytm sterowania wentylacją dla małych obiektów, zwiększając np. okresowy czas nawiewu lub skracając przerwy między kolejnymi załączeniami wentylatorów.
4. Przestrzeń pomiarowa temperatury ziarna w zbiorniku jest pomniejszona o przestrzeń przylegającą do ścian i dołu (podstawy) zbiornika. Ograniczenia dotyczą również przestrzeni górnych warstw przemy. Wszędzie tam występuje silne oddziaływanie chłodzące powietrza zewnętrznego, otaczającego zbiornik. Wartości pomiarowe temperatury mogą być zaniżone. Pomiary, na podstawie przeprowadzonych eksperymentów, należy prowadzić w odległości większej od  $1/4 D$  od ścian, dołu i górnej warstwy zbiornika. Wymagania te różnią się od podanych w zalecanej metodyce badań temperaturowych ISO[24], uzależniając przestrzeń pomiarową od wymiarów zbiornika, w którym składowane jest ziarno. Należy je uwzględnić przy modyfikacji tej normy.
5. Systemy pomiarowo-kontrolne trzech parametrów: temperatury, wilgotności i wysokości zasypu (stopnia zapełnienia komór) zostały zaprojektowane, wykonane oraz zainstalowane na rzeczywistym obiekcie pilotowym. W systemach sygnały przesyłowe są przekazywane na odległość do 1,5 km za pośrednictwem magistrali RS - 485, o dużej odporności na zakłócenia łączeniowe. Wyniki badań potwierdziły przydatność

tych systemów i obecnie trwają prace nad ich rozpowszechnianiem. Osiągnięte rezultaty zostały poprzedzone długoletnią obserwacją wcześniej opracowanych i zainstalowanych systemów pomiarowych w 20 elewatorach krajowych, gdzie autor wykonywał odpowiednie projekty i badania. Wszystkie te systemy wykorzystywały patent na sondy pomiarowe [35], opracowany z wiodącym udziałem autora.

6. Badania termowizyjne mogą służyć do wyznaczenia ciepłych (termicznych) obrazów elewatorów lub baterii silosów. Do pomiaru temperatury ziarna w przekroju silosu lub komory elewatora ta technika jest mało przydatna.
7. Rozmieszczenie sond i czujników temperaturowych w komorach elewatorów i silosach wymaga uwzględnienia ich rzeczywistych charakterystyk metrologicznych, co najczęściej sprowadza się do zwiększenia liczby punktów pomiarowych lub instalowania sond i czujników o udoskonalonej konstrukcji. Sondy takie mają mniejszą średnicę, większą liczbę czujników, a do ich konstrukcji wykorzystuje się światłowody i zjawiska optoelektroniczne, których oryginalne badania podstawowe zostały już wykonane i przedstawione w ogólnych zarysach.
8. Zasygnalizowane, na podstawie wcześniejszych prac, a także przedstawione w niniejszym opracowaniu problemy techniki pomiarowej w magazynach zbożowych, zostały przez autora rozeznane i w znacznym stopniu rozwiązane.

Metody pomiarowe i niektóre rozwiązania konstrukcyjne sond temperatury i aparatury kontrolno-pomiarowej stosowanej w Systemach Monitoringu zostały zbadane na obiektach pilotowych, a następnie upowszechnione w licznych publikacjach i wprowadzone do Projektów zrealizowanych na ok. 30 obiektach: w elewatorach zbożowych, magazynach płaskich, bateriach silosów i w ciągach technologicznych przetwórstwa zbożowego. Można je zalecić do szerszego stosowania.

Do najważniejszych osiągnięć autora można zaliczyć:

- \* Badania i analizę procesów termicznych w ziarnie zbóż,
- \* Określenie założeń i wymagań na aparaturę Systemu Monitoringu,
- \* Określenie wymagań na badania środowiskowe i iskrobezpieczeństwa,
- \* Opracowanie dokumentów krajowych i międzynarodowych charakteryzujący magazyn zbożowy jako obiekt pomiarów termicznych i innych parametrów kształtujących i chroniących proces metaboliczny składowanego ziarna,
- \* Opracowanie metod pomiarowych podstawowych parametrów Systemu Monitoringu,
- \* Opracowanie układów i Systemów Monitoringu,
- \* Opracowanie elastycznych sond temperatury,
- \* Badanie optoelektronicznych metod pomiaru temperatury i wybór metody, która będzie wykorzystana w sondzie światłowodowej,
- \* Opracowanie procedury projektowania Systemu Monitoringu na obiekcie rzeczywistym,
- \* Opracowanie procedury instalacyjnej Systemu Monitoringu na obiekcie rzeczywistym,
- \* Określenie zaleceń i wniosków wynikających z prowadzonych przez autora badań, które powinny być wprowadzone do norm krajowych i zagranicznych.

## 14. BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] Bock, W.J., Urbanczyk W.: Sprawozdanie z badań układów światłowodowych, University of Quebec, 1997,
- [3] Bryant G.W., Paton A.T., Scott J.C., Stuart A.D., *Int. J. Optoelectron.*, no.6, 1991
- [4] M.C. Elias, S.J. Strach, OSNET<sup>TM</sup> - an engineered fibre - optic sensing system for industrial applications; *Industrial Journal of Optoelectronics*, 1991, vol.6 Nos.1/2, pp.145-163.
- [5] Frączek J.: Aparatura przeciwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym, książka, ŚWT Katowice 1995,
- [6] Jórczak J., Kobosko A., Leśkiewicz K.: Metody i urządzenia pomiarowe dla przechwalnictwa zbożowego, Projekt badawczy, PIAP-1321G, KBN-5 5533 91 02, 92-95r.,
- [7] Jórczak J., Kobosko A., Leśkiewicz K.:Komputerowy system kontroli do elewatorów zbożowych obniżający straty w składowanym ziarnie oraz zmniejszający zużycie energii i paliw, Projekt celowy, PIAP-1298C, KBN-203/C.s5.8/92.,
- [8] Kobosko A.: Wybrane zagadnienia sterowania procesami przechowywania ziemniaków i ziarna zbóż, IBMER, str.149, książka,1983,
- [9] Kobosko A.: Wybrane układy pomiarowe i automatycznej regulacji stosowane do kształtowania mikroklimatu w magazynach rolniczych, IBMER, str.186, książka, 1986,
- [10] Kobosko A.: Systemy pomiarowo-kontrolne stosowane w magazynach materiałów sypkich i ziarnistych, PIAP, str. 92, książka, 1996,
- [11] Kobosko A.:Thermal distribution analyse on material storages realised by noncontact measurement, Konferencja ISMT II, Hayama, Tokyo Institute of Technology-Japonia, str.113-118, 1966,
- [12] Kobosko A.:Monitoring of thermal processes in grain storages, 6-th International Conference on Agrophysics, Lublin, PAN, 1997, str. 9
- [13] 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,
- [14] Kobosko A. i inni: Metody oceny intensywności procesów metabolicznych w przechwalnictwie zbożowym. Projekt badawczy KBN, nr 5 P06F 016, 1709 PIAP, 1996-1999,

- [15] Kobosko A., Leśkiewicz K.: Iskrobezpieczne sondy temperatury do układów kontrolno-pomiarowych stosowanych w elewatorach zbożowych, Projekt celowy KBN 1731/C.T10-8/96, PIAP-1720C, 1996-1999,
- [16] Leśkiewicz H., Kobosko A.: Komputerowy system pomiarowo-kontrolny w magazynach produktów sypkich i ziarnistych. Materiały z KN.: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i Przemysle SP'96-WSI Zielona Góra, PAN, str.143-152, 1996,
- [17] Leśkiewicz H., Kobosko A.: Aparatura kontrolno-pomiarowa dla przechowalnictwa zbożowego, Biuletyn PIAP nr 2-178/95, str.1-37,
- [18] Long D.A.: Raman spectroscopy. Londyn 1977 Mc Graw-Hill.
- [19] 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 1991 Vol. 34(1).
- [20] Schwab C.V., Thompson S.A., Williams A., Ross II.J.: Temperature cable loads comparison between model and full-scale experiments. ASAE Paper 1990 nr 90-4016.
- [21] Sergunow W.S.: Distancyjnyj kontrol temperatury ziarna w elewatorach. Moskwa 1977, Kołos.
- [22] Wolański P.: Grain dust explosion and control, Final Report Grant, książka, str. 258, Warsaw 1993,

## NORMY

- [23] FAO Agricult. Dev. 1990. Paper No. 90.: Handling and storage of food grains.
- [24] ISO 4112:1990 Cereal and pulses - Guidance on measurement of the temperature of grain stored in bulk.
- [25] PN-84/E-08119 Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe. Mieszanki wybuchowe. Klasyfikacja i metody badań.
- [26] PN-84/E-08107 Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe. Urządzenia i obwody iskrobezpieczne. Wymagania i badania.
- [27] Pn-84/C-01200/01. Zagrożenia pożarem i wybuchem. Parametry zapalności i wybuchowości. Nazwy i określenia.
- [28] PN-84/C-01200/08 - Parametry zapalności i wybuchowości. Oznaczenia dolnej granicy wybuchowości pyłów.
- [29] PN-84/C-01200/09 - Parametry zapalności i wybuchowości. Oznaczenia minimalnej energii zapłonu iskrowego pyłów.

- [30] PN-83/M-53852. Termometry elektryczne. Charakterystyki czujników (rezystorów) termometrycznych.
- [31] PrPNEN 60751 +A2 (Projekt) Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych.
- [32] PN-93/E-05009/443. Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Zapewnienie bezpieczeństwa. Ochrona przed przepięciami. Ochrona przed przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi.

## ROZPORZĄDZENIA

- [33] 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, Rozdz. 5. Instalacje i urządzenia techniczne.
- [34] Zabezpieczenie Przeciwpożarowe Zakładów Przemysłu Zbożowo - Młynarskiego, Warunki Techniczne, SiTPS, Warszawa, 1987

## PATENTY

- [35] Kobosko A. + 3 współautorów: Sonda do pomiaru temperatury. nr 39269

## KATALOGI

- [36] FOSS EL., SWEMA, AUTRONIC, DICKEY JOHN, TELETERM MC, NS, AN.DEV METROTERM DAC-20", PIAP 95.

## 15. STRESZCZENIE

### *MONITORING PROCESÓW TERMICZNYCH W ATMOSFERZE WYBUCHOWEJ OBIEKTÓW PRZEMYSŁU ZBOŻOWEGO*

*System monitoringu opisany w pracy przeznaczony jest do zdalnej kontroli temperatury i innych parametrów ziarna zbóż podczas ich przechowywania w magazynach zbożowych: elewatorach, bateriach silosów i magazynach płaskich. Przedstawiono w sposób syntetyczny wyniki wielu prac, które doprowadziły do określenia warunków środowiskowych i ustalenia struktury systemu oraz wymagań ogólnych i szczegółowych na elementy systemu pracujące w atmosferze wybuchowej, a zwłaszcza na elastyczne sondy pomiaru temperatury.*

*Kilka prezentowanych konstrukcji jest nowatorskich i chronionych prawem patentowym.*

*Przedstawiony wykaz bibliografii umożliwi znalezienie dokładniejszych informacji źródłowych związanych z projektowaniem systemu monitoringu, doboru elementów w celu poprawy kontroli mikroklimatu w elewatorach zbożowych.*