

SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU W ISKROBEZPIECZNYCH SYSTEMACH MONITOROWANIA W ELEWATORACH ZBOŻOWYCH

W opracowaniu przeprowadzono analizę dokładności pomiarów systemu monitorowania w elewatorze zbożowym. System monitorowania wykonuje: pomiar, jego wizualizację, przetwarzanie i archiwizację wartości pomiarowych. Przeprowadzono analizę dokładności toru pomiarowego, ze szczególną uwagą na błąd przesyłania sygnałów pomiarowych z wykorzystaniem techniki iskrobezpiecznej. Wynika to ze stosowania torów transmisyjnych, sygnał dotąd wprowadzany przez bariery (separator) ograniczające dopuszczalną wartość prądów a także zmiany związane z błędem ponownego przetwarzania na sygnał dostosowany do jednostki centralnej. Analizę przeprowadzono dla systemów monitorowania z sygnałem analogowym i z czujnikami cyfrowymi.

ESTIMATE THE UNCERTAINTY OF MEASUREMENTS FOR GRAIN ELEVATORS MONITORING SYSTEM

In the paper the analysis of accuracy of the measurements of the monitoring system in the grain elevator was done. The monitoring system carries out: measurement, its visualization, processing and archiving of the measurements values. The analysis of the measurement track was done, with the particular consideration of the error of the transmission of the measurement signals with the use intrinsic safety technique. It results from the application of the transmission temperature converter flows signal by the barriers, pulse isolator, interface RS, controllers. The analysis was done for the monitoring systems with the analogue and digital system with the smart sensors.

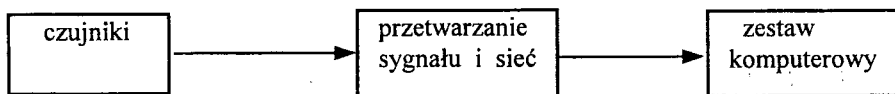
1. WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE, CHARAKTERYSTYKI REGULACYJNE I ODDZIAŁYWANIA ZEWNĘTRZNE

W elewatorach zbożowych stosowane są iskrobezpieczne systemy monitorowania temperatury ze względu na zagrożenie wybuchowe występujących tam pyłów. Różnią się one budową w stosunku do znanych systemów monitorowania spotykanych w

innych obiektach bez tych zagrożeń. Z opisu systemów [4] można się zorientować, że zawierają one dodatkowe elementy ograniczające wartość przepływu energii do wartości, która nie spowoduje zapłonu pyłu zbożowego. Będą to bariery Zenera, różnego rodzaju separatory zapewniające oddzielenie galwaniczne a także zasilacze i inne aparaty przeznaczone tylko do systemów iskrobezpiecznych [3]. Powstaje więc pytanie czy ww. elementy nie mają wpływu na dokładność pomiaru systemu monitorowania? Kolejnym zagadnieniem jest określenie właściwości regulacyjnych obiektu jakim jest magazyn zbożowy. Wynika to z tendencji wprowadzania obecnie już w mniejszych obiektach, a w przyszłości obiektach dużych, układów automatycznej regulacji. Integralnie są one związane z systemami monitorowania. Wspólnym problemem dla obu tych systemów: monitorowania i automatycznej regulacji jest odporność na występujące zakłócenia przemysłowe. Mogą być one przyczyną niewłaściwej ich pracy, również mogą spowodować obniżenie wartości parametrów metrologicznych.

2 ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARU

System monitorowania w elewatorze zbożowym składa się z czujników pomiarowych, systemu przetwarzania i przesyłu sygnału na odległość oraz układów przetwarzania sygnału i dostosowania do zestawu komputerowego. Za pomocą tego zestawu wykonuje się wizualizację wartości pomiarowych, przetwarzanie wartości, archiwizację itp. jak to przedstawiono na rys. 1.

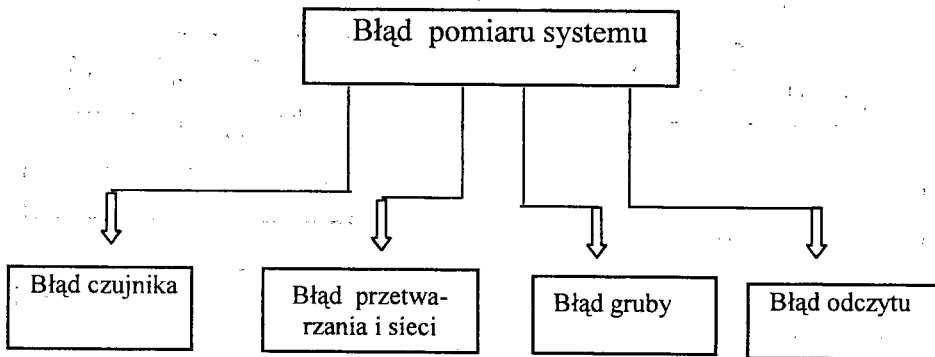


Rys. 1. Schemat blokowy systemu monitorowania

Systemy monitorowania wykonywane są z zastosowaniem dwuprzewodowych torów pomiarowych ze standardowymi sygnałami prądowymi. W połowie lat 80. do transmisji sygnałowej na większe odległości wprowadzono cyfrowe tory transmisyjne w standardzie interfejsu RS-485 [4], które znacznie poszerzyły możliwości pomiarowe tych systemów. Początkowo stosowane były czujniki pomiaru temperatury z wyjściem analogowym i transmisję sygnału na odległość. Obecnie wprowadzane są nowe aplikacje z czujnikami z wyjściem cyfrowym, czujniki inteligentne itp., których zalety widoczne są szczególnie w systemach iskrobezpiecznych przeznaczonych do magazynów zbożowych.

Błąd pomiaru systemu monitorowania określony przez różnicę między wynikiem pomiaru a wartością prawdziwą wielkości mierzonej [5] spowodowany jest występowaniem kilku błędów cząstkowych. Dla jednego toru pomiarowego, składa się on z błędów czujnika pomiarowego, błędu przetwarzania i przesyłania sygnałów pomiarowych na odległość między tymi czujnikami (sondami pomiarowymi) a jednostką centralną (zestaw komputerowy) oraz z błędu odczytu wartości pomiarowej występującej w tej jednostce, rys.1. Błąd czujników określany jest przez ich dokładność gwarantowaną przez producenta. Błąd przesyłania sygnałów pomiarowych składa się z

kilku błędów, na który ma istotny wpływ zastosowana technika iskrobezpieczna. Będzie to błąd przetwarzania sygnału z czujników pomiarowych na sygnał standardowy stosowany w torze transmisyjnym (sieci), błąd wprowadzany przez bariery (separatory) ograniczające dopuszczalną wartość prądu, a także błąd ponownego przetwarzania na sygnał dostosowany do jednostki centralnej. Błąd odczytu wynika z przyjętego systemu rozdzielczości, z błędu przetwarzania danych nawet wtedy, gdy wartością pomiarową jest wartość przyrostowa temperatury odniesiona jest do przedziału czasu (tygodnia, miesiąca).



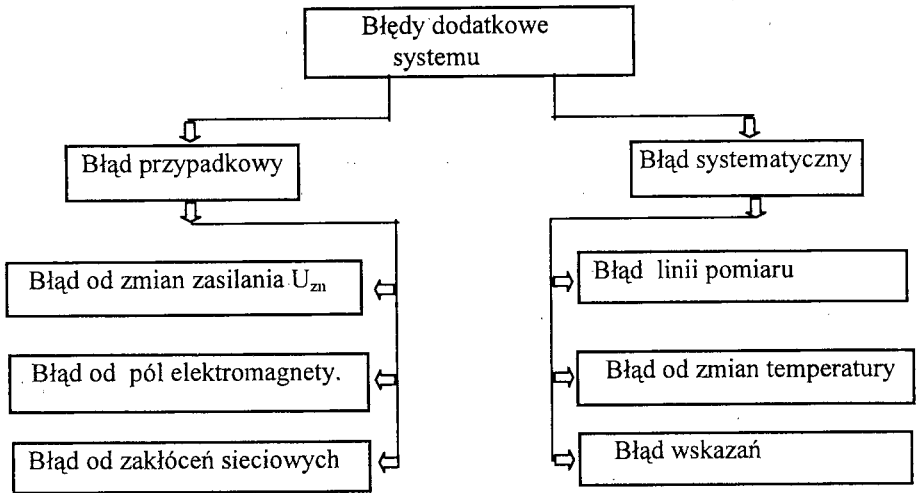
Rys. 2. Schemat powiązań błędu pomiaru systemu

Błędy grube uwiadcniają się w granicznych temperaturach pracy i konfiguracji przestrzennej systemu, a także zależą od przyjętego systemu analogowego lub cyfrowego.

Błąd dodatkowy systemu monitorowania występuje w warunkach odniesienia innych niż założone. Rozważane są również błędy dodatkowe systemu w ramach, którego ujęto błędy dodatkowe czujnika, przetwarzania i odczytu. Błąd dodatkowy temperaturowy systemu jest spowodowany pracą elementów przetwarzających oraz jednostką centralną w warunkach temperaturowych różniących się od warunków odniesienia. Podawany jest często w wartościach procentowych zmian wielkości mierzonej w odniesieniu do przyrostu temperatury np. na 10°C .

Błąd dodatkowy od zmian napięcia zasilania spowodowany jest zmianami napięcia zasilania w zakresie: -15% , \div $+10\%$ U_{zn} . Występuje obecnie tylko w niektórych obiektach poza miejskich, położonych w dużych odległościach od rozdzielni energetycznych, ale nie można go pominąć ze względu na występujące duże obciążenia urządzeniami technologicznymi. Błąd dodatkowy od długości sieci pomiarowej zależy od rodzaju przesyłu sygnałów analogowych lub cyfrowych. Występują również błędy dodatkowe spowodowane oddziaływaniem obcych pól elektromagnetycznych. Wprawdzie urządzenia pomiarowe wchodzące w skład systemów monitorowania muszą spełniać wymagania dyrektywy kompatybilności elektromagnetycznej [4] to jednak jak wynika z ostatnich badań obiektowych, nagromadzenie wielu nadajników telefonii komórkowej na dachach elewatorów było przyczyną wielu trudności w funkcjonowaniu tych systemów. Dlatego ten błąd dodatkowy powinien być uwzględniony podobnie jak błąd dodatkowy w sieci łączącej jednostkę centralną z czujnikami rozważanej jako linia długa z narastającą pojemnością i indukcyjnością. Oddziaływania magnetyczne mogą

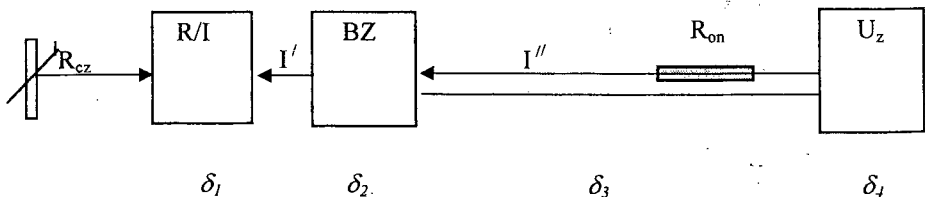
być tłumione, ale również wzmacniane powodując zmiany wartości pomiarowej. Dodatkowe błędy mogą być spowodowane również występowaniem przepięć i przetężeń sieciowych, które w linii długiej o dużych pojemnościach własnych mogą się dodawać do pozostałych błędów. Schemat blokowy błędów dodatkowych jest przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy błędów dodatkowych w systemach monitorowania

3 DOKŁADNOŚĆ SYSTEMÓW MONITOROWANIA Z SYGNAŁEM ANALOGOWYM

W iskrobezpiecznych systemach monitorowania, w technice analogowej z rezystancyjnymi czujnikami temperatury, stosowana jest metoda pomiarowa polegająca na przekształceniu sygnału rezystancyjnego z czujnika R_{cz} np. Pt 100 na sygnał standardowy 4-20 mA w bloku R/I, a następnie poprzez bariery Zenera BZ przesył tego sygnału na dużą odległość do członu z separacją i zasilaniem U_z oraz z odczytem wartości mierzonych na rezystancji R_{on} [4]. Mimo, że odczyt temperatury jest wykonany w technice cyfrowej, ze względu na analogowy przesył sygnału, system monitorowania nazywany jest w niniejszym opracowaniu systemem analogowym. Można go sprowadzić do schematu blokowego przedstawionego na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy toru iskrobezpiecznego w dwuprzewodowym standardzie prądowym 4 - 20 mA

Matematyczny model rozważanego procesu pomiaru temperatury można przedstawić w następującej postaci:

$$T_w = f_1(T) \times f_2(R_{cz}) \times f_3(I') \times f_4(I'') \quad (1)$$

gdzie:

T_w – temperatura odczytywana z miernika o rezystancji R_{on} ,

T – temperatura mierzona,

$f_1(T)$ – liniowy związek pomiędzy rezystancją czujnika $R(T)$ a temperaturą mierzoną,

$f_2(R_{cz})$ – liniowy związek pomiędzy prądem wyjściowym I' przetwornika a rezystancją R_{cz} czujnika temperatury,

$f_3(I')$ – liniowy związek pomiędzy prądem I'' przed barierą Zenera a prądem wyjściowym I' ,

$f_4(I'')$ – liniowy związek pomiędzy temperaturą odczytaną T_w a prądem I''

Błąd pomiarowy składa się z następujących błędów:

δ_1 – błąd wynikający z klasy zastosowanego czujnika;

δ_2 – błąd charakterystyki statycznej przetwornika R/I ;

δ_3 – błąd wprowadzony przez układ separujący i barierę Zenera;

δ_4 – błąd członu wyjściowego z odczytem wartości mierzonych.

Oszacowanie niedokładności pomiaru przeprowadza się w oparciu o podejście klasyczne błędów pomiarowych oraz przez określenie niepewności pomiaru [8].

W pracy B. Dudójca i J. Mindykowskiego [2, 3] wypadkowy błąd średniokwadratowy dla iskrobezpiecznego analogowego toru pomiaru temperatury wyznaczony został przy założeniu braku korelacji pomiędzy poszczególnymi źródłami błędów $\delta_1 \div \delta_4$. Przedstawiony jest następująca zależność:

$$\delta_{T_t} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_w f_1}{\partial f_1 T_w}\right)^2 \delta_1^2 + \left(\frac{\partial T_w f_2}{\partial f_2 T_w}\right)^2 \delta_2^2 + \left(\frac{\partial T_w f_3}{\partial f_3 T_w}\right)^2 \delta_3^2 + \left(\frac{\partial T_w f_4}{\partial f_4 T_w}\right)^2 \delta_4^2} \quad (2)$$

Odchylenie średniokwadratowe pomiaru pośredniego temperatury:

$$\delta_{T_t} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} \quad (3)$$

Obliczenia przeprowadzono dla iskrobezpiecznego układu analogowo-cyfrowego, rys. 4, przy założeniu, że błąd wnoszony przez sterownik cyfrowy jest integralną częścią błędów członu wyjściowego. Przesył sygnału jest w sieci analogowej, a także czujniki

temperatury są analogowe, dlatego sklasyfikowano go do tego typu systemów iskrobezpiecznych.

Dla błędów względnych cząstkowych przyjęto następujące wartości:

$$\delta_1 = 1,6 \times 10^{-3}$$

$$\delta_2 = 3 \times 10^{-3}$$

$$\delta_3 = 3 \times 10^{-5}$$

$$\delta_4 = 3 \times 10^{-3}$$

Wynikają one z badań doświadczalnych przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych.

Wartość średniokwadratowego błędu względnego wynosi:

Dopuszczalna niedokładność pomiaru ΔT_t wynika z wyznaczonego wzorem (3):

$$\delta_{T_t} = 5,5 \times 10^{-3}$$

Względnego błędu średniokwadratowego δ_{T_t} i dla zakresu pomiarowego $-120^\circ\text{C} \div +120^\circ\text{C}$ błąd bezwzględny przyjmuje wartość:

$$\Delta T_t = \pm 1,32^\circ\text{C}$$

Oszacowanie niedokładności pomiaru temperatury oszacowano również w oparciu o wyznaczenie niepewności pomiaru. Ze względu na znajomość tylko granicznych błędów względnych założono, a priori, prawo rozkładu prostokątnego wielkości mierzonej.

Miarą niepewności pomiaru jest niepewność standardowa będąca pierwiastkiem kwadratowym wariancji przyjętego rozkładu. Niepewność pomiaru można wyznaczyć przez względną złożoną niepewność standardową którą w rozważanym przypadku można wyznaczyć z zależności:

$$u_c(T_w) = \frac{\delta_{T_t}}{\sqrt{3}} (T_{w2} - T_{w1}) \quad (4)$$

Podstawiając następujące wartości:

$$\delta_{T_t} = 5,5 \times 10^{-3}$$

$$\text{oraz } T_{w1} = -120^\circ\text{C} \text{ i } T_{w2} = 120^\circ\text{C}$$

$$\text{otrzymujemy } u_c(T_w) = 0,76^\circ\text{C}$$

W porównaniu z wartością klasyczną błędu bezwzględnego $\Delta T_t = \pm 1,32^\circ\text{C}$ widać, że niepewność standardowa $u_c(T_w) = 0,76^\circ\text{C}$ przyjmuje wartość mniejszą.

Z analizy błędów dodatkowych wynika, że występuje również "błąd grubo" δ_5 , który jest spowodowany wystąpieniem składowej zmiennej o niezerowej wartości średniej. Jest on spowodowany pracą przetworników R/J i J/U oraz bariery Zenera w sieci z przetwarzaniem sygnału przesyłowego. Błąd ten zaobserwowano w klasycznym układzie, a także systemie monitorowania z sygnałem prądu stałego, ale jego wartość

znacznie wzrosła w systemie iskrobezpiecznym. W zależności od obszarów temperaturowych S2 i S3 wzrost temperatury wywołuje niekorzystne zmiany w przebiegu zakłócającym. Ich wartość znacznie wzrasta po przekroczeniu 40 °C, co ma istotne znaczenie na niedokładność metody pomiarowej, ponieważ w tym obszarze wymagana jest najwyższa dokładność pomiarowa w technologii przechowywania zbóż. Dlatego wprowadza się dodatkową filtrację przebiegu pomiarowego. Wpływa ona na czas odpowiedzi systemu pomiarowego. Ze względu na bardzo duże stałe czasowe masy zboża wzrost inercji pomiarowej może być pomijalny. Inaczej przedstawia się proces w układach automatycznej regulacji i dla magazynów małych tzw. magazynów płaskich. Czas odpowiedzi systemu pomiarowego powinien być krótki ponieważ stosowane są tutaj systemy automatycznej regulacji, a wartość tego czasu ma bezpośredni wpływ na jakość regulacji.

4 DOKŁADNOŚĆ SYSTEMÓW MONITOROWANIA Z MAGISTRALĄ INTERFEJSU RS

Rozważania dotyczą iskrobezpiecznych systemów monitorowania z magistralą RS oraz z czujnikami o wyjściu cyfrowym. System ten dalej nazywany jest systemem cyfrowym. Schemat blokowy jest przedstawiony na rys. 6.

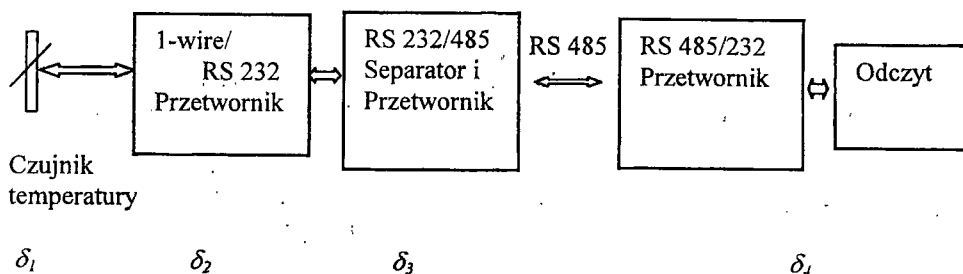
Z obliczeń metodą klasyczną błąd pomiarowy, w tym przypadku składa się z następujących błędów składowych:

δ_1 - błąd wynikający z klasy zastosowanego czujnika;

δ_2 - błąd wynikający z przekształcenia sygnału z magistrali "1 Wire system" na RS-232;

δ_3 - błąd przetwarzania RS-232 na RS-485 i odwrotnie w technice iskrobezpiecznej z oddzieleniem galwanicznym wprowadzony przez specjalistyczne separatory;

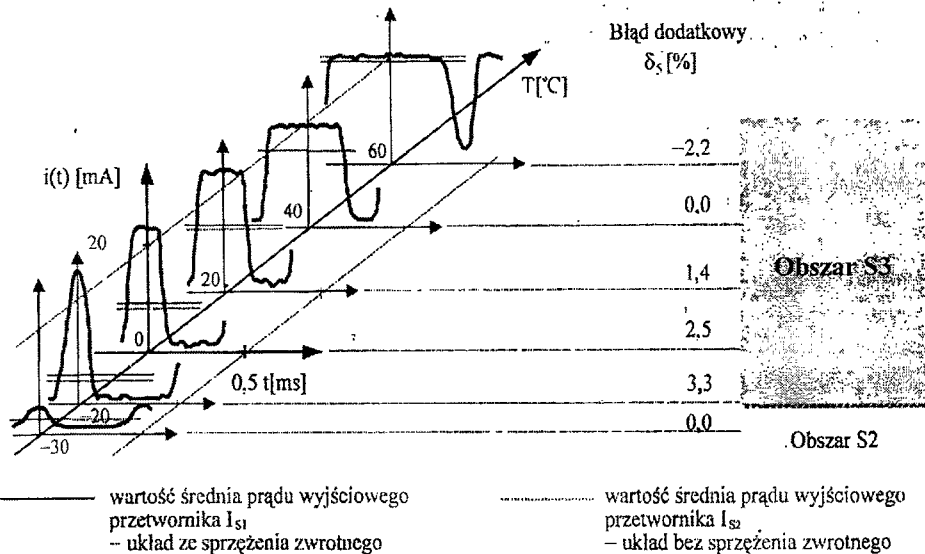
δ_4 - błąd członu wyjściowego z odczytem wartości mierzonych.



Rys.5. Schemat blokowy systemu z interfejsem RS-485 i z czujnikami z wyjściem cyfrowym na sieć „1-Wire”

Zgodnie z kartą katalogową czujniki temperatury z wyjściem cyfrowym, tablica 9, przeznaczone są do pracy w temperaturze od -55°C do 125°C . Dokładność czujników w zakresie temperatur: od -10°C do $+85^{\circ}\text{C}$ wynosi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

W systemie monitorowania zasadniczy błąd wywołany jest dokładnością tych czujników, inne błędy mają niskie wartości. Podczas badań eksploatacyjnych zaobserwowano wystąpienie "błędu grubego" spowodowanego krótkotrwałymi przepięciami łączeniowymi w sieci zasilającej. Pojawiały się krótkotrwałe zmienione wartości wielkości mierzonych sięgających nawet 50 % wartości rzeczywistych. Obecnie błąd ten został programowo wyeliminowany i nie wpływa na dokładność pomiarów. Program komputerowy jest tak zmodyfikowany, aby dopiero po trzech przeprowadzonych cyklach pomiarowych wyświetlony został wynik pomiaru, i dlatego użytkownik nie widzi wartości nieprawdziwych. Jeśli któryś z pomiarów różni się będzie więcej niż $\pm 1^{\circ}\text{C}$ od dwóch pozostałych w ciągu 3s całkowitego cyklu dla trzech pomiarów to wówczas ten wynik zostanie odrzucony.



Rys. 6. Graficzna ilustracja zmian w przebiegu niepożądanego składnika zmiennej w funkcji mierzonej temperatury dla iskrobezpiecznego systemu monitorowania z analogowy sygnałem prądowym. S2, S3 – obszary temperaturowe [2]

Do obliczeń przyjęto następujące wartości błędów cząstkowych wynikających z badań: $\delta_1 - 5,3 \times 10^{-3}$, $\delta_2 - 1,0 \times 10^{-5}$, $\delta_3 - 1,0 \times 10^{-5}$, $\delta_4 - 2,0 \times 10^{-5}$, $T_{w1} = -10^{\circ}\text{C}$, $T_{w2} = +85^{\circ}\text{C}$

Wartość błędu względnego średniokwadratowego wynosi:

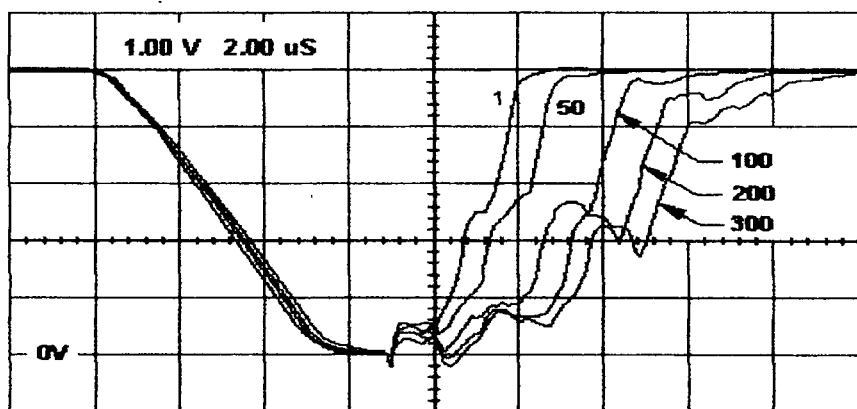
$$\text{Błąd bezwzględny wynosi: } \Delta T_l = \pm 0,57^{\circ}\text{C} \quad \delta_{T_l} = 5,6 \times 10^{-3}$$

Niepewność pomiaru zgodnie z wzorem (4) wynosi: $u_c(T_w) = 0,31^{\circ}\text{C}$ i podobnie jest mniejsza od ΔT_l , jak w obliczeniach dla systemu monitorowania wykonanym w

technice analogowej. Dokładność jest tu wyższa niż w szerzej jeszcze stosowanych systemach z czujnikami rezystancyjnymi i przesyłem sygnałów analogowych.

Systemy monitorowania z czujnikami temperatury z wyjściem cyfrowym i z wykorzystaniem sieci „1 – Wire” posiadają ograniczenia, które również wpływają na ich właściwości metrologiczne. Czujniki temperatury są indywidualnie adresowane. Sygnał aktywujący czujnik lub grupę czujników w sondzie wielo-czujnikowej wysyłany jest programowo przez komputer. Z czujników w kierunku do komputera przekazywany jest następnie sygnał danych temperaturowych i dalej analizowany. Transmisja dwukierunkowa wymaga zastosowania w systemach monitorowania odpowiedniej aparatury iskrobezpiecznej takiej jak separatory, zasilacze itp. Błąd transmisji z tego powodu nie wzrasta i można go pominąć, podobnie jak błąd transmisji z interfejsem RS-485 (422). Natomiast transmisja po sieci „1-Wire” stanowi poważny problem ponieważ może spowodować zniekształcenie sygnału cyfrowego a nawet jego zanik. Przyczyną jest pojemność własna sieci transmisyjnej między czujnikiem a przetwornikiem „1-Wire”/ RS-232. Pojemność ta zwiększa się wraz z odległością w [m], powodując zniekształcenie przebiegu sygnału transmisyjnego pokazanego na rys. 7.

Dla odległości ponad 300 m może nastąpić zanik transmisji i przerwa w pracy całego systemu monitorowania. Dlatego w projektach sieci „1-Wire” stosuje się linie transmisyjne o bardzo niskiej pojemności. Stosuje się również odłączniki elektroniczne (couplers – ang.), sterowane programowo przez komputer, których zadanie polega na zmniejszeniu pojemności sieci przez odcięcie części linii aktualnie niewykorzystywanych w bieżących pomiarach lub w aktualnie realizowanym cyklu pomiarowym. Uogólnienie tych ograniczeń pojemnościowych jest trudne, ponieważ zależy ono od konfiguracji przestrzennej systemu pomiarowego, liczby czujników itp. W praktyce wymaga się przeprowadzenie indywidualnych badań obiektowych.



Rys. 7. Przesunięcie czasowe przebiegu cyfrowego w transmisji „1- Wire” dla kilku odległości w [m] między czujnikiem a przetwornikiem „1-Wire”/ RS-232

LITERATURA

- [1] Dudojć B., Mindykowski J.: Błędy dodatkowe i ich wyznaczenie w pomiarach temperatury w obszarach zagrożonych wybuchem na statkach morskich, *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji* 47 z 3, ss. 355÷375, 2001.
- [2] Dudojć B., Mindykowski J.: Opis i metodyka oceny własności metrologicznych i eksploatacyjnych dwuprzewodowych torów pomiarowych w obszarach zagrożonych wybuchem na statkach morskich, *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji* 47 z 3, ss. 323÷354, 2001.
- [3] Frączek J.: Aparatura przeciwwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym, Katowice 1995, ŚWT.
- [4] Kobosko A.: Systemy monitorowania w elewatorach zbożowych, PIAP, Warszawa 2000.
- [5] Piotrowski J.: Podstawy metrologii, PWN, Warszawa 1977.
- [6] Sawicki A.: Błąd a niepewność – nieporozumienie w praktyce laboratoryjnej, *KNT- Automation 2002, Automatyzacja – Nowości i Perspektywy*, str.451-456, Warszawa, 2002.
- [7] Piotrowski J.: Podstawy metrologii, PWN, Warszawa 1977.
- [8] Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii, GUM 1996.
- [9] Wyrażanie niepewności pomiaru, Przewodnik, GUM 1999.