

Bolesław DUDOJC

WYŻSZA SZKOŁA MORSKA
KATEDRA ELEKTROENERGETYKI OKRĘTOWEJ

Nowe aspekty diagnostyki analogowych torów pomiarowych 4÷20 mA

Mgr inż. Bolesław Dudojć

absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Gdańskiej (1978 r.). Od 1982 r. pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej w Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni. Jego zainteresowania związane są z pomiarami wielkości nieelektrycznych na statkach specjalistycznych, a w szczególności w obszarach zagrożonych wybuchem.



Streszczenie

Przedstawiono nowe podejście do diagnostyki analogowych torów pomiarowych o standardzie 4÷20 mA. Zaproponowana metoda oparta jest na sprawdzaniu wartości prądu wyjściowego przetwornika przy różnych wartościach wypadkowej rezystancji obciążenia toru pomiarowego. Z uwagi na swą prostotę jest ona szczególnie przydatna do sprawdzania torów pomiarowych w warunkach eksploatacyjnych, zarówno podczas uruchamiania nowych instalacji, jak i w diagnostyce doraźnej istniejących systemów. Metodę tę należy traktować jako uzupełnienie dotychczas stosowanych procedur, które w szczególnych przypadkach mogą być nieskuteczne. Niniejszy artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu [1] przedstawionego przez autora na KKM '98 w Gdańsku.

Abstract

In the paper, a new approach to diagnosis of analogue measurement lines in standard 4–20 mA is presented. The principle is based on checking of measurement line for all available load resistance values permitted for different loop current value. The traditional diagnostic methods or commissioning procedures are supported by the new method particularly in exploitation conditions. This paper is based on the autor's presentation [1] during the KKM'98 Congress in Gdańsk.

Wstęp

Spośród wielu rozwiązań analogowych torów pomiarowych stosowanych w przemyśle dominującą rolę pełni dwuprzewodowy standard prądowy 4÷20 mA. Standard ten pozwala na budowanie instalacji pomiarowych o zminimalizowanym wpływie czynników zakłócających na dokładność pomiaru, zwłaszcza w przypadku gdy punkty pomiarowe znajdują się w znacznej odległości od miejsca odczytu.

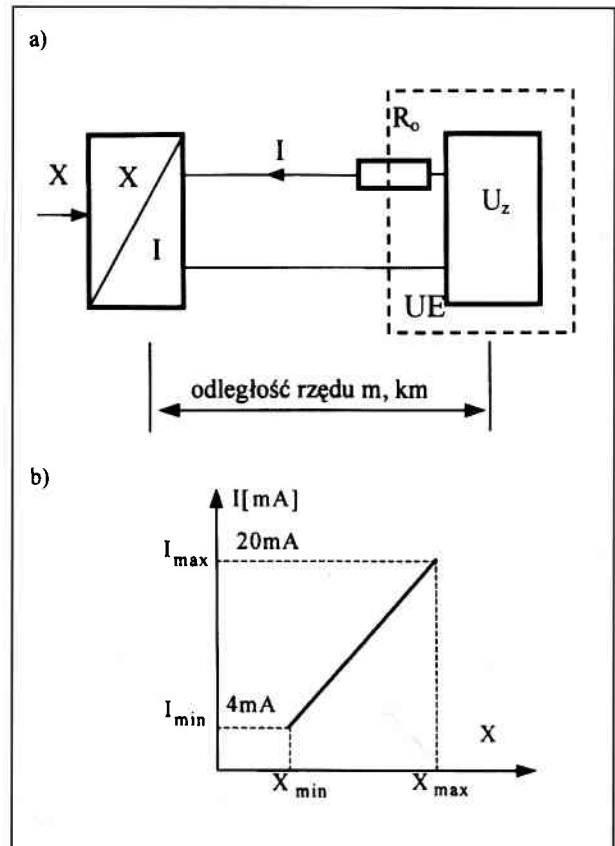
Istotą tego rozwiązania jest jednoznaczny związek pomiędzy wielkością mierzoną a wartością prądu w pętli pomiarowej nawet przy znacznych, ale określonych zmianach napięcia zasilania toru pomiarowego oraz dopuszczalnych zmianach rezystancji obciążenia.

Na etapie projektowania toru pomiarowego ograniczenia dotyczące wypadkowej rezystancji obciążenia zdeterminowane są parametrami przetwornika i uwzględniają wymagania wynikające z zachowania pożądanych właściwości metrologicznych toru przy maksymalnym prądzie w pętli wynoszącym 20 mA [2]. Natomiast w warunkach eksploatacyjnych można rozważać właściwości omawianego toru pomiarowego przy różnych wartościach prądu wyjściowego przetwornika. Tak wyznaczone charakterystyki rezystancji obciążenia toru w funkcji napięcia zasilania mogą być wykorzystane do sprawdzania toru pomiarowego przy wymuszeniach innych niż maksymalne. Często do tego celu można wykorzystywać wymuszenia wynikające z aktualnego stanu kon-

trolowanego procesu technologicznego bez potrzeby, czasami bardzo kłopotliwego, podłączania pobudeń zewnętrznych. Badanie polega na kontrolowaniu wartości prądu przy włączeniu w obwód wyjściowy przetwornika dodatkowej rezystancji, której wartość należy zmieniać od zera do wartości uzupełniającej wypadkową rezystancję obciążenia do wartości dopuszczalnej, odpowiadającej danemu wymuszeniu. Przedstawiona metoda pozwala na przeprowadzanie badań uzupełniających w odniesieniu do dotychczas stosowanych procedur, a czasami może być jedyną metodą pozwalającą na szybkie wykrycie niesprawności w pracujących torach pomiarowych.

Właściwości dwuprzewodowego toru pomiarowego o standardzie prądowym 4÷20 mA

Przykład toru pomiarowego zbudowanego w oparciu o standard 4÷20 mA przedstawiono na rys. 1a. Na rysunku tym przerywaną linią wyróżniono układ ekspozycji UE, który w najprostszej postaci może być analogowym miliamperomierzem wraz z zasilaczem napięciowym, a w bardziej złożonych systemach sumą rezystancji



Rys. 1. Dwuprzewodowy tor pomiarowy o standardzie 4,20mA, a) schemat blokowy, gdzie: X–wielkość mierzona, X/I–przetwornik pomiarowy, U_z–źródło napięcia zasilania, R_o–wypadkowa rezystancja obciążenia, UE układ ekspozycji, b) przykładowa liniowa charakterystyka statyczna przetwornika X/I

wejściowych szeregowo połączonych odbiorników i wspólnego dla wielu torów pomiarowych układu zasilającego. Dodatkowo wypadkowa rezystancja obciążenia R_o została symbolicznie podzielona w celu podkreślenia potrzeby uwzględniania rezystancji przewodów. Związek pomiędzy wielkością mierzoną X a prądowym sygnałem wyjściowym z przetwornika pomiarowego X/I w stanie ustalonym opisany jest charakterystyką statyczną. Najczęściej jest to zależność liniowa (rys. 1b). W ogólnym przypadku liniową charakterystykę statyczną można przedstawić jako:

$$I(X) = \left(\frac{I(X_{\max}) - I(X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} \right) (X - X_{\min}) + I(X_{\min}) \quad (1)$$

W szczególnych przypadkach charakterystyka statyczna może być nieliniowa, np.: wykładnicza, logarytmiczna lub zgodna z wymaganiami wynikającymi z założeń konstrukcyjnych toru pomiarowego.

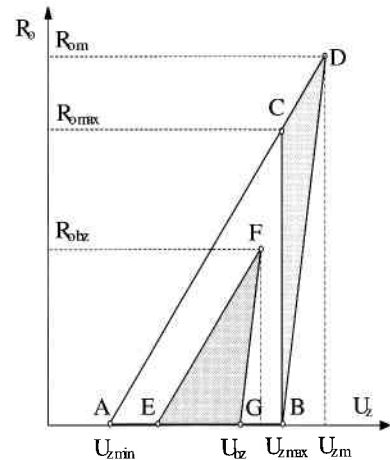
Właściwości metrologiczne dwuprzewodowego toru pomiarowego stanowią wypadkową właściwości poszczególnych elementów toru i są charakteryzowane powszechnie znanymi parametrami, takimi jak: stabilność charakterystyk w czasie i w funkcji temperatury, błędy nieliniowości itp.

Dwuprzewodowy tor pomiarowy o standardzie prądowym 4÷20 mA, w stosunku do pozostałych standardów analogowych wyróżnia się następującymi zaletami:

- dużą odpornością na wpływ zakłóceń elektromagnetycznych, która jest zdeterminowana jakością źródła prądowego na wyjściu przetwornika;
- dwuzłazkowym połączeniem układu, co w przypadku dużych odległości stanowi znaczną oszczędność;
- brakiem rygorystycznych wymagań dotyczących stabilizacji napięcia zasilania toru;
- łatwością konstruowania iskrobezpiecznych torów pomiarowych.

Właściwości takie wynikają z dopuszczalnego obszaru pracy, który łączy na wspólnym wykresie parametry przetwornika ($U_{z \min}$, $U_{z \max}$), rezystancji obciążenia R_o i napięcia zasilania U_z dwuprzewodowego toru pomiarowego w standardzie 4÷20 mA. Zwykle obszar ten wyznacza się w oparciu o charakterystykę $R_o = f(U_z)$ dla maksymalnej wartości prądu wyjściowego przetwornika $I = 20$ mA. Dopuszczalny obszar pracy wyznacza płaszczyznę, w której może się znajdować punkt pracy toru pomiarowego wyznaczony przez współrzędne, odpowiednio napięcie zasilania i wypadkową rezystancję obciążenia toru pomiarowego. Zmiana punktu pracy z powodu zmiany napięcia bądź wypadkowej rezystancji obciążenia w zakresie dopuszczalnego obszaru pracy nie powinna wpływać na wartość prądu wyjściowego przetwornika, która powinna być tylko funkcją wielkości mierzonej. Przykładowy wykres $R_o = f(U_z)$ przedstawiony jest na rys. 2. W większości kart katalogowych przetworników podaje się dopuszczalny obszar pracy toru pomiarowego zbudowanego w oparciu o dany przetwornik ograniczony do trójkąta ABC. Praktyczne wykorzystanie obszaru można poszerzyć o trójkąt BCD [3]. Należy jednak zaznaczyć, że obszar ten nie jest powszechnie wykorzystywany w praktyce eksploatacyjnej, z uwagi na konieczność stosowania napięcia zasilania wyższego od maksymalnego dopuszczalnego dla danego przetwornika. W przypadku skonstruowania iskrobezpiecznego toru pomiarowego z wykorzystaniem bariery Zenera tor pomiarowy można sprowadzić do obwodu przedstawionego na rys. 3.

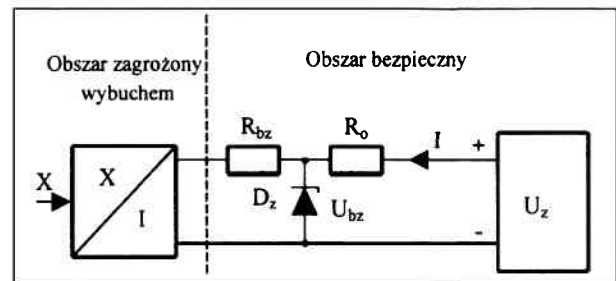
Praktycznie każda podwójna, złożona bariera Zenera [4] przystosowana do włączenia w dwuprzewodowy tor 4÷20 mA może być uproszczona do prostego obwodu R_{bz} i D_z . Dopuszczalny obszar pracy takiego toru zostaje ograniczony do trójkąta EFG, przy założeniu, że zastępcza rezystancja bariery Zenera wynosi R_{bz} , napięcie diody Zenera U_{bz} , natomiast rezystancja obciążenia jest wypadkową rezystancją będącą do dyspozycji projektanta dla danego toru pomiarowego. W przypadku budowy iskrobezpiecznego toru



Rys. 2. Dopuszczalny obszar pracy toru pomiarowego w standardzie 4÷20 mA

pomiarowego z wykorzystaniem bariery izolacyjnej schemat zastępczy takiego toru można sprowadzić do układu na rys. 1a. Poszczególne współrzędne punktów charakterystycznych na wykresie ilustrującym dopuszczalne obszary pracy toru pomiarowego są zdeterminowane parametrami przetwornika:

- $U_{z \min}$ – minimalne napięcie zasilania,
- $U_{z \max}$ – maksymalne napięcie zasilania,
- I_{\min} – minimalna wartość prądu (4 mA),
- I_{\max} – maksymalna wartość prądu (20 mA),



Rys. 3. Schemat blokowy dwuprzewodowego toru pomiarowego o standardzie 4÷20 mA w wykonaniu iskrobezpiecznym z bariery Zenera, gdzie R_{bz} – wypadkowa rezystancja bariery Zenera, U_{bz} – napięcie Zenera

i opisane następującymi zależnościami:

$$A = \{X_A = U_{z \min}, Y_A = 0\}$$

$$B = \{X_B = U_{z \max}, Y_B = 0\}$$

$$C = \{X_C = U_{z \max}, Y_C = 50 \cdot (U_{z \max} - U_{z \min})\}$$

$$D = \left\{ \begin{aligned} X_D &= 1,25 \cdot U_{z \max} - 0,25 \cdot U_{z \min} \\ Y_D &= 62,5 \cdot (U_{z \max} - U_{z \min}) \end{aligned} \right\}$$

$$E = \{X_E = U_{z \min} + 0,02 \cdot R_{bz}, Y_E = 0\}$$

$$F = \{Y_F = 312,5 \cdot U_{bz} - 1,25 \cdot R_{bz} - 62,5 \cdot U_{z \min} - 250 \cdot U_{bz}\}$$

gdzie współrzędne X wyrażane są w voltach [V], a współrzędne Y w omach [Ω].

Wykres przedstawiony na rys. 2 wynika z przyjęcia minimalnej i maksymalnej wartości prądu wyjściowego przetwornika, odpowiednio równych 4 mA i 20 mA. Natomiast z punktu widzenia warunków eksploatacyjnych można rozważać zachowanie się toru

pomiarowego dla:

- różnych wartości prądu wyjściowego przetwornika,
- różnych wartości dopuszczalnego napięcia zasilania przetwornika,
- różnych wartości całkowitej rezystancji obciążenia.

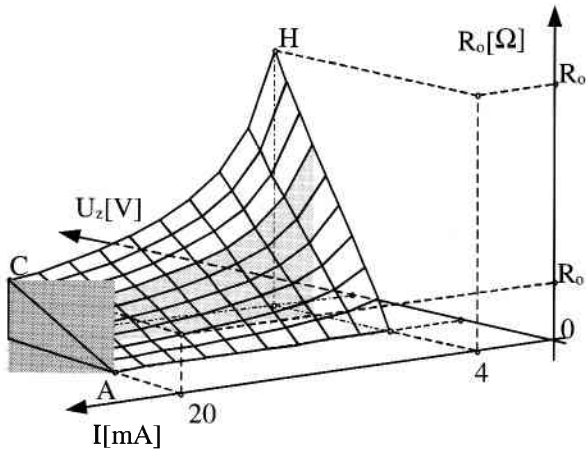
Uwzględniając zależność dopuszczalnej rezystancji obciążenia toru pomiarowego od napięcia zasilania, jak również od wartości wielkości mierzonej, można zdefiniować dopuszczalny obszar pracy toru pomiarowego w układzie trójwymiarowym. W wyniku otrzymuje się dopuszczalną diagnostyczną przestrzeń pracy toru pomiarowego, ograniczoną od góry powierzchnią $R_o\{U_z, I(x)\}$ i określoną następującą zależnością:

$$R_o\{U_z, I(x)\} = \frac{U_z - U_{z \min}}{I(x)} \quad (2)$$

gdzie: $I(x) \in \langle I_{\min}, I_{\max} \rangle$, $U_z \in \langle U_{z \min}, U_{z \max} \rangle$.

Przez dopuszczalną teoretyczną przestrzeń pracy przedstawioną na rys. 4 i określoną jako diagnostyczną przestrzeń pracy toru pomiarowego, należy rozumieć taką przestrzeń, w której dany prąd wyjściowy przetwornika nie zależy od parametrów toru pomiarowego, takich jak napięcie zasilania i wartość rezystancji obciążenia. Praktycznie diagnostyczna przestrzeń pracy toru pomiarowego zawsze wykracza poza zakres teoretyczny w kierunku wyższych wartości wypadkowej rezystancji obciążenia.

W warunkach eksploatacyjnych badanie toru jest ograniczone

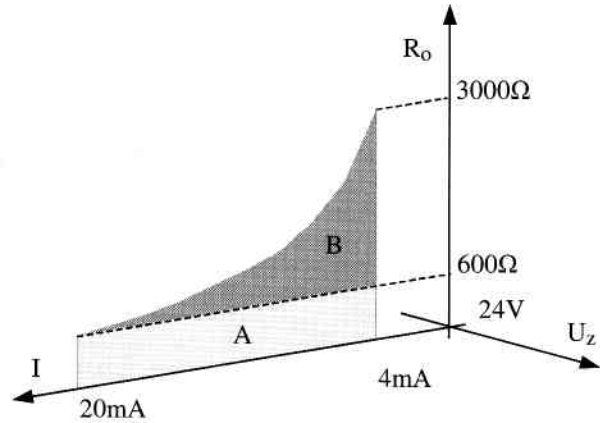


Rys. 4. Dopuszczalna diagnostyczna przestrzeń pracy dwuprzewodowego prądowego toru pomiarowego 4–20 mA

do płaszczyzny odpowiadającej faktycznemu napięciu zasilania, którego wartość najczęściej wynosi 24VDC. Uzasadnia to rozważenie sprawdzania toru pomiarowego dla jednej wartości napięcia zasilania. Dla danego napięcia zasilania $U_z = \text{const}$ można wyróżnić diagnostyczną płaszczyznę dwuprzewodowego toru pomiarowego. Tak określoną diagnostyczną płaszczyznę toru pomiarowego można podzielić na dwa obszary A i B, które przedstawiono na rys. 5.

Obszar A wyznacza zakres zmienności rezystancji obciążenia wynikający z wymagań konstrukcyjnych, opowiadający maksymalnej wartości prądu wyjściowego przetwornika. W obszarze B sprawdza się tor pomiarowy dla prądów o wartościach mniejszych od maksymalnej. Ocena toru pomiarowego przeprowadza się zgodnie z następującą procedurą:

1. Ustala się napięcie zasilania toru pomiarowego;
2. Mierzy się daną wartość prądu wyjściowego przetwornika;
3. Na podstawie danych technicznych przetwornika pomiarowego określa się minimalne napięcie zasilania $U_{z \min}$;
4. Zgodnie z zależnością (2) oblicza się maksymalną dopuszczalną rezystancję obciążenia;



Rys. 5. Diagnostyczna płaszczyzna dwuprzewodowego toru pomiarowego (A+B) dla danego napięcia zasilania

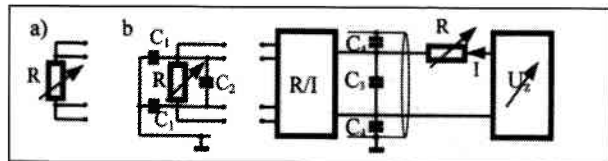
5. Ustala się wartość istniejącego obciążenia.

Po włączeniu dodatkowej regulowanej rezystancji w obwód wyjściowy przetwornika, zmienia się jej wartość od zera do maksymalnej wartości dopuszczalnej, obserwując zmiany prądu wyjściowego przetwornika. Dla sprawnego toru pomiarowego wartość tego prądu nie powinna się zmieniać, o ile wymuszenie będzie stałe dla każdej wartości rezystancji obciążenia mniejszej od dopuszczalnej. Wystąpienie zmian prądu przy zmianach rezystancji obciążenia w dopuszczalnych granicach świadczy o niesprawności toru pomiarowego.

Badanie właściwości toru pomiarowego temperatury

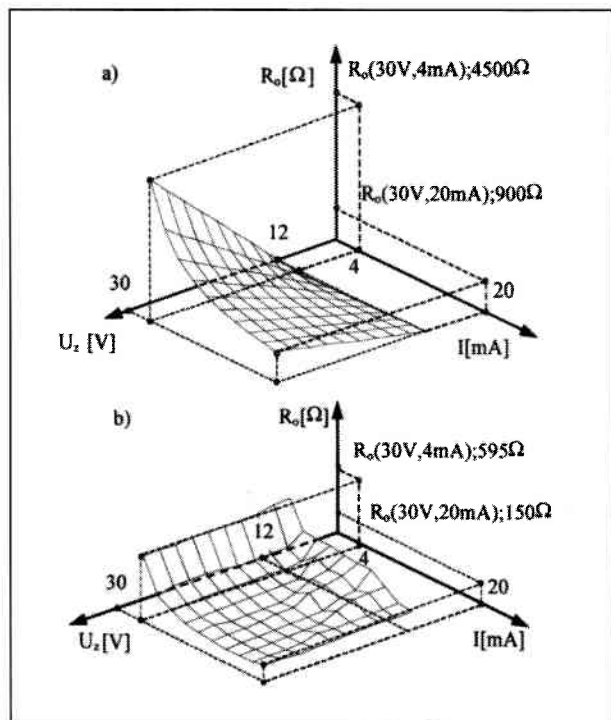
Dla zilustrowania omawianej metody przeprowadzono badania w warunkach laboratoryjnych toru pomiarowego temperatury, podczas których sprawdzono przestrzeń pracy w dwóch przypadkach. Układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6 pozwala na symulację warunków podczas sprawdzania lub kalibracji toru pomiarowego, jak również rzeczywistych warunków eksploatacji rozważanego toru. W eksperymencie wykorzystano dostępny na rynku przetwornik pomiarowy o charakterystyce dynamicznej odpowiadającej elementowi oscylacyjnemu, natomiast pojemności dobrano odpowiednio do rzeczywistego czujnika o długości około 10 mb i kabla łączącego o długości około 20 mb, które wynosiły odpowiednio $C_1=C_4=5\text{nF}$ i $C_2=C_3=3\text{nF}$.

W pierwszym przypadku wyznaczono dopuszczalną przestrzeń pracy przy założeniu kalibracji rzeczywistego toru pomiarowego metodą tradycyjną z wykorzystaniem symulatora rezystancyjnego (rys. 6a). Pomiar przeprowadzono w diagnostycznej przestrzeni



Rys. 6. Tor pomiarowy temperatury w standardzie 4–20 mA. R – rezystancyjny symulator czujnika Pt-100, C_n – pojemności własne kabli i czujnika rzeczywistego, R/I – przetwornik pomiarowy, R_o – rezystancja obciążenia, U_z – napięcie zasilania, I – prąd wyjściowy przetwornika (4–20 mA). a) rezystancyjny symulator czujnika Pt-100, b) rezystancyjny symulator Pt-100 wraz z pojemnościami własnymi czujnika opisaną zależnością (2). Otrzymana przestrzeń pracy była większa od teoretycznej przedstawionej na rys. 7a. Otrzymane wyniki uzasadniają pozytywną ocenę toru pomiarowego pod warunkiem

otrzymania prawidłowych wyników badania charakterystyk statycznych. W drugim przypadku do symulatora czujnika RTD podłączono odpowiednie kondensatory odpowiadające pojemnościom własnymi rzeczywistego czujnika (rys. 6b) lub symulator pojemności czujnika Pt-100. Otrzymane wyniki badania dopuszczalnej przestrzeni pracy ilustruje rys. 7b. W oparciu o rezultaty przedstawione na rys. 7a i 7b można stwierdzić, iż pomimo pozytywnej oceny toru pomiarowego w oparciu o tradycyjne podejście w warunkach rzeczywistych pomiar temperatury może odbywać się ze znacznymi błędami dotychczas nie brany pod uwagę. Dla oceny błędów dodatkowych przeprowadzono badanie

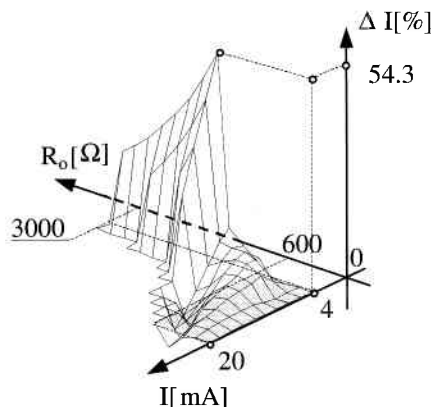


Rys. 7. Dopuszczalna przestrzeń pracy rzeczywistego toru z przetwornikiem R/I (12–30V), sprawdzanie z wykorzystaniem rezystancyjnego symulatora Pt-100, b) sprawdzanie z wykorzystaniem rezystancyjnego symulatora Pt-100 i uwzględnieniem pojemności własnych rzeczywistego czujnika toru pomiarowego zasilanego napięciem $U_z=24$ V, zmieniając wartość rezystancji obciążenia od zera do wartości maksymalnej dopuszczalnej, dla różnych wartości prądu wyjściowego przetwornika. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 8, gdzie dodatkowy błąd pomiarowy opisany jest wyrażeniem:

$$\Delta I[I(x), R_o] = \frac{I_s \cdot [I(x), R_o] - I_t \cdot [I(x), R_o]}{\Delta I_z} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

przy czym: $I[I(x), U_z]$ [mA] – wartość prądu wyjściowego przetwornika zmierzona przy sprzężeniu pojemnościowym; $I_t[I(x), U_z]$ [mA] – wartość prądu wyjściowego przetwornika zmierzona bez sprzężenia pojemnościowego. Błąd względny wyznaczony jest w odniesieniu do prądu wynikającego z maksymalnego zakresu pomiarowego: $\Delta I_z = I_{\max} - I_{\min} = 16$ mA.

W prawidłowo pracującym torze pomiarowym wykres ten miałby formę płaszczyzny $\Delta I=0$. Analizując wyniki otrzymane w postaci graficznej (rys. 7) widać wyraźnie, iż błędy dodatkowe są znacznie większe przy badaniu toru pomiarowego w zakresie zmian rezystancji obciążenia (na rys. 4. obszar B) większym, niż wynika to z zakresu odpowiadającego maksymalnemu wymuszeniu (na rys. 4 obszar A; na rys. 8 obszar zacieniowany).



Rys. 8. Dodatkowy błąd pomiarowy toru pomiarowego z załączonym sprzężeniem

Podsumowanie

Analogowe toru pomiarowe o standardzie 4–20 mA są powszechnie stosowane w rozbudowanych instalacjach przemysłowych. Sprawdzanie takich torów w warunkach eksploatacyjnych najczęściej sprowadza się do kontroli charakterystyki statycznej z wykorzystaniem różnego rodzaju kalibratorów czy też symulatorów. Jednakże w pewnych szczególnych przypadkach takie procedury mogą być niewystarczające. W pracy przedstawiono metodę, którą należy traktować jako metodę uzupełniającą sprawdzania toru pomiarowego zarówno podczas prac związanych z uruchamianiem nowych instalacji, jak również w odniesieniu do eksploatacji systemów już istniejących. Metoda polega na sprawdzaniu wartości prądu wyjściowego przetwornika, przy zmianie punktu pracy toru pomiarowego. Położenie punktu pracy jest określone w dopuszczalnej przestrzeni pracy rozważanego toru. Dla ustalonego wymuszenia (może ono wynikać z przebiegającego procesu technologicznego), które determinuje wartość prądu wyjściowego przetwornika i danym napięciu zasilania (zazwyczaj nie ma możliwości jego zmiany w warunkach eksploatacyjnych) można zmieniać wartość wypadkowej rezystancji obciążenia. Przy zmianach rezystancji obciążenia w dopuszczalnych granicach wartość prądu powinna być stała. Jakakolwiek jej zmiana świadczy o niesprawności toru pomiarowego często pomimo właściwych charakterystyk statycznych. Z przedstawionego przykładu wynika, że sprawdzanie toru pomiarowego dla wymuszeń odpowiadających małym wartościom prądu może być korzystniejsze niż dla dużych wartości, ponieważ można w większym zakresie zmieniać wartość rezystancji obciążenia. W przypadku dużych wartości rezystancji obciążenia wynikających np.: z włączenia bariery Zenera, układów progowych, rejestratora, kilku miliamperomierzy, obszar B na rys. 5, może być jedynym dostępnym.

LITERATURA

- [1] B. DUDOJĆ: Wybrane aspekty diagnostyki analogowych torów pomiarowych 4–20 mA. Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk, 1998, Tom 5, s. 115–122.
- [2] B. DUDOJĆ, J. MINDYKOWSKI: Selected problems of analog signal processing and transmission lines under ship's conditions. 7th International Symposium IMEKO TC4 „Modern Electrical and Magnetic Measurements, Praga 1995, s. 447–481.
- [3] B. DUDOJĆ, J. MINDYKOWSKI: Analysis of selected properties of measurement channels used in hazardous areas of ships. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Belgium, 1996, IMTC Proceedings, volume II, s. 826–831.
- [4] J. FRĄCZEK: Aparatura przeciwwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, 1995.

Artykuł recenzowany