

Jerzy MIKULSKI

## POJĘCIE OKNA TOLERANCJI W BEZPIECZNYCH UKŁADACH STEROWANIA

**Streszczenie.** Jednym z istotnych zagadnień techniki transportu jest problem bezpieczeństwa. W rozwiązaniach konstrukcyjnych związanych z procesem transportowym to ma znaczenie priorytetowe.

Celem artykułu jest omówienie pojęcia okna tolerancji w odniesieniu do bezpiecznego komparatora analogowego.

## THE NOTION OF TOLERANCE WINDOW IN SAFETY CONTROL CIRCUITS

**Summary.** One of the substantial problems of transport technology is safety. In constructions of transport systems this problem has the highest priority.

Paper discuss the notion of tolerance window with reference to safety analog comparator.

## WSTĘP

Jednym z istotnych zagadnień techniki transportu jest problem bezpieczeństwa. W rozwiązaniach konstrukcyjnych związanych z procesem transportowym, szczególnie gdy należy brać pod uwagę udział ludzi w tym procesie, zagadnienie to ma znaczenie priorytetowe. Następująca z biegiem czasu automatyzacja procesów transportowych ujawniła niedoskonałość potocznego rozumienia pojęcia "bezpieczeństwo" - brak bowiem obiektywnego i jednoznacznego kryterium bezpieczeństwa, według którego można by oceniać poszczególne rozwiązania konstrukcyjne. Istnieje obecnie tendencja sprowadzania pojęcia bezpieczeństwa do prawdopodobieństwa niewystąpienia usterki. Współcześnie powinno się prezentować inny sposób podejścia do tego zagadnienia - próbę przeprowadzenia dowodu bezpieczeństwa działania urządzenia.

Celem artykułu jest omówienie pojęcia okna tolerancji w odniesieniu do bezpiecznego komparatora analogowego.

## OKREŚLENIE POJĘCIA BEZPIECZNY SYSTEM STEROWANIA

Bezpieczny system sterowania to taki, który realizuje swoje zadania wypełniając zarazem nałożone na niego wymagania związane z zasadą "fail - safe". Oznacza to, że w przypadku usterki wewnątrz systemu przyjmuje on stan uznany za bezpieczny.

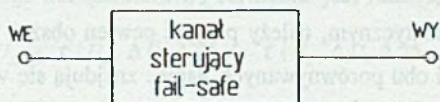
Systemy takie można podzielić na trzy grupy:

- a. jednokanałowe z kanałem fail - safe,
- b. jednokanałowe z kontrolą odpowiedności sygnału wyjściowego do wejściowego,
- c. dwukanałowe z kontrolą zgodności sygnałów wyjściowych.

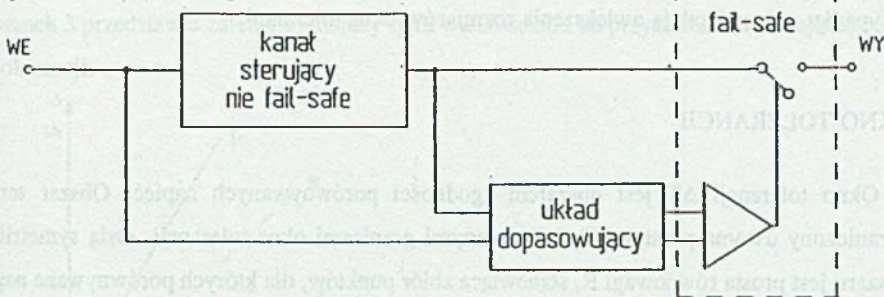
Schematy blokowe wymienionych systemów przedstawione są na rysunku 1. W przypadku systemów b i c kanały nie muszą spełniać wymogów zasady fail - safe, niezbędny jest tu jednak bezpieczny komparator. Rozszerzeniem grupy c są systemy wielokanałowe.

Rozwój systemów jednokanałowych fail - safe w technice sterowania ruchem kolejowym kończy się na urządzeniach przekaźnikowych, w których wykrycie usterek jest jeszcze możliwe na podstawie bezpośredniej obserwacji pracy urządzeń. Ze względu na trudności z lokalizacją usterek oraz dowodem bezpieczeństwa dla elektronicznych urządzeń analogowych systemy sterowania tej generacji dopiero aktualnie znajdują zastosowanie w sterowaniu ruchem kolejowym.

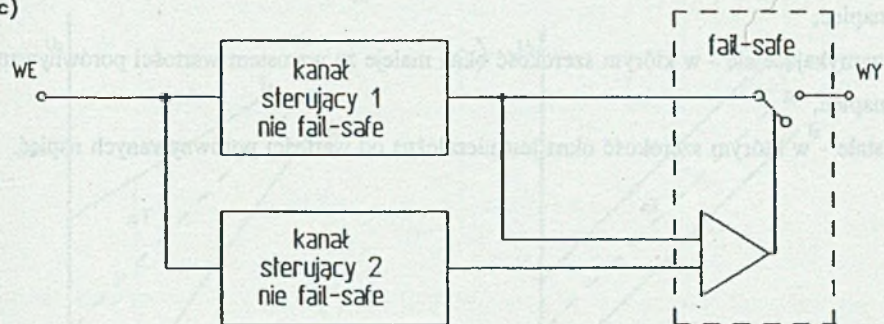
a)



b)



c)



Rys.1. Rodzaje bezpiecznych systemów sterowania  
 Fig.1. Safe control systems

## OKREŚLENIE POJĘCIA BEZPIECZNY KOMPARATOR

Komparator analogowy służy do porównywania dwóch napięć. Ponieważ nie można tu mówić o równości w sensie matematycznym, należy przyjąć pewien obszar tolerancji zwany "oknem tolerancji". Jeżeli wartości obu porównywanych napięć znajdują się wewnątrz okna tolerancji, oznacza to, że napięcia te są zgodne i sygnał wyjściowy komparatora przyjmuje wartość "1". Jeżeli wartość jednego z porównywanych napięć wykracza poza założone okno tolerancji, to sygnał wyjściowy przyjmuje wartość "0".

Bezpieczny komparator z oknem tolerancji to taki, w którym usterki wewnętrzne w żadnym przypadku nie spowodują zwiększenia rozmiarów okna tolerancji.

## OKNO TOLERANCJI

Okno tolerancji  $\Delta T$  jest obszarem zgodności porównywanych napięć. Obszar ten jest ograniczony dwoma prostymi  $T_1$  i  $T_2$  zwanymi granicami okna tolerancji. Ośią symetrii tego obszaru jest prosta równowagi  $R$ , stanowiąca zbiór punktów, dla których porównywane napięcia są dokładnie równe. Szerokość okna tolerancji może być zależna lub niezależna od wartości porównywanych napięć. W związku z tym rozróżnia się trzy typy okna tolerancji (rysunek 2):

- a. otwierające się - w którym szerokość okna rośnie ze wzrostem wartości porównywanych napięć,
- b. zamykające się - w którym szerokość okna maleje ze wzrostem wartości porównywanych napięć,
- c. stałe - w którym szerokość okna jest niezależna od wartości porównywanych napięć.

## OPIS FORMALNY OKNA TOLERANCJI

Stan sygnału wyjściowego komparatora  $U_A$  formalnie jest funkcją następujących wielkości:

$$U_A = f(U_1, \Delta U, \Delta T) = f(U_2, \Delta U, \Delta T), \quad (1)$$

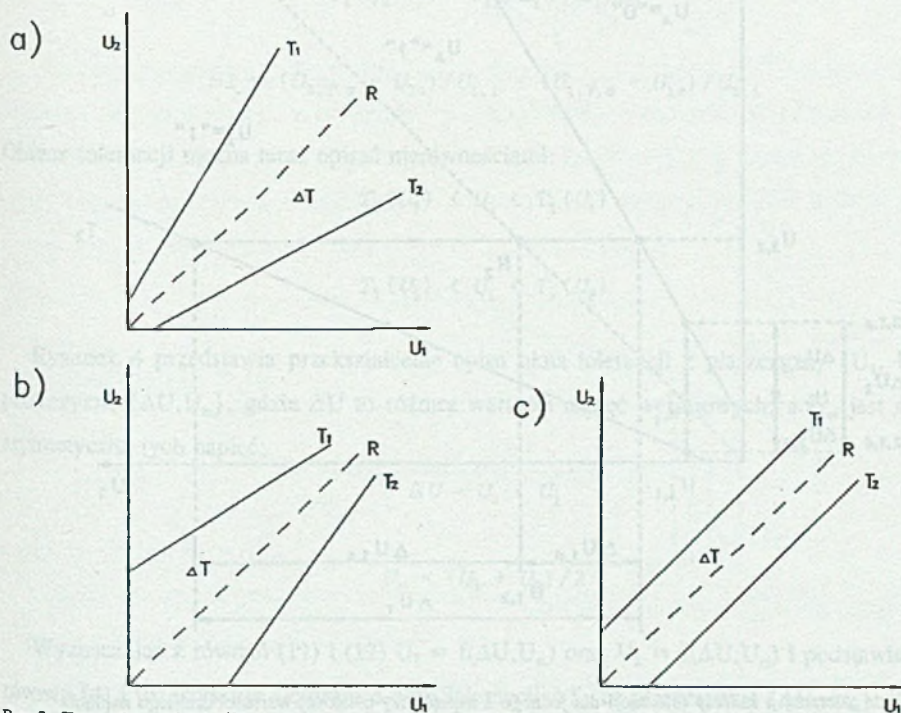
gdzie:

$U_1, U_2$  - napięcia wejściowe,

$\Delta U$  - różnica napięć wejściowych,

$\Delta T$  - okno tolerancji.

Rysunek 3 przedstawia zależność między tymi wielkościami na przykładzie otwierającego się okna tolerancji.

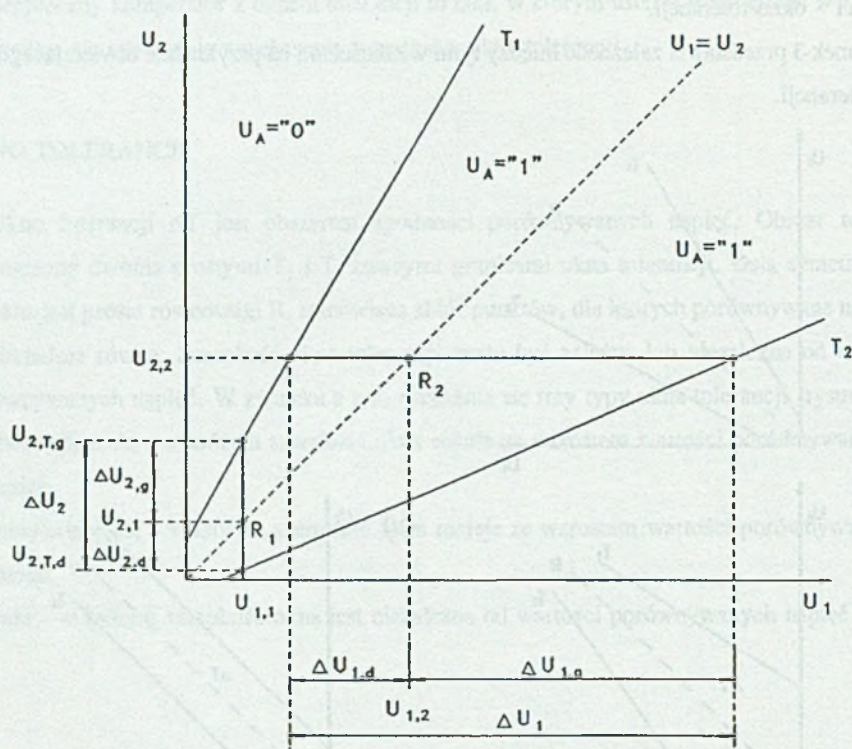


Rys.2. Typy okna tolerancji

Fig.2. Types of tolerance window

Granice okna tolerancji  $T_1$  i  $T_2$  określają maksymalne odchylenie jednego z napięć wejściowych w zależności od wielkości drugiego z tych napięć, dla którego sygnał wyjściowy komparatora ma jeszcze wartość "1". Dla przyjętego  $U_1 = U_{1,1}$  napięcie  $U_2$  może przyjmować wartości w granicach  $U_{2,T,d}$  i  $U_{2,T,g}$ . Daje to obszar tolerancji dla  $U_2$ :

$$\Delta U_2 = U_{2,T,g} - U_{2,T,d} \quad (2)$$



Rys.3. Okno tolerancji i zakresy tolerancji dla jednego z napięć przy ustalonej wartości drugiego napięcia wejściowego

Fig.3. The tolerance window and the ranges of tolerance for one of the voltages with the fixed value of the second input voltage

Analogicznie dla przyjętej wartości  $U_2 = U_{2,1}$  obszar tolerancji dla  $U_1$  wynosi:

$$\Delta U_1 = U_{1,T,g} - U_{1,T,d} \quad (3)$$

Granice okna tolerancji  $T_1$  i  $T_2$  można przedstawić jako funkcje  $U_1$  lub  $U_2$ :

$$T_1(U_1) = U_{2a} + S_1 U_1 \quad (4)$$

$$T_1(U_2) = -U_{2a}/S_1 + U_2/S_1 \quad (5)$$

$$T_2(U_2) = U_{1a} + S_1 U_2 \quad (6)$$

$$T_1(U_1) = -U_{1a}/S_1 + U_1/S_1 \quad (7)$$

$$S1 = (U_{2,T,g} - U_{2a})/U_{1,1} - (U_{1,T,d} - U_{1a})/U_{2,1} \quad (8)$$

Obszar tolerancji można teraz opisać nierównościami:

$$T_2(U_1) < U_2 < T_1(U_1) \quad (9)$$

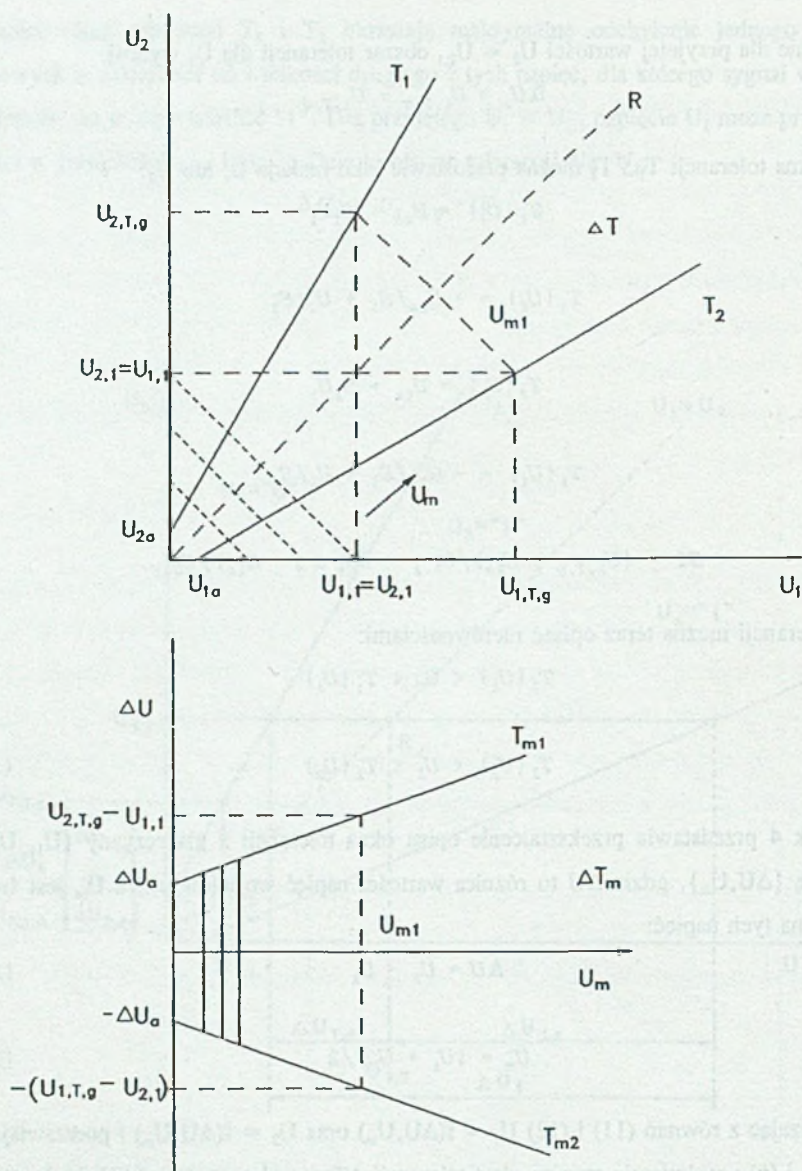
$$T_1(U_2) < U_1 < T_2(U_2) \quad (10)$$

Rysunek 4 przedstawia przekształcenie opisu okna tolerancji z płaszczyzny  $\{U_1, U_2\}$  na płaszczyznę  $\{\Delta U, U_m\}$ , gdzie  $\Delta U$  to różnica wartości napięć wejściowych, a  $U_m$  jest średnią arytmetyczną tych napięć:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (11)$$

$$U_m = (U_1 + U_2)/2 \quad (12)$$

Wyznaczając z równań (11) i (12)  $U_1 = f(\Delta U, U_m)$  oraz  $U_2 = f(\Delta U, U_m)$  i podstawiając do równań (4) i (6) uzyskuje się granice okna tolerancji  $\Delta T_m$  na płaszczyźnie  $\{\Delta U, U_m\}$ :



Rys.4. Zależność pomiędzy opisem okna tolerancji w układzie współrzędnych  $\{U_1, U_2\}$  a opisem w układzie  $\{\Delta U, U_m\}$

Fig.4. The relation of the description of tolerance window in the coordinate system  $\{U_1, U_2\}$  and in  $\{\Delta U, U_m\}$



$$T_{m1} = 2U_m(S_1 - 1) / (1 + S_1) + 2U_{2a} / (1 + S_1) \quad (13)$$

$$T_{m2} = -2U_m(S - 1) / (1 + S_1) + 2U_{1a} / (1 + S_1) \quad (14)$$

Wartości początkowe  $\Delta U_a$  dla  $U_m = 0$  wynoszą:

$$\Delta U_a = 2U_{2a} / (1 + S_1) = 2U_{1a} / (1 + S_1) \quad (15)$$

a współczynnik nachylenia  $S_2$  prostych granicznych  $T_{m1}$  i  $T_{m2}$  wynosi:

$$S_2 = 2(S_1 - 1) / (1 + S_1) \quad (16)$$

Obszar tolerancji można w tym przypadku opisać nierównością:

$$T_{m2}(U_m) < \Delta U < T_{m1}(U_m) \quad (17)$$

Z opisu okna tolerancji w układzie współrzędnych  $\{U_1, U_2\}$  można odczytać wprost wartość zakresu tolerancji jednego z napięć przy ustalonym drugim napięciu. W przypadku opisu w układzie  $\{\Delta U, U_m\}$  nie jest to możliwe, ponieważ  $U_m$  jest funkcją obu napięć wejściowych. W celu wyznaczenia zakresu dopuszczalnych zmian  $\Delta U$  przy ustalonej wartości jednego z napięć wejściowych należy wyprowadzić z (11) i (12) równanie prostej:

$$\Delta U = 2U_m - 2U_{1,1} \quad (18)$$

przy ustalonym  $U_1 = U_{1,1}$

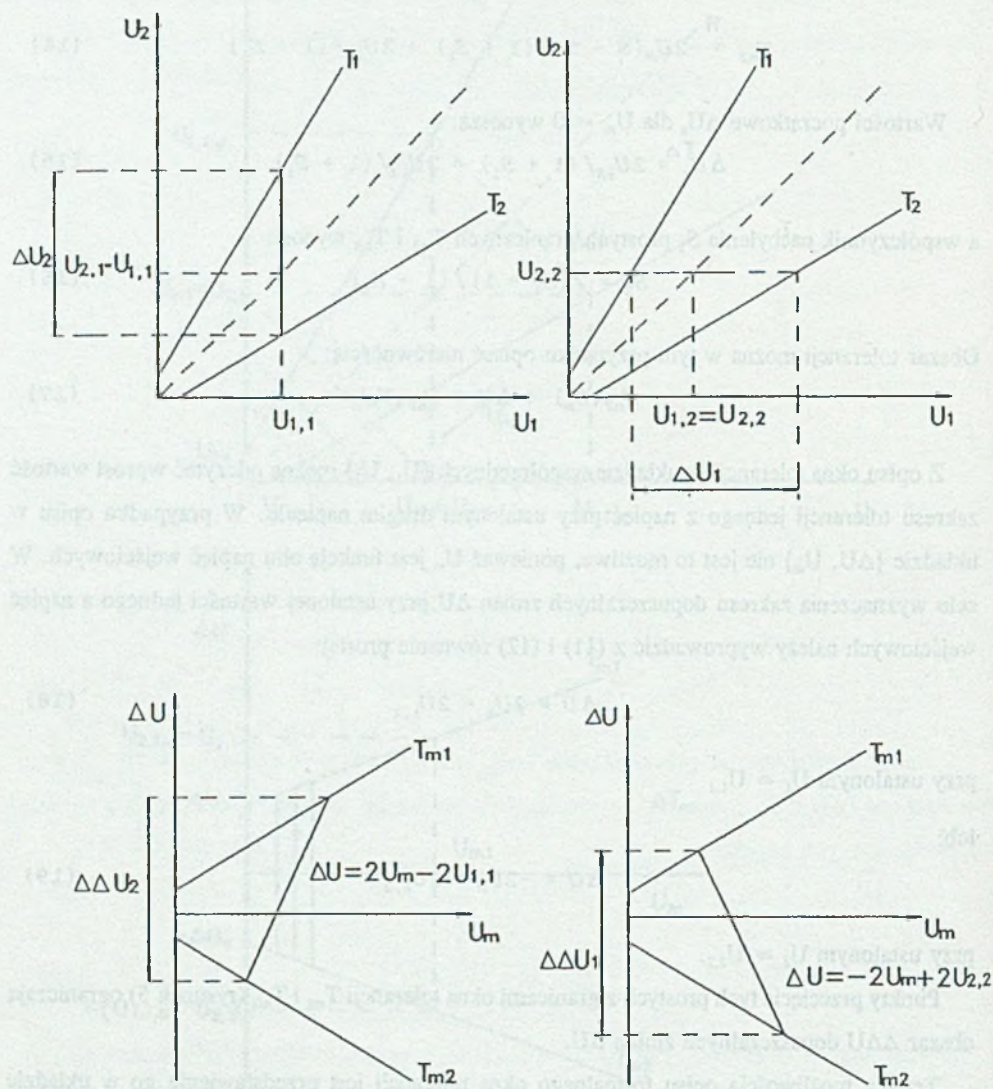
lub:

$$\Delta U = -2U_m + 2U_{2,2} \quad (19)$$

przy ustalonym  $U_2 = U_{2,2}$ .

Punkty przecięcia tych prostych z granicami okna tolerancji  $T_{m1}$  i  $T_{m2}$  (rysunek 5) ograniczają obszar  $\Delta\Delta U$  dopuszczalnych zmian  $\Delta U$ .

Trzecią możliwością opisu formalnego okna tolerancji jest przedstawienie go w układzie współrzędnych  $\{U_1, \Delta U\}$  lub  $\{U_2, \Delta U\}$  (rysunek 6). Na podstawie zależności (4) do (7) można wyprowadzić równania granic okna tolerancji w tych układach:



Rys.5. Wyznaczanie obszaru tolerancji  $\Delta\Delta U$  dla różnicy napięć wejściowych  $\Delta U$

Fig.5. The determination of the range of tolerance  $\Delta\Delta U$  for the difference of input voltages  $\Delta U$

$$T_{e1} = f(U_1) = U_1(S_1 - 1) + U_{2a} \quad (20)$$

$$T_{e2} = f(U_1) = U_1(1/S_1 - 1) - U_{1a}/S_1 \quad (21)$$

$$T_{e1} = f(U_2) = U_2(1 - 1/S_1) + U_{2a}/S_1 \quad (22)$$

$$T_{e2} = f(U_2) = U_2(1 - S_1) - U_{1a} \quad (23)$$

Obszar tolerancji  $\Delta T_e$  odzwierciedla nierówność:

$$T_{e2}(U_1) < \Delta U < T_{e1}(U_1) \quad (24)$$

lub

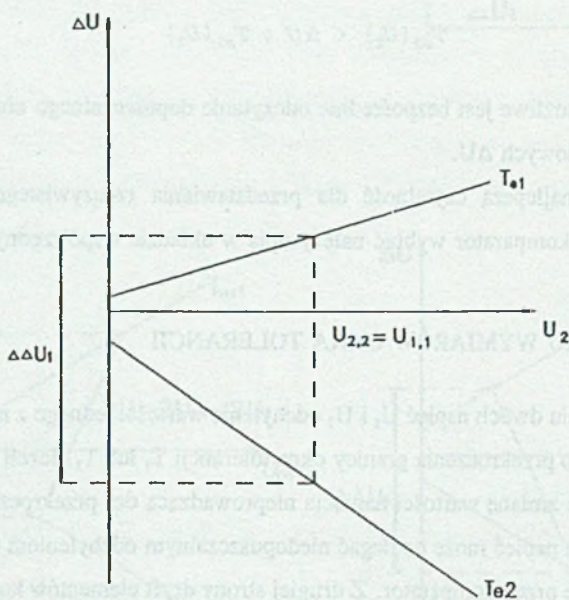
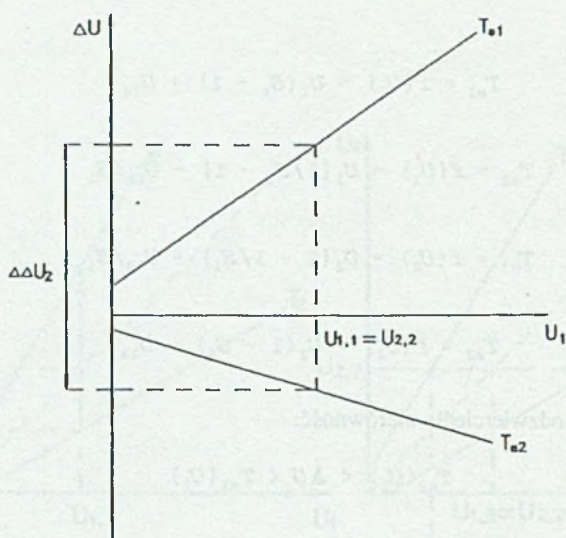
$$T_{e2}(U_2) < \Delta U < T_{e1}(U_2) \quad (25)$$

Z takiego opisu możliwe jest bezpośrednie odczytanie dopuszczalnego obszaru  $\Delta \Delta U$  zmian różnicy napięć wejściowych  $\Delta U$ .

Ze względu na najlepszą czytelność dla przedstawienia rzeczywistego okna tolerancji generowanego przez komparator wybrać należy opis w układzie współrzędnych  $\{U_1, U_2\}$ .

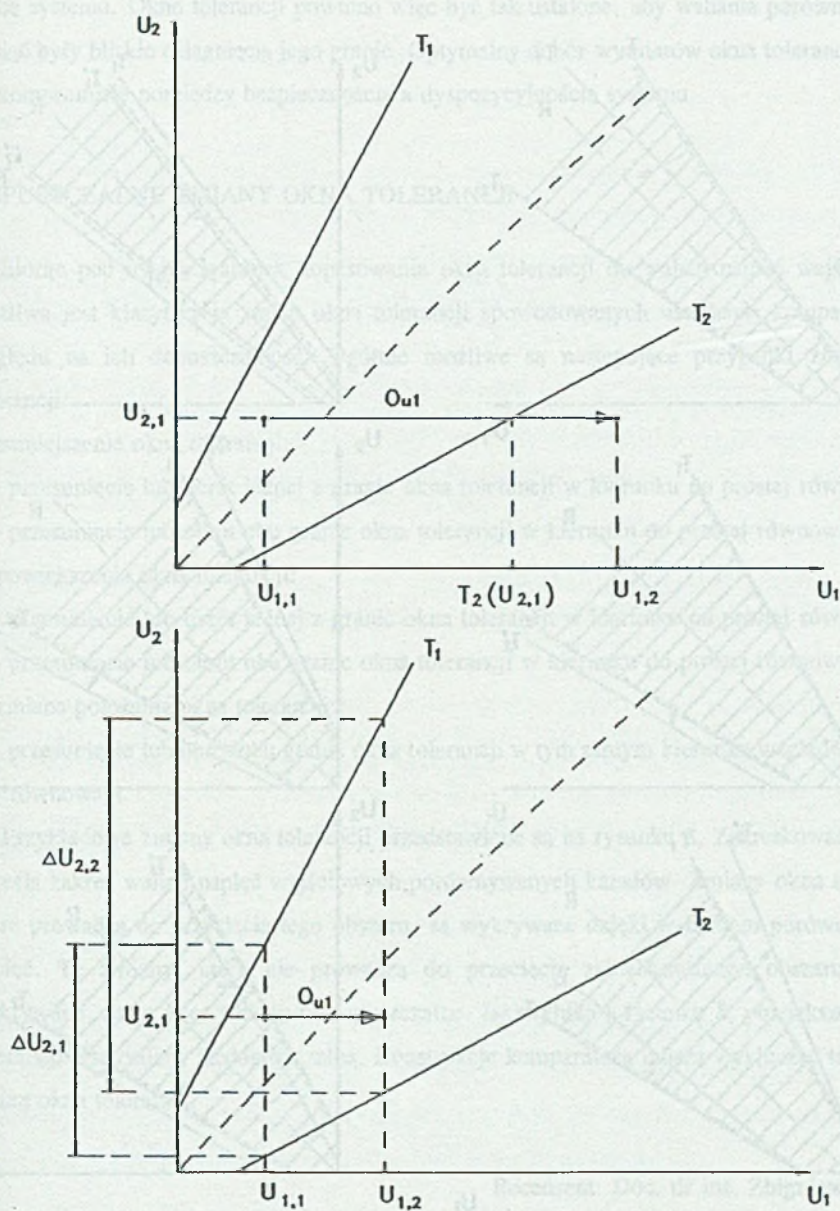
## KRYTERIA DOBORU WYMIARÓW OKNA TOLERANCJI

Przy porównywaniu dwóch napięć  $U_1$  i  $U_2$  odchylenie wartości jednego z nich jest wykrywane, jeżeli prowadzi do przekroczenia granicy okna tolerancji  $T_1$  lub  $T_2$ . Jeżeli usterka w jednym z kanałów spowoduje zmianę wartości napięcia nieprowadzącą do przekroczenia granicy okna tolerancji, to drugie z napięć może podlegać niedopuszczalnym odchyleniom (rysunek 7), które nie zostaną ujawnione przez komparator. Z drugiej strony dryft elementów konstrukcyjnych czy odchylenia regulacji mogą powodować pewne wahania napięć wyjściowych porównywanych kanałów sterujących. Interpretowanie tych wahań przez komparator jako usterek uniemożliwiłoby

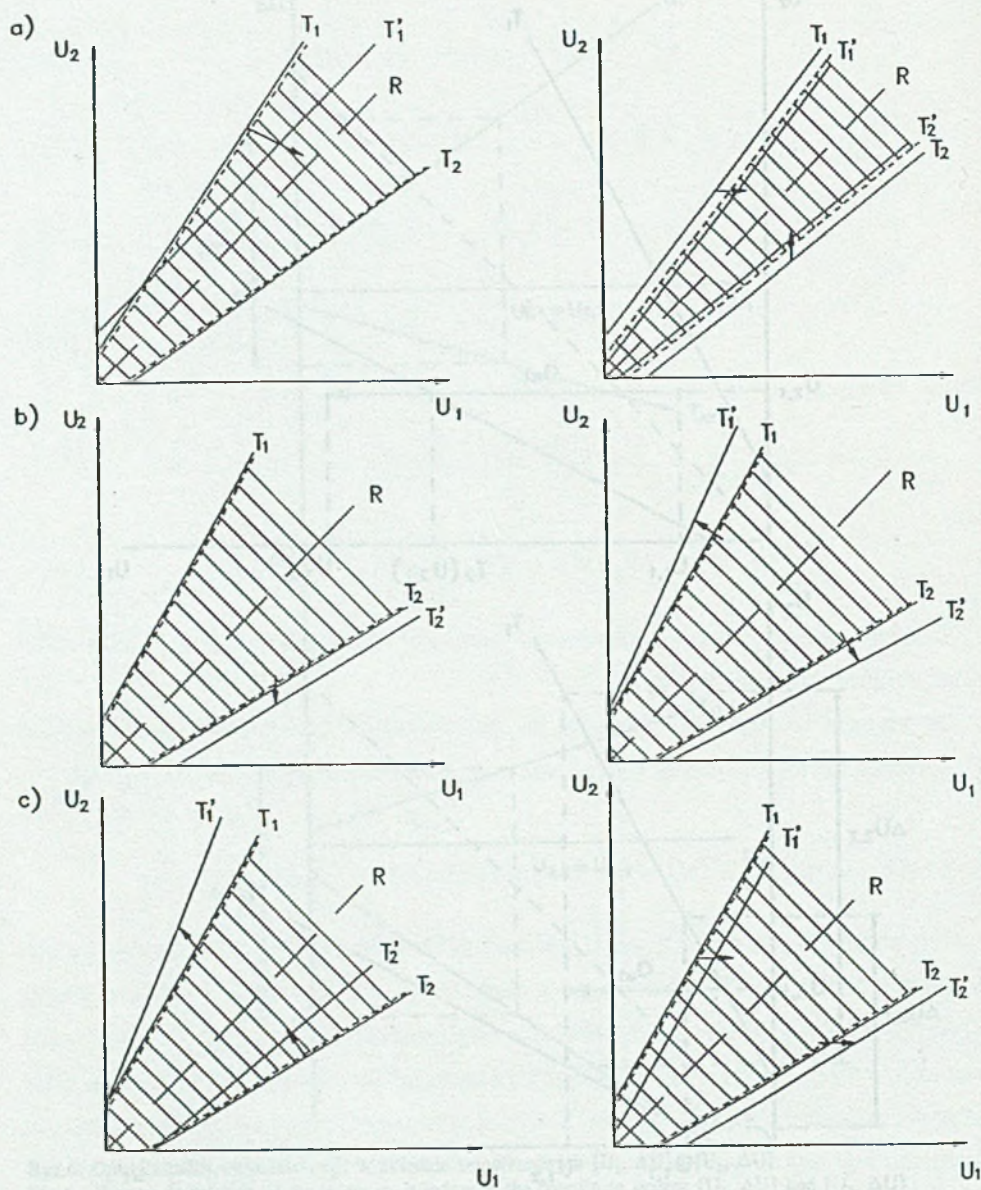


Rys.6. Opis formalny okna tolerancji w układzie współrzędnych  $\{U_1, \Delta U\}$  i  $\{U_2, \Delta U\}$

Fig.6. Formal description of the tolerance window in the coordinate system  $\{U_1, \Delta U\}$  and  $\{U_2, \Delta U\}$



Rys.7. Właściwy dobór okna tolerancji  
 Fig.7. The correct selection of tolerance window



Rys.8. Przykłady zmian okna tolerancji  
 Fig.8. Examples of changing the tolerance window

pracę systemu. Okno tolerancji powinno więc być tak ustalone, aby wahania porównywanych napięć były bliskie osiągnięcia jego granic. Optymalny dobór wymiarów okna tolerancji polega na kompromisie pomiędzy bezpieczeństwem a dyspozycyjnością systemu.

#### DOPUSZCZALNE ZMIANY OKNA TOLERANCJI

Biorąc pod uwagę warunek dopasowania okna tolerancji do wahań napięć wejściowych, możliwa jest klasyfikacja zmian okna tolerancji spowodowanych usterkami komparatora ze względu na ich dopuszczalność. Ogólnie możliwe są następujące przypadki zmian okna tolerancji:

a. zmniejszenie okna tolerancji:

- przesunięcie lub obrót jednej z granic okna tolerancji w kierunku do prostej równowagi,
- przesunięcie lub obrót obu granic okna tolerancji w kierunku do prostej równowagi,

b. powiększenie okna tolerancji:

- przesunięcie lub obrót jednej z granic okna tolerancji w kierunku od prostej równowagi,
- przesunięcie lub obrót obu granic okna tolerancji w kierunku do prostej równowagi,

c. zmiana położenia okna tolerancji:

- przesunięcie lub obrót obu granic okna tolerancji w tym samym kierunku względem prostej równowagi.

Przykładowe zmiany okna tolerancji przedstawione są na rysunku 8. Zakreskowany obszar określa zakres wahań napięć wyjściowych porównywanych kanałów. Zmiany okna tolerancji, które prowadzą do przecięcia tego obszaru, są wykrywane dzięki wahaniom porównywanych napięć. Te zmiany, które nie prowadzą do przecięcia zakreskowanego obszaru, nie są wykrywane. Są to więc zmiany niedopuszczalne. Jak wynika z rysunku 8, powiększenie okna tolerancji jest zmianą niedopuszczalną. Konstrukcje komparatora muszą wykluczać taki rodzaj zmian okna tolerancji.

Recenzent: Doc. dr inż. Zbigniew Ginalski

Wpłynęło do Redakcji 11.10.1994 r.

## Abstract

One of the substantial problems of transport technology is safety. In constructions of transport systems, especially involving people, this problem has the highest priority. The growing in time of automatization of transport processes revealed the imperfectness of the current sense of the notion "safety", that is the lack of objective and unambiguous criteria of safety according to which one could evaluate designs. There is the tendency to reduce the notion of safety to the probability of non occurrence of faults. Currently one should present a different settlement of this problem - carry out a test to proof the safe functioning of a device.

Paper discuss the notion of tolerance window with reference to safety analog comparator.