

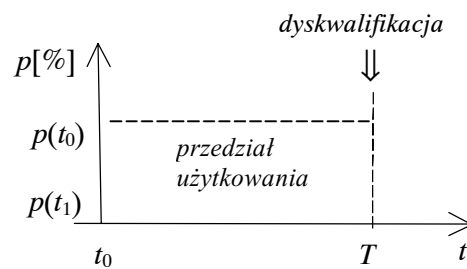
Bogdan Wolski\*

NIEZAWODNOŚĆ EKSPLOATACYJNA  
W TEORII I PRAKTYCE POMIARÓW GEODEZYJNYCH

---

### 1. Niezawodność systemów technicznych

Właściwością każdego mechanizmu, urządzenia, konstrukcji, a ogólnie systemu technicznego, jest jego użyteczność, tj. zdolność do realizacji określonych zadań w określonych warunkach i w założonym przedziale czasu (rys. 1). Nieostre granice kwalifikacji takiej zdolności, wielość kryteriów, a także alternatywny jej charakter („tak” lub „nie”) stały się podstawą sformułowania zagadnienia niezawodności [3–5, 9]. Zarówno niezawodność  $R$ , jak i utożsamiana z nią użyteczność  $U$  są funkcjami czasu, z tą tylko różnicą, że pierwsza z wymienionych wielkości jest liczona od momentu odbioru, druga od chwili wyprodukowania, czyli  $R(t) = 1$  dla  $t = 0$ .



Rys. 1. Użyteczność pojedynczego obiektu

---

\* Politechnika Krakowska

Niezawodność definiowana jest jako prawdopodobieństwo, że układ będzie sprawny w chwili  $t$  pod warunkiem, że w chwili początkowej  $t_0$  był odebrany bez zastrzeżeń.

Prawdopodobieństwo niezawodności można zapisać wzorem

$$R(t) = P(A_t \subset \Theta / A_0 \subset \Theta) \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  – zbiór wymaganych cech mierzalnych i niemierzalnych zapewniających użyteczność,

$A$  – zbiór wyników badań cech mierzalnych i niemierzalnych czynników  $\Pi$ ,

$A_t$  – zbiór czynników  $A$  w chwili  $t$ ,

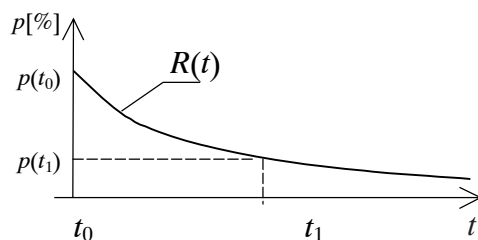
$\Pi$  – zespół czynników fizycznych np. temperatura, wilgotność, drgania oddziałujące na obiekt,

$R(t)$  – funkcja przetrwania.

Zależność  $R(t)$  pokazana na rysunku 2 często określana jest mianem funkcji przetrwania. Funkcja  $R(t)$  jest ściśle związana z zawodnością określaną jako prawdopodobieństwo

$$U(t) = 1 - R(t) \quad (2)$$

Funkcja  $U(t)$  pokazuje w jakim stopniu warunki użyteczności nie są spełnione i jakie jest ryzyko awarii. Powyższa zasada podejścia niezawodnościowego stosowana jest w wielu dyscyplinach technicznych [3, 9].



Rys. 2. Funkcja przetrwania  $R(t)$  określająca użyteczność grupy obiektów;  
 $p(t_1)$  – oczekiwana użyteczność w chwili  $t_1$

Wśród kilku argumentów, które przemawiają za szerszym niż dotychczas zastosowaniem podejścia niezawodnościowego w problematyce geodezyjnej w pierwszej kolejności, wymienić należy cel poznawczy oraz wspomnianą wyżej powszechność zastosowania. Kolejny, o znaczeniu praktycznym, wynika z potrzeby szukania kompatybilnych miar wiarygodności w przypadku skalania zadań formułowanych przez różne dyscypliny. Teoria niezawodności jest jednym z takich narzędzi, a jak pokazuje praktyka, narzędziem efektywnym. W przypadku zagadnień geodezyjnych tylko podejście niezawodnościowe daje możliwość oceny wiarygodności i użyteczności technologii scalających różne pomiarowe techniki.

## 2. Niezawodność w zagadnieniach geodezyjnych

W problematyce geodezji wyróżnić można kilka rodzajów zagadnień niezawodnościowych, w tym:

- niezawodność wyników pomiarów liniowo-kątowych i wysokościowych,
- niezawodność zautomatyzowanych technologii opracowania map,
- niezawodność złożonych systemów pomiarowych łączących metody geodezyjne i fizyczne,
- niezawodność eksploatacyjną osnów geodezyjnych.

Brak większego – jak dotąd – zainteresowania problemem niezawodności w geodezji ma racjonalne podstawy. Metody oceny dokładności oparte na teorii błędów są bowiem znacznie efektywniejsze od podejścia niezawodnościowego. Błędy standardowe są miarami precyzyjnymi, w ocenie wiarygodności wyników pomiarów najlepszymi. Łatwo je interpretować jako miary niezawodności. Rachunek błędów jest jednak poprawny pod warunkiem, że model zagadnienia pomiarowego daje się opisać układem równań i macierzą kowariancji. Zauważmy, że w wyżej wyróżnionych grupach problemów pomiarowych tylko pierwsza spełnia ten warunek.

W teorii niezawodności podstawowe znaczenie ma czas (rys. 1 i 2). W przypadku zagadnień geodezyjnych odgrywa pewną rolę w pierwszym z wyżej wymienionych rodzajów zadań, w dwóch kolejnych jest pomijany. Poza kinematycznymi modelami sieci pomiarowych problem czasu nie jest podnoszony. Tym samym tej grupy zagadnień nie można traktować jako spełniającej warunki ogólnej teorii niezawodności (rys. 1).

Pojęcie niezawodności sieci, które wprowadzono do problematyki geodezyjnej w latach 70. XX w., ma interpretację różną od ogólnej teorii niezawodności. Celem tej analizy niezawodnościowej jest bowiem wykrycie i oszacowanie wpływu grubych błędów, które deformują konstrukcje geodezyjne. Analizy ukierunkowane na zlokalizowanie źródeł nieprawidłowości sieci pomiarowych mają zarówno znaczenie poznawcze, jak i praktyczne, pozwalają bowiem racjonalnie projektować osnowy (sieci) pomiarowe [6].

Wyrazem potrzeby wprowadzania miar niezawodnościowych do pomiarów geodezyjnych, a jednocześnie przykładem uproszczonego podejścia, jest ocena niezawodności dokonywana za pomocą wzoru [2]

$$z = \frac{m-n}{m} \quad (3)$$

gdzie:

- $m$  – ogólna liczba pomiarów,
- $n$  – liczba niewiadomych.

Przy braku obserwacji nadliczbowych wartość wskaźnik niezawodności  $z$  równa się zero.

Niezawodność całej osnowy, gdy znane są błędy poszczególnych punktów, można określić, kierując się „najsłabszym ogniwem” lub szukając w arbitralny sposób wartości reprezentatywnej dla zbioru dokładności.

Inny typ zagadnienia niezawodności generują nowoczesne technologie opracowania map geodezyjnych. Przetwarzanie obrazów satelitarnych oraz technologie skaningu laserowego wykonywane są w sposób zautomatyzowany, co nie wyklucza wystąpienia błędów systematycznych, a nawet grubych. Typowym przykładem może być przetwarzanie danych za pomocą procedur filtracyjnych, które nie są w stanie całkowicie wyeliminować wpływu nieostrości granic, niewłaściwej interpretacji obiektów, przesłonięć szczegółów przez zarośla, krzewy i drzewostan. W takich przypadkach typowa analiza błędów może dotyczyć techniki pomiaru, nie zaś całej technologii. Łączna ocena użyteczności wyniku, uwzględniająca wszystkie źródła błędów, może być natomiast dokonana przy podejściu niezawodnościowym.

Dla teorii niezawodności nie ma alternatywy przy ocenie sprawności (użyteczności) złożonych systemów pomiarowych. O ile problem ten ma niewielkie znaczenie w odniesieniu do typowej aparatury geodezyjnej, to jest istotny np. przy prognozie sprawności czujników zamocowanych w niedostępnej części korpusu zapory czy czujników transformatorowych wykorzystywanych przez dłuższy czas w pomiarach deformacji budowli, w badaniach laboratoryjnych i w pomiarach próbnym obciążeniach [10]. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że w technicznych charakterystykach przyrządów geodezyjnych ich producenci zapewniają o niezawodności. Takie werbalne, bez liczbowych wskaźników zapewnienie jest oczywiście niepoprawne z punktu widzenia teorii niezawodności, ale potwierdza potrzebę oceny użyteczności przyrządu.

Interpretacja niezawodności stosowana przy ocenie funkcjonowania systemów technicznych daje się przełożyć na zagadnienie eksploatacji osnowy (sieci) geodezyjnej. Użyteczność, jaką musi odznaczać się każda konstrukcja geodezyjna, jest interpretowana jako konieczność spełnienia określonych kryteriów dokładnościowych. Dla wyróżnienia specyfiki tego problemu wprowadzono pojęcie niezawodności eksploatacyjnej [8, 10].

Niezawodność eksploatacyjna wyrażona w postaci prawdopodobieństwa stanowi miarę użyteczności całej osnowy geodezyjnej lub jej fragmentu.

Użyteczność osnowy jest zdefiniowana przez jej funkcje, jakimi są:

- zachowanie dokładności wyrażonej błędem średnim rzędnych wg klasy skatalogowanej w przepisach technicznych,
- zachowanie klasy osnowy (sieci) wyrażonej błędem średnim pomiaru na długości 1 km ciągu niwelacyjnego,
- zachowanie dokładności całej sieci lub jej fragmentu w określonym okresie i na założonym poziomie.

Niezawodność eksploatacyjna może mieć postać **globalnej**, gdy dotyczy zbioru punktów, lub **lokalnej**, gdy dotyczy pojedynczego punktu, ewentualnie niewielkiej grupy pod warunkiem zgrupowania ich na niewielkim obszarze.

Analiza niezawodności eksploatacyjnej osnowy ma sens praktyczny wyłącznie w odniesieniu do zadań projektowanych, a więc realizowanych w przyszłości. Dlatego integralną częścią każdego algorytmu wyznaczania niezawodności eksploatacyjnej jest procedura

prognozowania przemieszczeń. Prognozowanie stanowi kluczowy fragment zagadnienia niezawodności eksploatacyjnej. Jedną z metod prognozowania, uwzględniającą specyfikę przedmiotowego problemu, jest autorska propozycja polegająca na wyznaczaniu tzw. funkcji stabilności [8, 10]. Metoda została opracowana pod kątem osnów wysokościowych.

### 3. Funkcje stabilności punktów osnowy niwelacyjnej

Niestabilność reperów jest w rzeczywistości geotechnicznym problemem stabilności obiektu budowlanego, w którym znak jest zamocowany. Stabilność reperu zależy od stanu technicznego budowli, czasu jej eksploatacji i warunków geotechnicznych. Zmiany wysokości są wynikiem złożonych procesów zachodzących w podłożu gruntowym o charakterze losowym i systematycznym. Dla opisu przemieszczeń reperów wprowadzono funkcje stabilności wyznaczone jako związki korelacyjne pomiędzy parametrami opisującymi warunki geotechniczne a przemieszczeniami pionowymi reperów.

Funkcja stabilności jest modelem deformacji podłoża gruntowego. Jest to model korelacyjny, bowiem parametry funkcji określane są na podstawie analizy statystycznej zaobserwowanych przemieszczeń pionowych. Specyfiką badanego problemu przemieszczeń z jednej strony jest bardzo długi okres przebiegu procesu, a z drugiej niewielkie wartości deformacji. Są to istotne uwarunkowania, bowiem modele geotechniczne podłoża gruntowego nie są w stanie opisać procesu deformacji podłoża w długich, wieloletnich okresach. Przyczyną nie jest brak rozwiązań teoretycznych, ale brak dostatecznie dokładnych danych o historii obciążeń. Dlatego nie ma alternatywy dla empirycznego podejścia do problemu, a ten w badanym przypadku polega na statystycznym opisie wartości przemieszczeń bądź w postaci zmiennych losowych, bądź związku korelacyjnego. Rolę tę dobrze spełniają funkcje stabilności.

Funkcje stabilności dotyczą całego obszaru, na którym wykonywany jest pomiar geodezyjny. Z założenia dotyczą wyłącznie obiektów, których proces osiadań jest już w fazie końcowej, powinny to być obiekty co najmniej kilkudziesięcioletnie.

Ogólna postać funkcji stabilności ma postać

$$p_i = w_{1,i} \cdot k_1 + w_{2,i} \cdot k_2 + \dots + w_{m,i} \cdot k_m \quad \text{dla } i \langle 1, n \rangle \quad (4)$$

gdzie:

- $w_{m,i}$  – arbitralnie przyjęty parametr wartościujący wielkość wpływu danego czynnika w punkcie  $P_i$  o współrzędnych  $X_i, Y_i$
- $k_i$  – parametr funkcji stabilności określający wpływ czynnika niestabilności na przemieszczenia pionowe punktów wysokościowych na rozważanym obszarze.

Parametr  $k_j$  dla  $j \langle 1, m \rangle$ , wyznaczany jest w procesie wyrównania, na podstawie analiz przemieszczeń pionowych oraz charakterystyk wodno-gruntowych. Szacunkowe wartości współczynników  $w_j$  podano w pracy [8].

W praktycznych zadaniach, w zależności od posiadanych danych, zapis funkcji stabilności (4) może przyjąć jedną z niżej wymienionych postaci.

- Zadanie A – dane są tylko wyniki pomiarów geodezyjnych. Zbiory danych: początkowy  $\{H_i\}_0$  i końcowy  $\{H_i\}_k$  powinny obejmować co najmniej kilkanaście, a optymalnie – kilkadziesiąt (20–40) lat. Zbiór aktualny  $\{H_i\}_k$  może obejmować wszystkie repery, lub też może dotyczyć tylko fragmentu osnowy (sieci) pomiarzonej w czasie  $t_0$ .
- Zadanie B – dane są wyniki pomiarów wysokościowych i badań geotechnicznych, jak w funkcji (4).
- Zadanie C – dane są badania geotechniczne, przy niewielkiej liczbie, a w skrajnym przypadku przy braku jakichkolwiek danych geodezyjnych. Taki przypadek wymaga pomocy geotechnika, bowiem wartości przemieszczeń należy szacować, kierując się doświadczeniem, najlepiej przez analogię do innych obiektów o podobnych warunkach stabilizacji.

#### 4. Wyznaczenie wskaźnika niezawodności eksploatacyjnej metodą prawdopodobieństwa zupełnego

Jeśli oprócz zbioru prognozowanych przemieszczeń dane są prawdopodobieństwa ich wystąpienia, to wskaźnik niezawodności eksploatacyjnej określić można jako prawdopodobieństwo zupełne funkcjonowania układu. Metoda ta opiera się na alternatywnej kwalifikacji przemieszczeń zgodnie z rysunkiem 1. Przedmiotem analizy są w tym przypadku przemieszczenia albo mieszczące się w przedziale użyteczności, albo pozostające poza tym przedziałem.

W probabilistycznym modelu zagadnienia  $p(A_i)$  oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia warunków  $A_i$ , tj. stanów charakterystycznych.

Wychodząc z definicji na prawdopodobieństwo warunkowe, w którym wystąpienie zdarzenia  $B$  zależy od wystąpienia stanów  $A_i$

$$P(B/A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)} \quad (5)$$

można określić prawdopodobieństwo zupełne funkcjonowania całego układu (systemu) z zależności

$$P(B) = \sum P(A_i) \cdot P(B/A_i) \quad (6)$$

W zadaniu niezawodności eksploatacyjnej osnowy geodezyjnej wielkość  $p(A_i)$  oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia określonych warunków  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , np. gruntowych, wodnych itp. Wystąpienie osiadań w warunkach zaistnienia stanu  $A_i$  oznaczono jako prawdopodobieństwo warunkowe  $p(B/A_i)$ . Jest to prawdopodobieństwo wystąpienia osiadań dopuszczalnych, przy których osnowa spełnia kryteria użyteczności.

Określenie częstości wystąpienia warunków  $A_i$  jest w praktyce trudne. Najlepszym sposobem wyznaczenia  $p(A_i)$  jest zbadanie odpowiednio licznej próby statystycznej, wówczas

$$p(A_i) = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (7)$$

W tabeli 1 przedstawiono przykład sporządzony dla danych uzyskanych w czasie badań zmian wysokości w latach 1973–2003 reperów sieci niwelacyjnej krakowskiej dzielnicy Kazimierz [7].

**Tabela 1.** Wyznaczenie wskaźnika niezawadności w postaci prawdopodobieństwa zupełnego

Warunki stabilizacji	$A_i$	$p(A_i)$	$p(B/A_i)$	$p(A_i) \cdot p(B/A_i)$
Podłoże nawodnione	$A_1$	0,1	0,9	0,09
Oddziaływanie otoczenia	$A_2$	0,05	1,0	0,05
Dobre warunki gruntowe	$A_3$	0,3	1,0	0,30
Przeciętne warunki gruntowe	$A_4$	0,4	0,95	0,38
Słabe podłoże	$A_5$	0,15	0,8	0,12
$\Sigma$				0,94

Prawdopodobieństwo  $p(A_i)$  wyznaczono, generalizując warunki geotechniczne obiektów, w którym zamocowane były repery. Dużą trudność stwarzało wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa warunkowego  $p(B/A)$ . Przy wyznaczaniu tej wartości kierowano się tylko czynnikiem dominującym  $A_i$ , w praktyce jednak w każdym przypadku ma miejsce kompozycja kilku czynników  $A_i$ .

Prawdopodobieństwo zupełne wyznaczone dla badanego fragmentu osnowy wynoszące 0,94 należy uznać za wynik dobry. Jest tak tym bardziej, że w grupie reperów, które nie spełniają założonych kryteriów zdarzają się przypadki przemieszczeń bardzo dużych, wykluczających jakiegokolwiek ich wykorzystanie. Warto zwrócić uwagę na ten aspekt użytkowalności osnowy (sieci) wysokościowej. Według I. Gajderowicza około 5% reperów sieci niwelacyjnej I i II klasy w ciągu około trzydziestu lat eksploatacji ulega zniszczeniu [1]. Podobną prawidłowość stwierdził C. Toś w przytoczonych wyżej badaniach sieci niwelacyjnej na obszarze m. Krakowa [8].

## 5. Wyznaczanie wskaźników niezawadności eksploatacyjnej metodą testów statystycznych

Metoda polega na ocenie istotności deformacji wyznaczonych za pomocą funkcji stabilności. Procedura oparta jest na statystycznych testach zgodności  $T$ -Studenta i  $F$ -Fishera.

Zbiór przemieszczeń reperów  $\{p_j\}_k$  w okresie pomiędzy  $t_0$  i  $t_k$  wyznaczany jest wzorem

$$\{p_j\}_k = \{H_j\}_k - \{H_i\}_0 \quad (8)$$

gdzie:

$\{H_i\}_0$  – wyniki pomiaru wyjściowego wykonanego w czasie  $t_0$

$\{H_j\}_k$  – wyniki pomiaru aktualnego wykonanego w czasie  $t_k$

$\{H_i\}_g$  – zbiór rzędnych prognozowanych wyznaczany funkcją stabilności.

W zagadnieniu brane są także pod uwagę (rys. 3):

- $\sigma_k$  – odchylenie standardowe przemieszczeń dla zbioru  $\{p_j\}_k$  o liczebności  $n_k$
- $t_g$  – czas analizowanego pomiaru geodezyjnego (planowanego),  $t_g > t_k$
- $X_i, Y_i$  – współrzędne lokalizujące repery w jednolitym układzie,
- $p(x)$  – funkcja stabilności,
- $w_i$  – charakterystyki wodno-gruntowe wyznaczone dla badanego obszaru,  
 $\mathbf{x} = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ ,
- $v_{gl}$  – niezawodność globalna,
- $v_{lok}$  – niezawodność lokalna.

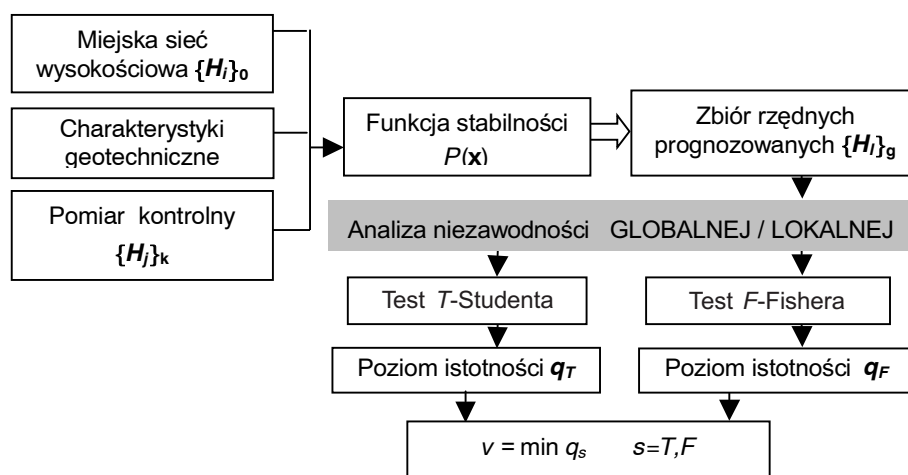
W analizie niezawodności eksploatacyjnej można wyróżnić dwa główne zadania. W pierwszym przedmiotem oceny jest osnowa w chwili  $t_k$ . Wykonany pomiar ma charakter kontrolny. Jest to zadanie statystycznej kontroli jakości, w którym cechy całego zbioru są szacowane na podstawie losowej próby. Zbiór przemieszczeń  $\{p_j\}_k$  dla  $j = 1, 2, 3, \dots, n_k$  stanowiący wynik aktualnego pomiaru jest próbą statystyczną o liczebności  $n_k$  dla populacji, którą tworzą wszystkie repery na badanym obszarze. Nie jest to typowe zadanie wyznaczania niezawodności eksploatacyjnej. Problem dotyczy bowiem aktualnego stanu, jego rozwiązanie nie wymaga prognozy procesu deformacji.

Prognozowane wartości przemieszczeń reperów wyznaczane są przez ekstrapolację przy założeniu, że gradient osiadań jest stały w przedziale czasu  $\langle t_0, t_g \rangle$ . Odchylenie standardowe zbiorów  $\{p_j\}_k$  oraz  $\{p_j\}_g$  można wyznaczyć z definicji, albo – co jest mniej uzasadnione – na podstawie wariancji funkcji stabilności  $p(x)$ . Utworzony zbiór przemieszczeń  $\{p_j\}_g$ , o którym zakłada się, że jego rozkład wystarczająco dokładnie opisuje rozkład normalny  $N\{p_{g, \bar{s}r}, \sigma_g\}$  jest porównywany ze zbiorem przemieszczeń  $\{p_j\}_k$ . Zgodnie ze schematem algorytmu (rys. 3) niezawodność eksploatacyjna wyznaczana jest jako prawdopodobieństwo, że wartości przeciętne oraz wariancje rozkładów zbiorów rzędnych  $\{H_i\}_g$  i  $\{H_i\}_k$  lub odpowiadającym im zbiorów przemieszczeń  $\{p_j\}_k$  i  $\{p_j\}_g$  nie różnią się istotnie, czyli że pochodzą z tej samej populacji generalnej. Charakterystyka  $T_0$  wyznaczana jest formułą testu  $T$ -Studenta. Na jej podstawie wyznaczany jest wskaźnik niezawodności, tj. wartość  $q_T = P\{|T| = T_0\}$ . Jeśli  $p_{k, \bar{s}r} = 0$ ,  $n_g = n_k = n$ , to statystykę  $T_0$  wyznacza zależność

$$T_0 = \frac{p_{g, \bar{s}r} \sqrt{n-1}}{\sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_k^2}} \quad (9)$$



W teście wariancji  $F$ -Fishera wyznaczana jest statystyka  $F$ . Z tablic rozkładu  $F$ -Fishera wyznacza się odpowiadające wartości zmiennej  $F$  poziom istotności  $q_F$ . Wynikiem analizy – miarą niezawodności – jest wskaźnik niezawodności  $v$ , który pokazuje, że z prawdopodobieństwem  $1-v$  badane próby nie pochodzą z tej samej populacji generalnej. Im większy jest współczynnik  $v$ , tym większa jest niezawodność eksploatacyjnej osnowy.



Rys. 3. Schemat algorytmu wyznaczania niezawodności punktów sieci wysokościowej

## 6. Przykład oceny niezawodności eksploatacyjnej osnowy wysokościowej

Zadanie ilustruje przykład wyznaczenia niezawodności osnowy niwelacyjnej, która będzie eksploatowana do 2010 r. Zadanie rozwiązywane jest w oparciu na funkcji stabilności całej sieci miasta Krakowa wg [7] dla okresu 1970–2003. Ma ona postać

$$p_j = -0,00059 \cdot w_1 - 0,0011 \cdot w_2 + 0,000366 \cdot w_5 \quad (10)$$

gdzie:

- $w_1$  – parametr gruntu zalegającego na głębokości fundamentowania,
- $w_2$  – parametr gruntu słabego zalegającego poniżej głębokości fundamentowania,
- $w_5$  – parametr miąższości warstwy niezawodnionej.

Przyjmując założenie o jednostajności procesu przemieszczeń w okresie 33 lat, można wyznaczyć współczynniki równania korelacyjnego odpowiadające przemieszczeniu w czasie jednego roku. Równanie (10) przyjmie postać

$$p_j = -0,000018 \cdot w_1 - 0,000033 \cdot w_2 + 0,000011 \cdot w_5 \quad (11)$$

Prognozowane na okres od 2003 do 2010 zbiory przemieszczeń są testowane wzorem (9), przy założeniu hipotezy  $H_0$ , że badana populacja ma rozkład normalny  $N(0,1)$ . Dla  $p_{gśr} = 1,23$  mm,  $n = 179$ ,  $\sigma_g = 1$  mm,  $\sigma_k = 0,75$  mm wartość  $T_0 = 13,13$ , stąd z tablic rozkładu

$$q_T = 1,3 e^{-32}.$$

Statystyka  $F$  obliczona na podstawie błędów standardowych wynoszących odpowiednio 1 mm i 0,749 mm wynosi  $F = 1,78$ , co odpowiada poziomowi istotności

$$q_F = 6,5 e^{-5}.$$

Wyznaczona wartość wskaźnika niezawodności osnowy

$$v = 1,3 e^{-32} < 0,01$$

wskazuje, że w najbliższych sześciu latach sieć ulegnie deformacji w takim stopniu, że z prawdopodobieństwem 99% nie spełni założonego kryterium rozkładu przemieszczeń  $N(0 \text{ mm}, 1 \text{ mm})$ . Jako wartości krytyczne współczynnika  $v$  można – zdaniem autora – przyjmować wartości 0,05 oraz 0,10, podobnie jak w innych zagadnieniach technicznych.

## 7. Przykład analizy niezawodnościowej na potrzeby projektowania osnowy realizacyjnej

Przykład dotyczy fragmentu istniejącej sieci geodezyjnej w dzielnicy Kazimierz (Kraków). Przewiduje się, że osnowa wysokościowa dla realizacji inwestycji budowlanych w latach 2005–2010 obejmie istniejące repery oraz trzy dodatkowe jak na rysunku 4. Na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń pionowych w latach 1970–2003 oraz danych dotyczących właściwości podłoża gruntowego wyznaczono funkcję stabilności (tab. 2).

Tabela 2. Funkcja stabilności wyznaczona dla okresu 1970–2004 (33 lata)

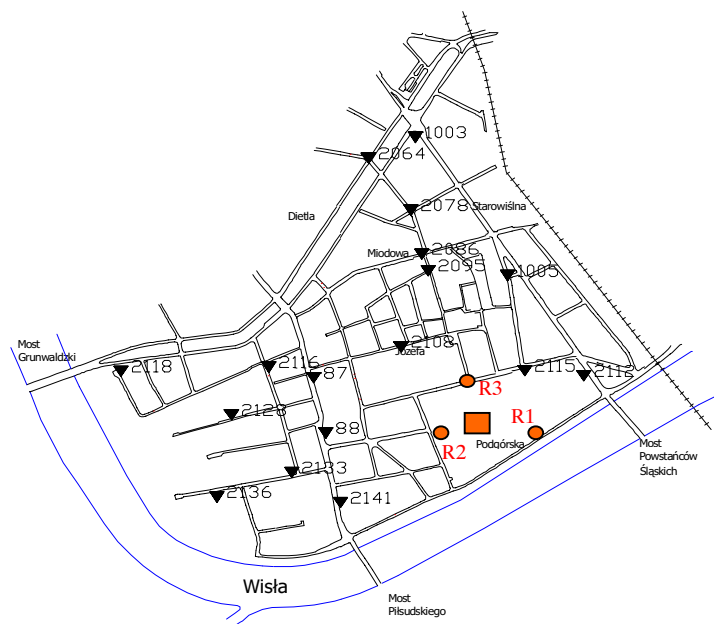
Opis / jednostka współczynnika	Symbol	Wartość $k$	Błąd	Statystyka $T$
Grunt na głębokości fundamentowania [mm/ $w_g$ ]	$k_1$	-0,0014	0,000428	3,35
Grunt słaby zalegający poniżej głębokości fundamentowania [mm/ $w_g$ ]	$k_2$	-0,001	0,000522	1,86
Mięszość warstwy niezawodnionej [mm/m]	$k_5$	0,00108	0,000357	3,03
Błąd aproksymacji – 0,0039 m; współczynnik korelacji wielorakiej – 0,87				

Przyjmując następnie, że w prognozowanym okresie 2004–2010 proces deformacji będzie przebiegał liniowo, wyznaczono współczynniki:

$$k_1 = -0,000043/\text{rok},$$

$$k_2 = -0,000029/\text{rok},$$

$$k_5 = 0,000033/\text{rok}.$$



Rys. 4. Lokalizacja reperów

Tabela 3. Prognoza przemieszczeń pionowych punktów osnowy obiektu do 2005 r. i 2010 r.

Reper	Odległość od obiektu	Błąd pomiaru ciągu	Przemieszczenia pomierzone 1970–2004	Przemieszczenia prognozowane [mm]	
				2005	2010
2136	240 m	0,39	2,3	0,0	0,2
2086	420 m	0,52	-0,5	0,0	-0,2
2116	450 m	0,54	0,7	0,0	0,2
Rp. 2	150 m	0,31	-	0,0	0,2
Rp. 3	150 m	0,31	-	-0,5	-1,6
				$n_g = 5$ $p_r = -0,1\text{mm}$ $\sigma_g = 0,2\text{ mm}$	$n_g = 5$ $p_{g\dot{s}r} = -0,3\text{mm}$ $\sigma_g = 0,8\text{ mm}$

Przy określaniu niezawodności wytypowanego układu odniesienia pięciu reperów (2136, 2086, 2126, Rp. 2, Rp. 3) w latach 2005–2010 należy uwzględnić wpływ błędów pomiaru i stabilności punktów odniesienia. W analizie przyjęto, że błąd pomiaru ciągu niwelacyjnego wynosi 0,8 mm/km. Wysokość każdego punktu realizowanego na obiekcie w czasie budowy w dowiązaniu do wytypowanych reperów osnowy, wyznaczona jest z błędem 0,43 mm. Zestawiając powyższe z wartościami  $\sigma_g$  podanymi w tabeli 3, we wzorach testów *T*-Studenta i *F*-Fishera należy przyjąć  $\sigma_{g,2005} = 0,47$  mm,  $\sigma_{g,2010} = 0,91$  mm. Wyznaczonym wartościom statystyk  $T_0 = 0,390$  oraz  $F = 3,67$  odpowiadają poziomy istotności  $q_T = 0,71$  oraz  $q_F = 0,12$ . Z dwóch uzyskanych wartości jako końcowy wynik należy przyjąć bezpieczniejszy wskaźnik niezawodności globalnej, stąd  $v_{gl} = 0,12$ .

Niestabilność punktu Rp. 3 wpływa na zmniejszenie niezawodności układu. Wynik jest korzystniejszy, jeśli Rp. 3 zastąpić reperem 88. Po takiej zamianie wskaźnik niezawodności globalnej przyjmuje wartość  $v_{gl} = 0,29$ , co kwalifikuje projektowaną osnowę jako spełniającą w pełni założone kryteria dokładnościowe.

## 8. Uwagi końcowe i wnioski

1. Główną zaletą podejścia niezawodnościowego jest możliwość scalania różnych problemów technicznych oraz szacowania wpływów czynników stanowiących źródło błędów systematycznych i grubych. Jakkolwiek przedstawiony przykład niezawodności eksploatacyjnej scalający w jednym zadaniu elementy geodezyjne i geotechniczne dotyczy tylko pomiarów wysokościowych, to w sensie metodycznym stanowi propozycję możliwą do zastosowania w innych zagadnieniach pomiarowych.
2. Zaprezentowane podejście niezawodnościowe stanowi narzędzie, które można wykorzystać w celu oceny stanu osnowy geodezyjnej, projektowania pomiarów aktualizujących sieć wysokościową oraz projektowania programu monitoringu deformacji budowli i podłoża gruntowego. W praktyce zaprezentowana metoda daje m.in. możliwość różnicowania czasokresu ważności klas reperów. Obecnie zmiana klasy dotyczy całej sieci niezależnie od warunków jej stabilizacji.
3. Warunkiem wyznaczenia niezawodności eksploatacyjnej jest pozyskanie danych potrzebnych dla opracowania prognozy badanych procesów. Dlatego ważne jest systematyczne archiwizowanie wyników badań, a także opracowanie procedur analiz cząstkowych pozwalających opisać elementy badanego układu zgodnie z potrzebami analizy niezawodnościowej.

## Literatura

- [1] Gajderowicz I.: *Ocena dokładności krajowej sieci niwelacyjnej precyzyjnej I klasy pomiarzonej w latach 1997–2003*. Technical Sciences. Supplement 2. Olsztyn, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego 2005, 123–134

- 
- [2] Instrukcja G-4: *Sieć niwelacyjna*. Warszawa, GUGiK 2001
  - [3] Murzewski J.: *Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych*. Wydawnictwo Arkady 1972
  - [4] PN-84/N-04041/05: *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Ogólne zasady badań*
  - [5] PN-85/N-04041/04: *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Struktury niezawodnościowe systemów technicznych*
  - [6] Prószyński W., Kwaśniak M.: *Niezawodność sieci geodezyjnych*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2002
  - [7] Toś C.: *Metodyka oceny warunków wodno-gruntowych dla celów optymalizacji geodezyjnych pomiarów wysokościowych na obszarach zurbanizowanych*. Kraków, Politechnika Krakowska 2005 (praca doktorska)
  - [8] Toś C., Wolski B.: *Operational reliability of levelling network*. Reports on Geodesy, No. 3 (74), Warsaw University of Technology, 2005, 55–64
  - [9] Wiczysty A.: *Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 2, Kraków, 2001
  - [10] Wolski B.: *Monitoring metrologiczny obiektów geotechnicznych*. Kraków, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej 2006