



RID II (Rozwój Innowacji Drogowych)
**Diagnostyka sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów
inżynierskich, z uwzględnieniem doboru systemów monitoringu**



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

**WYMAGANIA WZORCOWE SYSTEMU MONITORINGU
DROGOWYCH OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH
O KONSTRUKCJI SPRĘŻONEJ KABLOBETONOWEJ ORAZ PODWIESZONEJ**

Opracował zespół:

IBDiM

dr hab. inż. Piotr Olaszek, prof. IBDiM

dr hab. inż. Ireneusz Wyczalek

mgr inż. Mirosław Biskup

mgr inż. Artur Sakowski

mgr inż. Leszek Komorowski

IPPT PAN

dr inż. Andrzej Świercz

PŚw

prof. dr hab. inż. Grzegorz Świt

dr hab. inż. Aleksandra Krampikowska, prof. PŚw

Wydanie 3

11.06.2026, Warszawa

Spis treści

1. Przedmiot i zakres stosowania	4
2. Definicje	4
3. Rodzaj i zakres monitoringu	8
3.1 Zasady ogólne	8
3.2 Konstrukcje sprężone kablobetonowe	11
3.3 Konstrukcje podwieszane	15
4. Obligatoryjny okresowy monitoring geodezyjny	18
4.1 Przebieg pomiarów geodezyjnych	18
4.1.1 Zasady lokalizacji punktów pomiarowych	18
4.1.2 Ogólne zasady monitoringu geodezyjnego	18
4.1.3 Pomiary geodezyjne – precyzyjna niwelacja geometryczna	20
4.1.4 Pomiary geodezyjne – tachimetria	20
4.2 Zasady ogólne obliczeń i prezentacji wyników	21
5. Obligatoryjny okresowy monitoring wibracyjny ciągłych i zalecany okresowy monitoring wibracyjny zewnętrznych kabli sprężających	22
6. Obligatoryjny okresowy monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych	23
7. Monitoring okresowy, obligatoryjny zarysowań; zalecany metodą emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca	24
8. Monitoring rozszerzony ciągły i automatyczny	24
8.1 Zasady ogólne	24
8.2 Dobór czujników do monitoringu do zmian pod obciążeniem statycznym i dynamicznym	25
8.2.1 Pomiary przemieszczeń liniowych	25
8.2.2 Pomiary kątów obrotu	26
8.2.3 Pomiary odkształcenia elementów konstrukcji nośnej	26
8.2.4 Pomiary zmian rozwartości zarysowań i pęknięć	26
8.2.5 Pomiary przyspieszeń drgań	26
8.2.6 Pomiary temperatury powietrza i elementów konstrukcji oraz prędkości i kierunku wiatru.	27
8.3 Monitoring wideo ruchu pojazdów	27
8.4 Wizualizacja i wstępna analiza wyników monitoringu ciągłego	27
9. Model numeryczny konstrukcji	28
9.1 Zasady ogólne	28
9.2 Model numeryczny	29
9.2.1 Geometria	29

9.2.2 Elementy skończone i dyskretyzacja przestrzenna	30
9.2.3 Materiały	30
9.2.4 Obciążenie i warunki brzegowe	30
9.3 Analiza metodą elementów skończonych.....	31
9.4 Kalibracja modelu numerycznego	31
9.5 Uwagi końcowe	31
Bibliografia	33

1. Przedmiot i zakres stosowania

(1) Niniejsze wymagania mają zastosowanie do prowadzenia monitoringu obiektów mostowych o konstrukcji sprężonej kablobetonowej oraz podwieszanej. Zaprezentowane w niniejszych wymaganiach procedury monitoringu wynikają ze specyfiki tych konstrukcji.

(2) Na potrzeby niniejszych wymagań rozróżniono rodzaje monitoringu:

- Monitoring obligatoryjny okresowy;
- Monitoring zalecany (warunkowy) okresowy;
- Monitoring rozszerzony okresowy;
- Monitoring rozszerzony ciągły.

(3) Podstawowym elementem systemu monitoringu konstrukcji mostowych jest monitoring obligatoryjny prowadzony w trybie okresowym (inspekcyjnym - z udziałem człowieka).

(4) Monitoring obligatoryjny okresowy może zostać rozszerzony o dodatkowe pomiary wykonywane razem z pomiarami obligatoryjnymi, rekomendowane na podstawie wyników próbnego obciążenia odbiorczego lub diagnostycznego oraz przeglądu, stwierdzającymi przydatność danych pomiarów do oceny konstrukcji w przyszłości.

(5) Monitoring obligatoryjny oraz monitoring zalecany (warunkowy) jest wykonywany bez względu na pozytywny i nie budzący żadnych wątpliwości wynik próbnego obciążenia odbiorczego oraz bez względu na odpowiedni lub zadowalający stan konstrukcji określony podczas próbnego obciążenia diagnostycznego lub przeglądu.

(6) Monitoring obligatoryjny okresowy, na podstawie wyników badań w przypadku wystąpienia wątpliwości lub nieprawidłowości w pracy konstrukcji, może zostać rozszerzony o dodatkowe pomiary wykonywane razem z pomiarami obligatoryjnymi i określany jest jako monitoring rozszerzony okresowy.

(7) W wyjątkowych przypadkach monitoring może być rekomendowany monitoring w formie monitoringu ciągłego (automatycznego). Wybór formy monitoringu (okresowego lub ciągłego) zależy od charakteru analizowanych zjawisk i potrzeby ciągłości ich obserwacji.

(8) Celem prowadzenia monitoringu jest zapewnienie bezpiecznej eksploatacji konstrukcji oraz w przypadku wykrycia nieprawidłowości określenie przyczyn uszkodzeń lub anomalii w jej zachowaniu pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych lub czynników atmosferycznych.

(9) Niniejsze wymagania nie mają zastosowania do monitoringu konstrukcji nowych w przypadku których:

- a) projektant określił konieczność prowadzenia rozszerzonego monitoringu,
- b) w trakcie budowy wykryto błędy projektowe lub anomalie w zachowaniu konstrukcji.

W takich przypadkach zakres prowadzonego monitoringu powinien być ustalany indywidualnie z zaleceniem stosowania metod badawczych i pomiarowych wymienionych w niniejszych wymaganiach.

2. Definicje

Analiza modalna — numeryczna lub eksperymentalna metoda badania drgań konstrukcji z wykorzystaniem parametrów modalnych: częstotliwości i postaci drgań własnych oraz współczynników tłumienia

Baza odniesienia dla pomiarów geodezyjnych – zbiór punktów odniesienia, punktów kierunkowych i/lub punktów refrakcyjnych określony w projekcie monitoringu geodezyjnego.

Bezpieczeństwo użytkowania – bezpieczeństwo użytkowania obiektu mostowego to zapewnienie jego użytkownikom możliwości eksploatacji zgodnie z przeznaczeniem, bez ryzyka utraty zdrowia, życia lub mienia, z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych i eksploatacyjnych.

Celownik – sygnał punktu dla pomiaru tachymetrycznego (cel); w pomiarach powtarzalnych (pomiarach przemieszczeń) jako celowniki należy stosować pryzmaty dostosowane do pomiarów precyzyjnych;

Cięgno podwieszające – cięgno w postaci wieszaka, wanty, kabla lin liny stosowane w obiektach cięgowych.

Cięgno sprężające – cięgno sprężające to element z wprowadzoną siłą naciągu, służący do uzyskania w konstrukcji określonego stanu naprężenia, wykonany najczęściej ze stali wysokiej wytrzymałości w formie kabla wielolinowego lub pręta zakończonych elementami kotwiącymi. Rzadziej stosowane są cięgna sprężające złożone ze stalowych drutów, czy też materiałów kompozytowych.

Czas trwania monitoringu – długość czasu prowadzenia monitoringu (pomiarów) w trybie monitoringu okresowego lub ciągłego. Czas trwania monitoringu jest z reguły mierzony w latach. Jest to inny czas niż czas trwania sesji pomiarowej (z reguły mierzony w kilku godzinach) w przypadku monitoringu okresowego.

Częstotliwość pomiarów okresowych – jest zwykle określana jako przedział czasowy pomiędzy prowadzonymi pomiarami w ramach monitoringu okresowego.

Długookresowy pomiar geodezyjny przemieszczeń pionowych i poziomych (monitoring geodezyjny przemieszczeń) – pomiar geodezyjny mający na celu określenie wielkości zmian położenia punktów zlokalizowanych na badanej konstrukcji w długim okresie (standardowe odstępy pomiędzy odczytami wynoszą od kilku miesięcy do kilku lat). Do przeprowadzenia pomiarów wymagane jest zainstalowanie na konstrukcji sieci reperów i/lub celowników oraz wykonanie pomiarów zerowych po zakończeniu budowy i ewentualnie po wykonaniu próbnego obciążenia odbiorczego. W pobliżu badanej konstrukcji mostowej wymagana jest stabilna i trwała baza odniesienia. Specjalne zasady tworzenia bazy odniesienia dotyczą terenów szkód górniczych [24].

Element skończony — dyskretny fragment modelu numerycznego, który odwzorowuje zachowanie rzeczywistego obiektu w określonym obszarze.

Geodezyjny operat pomiarowy – dokument opracowany przez geodetę, zawierający zwięzły opis wykonanych badań w ramach monitoringu geodezyjnego, warunki realizacji pomiarów (stan obiektu i panujące warunki pogodowe), zestawienie uzyskanych wyników w postaci tabelarycznej (wykaz zmian położenia punktów kontrolowanych względem pomiaru referencyjnego) i graficznej (wykres zmian położenia punktów w funkcji czasu).

Kalibracja modelu numerycznego — proces optymalizacji modelu numerycznego poprzez porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi uzyskanymi na rzeczywistym obiekcie. Proces ten polega na dostosowaniu parametrów modelu, np. właściwości materiałowe, warunki podparcia, parametry sztywności czy tłumienia, w celu minimalizacji rozbieżności między modelowanym a rzeczywistym zachowaniem konstrukcji. Wyróżnia się kalibrację statyczną (statyczne obciążenie konstrukcji) i dynamiczną (dynamiczne obciążenie konstrukcji).

Kontrola stałości punktów odniesienia – sprawdzenie w drodze realizacji określonej procedury obliczeniowej, czy nie zachodzi obawa o zmianę położenia punktu lub grupy punktów odniesienia wskutek ich niekontrolowanego przemieszczenia – do dalszych obliczeń należy wykorzystywać jedynie pomiary do punktów odniesienia uznanych za stałe (nieruchome).

Kryterium stałości punktów odniesienia – wielkość liczbowa, której przekroczenie należy traktować jako informację o niestałości punktu odniesienia. Dla osnowy poziomej przedmiotem oceny są współrzędne płaskie punktu (x , y) albo długości (D) i kąty (H) między nimi, a dla osnowy wysokościowej – rzędne (H) lub przewyższenia (Δh), pomierzone względem punktów przyjętych jako stałe.

Metoda elementów skończonych (MES) – numeryczna technika rozwiązywania równań różniczkowych stosowana w zagadnieniach inżynierskich. Analizowane obiekty dzieli się na małe, skończone elementy, które są indywidualnie rozpatrywane, a uzyskane wyniki łączy się w celu uzyskania rozwiązania całego problemu.

Metoda różnicowa obliczenia przemieszczeń – metoda obliczeniowa polegająca na porównaniu w procesie wyrównawczym metodą najmniejszych kwadratów różnic współrzędnych lub różnic obserwacji między pomiarami..

Model numeryczny – matematyczna reprezentacja konstrukcji inżynierskiej utworzona za pomocą siatki elementów skończonych, wykorzystywana do przeprowadzania symulacji jej zachowania pod wpływem obciążeń lub/i czynników zewnętrznych.

Model strunowy cięga – uproszczony model matematyczny stosowany do analizy drgań cięgien, przy czym cięgno traktuje się jako idealną, jednorodną strunę przenoszącą osiową siłę rozciągającą przy zanedbywaniu sztywności na zginanie. Model strunowy stosuje się do przybliżonego wyznaczania częstotliwości drgań własnych cięgien w konstrukcjach mostowych.

Monitoring ciągły – cykliczne pomiary wykonywane na obiekcie w sposób ciągły i automatyczny za pomocą sensorów trwale zainstalowanych w miejscach pomiaru. Częstotliwość próbkowania jest dobierana w zależności od badanych zjawisk o charakterze statycznym lub dynamicznym. Przyjęcie określonej częstotliwości próbkowania wpływa na wybór metod pomiarowych i czujników. Modyfikacja częstotliwości próbkowania po zainstalowaniu systemu monitoringu ciągłego może być utrudniona lub praktycznie niemożliwa.

Monitoring okresowy – pomiary wykonywane na obiekcie w określonych dłuższych odstępach czasu za pomocą trwale zainstalowanych sensorów w miejscach pomiaru lub instalowanych na czas wykonywania pomiarów, przy czym miejsca pomiarów (cele w przypadku monitoringu geodezyjnego) powinny być jednoznacznie oznakowane tak, aby zapewnić uzyskanie wymaganej dokładności. W zależności od analizy wyników pomiarów okres między pomiarami może ulec skróceniu lub wydłużeniu.

Monitoring geodezyjny – pomiary okresowe wykonywane na obiekcie z użyciem precyzyjnych instrumentów geodezyjnych – niwelatorów, tachimetrów, teodolitów – zgodnie z zasadami pomiarów i obliczeń stosowanymi w geodezji.

Niwelacja – technika geodezyjna służąca do pomiarów wysokościowych.

Niwelacja geometryczna – metoda pomiaru wysokościowego za pomocą zestawu niwelatora i łąt; względem niwelacji geometrycznej dopuszcza się stosowanie samego określenia „niwelacja”.

Obiekt sprężony kablobetonowy – obiekt inżynierski, którego konstrukcja ustroju nośnego wykonana jest z betonu sprężonego, w wyniku oddziaływania sił pochodzących od naciągniętych i zakotwionych w konstrukcji kabli lub innych cięgien sprężających, poprowadzonych wewnątrz lub na zewnątrz przekroju betonowego.

Obiekt wzmocniony sprężeniem zewnętrznym – obiekt inżynierski, któremu przywrócono lub zwiększono nośność na skutek oddziaływań sił pochodzących od naciągniętych i zakotwionych na konstrukcji kabli lub innych cięgien sprężających, poprowadzonych na zewnątrz przekroju elementów ustroju nośnego.

Obiekt ze sprężoną płytą pomostu – obiekt inżynierski, którego konstrukcja płyty pomostowej została sprężona siłami pochodzącymi od naciągniętych i zakotwionych w niej kabli lub innych cięgien sprężających, poprowadzonych wewnątrz lub na zewnątrz przekroju płyty pomostowej, w jednym lub dwóch kierunkach.

Obiekt cięgowy – obiekt inżynierski, w którym głównymi elementami nośnymi są cięgna przenoszące siły rozciągające i podtrzymujące konstrukcję przęsła z wykorzystaniem wyniesionych ponad poziom pomostu wysokich podpór – pylonów. Wyróżniamy obiekty podwieszane, gdzie cięgna podtrzymujące przęsło są kotwione bezpośrednio w pylonach oraz obiekty wiszące, gdzie cięgna podtrzymujące przęsło są mocowane do liny nośnej rozpiętej między pylonami. Na potrzeby niniejszego opracowania zaliczono do konstrukcji cięgowych również obiekty łukowe z wieszakami w postaci cięgien prętowych lub linowych.

Obliczenie przemieszczeń na podstawie pomiarów geodezyjnych – uzyskanie wartości składowych przemieszczenia (w przyjętym układzie współrzędnych) punktu lub punktów poprzez matematyczne przetworzenie wyników obserwacji geodezyjnych, przeprowadzone zgodnie z zasadami rachunku wyrównawczego [19].

Oprogramowanie CAD — (ang. *Computer-Aided Design*) oprogramowanie komputerowe do tworzenia, edycji i analizy projektów inżynierskich, architektonicznych oraz mechanicznych w przestrzeniach 2D i 3D.

Oprogramowanie MES — specjalistyczne narzędzie komputerowe umożliwiające tworzenie, analizę i rozwiązywanie problemów inżynierskich i naukowych za pomocą metody elementów skończonych oraz wizualizację wyników obliczeń.

Precyzyjna niwelacja – wysokościowa metoda pomiarowa zapewniająca uzyskanie odchyłki wyznaczenia podwójnej różnicy wysokości na stanowisku niwelatora $\pm 0,10$ mm lub odchyłki z podwójnej różnicy wysokości ciągu $\pm 0,5 \sqrt{L}$ mm, gdzie L – sumaryczna odległość między punktami ciągu w [km].

Precyzyjny pomiar tachymetryczny – metoda pomiarowa zapewniająca pomiar odległości z rekomendowanym błędem średnim nie większym niż $\pm 0,6$ mm (dopuszczalnym $\pm 1,0$ mm) oraz pomiar kątów poziomych i pionowych z rekomendowanym błędem średnim nie większym niż $\pm 0,5''$ (dopuszczalnym $\pm 1,0''$).

Projekt monitoringu geodezyjnego – projekt rozmieszczenia punktów pomiarowych i bazy odniesienia dla pomiarów geodezyjnych, wyboru metod pomiaru (niwelacji lub tachimetrii) dla poszczególnych punktów oraz szczegółowych kryteriów wykonania pomiarów i obliczeń, w tym nieprzekraczalnych kryteriów dokładnościowych. Projekt monitoringu powinien stanowić integralną część projektu mostu i bazować na wynikach obliczeń statycznych i dynamicznych konstrukcji. Projekt monitoringu geodezyjnego powinien co najmniej spełniać zasady i ustalenia zawarte w niniejszych wymaganiach.

Reper – sygnalizowany punkt do pomiarów wysokościowych metodą niwelacji geometrycznej.

Stan awaryjny – stan obiektu mostowego, który zachodzi w przypadku uszkodzenia elementów konstrukcyjnych na skutek oddziaływań przekraczających projektowe parametry lub postępującej ich degradacji, w wyniku czego następuje poważna utrata nośności, stateczności lub bezpieczeństwa użytkowania obiektu.

Tachimetria – metoda pomiaru sytuacyjnego (poziomego) i/lub wysokościowego za pomocą tachimetru, obejmującego określenie długości i kątów przy pochylonej osi celowej.

Trwałość obiektu – zdolność konstrukcji przy określonych warunkach eksploatacji i oddziaływań środowiskowych do zachowania nośności oraz spełniania funkcji użytkowych w przewidzianym okresie, bez konieczności wymiany elementów lub wykonywania kosztownych napraw.

Układ odniesienia – układ współrzędnych, w którym zapisywane są wartości przemieszczeń.

Warunki brzegowe — sposób podparcia konstrukcji inżynierskiej reprezentowany w modelu numerycznym poprzez określenie przemieszczeń lub wartości sił w węzłach modelu numerycznego.

Węzły — punkty definiujące siatkę elementów skończonych w modelu numerycznym, określające geometrię elementów, w których obliczane są wartości poszukiwanej funkcji (np. przemieszczenia).

Wyrównanie obserwacji – procedura obliczeniowa prowadząca do uzyskania najbardziej prawdopodobnych wyników pomiaru poprzez realizację warunku najmniejszych kwadratów odchyłek poszczególnych wielkości obserwowanych – wynikiem wyrównania są wartości wielkości obliczanych wraz z ich charakterystyką dokładnościową.

3. Rodzaj i zakres monitoringu

3.1 Zasady ogólne

(1) Podstawowym elementem systemu monitoringu konstrukcji mostowych jest **monitoring obligatoryjny prowadzony w trybie okresowym**.

(2) Na potrzeby prowadzenia **monitoringu obligatoryjnego** niezbędne jest wykonanie **pomiarów zerowych** przed wykonaniem próbnego obciążenia odbiorczego. Konieczne jest **powtórzenie pomiarów zerowych**, po zakończeniu próbnego obciążenia odbiorczego i przed oddaniem konstrukcji do eksploatacji, w celu weryfikacji wyznaczonych w czasie próbnego obciążenia wartości przemieszczeń/odkształceń trwałych (plastycznych) oraz przyjęcia nowych wartości zerowych do monitoringu przemieszczeń/odkształceń w czasie eksploatacji obiektu.

(3) Monitoring obligatoryjny jest wykonywany bez względu na pozytywny i nie budzący żadnych wątpliwości wynik próbnego obciążenia odbiorczego oraz bez względu na odpowiedni lub zadowalający stan konstrukcji określony podczas przeglądu.

(4) Monitoring obligatoryjny może zostać wprowadzony (rozpoczęty) na podstawie wyników przeglądu lub ekspertyzy, jeśli nie był prowadzony od momentu oddania konstrukcji do eksploatacji.

(5) **Monitoring obligatoryjny okresowy** może zostać rozszerzony na podstawie wyników próbnego obciążenia odbiorczego o **monitoring zalecany (warunkowy) okresowy** – pomiary, których przydatność została wskazana w czasie próbnego obciążenia odbiorczego. Na potrzeby prowadzenia monitoringu okresowego niezbędne jest wykonanie pomiarów zerowych bezpośrednio po zakończeniu próbnego obciążenia odbiorczego i przed oddaniem konstrukcji do eksploatacji.

(6) Podstawowym czynnikiem decydującym o zakresie **monitoringu rozszerzonego** są wyniki próbnego obciążenia odbiorczego. Wyniki mogą być pozytywne i wtedy nie jest konieczne wprowadzanie monitoringu rozszerzonego. W przypadku wyników negatywnych nie jest możliwe dopuszczenie konstrukcji do eksploatacji. W przypadku gdy wyniki badań wskazują na nieprawidłowości w zachowaniu konstrukcji pod obciążeniem statycznym lub dynamicznym wymagane jest wprowadzenie monitoringu rozszerzonego.

(7) W przypadku konstrukcji eksploatowanych wprowadzenie **monitoringu rozszerzonego** może wynikać z wniosków z **monitoringu obligatoryjnego** lub wniosków z przeglądu okresowego lub próbnego obciążenia diagnostycznego wykonywanego w ramach ekspertyzy. Jeśli wprowadzenie monitoringu rozszerzonego wynika z wniosków z przeglądu okresowego powinno być poprzedzone próbnym obciążeniem diagnostycznym. Wyjątkowo w przypadku oczywistych wniosków można wprowadzić monitoring rozszerzony bez wykonywania próbnego obciążenia diagnostycznego.

(8) Wprowadzenie monitoringu rozszerzonego pod próbnym obciążeniem diagnostycznym powinno być poprzedzone monitoringiem pod obciążeniem eksploatacyjnym.

(9) Próbné obciążenie diagnostyczne wykonuje się zgodnie z „Procedurą badań obiektów mostowych o konstrukcji sprężonej kablobetonowej oraz podwieszanej z użyciem metody próbnego obciążenia diagnostycznego wspartej przeglądem wizualnym i inspekcją geodezyjną”.

(10) Częstotliwość wykonywania pomiarów monitoringu obligatoryjnego okresowego powinna zależeć od potrzeb analizy wyników. W przypadku obligatoryjnego monitoringu geodezyjnego podstawowy cykl pomiarowy wynosi 5 lat.

(11) Częstotliwość wykonywania pomiarów monitoringu rozszerzonego okresowego powinna zależeć od analizowanych czynników oddziałujących na konstrukcję, np. w przypadku wątpliwości w zakresie wpływu czynników atmosferycznych pomiary powinny być wykonywane dwa razy w ciągu roku – podczas zimy i lata.

(12) **Monitoring rozszerzony ciągły** (automatyczny) ze względu na wysokie koszty i ograniczoną żywotność urządzeń elektronicznych (z reguły maksymalnie 5-10 lat) powinien być stosowany wyłącznie w przypadkach wyjątkowych - wymagających ciągłej obserwacji zachowania konstrukcji pod obciążeniami eksploatacyjnymi i czynnikami atmosferycznymi.

(13) W celu zwiększenia wiarygodności pomiarów, monitoring ciągły należy wspierać okresowym monitoringiem obligatoryjnym (o zwiększonej częstotliwości) oraz okresowym monitoringiem rozszerzonym.

(14) Analizę wyników monitoringu rozszerzonego (okresowego lub ciągłego) należy prowadzić z wykorzystaniem modelu numerycznego. Zaleca się kalibrację modelu numerycznego na podstawie wyników uzyskanych z próbnego obciążenia odbiorczego. Kolejne aktualizacje modelu numerycznego należy wykonywać z wykorzystaniem wyników z próbnego obciążenia diagnostycznego lub monitoringu okresowego lub ciągłego.

(15) Zalecane w podanym zakresie monitoringu metody badawcze i pomiarowe są to metody zwalidowane, potwierdzone pozytywnymi wynikami badań członków konsorcjum projektu DiagSC lub licznymi publikacjami w literaturze krajowej lub światowej.

(16) W przyszłości, w przypadku walidacji testowanych obecnie metod badawczych, metody te mogą być wprowadzane do zakresu monitoringu okresowego lub ciągłego w tym obligatoryjnego lub rozszerzonego, pod warunkiem zapewnienia uzyskania wymaganej dokładności i wiarygodności uzyskanych wyników. Przykładami takich obecnie testowanych metod są przedstawione w akapitach (17)-(19)

(17) Metody nieniszczące kontroli stanu kabli mostów kablobetonowych i podwieszonych [2,11,12,20], w przypadku których ze względu na poprawę skuteczności wskazane jest zastosowanie kombinacji metod:

- a) kombinacja zastosowania georadaru i echa ultradźwięków, zwiększa skuteczność kontrolowania kabli w kanałach wewnętrznych – georadar może służyć do wykrywania odcinków, które zostaną szczegółowo zbadane metodą echa ultradźwięków [12];
- b) kombinacja tomografii podczerwieni i echa ultradźwiękowego może być stosowana do kontroli kabli wewnętrznych – metodą echa ultradźwiękowego wykrywa się miejsca podejrzane a tomografią podczerwieni można oszacować pustki i wodę pod warunkiem pokrycia kabli betonem o grubości mniejszej niż ok. 5 cm [12];
- c) kombinacja sondowania dźwiękowego i wycieku strumienia magnetycznego może być przydatna do kontroli kabli zewnętrznych – sondowanie dźwiękowe może służyć do wykrywania pustek a metoda wycieku strumienia do sprawdzania defektów (korozji, pęknięć i ubytków przekroju) cięgien [12];

- d) kombinacje metod wycieku strumienia magnetycznego i echa uderzenia (uderzania młotkiem impulsowym i rejestracji przyspieszeń lub przemieszczeń fal odbitych) może być przydatna do szybszej kontroli kabli zewnętrznych – metodą echa uderzenia lokalizuje się pustki, wadliwy iniekt i wodę a metodą wycieku strumienia magnetycznego wykrywa w tych miejscach defekty cięgien [12].

(18) Metody technik elektrochemicznych mogą mieć zastosowanie do detekcji i oznaczania procesów korozyjnych kabli konstrukcji sprężonych i podwieszonych. W technikach elektrochemicznych wykorzystuje się odpowiedź prądową układu na zaburzenie elektryczne układu w miejscu przyłożenia elektrody pomiarowej w tym wypadku najczęściej siarczano miedziowej. Techniki detekcji korozji metalu bazują głównie na następujących technikach pomiaru potencjału stacjonarnego stali i rezystancji otuliny (PT), impedancji układu technikami spektroskopii impedancyjnej stało lub zmiennoprądowej (EIS) oraz stanu metalu metodą impulsu galwanostatycznego (IG). Analizując odpowiedź układu można wnioskować o zawansowaniu lub braku korozji metalu [7,1]. Proponuje się zastosowanie takiego rozwiązania w dwóch wariantach:

- a) konstrukcji nowo budowanych - przyłączenie do kabli sprężających elektrod manganowych i ciągłego monitoringu tych konstrukcji za pomocą urządzeń z komórkowym transferem danych;
- b) konstrukcji istniejących - wymaga każdorazowo wytworzenia elektrody odniesienia dostosowanej do badanej konstrukcji tak aby uzyskać kontakt elektryczny z nasyconą otuliną kabla nie zależnie w czym jest zainiektowany.

Ograniczeniem metody najbardziej istotnym jest określenie prawdopodobieństwa korozji na poziomie 95% odnośnie wystąpienia zjawiska korozyjnego jak i miejsca. Drugim ograniczeniem jest prawidłowe przygotowanie podłoża badanego elementu do badań, co może istotnie wpływać na uzyskane rezultaty.

(19) Metody fotogrametryczne mogą mieć zastosowanie do jednoczesnej rejestracji całej lub znacznej części badanej konstrukcji. Możliwe jest również wykorzystanie zdjęć do ewidencjonowania i pomiaru lokalnych uszkodzeń (rys, pęknięć, korozji, wycieków, itp.).

- a) Podstawowym wymogiem w zakresie stosowania zdjęć do monitoringu przemieszczeń i deformacji całej konstrukcji jest zapewnienie wiarygodnej bazy odniesienia (zapewniającej eliminację ewentualnych drgań kamery), odpowiedniej sygnalizacji (tarcze kodowe, LED) oraz użycia metod obliczeniowych zapewniających uzyskanie wiarygodnych, dokładnych składowych przemieszczenia [15,16]. Możliwe jest również wykorzystywanie kamer od smartfonów przy zapewnieniu jednoczesnej obserwacji punktu mierzonego i punktu odniesienia [23]. W kontekście niniejszych wytycznych stosując metody fotogrametryczne do pomiarów statycznych należy udowodnić uzyskanie wyników porównywalnych z precyzyjną tachimetrią, albo uzasadnić konieczność zastąpienia nimi pomiaru tachimetrycznego;
- b) Metody fotogrametryczne wykorzystujące metodę korelacji obrazu (DIC) mogą mieć również zastosowanie do monitoringu drgań cięgien [22].
- c) Metody fotogrametryczne wykorzystujące metodę korelacji obrazu (DIC), metody bazujące na sztucznej inteligencji (AI) lub inne sprawdzone metody obliczeniowe mogą mieć również zastosowanie do monitoringu zarysowań. Ze względu na uzyskiwane dokładności – rozdzielczości obrazu, konieczne jest stosowanie układu wykorzystującego równoczesną obserwację z wielu kamer lub analizę wielu zdjęć zbieranych z wykorzystaniem dronów - UAV (Unmanned Aerial Vehicle) [17,21,25];

- d) Metody sztucznej inteligencji (AI), poza zautomatyzowanym wykrywaniem usterek mogą być także stosowane do usprawnienia analizy wyników monitoringu, a także do oceny ryzyka dalszych uszkodzeń mostu [6].

(20) Niniejsze wymagania wzorcowe nie dotyczą monitoringu nowych obiektów o przęsłach znacznej rozpiętości, nowatorskich pod względem rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych i o szczególnym znaczeniu dla systemu transportowego. Nie dotyczą również wybranych rozwiązań konstrukcyjnych reprezentatywnych dla znaczących grup obiektów mostowych będących przedmiotem studiów badawczych związanych z identyfikacją obciążeń, detekcją uszkodzeń konstrukcji czy modelowaniem degradacji, prognozowaniem trwałości itp. [14]. W takich przypadkach systemy monitoringu powinny być dobierane indywidualnie przez Projektanta konstrukcji czy prowadzącego badania naukowe. Zawsze powinien on zawierać elementy monitoringu obligatoryjnego przedstawione w niniejszych wymaganiach wzorcowych.

3.2 Konstrukcje sprężone kablobetonowe

(1) Rodzaj i zakres prowadzenia monitoringu w przypadku konstrukcji nowych przedstawiono na schemacie blokowym na rys. 1 a w przypadku konstrukcji eksploatowanych na schemacie blokowym na rys. 2.

(2) W przypadku konstrukcji nowych obligatoryjny jest monitoring geodezyjny dla wszystkich konstrukcji bez względu na rozpiętość przęsła.

(3) W przypadku konstrukcji z przęsłami o rozpiętości $L \geq 50$ m dodatkowo obligatoryjny jest monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych.

(4) Na podstawie wyników próbnego obciążenia odbiorczego, zawierających rozpoznanie przydatności, może być zalecany monitoring wibracyjny zewnętrznych kabli sprężających.

(5) W przypadku obiektów nowych, w których przed lub w czasie próbnego obciążenia odbiorczego stwierdzono zarysowania (o rozwartości $\geq 0,1$ mm) w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, obligatoryjny jest monitoring rozszerzony okresowy propagacji zarysowań. Zalecane jest zastosowanie metody emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca. Dopuszczalne jest zastosowanie zamiast emisji akustycznej innej metody wykrywania propagacji zarysowań w elementach betonowych, pod warunkiem zapewniania możliwości detekcji rys w całej objętości badanego elementu a nie tylko na jego powierzchni oraz uzyskania pozytywnej opinii ekspertów z zakresu nieniszczących badań betonu.

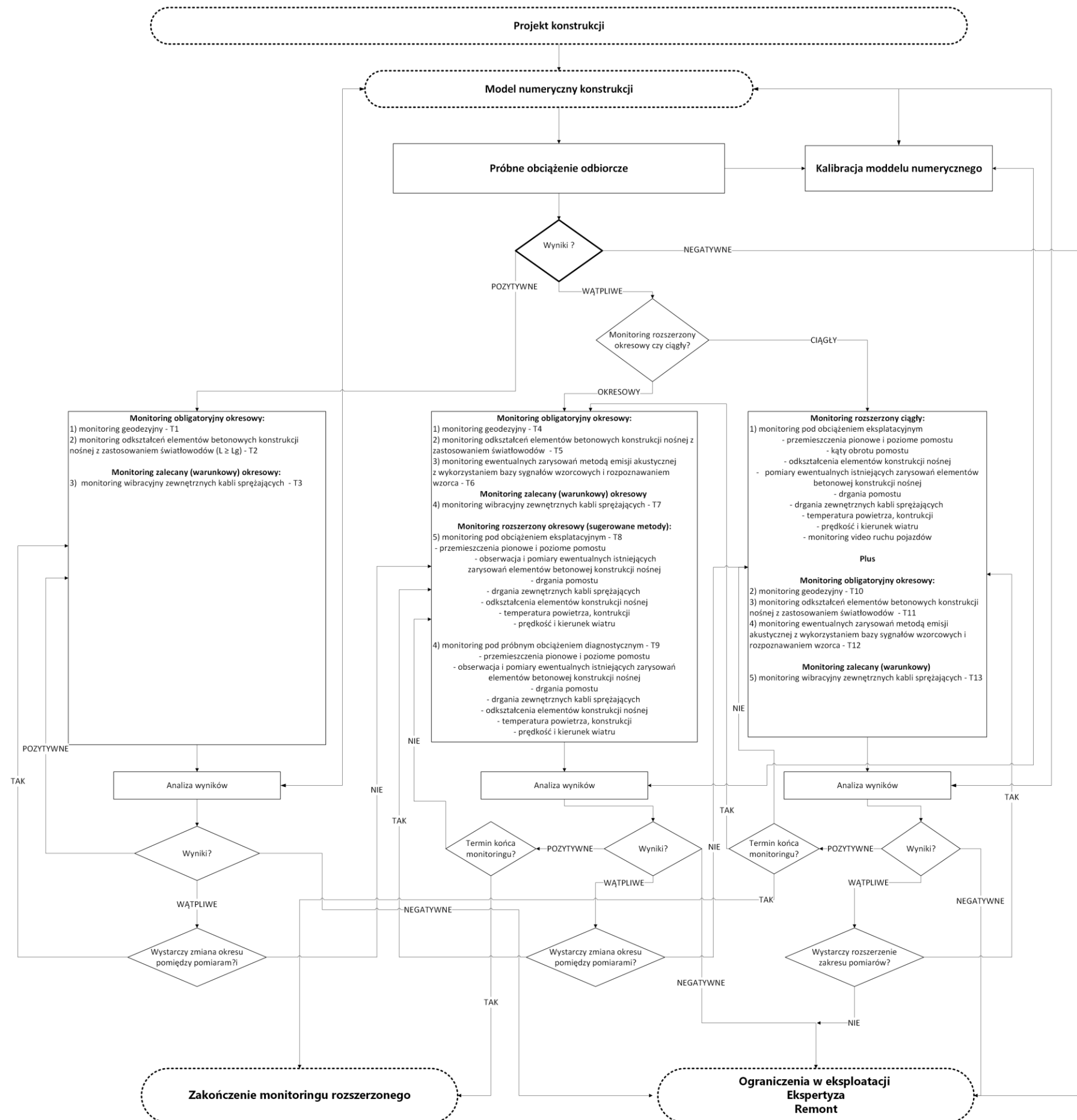
(6) W przypadku obiektów eksploatowanych, w których stwierdzono zarysowania (o rozwartości $\geq 0,1$ mm) w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, obligatoryjny jest monitoring rozszerzony okresowy propagacji zarysowań. Zalecane jest zastosowanie metody emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca. Dopuszczalne jest zastosowanie zamiast emisji akustycznej innej metody wykrywania propagacji zarysowań w elementach betonowych ze spełnieniem warunku podanego w akapicie (5).

(7) W przypadku obiektów eksploatowanych, w których stwierdzono zarysowania (o rozwartości $\geq 0,1$ mm) w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń i nie był wcześniej zainstalowany i prowadzony obligatoryjny monitoring geodezyjny powinien on być niezwłocznie

wprowadzony. Dotyczy to również wprowadzenia monitoringu z zastosowaniem czujników światłowodowych bez względu na rozpiętość przęsła.

(8) Podany na rys. 1 i 2 zakres monitoringu rozszerzonego ciągłego jest podany jako maksymalny możliwy i powinien być każdorazowo indywidualnie dobierany z uwzględnieniem konieczności monitoringu zjawisk statycznych, wolnozmiennych czy dynamicznych.

(9) Każdorazowo powinien być określony czas prowadzenia monitoringu rozszerzonego. W przypadku wniosków z analizy wyników monitoringu zawierających wątpliwości co do zachowania konstrukcji rodzaj monitoringu lub jego zakres powinien być zmodyfikowany.



Rys. 1. Schemat blokowy doboru rodzaju i zakresu monitoringu w przypadku nowych konstrukcji sprężonych kablabetonowych.

T1 .. T13 – odstępy czasu pomiędzy pomiarami przy prowadzeniu monitoringu okresowego:

T1, T4 i T10 – obligatoryjny monitoring geodezyjny, niezbędne dwa pomiary zerowe: po zakończeniu budowy i po próbnym obciążeniu odbiorczym; następnie w odstępie T1 – w pierwszym okresie eksploatacji zalecane jest powtarzanie pomiarów po 1 roku, po 3 i po 5 latach eksploatacji a następnie (w przypadku pozytywnych wyników) co 5 lat, T4 i T10 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

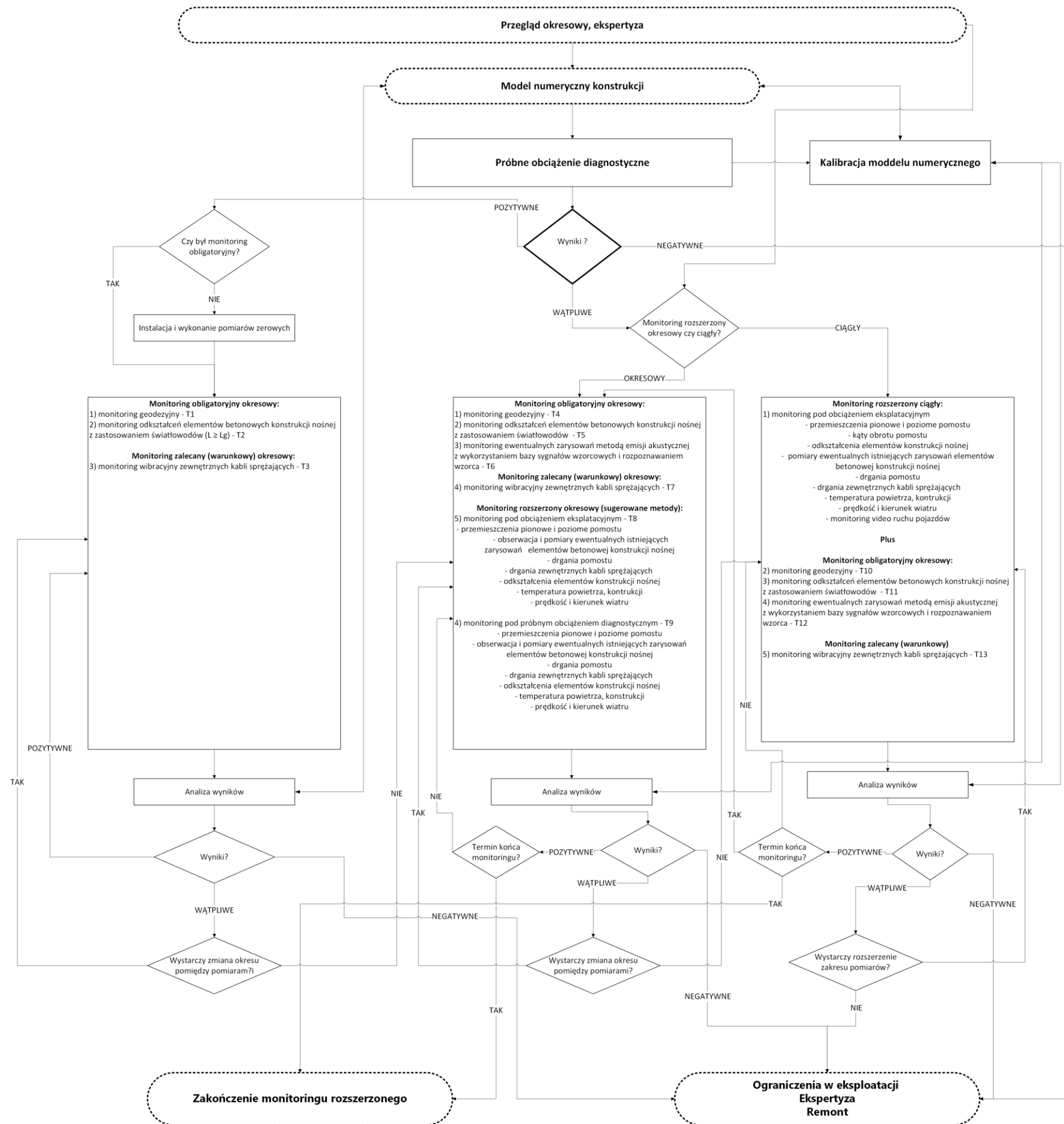
T2, T5 i T11 – obligatoryjny monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych, obligatoryjny w przypadku przeseł o rozpiętości większej bądź równej L_g ($L_g = 50$) m; T2 zalecany co 5 lat, bezwzględnie niezbędne dwa pomiary zerowe po zakończeniu budowy i po próbnym obciążeniu odbiorczym, T4 i T10 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T3, T7, T13 – monitoring wibracyjny zewnętrznych kabli sprężających, zalecany na podstawie badań podczas próbnego obciążenia odbiorczego, T3 - zalecany co 10 lat, T7 i T13 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1 rok;

T6, T12 – monitoring okresowy, obligatoryjny w przypadku kiedy przed lub w czasie próbnego obciążenia odbiorczego stwierdzono zarysowania w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, zalecana jest metoda emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca, w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T8 – monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem eksploatacyjnym w pierwszym okresie co 3 miesiące z uwzględnieniem ekstremalnych temperatur w zimę i lato oraz pośrednich na wiosnę i jesień; po roku w przypadku pozytywnych wyników może prowadzony co rok, zakres monitoringu rozszerzonego zależy od wyników próbnego obciążenia odbiorczego;

T9 - monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem próbnym; częstotliwość zależna od wyników monitoringu pod obciążeniem eksploatacyjnym.



Rys. 2. Schemat blokowy doboru rodzaju i zakresu monitoringu w przypadku eksploatowanych konstrukcji sprężonych kablabetonowych

T1 .. T13 – odstępy czasu pomiędzy pomiarami przy prowadzeniu monitoringu okresowego:

T1, T4 i T10 – obligatoryjny monitoring geodezyjny; T1 – w pierwszym okresie monitoringu zalecane jest powtarzanie pomiarów po 1 roku, po 3 i po 5 latach a następnie (w przypadku pozytywnych wyników) co 5 lat; monitoring może zostać wprowadzony (rozpoczęty) na podstawie wyników przeglądu lub ekspertyzy gdy nie był prowadzony od momentu oddania konstrukcji do eksploatacji; T4 i T10 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T2, T5 i T11 – obligatoryjny monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych, obligatoryjny w przypadku przeseł o rozpiętości większej bądź równej L_g ($L_g = 50$) m; T2 zalecany co 5 lat, może zostać wprowadzony (rozpoczęty) na podstawie wyników przeglądu lub ekspertyzy gdy nie był prowadzony od momentu oddania konstrukcji do eksploatacji - bez względu na rozpiętość przęsła, T4 i T10 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T3, T7, T13 – monitoring wibracyjny zewnętrznych kabli sprężających, może zostać wprowadzony (rozpoczęty) na podstawie wyników próbnego obciążenia diagnostycznego, gdy nie był prowadzony od momentu oddania konstrukcji do eksploatacji, T3 - zalecany co 10 lat, T7 i T13 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1 rok;

T6, T12 – monitoring okresowy, obligatoryjny w przypadku kiedy w czasie przeglądu, ekspertyzy lub próbnego obciążenia diagnostycznego stwierdzono zarysowania w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, metodą emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca, w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T8 – monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem eksploatacyjnym w pierwszym okresie co 3 miesiące z uwzględnieniem ekstremalnych temperatur w zimę i lato oraz pośrednich na wiosnę i jesień; po roku w przypadku pozytywnych wyników może prowadzony co rok, zakres monitoringu rozszerzonego zależy od wyników próbnego obciążenia odbiorczego;

T9 - monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem próbnym; częstotliwość zależna od wyników monitoringu pod obciążeniem eksploatacyjnym.

3.3 Konstrukcje podwieszane

(1) Rodzaj i zakres prowadzonego monitoringu w przypadku konstrukcji nowych został przedstawiony na schemacie blokowym na rys. 3 a w przypadku konstrukcji eksploatowanych na schemacie blokowym na rys. 4.

(2) W przypadku konstrukcji nowych obligatoryjny jest monitoring geodezyjny oraz monitoring wibracyjny wszystkich ciągów dla wszystkich konstrukcji bez względu na rozpiętość przęsła.

(3) Warunkiem koniecznym do prowadzenia monitoringu wibracyjnego ciągów jest wykonanie pomiarów zerowych przed próbnym obciążeniem odbiorczym. Dodatkowo wskazane jest wyznaczenie przez Projektanta częstotliwości drgań ciągów związanych z zaprojektowaną ich siłą nacisku.

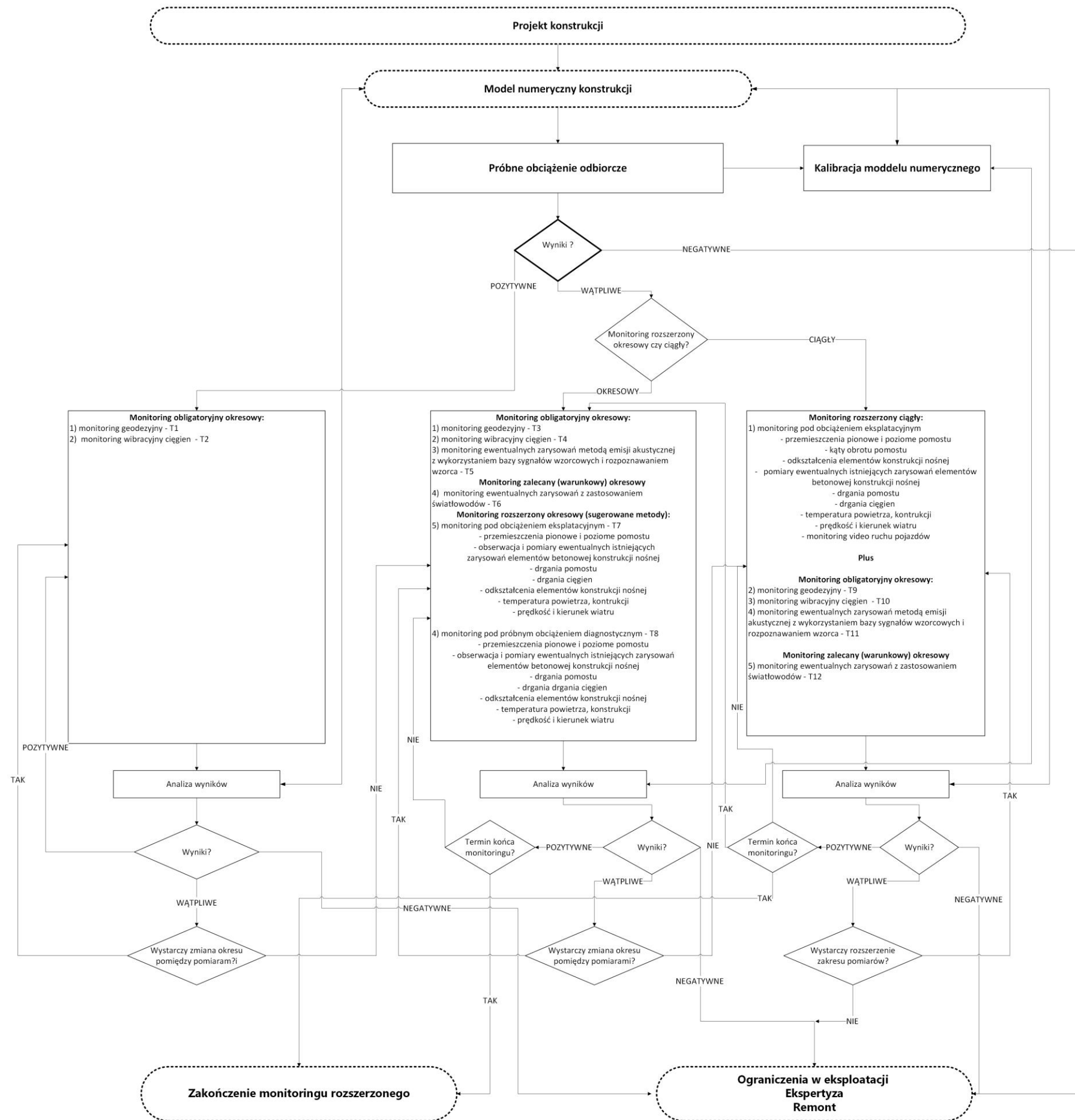
(4) W przypadku obiektów nowych, w których przed lub w czasie próbnego obciążenia odbiorczego stwierdzono zarysowania, (o rozwarości $\geq 0,3$ mm) w elementach z betonu zbrojonego oraz (o rozwarości $\geq 0,1$ mm) w elementach z betonu sprężonego, konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, obligatoryjny jest monitoring rozszerzony okresowy propagacji zarysowań. Zalecane jest zastosowanie metody emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca. Dopuszczalne jest zastosowanie zamiast emisji akustycznej innej metody wykrywania propagacji zarysowań w elementach betonowych, pod warunkiem zapewnienia możliwości detekcji rys w całej objętości badanego elementu a nie tylko na jego powierzchni oraz uzyskania pozytywnej opinii ekspertów z zakresu nieniszczących badań betonu. Jeśli zostanie uznany za celowy - zalecany jest dodatkowo również monitoring rozszerzony okresowy odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych.

(5) W przypadku obiektów eksploatowanych, w których stwierdzono zarysowania, (o rozwarości $\geq 0,3$ mm) w elementach z betonu zbrojonego oraz (o rozwarości $\geq 0,1$ mm) w elementach z betonu sprężonego, w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, obligatoryjny jest monitoring rozszerzony okresowy propagacji zarysowań. Zalecane jest zastosowanie metody emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca. Dopuszczalne jest zastosowanie zamiast emisji akustycznej innej metody wykrywania propagacji zarysowań w elementach betonowych ze spełnieniem warunku podanego w akapicie (4). Jeśli zostanie uznany za celowy - zalecany jest dodatkowo również monitoring rozszerzony okresowy odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych.

(6) W przypadku obiektów eksploatowanych, w których stwierdzono zarysowania (o rozwarości $\geq 0,3$ mm) w elementach z betonu zbrojonego oraz (o rozwarości $\geq 0,1$ mm) w elementach z betonu sprężonego, konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń i nie był wcześniej zainstalowany i prowadzony obligatoryjny monitoring geodezyjny powinien on być niezwłocznie wprowadzony.

(7) Podany na rys. 3 i 4 zakres monitoringu rozszerzonego ciągłego jest podany jako maksymalny możliwy i powinien być każdorazowo indywidualnie dobierany z uwzględnieniem konieczności monitoringu zjawisk statycznych, wolnozmiennych czy dynamicznych.

(8) Każdorazowo powinien być określony czas prowadzenia monitoringu rozszerzonego. W przypadku wniosków z analizy wyników monitoringu zawierających wątpliwości co do zachowania konstrukcji rodzaj monitoringu lub jego zakres powinien być zmodyfikowany.



Rys. 3. Schemat blokowy doboru rodzaju i zakresu monitoringu w przypadku nowych konstrukcji cięgowych.

T1 .. T12 – odstępy czasu pomiędzy pomiarami przy prowadzeniu monitoringu okresowego:

T1, T3 i T9 – obligatoryjny monitoring geodezyjny, niezbędne dwa pomiary zerowe: po zakończeniu budowy i po próbnym obciążeniu odbiorczym; następnie w odstępie T1 – w pierwszym okresie eksploatacji zalecane jest powtarzanie pomiarów po 1 roku, po 3 i po 5 latach eksploatacji a następnie (w przypadku pozytywnych wyników) co 5 lat; T3 i T9 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

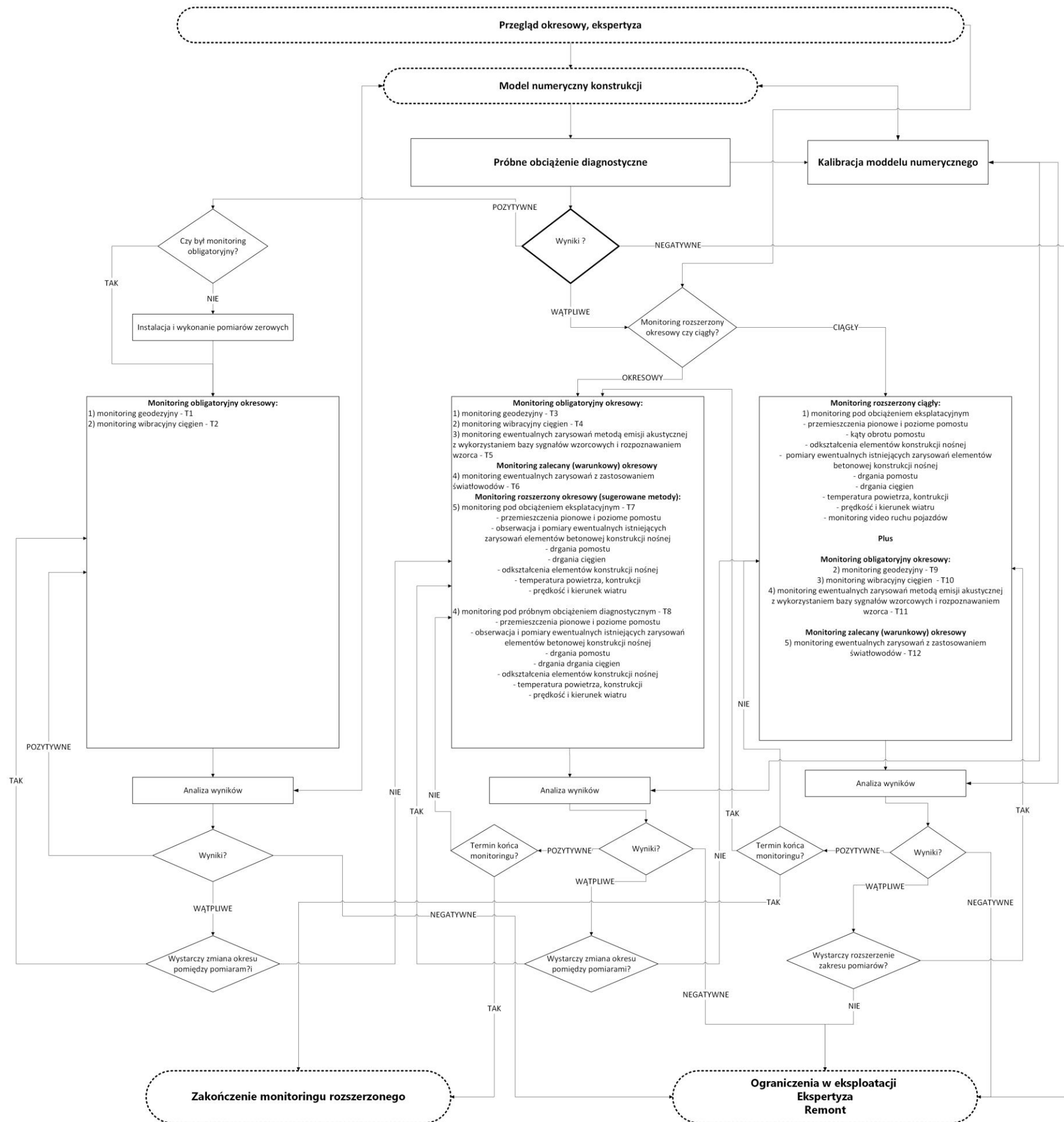
T2, T4, T10 – monitoring wibracyjny cięgien, T3 - zalecany co 10 lat w odniesieniu do wartości zerowych wyznaczonych podczas próbnego obciążenia, T7 i T13 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1 rok;

T5, T11 – monitoring okresowy, obligatoryjny w przypadku kiedy przed lub w czasie próbnego obciążenia odbiorczego stwierdzono zarysowania w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, metodą emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca, w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T6, T12 – monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych, zalecany w przypadku kiedy w czasie próbnego obciążenia odbiorczego stwierdzono zarysowania w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, T6 i T12 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T7 – monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem eksploatacyjnym w pierwszym okresie co 3 miesiące z uwzględnieniem ekstremalnych temperatur w zimę i lato oraz pośrednich na wiosnę i jesień; po roku w przypadku pozytywnych wyników może prowadzony co rok, zakres monitoringu rozszerzonego zależy od wyników próbnego obciążenia odbiorczego;

T8 - monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem próbnym; częstotliwość zależna od wyników monitoringu pod obciążeniem eksploatacyjnym.



Rys. 4. Schemat blokowy doboru rodzaju i zakresu monitoringu w przypadku eksploatowanych konstrukcji cięgowych.

T1 .. T12 – odstępy czasu pomiędzy pomiarami przy prowadzeniu monitoringu okresowego:

T1, T3 i T9 – obligatoryjny monitoring geodezyjny; T1 – w pierwszym okresie monitoringu zalecane jest powtarzanie pomiarów po 1 roku, po 3 i po 5 latach a następnie (w przypadku pozytywnych wyników) co 5 lat; monitoring może zostać wprowadzony (rozpoczęty) na podstawie wyników przeglądu lub ekspertyzy gdy nie był prowadzony od momentu oddania konstrukcji do eksploatacji; T3 i T9 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T2, T4, T10 – monitoring wibracyjny cięgien, T3 - zalecany co 10 lat w odniesieniu do wartości zerowych wyznaczonych podczas próbnego obciążenia, może zostać wprowadzony (rozpoczęty) na podstawie wyników przeglądu lub ekspertyzy gdy nie był prowadzony od momentu oddania konstrukcji do eksploatacji, T7 i T13 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1 rok;

T5, T11 – monitoring okresowy, obligatoryjny w przypadku kiedy w czasie przeglądu, ekspertyzy lub próbnego obciążenia diagnostycznego stwierdzono zarysowania w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, metodą emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca, w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T6, T12 – monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych, zalecany w przypadku kiedy w czasie przeglądu, ekspertyzy lub próbnego obciążenia diagnostycznego stwierdzono zarysowania w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, T6 i T12 w zależności od potrzeby częstotliwości pomiarów, np. co 1, 2, 3 lub 12 miesięcy;

T7 – monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem eksploatacyjnym w pierwszym okresie co 3 miesiące z uwzględnieniem ekstremalnych temperatur w zimę i lato oraz pośrednich na wiosnę i jesieni; po roku w przypadku pozytywnych wyników może prowadzony co rok, zakres monitoringu rozszerzonego zależy od wyników próbnego obciążenia odbiorczego;

T8 - monitoring rozszerzony okresowy pod obciążeniem próbnym; częstotliwość zależna od wyników monitoringu pod obciążeniem eksploatacyjnym.

4. Obligatoryjny okresowy monitoring geodezyjny

4.1 Przebieg pomiarów geodezyjnych

4.1.1 Zasady lokalizacji punktów pomiarowych

(1) Podstawową zasadą doboru punktów do pomiaru jest zilustrowanie przemieszczeń lub zmian kształtu podpór, pomostu wraz z dźwigarami oraz elementów konstrukcji takich jak pylony lub łuki. Jako punkt pomiarowy rozumiany jest reper do pomiarów niwelacyjnych lub pryzmat do pomiarów tachimetrycznych w zależności od możliwości stosowania niwelacji lub tachimetrii.

(2) Liczba punktów mierzonych na przyczółkach powinna być tak dobrana, aby co najmniej dwa punkty przypadały na jeden niezależny element konstrukcji przyczółku i były zlokalizowane na jego skrajach. W przypadku przyczółków o wysokości powyżej 10 m powinny być stosowane dodatkowe dwa punkty na szczycie przyczółku, w celu umożliwienia określenia parametrów obrotu.

(3) Minimalna liczba punktów lokalizowanych na podporach pośrednich:

- a) konstrukcji sprężonych i podwieszonych – dwa punkty na każdej podporze, po jednym od strony górnej i dolnej wody, a w przypadku podpór składających się z kilku słupów – po jednym punkcie na każdym słupie;
- b) W przypadku podpór o wysokości powyżej 10 m powinny być stosowane dodatkowe dwa punkty na szczycie podpory, w celu umożliwienia określenia parametrów obrotu;
- c) pylonów konstrukcji podwieszonych – jeden punkt na szczycie pylonu typu A lub dwa punkty na szczycie pylonu typu H, zaś dla pylonów wyższych niż 20 m nad poziomem jezdni, także punkty pośrednie w połowie wysokości pylonu;
- d) łuków konstrukcji podwieszonych – jeden punkt na szczycie łuku, zaś dla przęseł dłuższych niż 60 m, także punkty pośrednie w 1/4 i 3/4 rozpiętości łuku.

(4) Minimalna liczba punktów lokalizowanych na pomoście:

- a) konstrukcji sprężonych – punkty umieszczone po obu stronach przekroju poprzecznego nad podporami i w środku rozpiętości przęseł, a w przypadku przęseł dłuższych niż 100 m punkty umieszczone w środku rozpiętości przęseł 1/4 i 3/4 rozpiętości przęsła;

(5) konstrukcji podwieszonych – punkty umieszczone po obu stronach przekroju poprzecznego nad podporami i w miejscach podczepienia wszystkich want oraz w środku rozpiętości przęseł,

- b) podwieszonych konstrukcji łukowych – punkty umieszczone po obu stronach przekroju poprzecznego nad podporami i w miejscach podczepienia wszystkich wieszaków oraz w środku rozpiętości przęseł.

(6) Miejsca instalacji punktów na poszczególnych elementach mostu powinny zapewniać widoczność danego punktu ze stanowiska instrumentu, a jednocześnie – nie powinny stwarzać utrudnień w ruchu pojazdów i pieszych.

4.1.2 Ogólne zasady monitoringu geodezyjnego

(1) Geodezyjny monitoring przemieszczeń polega na wykonywaniu pomiarów geodezyjnych do punktów zasygnalizowanych na badanym moście albo jego elementach składowych, zgodnie z projektem monitoringu. W punktach przeznaczonych do pomiaru powinny być zamontowane repery lub pryzmaty umożliwiające poprawny, jednoznaczny i powtarzalny pomiar.

(2) Dobierając technikę pomiarową, należy kierować się kryterium dokładnościowym, zgodnie z którym precyzyjna niwelacja geometryczna powinna zapewnić wyznaczenie przemieszczeń pionowych z dokładnością rzędu 0,1 mm, przy celowej do 35 m. Pomiaru tachimetryczne są mniej dokładne (nie więcej niż $\pm 0,5$ mm, na odległość do 100 m), ale umożliwiają określenie przemieszczeń poziomych, wysokościowych (H) lub przestrzennych (x, y i H) i nie wymagają bezpośredniego dostępu do mierzonego punktu.

(3) W szczególności, metodę niwelacji geometrycznej należy stosować do pomiaru przemieszczeń pionowych podpór na terenie do którego istnieje swobodny dostęp (np. przyczółków i podpór przęseł skrajnych na terenie zalewowym). Metodę niwelacji geometrycznej można również stosować do monitoringu przemieszczeń pionowych płyty pomostu przy możliwości lokalizacji stanowiska niwelatora w stabilnych miejscach poza przęsłem i celowych nie przekraczających 35 m.

(4) Metodę niwelacji geometrycznej można stosować bez ograniczeń odległości pomiędzy stanowiskiem niwelatora i punktami pomiarowymi wyłącznie w przypadku, gdy zarządca obiektu będzie zezwalał na całkowite ograniczanie ruchu pojazdów na obiekcie podczas prowadzenia pomiarów (dotyczy to nie tylko pomiarów zerowych ale również monitoringu w czasie eksploatacji obiektu).

(5) W pozostałych przypadkach w stosunku do akapitów (3) i (4) należy stosować metodę tachimetryczną.

(6) Metodą tachimetryczną powinny być również mierzone wysokościowe lub przestrzenne przemieszczenia pylonów lub konstrukcji łuków.

(7) W przypadku ograniczeń przestrzennych pomiaru niwelacyjnego, takich jak niemożność ustawienia w łąty pionie, różnice wysokości między niwelatorem a punktem mierzonym przekraczające 1,5 m, a także występowanie przeszkód uniemożliwiających widok łąty, należy zastąpić go metodą tachimetryczną. Dotyczy to również przypadku, gdy nie można zapewnić stabilności niwelatora na czas pomiaru na danym stanowisku.

(8) Monitoring geodezyjny wymaga ustalenia lokalizacji stanowisk i punktów odniesienia w stabilnych miejscach poza mostem. W przypadku obiektów o wymiarach powyżej 60 m punkty odniesienia powinny być założone po obu stronach przeszkody. Repery i przyrządy niezbędne do pomiaru geodezyjnego powinny być zabezpieczone przed uszkodzeniem, nie powinny także stwarzać zagrożeń dla osób lub mienia.

(9) Rozmieszczenie punktów badanych metodami geodezyjnymi, a także częstotliwość i dokładność ich pomiarów należy ustalić w projekcie monitoringu dostosowanym do charakterystyki obiektu i zjawisk na nim zachodzących. Niezbędnym wymogiem technicznym jest zapewnienie warunków do wykonania pomiaru wszystkich punktów w przewidzianym zakresie przestrzennym, określoną techniką, z zadaną dokładnością oraz w ustalonym przedziale czasu.

(10) W pierwszym okresie eksploatacji zaleca się wykonanie pomiarów po 1 roku, po 3 i po 5 latach eksploatacji. Następnie w przypadku pozytywnych wyników należy zachować odstęp 5 letni. W przypadku obiektów zlokalizowanych na terenie szkód górniczych lub zarejestrowania występowania osiadania podpór lub statycznych przemieszczeń przęseł powinna być zwiększona z raz na 5 lat do raz na 1 rok lub częściej.

(11) Wykonawcą monitoringu powinna być geodezyjna jednostka badawcza albo zespół geodezyjny podmiotu naukowego lub akredytowanego laboratorium diagnostycznego, posiadającego udokumentowany dorobek w tym zakresie. W przypadku nowych inwestycji

kierownik zespołu powinien legitymować się 4. zakresem uprawnień geodezyjnych: „Geodezyjna obsługa inwestycji”.

(12) Monitoring geodezyjny należy wykonywać sprawdzonym sprzętem – niwelatory i tachimetry, a także łaty i pryzmaty powinny posiadać aktualne świadectwa atestacji, potwierdzające spełnienie nominalnej precyzji pomiaru; należy także dbać o to, aby pryzmaty i inne znaki pomiarowe były czyste na czas pomiaru.

(13) Okresowy monitoring geodezyjny powinien być prowadzony w podobnych warunkach pogodowych co jest szczególnie istotne w przypadku stalowych konstrukcji łuku i pylonu. Sprawozdanie z pomiarów powinno zawierać informacje o temperaturze powietrza, o nasłonecznieniu, opadach deszczu lub śniegu a także o kierunku i sile wiatru podczas badań.

4.1.3 Pomiary geodezyjne – precyzyjna niwelacja geometryczna

(1) Precyzyjną niwelację geometryczną należy stosować do pomiaru podpór mostu oraz tych jego części, które są dostępne przy zachowaniu poziomej osi celowej – punkty te powinny być trwale oznakowane znakami (reperami) umożliwiającymi jednoznaczne ustawienie w pionie łaty i wykonanie poprawnych odczytów.

(2) Należy zapewnić stałość stanowiska niwelatora podczas wykonywania odczytu, zatem pomiary pomostu można wykonywać jedynie na obiektach trwale lub czasowo wyłączonych z ruchu eksploatacyjnego. Pomiary osiadań podpór możliwe są na obiektach obciążonych ruchem.

(3) Jako odniesienie pomiaru niwelacyjnego należy stosować co najmniej po trzy repery zlokalizowane w stabilnych miejscach po obu stronach mostu (wyjątkowo po jednej stronie mostu o długości do 60 m) poza strefą oddziaływania ruchu pojazdów; miejsca posadowienia reperów odniesienia powinny być jednoznaczne wysokościowo i powinny zapewniać stałość reperów w długim okresie czasu.

(4) W przypadku stwierdzenia zagrożenia co do stałości reperu odniesienia między kolejnymi pomiarami (uszkodzenie, przemieszczenie) należy wyłączyć dany punkt z obliczeń oraz zwiększyć sieć odniesienia o kolejny reper; punkt ten powinien zostać włączony do sieci tak, aby można było skutecznie korzystać z niego w kolejnych cyklach pomiaru.

4.1.4 Pomiary geodezyjne – tachimetria

(1) Metoda tachimetryczna monitoringu powinna być stosowana do pomiaru poziomych, pionowych lub przestrzennych przemieszczeń punktów, które nie muszą być bezpośrednio dostępne, ale widoczne ze stanowiska instrumentu.

(2) Jako celowniki do pomiaru tachimetrycznego należy stosować pryzmaty dobrane odpowiednio do danego typu instrumentu. Pryzmaty powinny być założone w takich miejscach i w taki sposób, aby nie były narażone na uszkodzenie przez cały okres monitoringu.

(3) Monitoring metodą tachimetryczną wymaga każdorazowego nawiązania do co najmniej trzech punktów odniesienia zlokalizowanych w pobliżu instrumentu (do ok. 20 m), zaś w przypadku pomiaru wysokościowego na odległość ponad 50 m należy każdorazowo wykonywać pomiar do dodatkowego odległego punktu refrakcyjnego w celu uwzględnienia krzywizny Ziemi i wpływu refrakcji atmosferycznej.

(4) Ze względu na niestabilność obiektów mostowych wskutek obciążenia ruchem należy dążyć do tego, aby pomiary ruchomych elementów mostu (przęsła, zakotwienia want) odbywały się przy chwilowo wstrzymanym ruchu lub w przerwach pomiędzy przejazdami ciężkich pojazdów, a w przypadku braku takiej możliwości aby były wykonywane kilkakrotnie w celu wykrycia i minimalizacji wpływu obciążenia.

(5) W przypadku stwierdzenia zagrożenia co do stałości punktu odniesienia (uszkodzenie, przemieszczenie) należy wyłączyć dany punkt z obliczeń oraz zwiększyć sieć odniesienia o

kolejny pryzmat; punkt powinien zostać włączony do sieci tak, aby można było skutecznie korzystać z niego w kolejnych cyklach pomiaru.

4.2 Zasady ogólne obliczeń i prezentacji wyników

(1) Wykonując monitoring należy stosować taki schemat pomiaru, który uwzględnia korektę zakłócających czynników o charakterze systematycznym oraz umożliwia bieżące wykrywanie i eliminację błędów grubych. W szczególności pomiar wyjściowy („zerowy”) powinien być wykonany co najmniej dwukrotnie, aby tym sposobem zabezpieczyć się przed ewentualnymi omyłkami, sprawdzić poprawność korekty błędów systematycznych i przygotować wiarygodne dane referencyjne do kolejnych pomiarów. Dwukrotne pomiary zerowe powinny być wykonane przed próbnym obciążeniem odbiorczym. Kolejny pomiar powinien być wykonany po próbnym obciążeniu w celu weryfikacji wartości trwałych przemieszczeń występujących na skutek próbnego obciążenia

(2) W miarę możliwości wyniki pomiarów zerowych podpór powinny być odniesione do monitoringu osiadania podczas budowy.

(3) Obliczenia przemieszczeń należy każdorazowo poprzedzić kontrolą stałości punktów odniesienia, a w przypadku, gdy dane pomiarowe wskazują na możliwość wystąpienia niestałości danego punktu odniesienia (przekroczony trzykrotny błąd średni pomiaru) należy stosować – zależnie od metody pomiaru – zapisy akapitów (4) z punktu 4.1.3 lub (5) z punktu 4.1.4.

(4) W metodzie wyrównania bazującej na różnicach współrzędnych płaskich jako potrójny błąd różnicowy należy przyjmować odchyłki między porównywanymi pomiarami przekraczające wartości $|\Delta x|, |\Delta y| \leq 3 \text{ mm}$, a w przypadku różnic wysokości $|\Delta H| \leq 1 \text{ mm}$.

(5) (W metodzie wyrównania bazującej na różnicach obserwacji, jako potrójny błąd różnicowy należy przyjmować odchyłki między porównywanymi pomiarami (tj. między stanowiskiem a punktem odniesienia) przekraczające wartości $|\Delta D| \leq 2 \text{ mm}$, $|\Delta \alpha| \leq 2''$ oraz $|\Delta h| \leq 0,1 \sqrt{n_0 + n_i} \text{ mm}$, gdzie n_0 , n_i – liczba stanowisk niwelatora między reperami odpowiednio w pomiarze zerowym (0) i aktualnym (i).

(6) W przypadku, gdy stwierdzono niestałość więcej niż jednego punktu odniesienia – dotyczy to większych obszarów wykazujących się niestabilnością, na przykład terenów szkód górniczych – przed zasadniczym wyrównaniem należy wykonać dodatkowe pomiary nawiązujące do punktów zlokalizowanych na terenie ustabilizowanym.

(7) Zasadnicze obliczenia należy wykonywać ściśle metodą różnicową połączoną z analizą dokładnościową; w pomiarach powtarzalnych (ta sama lokalizacja stanowiska względem mierzonych punktów) zaleca się metodę różnic obserwacji, a w innych przypadkach – metodę różnic współrzędnych, w nawiązaniu do danych z pomiaru wyjściowego. Opisy topograficzne, szkice rozmieszczenia punktów oraz raport z pomiaru i obliczeń pomiarów wyjściowych powinny stanowić integralną część dokumentacji projektu monitoringu.

(8) Wynikiem procesu wyrównawczego są zmiany położenia punktów (przemieszczenia, osiadania) oraz błędy średnie ich wyznaczenia. Wyniki każdorazowego pomiaru powinny zostać przedstawione w raporcie w postaci tabelarycznej i graficznej. Sprawozdanie powinno zawierać opis warunków pomiaru i jego przebieg, omówienie wyników i błędów ich wyznaczenia oraz ich interpretację geodezyjną (jaka jest relacja stwierdzonych przemieszczeń względem uzyskanych dokładności).

(9) Geodezyjny operat pomiarowy powinien być przekazywany jednostce odpowiedzialnej za utrzymanie mostu w formie i czasie określonych w dokumentacji projektowej monitoringu. Dopuszcza się zdalne udostępnianie wyników monitoringu pod warunkiem zapewnienia bezpieczeństwa danych w sieci.

5. Obligatoryjny okresowy monitoring vibracyjny cięgien i zalecany okresowy monitoring vibracyjny zewnętrznych kabli sprężających

(1) Celem monitoringu jest ocena sił wewnętrznych w układach cięgowych z wykorzystaniem zmierzonych częstotliwości drgań własnych. Układy cięgnowe obejmują:

- a) wanty – w obiektach mostowych o konstrukcji podwieszanej;
- b) wieszaki – w konstrukcjach łukowych;
- c) zewnętrzne kable sprężające – w konstrukcjach sprężonych.

(2) W przypadku cięgien wymienionych w (1) a i b szczególnie prosta w realizacji pomiarów jest metoda pośrednia bazująca na identyfikacji cech dynamicznych [5,13]. Zalecany sposób prowadzenia pomiarów to instalacja czujników przyspieszeń drgań (akcelerometrów) poprzez bezpośrednie ich z mocowanie do cięgna. W celu wykrycia pierwszych postaci drgań własnych wskazany jest montaż czujnika w 1/3 długości cięgna. Rekomendowane jest zastosowanie czujników dwukierunkowych lub układu dwóch prostopadłych względem siebie czujników jednoosiowych mierzących drgania w dwóch kierunkach poprzecznych do osi cięgna i leżących w płaszczyźnie sąsiednich cięgien i prostopadle do niej. Dopuszczalny jest również zdalny pomiar drgań poprzez zastosowanie metod alternatywnych np. radaru interferencyjnego [8,9].

(3) W analizie numerycznej drgań cięgowych obiektów mostowych, w tym wieszaków, want i zewnętrznych kabli sprężających, uwzględnia się ich wstępny naciąg o wartościach sił wskazanych w dokumentacji technicznej lub zarejestrowanych przez urządzenia pomiarowe w czasie naciągu cięgien.

(4) Wstępny naciąg cięgien w modelu numerycznym realizuje się za pomocą jednego z poniżej wymienionych schematów:

- a) statycznego, samozrównoważonego układu dwóch sił skupionych przyłożonych na obu końcach cięgna;
- b) naprężeniowych warunków początkowych;
- c) obciążenia termicznego.

(5) Efektywny model numeryczny wyizolowanego z konstrukcji mostowej cięgna z odpowiednimi warunkami brzegowymi (utwierdzonymi lub podpartymi przegubowo końcami), obciążonego siłą osiową tworzy się z wykorzystaniem skończonych elementów typu belkowego.

(6) W przypadku cięgien o znacznej długości do wyznaczania częstotliwości drgań własnych dopuszcza się zastosowanie elementu typu kratowego lub wykorzystanie analitycznego modelu strunowego.

(7) Parametryczną analizę cięgien z wykorzystaniem uproszczonych modeli numerycznych lub modelu strunowego wykorzystuje się do wyznaczania wrażliwości sił naciągu na częstotliwości własne oraz szacowania siły naciągu przy użyciu zmierzonych częstotliwości drgań własnych.

(8) W przypadku cięgien (want) mostów podwieszonych należy wykonać „zerowe” pomiary częstotliwości i postaci drgań podczas próbnego obciążenia odbiorczego i określić na ich podstawie wartości sił w wantach. Te wartości podlegają weryfikacji z wartościami wyznaczonymi przez Projektanta konstrukcji mostowej. Zmierzone wartości powinny być wykorzystane do kalibracji modelu obliczeniowego cięgien oraz konstrukcji. Wyznaczone podczas próbnego obciążenia wartości częstotliwości i sił (wraz z pomiarami temperatury) stanowią wartości referencyjne i są podstawą do monitorowania zmiany siły w cięgnach eksploatowanego obiektu mostowego.

(9) Uproszczony model strunowy może być stosowany do określenia częstotliwości i sił w długich cięgnach, gdzie wpływ sztywności na zginanie przy zakotwieniu może być pominięty.

W szczególności, model strunowy nie powinien być wykorzystywany w przypadku krótkich cięgien oraz cięgien umieszczonych w rurach i wypełnionych zaczynem cementowym, które przez to posiadają sztywność przy zginaniu.

(10) W przypadku zewnętrznych kabli sprężających, ze względu na obecność dewiatorów, sploty w obrębie jednej osłony stykają się ze sobą i mogą się wzajemnie przeplatać. Dodatkowo może wystąpić sytuacja, w której niektóre sploty w pakiecie nie poddają się procesowi przeciągania i pozostają nienapięte (martwe sploty) [13].

(11) Ze względu na niepewności w numerycznym modelowaniu zewnętrznych kabli sprężających metoda wibracyjna może mieć zastosowanie do monitorowania zmiany siły w czasie. Rekomendowane jest wykonanie pomiarów „zerowych” podczas próbnego obciążenia i wskazanie przekrojów do monitoringu zmian siły w czasie eksploatacji obiektu mostowego.

6. Obligatoryjny okresowy monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych

(1) Monitoring odkształceń elementów betonowych konstrukcji nośnej z zastosowaniem czujników światłowodowych powinien być prowadzony z zastosowaniem czujników ciągłych geometrycznie (rozłożonych) DFOS (ang. Distributed Fiber Optic Sensors) [3,18]. Czujniki te umożliwiają wyznaczenie zmiany odkształceń na całej długości światłowodu. Zastosowanie ciągłych geometrycznie pomiarów czujnikami DFOS umożliwia uzyskanie pełnego obrazu odkształceń oraz ewentualnego rozkładu rys na długości badanego elementu, co jest nieosiągalne przy użyciu typowych czujników punktowych.

(2) W przypadku konstrukcji nowych czujniki światłowodowe powinny być zainstalowane wewnątrz elementu betonowego wraz z wykonaniem odczytu zerowego na etapie jego wytwarzania. Można wtedy uzyskać informacje na temat zachowania konstrukcji podczas wiązania mieszanki betonowej, sprężania (w przypadku konstrukcji kablobetonowych) i dojrzewania betonu oraz dalej monitorować zmiany odkształceń pod obciążeniami zewnętrznymi (również od ciężaru własnego, co nie jest możliwe w przypadku wykonywania instalacji po wykonaniu konstrukcji). Projektowanie trasy światłowodu powinno uwzględniać obszary konstrukcji charakterystyczne dla występowania naprężenia rozciągającego (rejony potencjalnych zarysowań) od oddziaływania obciążenia.

(3) W przypadku montażu czujników na etapie eksploatacji obiektu, należy je wkleić w bruzdy wykonane na powierzchni elementów betonowych. Czujniki umożliwiają rejestrację zmian odkształceń od momentu wykonania odczytu zerowego - wykonanego bezpośrednio po ich wklejeniu. Ze względu na przyczyny instalacji monitoringu projektowanie trasy światłowodu powinno uwzględniać obszary z występującymi zarysowaniami o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń lub obszary gdzie mogą pojawić się takie zarysowania.

(4) Wymagane parametry czujnika światłowodowego to:

- a) minimalna odkształcalność na poziomie $\pm 4\%$ (umożliwiająca pomiar zarysowań bez obawy o uszkodzenie czujnika),
- b) rozdzielczość pomiaru odkształceń: $1\ \mu\epsilon$,
- (5) minimalna długość pomiarowa czujnika umożliwiająca pomiar pod obciążeniem dynamicznym: 100 m,
- c) niski moduł sprężystości (rzędu 3 GPa) zapewniający łatwość instalacji (niewielki promień gięcia) i brak wpływu czujnika na monitorowaną konstrukcję,
- d) monolityczny przekrój poprzeczny (tj. brak pośrednich warstw wewnątrz czujnika powodujących zjawisko poślizgu i zaburzania pomiarów),
- e) minimalna liczba światłowodów do pomiaru odkształceń w czujniku zalecana z uwagi na bezpieczeństwo pomiarów (redundancja): 2,

- f) zaleca się umieszczenie w czujniku min 1 światłowodu typu multimode dedykowanego do pomiaru temperatury
- g) odporność na korozję (kompozytowy rdzeń czujnika),
- h) powierzchnia zewnętrzna umożliwiająca dobre zespolenie czujnika z otaczającym go betonem (np. dwukierunkowy oplot),
- i) możliwość dostarczenia na plac budowy dowolnych długości czujników zwiniętych w kręgi.

(6) Okresowe odczyty powinny być wykonywane za pomocą rejestratorów optycznych wykorzystujących zjawisko rozpraszania Rayleigha. Rejestratory te zapewniają:

- a) pomiary geometrycznie ciągłe na całej długości czujnika,
- b) dokładność pomiaru odkształceń: $\pm 1 \mu\epsilon$,
- c) rozdzielczość pomiaru odkształceń: $0.1 \mu\epsilon$,
- d) zakres pomiaru odkształceń: $\pm 15\,000 \mu\epsilon$
- e) możliwość wykonywania pomiarów dynamicznych z częstotliwością do 250 Hz.

7. Monitoring okresowy, obligatoryjny zarysowań; zalecany metodą emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca

(1) W przypadku obiektów nowych, w których przed lub w czasie próbnego obciążenia odbiorczego stwierdzono zarysowania, (o rozwartości $\geq 0,3$ mm) w elementach z betonu zbrojonego oraz (o rozwartości $\geq 0,1$ mm) w elementach z betonu sprężonego, konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, obligatoryjny jest monitoring rozszerzony okresowy propagacji zarysowań. Zalecane jest zastosowanie metody emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca.

(2) W przypadku obiektów eksploatowanych, w których stwierdzono zarysowania, (o rozwartości $\geq 0,3$ mm) w elementach z betonu zbrojonego oraz (o rozwartości $\geq 0,1$ mm) w elementach z betonu sprężonego, w elementach betonowej konstrukcji nośnej o charakterze wskazującym na efekt oddziaływań występujących obciążeń, obligatoryjny jest monitoring rozszerzony okresowy propagacji zarysowań. Zalecane jest zastosowanie metody emisji akustycznej z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych i rozpoznawaniem wzorca.

(3) Czujniki emisji akustycznej powinny być umieszczone możliwie najbliżej miejsca generowania sygnału akustycznego – miejsca uszkodzeń.

(4) W przypadkach przedstawionych w (1) i (2) dopuszczalne jest zastosowanie zamiast emisji akustycznej innej metody wykrywania propagacji zarysowań w elementach betonowych, pod warunkiem zapewniania możliwości detekcji rys w całej objętości badanego elementu a nie tylko na jego powierzchni oraz uzyskania pozytywnej opinii ekspertów z zakresu nieniszczących badań betonu.

(5) Szczegółowa instrukcja prowadzenia okresowego monitoringu znajduje się w dokumencie *Procedura badania metodą emisji akustycznej sprężonych oraz ciągowych drogowych obiektów inżynierskich*.

8. Monitoring rozszerzony ciągły i automatyczny

8.1 Zasady ogólne

(1) Monitoring ciągły i automatyczny powinien być prowadzony tylko w wyjątkowych przypadkach. Te przypadki to konieczność prowadzenia ciągłej obserwacji zachowania się konstrukcji pod codziennym obciążeniem eksploatacyjnym lub oddziaływaniem czynników atmosferycznych.

(2) Na etapie projektowania monitoringu ciągłego należy jednoznacznie określić rodzaj obciążeń, których oddziaływania będą monitorowane – statyczne lub dynamiczne [14]:

- a) obciążenia statyczne zdeterminowane to obciążenia mechaniczne - ciężar własny, siły sprężające, pojazdy specjalne;
- b) obciążenia statyczne losowe to oddziaływania niemechaniczne - wpływy temperatury, zmian wilgotności, reologii materiałów czy posadowienia;
- c) obciążenia dynamiczne zdeterminowane to obciążenia mechaniczne – pojazdy specjalne, wzbudniki drgań;
- d) obciążenia dynamiczne losowe to obciążenia mechaniczne – obciążenia użytkowe;
- e) obciążenia dynamiczne losowe to oddziaływania niemechaniczne - oddziaływania aerodynamiczne wiatru i maszyn ruchy podłoża.

(3) Na etapie projektowania monitoringu należy uwzględnić występujące oddziaływania i związane z nimi niepewności związane z zachowaniem konstrukcji oraz ryzyka zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji mostowej lub jej użytkowników [10].

(4) Szczegóły związane z projektowaniem i eksploatacją systemów monitoringu oraz szeroki przegląd stosowanych czujników można znaleźć w monografiach [10,14]. Zalecane w niniejszych wymaganiach czujniki pomiarowe oraz metody prezentacji i analizy sygnałów są to metody zwalidowane, potwierdzone pozytywnymi wynikami badań członków konsorcjum projektu DiagSC lub licznymi publikacjami w literaturze krajowej lub światowej.

(5) W przyszłości, w przypadku walidacji nowych metod badawczych i czujników metody te mogą być wprowadzane do zastosowania w systemach monitoringu ciągłego.

8.2 Dobór czujników do monitoringu do zmian pod obciążeniem statycznym i dynamicznym

8.2.1 Pomiary przemieszczeń liniowych

(1) Pomiary przemieszczenia liniowego mogą dotyczyć przemieszczeń pionowych przęseł, osiadania podpór, przemieszczeń poziomych dźwigarów przy łożyskach; zmian szerokości szczelin dylatacyjnych.

(2) Ze względu na trudności w realizacji nie zaleca się prowadzenia w sposób ciągły i automatyczny monitoringu przemieszczeń pionowych przęseł i osiadania podpór. Zaleca się prowadzenie tych pomiarów w ramach okresowego monitoringu geodezyjnego z wykorzystaniem tachimetru do pomiaru statycznych przemieszczeń przęseł i podpór w nurcie rzeki oraz niwelacji precyzyjnej do pomiaru osiadania pozostałych podpór.

(3) W przypadku konieczności prowadzenia monitoringu statycznych lub dynamicznych przemieszczeń pionowych przęseł możliwy jest pomiar metodą pośrednią z wykorzystaniem inklinometrów umożliwiających pomiar pod obciążeniem statycznym lub dynamicznym.

(4) Pomiar przemieszczeń względnych takich jak przemieszczeń poziomych dźwigarów przy łożyskach czy zmian szerokości szczelin dylatacyjnych jest możliwy do realizacji w sposób ciągły i automatyczny. Rekomendowany jest pomiar przemieszczeń statycznych z wykorzystaniem czujników strunowych które zapewniają stabilność pomiarową w bardzo długim okresie czasu.

(5) Zalecane parametry czujników strunowych przemieszczeń:

- a) zakres pomiarowy: do 150÷200% spodziewanych przemieszczeń,
- b) dokładność pomiaru: $\pm 0,1\%$ zakresu pomiarowego,
- c) nieliniowość pomiaru: $< 0,5\%$ zakresu pomiarowego,
- d) rozdzielczość: 0,025% zakresu pomiarowego,
- e) temperatura pracy: -20 do +60°C.

8.2.2 Pomiary kątów obrotu

(1) Pomiary kątów obrotu mogą dotyczyć dźwigarów przy podporach lub szczytów pylonu. Rekomendowany jest pomiar statycznych tych kątów obrotu z wykorzystaniem czujników strunowych.

(2) Zalecane parametry czujników strunowych kątów obrotu:

- a) zakres pomiarowy: do $150 \div 200\%$ spodziewanych kątów obrotu,
- b) powtarzalność pomiaru: min. $0,001^\circ$,
- c) nieliniowość: 2% zakresu pomiarowego,
- d) rozdzielczość: min. 0.001° ,
- e) temperatura pracy: -20 do $+60^\circ\text{C}$.

8.2.3 Pomiary odkształcenia elementów konstrukcji nośnej

(1) Pomiary odkształcenia elementów konstrukcji nośnej mogą dotyczyć pomiarów na dźwigarach w przekrojach przęsłowych oraz podporowych przy przęsłach ciągłych, na dole pylonów, na poprzecznicach czy innych elementach konstrukcyjnych. Rekomendowany jest pomiar dynamiczny lub statyczny z wykorzystaniem czujników strunowych.

(2) Zalecane parametry czujników strunowych odkształcenia:

- a) zakres pomiarowy: $3\,000\ \mu\epsilon$,
- b) dokładność pomiaru: $\pm 0,5\%$ zakresu pomiarowego,
- c) nieliniowość pomiaru: $< 0,5\%$ zakresu pomiarowego,
- d) rozdzielczość: minimum $1\ \mu\epsilon$,
- e) częstotliwość próbkowania min $100\ \text{Hz}$ przy pomiarach dynamicznych;
- f) baza pomiarowa: od 50 do $150\ \text{mm}$,
- g) temperatura pracy: -20 do $+60^\circ\text{C}$.

8.2.4 Pomiary zmian rozwartości zarysowań i pęknięć

(1) Pomiary zmian rozwartości zarysowań i pęknięć mogą dotyczyć „punktowego” pomiaru wykrytych zarysowań. Rekomendowane jest stosowanie strunowych czujników przemieszczeń o małym zakresie pomiarowym:

- a) zakres pomiarowy: $\pm 2\ \text{mm}$,
- b) dokładność pomiaru: $\pm 0,1\%$ zakresu pomiarowego,
- c) nieliniowość pomiaru: $< 0,5\%$ zakresu pomiarowego,
- d) rozdzielczość: $0,025\%$ zakresu pomiarowego,
- e) temperatura pracy: -20 do $+60^\circ\text{C}$.

8.2.5 Pomiary przyspieszeń drgań

(1) Pomiary przyspieszeń drgań mogą dotyczyć pomiarów drgań pomostu, dźwigarów, ciągów podwieszających czy zewnętrznych kabli sprężających, szczytu pylonów lub łuku.

(2) Pomiar przyspieszeń drgań w przypadku pomostu i dźwigarów powinny być prowadzone w kierunku pionowym i w razie potrzeby poziomym poprzecznym do osi konstrukcji,

(3) W przypadku pomiaru drgań ciągów w celu wykrycia pierwszych postaci drgań własnych wskazany jest montaż czujnika w $1/3$ długości cięgna. Rekomendowane jest zastosowanie czujników dwukierunkowych lub układu dwóch prostokątnych względem siebie czujników jednoosiowych mierzących drgania w dwóch kierunkach poprzecznych do osi cięgna i leżących w płaszczyźnie sąsiednich cięgów i prostokątnie do niej.

(4) W przypadku drgań szczytów pylonu lub łuków pomiar powinien dotyczyć drgań poziomych w dwóch kierunkach - wzdłuż i w poprzek konstrukcji mostowej.

(5) Rekomendowany jest pomiar dynamiczny z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych o parametrach:

- a) zakres pomiarowy: $\pm 2g$ ($\approx \pm 20 \text{ m/s}^2$),
- b) minimalny wymagany zakres częstotliwości: od min 0,5 Hz do max 200 Hz,
- c) czułość: 1 000 mV/g,
- d) temperatura pracy: -0 do +80°C.

(6) W przypadku konieczności prowadzenia monitoringu zerwania zewnętrznych kabli sprężających dopuszczalny jest pomiar drgań zero/jedynkowy – sygnał alarmowy wystąpi w momencie zerwania kabla.

8.2.6 Pomiary temperatury powietrza i elementów konstrukcji oraz prędkości i kierunku wiatru.

(1) Monitoring temperatury powinien obejmować temperaturę powietrza oraz kilku punktów konstrukcji związanych z różnym stopniem oddziaływania promieni słonecznych. W szczególnym przypadku dotyczy to również szczytu pylonów lub łuków.

(2) Monitoring prędkości i kierunku wiatru powinien być prowadzony szczególnie w przypadku konstrukcji podwieszonych. W szczególnym przypadku powinien być prowadzony na szczycie pylonów lub łuków.

8.3 Monitoring wideo ruchu pojazdów

(1) Kamera ma umożliwiać rejestrację pojazdów przejeżdżających przez monitorowaną obiekt w porze dziennej oraz w porze nocnej. Jedna kamera lub dwie kamery (w przypadku pasów ruchu w dwóch kierunkach) powinny być usytuowane od strony wjazdu pojazdów na obiekt.

(2) Wymagania minimalne kamery:

- a) tryby pracy: dzień/noc;
- b) przetwornik: 1 x 1.8 ", 8MP Progressive Scan CMOS;
- c) rozdzielczość: 3840×2160;
- d) pole widzenia przy ogniskowej 2,8 mm: horizontal FOV 58°vertical FOV 108° ;
- e) autofocus;
- f) funkcje poprawiające jakość obrazu: AWB, AGC, BLC, HLC, 3D DNR, WDR 120dB, ROI;
- g) promiennik podczerwieni;
- h) Warunki pracy -30 ÷ +60 °C Wilgotność 95% lub mniejsza (bez kondensacji).

(3) Przy dobrych warunkach oświetleniowych i kątowych (związanych z prędkością przejazdu) projektowany system może zapewnić „ręczne” odczytanie numerów tablic rejestracyjnych.

8.4 Wizualizacja i wstępna analiza wyników monitoringu ciągłego

(1) Wizualizacja wyników monitoringu ciągłego powinna umożliwiać analizę wszystkich rejestrowanych przebiegów statycznych jak i części (wywołującej ekstremalne skutki) rejestrowanych przebiegów dynamicznych.

(2) Wartości średnie z chwilowych pomiarów statycznych powinny być przesyłane na serwer co 15 lub 60 minut.

(3) Wartości średnie z pomiarów dynamicznych powinny być wyznaczane w celu odfiltrowania efektów dynamicznych. Wartości średnie z pomiarów dynamicznych powinny być przesyłane na serwer i dalej analizowane jak wszystkie dane z pomiarów statycznych (pomiar co 15 lub 60 minut).

(4) W celu minimalizacji transmisji danych automatyczna analiza wyników monitoringu powinna być prowadzona w dwóch etapach:

- a) Etap 1 - na komputerze zainstalowanym na obiekcie,
- b) Etap 2 – na serwerze zdalnym.

(5) W etapie 1 w przypadku pomiarów dynamicznych odkształceń i przemieszczeń lokalna analiza powinna być prowadzona poprzez przetwarzanie sygnałów próbkowanych z częstotliwością 100 Hz. Należy wyznaczyć i przysyłać na serwer wartości ekstremalne i średnie co 1s (wariant pożądaný). Dodatkowo powinna być zapewniona transmisja kilku (dziennie) wybranych przebiegów z ekstremalnymi wartościami o czasie trwania ok. 30÷60 s.

(6) W przypadku pomiarów przyspieszeń drgań (sygnałów próbkowanych z częstotliwością 100 Hz) powinna być prowadzona analiza widmowa (w celu wizualizacji na serwerze wyznaczonych wartości częstotliwości drgań) oraz amplitudowa (z transmisją wartości ekstremalnych z określonych przedziałów czasu) z nastawnym zdalnie filtrem dolnoprzepustowym (ok. 3-5 Hz) i powinny być przesyłane kilka (dziennie) wybrane przebiegi z ekstremalnymi wartościami o czasie trwania ok. 30÷60 s.

(7) W etapie 2 analiza zdalna powinna umożliwić wizualizację wyników pomiarów statycznych i dynamicznych w postaci wykresów i wartości cyfrowych. W przypadku pomiarów dynamicznych odkształceń i przyspieszeń konieczne jest zapewnienie możliwości „ręcznej” korelacji zarejestrowanych (co 1 s) wartości ekstremalnych z konkretnymi zdjęciami przesłanymi z kamery. W przypadku wszystkich pomiarów statycznych powinna być możliwość wyświetlania wykresów z różnych wybranych okresów: 24 h, 7 dni, miesiąc, rok.

(8) Monitoring video ruchu pojazdów powinien umożliwić prowadzenie „orientacyjnej” kontroli obciążenia poprzez rejestrację obrazu z kamery video. Obraz z kamery powinien być rejestrowany z częstotliwością 60 klatek na minutę. Powinna być zapewniona możliwość zdalnego ręcznego przeglądania po czasie rejestrowanych zdjęć w celu ich korelacji z wynikami pomiarów dynamicznych odkształceń, przemieszczeń lub przyspieszeń drgań. Nie jest wymagana dokładność zdjęć umożliwiająca automatyczny odczyt numerów tablic rejestracyjnych.

(9) W przypadku dostępu do przepustowości dopuszczalna jest transmisja nieprzetworzonych zarejestrowanych danych na zdalny serwer i prowadzenie analizy danych w Etapie 1 i 2 na serwerze.

(10) Wizualizacja wyników monitoringu powinna być możliwa z wykorzystaniem przeglądarki Internetowej typu: Google Chrome, Microsoft Edge lub Firefox. Ewentualnie dopuszczalna jest analiza z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania opracowanego przez Wykonawcę systemu monitoringu do zainstalowania w systemie Microsoft Windows 10 lub nowszym; z licencją bezpłatnego wykorzystywania przez GDDKiA.

9. Model numeryczny konstrukcji

9.1 Zasady ogólne

(1) Model numeryczny i obliczeniowy konstrukcji mostowej w fazie projektowania stanowią [4]:

- a) Model geometrii – określający sposób odwzorowania w modelu obliczeniowym geometrii projektowanej konstrukcji;

- b) Model obciążeń i warunków brzegowych – opisujący sposób numerycznego przedstawienia normowych obciążeń konstrukcji i sposobu jej podparcia;
- c) Model materiału – definiujący sposób numerycznego opisu normowych cech opisu materiału konstrukcyjnego.

Model ten jest podstawą do zaprojektowania i analizy wyników próbnego obciążenia odbiorczego. Model ten powinien być potwierdzony lub skalibrowany na podstawie wyników próbnego obciążenia odbiorczego.

(2) Do analizowania konstrukcji w trakcie jej eksploatacji niezbędne jest najczęściej uwzględnienie dodatkowego składnika – modelu uszkodzeń opisującego numerycznie uszkodzenia obiektu [4]. W tym celu wymagane jest dostosowanie parametrów tego modelu na podstawie przeglądów i ekspertyz oraz kalibrowany na podstawie wyników próbnego obciążenia diagnostycznego lub wyników monitoringu okresowego lub ciągłego.

(3) Niniejsze wymagania dotyczą analizy numerycznej obiektów mostowych przy użyciu oprogramowania metody elementów skończonych. Rekomendowane są obliczenia z wykorzystaniem modelu numerycznego w celu:

- a) oceny nośności i zapasów bezpieczeństwa nowych i eksploatowanych konstrukcji mostowych;
- b) pozyskania nowej wiedzy na skutek wpływu zmian konstrukcyjnych, działań naprawczych lub uszkodzeń powstałych na skutek zdarzeń drogowych lub czynników losowych;
- c) przewidywania zachowania konstrukcji w sytuacji ponadnormatywnego obciążenia lub wystąpienia szczególnych okoliczności mogących mieć wpływ na bezpieczne funkcjonowanie obiektu;
- d) oceny dynamicznej odpowiedzi konstrukcji na obciążenia zmienne w czasie;
- e) uzupełnienia badań odbiorczych oraz diagnostycznych i monitoringu.

(4) Etapy symulacji komputerowej. Proces symulacji komputerowej odpowiedzi obiektu mostowego lub jego fragmentu przeprowadza się w trzech etapach:

- a) etap I – opracowanie modelu numerycznego (ang. *preprocessing*) obejmującego: odwzorowanie uproszczonej geometrii obiektu, utworzenie siatki elementów skończonych, zdefiniowanie warunków brzegowych oraz przyjęcie modeli materiałowych i modeli obciążeń;
- b) etap II – przeprowadzenie obliczeń (ang. *solver*) przy użyciu oprogramowania MES w zakresie zdefiniowanego typu analizy (np. analiza statyczna, termiczna, dynamiczna);
- c) etap III – przetwarzania wyników obliczeń (ang. *postprocessing*) w celu ich wizualizacji i archiwizacji.

9.2 Model numeryczny

9.2.1 Geometria

(1) Geometrię obiektu mostowego lub jego fragmentu (np. przęsła, pylonu, cięgna) odwzorowuje się cyfrowo w modelu numerycznym uwzględniając jego cechy przestrzenne oraz wszystkie główne elementy konstrukcyjne.

(2) W przypadku szczegółowych analiz zaleca się uwzględnić drugorzędne elementy konstrukcyjne.

(3) Opcjonalnie, elementy drugorzędne zastępuje się równoważnymi masami skupionymi w węzłach modelu numerycznego, co prowadzi do redukcji nakładów obliczeniowych i zmniejszenia dokładności wyników.

(4) Elementy niekonstrukcyjne i elementy stanowiące wyposażenie obiektu mostowego zastępuje się równoważnymi masami skupionymi. Wyposażenie i elementy niekonstrukcyjne modelowanego obiektu (fragmentu) o znikomym udziale w masie całkowitej konstrukcji pomija się.

(5) Masy skupione w węzłach siatki można pominąć w liniowych zadaniach statyki, w których wyznacza się przyrosty deformacji (np. ugięć) lub przyrosty sił wewnętrznych wywołane zmianami obciążeń.

(6) Geometria może być zaimportowana do oprogramowania MES z innego oprogramowania typu CAD.

9.2.2 Elementy skończone i dyskretyzacja przestrzenna

(1) W modelowaniu obiektów inżynierskich za pomocą MES stosuje się:

- a) elementy jednowymiarowe typu e1 (kratowe, belkowe);
- b) elementy dwuwymiarowe typu e2 (elementy powłokowe);
- c) elementy trójwymiarowe typu e3 (elementy bryłowe).

W szczególnych przypadkach stosuje się elementy specjalne (np. element sztywny, sprężyna translacyjna lub sprężyna obrotowa).

(2) Pełną klasę modelowanej konstrukcji określa kombinacja typu zastosowanych elementów wraz z wymiarem przestrzeni. Podstawowe modele to:

- a) modele belkowe w przestrzeni jednowymiarowej (klasa e1,p1);
- b) modele rusztowo-belkowe w przestrzeni dwuwymiarowej (klasa e1,p2);
- c) ramowe w przestrzeni trójwymiarowej (klasa e1,p3);
- d) alternatywnie mogą być to modele: mieszane powłokowo-belkowe (klasy e1+e2,p3), powłokowe (klasy e2,p3) lub bryłowe (klasy e3,p3).

(3) Elementom skończonym przypisuje się właściwości fizyczne: materiał, przekrój poprzeczny (elementy kratowe, belkowe) lub grubość (elementy powłokowe).

9.2.3 Materiały

(1) Modele materiałowe wykorzystuje się do modelowania związków fizycznych (związków konstytutywnych) elementów konstrukcyjnych.

(2) W analizie liniowej (sprężystej) podstawowymi parametrami definiującymi model materiału są: gęstość, współczynnik sprężystości (moduł Younga) i współczynnik Poissona.

(3) W przypadkach wymagających szczególnych analiz przyjmuje się dodatkowe parametry np.: w analizach termicznych (współczynnik rozszerzalności cieplnej), dynamicznych (parametry tłumienia), postępującego zniszczenia lub kontaktu z pojazdem (parametry modelu materiału np. sprężysto-plastycznego).

9.2.4 Obciążenie i warunki brzegowe

(1) Odwzorowanie obciążenia modeluje rzeczywiste obciążenie obiektu mostowego, które przypisuje się do węzłów siatki elementów skończonych. Są to obciążenia:

- a) stałe: ciężar własny przęsła, ciężar elementów wyposażenia, sprężenie, osiadanie podpór, imperfekcje wykonawcze;
- b) zmienne: pionowe obciążenie ruchome, siły wywołane przyspieszaniem i hamowaniem pojazdów, parcie wiatrem, oddziaływania termiczne, efekty reologiczne, obciążenie pojazdem specjalnym.

(2) Do obliczeń numerycznych zaleca się wykorzystanie wybranego obciążenia, zależnie od celu analizy.

(3) Warunki brzegowe przypisuje się do węzłów siatki elementów skończonych, które określa się na podstawie dokumentacji technicznej lub wizji lokalnej.

(4) Model numeryczny może zawierać więzy kinematyczne lub zdefiniowane interakcje pomiędzy węzłami (elementy niekonstrukcyjne), połączenia sztywne lub masy skupione w celu odwzorowania właściwych mechanizmów pracy konstrukcji.

9.3 Analiza metodą elementów skończonych

(1) Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje analiz metodą elementów skończonych (MES):

- a) analizę statyczną, w której przyjmuje się niezmiennie w czasie obciążenie;
- b) analizę dynamiczną, w której przyjmuje się zmienne w czasie obciążenie, uwzględnia się jej bezwładność i tłumienie. Szczególnym przypadkiem jest analiza modalna, w której wyznacza się postaci i częstotliwości drgań własnych konstrukcji.

(2) Analizy numeryczne konstrukcji przeprowadza się w zakresie:

- a) liniowym, w którym obowiązuje zasada superpozycji i przyjmuje się:
 - liniowo-sprężysty model materiału (liniowość materiałowa, spełnia prawo Hooke'a);
 - obowiązuje zasada małych przemieszczeń (liniowość geometryczna);
 - brak zjawisk kontaktowych.
- b) nieliniowym, w którym uwzględnia się nieliniowości materiałowe i/lub geometryczne (np. zwis wanty), lub/i zjawiska kontaktowe (kontakt pojazdu z konstrukcją).

9.4 Kalibracja modelu numerycznego

(1) Przed przeprowadzeniem właściwych obliczeń wymaga się kalibracji modelu numerycznego. Kalibrację modelu numerycznego przeprowadza się dwuetapowo:

- a) etap I: kalibracja statyczna – polega na określeniu nieznanymi parametrów modelu opisujących jego sztywność poprzez minimalizację rozbieżności między zmierzonymi a obliczonymi ugięciami w co najmniej jednym reprezentatywnym punkcie obiektu, uzyskanymi w wyniku tego samego obciążenia;
- b) etap II: kalibracja dynamiczna – polega na uzyskaniu zgodności wyników analizy modalnej z wynikami pomiarów.

(2) W kalibracji statycznej i dynamicznej dopuszcza się stosowanie miar odpowiedzi konstrukcji na obciążenie innych niż ugięcie.

(3) W kalibracji statycznej i dynamicznej reprezentatywne punkty pomiarowe powinny znajdować się w strefach ekstremalnych odpowiedzi konstrukcji.

(4) W przypadku analiz dynamicznych rekomenduje się w pierwszej kolejności przeprowadzenie kalibracji statycznej, a następnie dynamicznej.

(5) W przypadku konstrukcji wiotkich o znacznych przemieszczeniach, pod wpływem obciążeń dynamicznych, może być konieczna dodatkowa kalibracja z wykorzystaniem wyników z czujników przemieszczeń pionowych lub przyspieszeń drgań przęseł.

9.5 Uwagi końcowe

(1) Wymagania stanowią ogólne zasady modelowania numerycznego konstrukcji metodą elementów skończonych z uwzględnieniem obiektów ciągnowych w zakresie liniowych i nieliniowych analiz.

(2) Analizy numeryczne przeprowadza się w celu uzupełnienia badań eksperymentalnych, symulacji hipotetycznych scenariuszy obciążeń oraz przeprowadzenia analiz powypadkowych.

(3) Jakość wyników uzyskanych z modelu numerycznego zależy od gęstości i jakości siatki elementów skończonych; nadmierna liczba elementów wymaga dużej mocy obliczeniowej, a zbyt mała prowadzi do niedokładnych wyników obliczeń.

(4) Wymagania tworzenia modeli numerycznych i przeprowadzania analiz sformułowano niezależnie od oprogramowania MES i CAD, a sposób wprowadzania danych i ich struktura może się znacząco różnić w zależności od twórcy lub producenta oprogramowania.

(5) Do załączanych przez Wykonawców projektów i/lub wyników analiz numerycznych zaleca się dołączanie informacji istotnych do modelowania numerycznego konstrukcji w otwartym formacie (np. STEP). Format STEP (z rozszerzeniem .stp lub .step), zawiera informacje o geometrii konstrukcji, a ponadto:

- jest niezależny od jakiegokolwiek konkretnego dostawcy oprogramowania lub systemu operacyjnego,
- zachowuje wysoką precyzję i dokładność odwzorowania geometrii,
- umożliwia przenoszenie metadanych (dodatkowych informacji o elementach modelu takich jak materiały czy właściwości fizyczne),
- nadaje się do archiwizacji danych projektowych.

Należy mieć na uwadze, że zapis w formacie innym niż natywny wymaga większej ilości miejsca na dysku, a dane specyficzne dla danego oprogramowania mogą zostać niepoprawnie przeniesione.

(6) Zastosowanie formatów otwartych powinno zmniejszyć czas i koszty realizacji przyszłych analiz numerycznych w czasie eksploatacji obiektu

Bibliografia

- [1] Angst U., Büchler M.: State-of-the-Practice Report: Monitorable Post-Tensioning Systems. Federal Highway Administration, USA 2021;
- [2] Azizinamini A., Gull J.: Improved Inspection Techniques for Steel Prestressing/Post Tensioning Strand : [Summary]. Florida International University, USA 2012;
- [3] Bednarski Ł., Sieńko R., Howiacki T., Zuziak K.: The Smart Nervous System for Cracked Concrete Structures: Theory, Design, Research, and Field Proof of Monolithic DFOS-Based Sensors. *Sensors*, 2022; 22: 8713;
- [4] Bień, Jan: Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji. . Oficyna Wydawnicza P.Wr., Wrocław, 2002;
- [5] Caetano E.: On the identification of cable force from vibration measurements. IABSE-IASS Symposium, London, 2011; ;
- [6] Di Mucci V.M., Cardellicchio A., Ruggieri S., Nettis A., Renò V., Uva G.: Artificial intelligence in structural health management of existing bridges. *Automation in Construction*, 2024; 167: 105719;
- [7] Filipek R.: Nowa, nieniszcząca metoda diagnostyki procesów korozyjnych na konstrukcjach żelbetowych. *CORROSION PROTECTION*, 2017; 1: 5–9;
- [8] Gentile C.: Deflection measurement on vibrating stay cables by non-contact microwave interferometer. *NDT & E International*, 2010; 43: 231–240;
- [9] Gentile, Carmelo, Cabboi, Alessandro: Vibration-based structural health monitoring of stay cables by microwave remote sensing. *Smart Structures and Systems*, 2015; 16: 263–280;
- [10] Hildebrand M.: Projektowanie i eksploatacja systemów monitorowania obiektów mostowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2024;
- [11] Hurlebaus S., Hueste M.B.D., Karthik M.M., Terzioglu T.: Inspection guidelines for bridge post-tensioning and stay cable systems using NDE methods. 2017;
- [12] Jarominiak A.: Nieniszczące metody kontroli stanu kabli mostów kablobetonowych i podwieszonych. *Drogownictwo*, 2019; ;
- [13] Krzysztof Żółtowski, Mikołaj Binczyk, Przemysław Kalitowski: Identyfikacja własności dynamicznych cięgien jako element diagnostyki wybranych konstrukcji mostowych. 2018; ;
- [14] Kużawa M.: Monitoring sensoryczny obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2022;
- [15] Luo L., Feng M.Q., Wu Z.Y.: Robust vision sensor for multi-point displacement monitoring of bridges in the field. *Engineering Structures*, 2018; 163: 255–266;
- [16] Olaszek, P.: Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. *Measurement*, 1999; 25: 227–236;

- [17] Panigati T., Zini M., Striccoli D., Giordano P.F., Tonelli D., Limongelli M.P., Zonta D.: Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. *Automation in Construction*, 2025; 173: 106101;
- [18] Piątek B.: Monitoring światłowodowy DFOS w konstrukcjach kablobetonowych. *Drogownictwo*, 2023; 43–53;
- [19] Prószyński W., Kwaśniak M.: Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń: pojęcia i elementy metodyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006;
- [20] Schumacher T.: Imaging and Image Fusion Using GPR and Ultrasonic Array Data to Support Structural Evaluations: A Case Study of a Prestressed Concrete Bridge. *NDT*, 2024; 2: 363–377;
- [21] Tomaszewicz K., Owerko T.: Application of open deep learning datasets for building vision-based bridge condition monitoring solutions. W: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability*. red.: CRC Press, London 2024, 1496–1503;
- [22] Winkler J., Bormlund F., Havellykke M.D.: Improved structural health monitoring of great belt bridge hangers and deck using digital image correlation. W: *Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability*. red.: CRC Press, London 2022, 1753–1758;
- [23] Winkler J., McKay N., Hendy C.: Improved structural assessment of Newport Bridge using smartphone-based technologies. W: *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability*. red.: CRC Press, London 2024, 3035–3040;
- [24] Wojtas M.: Przydatność danych geodezyjnych na terenach górniczych do celów projektowych. *Acta Scientiarum Polonorum. Geodesia et Descriptio Terrarum*, 2010; Vol. 9: 39–50;
- [25] Zhang F., Zarate Garnica G.I., Yang Y., Lantsoght E., Sliedrecht H.: Monitoring Shear Behavior of Prestressed Concrete Bridge Girders Using Acoustic Emission and Digital Image Correlation. *Sensors*, 2020; 20: 5622;