

Dr inż. **Mieszko Kużawa**
Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk
wyb. St. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Załącznik 3

AUTOREFERAT

Wrocław, maj 2023 r.

SPIS TREŚCI

1. IMIĘ I NAZWISKO	4
2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE	4
3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	4
4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŻN. ZM.)	5
4.1. Tematyka działalności naukowo-badawczej i sformułowanie osiągnięć	5
4.2. Główne osiągnięcie naukowe	7
4.2.1. Sformułowanie osiągnięcia	7
4.2.2. Wprowadzenie	7
4.2.3. Cel naukowy i zakres osiągnięcia	9
4.2.4. Systemy monitoringu sensorycznego obiektów mostowych (rozdział 2 monografii [1])	10
4.2.5. Analizy teoretyczne MES w monitorowaniu obiektów mostowych (rozdział 3 monografii [1])	11
4.2.6. Badania doświadczalne pod obciążeniami w monitorowaniu obiektów mostowych (rozdział 4 monografii)	12
4.2.7. Techniki i czujniki pomiarowe w monitoringu obiektów mostowych (rozdział 5 monografii [1])	14
4.2.8. Rejestracja, przetwarzanie i weryfikacja danych pomiarowych (rozdział 6 monografii [1])	16
4.2.9. Metodyka i etapy monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych (rozdział 7 monografii [1])	18
4.2.10. Długoterminowe badania monitorujące na przykładzie mostu sprzężonego z zarysowaniami przęseł (rozdział 8 monografii [1])	23
4.2.11. Krótkoterminowe badania monitorujące na przykładzie mostu o konstrukcji zespolonej, z trwałymi deformacjami przęseł (rozdział 9 monografii [1])	26
4.2.12. Podsumowanie i kierunki dalszych badań (rozdział 10 monografii)	29
4.3. Osiągnięcie projektowo-technologiczne	31
4.3.1. Sformułowanie osiągnięcia	31
4.3.2. Główne cele, założenia i etapy prac	31
4.3.3. Układ pomiarowy zainstalowany na obiekcie	33
4.3.4. Prace laboratoryjne i montaż systemu na obiekcie	35
4.3.5. Wartości progowe i sposób prezentacji wyników	37
4.3.6. Wybrane wyniki pomiarów	42
4.3.7. Podsumowanie prac	46
4.4. Dodatkowe osiągnięcie naukowe	47
4.4.1. Sformułowanie osiągnięcia	47
4.4.2. Wprowadzenie	48
4.4.3. Cel naukowy osiągnięcia	49
4.4.4. Ogólna procedura diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami z wykorzystaniem wyników badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne	50
4.4.5. Wyszczególnienie wkładu wnioskodawcy w opracowane rozwiązania	52
4.5. Podsumowanie	55

5. INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI LUB INSTYTUCJI NAUKOWEJ.....	56
6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ	58
6.1. Osiągnięcia dydaktyczne.....	58
6.2. Osiągnięcia organizacyjne	59
6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę.....	59
7. INNE INFORMACJE DOTYCZĄCE PRACY ZAWODOWEJ	60
8. BIBLIOGRAFIA.....	61

1. IMIĘ I NAZWISKO

Mieszko Kużawa

2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

- 1) **Tytuł zawodowy magistra inżyniera** w zakresie inżynierii lądowej uzyskany w dn. 22 października 2008 r. na Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego; kierunek studiów: budownictwo, specjalność: inżynieria mostowa.
- 2) **Stopień naukowy doktora** w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej: budownictwo, nadany uchwałą Rady Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej w dn. 6 listopada 2013 r. na podstawie obronionej (z wyróżnieniem) rozprawy doktorskiej *Nosność graniczna przy ścinaniu blachownicowych dźwigarów mostowych z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń*.
Promotor w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. inż. Jan Bień.
Recenzenci w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. Jan Biliszczuk, prof. dr hab. inż. Henryk Zobel.

3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

- 1) Od 9.07.2009 do 30.11.2009 r. – Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej; forma zatrudnienia: umowa o pracę na czas określony w wymiarze 1/2 etatu na stanowisku starszego referenta administracyjnego do przygotowania i przeprowadzenia Międzynarodowej Konferencji EVACES 2009 (ang. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*).
- 2) Od 31.03.2010 do 30.09.2012 r. – Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej; forma zatrudnienia: umowa o pracę na czas określony w wymiarze 1/2 etatu na stanowisku asystenta do realizacji projektu *Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju*, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013.
- 3) Od 1.10.2012 do 30.09.2014 r. – Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej; forma zatrudnienia: umowa o pracę na czas nieokreślony w wymiarze 1/1 etatu na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego.
- 4) Od 1.10.2014 r. do chwili obecnej – Instytut Inżynierii Lądowej (do 31.12.2014 r.), Katedra Mostów i Kolei (od 1.01.2015 do 31.12.2020 r.) oraz Katedra Dróg Mostów Kolei i Lotnisk (od 1.01.2021 r.), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej; forma zatrudnienia: umowa o pracę na czas nieokreślony w wymiarze 1/1 etatu na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego.

4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŻN. ZM.)

4.1. Tematyka działalności naukowo-badawczej i sformułowanie osiągnięć

Tematyka mojej działalności naukowo-badawczej dotyczy diagnostyki i oceny stanu eksploatowanych obiektów mostowych, wykazujących istotne uszkodzenia mające wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji i ich użytkowników, a także w zakresie trwałości.

W okresie dotychczasowej pracy na Politechnice Wrocławskiej (od 2009 r.) można wyróżnić następujące obszary mojej działalności (naukowo-badawczej, wdrożeniowo-usługowej oraz organizacyjnej; szczegółowe zestawienie w załączniku 4):

- Udział w opracowywaniu publikacji, a także samodzielne przygotowanie artykułów do krajowych i międzynarodowych czasopism naukowych, a także recenzowanych materiałów konferencyjnych. Autor lub współautor 50 publikacji, w tym: 5 z Impact Factor, 8 umieszczonych na liście filadelfijskiej, 20 indeksowanych w Web od Science. Sumaryczny Impact Factor publikacji: 15,885.
- Udział w pozyskiwaniu i realizacji krajowych i międzynarodowych projektów naukowo-badawczych (łącznie 8 projektów, w tym 5 indywidualnych grantów, szczegółowe zestawienie w załączniku 4, pkt II.9 i II.15). W szczególności bardzo aktywny udział w 2 dużych projektach naukowo-badawczych:
 - krajowym *Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju* w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (w latach 2010-2014) oraz
 - międzynarodowym *Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level*, COST TU1406 w latach 2015–2019.
- Udział w opracowaniu, a w późniejszym okresie (od około 2015 r.) również nadzór nad realizacją prac naukowo-badawczych oraz prac wdrożeniowo-usługowych na potrzeby przemysłu:
 - 40 raportów z prac naukowo-badawczych (raporty SPR zestawione w załączniku 4, pkt II.4.1c, II.4.2.c, III.5),
 - 63 raporty z prac wdrożeniowo-usługowych (raporty U zestawione w załączniku 4, pkt III.5).
- Aktywność naukowa w krajowych i międzynarodowych instytucjach naukowych:
 - Polska Akademia Nauk Oddział we Wrocławiu, członek Komisji Budownictwa i Mechaniki (kadencja 2023-2026);
 - International Federation for Structural Concrete *fib*, członek sekcji “Commission3: Existing concrete structures, TG3.3 - Life Management, Testing and Structural Health Monitoring” (od 2019/2020);
 - International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, członek sekcji “Task Group 5.3: Gerontology of Bridge Structures” (od 2020).
- Zaangażowanie w prace naukowe krajowych zespołów eksperckich opracowujących wytyczne i zalecenia dotyczące diagnostyki i oceny obiektów mostowych:
 - zespołu eksperckiego opracowującego wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra Infrastruktury w zakresie wytycznych określania nośności drogowych obiektów mostowych (WR-M-82);

- zespołu eksperckiego Politechniki Wrocławskiej ds. wpływu szkód górniczych na drogę S3, działającego dla KGHM Polska Miedź S.A.
- Organizacja współpracy Zespołu Mostów Politechniki Wrocławskiej z przemysłem i pozyskiwanie zleceń na prace naukowo-badawcze oraz ich realizacja.
- Inicjator, aktywny organizator Pracowni Monitoringu Konstrukcji Inżynierskich, która jest częścią Laboratorium Badań Nano- i Mikrostruktur Materiałów Kompozytowych i Konstrukcji Inżynierskich i ma siedzibę w centrum badawczym GEO-3EM Politechniki Wrocławskiej. Pracownia – pod kierunkiem wnioskodawcy – realizuje projekty naukowe oraz prace eksperckie dla sektora gospodarczego.
- Duża aktywność jako recenzenta artykułów publikowanych w międzynarodowych czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports oraz w czasopismach o zasięgu krajowym. Łącznie 14 recenzji manuskryptów do czasopism o zasięgu międzynarodowym.

Moja działalność naukowo-badawcza dotyczy następujących zagadnień:

- zmęczenia i stateczności stalowych konstrukcji mostowych,
- badań zachowania się obiektów mostowych pod obciążeniami, w szczególności w warunkach eksploatacyjnych,
- monitorowania procesów degradacji i zmian kondycji obiektów mostowych,
- szeroko rozumianej diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami, w tym oceny ich nośności z zastosowaniem metod komputerowych w zakresie modelowania i analizy.

W okresie studiów doktoranckich (lata 2009–2013) moja działalność naukowo-badawcza – związana z przygotowaniem rozprawy doktorskiej – dotyczyła zaawansowanego modelowania i analiz MES stalowych konstrukcji mostowych z uszkodzeniami, głównie w zakresie oceny nośności tych obiektów z uwzględnieniem zagadnień niestateczności. Pracę doktorską *Nośność graniczna przy ścinaniu blachownicowych dźwigarów mostowych z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń* opracowaną pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Jana Bienia obroniłem z wyróżnieniem w dn. 6 listopada 2013 r.

Od 2015 r. prowadzę prace badawczo-rozwojowe związane z szeroko rozumianą diagnostyką konstrukcji mostowych z uszkodzeniami, z wykorzystaniem wyników badań odpowiedzi konstrukcji na obciążenia i oddziaływania. Prace te dotyczą głównie:

- opracowania procedur diagnostycznych obiektów mostowych z wykorzystaniem wyników zarówno doraźnych, jak i monitorujących badań zachowania się obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych;
- zastosowań systemów monitoringu sensorycznego (ang. *structural monitoring systems*) w diagnostyce i ocenie stanu konstrukcji mostowych.

Przeprowadziłem badania doświadczalne 21 obiektów mostowych w warunkach normalnej eksploatacji, z uwzględnieniem obiektów o znaczeniu historycznym i o największych w kraju rozpiętościach przęsł (np. Most Rędziański we Wrocławiu, most przez Wisłę w Puławach, most przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu, most przez Wartę w ciągu autostrady A2, mosty przez Narwę w Ostrołęce, Most Brama Przemyska przez San, Most Wyszehradzki przez Weltawę w Pradze).

Moje istotne osiągnięcia naukowe w zakresie diagnostyki i oceny stanu obiektów mostowych, przedstawione do oceny w świetle wymagań art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy o p. o s. w. i n. oraz stanowiące jednocześnie mój indywidualny, oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport w Polsce formułuję następująco:

- Główne osiągnięcie naukowe (opis w pkt 4.2):

Opracowanie kompleksowej metodyki monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych za pomocą elektronicznych systemów pomiarowych,

opublikowane w formie monografii naukowej:

Monitoring sensoryczny obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji,

w Oficynie Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej w 2022 r.

- Osiągnięcie projektowo-technologiczne (opis w pkt 4.3):

Zaprojektowanie i wdrożenie systemu ciągłego monitoringu sensorycznego mostu nad Odrą w Kędzierzynie-Koźlu w warunkach eksploatacyjnych z zastosowaniem światłowodowych technik pomiarowych.

- Dodatkowe osiągnięcie naukowe (opis w pkt 4.4):

Opracowanie i implementacja procedur diagnostycznych obiektów mostowych z uszkodzeniami, z wykorzystaniem wyników doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne, w zakresie:

- 1) **wspomagania identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określenia jej kondycji i warunków ich dalszej eksploatacji;**
- 2) **oceny poziomu zaawansowania procesów zmęczeniowych w starych mostach stalowych i prognozowania ich trwałości.**

Syntetyczny opis przedstawionych do oceny osiągnięć naukowych zamieszczono w dalszej części punktu 4.

4.2. Główne osiągnięcie naukowe

4.2.1. Sformułowanie osiągnięcia

Tytuł głównego osiągnięcia naukowego:

Opracowanie kompleksowej metodyki monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych za pomocą elektronicznych systemów pomiarowych.

Osiągnięcie to zostało przedstawione w formie monografii naukowej [1]:

Monitoring sensoryczny obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji,

wydanej w Oficynie Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej w 2022 r., nazywanej dalej monografią. Recenzentami wydawniczymi monografii są:

- prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski dr h.c. (multi) Politechniki Warszawskiej, Łódzkiej i Bydgoskiej;
- prof. dr hab. inż. Henryk Zobel z Politechniki Warszawskiej.

4.2.2. Wprowadzenie

Systematyczne obserwacje i analizy umożliwiające monitorowanie stanu obiektów mostowych są obecnie podstawą przy podejmowaniu decyzji w systemach zarządzania infrastrukturą mostową. Standardowym rozwiązaniem są okresowe przeglądy (inspekcje) obiektów, odbywające się zgodnie z przepisami obowiązującymi w poszczególnych krajach i określającymi ich częstotliwość, zakres, metody i sprzęt, za pomocą których są prowadzone, a także sposób przygotowania personelu. Przeglądy te w większości krajów mają charakter głównie badań wizualnych i elementarnych badań nieniszczących, wykonywanych przy użyciu prostych narzędzi badawczych.

W niektórych sytuacjach działania, które przewiduje system przeglądów, nie są wystarczające. Niezbędne staje się wówczas zastosowanie bardziej zaawansowanej technicznie strategii działań diagnostycznych. Coraz częściej w celu kompleksowej oceny stanu konstrukcji w trakcie jej użytkowania implementuje się specjalistyczne systemy elektroniczne, tj. systemy monitoringu sensorycznego. W monografii system monitoringu sensorycznego zdefiniowano jako zautomatyzowany, elektroniczny system obserwacji cech konstrukcji i jej środowiska za pomocą zainstalowanego na obiekcie i/lub w jego bezpośrednim otoczeniu układu kontrolno-pomiarowego składającego się z:

- czujników (sensorów),
- urządzeń pomiarowych,
- układów transmisji danych,
- jednostek rejestrujących, przetwarzających i udostępniających dane.

Monitoring sensoryczny konstrukcji polega na monitorowaniu fizycznej, chemicznej, a także fizyko-chemicznej odpowiedzi konstrukcji na różnego rodzaju oddziaływania, a prowadzony jest z wykorzystaniem systemów monitoringu sensorycznego. Innymi słowy, jest to proces systemowej identyfikacji niekorzystnych zjawisk w konstrukcji na podstawie odpowiedzi fizycznej i/lub chemicznej obiektu, pomierzonej z wykorzystaniem elektronicznego systemu kontrolno-pomiarowego.

W ramach monitoringu sensorycznego można wyróżnić działania monitorujące procesy degradacji materiału (np. procesy reologiczne, zmęczeniowe czy korozyjne materiałów), jak również krótko- i długoterminowe pomiary monitorujące odpowiedź obiektu w warunkach zidentyfikowanych oddziaływań (o znanych, identyfikowanych parametrach) lub w losowych warunkach eksploatacyjnych.

Ewentualna implementacja monitoringu sensorycznego powinna mieć charakter indywidualny, tj. dla pojedynczego obiektu i być dokonywana tylko w uzasadnionych przypadkach. Zastosowanie tego rodzaju monitoringu powinno przyczynić się do dokładniejszego oszacowania kondycji i warunków pracy obiektu w aspektach, które nie mogą zostać osiągnięte jedynie w drodze przeglądów. Ogólnie potrzeby w zakresie monitoringu sensorycznego konstrukcji mostowych dotyczą przede wszystkim:

- Nowych obiektów o przesłach znacznej rozpiętości, nowatorskich pod względem rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych i o szczególnym znaczeniu dla systemu transportowego – wyniki monitoringu takich obiektów powinny być wykorzystywane do doskonalenia metod ich projektowania, budowy, eksploatacji i utrzymania.
- Obiektów w złym stanie technicznym, wykazujących istotne uszkodzenia w zakresie bezpieczeństwa konstrukcji i ich użytkowników lub/i w zakresie trwałości obiektów – badania monitorujące prowadzone są wtedy w celu precyzyjnej oceny kondycji i warunków pracy obiektu do czasu wykonania modernizacji lub przebudowy obiektu.
- Wybranych typów rozwiązań konstrukcyjnych, reprezentatywnych dla znaczących grup obiektów mostowych, będących przedmiotem studiów badawczych związanych z identyfikacją rzeczywistych obciążeń i oddziaływań, detekcją uszkodzeń konstrukcji, modelowaniem procesów degradacji, prognozowaniem trwałości itp.

Coraz powszechniej stosowany sensoryczny monitoring obiektów mostowych jest złożonym interdyscyplinarnym zagadnieniem naukowo-technicznym, wymagającym połączenia specjalistycznej wiedzy z różnych dziedzin: inżynierii mostowej, systemów pomiarowych, informatyki, mechaniki konstrukcji, metod obliczeń numerycznych oraz metod inteligencji obliczeniowej. Zagadnienia związane z monitorowaniem kondycji obiektów mostowych są

przedmiotem prac badawczych i wdrożeniowych w wielu krajach, a także stanowią obszar intensywnej współpracy międzynarodowej.

Potrzeba innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie monitorowania obiektów mostowych coraz wyraźniej pojawia się także w Polsce, gdyż wiele obiektów wymaga zmiany sposobu ich użytkowania lub ze względu na swój wiek wchodzi w okres podwyższonego zagrożenia bezpieczeństwa. Częściej też występują niekorzystne zjawiska środowiskowe, takie jak powodzie, pożary i huragany, zmieniające warunki pracy obiektów mostowych. Znajduje to odzwierciedlenie w podejmowanych badaniach i opracowywanych rozwiązaniach technicznych, np. [2]-[18].

4.2.3. Cel naukowy i zakres osiągnięcia

Monografia [1], nazywana dalej monografią, jest próbą kompleksowego przedstawienia kluczowych – zarówno teoretycznych, jak i technicznych – aspektów monitoringu sensorycznego obiektów mostowych. Pomimo dużej złożoności i rozległości tego multidyscyplinarnego zagadnienia, na podstawie dostępnej wiedzy naukowo-technicznej, wieloletnich badań własnych konstrukcji mostowych oraz doświadczeń wynikających z udziału w krajowych i międzynarodowych projektach badawczych w zakresie diagnostyki i oceny kondycji obiektów mostowych podjąłem próbę nie tylko uściślenia, ujednoczenia, sklasyfikowania i omówienia wiedzy dziedzinowej związanej z monitoringiem sensorycznym obiektów mostowych, ale także stworzenia kompleksowej metodyki monitorowania zachowania się tego rodzaju obiektów i implementacji zaproponowanych procedur.

Głównym celem naukowym prowadzonych prac było stworzenie jednolitej, kompleksowej metodyki monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych, za pomocą elektronicznych systemów kontrolno-pomiarowych, umożliwiających określanie odpowiedzi fizycznej i/lub chemicznej konstrukcji na różnego rodzaju oddziaływania i analizę pracy obiektów mostowych w zakresie:

- oceny warunków bezpiecznej eksploatacji obiektu;
- oceny kondycji obiektu;
- prognozowania rozwoju niekorzystnych zjawisk w konstrukcji.

Treść monografii ujęta jest w 10 rozdziałach, których tytuły, kolejność i zawartość odpowiada budowaniu wiedzy o monitoringu sensorycznym i jego zastosowaniach w mostownictwie. W monografii:

- Uściślono i ujednoczono terminologię stosowaną w ramach badań monitorujących obiektów mostowych oraz oceny ich stanu na podstawie wyników tych badań – rozdziały 1 i 2 – a także zebrano w formie umieszczonego na końcu książki wykazu ważniejsze terminy i pojęcia.
- Sklasyfikowano, zestawiono i omówiono: narzędzia wykorzystywane do teoretycznych analiz obiektów mostowych, procedury badawcze, technologie i narzędzia pomiarowe oraz algorytmy przetwarzania danych i ich analizy przydatne w monitoringu sensorycznym konstrukcji mostowych – rozdziały 3–6.
- Opracowano autorską metodykę monitorowania (monitoringu sensorycznego) obiektów mostowych poddanych oddziaływaniom eksploatacyjnym, obejmującą procedury projektowania, wdrożenia, eksploatacji systemów monitoringu i przetwarzania, analizy i udostępniania wyników pomiarów, a także ich wykorzystywania w ocenie parametrów technicznych i użytkowych obiektu – rozdział 7.

- Przedstawiono – pierwsze w Polsce – przykłady zastosowań proponowanej metodyki badań w monitorowaniu obiektów mostowych poddanych oddziaływaniom eksploatacyjnym – rozdziały 8 i 9.

Rozdział 10 *Uwagi końcowe* stanowi podsumowanie całej monografii. Wskazałem w nim moje osobiste osiągnięcia, stanowiące mój indywidualny wkład w rozwój monitoringu sensorycznego w Polsce. W drugiej sekcji rozdziału 10 sformułowałem kierunki dalszych badań nad monitoringiem obiektów mostowych.

Z uwagi na duży potencjał diagnostyczny systemów monitoringu sensorycznego znaczącą uwagę skoncentrowałem na aspektach teoretycznych i technicznych monitorowania konstrukcji, wymagających pogłębionej diagnostyki z uwagi na obniżoną przydatność do użytkowania (np. powodowaną uszkodzeniami).

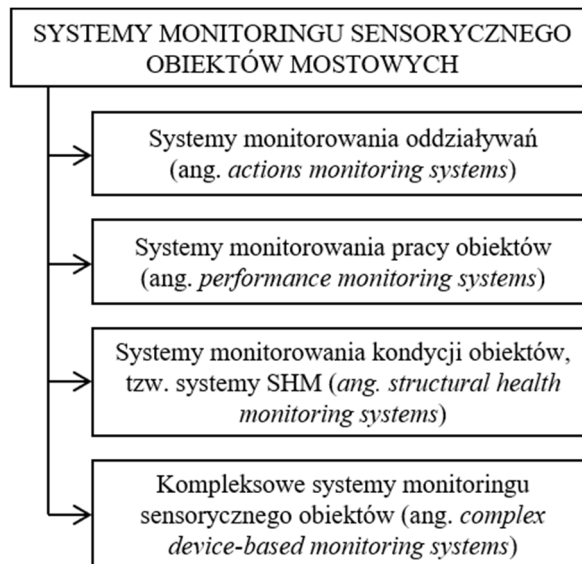
W mojej opinii duże znaczenie monografii polega również na tym, że monitoring sensoryczny mostów w Polsce jest rozwijany już od około 20 lat, ale wiedza o nim nie jest jeszcze wystarczająco rozpowszechniona, nawet w środowisku projektantów i realizatorów tego rodzaju obiektów oraz służb administrujących nimi i je utrzymujących.

4.2.4. Systemy monitoringu sensorycznego obiektów mostowych (rozdział 2 monografii [1])

System monitoringu sensorycznego obiektu mostowego to – w ogólnym ujęciu – zestaw składający się z czujników i urządzeń pomiarowych rejestrujących wielkości fizyczne, systemu transmisji danych pomiarowych, komputerów wraz z oprogramowaniem do rejestracji, przetwarzania, analizy i gromadzenia danych, jak również z podsystemu łączności, który w sposób ciągły i autonomiczny udostępnia – przeważnie zdalnie - informacje o konstrukcji i warunkach jej eksploatacji w czasie rzeczywistym [6].

W rozdziale 2 monografii zaproponowałem ogólną systematykę systemów monitoringu sensorycznego obiektów mostowych. Z uwagi na cele prowadzonych obserwacji oraz potencjalne zastosowania wyników badań monitorujących zdefiniowałem i omówiłem cztery główne kategorie systemów (koncepty ideowe) monitoringu sensorycznego konstrukcji mostowych w warunkach eksploatacyjnych (rys. 1):

1. Systemy monitorowania oddziaływań (ang. *actions monitoring systems*) – ich zadaniem jest określenie parametrów oddziaływań działających na obiekt w trakcie jego użytkowania, a także ich analiza i dokumentacja.
2. Systemy monitorowania pracy obiektu (ang. *performance monitoring systems*) – ich zadaniem jest bieżąca, tj. dokonywana w czasie rzeczywistym, ocena zachowania się konstrukcji (reakcji obiektu na oddziaływania) w kontekście wymagań bezpieczeństwa (SGN) i użyteczności (SGU) w różnych warunkach eksploatacyjnych, a także dokumentacja historii warunków użytkowania obiektu.
3. Systemy monitorowania kondycji obiektu, tj. systemy SHM (ang. *structural health monitoring systems*) – ich zadaniem jest bieżąca identyfikacja niekorzystnych zjawisk (uszkodzeń, procesów degradacji) zachodzących w konstrukcji, świadczących o zmianach kondycji obiektu, a także – w niektórych sytuacjach – obserwacja przebiegu procesów degradacyjnych oraz prognoza pozostałego czasu życia obiektu.
4. Kompleksowe systemy monitoringu sensorycznego (ang. *complex device-based monitoring systems*) – systemy integrujące wymienione powyżej koncepty w celu kompleksowej oceny konstrukcji i jej środowiska.



Rys. 1. Główne kategorie systemów (konceptje ideowe) monitoringu sensorycznego konstrukcji mostowych w warunkach eksploatacyjnych [1]

Następnie określiłem i scharakteryzowałem podstawowe cechy funkcjonalno-techniczne systemów monitoringu sensorycznego konstrukcji mostowych oraz zastosowania wyników badań monitorujących na różnych etapach budowy i eksploatacji obiektów mostowych. W tej części monografii przedstawiłem również krótką historię rozwoju systemów monitorowania mostów na świecie.

Ponadto opisałem wybrane systemy monitorowania zainstalowane na dużych obiektach mostowych w Polsce i wskazałem obszary wymagające poprawy w systemach obecnych, a także tych, które będą wdrażane w przyszłości. Uważam bowiem, że największy wpływ na ogólnie rozumianą skuteczność systemów monitoringu sensorycznego w realizacji założonych celów monitorowania ma dobór rozwiązań technicznych w zakresie układu pomiarowego. W szczególności dotyczy to rodzaju wykorzystanych technik pomiarowych, które mają określoną stabilność cech metrologicznych w czasie, niezawodność oraz odporność na różnego rodzaju zakłócenia i szумы. Wybór technik pomiarowych, jak również liczba czujników i ich lokalizacja powinny zależeć od precyzyjnie określonego celu działania systemu i wymagań związanych z zastosowaniami wyników badań.

4.2.5. Analizy teoretyczne MES w monitorowaniu obiektów mostowych (rozdział 3 monografii [1])

Właściwe rozumienie roli i celów monitoringu sensorycznego oraz interpretacja wyników pomiarów wymagają znajomości teorii w zakresie modelowania i analizy zachowania się konstrukcji mostowych w warunkach eksploatacyjnych. Działania obejmujące tworzenie matematycznego modelu obliczeniowego konstrukcji oraz analizy teoretyczne (statyczna, dynamiczna i modalna) stanowią podstawę zarówno procesu projektowania, implementacji, jak i eksploatacji systemów monitoringu. Opracowane modele obliczeniowe oraz uzyskane dzięki nim wyniki wspomagają projektowanie struktury systemu monitorowania w zakresie określenia lokalizacji przekrojów krytycznych wymagających rozmieszczenia czujników pomiarowych oraz umożliwiają szacunkowe określenie wartości mierzonych wielkości. Podczas wdrażania systemu monitoringu wyniki obliczeń pozwalają na weryfikację wartości pomierzonych wielkości oraz na walidację opracowanego modelu teoretycznego. W procesie eksploatacji systemu opracowany model, jak i wyniki analiz stanowią podstawę w ocenie pracy konstrukcji w warunkach eksploatacyjnych oraz identyfikacji niekorzystnych zjawisk w niej zachodzących. Strategia identyfikacji trwałych zmian w konstrukcji, w której stosowane są numeryczne modele obliczeniowe, czyli strategia *model-based*

(ang. *model-based strategy*), służy głównie do identyfikacji uszkodzeń. W ramach tej strategii można wyróżnić kilka kategorii metod identyfikacji uszkodzeń, które opisano w podrozdziale 6.6.5.

W rozdziale 3 zaprezentowałem przegląd podstawowych narzędzi wykorzystywanych do teoretycznych analiz obiektów mostowych, prowadzonych na potrzeby monitorowania pracy tychże obiektów i ich kondycji. Szczególną uwagę poświęcono możliwościom posługiwania się w tym zakresie metodą elementów skończonych (MES). Syntetycznie przedstawiłem podstawy matematyczne MES oraz ujednolicone podstawowe oznaczenia stosowane w dalszej części monografii.

Scharakteryzowałem podstawowe komponenty dyskretnego modelu obliczeniowego MES, a mianowicie model geometrii, materiału oraz obciążeń. Przedstawiono jego podstawowe założenia oraz systematykę poszczególnych części składowych. Zwróciłem uwagę na specyfikę modelowania i analizy konstrukcji mostowych w procesie monitorowania oraz zaprezentowałem przykłady modeli numerycznych przygotowanych na potrzeby prowadzonych badań własnych. Zaprezentowałem również rodzaje analiz MES najczęściej wykonywane w procesie monitorowania obiektów mostowych, a mianowicie:

- liniową analizę statyczną;
- liniową analizę modalną z uwzględnieniem wpływu tłumienia;
- liniową analizę czasową drgań wymuszonych.

Przedstawione podstawowe informacje o analizach teoretycznych stosowanych w monitorowaniu obiektów mostowych stanowią niezbędne wprowadzenie do kolejnych rozdziałów oraz ujednolicenie pod względem terminologii zagadnień opisywanych w dalszej części monografii.

4.2.6. Badania doświadczalne pod obciążeniami w monitorowaniu obiektów mostowych (rozdział 4 monografii)

Eksperymentalne badania obiektów mostowych pod obciążeniami (oddziaływaniami) są bardzo ważne w diagnostyce obiektów mostowych. Polegają na pomiarze i analizie odpowiedzi fizycznej i/lub chemicznej konstrukcji na różnego rodzaju oddziaływania, mogące wywołać w konstrukcji przemieszczenia, odkształcenia, siły wewnętrzne, przyspieszenie drgań czy efekty związane z uwolnieniem energii odkształcenia w momencie powstawania uszkodzeń, a ich wyniki umożliwiają kompleksową ocenę pracy całego obiektu lub jego elementów składowych. Badania tego rodzaju stanowią zasadniczą kategorię metod badań diagnostycznych, zaadaptowaną w monitoringu sensorycznym obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji.

W rozdziale 4 sklasyfikowałem i omówiłem szerokie spektrum technik badań doświadczalnych obiektów mostowych pod obciążeniami (oddziaływaniami). W podrozdziale 4.1 przedstawiłem ogólną klasyfikację badań obiektów mostowych pod obciążeniami ze względu na:

- fazę istnienia konstrukcji;
- charakter (naturę) oddziaływań i związaną z tym reakcję konstrukcji;
- rodzaje oddziaływań;
- sposób prowadzenia badań (doraźne, monitorujące);
- zastosowania wyników badań w zarządzaniu eksploatacją i utrzymaniem obiektu mostowego.

W dalszej części rozdziału 4 przedstawiłem i omówiłem kompleksowe klasyfikacje dwóch podstawowych kategorii monitorujących badań obiektów mostowych pod obciążeniami:

- Monitorujące badania statyczne (podrozdział 4.2; ang. *static monitoring*) – systematyczna akwizycja, przetwarzanie i analiza odpowiedzi (reakcji) konstrukcji na określone

oddziaływania o charakterze statycznym, m.in. obciążenia stałe ciężarem własnym i wyposażenia, siłami sprężającymi, wpływy termiczne, wpływy reologiczne.

- Monitorujące badania dynamiczne (podrozdział 4.3; ang. *dynamic monitoring*) – systematyczna akwizycja, przetwarzanie i analiza odpowiedzi (reakcji) konstrukcji na określone oddziaływania o charakterze dynamicznym, takie jak obciążenia użytkowe, oddziaływania wiatru czy oddziaływania sejsmiczne.

Jako kryteria klasyfikacji przyjęto cele i rodzaje badań, rodzaje oddziaływań na obiekt, wielkości mierzone podczas badań i rodzaje wyników uzyskiwanych na podstawie przetwarzania danych pomiarowych, a także obszary praktycznych zastosowań otrzymanych wyników w diagnostyce.

Specyfika badań monitorujących prowadzonych w warunkach użytkowania obiektu (podrozdział 4.4) wymaga integracji różnych kategorii badań monitorujących, umożliwiających monitorowanie statycznego i dynamicznego zachowania się konstrukcji, a także procesów degradacji materiałowej. Prezentowana w pracy metodyka monitoringu sensorycznego konstrukcji mostowych w warunkach eksploatacyjnych obejmuje systemową rejestrację, przetwarzanie, analizę i wykrywanie zmian odpowiedzi fizycznej, chemicznej i fizyko-chemicznej konstrukcji na oddziaływania w warunkach użytkowania obiektu, z uwzględnieniem skutków powodowanych przez procesy degradacji materiału konstrukcji i posadowienia (np. wywołujące uwolnienie energii odkształcenia).

Ogólną systematykę badań monitorujących obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych zaprezentowano na rys. 2. Rejestrowana odpowiedź konstrukcji w procesie eksploatacji obiektu jest związana przede wszystkim z oddziaływaniem na obiekt:

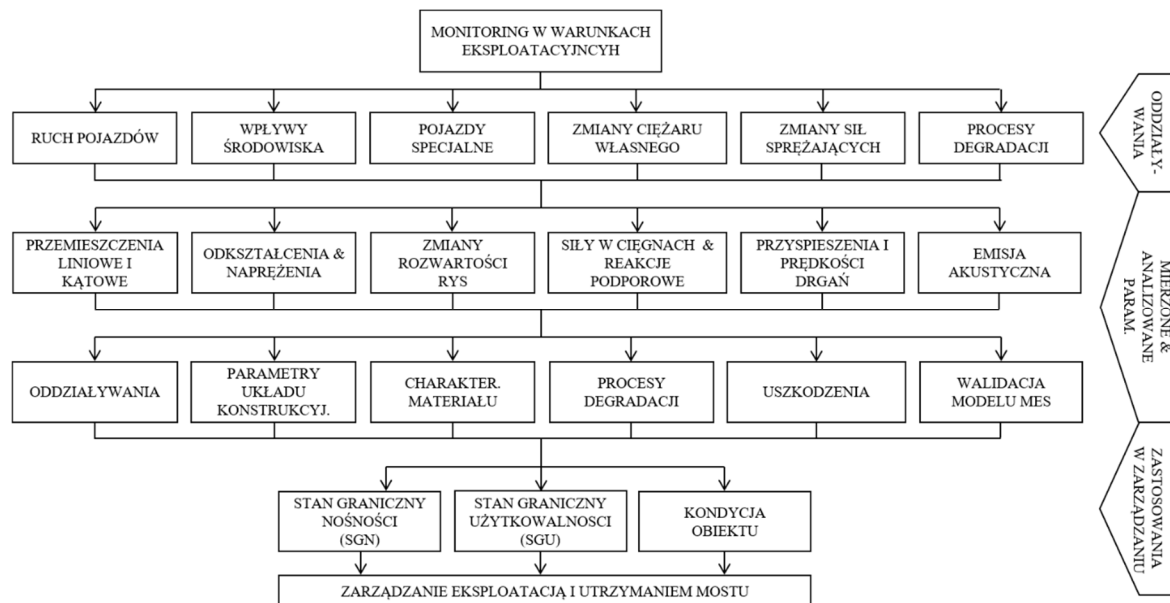
- ruchu pojazdów;
- wpływów środowiskowych;
- ewentualnych zmian ciężaru własnego i sił sprężających w trakcie procesu monitorowania;
- skutków procesów degradacji materiałów konstrukcyjnych i posadowienia, objawiających się redystrybucją sił wewnętrznych na skutek pojawiających się uszkodzeń (ubytków, utraty ciągłości czy destrukcji materiału bądź nadmiernej deformacji elementów).

W sytuacji, gdy system monitorowania jest instalowany już na etapie budowy konstrukcji, możliwe jest kompleksowe monitorowanie efektów fizycznych, chemicznych i mieszanych, wynikających z wszystkich istotnych oddziaływań.

Monitorowaną odpowiedź konstrukcji (fizyczną, chemiczną i mieszaną) w warunkach eksploatacyjnych może reprezentować szerokie spektrum wielkości fizycznych:

- przemieszczenia liniowe i kątowe;
- odkształcenia i naprężenia;
- zmiany rozwartości rys;
- zmiany sił wciągach i reakcje podporowe;
- przyspieszenia i prędkości drgań;
- poziom emisji akustycznej;
- parametry procesów elektrochemicznych związanych z destrukcją korozyjną materiału.

Wielkości te mogą być rejestrowane z pożądaną częstością próbkowania sygnałów pomiarowych, dobraną w zależności od celów i zastosowań wyników badań, a także natury monitorowanych procesów.



Rys. 2. Ogólna systematyka badań monitorujących obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych [1]

Systemy kompleksowego monitorowania efektów fizycznych, chemicznych i mieszanych w konstrukcji oferują zwiększone możliwości diagnostyczne w porównaniu do systemów statycznych (monitorowanie odpowiedzi statycznej) czy wibracyjnych (monitorowanie odpowiedzi dynamicznej i cech modalnych). Gromadzenie danych z wielu źródeł i zastosowanie mechanizmów przetwarzania danych (patrz rozdział 6) z wykorzystaniem różnych technik reprezentacji wiedzy (klasycznych metod obliczeniowych oraz metod inteligencji obliczeniowej) pozwala uzyskać bardziej precyzyjne informacje o obiekcie i warunkach jego użytkowania.

Wyznaczane i analizowane parametry, nazywane w monografii charakterystykami pracy konstrukcji (patrz podrozdział 7.3.2), mogą dotyczyć następujących zagadnień:

- monitorowania oddziaływań;
- monitorowania parametrów układu konstrukcyjnego;
- monitorowanie charakterystyk materiału, m.in. wyężenia materiału, moduł sprężystości;
- monitorowania parametrów procesów degradacyjnych;
- monitorowania uszkodzeń;
- weryfikacji założeń projektowych, np. w wyniku walidacji modelu MES.

Gromadzone i analizowane informacje powinny być wykorzystywane w ocenie stanu technicznego i przydatności do użytkowania konstrukcji i stanowić podstawę przy podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych i utrzymaniowych.

4.2.7. Techniki i czujniki pomiarowe w monitoringu obiektów mostowych (rozdział 5 monografii [1])

Kluczowe znaczenie w projektowaniu systemów monitorowania obiektów mostowych ma dobór aparatury pomiarowej i rejestrującej, której cechy bezpośrednio wpływają na rodzaj i jakość otrzymywanych wyników stanowiących źródło informacji o zachowaniu się badanego obiektu. Poszczególne rozwiązania techniczne mają ograniczony zakres zastosowań, a ich wykorzystanie w badaniach obiektów mostowych wymaga szczegółowej, indywidualnej analizy przydatności przeprowadzonej z uwzględnieniem wymagań dotyczących realizacji celu badań. Dotyczy to

przede wszystkim podstawowych cech technicznych aparatury pomiarowej, które mają bardzo istotne znaczenie i wpływają bezpośrednio na rodzaj i jakość otrzymywanych wyników pomiarów.

W rozdziale 5 zaprezentowano szeroki przegląd dostępnych rozwiązań technicznych w zakresie technik i czujników pomiarowych pod kątem ich przydatności w monitoringu sensorycznym konstrukcji. Opracowałem autorską klasyfikację stosowanych obecnie technik pomiarowych i rodzajów czujników oraz dokonałem oceny poszczególnych rozwiązań technicznych w monitorowaniu obiektów w warunkach eksploatacyjnych.

Tabela 1. Klasyfikacja technik pomiarowych w kontekście możliwości ich wykorzystywania w monitorowaniu obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych [1]

Techniki pomiarowe	Identyfikowane parametry														
	reakcja obiektu na oddziaływania							środowisko pracy konstrukcji							
	przemieszczenia liniowe	przemieszczenia kątowe	odkształcenia	prędkości drgań	przyspieszenia drgań	sily	rozwój zarysowań	obciążenia ruchome			warunki środowiskowe			procesy degradacji materiału	
geometria pojazdu								masa pojazdów/naciski na osie	prędkość przejazdu	temperatura	wilgotność	prędkość i kierunek wiatru			
Elektrochemiczne															●
Elektryczne indukcyjne	●	●		●	●	●	●		●						
Elektryczne pojemnościowe	●	●		●	●	●			●						
Elektryczne rezystancyjne			●	○	○	●	●		●	○	●	●			
Emisji akustycznej							●								●
Geodezyjne	●	○													
Hydrauliczne	●														
Laserowe	●			●	●			●		●					
Mechaniczno-elektryczne	●		○				●							●	
Mikroelektromechaniczne (MEMS)		●	○	○	●						●	●			
Piezoelektryczne			○	●	●	●			●						
Radarowe	●			●	●					●					
Rejestracji i przetwarzania obrazu	●	○	○	○	○			●		●					○
Satelitarne	○									●					
Światłowodowe	●	●	●	○	●	●	●		●		●				●
Termoelektryczne											●			●	
Termowizyjne											●	○			
Ultradźwiękowe	●						●							●	○

Oznaczenia:
 ● – pełna przydatność rozwiązania technicznego, ○ – ograniczona przydatność rozwiązania technicznego.

Technika pomiarowa (ang. *measurement technique*) jest w pracy zdefiniowana jako szczegółowa procedura techniczna bazująca na określonych zjawiskach fizycznych i/lub chemicznych, a także na specjalistycznych rozwiązaniach technicznych pozwalających na uzyskanie informacji o badanym materiale lub konstrukcji. Natomiast zbiór technik pomiarowych, wymagających wykorzystania określonych zjawisk fizycznych i specjalistycznych rozwiązań technicznych określany jest mianem technologii pomiarowej (ang. *measurement technology*). Cały proces pomiaru danej wielkości za pomocą określonej techniki pomiarowej jest rozumiany jako metoda pomiarowa (ang. *measurement method*).

Na potrzeby projektowania systemów monitoringu sensorycznego obiektów mostowych zaproponowałem definicje 18 technik pomiarowych przydatnych w określaniu podstawowych wielkości charakteryzujących zachowanie się obiektu oraz warunki jego eksploatacji. Zaproponowana klasyfikacja (tabela 1) jest niezależna od rodzaju mierzonych wielkości. Dana technika pomiarowa może bowiem posłużyć do pomiaru różnych wielkości charakteryzujących obiekt lub jego środowisko.

Zasadniczym elementem systemów pomiarowych są czujniki, które zamieniają jedną postać energii na inną [19],[20],[21]. Konstrukcja czujników i innych urządzeń pomiarowych stanowi fizyczną implementację różnych technik pomiarowych, co w rezultacie pozwala na wykrywanie i rejestrowanie nawet bardzo niewielkich zmian mierzonych wielkości. W związku z tym poszczególne techniki pomiarowe, jak i typy czujników mają wiele cech, które decydują o ich możliwościach pomiarowych oraz przydatności w konkretnej sytuacji.

W dalszej części rozdziału 5 wymieniłem i zdefiniowałem podstawowe charakterystyki techniczne aparatury pomiarowej, które należy rozpatrywać zarówno przy projektowaniu systemów monitorujących, jak i przy analizie wyników badań. Podjąłem również próbę klasyfikacji dostępnych obecnie rozwiązań technicznych, które mogą być stosowane w monitoringu sensorycznym obiektów mostowych w kontekście:

- Monitorowania reakcji obiektu na oddziaływania przez systemowy pomiar następujących wielkości fizycznych:
 - przemieszczeń liniowych – podrozdział 5.4;
 - przemieszczeń kątowych – podrozdział 5.5;
 - odkształceń – podrozdział 5.6;
 - prędkości i przyspieszeń drgań – podrozdział 5.7;
 - sił (w tym naprężeń i reakcji podporowych) – podrozdział 5.8;
 - rozwoju zarysowań – podrozdział 5.9.
- Monitorowania środowiska pracy konstrukcji, w szczególności:
 - parametrów obciążeń ruchomych – podrozdział 5.10;
 - warunków środowiskowych – podrozdział 5.11;
 - wielkości chemicznych związanych z procesami degradacji – podrozdział 5.12.

W podrozdziałach dokonałem ogólnej oceny przydatności poszczególnych rozwiązań technicznych w doraźnych badaniach diagnostycznych odpowiedzi statycznej i dynamicznej obiektów mostowych (w badaniach statycznych i dynamicznych), jak również w badaniach monitorujących prowadzonych w warunkach eksploatacyjnych.

4.2.8. Rejestracja, przetwarzanie i weryfikacja danych pomiarowych (rozdział 6 monografii [1])

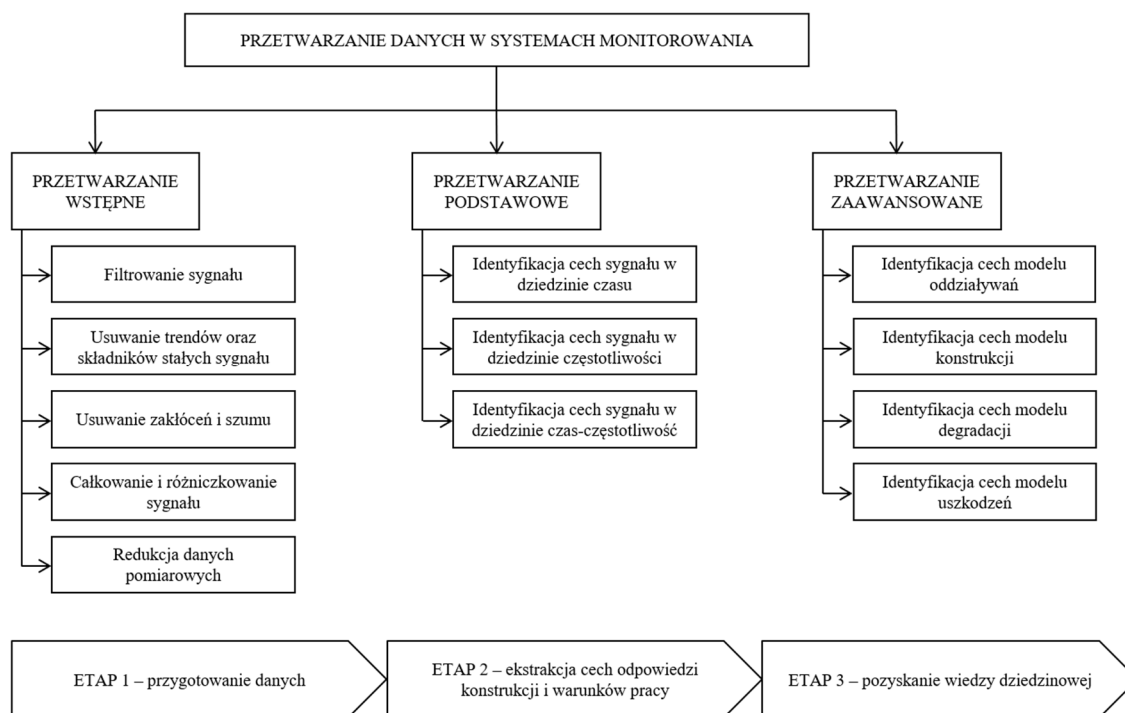
Monitorowanie obiektów mostowych wiąże się z przetwarzaniem wielu danych rejestrowanych przez system pomiarowy. Racjonalne zarządzanie danymi pomiarowymi oraz ich efektywne

przetwarzanie i wykorzystywanie są podstawowymi, ale też często najtrudniejszymi, zadaniami systemu monitorującego.

W rozdziale 6 opisałem w sposób syntetyczny, metody i techniki rejestracji, przetwarzania i weryfikacji danych pomiarowych, pozyskiwanych na potrzeby monitorowania obiektów mostowych. Przedstawiłem specyfikę sygnałów pomiarowych wykorzystywanych na potrzeby monitorowania oraz podstawowe zagadnienia związane z rejestracją sygnałów, w tym z eliminacją ich zakłóceń.

W dalszej części rozdziału zaprezentowałem oryginalny trój etapowy sposób przetwarzania danych pomiarowych. Proponowaną systematykę przetwarzania danych pomiarowych w postaci dyskretnych szeregów czasowych w monitorowaniu konstrukcji mostowych przedstawiłem na rys. 3. W całym procesie można wyróżnić trzy główne etapy:

- Etap 1: przetwarzanie wstępne – polega na wykorzystaniu technik przetwarzania wstępnego w celu przygotowania danych do dalszych analiz.
- Etap 2: przetwarzanie podstawowe – polega na wykorzystaniu algorytmów przetwarzania na poziomie podstawowym w celu ekstrakcji cech odpowiedzi konstrukcji i warunków jej eksploatacji.
- Etap 3: przetwarzanie zaawansowane – polega na wykorzystaniu algorytmów przetwarzania na poziomie zaawansowanym w celu pozyskania wiedzy dziedzinowej dotyczącej oddziaływań, układu konstrukcyjnego obiektu, procesów degradacji i uszkodzeń.



Rys. 3. Systematyka przetwarzania danych pomiarowych w systemach monitorowania obiektów mostowych [1]

Przetwarzanie wstępne obejmuje dane pierwotne, zarejestrowane przez urządzenia pomiarowe. Może być prowadzone za pomocą różnych technik „oczyszczenia” zarejestrowanego sygnału ze zbędnych informacji, szumu oraz zakłóceń. Do technik tych zalicza się:

- filtrowanie sygnału w dziedzinie czasu;
- usuwanie trendów oraz składników stałych sygnału;

- poprawa jakości sygnału, głównie w kontekście usuwania zakłóceń i szumu;
- całkowanie i różniczkowanie sygnału w dziedzinie czasu;
- redukcja danych pomiarowych (np. kompresja, transformacja, decymacja).

W etapie 2 obejmującym przetwarzanie na poziomie podstawowym stosowane są algorytmy estymacji:

- charakterystyk sygnału pomiarowego w dziedzinie czasu;
- charakterystyk sygnału pomiarowego w dziedzinie częstotliwości;
- charakterystyk sygnału pomiarowego w dziedzinie czas-częstotliwość.

Przetwarzanie sygnałów na poziomie podstawowym samo w sobie nie powoduje wytwarzania nowych informacji o obiekcie. Pozwala natomiast na ekstrakcję tych informacji zawartych w sygnale, stanowiących doskonały indyktor (choć niebezpośredni) stanu obiektu i jego środowiska. W związku z tym w dalszej części pracy parametry sygnału określone w etapie 2 nazywane są podstawowymi charakterystykami pracy konstrukcji (patrz klasyfikacja zaprezentowana w podrozdział 7.3.2).

Dane przetworzone wstępnie i na poziomie podstawowym mogą stanowić również podstawę bardziej zaawansowanych analiz w etapie 3. Na tym poziomie celem jest przekształcenie danych w wiedzę dziedzinową o konstrukcji i jej środowisku pracy. Zazwyczaj wiedza ta jest reprezentowana w postaci modeli teoretycznych, a głównym celem jest pozyskanie (estymowanie) parametrów modeli teoretycznych, przyjętych na potrzeby monitorowania konstrukcji. Parametry tych modeli reprezentują zazwyczaj:

- cechy oddziaływań;
- cechy układu konstrukcyjnego, w tym cechy modelu materiałów konstrukcyjnych i/lub posadowienia;
- parametry związane z procesami degradacji konstrukcji, w szczególności tymi związanymi ze zmęczeniem materiału, procesami reologicznymi oraz procesami korozyjnymi;
- parametry uszkodzeń konstrukcji.

Wyznaczane wartości wymienionych parametrów w dłuższym okresie monitorowania obiektu umożliwiają analizę zmian zachodzących w konstrukcji. W dalszej części pracy parametry wyznaczone w etapie 3 nazywane są zaawansowanymi charakterystykami pracy konstrukcji (patrz klasyfikacja w podrozdział 7.3.2).

W przetwarzaniu danych na poziomie zaawansowanym niezbędne stają się różne techniki symbolicznej i niesymbolicznej reprezentacji wiedzy, w tym metod inteligencji obliczeniowej, należące do dziedziny sztucznej inteligencji, np. [22]-[32]. Zagadnienia te omówiono w podrozdziale 6.6.

Zaproponowany w rozdz. 6 sposób przetwarzania danych pomiarowych w postaci dyskretnych szeregów czasowych $x(n)$ zawiera główne zagadnienia wymagające indywidualnego rozwiązania w każdym systemie monitorowania.

Ostatnią część rozdziału poświęcono metodom weryfikacji danych pomiarowych uzyskiwanych w procesach monitorowania obiektów mostowych.

4.2.9. Metodyka i etapy monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych (rozdział 7 monografii [1])

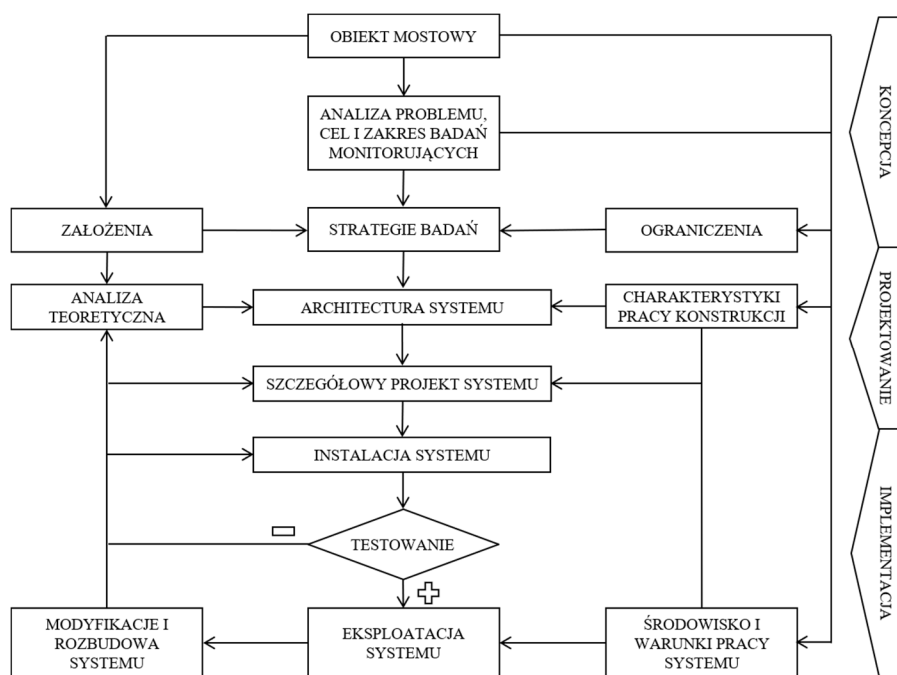
Propozycję autorskiej, jednolitej, kompleksowej metodyki monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych za pomocą elektronicznych systemów monitoringu

sensorycznego przedstawiono w rozdziale 7 monografii. Opracowana metodyka stanowi zbiór procedur i zaleceń dotyczących realizacji poszczególnych etapów całego procesu monitorowania – projektowania, wdrożenia, eksploatacji, przetwarzania, analizy i udostępniania wyników pomiarów oraz ich wykorzystania w ocenie parametrów technicznych i użytkowych obiektu.

Kolejność poszczególnych działań związanych z planowaniem i realizacją procesu monitorowania obiektów oraz wzajemne relacje między nimi zobrazowano na rys. 4.

Podstawowymi etapami procesu planowania i projektowania badań monitorujących są:

- Prace koncepcyjne:
 - analiza problemu wraz z precyzyjnym określeniem celów i zakresu obserwacji obiektu mostowego;
 - określenie ograniczeń w projektowaniu, instalacji i eksploatacji całego systemu;
 - określenie założeń w zakresie funkcjonalności, przydatności i niezawodności systemu;
 - przyjęcie strategii prowadzenia badań monitorujących (lokalnych i globalnych badań krótko- i długoterminowych).
- Prace projektowe:
 - analiza teoretyczna konstrukcji;
 - projekt struktury systemu monitorowania, wraz z określeniem rodzaju mierzonych wielkości stanowiących podstawę identyfikacji parametrów charakterystyk pracy konstrukcji;
 - szczegółowy projekt systemu monitorowania.



Rys. 4. Etapy planowania i realizacji procesu monitorowania obiektów [1]

Wskazałem podstawowe kryteria, które powinny być uwzględniane w trakcie opracowywania koncepcji i projektowania badań monitorujących, a także scharakteryzowałem czynniki decydujące o efektywności systemów wykorzystywanych w warunkach eksploatacyjnych. Omówiłem proponowaną strukturę funkcjonalno-użytkową systemów do obserwacji obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych z przedstawieniem klasyfikacji podstawowych cech funkcjonalnych

oraz parametrów technicznych projektowanych systemów. Szczegółowo przedstawiłem najistotniejsze zagadnienia procesu projektowania systemu, z uwzględnieniem doboru aparatury pomiarowo-rejestrującej oraz metod akwizycji, transmisji, przetwarzania i udostępniania danych pomiarowych.

Po zakończeniu prac projektowych system monitorujący jest instalowany na obiekcie i rozpoczyna się jego użytkowanie. Proces ten można podzielić na kilka etapów, tj:

1. Fizyczną instalację wszystkich komponentów systemu na obiekcie mostowym.
2. Przeprowadzenie testów sprawdzających cały system.
3. Rozpoczęcie eksploatacji systemu po uzyskaniu pozytywnych wyników testów sprawdzających.
4. Prowadzenie działań utrzymaniowych określonych w projekcie systemu.
5. Modyfikację systemu monitorującego i/lub teoretycznego modelu obiektu wykorzystywanego do analizy wyników z uwzględnieniem danych doświadczalnych.

W rozdziale 7 zaproponowałem dwie główne strategie sensorycznych badań monitorujących konstrukcji mostowych w warunkach eksploatacyjnych:

- Strategię cyklicznych, krótkookresowych badań odpowiedzi dynamicznej konstrukcji na obciążenia użytkowe z jednoczesnym uwzględnieniem wpływu innych oddziaływań (głównie środowiskowych) – krótkoterminowy monitoring w warunkach eksploatacyjnych.
- Strategię długookresowych pomiarów monitorujących odpowiedzi fizycznej (statycznej i dynamicznej) i/lub chemicznej konstrukcji, będącej wynikiem obciążeń użytkowych i oddziaływań środowiskowych, a także procesów degradacji – długoterminowy monitoring w warunkach eksploatacyjnych.

Decyzja o wyborze odpowiedniej dla danego obiektu strategii wymaga każdorazowo szczegółowej analizy z uwzględnieniem celów badań, rodzaju i natury monitorowanych procesów, a także specyfiki monitorowanego obiektu mostowego.

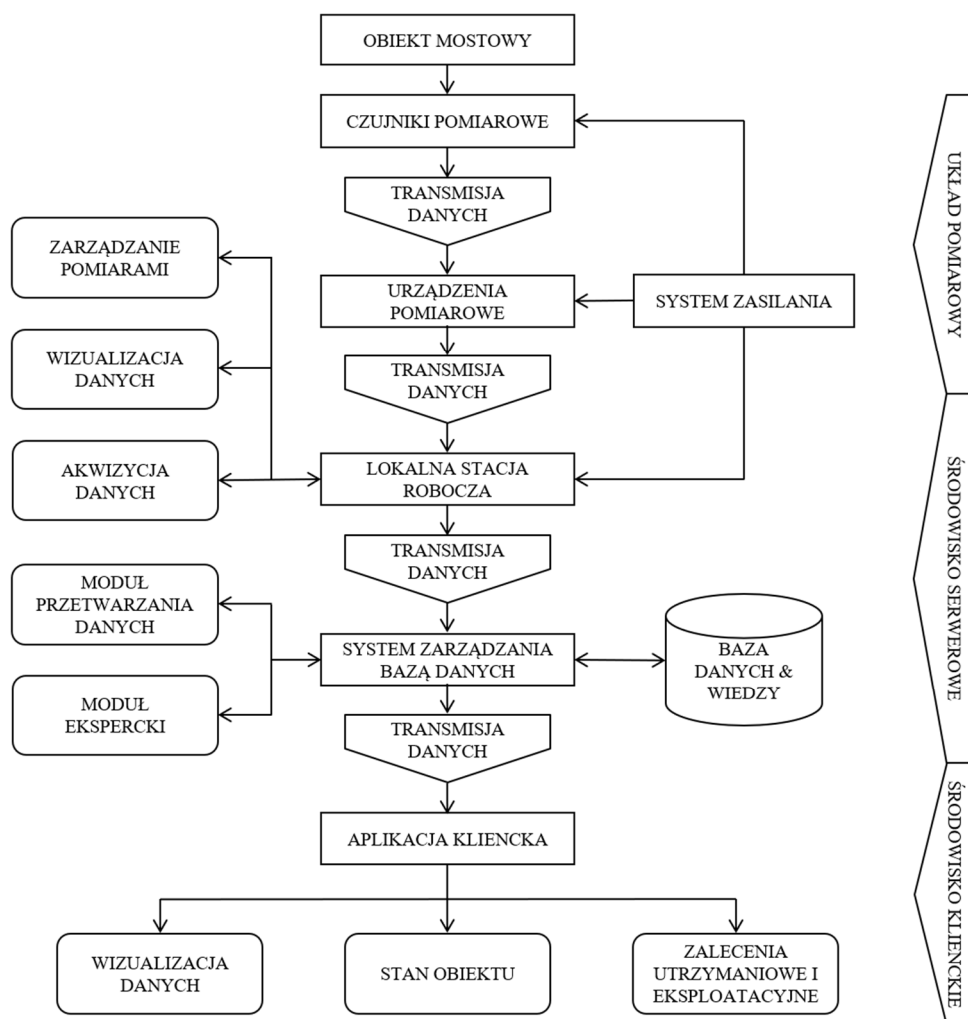
Strategia systematycznych (cyklicznych) badań krótkoterminowych w warunkach eksploatacyjnych wykazuje bardzo duży potencjał w ocenie bieżącej kondycji istniejących obiektów mostowych z uszkodzeniami, których skutkiem jest ograniczenie przydatności do użytkowania. Cyklicznie prowadzone sesje badań monitorujących umożliwiają m.in.:

- pełniejszą identyfikację stopnia uszkodzenia konstrukcji;
- walidację modelu obliczeniowego wykorzystywanego w analizach teoretycznych;
- określenie wpływu uszkodzeń na odpowiedź konstrukcji.

Pozwala to na bardziej precyzyjne określenie parametrów użytkowych obiektu, w tym na ocenę jego rzeczywistej nośności oraz określenie niezbędnego zakresu działań remontowo-utrzymaniowych. Na potrzeby opracowania strategii badań krótkookresowych przeprowadziłem badania doświadczalne 21 obiektów mostowych w warunkach normalnej eksploatacji, z uwzględnieniem obiektów o znaczeniu historycznym i o największych w kraju rozpiętościach przęsła (np. Most Rędziański we Wrocławiu, Most Grunwaldzki we Wrocławiu, most przez Wisłę w Puławach, most przez Wartę w ciągu autostrady A2, mosty przez Narew w Ostrołęce, most przez San w Przemyśle, Most Wyszehradzki w Pradze).

Zasadniczym celem strategii długoterminowych badań monitorujących jest identyfikacja i obserwacja niekorzystnych zjawisk (procesów degradacyjnych i uszkodzeń konstrukcji) zachodzących w konstrukcji w dłuższej perspektywie. Monitoring długoterminowy powinien być źródłem bieżącej wiedzy o kondycji i warunkach pracy obiektu w celu zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa jego eksploatacji oraz wspomagania procesów zarządzania zarówno

eksploatacją, jak i utrzymaniem. W badaniach długoterminowych istotne jest zapewnienie pełnej automatyzacji wszystkich czynności z wymaganą niezawodnością. Ogólny schemat funkcjonalno-użytkowy systemu do długotrwałej obserwacji zachowanie się konstrukcji zaprezentowano na rys. 5.

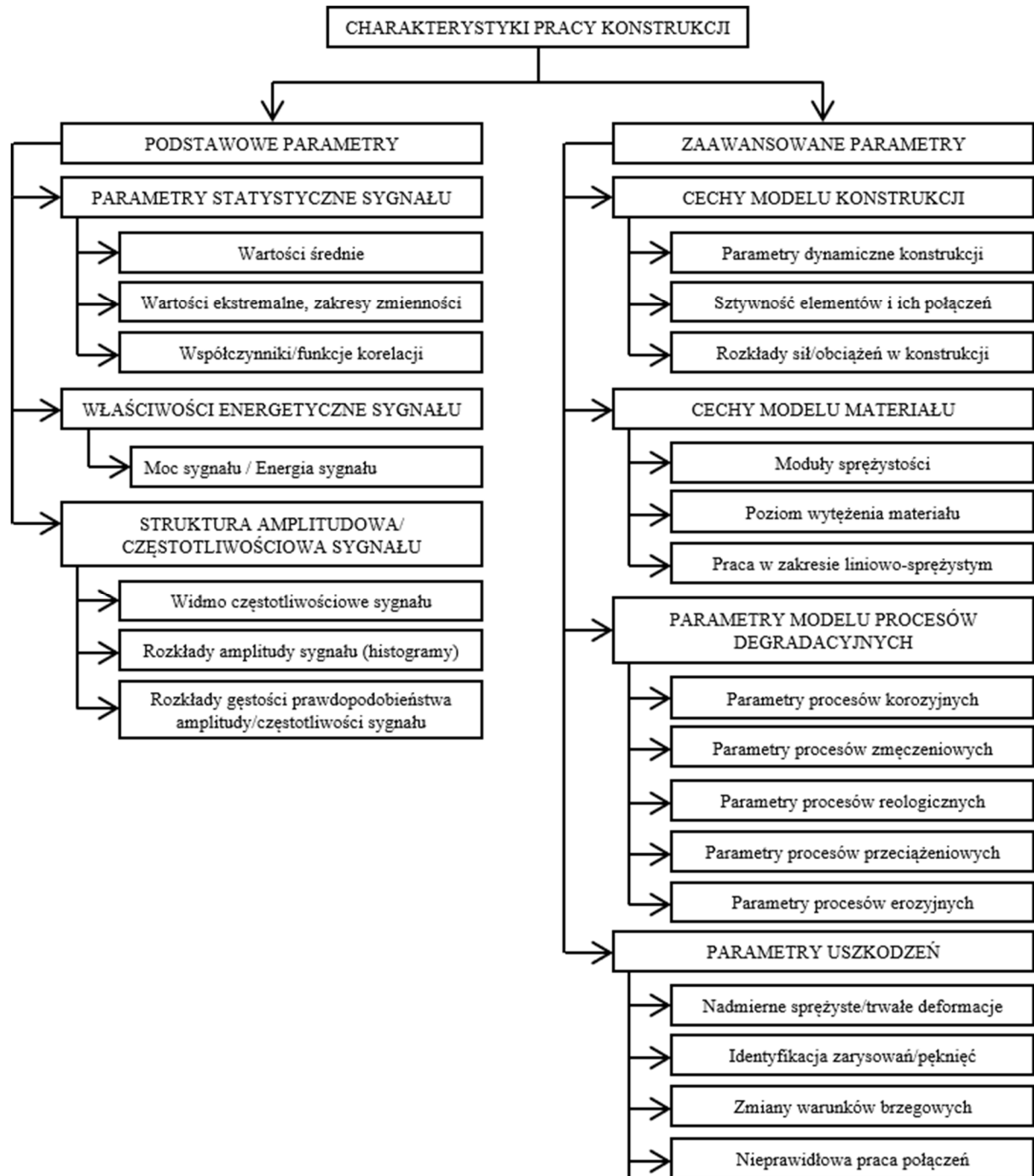


Rys. 5. Struktura funkcjonalno-użytkowa systemu do długotrwałej obserwacji obiektów mostowych [1]

W latach 2018–2021, w ramach prac nad strategią długoterminowych badań monitorujących, opracowałem i wdrożyłem na potrzeby Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad pierwszy w Polsce system monitoringu mostu, w którym do pomiarów wielkości fizycznych charakteryzujących obiekt i środowisko wykorzystane zostały zaawansowane, światłowodowe techniki FBG (ang. *fiber Bragg grating*). Opracowana metodyka badań i zastosowane techniki pomiarowe wykazują szczególną przydatność w monitorowaniu niekorzystnych zjawisk (procesów degradacyjnych i uszkodzeń) zachodzących w mostach z betonu sprężonego o znacznej rozpiętości przęsł.

W opracowanej metodyce zakłada się, że identyfikacja i obserwacja zmian zachodzących w obiekcie może być realizowana przez systematyczną ocenę zmian wrażliwych na uszkodzenia charakterystyk pracy konstrukcji, wyznaczanych na podstawie danych pomiarowych w trakcie procesu monitorowania. Dlatego jednym z najbardziej istotnych etapów wdrażania systemu monitoringu sensorycznego obiektów mostowych jest dobór odpowiednich parametrów, tj. charakterystyk pracy konstrukcji (ang. *performance indicators*), stanowiących podstawę zobiektywizowanej oceny kondycji obiektu. Klasyfikację i propozycję rozwiązań w tym zakresie przedstawiłem w podrozdział 7.3.2 monografii. Charakterystyki te (patrz rys. 6), obliczane na

podstawie wartości wielkości pomierzonych za pomocą algorytmów przetwarzania wstępnego, podstawowego i zaawansowanego (patrz rys. 3), mogą stanowić parametry reprezentujące cechy zarówno samej konstrukcji, jak i środowiska jej pracy. Akwizycja i analiza tych parametrów w trakcie badań powinna umożliwiać realizację celów monitorowania. Szczególną przydatność w analizie charakterystyk pracy konstrukcji gromadzonych w trakcie eksploatacji obiektu wykazują metody z obszaru inteligencji obliczeniowej, które krótko omówiono w podrozdział 6.6.1 monografii.



Rys. 6. Etapy planowania i realizacji procesu monitorowania obiektów [1]

Opracowana metodyka monitoringu sensorycznego obiektów mostowych może być z powodzeniem stosowana w przypadku wszystkich typów konstrukcji mostowych, a także innych rodzajów konstrukcji budowlanych. Jej zastosowanie wymaga jednak w każdym przypadku pewnej

indywidualizacji szczegółowych rozwiązań (np. w zakresie doboru metod i technik badań, rejestracji, przetwarzania i analizy wyników), ze szczególnym uwzględnieniem rodzaju badanego obiektu, zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i materiałowych. Rozwiązania zaproponowane przeze mnie mogą być szczególnie przydatne w diagnostyce i monitorowaniu eksploatowanych od wielu lat obiektów mostowych, wykazujących obniżoną przydatność do użytkowania (np. spowodowaną uszkodzeniami).

4.2.10. Długoterminowe badania monitorujące na przykładzie mostu sprzężonego z zarysowaniami przęseł (rozdział 8 monografii [1])

Długoterminowy monitoring sensoryczny obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych obejmuje rejestrację, analizę i wykrywanie zmian odpowiedzi (fizycznej i/lub chemicznej) konstrukcji na oddziaływania w warunkach użytkowania obiektu, przeprowadzane długookresowo za pomocą elektronicznego systemu kontrolno-pomiarowego zainstalowanego na obiekcie. Zasadniczym celem jest identyfikacja (wykrycie, określenie rodzaju, charakterystyka) i obserwacja niekorzystnych zjawisk zachodzących w konstrukcji (procesy degradacyjne i uszkodzenia konstrukcji), mających istotny wpływ na kondycję obiektu. Systemy przeznaczone do prowadzenia tego rodzaju monitoringu powinny być w pełni zautomatyzowane i wykonywać wszystkie czynności z wymaganą niezawodnością.

Implementacja elektronicznych systemów do długoterminowej obserwacji zmian zachodzących w konstrukcji wydaje się szczególnie uzasadniona w przypadku dużych obiektów mostowych o znacznych rozpiętościach przęseł i/lub innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych i technologicznych. W sytuacji, gdy tego rodzaju obiekty wykazują dodatkowo uszkodzenia obniżające ich przydatność do użytkowania, wdrożenie systemu staje się niezbędnym warunkiem racjonalnego zarządzania ich utrzymaniem i eksploatacją.

Każdy system monitoringu sensorycznego powinien zostać zaprojektowany indywidualnie, z uwzględnieniem szczegółowych celów badań, problemów występujących w rozpatrywanej konstrukcji i różnego rodzaju ograniczeń. Proponowaną ogólną metodykę i procedurę realizacji procesu sensorycznego monitorowania obiektów mostowych omówiłem w podrozdziale 7.1 monografii. Typowe etapy związane z planowaniem, projektowaniem i implementacją omawianego procesu, a także kolejność poszczególnych działań i wzajemne relacje między nimi zobrazowałem na rys. 4 (rys. 7.1 w monografii).

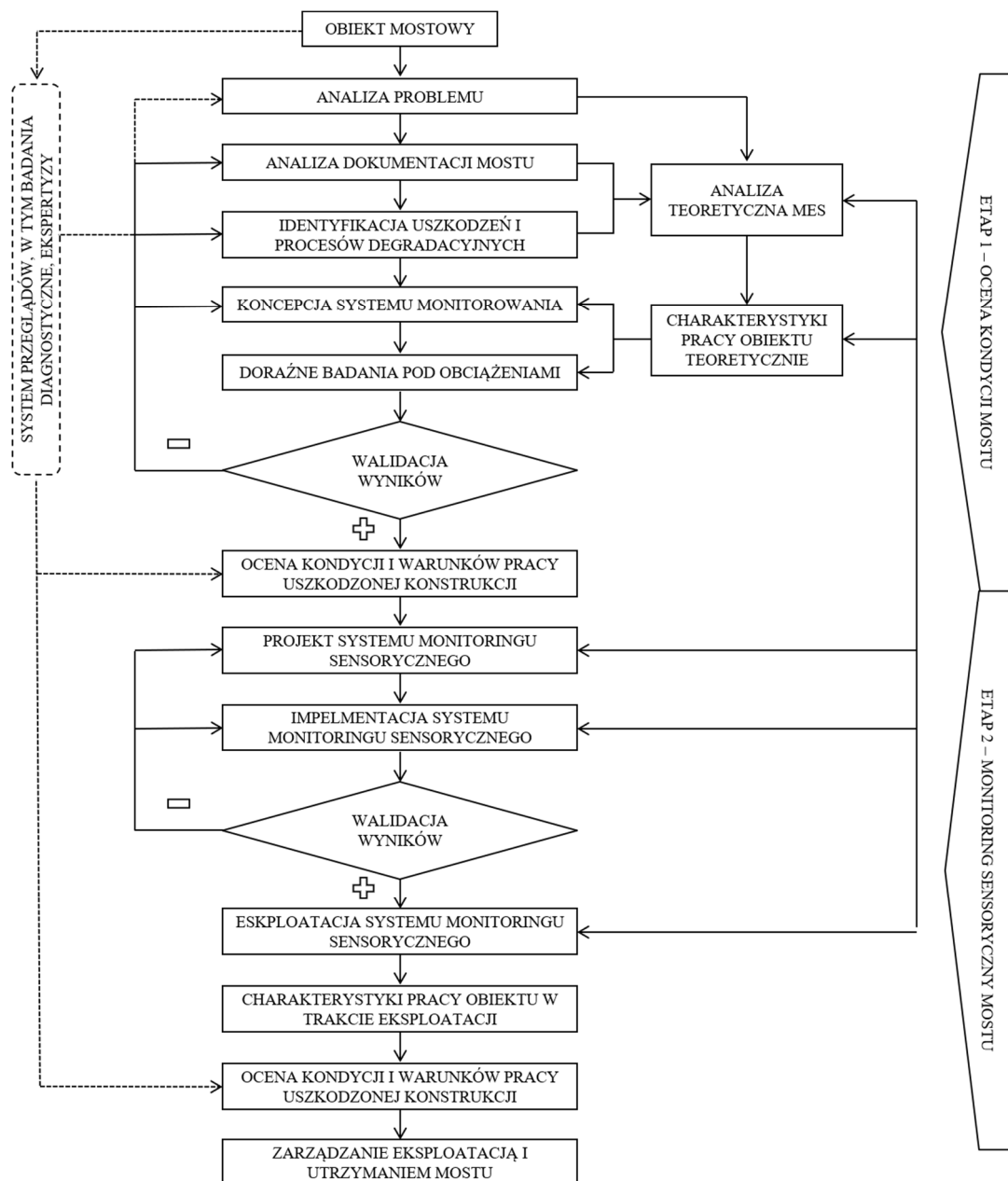
System monitoringu, który ma być zaimplementowany na obiekcie wykazującym istotne uszkodzenia, wymaga rozszerzenia zakresu dotyczących go działań (rys. 4) o dokładniejszą diagnostykę konstrukcji na etapie planowania system. Autorską procedurę wdrażania i eksploatacji elektronicznych systemów długoterminowego monitoringu sensorycznego istniejących konstrukcji z uszkodzeniami skutkującymi obniżeniem parametrów użytkowych przedstawiłem na rys. 7 (rys. 8.1 w monografii). Cały proces podzieliłem na:

- Etap 1: ocenę kondycji obiektu – dokonywaną na podstawie systematycznych i specjalnych badań diagnostycznych oraz analiz teoretycznych MES. Istotnym elementem procedury jest doświadczalna identyfikacja warunków pracy uszkodzonej konstrukcji i weryfikacja podstawowych założeń dotyczących systemu monitorowania na podstawie wyników doraźnych badań pod obciążeniami.
- Etap 2: podstawowe działania – związane z projektowaniem, instalacją, testowaniem, eksploatacją i utrzymaniem systemu monitoringu sensorycznego (szczegółowo opisane w rozdziale 7 monografii).

Długoterminowy monitoring sensoryczny obiektów mostowych może polegać na systematycznej ocenie zmian w czasie charakterystyk pracy konstrukcji (rys. 6; opis w podrozdziale 7.3.2 monografii), wrażliwych na uszkodzenia i wyznaczanych na bieżąco, na podstawie danych pomiarowych pozyskiwanych w trakcie procesu monitorowania. Ocena i prognozowanie kondycji

obiektu są dokonywane na podstawie projektowanych dla danej konstrukcji algorytmów obliczeniowych, które dzięki historii informacji zgromadzonych przez system pozwolą na identyfikację ewentualnych zmian cech układu konstrukcyjnego. Algorytmy te powinny umożliwiać na bieżąco:

- porównywanie wartości gromadzonych parametrów z wartościami progowymi;
- identyfikację trwałych zmian wartości określanych parametrów w jednocześnie powtarzalnych warunkach pracy konstrukcji, świadczących o powstaniu uszkodzeń;
- analizę wartości parametrów bezpośrednio związanych z postępującą degradacją obiektu, np. ze zmęczeniem materiału w konstrukcjach stalowych lub powstawaniem zarysowań i mikro zarysowań w betonie;
- prognozowanie procesów degradacji, szacowanie trwałości obiektu.

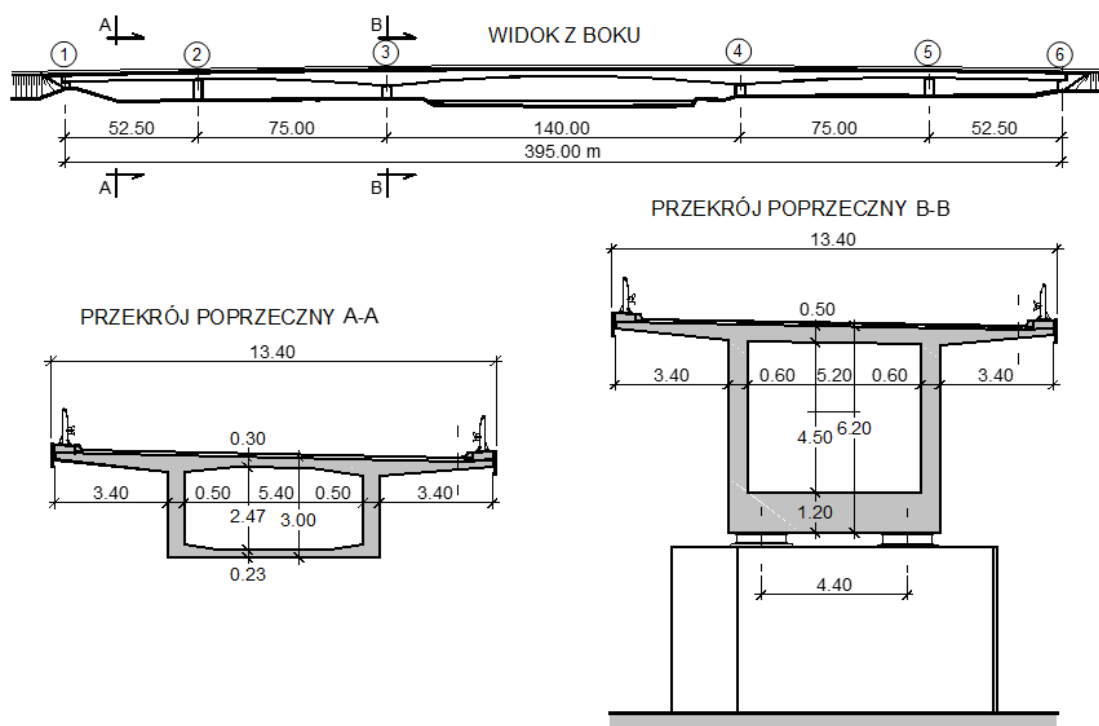


Rys. 7. Schemat procedury wdrażania i eksploatacji systemów długoterminowego monitoringu sensorycznego obiektów mostowych z uszkodzeniami [1]

W identyfikacji trwałych zmian zachodzących w konstrukcji na podstawie wyników długoterminowego monitoringu sensorycznego wykorzystywane są głównie metody identyfikacyjne, nazywane w literaturze przedmiotu metodami *data-based* (patrz podrozdz. 6.6.5 monografii). Podstawą tych metod jest analiza danych gromadzonych w dłuższym okresie za pomocą odpowiednio dobranych algorytmów przetwarzania i interpretacji. Szczególną przydatność w analizie charakterystyk pracy konstrukcji gromadzonych w trakcie jej eksploatacji wykazują metody z obszaru inteligencji obliczeniowej (patrz podrozdz. 6.6.1 monografii).

W badaniach długoterminowych należy stosować techniki pomiarowe zapewniające stabilność cech metrologicznych układu pomiarowego w trakcie całego procesu monitorowania, w szczególności techniki światłowodowe. Duża stabilność tych technik umożliwia bowiem identyfikację w konstrukcji zmian, które powodowane są aktywnością procesów degradacji, a skutkują powstawaniem uszkodzeń.

Doświadczenia z pilotażowego wdrożenia strategii badań długoterminowych zaprezentowałem w rozdziale 8 monografii na przykładzie mostu przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu, wykonanego z betonu sprężonego i wymagającego pogłębionej, ciągłej diagnostyki z uwagi na zły stan techniczny (znaczące zarysowania betonu konstrukcji przęseł).



Rys. 8. Ukształtowanie geometrii i podstawowe wymiary mostu przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu, na którym została pilotażowo wdrożona opracowana przeze mnie metodyka długoterminowych badań monitorujących [12]

Opracowana metodyka długoterminowych badań monitorujących została pilotażowo wdrożona na jednym z największych mostów betonowych w Polsce. Obiekt jest konstrukcją belkową, wykonaną z betonu sprężonego w układzie statycznym wieloprzęsłowym, ciągłym. Składa się z pięciu przęseł o rozpiętości: 53,82 m + 75,00 m + 140,00 m + 75,00 m + 53,82 m. Ukształtowanie i podstawowe wymiary konstrukcji pokazano na rys. 8, a ogólny widok przęsła nurtowego na rys. 9. Charakterystyczną cechą obiektu jest znaczny ukos podparcia przęseł na podporach, wynoszący 49°. W betonie przęsła rozpatrywanego obiektu są istotne uszkodzenia w postaci narastających w czasie zarysowań.

Wdrożony – przez mnie, w kwietniu 2019 r. – pilotażowy system monitorujący jest pierwszym w Polsce systemem do długoterminowej, ciągłej obserwacji fizycznej odpowiedzi konstrukcji (statycznej oraz dynamicznej) na oddziaływania eksploatacyjne, z uwzględnieniem efektów powodowanych aktywnością procesów degradacji. W systemie tym do monitorowania obiektu mostowego zastosowano po raz pierwszy w kraju światłowodowe techniki pomiarowe FBG. W rozdziale 8 monografii zaprezentowałem i omówiłem główne etapy wdrażania systemu, a także reprezentatywne wyniki badań monitorujących.



Rys. 9. Widok ogólny przęsła nurtowego mostu [1]

4.2.11. Krótkoterminowe badania monitorujące na przykładzie mostu o konstrukcji zespolonej, z trwałymi deformacjami przęseł (rozdział 9 monografii [1])

Instalowanie stałych systemów monitoringu na wszystkich obiektach, które z uwagi na obniżone parametry użytkowe (np. spowodowane uszkodzeniami) wymagają pogłębionej diagnostyki, jest ekonomicznie nieuzasadnione. Dlatego w monografii prezentowana jest również strategia krótkoterminowych badań monitorujących obiektów w warunkach eksploatacyjnych, wykonywanych w formie cyklicznych pomiarów całodobowych, w różnych warunkach eksploatacyjnych. Badania te dotyczą z reguły rejestracji i analizy dynamicznego zachowania się konstrukcji pod obciążeniami użytkowymi, z jednoczesnym uwzględnieniem wpływów środowiskowych i ewentualnych efektów procesów degradacyjnych.

Strategia systematycznych (cyklicznych) badań krótkoterminowych w warunkach eksploatacyjnych ma bardzo duży potencjał w ocenie istniejących obiektów mostowych z uszkodzeniami, których skutkiem jest ograniczenie przydatności całego obiektu do użytkowania. Ten rodzaj badań monitorujących jest również niezwykle cennym narzędziem w ocenie stanu i warunków dalszej eksploatacji obiektów o znaczeniu historycznym i o największej w kraju rozpiętości przęseł.

Cyklicznie prowadzone sesje badań monitorujących umożliwiają m.in.:

- pełniejszą identyfikację stopnia uszkodzenia konstrukcji,
- walidację modelu obliczeniowego wykorzystywanego w analizach teoretycznych,
- określenie wpływu uszkodzeń na odpowiedź konstrukcji,

co z kolei pozwala na bardziej precyzyjne określenie parametrów użytkowych obiektu, w tym na ocenę jego nośności użytkowej oraz określenie niezbędnego zakresu działań remontowo-utrzymawczych.

Autorską procedurę realizacji krótkoterminowego monitoringu sensorycznego na potrzeby pogłębionej diagnostyki obiektu mostowego z uszkodzeniami zaprezentowałem na rys. 10. Proponowany program obejmuje:

- Analizę problemu oraz określenie celu i zakresu badań monitorujących.
- Analizę dokumentacji projektowej i eksploatacyjnej obiektu oraz przeprowadzenie szczegółowej identyfikacji uszkodzeń.
- Opracowanie modeli numerycznych i przeprowadzenie kompleksowych, symulacyjnych analiz teoretycznych MES konstrukcji z uszkodzeniami, w tym:
 - określenie wpływu uszkodzeń na zachowanie się dynamiczne konstrukcji pod obciążeniami użytkowymi;
 - identyfikacja teoretycznych wartości charakterystyk pracy konstrukcji.
- Opracowanie programu badań monitorujących zachowanie się mostu w warunkach eksploatacyjnych.
- Przeprowadzenie serii cyklicznych, krótkoterminowych badań monitorujących zachowanie się konstrukcji w warunkach eksploatacyjnych.
- Ocenę warunków pracy uszkodzonej konstrukcji na podstawie porównania wyników badań i analiz oraz ocenę kondycji uszkodzonej konstrukcji obejmującą:
 - ocenę stanu technicznego konstrukcji;
 - ocenę parametrów użytkowych;
 - ocenę trwałości obiektu w kontekście zaawansowania zjawisk zmęczeniowych.
- Określenie warunków bezpiecznej eksploatacji konstrukcji, w tym określenie zakresu niezbędnych działań technicznych pozwalających na zmniejszenie wpływu uszkodzeń na pracę konstrukcji.
- Przeprowadzenie kontrolnych sesji krótkoterminowych badań monitorujących zachowanie się konstrukcji w warunkach eksploatacyjnych.
- Ocenę warunków pracy i kondycji obiektu po wykonaniu zabiegów remontowo-utrzymawczych.
- Zalecenia w zakresie zarządzania eksploatacją i utrzymaniem mostu.

Zaprezentowany w rozdziale 9 monografii przykład wdrożenia opracowanej metodyki krótkoterminowych badań monitorujących w warunkach eksploatacyjnych dotyczy autostradowego mostu o konstrukcji zespolonej (stalowo-betonowej) z trwałymi deformacjami przeszł. Ukształtowanie i podstawowe wymiary konstrukcji mostu pokazano na rys. 11. Schemat statyczny dźwigarów głównych mostu jest belkowy, 7-przęsłowy, z pozornym uciągnięciem konstrukcji w przekrojach podporowych za pomocą cienkiej płyty żelbetowej. Każde z przęseł składa się z pięciu dźwigarów blachownicowych o stałej wysokości 2,00 m, które zostały zespolone z płytą żelbetową o grubości około 26–30 cm. Konstrukcja zespolona każdego przęsła wykazuje uszkodzenia w postaci nadmiernych, trwałych ugięć, przekraczających w większości przęseł 10 cm.

4.2.12. Podsumowanie i kierunki dalszych badań (rozdział 10 monografii)

W Polsce nie ma publikacji naukowo-technicznej, która kompleksowo, jednoznacznie i z uwzględnieniem aktualnej wiedzy tematycznej przedstawiałaby diagnozowanie i ocenę stanu obiektów mostowych z wykorzystaniem systemów monitoringu sensorycznego. Nie istnieją również szczegółowe procedury, wytyczne, instrukcje dotyczące monitoringu sensorycznego obiektów mostowych.

Prezentowana monografia jest pierwszym w Polsce kompleksowym opracowaniem na temat monitoringu sensorycznego obiektów mostowych. Przedstawia, w sposób syntetyczny i możliwie całościowy, kluczowe, zarówno teoretyczne, jak i praktyczne, zagadnienia z zakresu diagnostyki obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji prowadzonej z wykorzystaniem systemów monitoringu sensorycznego. W opracowaniu zostały usystematyzowane dotychczasowe doświadczenia krajowe w tym zakresie, w tym również moje własne, w powiązaniu z doświadczeniami badaczy z innych krajów oraz zaleceniami międzynarodowymi (np. zaleceniami International Federation for Structural Concrete *fib* w zakresie badań i oceny istniejących konstrukcji betonowych [33], opracowanymi przy moim znaczącym wkładzie).

Głównym celem pracy było stworzenie jednolitej, kompleksowej metodyki monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych za pomocą systemów elektronicznych, umożliwiających określanie odpowiedzi fizycznej i/lub chemicznej konstrukcji na różnego rodzaju oddziaływania, analizę jej pracy w kontekście oceny warunków bezpiecznej eksploatacji obiektu, a także identyfikację niekorzystnych zjawisk zachodzących w konstrukcji. Opracowana metodyka może być z powodzeniem stosowana we wszystkich typach konstrukcji mostowych, a także innych rodzajach konstrukcji budowlanych. Zaproponowane rozwiązania mogą być szczególnie przydatne w diagnostyce i monitorowaniu eksploatowanych od wielu lat obiektów mostowych, wykazujących obniżoną przydatność do użytkowania (np. spowodowaną uszkodzeniami).

Szczegółowy zakres zrealizowanych prac naukowo-badawczych, jednocześnie stanowiących mój indywidualny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport obejmował:

- Uściślenie i ujednoczenie terminologii związanej z badaniami monitorującymi obiektów mostowych oraz oceną ich stanu na podstawie wyników tych badań – rozdziały 1 i 2 oraz wykaz terminów i pojęć zamieszczony w monografii.
- Sklasyfikowanie, zestawienie i omówienie narzędzi wykorzystywanych do teoretycznych analiz obiektów mostowych, procedur badawczych, technologii i narzędzi pomiarowych, jak również algorytmów przetwarzania danych i ich analizy przydatnych w monitoringu sensorycznym konstrukcji mostowych – rozdziały 3–6 monografii.
- Opracowanie autorskiej metodyki monitorowania (monitoringu sensorycznego) obiektów mostowych poddanych oddziaływaniom eksploatacyjnym, obejmującej procedury projektowania, wdrożenia, eksploatacji, przetwarzania, analizy i udostępniania wyników pomiarów oraz ich wykorzystania w ocenie parametrów technicznych i użytkowych obiektu – rozdział 7 monografii.
- Przedstawienie pierwszych w Polsce zastosowań proponowanej metodyki badań w monitorowaniu obiektów mostowych, poddanych oddziaływaniom eksploatacyjnym (statycznym i dynamicznym) – rozdziały 8 i 9 monografii.

Syntetyczne podsumowania zakresu zrealizowanych prac oraz ogólne wnioski zamieściłem na końcach poszczególnych rozdziałów.

Zaproponowana w pracy metodyka diagnostyki oraz przedstawione rozwiązania mogą stanowić podstawę dalszych badań w dziedzinie elektronicznych systemów monitoringu sensorycznego, wspomagających zarządzanie eksploatacją i utrzymaniem obiektów mostowych. Do problemów wymagających najpilniejszego rozwiązania należy zaliczyć opracowanie

specjalistycznych rozwiązań dla różnych rodzajów konstrukcji (np. stalowych, z betonu sprężonego,ciągnowych), w szczególności:

- Rozwiązań umożliwiających bardziej precyzyjne monitorowanie procesów degradacyjnych materiału i prognozowanie zmian kondycji obiektu.
- Wzorcowych wymagań dla systemów monitoringu sensorycznego.
- Procedur postępowania w przypadku zagrożenia bezpieczeństwa lub awarii, z uwzględnieniem:
 - rodzaju systemu monitoringu (mierzonych wielkości, układów pomiarowych, częstości próbkowania, systemów transmisji danych);
 - rodzaju i poziomu zagrożenia bezpieczeństwa obiektu;
 - układu statycznego, rozwiązań i materiałów konstrukcyjnych zastosowanych w obiekcie mostowym;
 - znaczenia obiektu dla funkcjonowania infrastruktury transportowej;
 - warunków środowiskowych związane z lokalizacją obiektu.

W zakresie rozwoju algorytmów przetwarzania, analizy i interpretacji danych pomiarowych za najważniejsze zadania należy uznać:

- Doskonalenie technik przetwarzania danych pomiarowych i metod reprezentacji wiedzy o konstrukcji i środowisku jej użytkowania.
- Rozszerzenie zastosowań metod inteligencji obliczeniowej oraz systemów uczących się.
- Wykorzystanie wyników monitorowania w wymagających wsparcia działaniach w ramach procesu zarządzania eksploatacją i utrzymaniem obiektów mostowych, tj. w:
 - optymalizacji częstości i zakresu przeglądów obiektów mostowych;
 - diagnozowaniu parametrów i przyczyn uszkodzeń;
 - wspomaganie interpretacji wyników badań.

Należy podkreślić, że rozwój inżynierii systemów monitoringu sensorycznego jest ściśle związany z rozwojem technologii pomiarowych oraz technik komputerowych, zarówno w zakresie sprzętu, jak i oprogramowania. Na podstawie zgromadzonej w monografii aktualnej wiedzy można przewidywać, że strategicznymi kierunkami rozwoju będą w najbliższych latach:

- Doskonalenie technologii pomiarowych w kontekście pozyskiwania lepszej jakości danych pomiarowych, np.:
 - rozwój światłowodowych technologii pomiarowych DFOS (ang. *distributed fiber optic sensors*), umożliwiających monitorowanie odkształceń, przemieszczeń, temperatury i wilgotności, a pośrednio również zarysowań, sztywności i parametrów dynamicznych elementów konstrukcji w sposób geometrycznie ciągły, wzdłuż całej długości włókna pomiarowego;
 - rozwój technik rejestracji i przetwarzania obrazów (ang. *image-based techniques, vision-based techniques*), w których wykorzystywany jest obraz zarejestrowany za pomocą kamer cyfrowych o wysokiej rozdzielczości.
- Wykorzystanie narzędzi rzeczywistości wirtualnej (szczegółowe omówienie np. w [34]).
- Powszechne zastosowania systemów monitoringu sensorycznego, umożliwiających monitorowanie obiektu w całym okresie jego istnienia (budowy i użytkowania).
- Integracja systemów monitoringu sensorycznego z systemami sterującymi parametrami konstrukcji w zależności od stanu obiektu i wymaganych parametrów użytkowych (np. sterowania poziomem sprężenia).

4.3. Osiągnięcie projektowo-technologiczne

4.3.1. Sformułowanie osiągnięcia

W latach 2020–2022, z uwagi na systematycznie pogarszający się stan konstrukcji mostu przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu, zaprojektowałem i wdrożyłem na potrzeby GDDKiA w pełni profesjonalny system stałego monitoringu sensorycznego. System ten stanowi zaawansowane, oryginalne narzędzie do oceny obiektu – dokonywanej w czasie rzeczywistym – w zakresie bezpieczeństwa eksploatacji i kondycji mostu, wspomagając w ten sposób procesy zarządzania jego utrzymaniem i eksploatacją. Realizacja ta stanowi praktyczne wykorzystanie opracowanej przeze mnie metodyki monitorowania obiektów mostowych z uszkodzeniami, umożliwiającej analizę ich pracy w warunkach eksploatacyjnych.

Tytuł zrealizowanego przeze mnie oryginalnego osiągnięcia projektowo-technologicznego, przedstawionego do oceny w świetle wymagań art. 219 ust. 1 pkt 2c ustawy o p. o s. w. i n., formułuję następująco:

Zaprojektowanie i wdrożenie systemu ciągłego monitoringu sensorycznego mostu nad Odrą w Kędzierzynie-Koźlu w warunkach eksploatacyjnych z zastosowaniem światłowodowych technik pomiarowych.

Dokumentację osiągnięcia stanowią raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego (WBLiW) Politechniki Wrocławskiej (PWt) z przeprowadzanych prac:

1. **Mieszko Kużawa (projektant)**, Jan Bień (sprawdzający): Projekt systemu do długotrwałej obserwacji przęsła mostu nad rzeką Odrą w ciągu drogi krajowej nr 40b w km 3+144 w miejscowości Kędzierzyn-Koźle. Raport WBLiW Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 12/2020, Wrocław, marzec 2020 r.
2. **Mieszko Kużawa (główny wykonawca)**, Jan Bień: Wdrożenie docelowego elektronicznego układu pomiarowego do długotrwałej obserwacji mostu nad rz. Odrą w ciągu drogi krajowej nr 40b w km 3+144 w miejscowości Kędzierzyn-Koźle. Raport WBLiW Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 41/2022, Wrocław, grudzień 2022 r.

4.3.2. Główne cele, założenia i etapy prac

Kompleksowy system ciągłego monitoringu sensorycznego mostu przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu został zaprojektowany i zaimplementowany z wykorzystaniem efektów pilotażowych prac naukowo-badawczych nad zastosowaniami światłowodowych technik pomiarowych FBG w monitorowaniu obiektów mostowych. Pełny opis zakresu i efektów prac naukowych związanych z wdrożeniem i eksploatacją pilotażowego systemu monitorującego przedstawiłem w rozdziale 8 monografii [1].

W docelowym systemie zastosowałem sprawdzone w badaniach pilotażowych techniki światłowodowe FBG (ang. *fiber Bragg grating*), które potwierdziły swoją przydatność w diagnostyce tego obiektu. Duża dokładność i stabilność parametrów metrologicznych technik światłowodowych FBG umożliwiła śledzenie zmian odpowiedzi fizycznej konstrukcji na oddziaływania w funkcji czasu, w tym odpowiedzi związanej z procesami degradacji.

Zasadniczym zadaniem docelowego systemu jest zapewnienie bieżących (w czasie rzeczywistym), kompleksowych informacji o zachowaniu się uszkodzonej konstrukcji w trakcie jej eksploatacji oraz informowanie użytkownika systemu o ewentualnych zmianach stanu obiektu. Szczegółowe cele i założenia funkcjonalno-użytkowe, które przyjąłem w projektowaniu docelowego systemu były następujące:

- Bieżąca ocena zachowania się uszkodzonej konstrukcji jest dokonywana na podstawie akwizycji, rejestracji, przetwarzania i analizy wielkości fizycznych charakteryzujących obiekt i jego środowisko.
- System rejestruje i analizuje bieżące zmiany niżej wymienione wielkości w wybranych punktach przęsła nurtowego:
 - zmiany rozwartości wybranych rys ścian konstrukcji przęsła nurtowego;
 - odkształcenia ścian konstrukcji przęsła nurtowego w obszarze niezarysowanym;
 - zmiany kątów obrotu przęsła nurtowego;
 - zmiany temperatury otoczenia dźwigara skrzynkowego.
- Ciągły pomiar wielkości umożliwia rejestrację odpowiedzi fizycznej konstrukcji:
 - w różnych warunkach środowiskowych;
 - w różnych warunkach obciążeń użytkowych – w trakcie rzeczywistego ruchu pojazdów po obiekcie;
 - w warunkach zachodzenia naturalnych zjawisk reologicznych.
- Odpowiedź konstrukcji na obciążenia i oddziaływania jest oceniana za pomocą indywidualnie predefiniowanych dla przedmiotowego mostu kryteriów, tj. wskaźników pracy obiektu, wraz ze wskazaniem wartości progowych tych parametrów, których przekroczenie powoduje przekazanie odpowiednich informacji zarządcy obiektu.
- Zapewniony jest zdalny dostęp do wyników pomiarów oraz zdalny nadzór nad urządzeniami zainstalowanymi w moście wraz z możliwością sterowania parametrami układu kontrolno-pomiarowego.
- Zapewniony jest łatwy fizyczny dostęp do wszystkich elementów systemu w celu ich kalibracji, modyfikacji lub ewentualnej wymiany.

Poniżej udokumentowałem główne etapy i wybrane efekty prac wdrożeniowych nad przedstawionym do oceny oryginalnym osiągnięciem projektowo-technologicznym. Realizacja przedsięwzięcia była zgodna z opracowaną przeze mnie metodyką planowania i realizacji procesu monitorowania obiektów mostowych (patrz rozdział 7 monografii [1]). Kolejność poszczególnych etapów prac wdrożeniowych była następująca:

- Zaprojektowanie systemu monitoringu sensorycznego z zastosowaniem światłowodowych technik pomiarowych FBG, obejmującego wszystkie zagadnienia.
- Prace laboratoryjne polegające na sprawdzeniu poprawności działania i przygotowaniu elektronicznego układu pomiarowego do zainstalowania na obiekcie.
- Instalacja, konfigurowanie, uruchomienie i testowanie docelowego układu pomiarowego na obiekcie, opracowanie instrukcji prowadzenia pomiarów oraz dokumentacji powykonawczej systemu zainstalowanego na obiekcie.
- Pełnienie stałego nadzoru naukowo-technicznego nad docelowym systemem, w tym:
 - wstępne pomiary monitorujące wraz z analizą i oceną wyników pomiarów;
 - kalibracja i pełna automatyzacja systemu pomiarowego FBG, w tym optymalizacja algorytmów przetwarzania danych i określanie indywidualnie predefiniowanych wskaźników pracy konstrukcji z uwzględnieniem wartości progowych;
 - prace utrzymaniowe i niezbędne korekty układu pomiarowego zapewniające jego poprawne funkcjonowanie;

- kompleksową analizę wyników monitorowania za pomocą systemu pomiarowego FBG, w całym okresie jego działania,
- systematyczna kompleksowa ocena kondycji mostu z wykorzystaniem danych z monitoringu inspekcyjnego i sensorycznego.

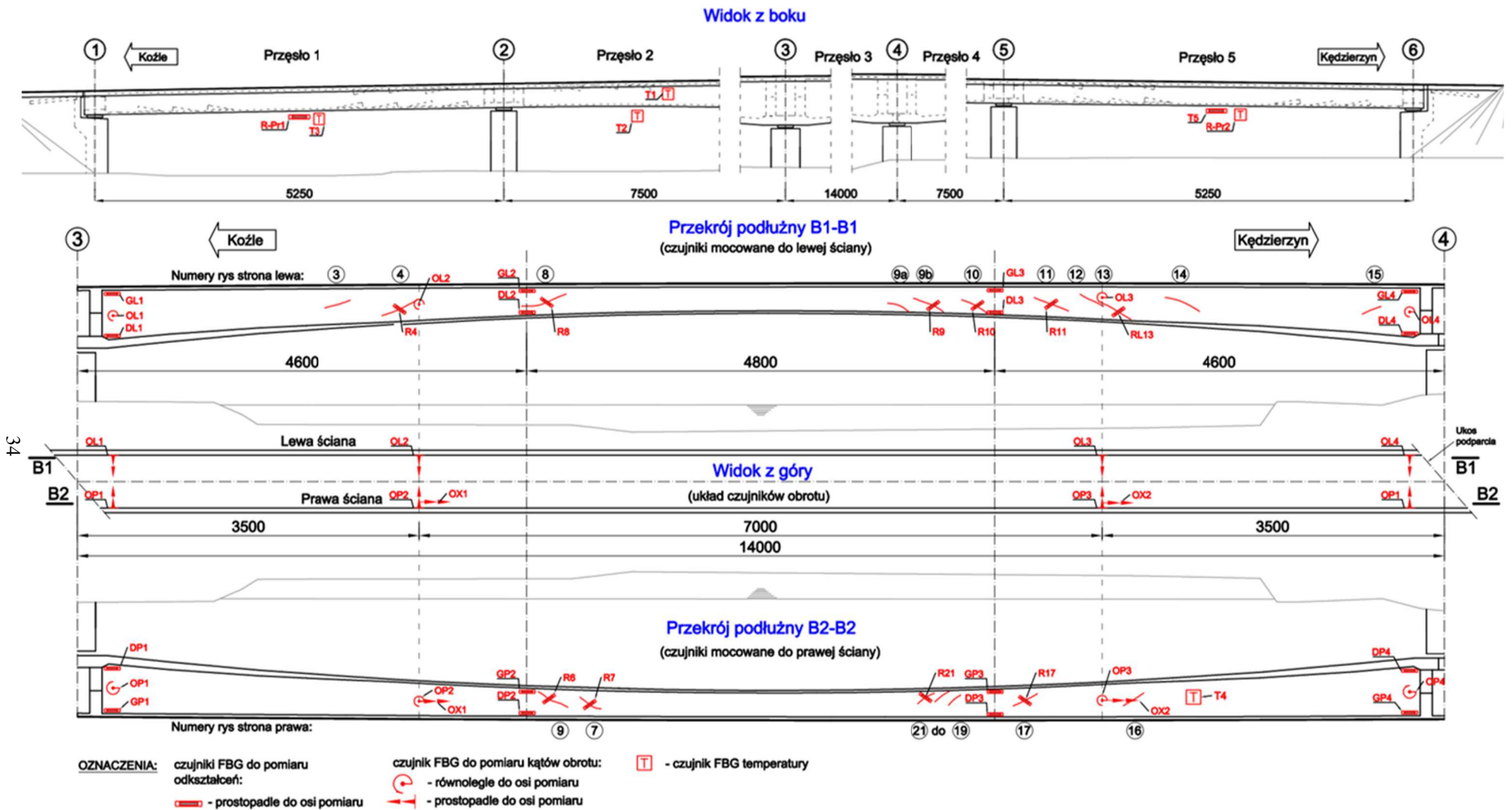
4.3.3. Układ pomiarowy zainstalowany na obiekcie

Kluczową część systemu monitorowania stanowi instalacja na obiekcie, w której skład wchodzi następujące grupy elementów:

- 1) Stacja robocza do obsługi pomiarów i innych urządzeń wchodzących w skład instalacji na obiekcie.
- 2) Oprogramowanie narzędziowe do konfigurowania aparatury oraz obsługi pomiarów.
- 3) Aparatura pomiarowa:
 - interrogator optyczny FBG (1 sztuka),
 - światłowodowe czujniki odkształceń FBG (28 sztuk),
 - światłowodowe czujniki pochylenia FBG (10 sztuk),
 - światłowodowe czujniki temperatury FBG (6 sztuk),
 - światłowodowe jednożyłowe przewody przyłączeniowe.
- 4) Szafa telekomunikacyjna wyposażona w urządzenia chłodzenia/ogrzewania, podtrzymywania zasilania (UPS) i urządzenia do prowadzenia ich monitoringu on-line (rys. 13).
- 5) Podsystem łączności zdalnej z instalacją na obiekcie.

Lokalizacja i numeracja czujników pomiarowych w docelowym systemie monitorowania mostu przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu pokazana jest na rys. 12.

Jak już wspomniałem, w układzie pomiarowym zastosowałem czujniki światłowodowe z siatką Bragga (czujniki typu FBG). Są to sensory, w których podstawowym elementem jest standardowy światłowód – cienkie włókno szklane przepuszczające światło w jego rdzeniu. Światłowodowa siatka Bragga to krótki segment światłowodu, który dzięki wykonanej w rdzeniu światłowodu strukturze z okresową/skokową zmianą współczynnika załamania światła odbija tylko światło o określonej długości fali – inne długości fali są przepuszczane. Zmiany długości fali świetlnej odbitej od siatki Bragga są wprost proporcjonalne do odkształcenia konstrukcji. Wyniki pomiarów z czujników FBG są odczytywane przy użyciu interrogatora optycznego.

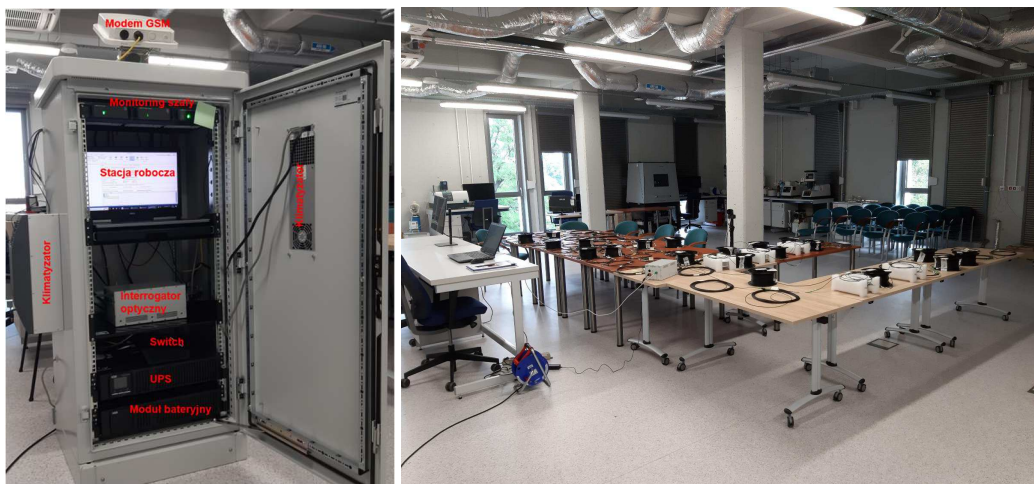


Rys. 12. Lokalizacja i numeracja czujników pomiarowych w systemie monitorowania mostu przez Odrę w Kędzierzynie-Koźlu

4.3.4. Prace laboratoryjne i montaż systemu na obiekcie

Wszystkie elementy systemu monitorowania przeznaczone do zainstalowania na obiekcie zostały sprawdzone i przygotowane do montażu w Pracowni Monitoringu Konstrukcji Inżynierskich (Laboratorium Badań Nano- i Mikrostruktur Materiałów Kompozytowych i Konstrukcji Inżynierskich) znajdującej się w centrum badawczym GEO-3EM Politechniki Wrocławskiej.

W warunkach laboratoryjnych dokonałem próbnego montażu i testowania wszystkich elementów docelowego układu pomiarowego. W toku prowadzonych prac przeprowadziłem również przeszkolenia członków zespołu wyznaczonych przez GDDKiA.

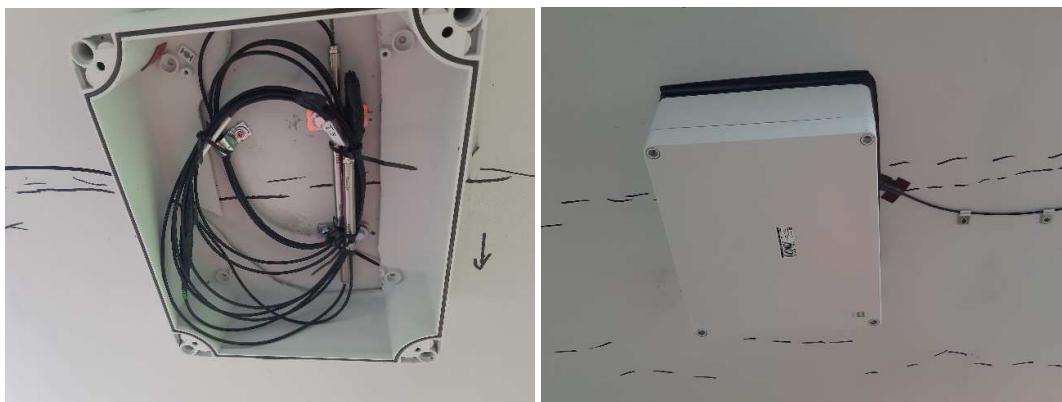


Rys. 13. Próbny montaż i testowanie systemu w warunkach laboratoryjnych: szafa telekomunikacyjna (serwerowa) wraz z wyposażeniem (po lewej), czujniki pomiarowe (po prawej)



Rys. 14. Próbny montaż i testowanie docelowego układu pomiarowego w warunkach laboratoryjnych – widok wybranych elementów układu pomiarowego

Widok wybranych elementów systemu przeznaczonych do instalacji w moście podczas prac przygotowawczych pokazany jest na rys. 13 i 14, natomiast widok wybranych elementów systemu po zainstalowaniu na moście na rys. 15–17.



Rys. 15. Czujniki odkształceń (pkt R-Pr1) i temperatury (T3) zamocowane do płyty dolnej przęsła 1-2



Rys. 16. Czujniki pochylenia w pkt OL1 i OX1 zainstalowane wewnątrz przęsła nurtowego



Rys. 17. Czujniki odkształcenia w pkt R9 i R7 zainstalowane wewnątrz przęsła nurtowego

4.3.5. Wartości progowe i sposób prezentacji wyników

Sposób prezentacji wyników pomiarów został pokazany na indywidualnie zaprojektowanych panelach (ekranach) pomiarowych. Ekran te prezentują kolejno niezbędne informacje o konstrukcji, układzie pomiarowym, a w szczególności bieżące wyniki pomiarów. Wybrane ekrany widoczne są na rys. 18–21.

Na opracowanych panelach pomiarowych odpowiedź konstrukcji na obciążenia i oddziaływania jest oceniana za pomocą indywidualnie predefiniowanych dla każdego czujnika wskaźników pracy (WP) obiektu, wraz ze wskazaniem wartości progowych tych parametrów, których przekroczenie powoduje przekazanie odpowiednich informacji Zarządcy obiektu.

Wartości parametrów WP, które stanowią podstawowe informacje o stanie konstrukcji obliczane, są indywidualnie wyznaczane dla każdego czujnika, np. dla czujników obrotu zgodnie ze wzorem:

$$WP_{-\varphi_j}(t) = \frac{|\varphi_j^{\dot{s}r} - \varphi_j(t)|}{\Delta\varphi_j^{exp}} \quad (1)$$

gdzie:

$\varphi_j(t)$ – wartość pomierzonego kąta obrotu [deg] w pkt j w czasie t (wartość średnia wielkości z każdej minuty pomiaru),

$\varphi_j^{\dot{s}r}$ – uśredniona wartość kąta obrotu w pkt j w cyklu rocznym,

$\Delta\varphi_j^{exp}$ – dopuszczalny zakres zmian kątów obrotu przekrojów przęsła w pkt j w cyklu rocznym w warunkach normalnej eksploatacji.

Ustalenie wartości takich parametrów jak $\varphi_j^{\dot{s}r}$, $\Delta\varphi_j^{exp}$ wymaga szczegółowego przeanalizowania wielu czynników i docelowo wartości te powinny zostać doprecyzowane po zebraniu, przetworzeniu i przeanalizowaniu informacji z pełnego roku eksploatacji docelowego systemu. Z uwagi na wpływ warunków środowiskowych pełny obraz pracy konstrukcji otrzymuje się dopiero po co najmniej roku prowadzenia pomiarów monitorujących.

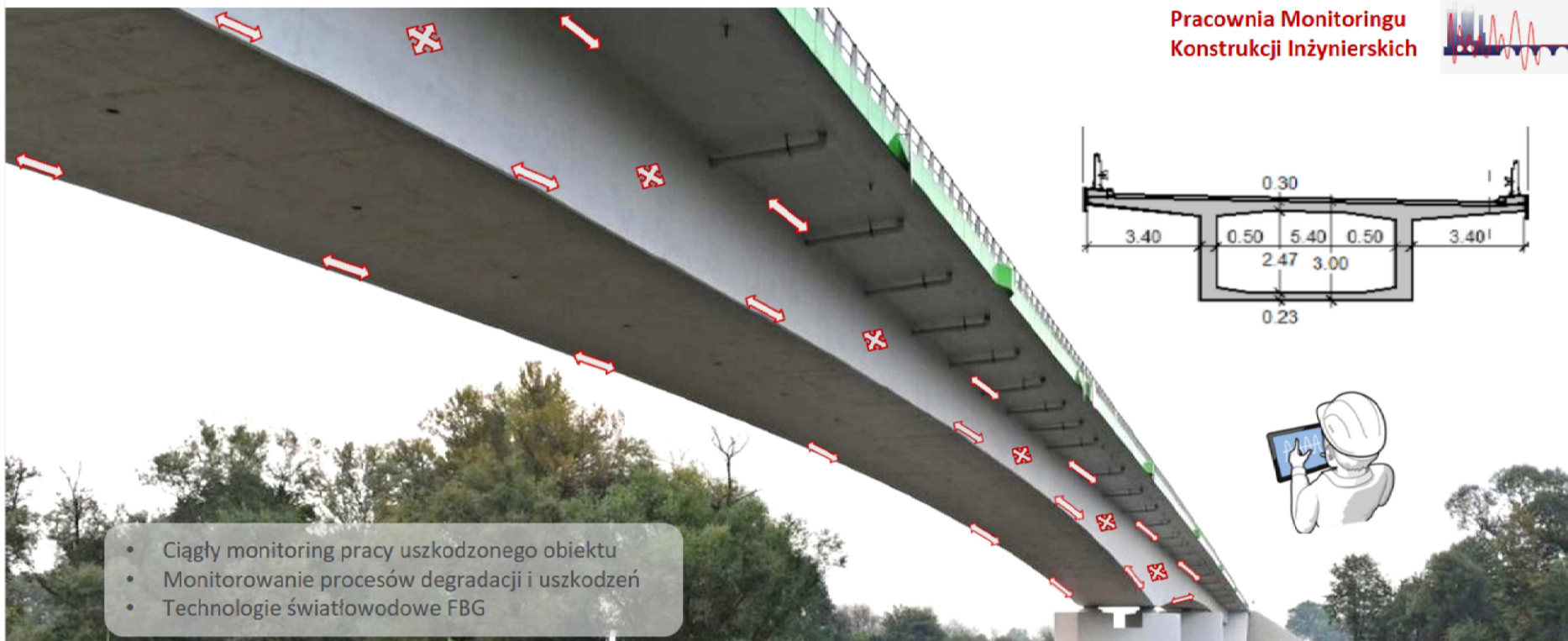
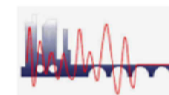
W docelowym systemie monitorowania zostały zdefiniowane – dla każdego czujnika odkształcenia i obrotu – dwie wartości progowe odpowiadające trzem stanom konstrukcji:

1. Jeżeli wartość parametru WP < wartość progowa = **1** (próg **Warning**) → komunikat 1: **stan bezpieczny**.
2. Jeżeli wartość parametru WP \geq wartość progowa = **1** (próg **Warning**) < wartość progowa = **2** (próg **Alarm**) → komunikat 2: **stan ostrzegawczy** wymagający przeprowadzenia analizy przyczyn i skutków przekroczenia przyjętej wartości progowej.
3. Jeżeli wartość parametru WP \geq wartość progowa = **2** (próg **Alarm**) → komunikat 3: **stan zagrożenia** wymagający wprowadzenia ograniczeń w eksploatacji obiektu.

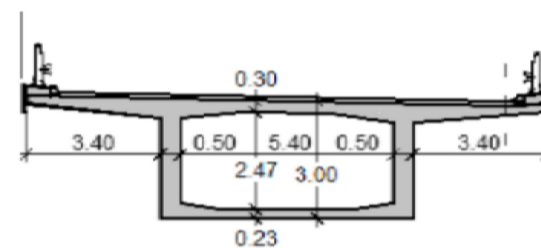


System Monitoringu Sensorycznego mostu nad Odrą w Kędzierzynie-Koźlu

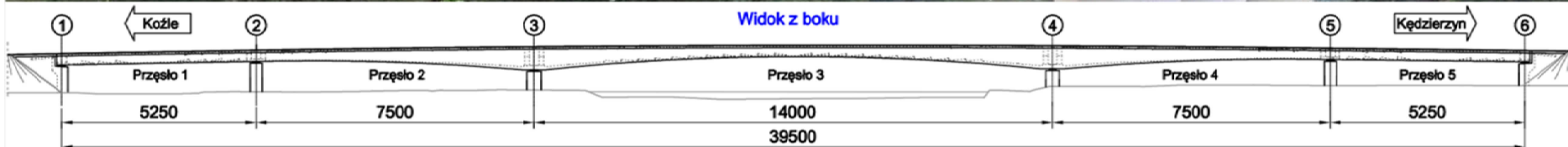
Pracownia Monitoringu
Konstrukcji Inżynierskich



- Ciągły monitoring pracy uszkodzonego obiektu
- Monitorowanie procesów degradacji i uszkodzeń
- Technologie światłowodowe FBG



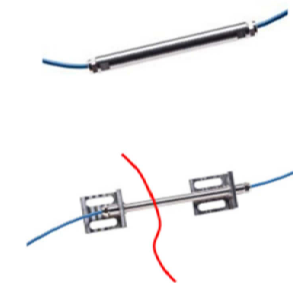
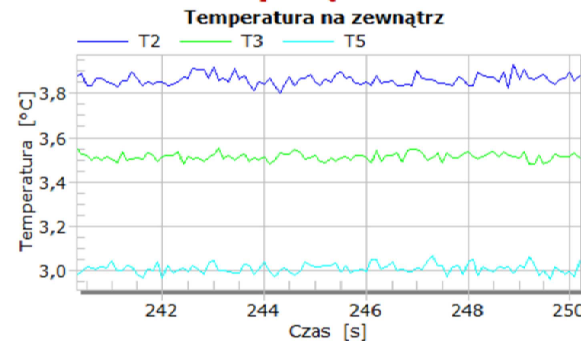
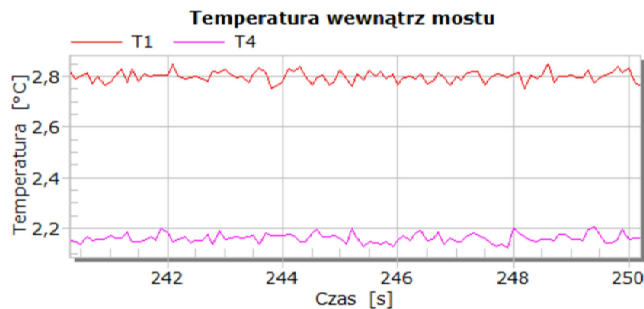
Widok z boku



Rys. 18. Panele pomiarowe – ekran informacyjny

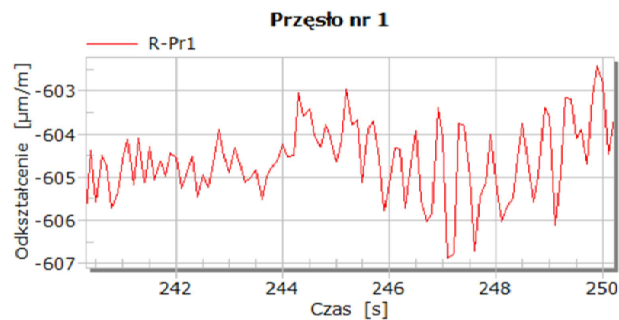


Temperatura otoczenia przęseł mostu

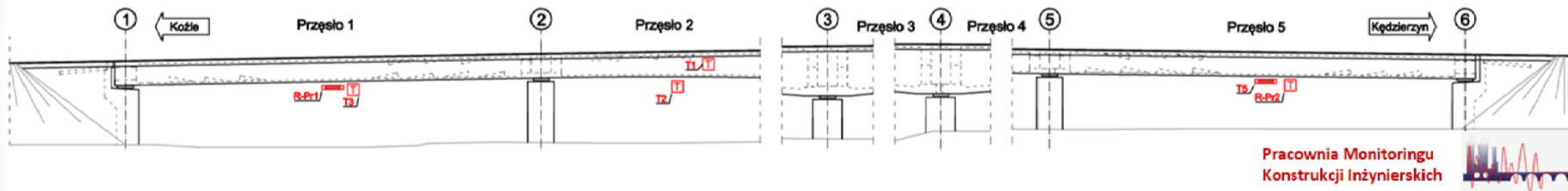
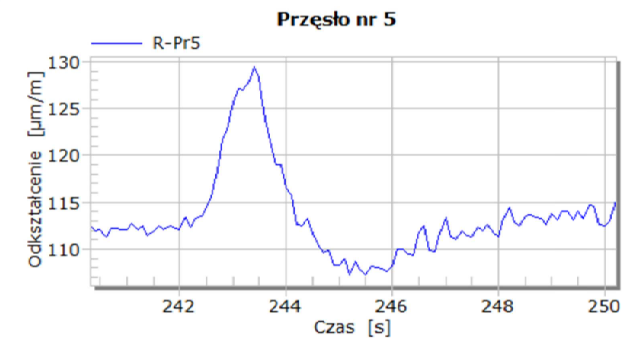
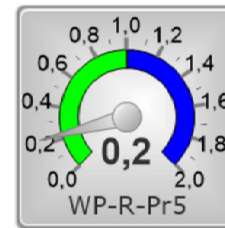


Odształcenia betonu zarysowanego – przęsła 1 i 5 (zmiany rozwartości rys w płycie dolnej)

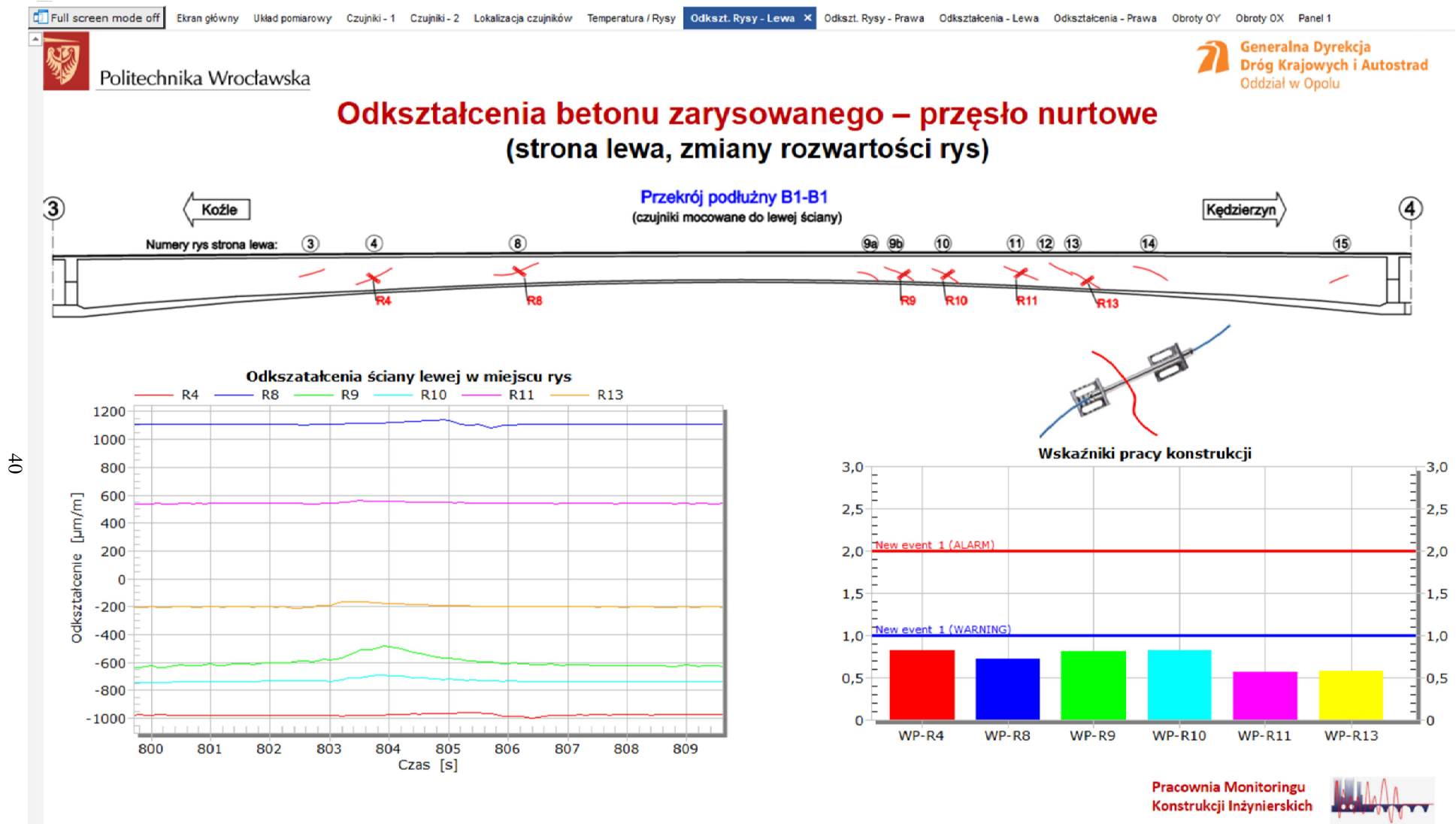
38



Wskaźniki pracy konstrukcji



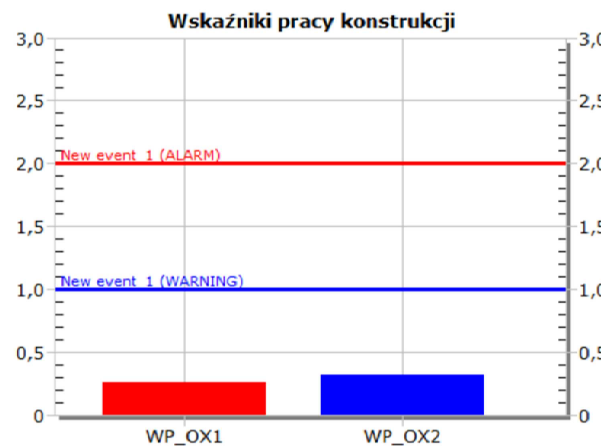
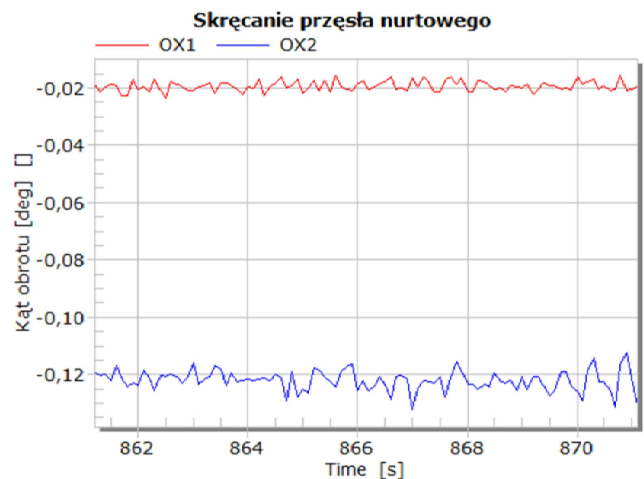
Rys. 19. Panele pomiarowe – ekran przedstawiający wyniki pomiaru temperatury w pkt T1–T5 oraz zmian rozwartości rys przęseł skrajnych w pkt R-Pr1 i R-Pr5



Rys. 20. Panele pomiarowe – ekran przedstawiający wyniki pomiaru zmian rozwartości rys przęsła nurtowego w pkt R4, R8, R9, R10, R11, R13



Obroty OX przekrojów przęsła nurtowego



41



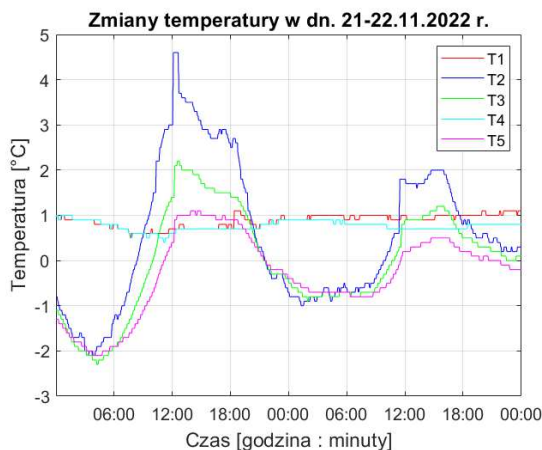
Pracownia Monitoringu
Konstrukcji Inżynierskich



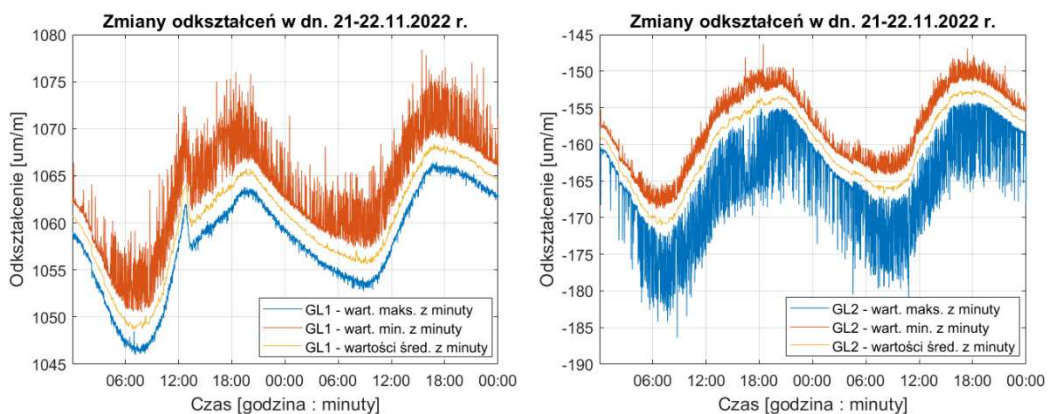
Rys. 21. Panele pomiarowe – ekran przedstawiający wyniki pomiaru kąta skrećania OX przęsła nurtowego

4.3.6. Wybrane wyniki pomiarów

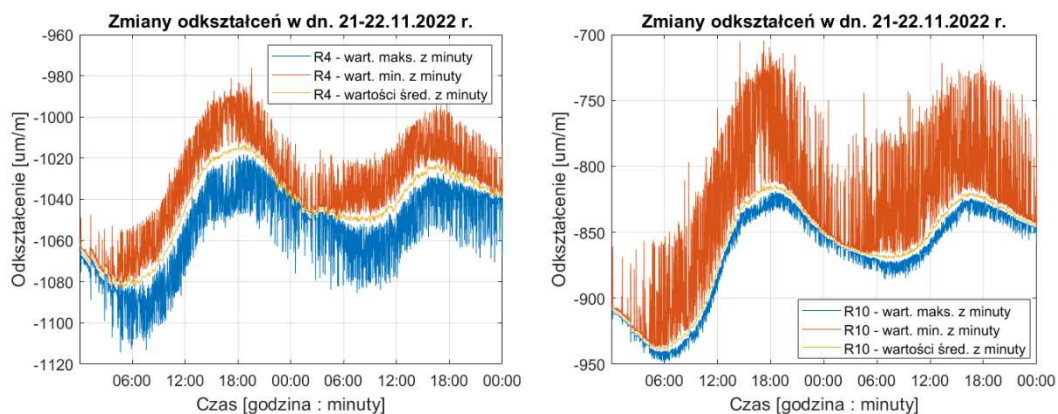
Pomiary za pomocą docelowego układu pomiarowego rozpoczęłem 8 listopada 2022 r., po zakończeniu wszystkich działań instalacyjnych i kalibracyjnych. Wybrane wyniki pomiaru wielkości fizycznych w wybranych punktach pomiarowych pokazanych na rys. 12 zaprezentowałem na rys. 22–27.



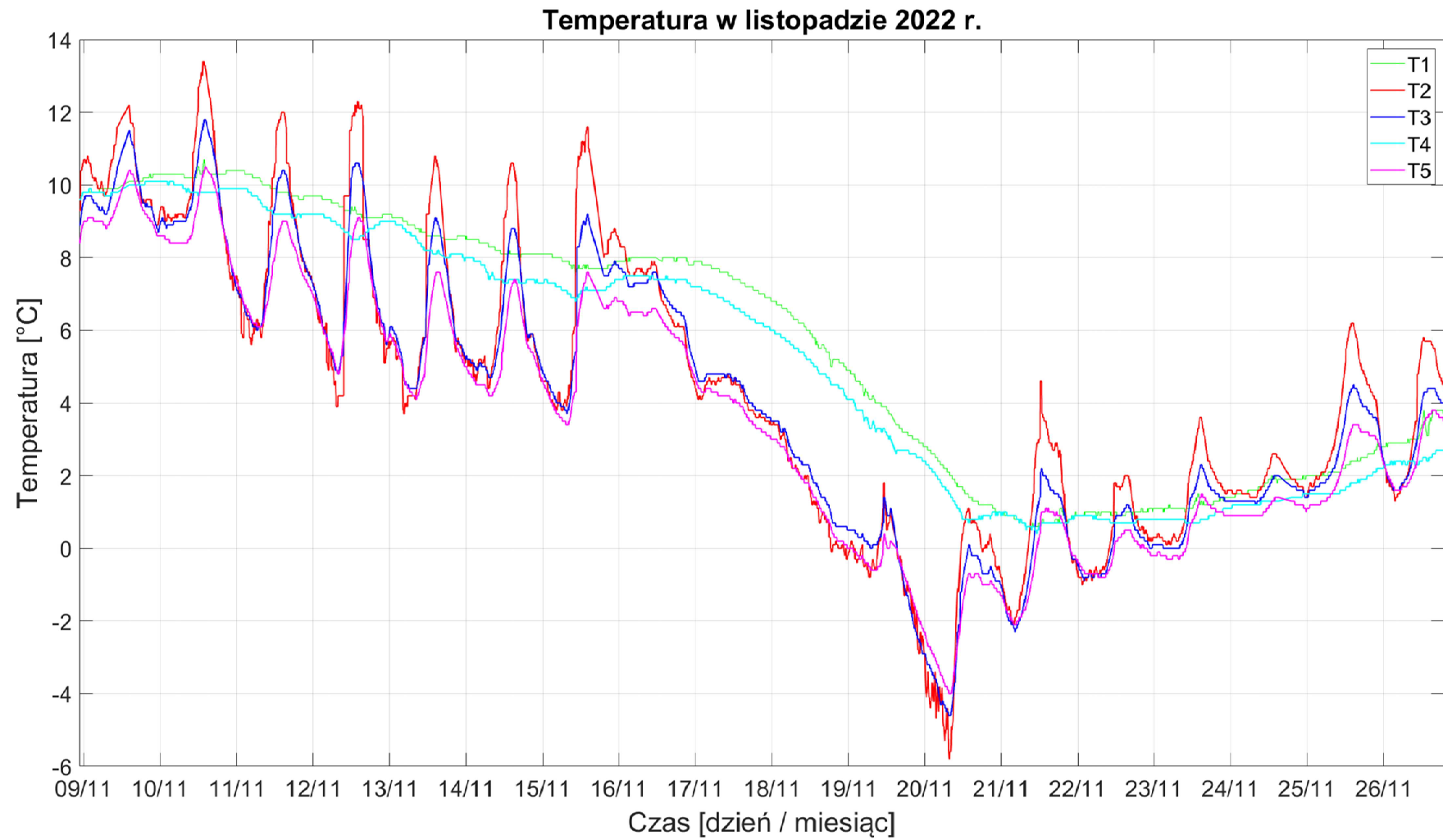
Rys. 22. Wyniki pomiaru **temperatury** otoczenia dźwigara skrzynkowego – zmiany w trakcie wybranych 48 godz., 21–22 listopada 2022 r.



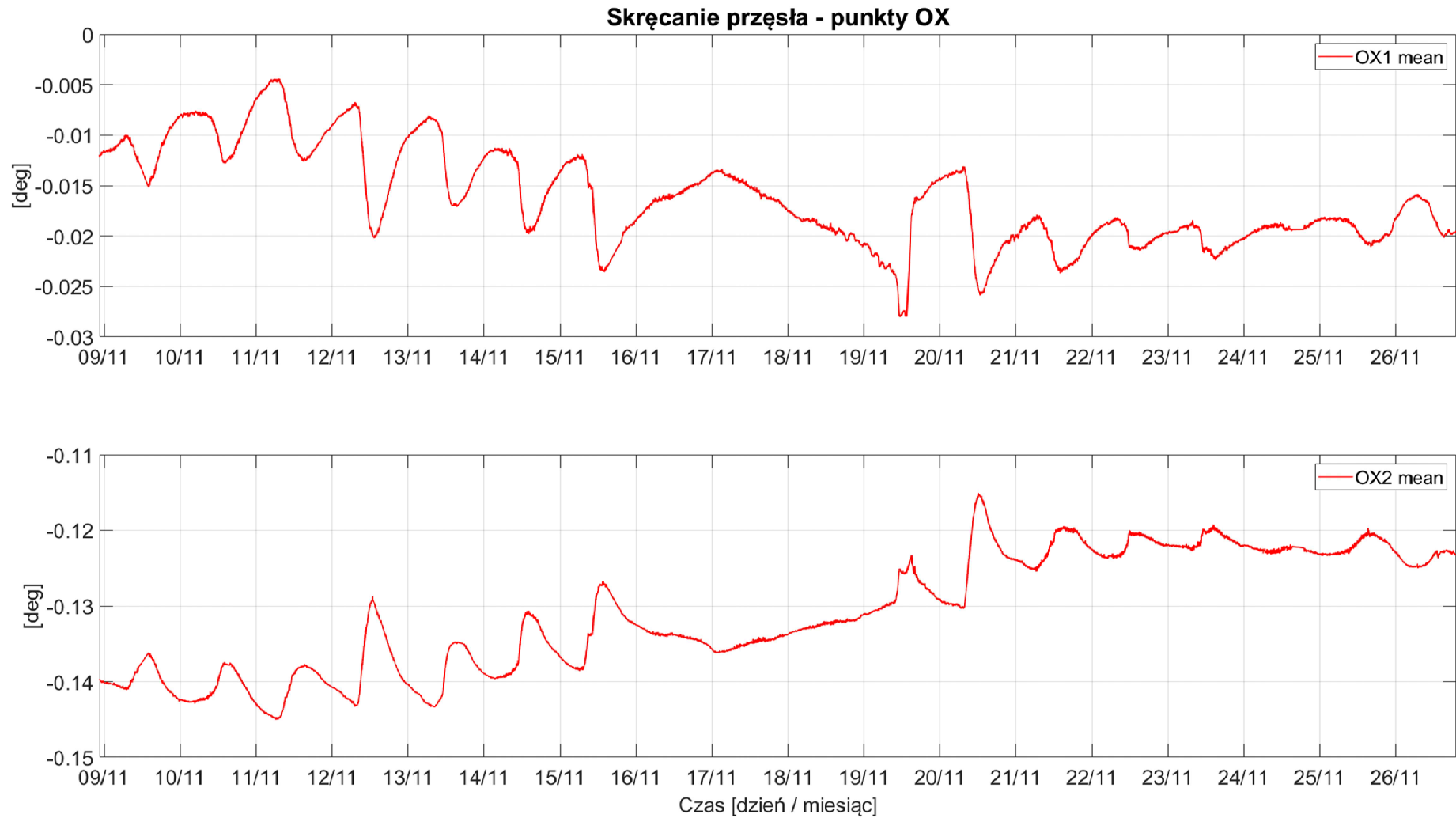
Rys. 23. Wyniki pomiaru **odkształceń lewej ściany przęsła nurtowego** w miejscach **niezarysowanych** – pkt **GL1** i **GL2**, zmiany w trakcie wybranych 48 godz., 21–22 listopada 2022 r.



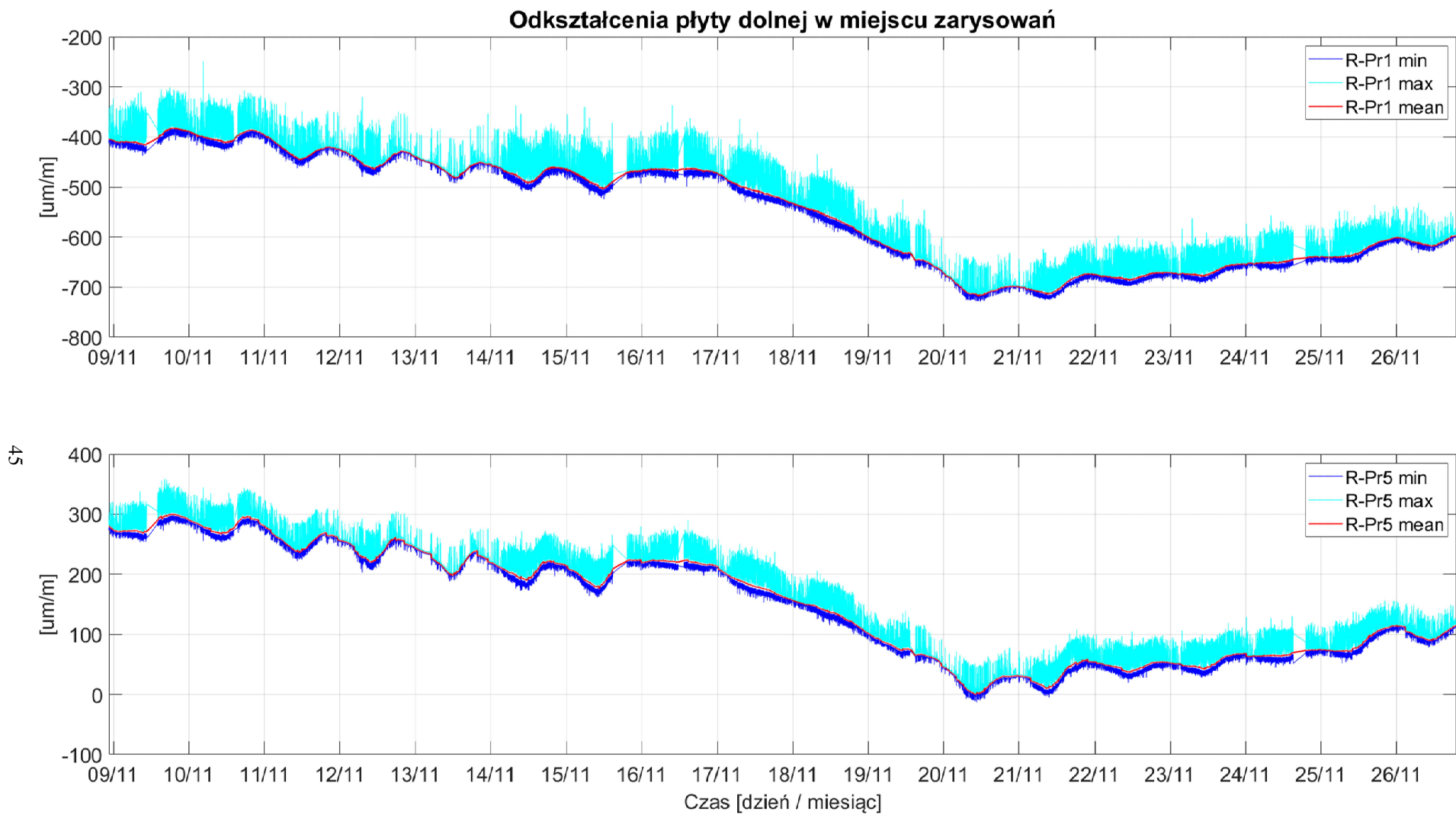
Rys. 24. Wyniki pomiaru **odkształceń konstrukcji lewej ściany w miejscu zarysowań**, tj. **zmiany rozwarości rys** – pkt **R4** i **R10**, zmiany w trakcie wybranych 48 godz., 21–22 listopada 2022 r.



Rys. 25. Wyniki pomiaru **temperatury** otoczenia dźwigara skrzynkowego
– okres 9–26 listopada 2022 r. (system docelowy)



Rys. 26. Wyniki pomiaru zmian **kątów skręcania przęsła nurtowego** w pkt **OX1–OX2**
– okres 9–26 listopada 2022 r. (system docelowy)



Rys. 27. Wyniki pomiaru **odkształceń** płyty dolnej przęseł skrajnych **w miejscu zarysowań**, tj. zmiany rozwartości rys – pkt **R-Pr1**, **R-Pr5**, okres 9–26 listopada 2022 r. (system docelowy)

Na wykresach przedstawiono wartości średnie, maksymalne i minimalne z każdej minuty pomiaru. Zmiany wartości średnich w rozpatrywanym okresie należy rozumieć jako odpowiedź konstrukcji na oddziaływania o charakterze statycznym, które wystąpiły w tym okresie (głównie zmiany warunków atmosferycznych). Natomiast różnica wartości średnich i wartości maksymalnych (lub minimalnych) w danej chwili jest efektem obciążeń eksploatacyjnych.

Wyniki pomiarów nie budzą istotnych zastrzeżeń natury metrologicznej. Zaprezentowane w funkcji czasu wartości pomierzonych wielkości charakteryzujących obiekt, tj. przemieszczenia kątowe, odkształcenia konstrukcji i zmiany rozwarłośc rys, są w znacznym stopniu związane ze zmianami temperatury otoczenia obiektu (w dłuższych przedziałach czasu) oraz poziomem obciążeń eksploatacyjnych (w 1-minutowych odcinkach pomiarowych).

4.3.7. Podsumowanie prac

W 2022 roku wdrożyłem na potrzeby Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad zaprojektowany przez siebie oryginalny, profesjonalny system do ciągłej, długoterminowej obserwacji przęsł rozpatrywanego mostu, bazujący na technikach światłowodowych FBG.

System został zaimplementowany zgodnie z opracowaną przeze mnie oryginalną metodyką monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych, zaprezentowaną w monografii [1]. W docelowym, profesjonalnym systemie zastosowałem sprawdzone w pilotażowych badaniach monitorujących (patrz rozdział 8 monografii) techniki światłowodowe FBG.

W momencie redagowania niniejszego dokumentu przedmiotowy system jest jedynym w naszym kraju światłowodowym systemem kontrolno-pomiarowym i informatyczno-telekomunikacyjnym, umożliwiającym określanie (w czasie rzeczywistym, w sposób ciągły) odpowiedzi fizycznej obiektu mostowego na różnego rodzaju oddziaływania (statyczne i dynamiczne) oraz zdalną analizę pracy obiektów w zakresie:

- oceny bezpieczeństwa eksploatacji obiektu;
- identyfikacji obciążeń i oddziaływań wpływających na obiekt;
- oceny kondycji obiektu;
- prognozowania niekorzystnych zjawisk w konstrukcji oraz oceny okresu jej bezpiecznej eksploatacji.

System wykazuje dużą stabilność, o czym świadczy powtarzalność wyników pomiarów w warunkach powtarzalnych oddziaływań na konstrukcję oraz bezawaryjne działanie urządzeń pomiarowych i rejestrujących w całym okresie dotychczasowego monitorowania. Umożliwia to monitorowanie systematycznie narastających uszkodzeń i deformacji konstrukcji w trakcie wieloletniej eksploatacji mostu w świetle zachodzących zjawisk degradacyjnych materiału i redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcji przęsł.

4.4. Dodatkowe osiągnięcie naukowe

4.4.1. Sformułowanie osiągnięcia

Tytuł trzeciego, oryginalnego osiągnięcia przedstawionego do oceny, w świetle wymagań art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy o p. o s. w. i n., sformułowano następująco:

Opracowanie i implementacja procedur diagnostycznych obiektów mostowych z uszkodzeniami, z wykorzystaniem wyników doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne, w zakresie:

- 3) **wspomagania identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określenia jej kondycji i warunków ich dalszej eksploatacji;**
- 4) **oceny poziomu zaawansowania procesów zmęzeniowych w starych mostach stalowych i prognozowania ich trwałości.**

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia:

- 1) W zakresie wspomaganie identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określenia jej kondycji i warunków dalszej eksploatacji:

- Zalecenia i standardy rekomendowane przez Ministerstwo Infrastruktury dotyczące określania nośności użytkowej drogowych obiektów inżynierskich:

Siwowski T., Bień J., Wiśniewski D., Żółtowski K., Rajchel M., Kamiński T., **Kużawa M.**: *Wytoczne określenia nośności użytkowej drogowych obiektów mostowych. Wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra właściwego ds. transportu*, WR-M-82 (opracowanie zaakceptowane przez Ministerstwo Infrastruktury, w trakcie publikacji) [37].

- Wytoczne International Federation for Structural Concrete *fib*, które będą stanowiły uzupełnienie (ang. *background document*) zapisów nowej normy *fib* MC2020 w zakresie badań i oceny istniejących konstrukcji betonowych:

Keßler S., Limongelli M.P., Apostolidi E., Sousa H., **Kużawa M.**, Chatzi E., Strauss A., Braml T., Zimmert F., Bień J.: *fib Bulletin. Existing Concrete Structures Life Management, Testing and Structural Health Monitoring. State of the Art Report No 109, Task Group 3.3, 2022* (opracowanie zaakceptowane przez *fib*, w trakcie publikacji) [33].

- Artykuły w czasopiśmie i referaty konferencyjne o zasięgu międzynarodowym:

Bień J., Kamiński T., **Kużawa M.**: *Taxonomy of non-destructive field tests of bridge materials and structures*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2019, nr 4, s. 1353–1367 [3].

Kamiński T., **Kużawa M.**, Bień J.: *Experimental and numerical assessment of an old backfilled concrete arch bridge*. W: *Proceedings of ARCH 2019 : 9th International Conference on Arch Bridges*, eds. A. Arêde, C. Costa. Springer, 2020, s. 194–202 [38].

Kamiński T., Bień J., **Kużawa M.**, Zwolski J.: *Live loads in condition assessment of old bridges*. W: *Maintenance, monitoring, safety, risk and resilience of bridges and bridge networks : Proceedings of the Eighth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2016)*, Foz do Iguaçu, Brazil, 26–30 June 2016, eds. T.N. Bittencourt, D.M. Frangopol, A.T. Beck. CRC Press, 2016. s. 1015–1022 [39].

Bień J., Kamiński T., **Kużawa M.**, Rawa P., Zwolski J.: *Dynamic tests of two old masonry arch bridges over the Odra River in Wrocław*. W: *EVACES 2011 : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 3–5 October 2011, Verenna, Italy, eds. C. Gentile, F. Benedettini. Starrylink Editrice, Brescia, 2011, s. 79–86 [40].

- 2) W zakresie oceny poziomu zaawansowania procesów zmęczenia w starych mostach stalowych i prognozowania ich trwałości:

Kużawa M., Kamiński T., Bień J.: *Fatigue assessment procedure for old riveted road bridges*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2018, No. 4, s. 1259–1274 [41].

Kużawa M.: *Fatigue performance evaluation of steel arch bridge based on experimental tests in the light of increased operating loads*. „Materials Science and Engineering” 2018, Vol. 419 [42].

Kużawa M., Kamiński T., Bień J.: *Experimental vibration tests in fatigue evaluation of a riveted truss bridge*. W: *Experimental vibration analysis for civil structures*, eds. J. Conte, R. Astroza, G. Benzoni, G. Feltrin, K. Loh, B. Moaveni, seria: „Lecture Notes in Civil Engineering” 2017, Vol 5 [43].

Bień J., **Kużawa M.**, Zwolski J., Banakiewicz A., Rabięga J., Rawa P., Adamcewicz S.: *Fatigue life assessment of Grunwaldzki bridge based on experimental vibration tests*. W: *EVACES'09 : Experimental vibration analysis for civil engineering structures : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 14-16 October 2009, Wrocław, Poland, red. J. Bień. DWE, Wrocław, 2009 [44].

4.4.2. Wprowadzenie

Doraźne badania odpowiedzi obiektów mostowych na obciążenia i oddziaływania eksploatacyjne mogą stanowić efektywne narzędzie w diagnostyce tych obiektów. Określona doświadczalnie odpowiedź na oddziaływania może zostać wykorzystana do diagnostyki obiektu w zasadzie na każdym etapie jego istnienia. W ogólnej systematyce doraźnych badań obiektów mostowych pod obciążeniami rozróżnia się, np. [3],[5],[8]:

- Badania wykonywane przed przekazaniem do eksploatacji:
 - badania wykonywane w trakcie budowy,
 - badania odbiorcze nowego obiektu, tj. próbne obciążenia obiektu.
- Badania obiektów wykonywane w trakcie użytkowania:
 - badania wykonywane w warunkach eksploatacyjnych,
 - badania odbiorcze wykonywane po ewentualnej istotnej modernizacji obiektu.

W Polsce próbnym obciążeniom poddawana jest większość nowo wybudowanych obiektów, a także – w niektórych sytuacjach – wcześniej użytkowane obiekty po wykonaniu ich modernizacji polegającej na zmianie układu statycznego konstrukcji czy wzmocnieniu elementów układu konstrukcyjnego. Celem tych badań jest weryfikacja założeń teoretycznych dotyczących szeroko rozumianej pracy konstrukcji, jak również ocena jakości wykonanych prac budowlanych, np. [45], [46].

Niezwykle cennych informacji o stanie konstrukcji mogą dostarczyć także doraźne badania prowadzone w trakcie normalnej eksploatacji obiektów – pod rzeczywistym ruchem pojazdów poruszających się po obiekcie i w określonych warunkach środowiskowych. W mojej ocenie badania te wykazują bardzo dużą przydatność w diagnostyce obiektów zaawansowanych wiekowo, które oprócz widocznych gołym okiem uszkodzeń mają z reguły również uszkodzenia trudne do bezpośredniej identyfikacji za pomocą typowych metod diagnostycznych, np. NDT. W szczególności badania te mogą stanowić cenne źródło informacji o ewentualnych istotnych uszkodzeniach mikrostruktury materiału, np. zlokalizowanych wewnątrz elementów konstrukcji lub w trudnodostępnych miejscach ich połączeń.

W zakresie literatury przedmiotu niewiele jest prac dotyczących doraźnych badań zachowania się obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych, wykonanych na potrzeby szeroko

rozumianej diagnostyki użytkowanych od wielu lat obiektów z uszkodzeniami. Spośród nielicznych prac polskich autorów w obszarze tej tematyki wymienić należy prace realizowane na Politechnice Wrocławskiej pod kierunkiem prof. Jana Bienia i przy moim udziale (od 2009 r.), np. [39][40][44][47][48][49], a od 2015 r. pod moim kierunkiem: [4],[38],[41][42][43][50],[51],[52].

Stosowane dotychczas w kraju podejście do oceny istniejących obiektów nie gwarantowało odpowiednio wysokiej wiarygodności wyników, jak również odpowiedniej jakości i efektywności badań diagnostycznych konstrukcji.

4.4.3. Cel naukowy osiągnięcia

Wyniki doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na obciążenia eksploatacyjne mogą stanowić cenne źródło zindywidualizowanych informacji o obiekcie mostowym, umożliwiających m.in.:

- identyfikację jakościową i ilościową niektórych typów uszkodzeń konstrukcji;
- ocenę zaawansowania niektórych procesów degradacji materiałowej;
- ocenę warunków pracy uszkodzonej konstrukcji;
- ocenę kondycji obiektu;
- prognozowanie trwałości obiektu.

W Polsce, jak dotąd, nie opracowano procedur diagnostycznych w wymienionym zakresie. W związku z tym celem naukowym przedstawionego do oceny osiągnięcia naukowego było opracowanie wybranych procedur diagnostycznych obiektów mostowych z uszkodzeniami z wykorzystaniem wyników doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne. Skoncentrowałem się przede wszystkim na procedurach umożliwiających:

- 1) Wspomaganie identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określania jej kondycji i warunków ich dalszej eksploatacji.
- 2) Ocenę poziomu zaawansowania procesów zmęczeniowych w starych mostach stalowych i prognozowania ich trwałości.

Opracowanie pewnych standardów działań w tym zakresie ma – moim zdaniem – duże znaczenie aplikacyjne, gdyż pozwoli to na bardziej precyzyjną diagnostykę eksploatowanych od wielu lat obiektów, a tym samym na efektywne zarządzanie ich dalszą eksploatacją i utrzymaniem. O tym, że jest to działalność w pełni uzasadniana i pożądana, świadczy m.in. to, że współczesne normy i wytyczne oceny istniejących konstrukcji pozwalają, w coraz większym stopniu, wykorzystywać dane z badań eksperymentalnych.

Potrzeba opracowania podstaw i procedur oceny istniejących obiektów mostowych z uszkodzeniami znajduje odzwierciedlenie w – opracowanych przy moim udziale – zaleceniach i wytycznych wchodzących w skład niniejszego osiągnięcia:

- Zaleceniach i standardach rekomendowanych przez Ministerstwo Infrastruktury, dotyczących określania nośności użytkowej drogowych obiektów inżynierskich [37].
- Wytycznych International Federation for Structural Concrete *fib* [33], które będą stanowiły uzupełnienie (ang. *background document*) zapisów nowej normy *fib* MC2020. w zakresie badań i oceny istniejących konstrukcji betonowych.

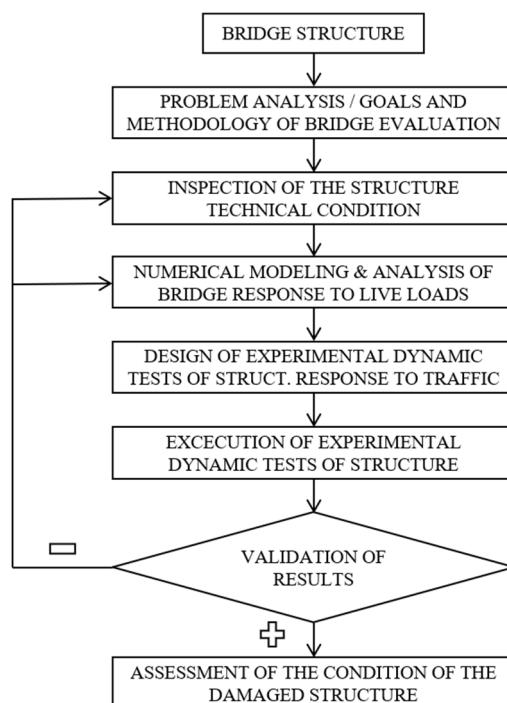
Liczne przykłady wdrożeń opracowanych – przeze mnie – rozwiązań w zakresie diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami z wykorzystaniem wyników badań zachowania się konstrukcji mostowych w warunkach eksploatacyjnych udokumentowano w:

- publikacjach wymienionych w pkt 4.4.1 i krótko scharakteryzowanych w pkt 4.4.5 w tab. 2 i 3;

- raportach z prac naukowo-badawczych Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej realizowanych po kierunku autora (patrz załącznik 4);
- innych pracach mojego autorstwa lub współautorstwa (patrz załącznik 4).

4.4.4. Ogólna procedura diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami z wykorzystaniem wyników badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne

Badania odpowiedzi istniejących obiektów mostowych na oddziaływania eksploatacyjne wymaga – w każdym przypadku – indywidualnego, tj. uwzględniającego specyfikę rozpatrywanej konstrukcji i problemów wymagających wyjaśnienia, podejścia z wykorzystaniem dostępnej wiedzy naukowo-technicznej, z uwzględnieniem specyfiki rozpatrywanej konstrukcji oraz problemów wymagających wyjaśnienia. Niemniej jednak można wyróżnić typowe etapy związane z przeprowadzaniem procesu diagnostycznego. Zaproponowaną przeze mnie ogólną procedurę diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami z wykorzystaniem wyników badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne przedstawiłem na rys. 25.



Rys. 25. Ogólną procedurę diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami z wykorzystaniem wyników doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na obciążenia eksploatacyjne [52]

Opracowana procedura, która została zaimplementowana przez mnie w ocenie 21 obiektów mostowych, obejmuje następujące główne etapy:

1. Analiza problemu, sformułowanie celów i zakresu diagnostyki konstrukcji.
2. Ogłędziny stanu technicznego konstrukcji w celu wykrycia uszkodzeń, w szczególności tych, które niekorzystnie wpływają na zachowanie i integralność układu konstrukcyjnego.
3. Modelowanie i analiza MES zachowania się obiektu z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń pod obciążeniami użytkowymi, w tym wyznaczenie kluczowych parametrów charakteryzujących obiekt.
4. Szczegółowy projekt badań obiektu pod rzeczywistym ruchem, z uwzględnieniem doboru technik i wielkości pomiarowych, rodzaju i lokalizacji czujników, sposobu przetwarzania danych i identyfikacji parametrów charakteryzujących obiekt i jego środowisko.

5. Wykonanie badań zachowania się konstrukcji pod obciążeniami użytkowymi, w miarę możliwości w różnych warunkach środowiskowych.
6. Walidacja wyników symulacji numerycznych na podstawie porównania wartości eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi za pomocą modelu MES konstrukcji. Kalibracja modelu numerycznego i/lub układu pomiarowego w przypadku negatywnego wyniku walidacji.
7. Ocena obiektu obejmująca w ogólnym przypadku:
 - o ocenę wybranych parametrów technicznych konstrukcji, np. cech materiałów, sztywności elementów i ich połączeń;
 - o wykrywanie i identyfikację niektórych rodzajów uszkodzeń konstrukcyjnych;
 - o ocenę przydatności użytkowej konstrukcji, w tym wyznaczenie i analizę nośności oraz zachowania się konstrukcji w różnych warunkach eksploatacji, np. przy wymuszeniu drgań ruchem taboru poruszającego się po obiekcie z różną prędkością i w różnej konfiguracji;
 - o ocenę zaawansowania niektórych procesów degradacyjnych;
 - o ocenę trwałości konstrukcji, np. w kontekście zagrożenia zmęczeniem materiału.

W opracowanej procedurze diagnostycznej podstawę oceny zachowania się obiektu stanowią zarówno wyniki odpowiedzi konstrukcji na obciążenia użytkowe, jak również wyniki symulacyjnych analiz numerycznych, otrzymane za pomocą modeli teoretycznych (zazwyczaj modeli MES) konstrukcji i obciążeń użytkowych. Tego rodzaju strategie diagnostyczne zaliczane są do kategorii *model-based*, które zostały opracowane na potrzeby weryfikacji i walidacji modeli obliczeniowych konstrukcji, stanowiących podstawę zobiektywizowanej oceny konstrukcji oraz identyfikacji jej uszkodzeń. Strategia ta zapewnia dużą wiarygodność diagnozy i wysoką efektywność stosowania.

Ogólnie metody *model-based* wymagają przeprowadzenia oprócz badań doświadczalnych również symulacyjnych analiz teoretycznych z uwzględnieniem różnych parametrów konstrukcji, obciążeń, a także z uwzględnieniem potencjalnych scenariuszy uszkodzeń. Diagnostyka badanej konstrukcji polega na porównywaniu wyników badań doświadczalnych z wynikami analiz teoretycznych. Arbitralnie zakłada się, że wariant modelu teoretycznego (z uwzględnieniem określonego scenariusza uszkodzeń), dla którego uzyskano najlepszą zgodność z wynikami badań doświadczalnych, jest najlepszym przybliżeniem rzeczywistej konstrukcji.

Zintegrowanie w jednej procedurze wyników badań odpowiedzi istniejących obiektów mostowych na oddziaływania eksploatacyjne oraz wyników symulacji numerycznych tego procesu fizycznego pozwoli w rezultacie na wiarygodną ocenę bezpieczeństwa, użyteczności i trwałości jego konstrukcji. Należy przy tym podkreślić, że zaprojektowanie, przeprowadzenie, a w szczególności efektywne wykorzystanie wyników tego rodzaju badań wymaga specjalistycznej wiedzy i znacznego doświadczenia. Kluczowe znaczenie ma również jakość zastosowanej aparatury pomiarowej, jak i dobór odpowiednich procedur związanych z przetwarzaniem danych pomiarowych i identyfikacją cech obiektu.

4.4.5. Wyszczególnienie wkładu wnioskodawcy w opracowane rozwiązania

Syntetyczną charakterystykę publikacji – z uwzględnieniem zakresu prac wykonanych przeze mnie – wchodzących w skład przedmiotowego osiągnięcia przedstawiono w tab. 2 i 3.

Tabela 2. Charakterystyka publikacji wchodzących w skład osiągnięcia dodatkowego dotyczącego diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami w zakresie wspomaganie identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określenia jej kondycji i warunków dalszej eksploatacji

Lp.	Tytuł opracowania	Autorzy	Opis	Wkład wnioskodawcy
1	WR-M-82. Wytyczne określania nośności użytkowej drogowych obiektów mostowych. Wzorce i standardy rekomendowane przez ministra właściwego ds. transportu (2022 r.) [37]	Siwowski T. Bień J. Wiśniewski D. Żółtowski K. Rajchel M. Kamiński T. Kużawa M.	Przedmiotem wytycznych są podstawowe zasady i procedura oceny nośności użytkowej istniejących drogowych obiektów mostowych, uwzględniające rzeczywiste obciążenia użytkowe oraz aktualny stan techniczny obiektu. Wytyczne zawierają trzypoziomową procedurę oceny nośności użytkowej istniejących drogowych obiektów mostowych oraz opis możliwych działań interwencyjnych mających na celu przywrócenie obiektowi wymaganej nośności użytkowej	Udział w opracowaniu procedury i przykładu oceny nośności użytkowej mostów na poziomie trzecim (najbardziej zaawansowanym) z wykorzystaniem specjalnych metod badań obiektów pod obciążeniami. Wyniki tych badań mają służyć głównie do aktualizacji i walidacji modelu obliczeniowego stosowanego w końcowej ocenie nośności użytkowej obiektu mostowego
2	<i>fib Bulletin. Existing Concrete Structures Life Management, Testing and Structural Health Monitoring</i> (2022 r.) [33]	Keßler S. Limongelli M.P. Apostolodi E. Sousa H. Kużawa M. Chatzi E. Strauss A. Braml T. Zimmert F. Bień J.	Przedstawienie i omówienie najnowszego stanu wiedzy w zakresie teoretycznych i technicznych zagadnień dotyczących diagnostyki i oceny kondycji konstrukcji betonowych w świetle wymagań przygotowywanej obecnie normy <i>fib Model Code 2020</i>	Główny autor i współkoordynator rozdziału 2 <i>Condition survey: testing and monitoring methods</i> , w którym, w sposób syntetyczny, zaprezentowano najnowszy stan wiedzy na temat metod badań i procedur diagnostycznych obiektów betonowych. Najważniejszą część rozdziału 2 stanowią badania diagnostyczne obiektów mostowych pod obciążeniami i oddziaływaniami
3	<i>Taxonomy of non-destructive field tests of bridge materials and structures</i> . „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2019r. [3]	Bień J., Kamiński T., Kużawa M.	Zaproponowano metodologię zintegrowanej klasyfikacji współczesnych, nieniszczących badań terenowych jako części ogólnej strategii badań diagnostycznych materiałów i konstrukcji mostowych. Opracowana metodologia klasyfikacji obejmuje badania obiektów mostowych pod obciążeniami i badania wykonywane niezależnie od obciążeń działających na obiekt	Opracowanie wielopoziomowej systematyki badań obiektów mostowych pod obciążeniami z uwzględnieniem celów badań, identyfikowanych parametrów oraz technik i technologii pomiarowych
4	<i>Experimental and numerical assessment of an old backfilled concrete arch bridge</i> . W: Proceedings of ARCH 9th International Conference on Arch Bridges. Springer, 2020 r. [38]	Kamiński T., Kużawa M., Bień J.	W artykule przedstawiono poszczególne etapy kompleksowej oceny starego mostu łukowego o konstrukcji betonowej, sklepionej z zasypką gruntową. Obiekt ma znaczące uszkodzenia struktury materiału sklepienia łukowego Zakres prac obejmuje analizę numeryczną mostu za pomocą modeli 2D i 3D elementów	Opracowanie i implementacja procedury diagnostycznej uszkodzonego obiektu z wykorzystaniem wyników badań pod obciążeniem ruchem kolejowym o znanych i kontrolowanych parametrach, jak i warunków normalnej eksploatacji. Badania przeprowadzono w celu: identyfikacji stopnia uszkodzenia mostu, oceny warunków jego pracy pod obciążeniem użytkowym i określenia

			skończonych (FE) oraz eksperymentalne badania in situ odpowiedzi konstrukcji na obciążenia ruchem kolejowym	ogólnej kondycji obiektu. Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę warunków pracy uszkodzonej konstrukcji i walidację modeli numerycznych, które wykorzystano do oceny nośności
5	<i>Live loads in condition assessment of old bridges.</i> W: Proceedings of the 8-th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS). CRC Press, 2016 r. [39]	Kamiński T. Bień J. Kużawa M. Zwolski J	W artykule przedstawiono przykłady zastosowań metod badań pod obciążeniami użytkowymi w odniesieniu do wybranych wrocławskich obiektów mostowych o znaczeniu historycznym, takich jak mosty Grunwaldzki, Osobowicki i Pomorski Południowy	Udział w opracowaniu metodyki badań pod obciążeniami użytkowymi, a także udział w badaniach oraz przetwarzaniu i analizie wyników pomiarów
6	<i>Dynamic tests of two old masonry arch bridges over the Odra River in Wrocław.</i> W: EVACES 2011 : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. Starrylink Editrice, 2011 r. [40]	Bień J. Kamiński T. Kużawa M. Rawa P. Zwolski J.	W artykule przedstawiono poszczególne etapy kompleksowej oceny kondycji dwóch mostów łukowych o konstrukcji sklepionej, z zasypką gruntową (Osobowickiego i Pomorskiego Południowego we Wrocławiu). Rozpatrywane mosty to obiekty, które po ponad 100-letniej eksploatacji pełnią bardzo ważną rolę w układzie transportowym Wrocławia, a jednocześnie mają dużą wartość historyczną. Opracowano i zaprezentowano, oryginalną metodykę diagnostyki tych obiektów oraz reprezentatywne wyniki badań i analiz	Udział w opracowaniu metodyki badań pod obciążeniami użytkowymi, a także udział w badaniach oraz przetwarzaniu i analizie wyników pomiarów

Tabela 2. Charakterystyka publikacji wchodzących w skład osiągnięcia dodatkowego dotyczącego diagnostyki obiektów mostowych z uszkodzeniami w zakresie wspomaganie identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określenia jej kondycji i warunków dalszej eksploatacji

Lp.	Tytuł opracowania	Autorzy	Opis	Wkład wnioskodawcy
1	<i>Fatigue assessment procedure for old riveted road bridges.</i> „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2018, No. 4 [41]	Kużawa M. Kamiński T. Bień J.	W artykule przedstawiono opracowaną przez mnie oryginalną, kompleksową metodykę oceny trwałości starych mostów stalowych z wykorzystaniem badań zachowania się konstrukcji pod obciążeniami użytkowymi. W drugiej części artykułu przedstawiono przykład implementacji opracowanych rozwiązań w analizie zmęczeniowej mostu im. Prezydenta Ignacego Mościckiego przez Wisłę w Puławach	Opracowanie oryginalnej, kompleksowej metodyki oceny trwałości starych mostów stalowych z wykorzystaniem badań zachowania się konstrukcji pod obciążeniami użytkowymi. Przeprowadzenie badań zachowania się mostu w warunkach normalnej eksploatacji, wraz z analizą wyników. Opracowana metodyka badań i analiz jest zgodna z ogólnymi założeniami Eurokodów oraz europejskich rekomendacji w zakresie szacowania trwałości zmęczeniowej istniejących mostów stalowych [53]. Została ona opracowana z wykorzystaniem doświadczeń własnych autora w ocenie takich obiektów jak: Most Grunwaldzki nad Odrą we Wrocławiu, Most im. Prezydenta Ignacego Mościckiego przez Wisłę w Puławach, Most im. gen. Antoniego Madalińskiego nad Narwią w Ostrołęce
2	<i>Fatigue performance evaluation of steel arch bridge based on experimental tests in the light of increased operating loads.</i> „Materials Science and Engineering” 2018, Vol. 419 [42]	Kużawa M.	W artykule przedstawiono studium przypadku analizy zmęczeniowej mostu łukowego nad Narwią w Ostrołęce, w świetle tymczasowo zwiększonych obciążeń eksploatacyjnych. Przyjęta metodyka oszacowania poziomu zaawansowania procesów zmęczeniowych wykorzystuje wyniki doraźnych badań odkształceń obiektu w warunkach zwiększonych obciążeń eksploatacyjnych i wyniki symulacyjnych analiz MES	Publikacja jednoautorska
3	<i>Experimental vibration tests in fatigue evaluation of a riveted truss bridge.</i> W: Experimental vibration analysis for civil structures, eds. J. Conte, R. Astroza, G. Benzoni, G. Feltrin, K. Loh, B. Moaveni, seria: „Lecture Notes in Civil Engineering” 2017, Vol 5 [43]	Kużawa M. Kamiński T. Bień J.	W artykule przedstawiono studium przypadku analizy zmęczeniowej mostu przez Wisłę w Puławach o konstrukcji kratownicowej. Zaprezentowano wyniki badań odpowiedzi dynamicznej konstrukcji na obciążenia użytkowe i wyniki analizy MES. Przyjęta metodyka oszacowania poziomu zaawansowania procesów zmęczeniowych wykorzystuje wyniki doraźnych badań odkształceń obiektu w warunkach eksploatacyjnych i wyniki symulacyjnych analiz MES	Opracowanie metodyki badań i analiz. Przeprowadzenie badań zachowania się mostu w warunkach normalnej eksploatacji, wraz z analizą wyników

4	<p><i>Fatigue life assessment of Grunwaldzki bridge based on experimental vibration tests.</i> W: EVACES'09 : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. DWE, Wrocław, 2009 r. [44]</p>	<p>Bień J. Kuźawa M. Zwolski J. Banakiewicz A. Rabiega J. Rawa P. Adamcewicz S.</p>	<p>W artykule przedstawiono studium przypadku analizy zmęczeniowej mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu o konstrukcji wiszącej. Zaprezentowano badania odpowiedzi dynamicznej konstrukcji na obciążenia użytkowe i wyniki analizy MES. Przyjęta metodyka oszacowania poziomu zaawansowania procesów zmęczeniowych wykorzystuje wyniki doraźnych badań odkształceń obiektu w warunkach eksploatacyjnych i wyniki symulacyjnych analiz MES</p>	<p>Opracowanie metodyki analiz i oszacowanie trwałości zmęczeniowej mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu z wykorzystaniem wyników doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne oraz symulacyjnych analiz MES</p>
---	---	---	---	---

4.5. Podsumowanie

Moje istotne osiągnięcia w świetle wymagań art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy o p. o s. w. i n. oraz stanowiące mój indywidualny, oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport w Polsce stanowią:

- Główne osiągnięcie naukowe (opis w pkt 4.2):

Opracowanie kompleksowej metodyki monitorowania obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych za pomocą elektronicznych systemów pomiarowych,

które opublikowałem w formie monografii naukowej:

Monitoring sensoryczny obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji,

w Oficynie Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej w 2022 r.

- Osiągnięcie projektowo-technologiczne (opis w pkt 4.3):

Zaprojektowanie i wdrożenie systemu ciągłego monitoringu sensorycznego mostu nad Odrą w Kędzierzynie-Koźlu w warunkach eksploatacyjnych z zastosowaniem światłowodowych technik pomiarowych.

- Dodatkowe osiągnięcie naukowe (opis w pkt 4.4):

Opracowanie i implementacja procedur diagnostycznych obiektów mostowych z uszkodzeniami, z wykorzystaniem wyników doraźnych badań odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania eksploatacyjne, w zakresie:

- 5) wspomagania identyfikacji uszkodzeń i warunków pracy uszkodzonej konstrukcji oraz określenia jej kondycji i warunków ich dalszej eksploatacji;
- 6) oceny poziomu zaawansowania procesów zmęczeniowych w starych mostach stalowych i prognozowania ich trwałości.

5. INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI LUB INSTYTUCJI NAUKOWEJ

Jestem członkiem Komisji Budownictwa i Mechaniki Oddziału Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu (kadencja 2023-2026).

Od 2019 r. wykazuję się aktywną działalnością naukową w dwóch międzynarodowych instytucjach naukowych:

- 1) International Federation for Structural Concrete *fib*, sekcja:
 - Commission3: Existing concrete structures:
 - TG3.3 - Assessment /evaluation and decision-making procedures for the through-life management of existing concrete structures;
 - AG9 Action Group: Structural health monitoring and testing.
- 2) International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, sekcja:
 - Task Group 5.3: Gerontology of Bridge Structures.

Współpraca z instytucją naukową International Federation for Structural Concrete *fib* obejmuje szeroki obszar zagadnień dotyczących monitoringu i oceny eksploatowanych od wielu lat obiektów mostowych z uszkodzeniami. Obecnie zagadnienia te są bowiem istotnym elementem przygotowywanej przez *fib* wzorcowej normy Model Code 2020, jak również opracowań typu *state-of-the-art analysis*, których celem jest przedstawienie i omówienie bieżącego stanu wiedzy w zakresie projektowania, diagnostyki i oceny kondycji konstrukcji betonowych. Współpraca ta dotyczyła udziału w następujących zadaniach:

- Opracowanie nowych zleceń normowych *fib* Model Code 2020, w zakresie rozdziału 27.11: *Verification assisted by testing and monitoring*.
- Opracowanie wytycznych, które będą stanowiły uzupełnienie (ang. *background document*) zapisów nowej normy *fib* MC2020 w zakresie badań i oceny istniejących konstrukcji betonowych:

Keßler S., Limongelli M.P., Apostolidi E., Sousa H., Kuźawa M., Chatzi E., Strauss A., Braml T., Zimmert F., Bień J.: *fib* Bulletin No 109. Existing Concrete Structures Life Management, Testing and Structural Health Monitoring. State of the Art Report, Task Group 3.3, 2022 (opracowanie zaakceptowane przez *fib*, w trakcie publikacji) [33].

Jestem głównym autorem i współkoordynatorem rozdziału 2: *Condition survey: testing and monitoring methods*.

- Wydanie specjalnego numeru czasopisma „Structural Concrete” zatytułowanego „Existing Concrete Structures: Structural Health Monitoring & Testing for Condition Assessment”, którego częścią jest artykuł [6] przygotowany przy moim udziale.

Od grudnia 2019 r. jestem również zaangażowany w prace naukowe instytucji IABSE w sekcji Task Group (TG) 5.3: Gerontology of Bridge Structures. W ramach prowadzonych prac opracowywane jest wydawnictwo *Gerontology of Bridge Structures* zgłoszone jako IABSE Bulletin, Structural Engineering Document (SED). Opracowywana obecnie, przy moim udziale, monografia jest próbą ujęcia procesów starzenia się konstrukcji mostowych w sposób holistyczny. Mój wkład w monografię obejmuje praktyczne zagadnienia diagnostyki w zakresie przyczyn, przebiegu i skutków procesów degradacji obiektów mostowych. Ukończenie prac nad monografią przewiduje się w październiku tego roku.

W latach 2011–2018 przygotowałem i wygłosiłem – na 5 zagranicznych uczelniach – na zaproszenie organizatorów autorskie wykłady na temat diagnostyki i oceny kondycji obiektów mostowych z uszkodzeniami:

- University of Cambridge, Wielka Brytania 2011 r. – wykład *Field testing of historical masonry bridges in Wrocław* w ramach szkoły letniej „Construction History European Summer School CHESS 2011”, 23 lipca–6 sierpnia 2011 r., Cambridge, Wielka Brytania.
- Federal University of Juiz de Fora, Brazylia, 2013 r. – wykład *NOBLA expert tool for load capacity assessment of railway plate girders with defects*, 31 października 2013 r., Juiz de Fora, Brazylia.
- University of Split, Chorwacja 2014 r. – wykład *Knowledge-based expert systems in railway bridge engineering* w ramach międzyuczelnianego seminarium naukowego, 21–24 września, Split, Chorwacja.
- Beijing Jiaotong University, Pekin, Chin 2015 r. – seria 3 wykładów *Live loads in bridge condition assessment based on results of the experimental tests*:
 - Wykład 1: *Technologies of bridge testing and monitoring*.
 - Wykład 2: *Proof loads of bridges on the example of acceptance tests of the Rędziński bridge over the Odra River in Wrocław*.
 - Wykład 3: *Diagnostic load tests of historical bridges*.

wygodzonych w ramach szkoły letniej „International Summer Camp 2015 – Chinese Culture & Engineering”, 27 lipca–5 sierpnia 2015 r., Beijing, Chiny.

- Politechnika Czeska w Pradze, Czechy 2018 r. – wykład *Experimental dynamic tests in condition assessment of bridges* w ramach międzyuczelnianych badań dynamicznych mostu Wyszehradzkiego w Pradze pod obciążeniem taborem kolejowym z wykorzystaniem różnych technik pomiarowych, 30–31 października 2018 r., Praga, Czechy.

W semestrze letnim roku akademickiego 2007/2008, w ramach programu Erasmus, studiowałem na University of Minho w Portugalii (10 semestr jednolitych studiów magisterskich). W tym okresie rozpocząłem pracę naukową w zakresie diagnostyki procesów zmęczeniowych w starych mostach stalowych. W pierwszym etapie prac, pod kierunkiem prof. Paulo Cruza, przeprowadziłem szeroko zakrojone studia literaturowe, a następnie wykonałem – na podstawie zgromadzonej wiedzy i materiałów udostępnionych przez opiekuna – analizę zmęczeniową mostu Pinhao w Portugalii. Wyniki wykonanych prac naukowych przedstawiłem w części studialnej mojej pracy dyplomowej magisterskiej *Analysis and fatigue evaluation of Pinhao bridge in Portugal*. Wybrane wyniki tych prac zaprezentowałem na Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe w listopadzie 2008 r., w trakcie którego wygłosiłem referat *Analysis and fatigue evaluation of Pinhao bridge in Portugal* [54].

Zdobytą w tamtym czasie wiedzę na temat zjawiska zmęczenia w starych mostach stalowych wykorzystałem w kolejnych etapach mojej pracy naukowej. W rezultacie zagadnienia zmęczenia w mostach stalowych są istotnym elementem przedstawionego do ceny, zarówno głównego osiągnięcia naukowego (patrz pkt 4.2), jak i dodatkowego osiągnięcia naukowego (patrz pkt 4.4). Mój publikacyjny dorobek w tym obszarze inżynierii mostowej stanowi łącznie 9 publikacji (np. [41],[42],[43],[44],[48],[50],[54]). Jestem również współautorem kilkunastu ekspertyz dotyczących oceny zaawansowania procesów zmęczeniowych w starych mostach stalowych i prognozowania ich trwałości (np. most Grunwaldzki we Wrocławiu, most przez Wisłę w Puławach, most przez Narew w Ostrołęce).

6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

Wieloletnie doświadczenie w prowadzeniu zajęć dydaktycznych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej:

- **Studia I-stopnia, inżynierskie** – opracowanie materiałów dydaktycznych i prowadzenie następujących kursów na specjalności **Inżynieria Lądowa**:
 - Podstawy mostownictwa – projekt;
 - Mosty – wykład i projekt.
 - Utrzymanie mostów – wykład i ćwiczenia;
- **Studia II-stopnia, magisterskie** – opracowanie materiałów dydaktycznych i prowadzenie następujących kursów:
 - specjalność **Inżynieria Mostowa**:
 - Mosty metalowe I – wykład i projekt,
 - Mosty metalowe II – wykład i projekt,
 - Komputerowe systemy wspomagania gospodarki mostowej – laboratorium;
 - specjalność **Inżynieria Transportu Szynowego**:
 - Mosty kolejowe – wykład i projekt;
 - specjalność **Budownictwo Podziemne i Inżynieria Miejska**:
 - Mosty – wybrane zagadnienia – wykład i projekt;
 - specjalność **Civil Engineering**:
 - Bridges – projekt,
 - Artificial intelligence in civil engineering – laboratorium;

Promotor około 50 prac dyplomowych, w tym:

- **inżynierskich** na specjalności **Inżynieria Lądowa** – łącznie ponad 20 prac;
- **magisterskich** na specjalności **Inżynieria Mostowa** – łącznie ponad 20 prac;
- **magisterskich** na specjalności anglojęzycznej **Civil Engineering** – łącznie około 6 prac

Długoletni wykładowca na:

- **Specjalistycznych kursach podyplomowych**:
 - Szkolenia Drogowych Inspektorów Mostowych,
 - Szkolenia Diagnostów Kolejowych Obiektów Inżynierskich.
- **Międzynarodowych szkołach letnich** – opracowanie i prowadzenie zajęć w ramach:
 - „Construction History European Summer School CHESS 2011”, 23 lipca–6 sierpnia 2011 r., Cambridge, Wielka Brytania;
 - „International Summer Camp 2015 – Chinese Culture & Engineering”, 27 lipca–5 sierpnia 2015 r., Beijing, Chiny;
 - 2018 Summer School 3E+, Wrocław, lipiec 2018 r.;
 - 2019 Summer School 3E+, Wrocław, lipiec 2019 r.

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

Organizacja współpracy Zespołu Mostów Politechniki Wrocławskiej z przemysłem i pozyskiwanie zleceń na prace naukowo-badawcze oraz ich realizacja. Opracowania naukowo-techniczne, ekspertyzowe i projektowe dla firm:

- Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad,
- Autostrada Wielkopolska SA,
- KGHM Polska Miedź S.A.,
- Budimex SA,
- Sixense Group.

Inicjator, aktywny organizator i kierownik Pracowni Monitoringu Konstrukcji Inżynierskich, która powstała w latach 2017–2018 i jest systematycznie rozwijana. Pracownia jest częścią Laboratorium Badań Nano- i Mikrostruktur Materiałów Kompozytowych i Konstrukcji Inżynierskich i ma siedzibę w centrum badawczym GEO-3EM Politechniki Wrocławskiej.

Pracownia realizuje – pod moim kierunkiem – program badawczy centrum GEO-3EM w zakresie zadania *Metodyka monitorowania stanu konstrukcji budowlanych i inżynierskich z wykrywaniem i identyfikacją uszkodzeń*. W trakcie tego programu prowadzony jest monitoring sensoryczny wybranych obiektów z uszkodzeniami w trakcie normalnej eksploatacji z wykorzystaniem nowoczesnych technologii pomiarowych.

W ramach prac eksperckich realizowanych dla podmiotów gospodarczych zorganizowałem i przeprowadziłem badania diagnostyczne zachowania się 21 obiektów mostowych w warunkach eksploatacyjnych.

W ramach bieżących prac Zespołu Mostów PWr wykonuję następujące zadania organizacyjne:

- zakupy aparatury pomiarowej i wyposażenia laboratoryjnego;
- rozbudowa i utrzymanie potencjału badawczego jednostki;
- planowanie i organizacja badań terenowych obiektów mostowych.

6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę

Autorstwo lub współautorstwo 50 publikacji (patrz zestawienie dorobku w załączniku 4). Wiele z tych prac jest dostępnych on-line w różnych serwisach internetowych (np. ResearchGate), co przyczynia się do popularyzacji nauki. W powszechnie dostępnym serwisie ResearchGate zarejestrowano ponad 4000 pobrań/wyświetleń moich prac.

Treści popularyzujące naukę są również prezentowane przeze mnie na zajęciach dydaktycznych, w tym również na:

- specjalistycznych kursach podyplomowych:
 - Szkolenia Drogowych Inspektorów Mostowych;
 - Szkolenia Diagnostów Kolejowych Obiektów Inżynierskich.
- międzynarodowych szkołach letnich:
 - „Construction History European Summer School CHESS 2011”, 23 lipca–6 sierpnia 2011 r., Cambridge, Wielka Brytania;
 - „International Summer Camp 2015 – Chinese Culture & Engineering”, 27 lipca–5 sierpnia 2015 r., Beijing, Chiny;
 - 2018 Summer School 3E+, Wrocław, lipiec 2018 r.;
 - 2019 Summer School 3E+, Wrocław, lipiec 2019 r.

7. INNE INFORMACJE DOTYCZĄCE PRACY ZAWODOWEJ

- 1) Nagrody, odznaczenia i wyróżnienia za pracę zawodową:
 - o 2014 r. - nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej za pracę doktorską;
 - o 2016, 2018, 2020, 2022 r. – nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność uczelni.
 - o 2020 r. – Brązowy Medal za Długoletnią Służbę nadany przez Prezydenta RP.
- 2) Liczbowe podsumowanie mojej działalności zawodowej przestawiłem w tabeli poniżej.

L.p.	Rodzaj działalności	Przed doktoratem	Po doktoracie	Suma
1.	Liczba publikacji o zasięgu międzynarodowym	14	16	30
2.	Liczba publikacji o zasięgu krajowym	10	10	20
3.	Liczba raportów z prac naukowo-badawczych (SPR)	16	24	40
4.	Liczba raportów z prac ekspertowo-wdrożeniowych (U)	1	62	63
5.	Liczba międzynarodowych grantów/projektów naukowo-badawczych	0	1	1
6.	Liczba krajowych grantów/projektów naukowo-badawczych	3	2	5
7.	Liczba indywidualnych (lokalnych) grantów/projektów naukowo-badawczych	3	2	5
8.	Członkostwo i działalność w międzynarodowych organizacjach naukowo-technicznych	0	2	2
9.	Członkostwo i działalność w krajowych organizacjach naukowo-technicznych	0	1	1
10.	Członkostwo w komitetach naukowych i programowych konferencji międzynarodowych	0	1	1
11.	Członkostwo w komitetach naukowych i programowych konferencji krajowych	0	1	1
12.	Liczba wykładów/prezentacji na zaproszenia ośrodków zagranicznych	2	5	7
13.	Liczba wykładów/prezentacji na zaproszenia ośrodków krajowych	0	1	1
RAZEM		49	128	177

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kuźawa M.: *Monitoring sensoryczny obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2022 r., ISBN: 978-83-7493-227-1.
- [2] Bień J., Kamiński T., Kuźawa M.: *Monitoring in management of roadway bridges*. W: *Maintenance, safety, risk, management and life-cycle performance of bridges*, eds. N. Powers, D. Frangopol, R. Al-Mahaidi, C. Caprani. CRC Press, 2018, s. 1839–1844.
- [3] Bień J., Kamiński T., Kuźawa M.: *Taxonomy of non-destructive field tests of bridge materials and structures*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2019, nr 4, s. 1353–1367.
- [4] Bień J., Kuźawa M.: *Dynamic Tests in Bridge Health Monitoring*. „Studia Geotechnica et Mechanica” 2020, s. 1–6.
- [5] Bień J., Kuźawa M., Gładysz-Bień M., Kamiński T.: *Quality control of road bridges in Poland*. W: *Maintenance, monitoring, safety, risk and resilience of bridges and bridge networks*, eds. T.N. Bittencourt, D.M. Frangopol, A.T. Beck. CRC Press, 2016, s. 971–978.
- [6] Bień J., Kuźawa M., Kamiński T.: *Strategies and Tools in Monitoring of Concrete Bridges*. „Structural Concrete” 2020, s. 1–132.
- [7] Jan Bień, Mieszko Kuźawa: *Monitorowanie obiektów mostowych*. W: XVII Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, Kielce-Cedzyna, 19-21 października 2022 roku. Warszawa : Zarząd Główny PZITB, 2022. s. 379–394.
- [8] Bień J.: *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*. WKiŁ, Warszawa, 2010.
- [9] Biliszczuk J., Hawryszków P., Teichgraeber M.: *SHM system and a FEM model-based force analysis assessment in stay cables*. „Sensors” 2021, nr 6, s. 1–27.
- [10] Chróścielewski J., Rucka M., Banaś A., Malinowski M., Miśkiewicz M., Rutkowski R.: *Systemy monitorowania stanu technicznego konstrukcji na przykładzie trzech mostów*. „Mosty” 2011, nr 2, s. 32–40.
- [11] Hildebrand M., Malinowski M., Żółtowski K.: *Monitoring mostów podwieszonych*. „Mosty” 2009, nr 3, s. 16–24.
- [12] Machelski C.: *Monitoring przęseł mostowych wybudowanych metodą wspornikową*. „Inżynieria i Budownictwo” 2022, nr 1/2, s. 42–45.
- [13] Machelski C., Hildebrand M.: *Efficiency of monitoring system of a cable-stayed bridge for investigation of live loads and pier settlements*. „Journal of Civil Structural Health Monitoring” 2015, No. 1, s. 1–9.
- [14] Miśkiewicz M., Pyrzowski L., Chróścielewski J., Wilde K.: *Structural Health Monitoring of Composite Shell Footbridge for Its Design Validation*. W: 2016 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics 2016). Gdańsk, 2016, s. 228–233.
- [15] Salamak M., Perski Z.: *Techniki satelitarne w monitoringu mostów na terenach z deformacją podłoża*. W: *Warunki gruntowe a projektowanie oraz budowa dróg i mostów. Budownictwo mostowe*, red. A. Duszyńska. Elamed Media Group, Katowice, 2020.
- [16] Siwowski T., Kulpa M., Rajchel M., Howiacki T., Sieńko R.: *Diagnostyka i monitoring mostów kompozytowych za pomocą czujników światłowodowych DFOS*. „Mosty” 2021, nr 2.
- [17] Siwowski T., Rajchel M., Howiacki T., Sieńko R., Bednarski Ł.: *Distributed fibre optic sensors in FRP composite bridge monitoring: Validation through proof load tests*. „Engineering Structures” 2021, Vol. 246.
- [18] Zobel H., Żółtowski P.: *Monitoring System for Determination of Vibrations of Different Building Structures during Driving in Reinforced Concrete Pre-Cast Piles and Sheet Piles*. „Key Engineering Materials” 2012, Vol. 518.
- [19] Wilson J.S. (ed.): *Sensor technology handbook*. Elsevier, 2005.
- [20] Fraden J.: *Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs and Applications*. Springer, New York–Heidelberg–Dordrecht–London, 2015.
- [21] Pallas-Areny R., Webster J.G.: *Sensors and Signal Conditioning*. John Willey & Sons, Hoboken, 2001.

- [22] Chen H.P.: *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2018.
- [23] Farrar C.R., Worden K.: *Structural Health Monitoring – a Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2013.
- [24] Hu W.H., Tang D.H., Teng J., Said S., Rohrmann R.G.: Structural Health Monitoring of a Prestressed Concrete Bridge Based on Statistical Pattern Recognition of Continuous Dynamic Measurements over 14 years. „Sensors” 2018, No. 12, s. 4117.
- [25] Huang Y., Li J., Fu J.: *Review on Application of Artificial Intelligence in Civil Engineering*. „Computer Modeling in Engineering & Sciences CMES” 2019, No. 3, s. 845–875.
- [26] Ibrahim D.: *An overview of soft computing*. „Procedia Computer Science” 2016, Vol. 102, s. 34–38.
- [27] Neves A.C, Leander J., González I., Karoumi R.: A new approach to damage detection in bridges using machine learning. W: *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, eds. J. Conte, R. Astroza, G. Benzoni, G. Feltrin, K. Loh, B. Moaveni, seria: „Lecture Notes in Civil Engineering” 2017, Vol. 5.
- [28] Neves A.C, Leander J., González I., Karoumi R.: *An approach to decision-making analysis for implementation of structural health monitoring in bridges*. „Structural Control and Health Monitoring” 2016, Iss. 6.
- [29] Neves C.: *Structural Health Monitoring of Bridges: Data-based damage detection method using Machine Learning*. Rozprawa doktorska. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2020.
- [30] Pawar P.M., Ganguli R.: *Structural Health Monitoring Using Genetic Fuzzy Systems*. Springer, London, 2011.
- [31] Salehi H., Das S., Biswas S., Burgueño R.: Data mining methodology employing artificial intelligence and a probabilistic approach for energy-efficient structural health monitoring with noisy and delayed signals. „Expert Systems with Applications” 2019, Vol. 135.
- [32] Sungkon K., Jungwhae L., Min-Seok P., Byung-Wan J.: Vehicle Signal Analysis Using Artificial Neural Networks for a Bridge Weigh-in-Motion System. „Sensors” 2009, No. 10, s. 7943–7956.
- [33] Sylvia Keßler, Maria Pina Limongelli, Eftychia Apostolidi, Helder Sousa, Mieszko Kuźawa, Eleni Chatzi, Alferd Strauss, Thomas Braml, Florian Zimmert, Jan Bień i inni: fib Bulletin No 109. Existing Concrete Structures Life Management, Testing and Structural Health Monitoring. State of the Art Report, Task Group 3.3, 2022 r. (publikacja w druku).
- [34] Salamak M.: *BIM w cyklu życia mostów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2020.
- [35] Kuźawa M., Bień J.: Projekt systemu do długotrwałej obserwacji przęsła mostu nad rzeką Odrą w ciągu drogi krajowej nr 40b w km 3+144 w miejscowości Kędzierzyn-Koźle. Raport WBLiW Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 12/2020, Wrocław, marzec 2020 r.
- [36] Kuźawa M., Bień J.: Wdrożenie docelowego elektronicznego układu pomiarowego do długotrwałej obserwacji mostu nad rz. Odrą w ciągu drogi krajowej nr 40b w km 3+144 w miejscowości Kędzierzyn-Koźle. Raport WBLiW Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 41/2022, Wrocław, grudzień 2022 r.
- [37] Siwowski T., Bień J., Wiśniewski D., Żółtowski K., Rajchel M., Kamiński T., Kuźawa M.: Wytyczne określania nośności użytkowej drogowych obiektów mostowych. Wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra właściwego ds. transportu; WR-M-82 (w trakcie publikacji).
- [38] Kamiński T., Kuźawa M., Bień J.: *Experimental and numerical assessment of an old backfilled concrete arch bridge*. W: *Proceedings of ARCH 2019 : 9th International Conference on Arch Bridges*, eds. A. Arède, C. Costa. Springer, 2020, s. 194–202.
- [39] Kamiński T., Bień J., Kuźawa M., Zwolski J.: *Live loads in condition assessment of old bridges*. W: *Maintenance, monitoring, safety, risk and resilience of bridges and bridge networks : Proceedings of the Eighth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2016)*, Foz do Iguaçu, Brazil, 26–30 June 2016, eds. T.N. Bittencourt, D.M. Frangopol, A.T. Beck. CRC Press, 2016. s. 1015–1022.

- [40] Bień J., Kamiński T., Kużawa M., Rawa P., Zwolski J.: *Dynamic tests of two old masonry arch bridges over the Odra River in Wrocław*. W: EVACES 2011 : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, 3–5 October 2011, Verenna, Italy, eds. C. Gentile, F. Benedettini. Starrylink Editrice, Brescia, 2011, s. 79–86.
- [41] Kużawa M., Kamiński T., Bień J.: *Fatigue assessment procedure for old riveted road bridges*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2018, No. 4, s. 1259–1274.
- [42] Kużawa M.: *Fatigue performance evaluation of steel arch bridge based on experimental tests in the light of increased operating loads*. W: 9th International Symposium on Steel Bridges : 10-11 September 2018, Prague, Czech Republic. IOP Publishing, 2018.
- [43] Kużawa M., Kamiński T., Bień J.: *Experimental vibration tests in fatigue evaluation of a riveted truss bridge*. W: Experimental vibration analysis for civil structures, eds. J. Conte, R. Astroza, G. Benzoni, G. Feltrin, K. Loh, B. Moaveni, seria: „Lecture Notes in Civil Engineering” 2017, Vol 5.
- [44] Bień J., Kużawa M., Zwolski J., Banakiewicz A., Rabięga J., Rawa P., Adamcewicz S., *Fatigue life assessment of Grunwaldzkiej bridge based on experimental vibration tests*. W: EVACES'09 : Experimental vibration analysis for civil engineering structures : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, 14-16 October 2009, Wrocław, Poland, red. J. Bień. DWE, Wrocław, 2009.
- [45] Bień J., Kużawa M., Kamiński T.: *Validation of numerical models of concrete box bridges based on load test results*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2015, nr 4, s. 1046–1060.
- [46] Bień J., Kużawa M., Kamiński T., Rawa P., Zwolski J.: *Most Rędziniński we Wrocławiu – próbne obciążenia w procesie inwestycyjnym*. W: *Aktualne realizacje mostowe : [Wrocławskie Dni Mostowe] : seminarium, Wrocław, 24–25 listopada 2011*. DWE, Wrocław, 2011, s. 233 –244.
- [47] Adamcewicz S., Bień J., Kużawa M., Zwolski J.: *Experimental identification of dynamic parameters of a deteriorated suspension footbridge*. W: *ECACES'09 : Experimental vibration analysis for civil engineering structures : Wrocław, 14–16 October 2009*, red. J. Bień. DWE, Wrocław, 2009, s. 511–520.
- [48] Bień J., Kużawa M., Rawa P., Zwolski J., Rabięga J., Adamcewicz S., Banakiewicz A.: *Ocena trwałości zmęczeniowej mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu po 100 latach eksploatacji*. „Inżynieria i Budownictwo” 2010, nr 12, s. 692–696.
- [49] Kamiński T., Bień J., Kużawa M., Rabięga J.: *Investigation of the historical Osobowicki Bridge in Wrocław*. W: *Proceedings of the 6th International Conference on Arch Bridges, ARCH '10, [Fuzhou, Fujian, China], October 11–13, 2010*, eds. B. Chen, J. Wei. Fuzhou University, Fuzhou, 2010, s. 405–412.
- [50] Kużawa M., Bień J.: *Experimental vibration analysis of composite bridge superstructure with excessive deformations*. W: Experimental Vibration Analysis for Civil Structures, eds. J. Conte, R. Astroza, G. Benzoni, G. Feltrin, K. Loh, B. Moaveni, seria: „Lecture Notes in Civil Engineering” 2017, Vol 5.
- [51] Kużawa M., Mróz A., Bień J.: *Influence of Permanent Deflections on The Vibrations of Bridge Spans in Operating Conditions*. „Studia Geotechnica et Mechanica” 2022, Iss. 2, s. 1–17.
- [52] Kużawa M., Mróz A., Bień J.: *Experimentally validated time-domain dynamic response analysis of the highway bridge with permanent deflections of spans*. W: EVACES 2023 : Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, August 30–1 September 2023, Milan, Italy.
- [53] Assessment of existing steel structures: recommendations for estimation of remaining fatigue life. JRC Scientific Technical Report No. 43401. European Commission, 2008.
- [54] Kużawa M., Bień J., Cruz P.: *Analysis and fatigue evaluation of Pinhao bridge in Portugal*. W: *Mosty stalowe: projektowanie, technologie budowy, badania, utrzymanie*. Seminarium „Wrocławskie Dni Mostowe”, Wrocław, 27–28 listopada 2008.