

# Możliwości wykorzystania automatycznych systemów decyzyjnych w monitoringu obiektów mostowych

dr inż. Krzysztof Karsznia

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Katedra Inżynierii Budowlanej

napisz do autora:  
krzysztof\_karsznia@sggw.pl

**W artykule przedstawiono koncepcję zastosowania metod uczenia maszynowego (Machine Learning), ze szczególnym uwzględnieniem drzew decyzyjnych w budowaniu i rozwijaniu zintegrowanych systemów geomonitoringu dla obiektów mostowych.**

Zintegrowany monitoring obiektów budowlanych, a w szczególności mostów, wymaga stosowania coraz bardziej zaawansowanych technologii pozyskiwania, przetwarzania oraz modelowania danych. Znane rozwiązania z zakresu badań fizykalnych stanu konstrukcji (tzw. *Structural Health Monitoring*) oraz zmian jej cech geometrycznych (GMS – *Geodetic Monitoring Systems*) zaczynają być stosowane w sposób zintegrowany, dostarczając użytkownikom pełnego obrazu stanu badanych obiektów. W efekcie powstają systemy eksperckie wykrywające zmiany trendów zachodzących zjawisk oraz identyfikujące wpływy czynników wywołujących zagrożenia. Rozwiązania takie, często nazywane systemami geomonitoringu, pozwalają efektywnie zarządzać ryzykiem w odniesieniu do bezpieczeństwa ludzi oraz infrastruktury technicznej.

Geodezyjny, jak również fizykalny monitoring obiektów mostowych stanowią bardzo ważny element procesu ich budowy oraz późniejszej eksploatacji. Tematyka ta była wielokrotnie przedmiotem publikacji, zarówno w „Mostach”, jak również w innych wydawnictwach branżowych. Szczególnie monitoring fizykalny stanu obiektów inżynierskich (*Structural Health Monitoring* – SHM) jest jednym z głównie poruszanych tematów w literaturze fachowej z zakresu budownictwa. Motywacją autora do przedstawienia problematyki zastosowania metod decyzyjnych w monitoringu mostów stał się natomiast fakt, że obiekty te w sposób modelowy prezentują zalety wykorzystania różnych technologii pomiarowych w celu zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji. Dotyczy to zarówno etapu budowy mostów, jak i ich późniejszej eksploatacji.

Setki podręczników i artykułów naukowych, studia przypadku i opisy wdrożeń pozwalają na zapoznanie się z SHM w sposób dogłębny. Podczas obsługi i eksploatacji inwestycji budowlanej istotną rolę odgrywają także pomiary kontrolne (pomiar sieci kątowno-liniowej, tachimetria czy niwelacja), jak również zrobotyzowane systemy monitoringu geodezyjnego (GMS – *Geodetic Monitoring Systems*). Istnieje wiele publikacji na temat geodezyjnych systemów kontrolno-pomiarowych, systemów GMS oraz innych metod kontroli zmian geometrycznych badanych obiektów. Doświadczenia zgromadzone w tej dziedzinie zestawiane są często w formie procedur i wytycznych, gotowych do wdrożenia na konkretnym obiekcie [2]. Warto także wspomnieć, że pierwsze publikowane prace dotyczące wieloelementowych systemów kontroli obiektów hydrotechnicznych pojawiały się już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Jedną z pionierskich publikacji polskich jest niewątpliwie praca powstała w Instytucie Geotechniki Politechniki Wrocławskiej w 1977 roku [3].

Fakt prowadzenia oceny stanu obiektów tak pod kątem zmian ich cech fizykalnych, jak również geometrycznych stanowi niewątpliwie wyzwanie dla świata nauki

## I SUMMARY

### The possibilities of applying automatic decision-making systems in the structural monitoring of bridges

Integrated structural monitoring of buildings, particularly bridges, requires the use of advanced technology for the collecting, processing and modeling of data. Known solutions used for the testing of the physical condition of engineering structures (the so-called Structural Health Monitoring) and the detecting of changes of their geometrical features (GMS – Geodetic Monitoring Systems) have started to be used in a combined way providing users with a complete overview of the status of the examined objects. As a result, expert systems have been developed, making it possible to detect changes in the trends of occurring phenomena and identifying the influence of various factors invoking hazards. Such solutions – often named „geomonitoring” – enable their users to effectively manage risks – especially related to the safety of people and infrastructure.

The article presents a concept of the use of machine learning technologies with special regard to the decision trees in building and developing integrated structural geomonitoring systems to examine bridges.

**Keywords:** SHM, GMS, geoinformation systems, geomonitoring, integration of measurements

oraz praktyki – mowa o modelach integracji, budowaniu baz wiedzy oraz całych systemów eksperckich [6]. W tym zakresie na świecie prowadzonych jest wiele prac badawczych i wdrożeniowych, publikowanych i prezentowanych na konferencjach.

### Monitoring czy system pomiarowy?

Realizacja systemów monitoringu inżynierskiego obwarowana jest wieloma czynnikami, między innymi koniecznością rozpoznania możliwych zjawisk występujących na obiekcie i w jego otoczeniu, doboru odpowiedniej technologii pomiarowej, zapewnienia bezpiecznego transferu danych do centrum obliczeniowego oraz ustalenia tzw. „progów bezpieczeństwa”, zwanych także „progami alarmowymi”. Jak przedstawiono w publikacji [12], bez spełnienia tychże warunków nie można mówić o pełnym systemie monitoringu, a co najwyżej o systemie pomiarowym, a raczej o procedurze pomiaru kontrolnego. Zgodnie z zawartą tam definicją monitoring jest działalnością mającą na celu wykrywanie zagrożeń. Cytując jej autora – profesora Piotra Witakowskiego: „Podczas monitoringu, niezbędne jest wcześniejsze ustalenie rodzaju zagrożenia – określenie warunku monitoringu – i dostosowania systemu monitorowania do tego zagrożenia oraz informowania o zagrożeniu. System monitoringu musi się więc składać z dwóch



Widok konstrukcji Mostu Gdańskiego w Warszawie (fot. K. Karsznia)



podsystemów – obserwacyjnego i ostrzegawczego. Podsystem informacyjny musi umożliwiać pozyskiwanie informacji stosowanych do rodzaju potencjalnego zagrożenia. System ostrzegawczy musi mieć możliwość analizy obserwacji, porównania jej ze stanami alarmowymi i przekazywania informacji o wystąpieniu stanów alarmowych pod ustalone adresy”.

Szczególnie ważne jest tu ostatnie zdanie. Wynika z niego, że aby system pomiarowo-teleinformatyczny nosił znamiona monitoringu, musi być wyposażony w moduł analityczny konfrontujący otrzymane wyniki pomiarów z wartościami modelowymi, by w wyniku takiego wnioskowania poinformować odpowiednie służby o zaistniałych zagrożeniach. W przypadku nieskomplikowanych systemów pomiarowych reprezentujących jeden rodzaj czujników bądź też zastaw czujników o podobnych zasadach działania (pozyskiwanie danych przestrzennych, odczyty wartości fizycznych), konfiguracja progów bezpieczeństwa może wydawać się łatwa (co w istocie nie jest prawdą). Polega ona bowiem na ustaleniu wartości granicznej (rys. 1), powyżej której system wygeneruje zaprogramowaną uprzednio reakcję (rys. 2).

Poważny problem pojawia się podczas współdziałania w ramach jednego systemu różnych zestawów czujników dostarczających zarówno danych GMS, jak i SHM. W takim przypadku istnieją dwa możliwe rozwiązania: 1) określenie wartości progowych dla poszczególnych czujników/instrumentów niezależnie, 2) zbudowanie modelu integracji wyników pomiarów, a w rezultacie próba opracowania kompleksowego modelu zagrożeń dla badanego obiektu.

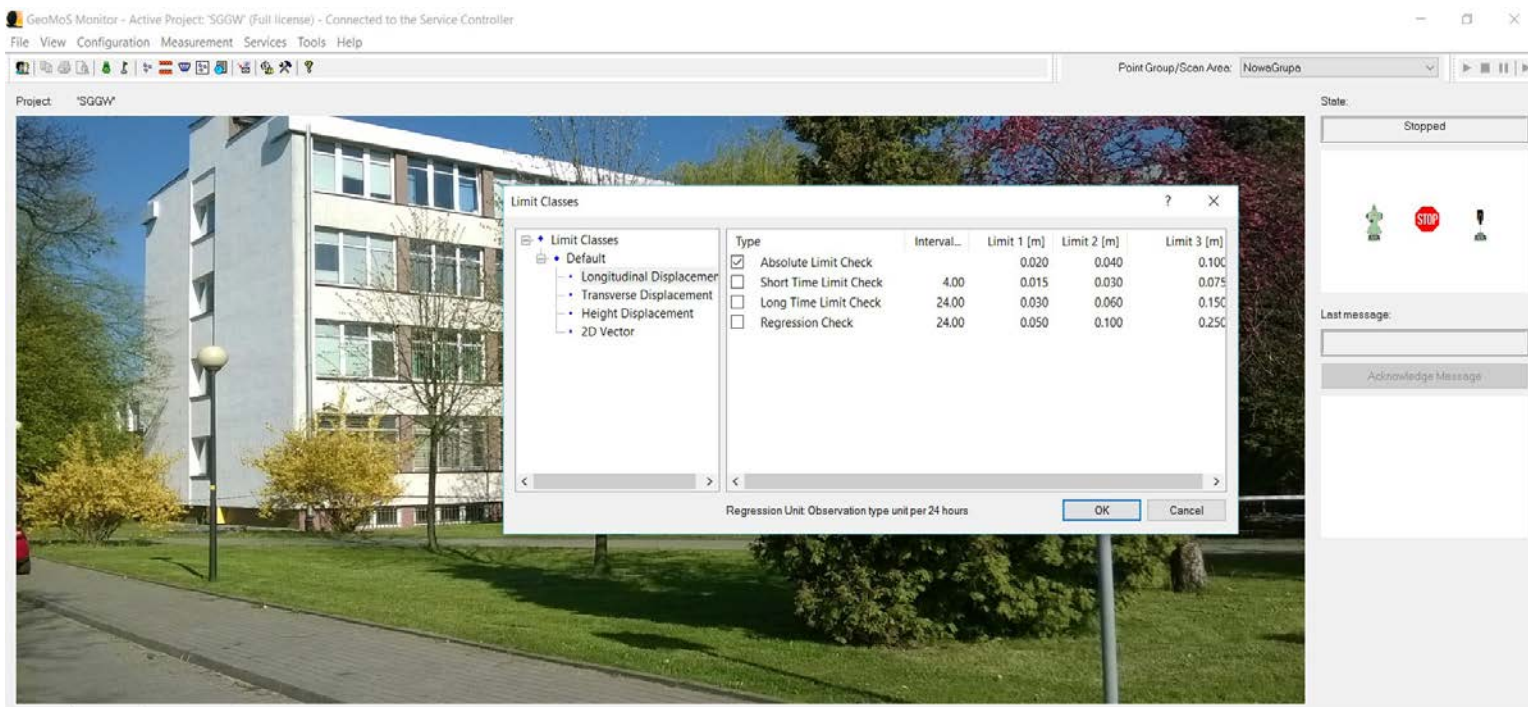
W praktyce z przyczyn obiektywnych (ograniczony czas na wdrożenie oraz zasoby finansowe, z reguły zredukowane do niezbędnego minimum) znacznie częściej, jeśli nie prawie zawsze, realizowany jest punkt 1. Roz-

wiązanie to sprawdza się w warunkach znanych, przy dobrze określonym modelu oczekiwanych odkształceń i przemieszczeń oraz dla obiektów standardowych. Natomiast dla obiektów większych czy unikalnych, przy narzuconym szybkim tempie realizacji inwestycji, jak również dla standardowych obiektów budowlanych, ale o dużym, często strategicznym znaczeniu, procedura ta wydaje się ze wszech miar niewystarczająca. W takich przypadkach nieunikniona będzie budowa systemu geoinformacyjnego – pozyskującego, analizującego i archiwizującego dane o obiekcie. Powstaje więc unikalny system monitoringu (stosowanym często terminem jest „geomonitoring”) mający za zadanie na bieżąco budować aktualny model danych, a następnie oceniać jego zgodność ze znanym modelem stanu projektowego (model odkształceń i przemieszczeń, model konstrukcji, oczekiwane wartości fizyczne itp.). W wyniku tej oceny system „podejmuje decyzje”, czyli generuje alerty, alarmy oraz powiadomienia. Decyzja taka musi zapadać po jednoznacznym zakwalifikowaniu wykrytego zdarzenia jako niebezpieczne (lub inaczej – „interesujące”). W przeciwnym razie wysyłane komunikaty mogą okazać się niewiarygodne i tym samym „znieczulić” służby na określony rodzaj wiadomości. Stawia to pod znakiem zapytania samą zasadność wdrażania systemów geomonitoringu i wyzwala pokusę zastępowania ich znanymi, klasycznymi zestawami pomiarów okresowych.

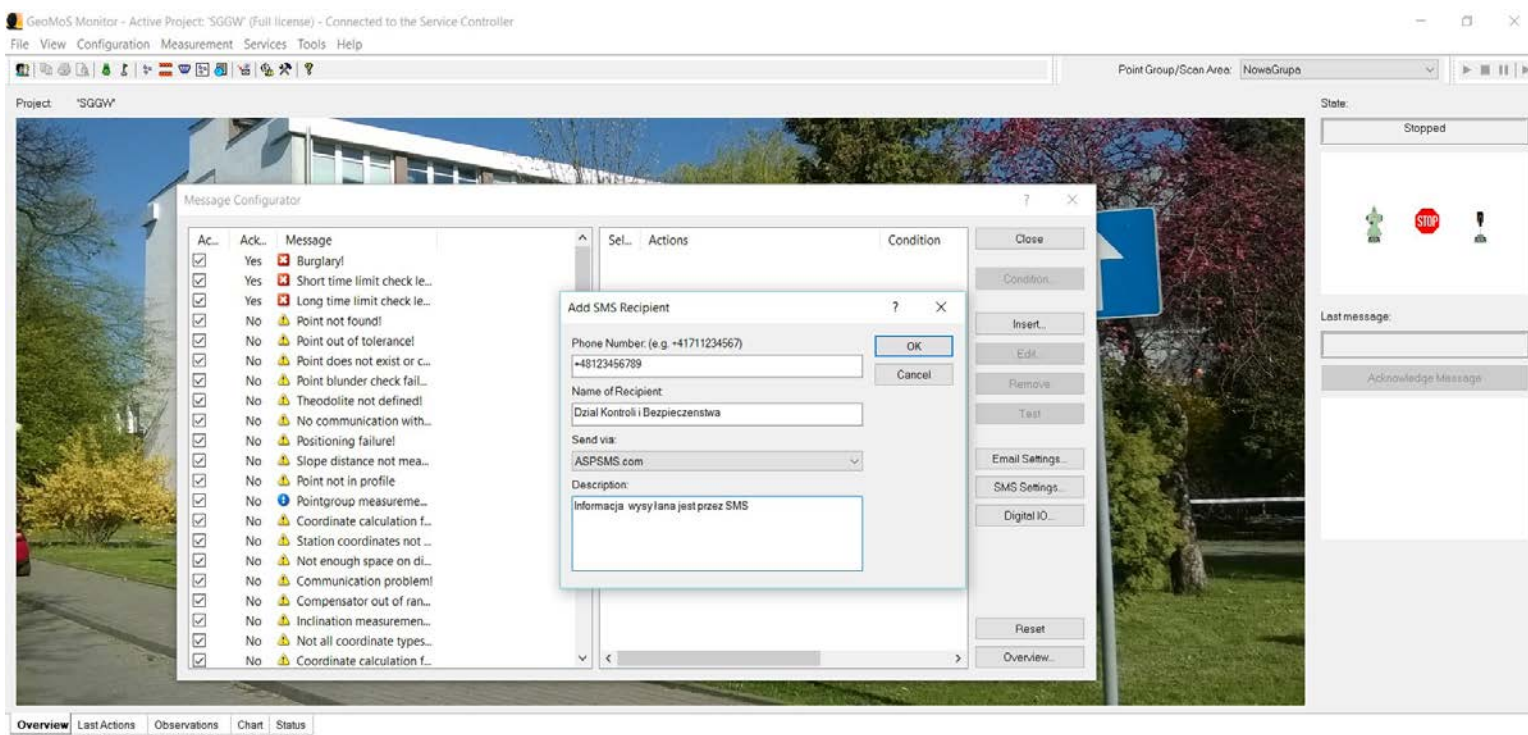
### Jak działają zintegrowane systemy monitoringu obiektów inżynierskich?

Prace badawcze dotyczące budowy modułów decyzyjnych zintegrowanych systemów monitoringu obiektów inżynierskich prowadzone są przez autora niniejszego artykułu w Katedrze Inżynierii Budowlanej warszawskiej SGGW [7]. Aby zobrazować sposób ich działania, przy-





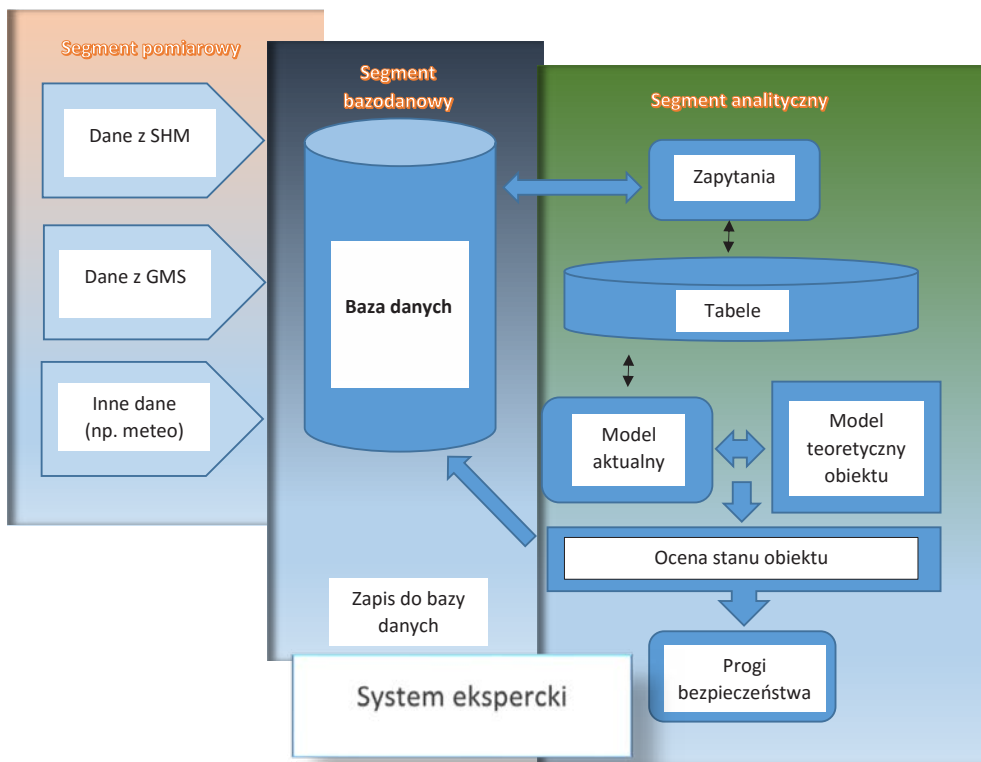
Rys. 1. Widok okna dialogowego systemu monitoringu Leica GeoMoS – ustalanie wartości granicznych progów alarmowych „Limit Classes” (lic. Katedra Inżynierii Budowlanej, WBIS SGGW)



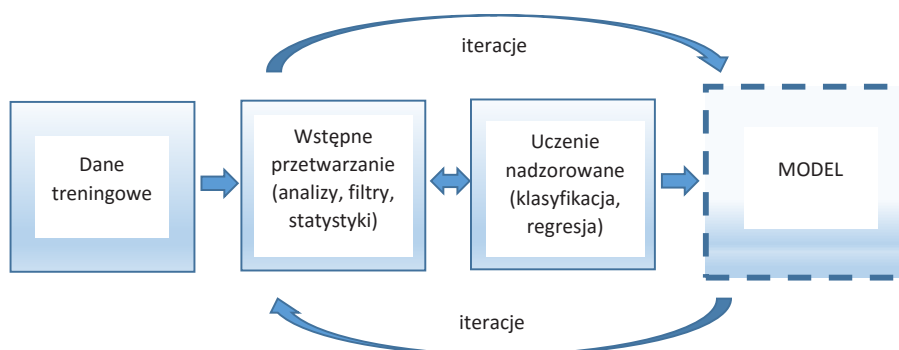
Rys. 2. Widok okna dialogowego systemu monitoringu Leica GeoMoS – konfigurator wiadomości „Message Configurator” (lic. Katedra Inżynierii Budowlanej, WBIS SGGW)

► rzyjemy się schematowi systemu eksperckiego służącego do oceny stanu obiektów inżynierskich (rys. 3). Dane pozyskiwane z czujników na obiekcie przesyłane są do centralnej bazy danych, gdzie zapisywane są w odpowiednich tabelach. Ponieważ z reguły same systemy pomiarowe działają we współpracy z własnymi bazami danych, na etapie projektowania systemu złożonego należy przewidzieć aplikację integrującą wspomniane bazy. Rozwiązania takie stosowane są powszechnie w geoinformatyce i stanowiły przedmiot wielu wdrożeń systemów geoinformacyjnych (powszechnie określanych jako GIS – *Geographic Information Systems*). Następnie, dzięki zaprogramowanemu zestawowi skryptów bazodanowych generujących zapytania (powszechny język SQL – *Structured Query Language*), pobierane są z bazy głównej te dane, które zasilą budowę modelu aktualnego (zwanego także bieżącym). Model ten porównywany jest z wprowadzonym uprzednio do systemu modelem obiektu. Powstaje on na bazie danych archiwalnych,

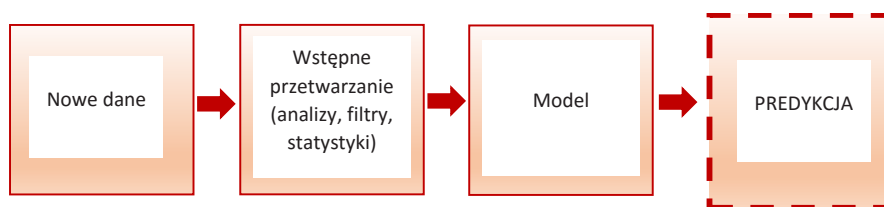
informacji technicznych, wyników prowadzonych wcześniej pomiarów, studiów *etc.* Wynikiem porównania jest oszacowanie poziomu niepewności pomiaru, jego precyzji oraz osiągniętych dokładności. Uzyskany nowy model poddawany jest testom statystycznym weryfikującym wiarygodność modelu oraz testującym hipotezy o występowaniu, bądź nie, sytuacji zagrożenia. Na bazie tychże analiz ustalone są najbardziej wiarygodne progi bezpieczeństwa, które z kolei weryfikowane są przez system z założeniami projektowymi. Po dokonaniu takiej oceny generowana jest informacja – komunikat wysyłany do operatora systemu lub odpowiedniej służby odpowiedzialnej za stan obiektu. Wynik przeprowadzonej analizy zapisywany jest następnie do głównej bazy danych, dzięki czemu aktualizuje się tzw. „proces uczenia” systemu. Od tej pory dzięki zaimplementowanym algorytmom sztucznej inteligencji (np. sieci neuronowe) system „dopasowuje się” do unikalnej charakterystyki badanego obiektu. W rezultacie powstaje system ekspercki



Rys. 3. Schemat działania proponowanego systemu eksperckiego w systemie monitoringu inżynierskiego. Opracowanie własne



Rys. 4. Schemat działania procesu treningowego w uczeniu maszynowym środowiska Matlab<sup>®</sup>. Źródło: na podstawie [10]



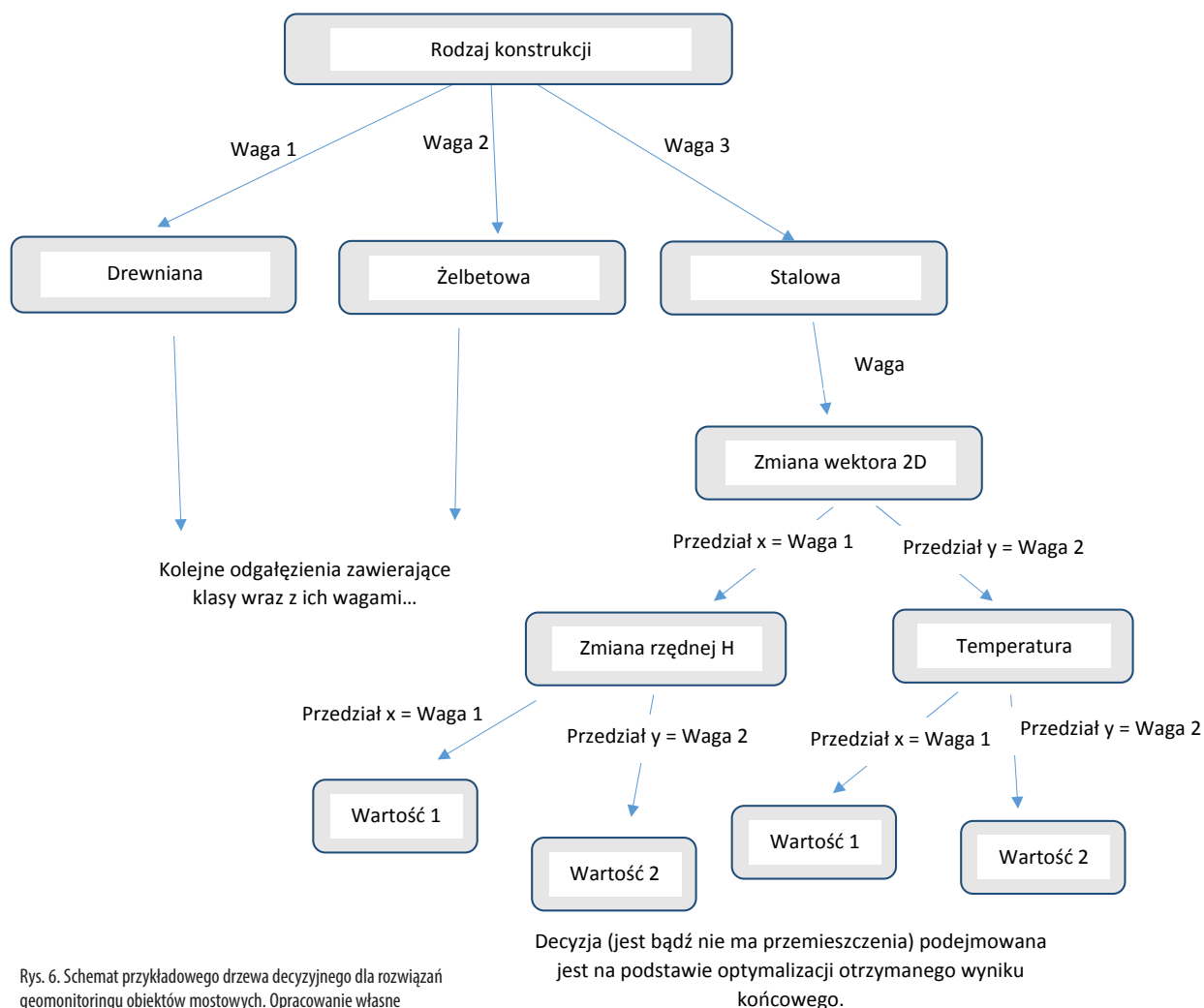
Rys. 5. Schemat działania procesu budowania modelu predykcji w środowisku Matlab<sup>®</sup>. Źródło: na podstawie [10]

**Piśmiennictwo**

1. Bujak Ł.: *Drzewa decyzyjne*. Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń 2008.
2. *Committee on Automated Monitoring of Dams and Their Foundations. Automated dam monitoring systems – guidelines and case histories*. Paris 2000.
3. Dobrzański J., Kowalczyk M.: *Koncepcja automatyzacji pomiarów kontrolnych zapór ziemnych nadpoziomowych*. „Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej”, nr 22, „Konferencje”, nr 8, Wrocław 1977.
4. Faber M.H., Stewart M.G.: *Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion*. „Reliability Engineering and System Safety”, 80/2003, str. 173-184.
5. Kalisch M.: *Modelowanie testów diagnostycznych za pomocą metod uczenia maszynowego*. „Modelowanie Inżynierskie”, nr 53/2013, str. 70-77.
6. Karsznia K.: *Pomiary zintegrowane z użyciem światłowodów w monitorowaniu obiektów mostowych*. „Mosty”, 4/2016, str. 24-27.
7. Karsznia K.: *Geoinformacja a bezpieczeństwo obiektów infrastruktury technicznej – podejście interdyscyplinarne*. [W:] *Geoinformacja jako metoda ochrony przed zagrożeniami*. Monografia pod red. K. Karsznia i K. Podawcy, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2014, s. 7-21.

dający możliwość dogłębnego rozpoznania zachowania się konstrukcji oraz identyfikowania zjawisk, które na nią w różnym stopniu oddziałują. Niezwykle istotnym, wręcz newralgicznym elementem zaprezentowanego schematu jest etap generowania powiadomień, czyli klasyfikowania zdarzeń jako bezpieczne bądź niebezpieczne. W tym celu stosowane są procedury i algorytmy tzw. „uczenia maszynowego” – ang. *Machine Learning* [9]. Polega ono na analizowaniu przez system informatyczny (np. w środowisku Matlab<sup>®</sup> firmy MathWorks, stosowanym szeroko w świecie obliczeń matematycznych i inżynierskich, także przez autora niniejszej publikacji) zbiorów danych (niekiedy dużych zbiorów danych z zakresu „Big Data” – zob. [5]).

W prezentacji z warsztatów internetowych krakowskiej firmy ONT (webinarium) – polskiego przedstawicielstwa firmy MathWorks [10] – zawarto schemat funkcjonalny uczenia maszynowego. Proces taki składa się z dwóch segmentów – treningu oraz predykcji. Do systemu wprowadzane są dane treningowe, a następnie poprzez ich przetwarzanie wstępne oraz uczenie nadzorowane budowany jest model zjawiska. Obrazuje to schemat zamieszczony na rys. 4. Bazując na uzyskanych wynikach procesu treningowego, budowany jest model predykcji, który to proces zobrazowany został na rys. 5. W uczeniu maszynowym rozwiązany zostaje problem różnorodności danych, braku jednego, uniwersalnego



Rys. 6. Schemat przykładowego drzewa decyzyjnego dla rozwiązań geomonitoringu obiektów mostowych. Opracowanie własne

8. Khader A.I., Rosenberg D.E., McKee M.: *A decision tree model to estimate the value of information provided by a groundwater quality monitoring network*, „Hydrology and Earth System Sciences”, 17/2013, str. 1797-1807.
9. Marsland S.: *Machine Learning – An algorithmic perspective*. CRC Press, Boca Raton, London, New York 2009.
10. Oprogramowanie Naukowo-Techniczne Sp. z o.o. sp. k., www.ont.com.pl, materiały szkoleniowe: <http://www.ont.com.pl/webinaria/uczenie-maszynowe-w-matlabie/>
11. RapidMiner Studio – Manual (2014). Rapid Miner (<http://docs.rapidminer.com/downloads/RapidMiner-v6-user-manual.pdf>).
12. Witakowski P.: *Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji*. „Czasopismo Techniczne”, Biblioteka Cyfrowa, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.

► narzędzia informatycznego do obsługi wielu źródeł informacji oraz czasochłonności klasycznego podejścia eksperckiego. Dzięki zaawansowanym technikom filtracji, statystycznemu opracowaniu danych oraz testom diagnostycznym [5] identyfikowane są bardzo szybko obserwacje odstające oraz tzw. „szum” pomiarowy, który zaburza obraz ocenianej sytuacji. Co więcej, możliwe staje się ustalenie wielkości udziału błędów pomiarowych oraz precyzji odczytu czujników (bądź instrumentów) w dokładności budowanego modelu końcowego. To z kolei pozwala ustalić najbardziej wiarygodny model predykcji zdarzeń, a w rezultacie skonfigurować progi bezpieczeństwa. System taki wchodzi w skład kompleksowego zarządzania ryzykiem obiektu budowlanego (w omawianym przypadku – mostu). Taka ocena ryzyka stanowi kluczowy element całego procesu inwestycyjnego i sama w sobie stanowi przedmiot prowadzonych w świecie badań naukowych [4].

Automatyczne podejmowanie przez system decyzji odnośnie do klasyfikacji danego zdarzenia jako bezpieczne lub niebezpieczne jest możliwe np. dzięki zastosowaniu tzw. „drzew decyzyjnych” – diagramów analizujących spełnienie określonych warunków w celu doboru optymalnej ścieżki postępowania w rozwiązaniu konkretnych zagadnień inżynierskich [1, 8]. W trakcie budowy drzewa decyzyjnego kluczową rolę odgrywają klasyfikatory – warunki decydujące o przebiegu konkretnej ścieżki decyzyjnej. Dobór odpowiednich klasyfikatorów oraz testowanie ich sprawności jest możliwe dzięki zastosowaniu specjalistycznego oprogramowania. Dzięki swojej dostępności, bogatej dokumentacji technicznej oraz łatwości obsługi dużą popularnością cieszy się RapidMiner [5, 11]. W programie tym użytkownik definiuje kolejne

klasyfikatory oraz buduje ich połączenia. W efekcie otrzymuje gotowe drzewo decyzyjne, na podstawie którego można następnie skonfigurować segment analityczny przedstawiony na rys. 3. W odniesieniu do monitoringu mostów przykładowy schemat drzewa decyzyjnego zaprezentowano na rys. 6.

Należy wyjaśnić, że drzewo takie powstaje w procesie testowania i modelowania, a jego jakość zależy od współpracy ekspertów z dziedzin budownictwa, geodezji, geotechniki i innych nauk pokrewnych. Zgodnie bowiem z przytoczoną we wstępie definicją systemu monitoringu technologia geoinformacyjna musi zostać dopasowana do występujących rodzajów zagrożeń.

### Podsumowanie

Zintegrowane systemy monitoringu stanowią zatem pole do szerokich działań naukowych i wdrożeniowych. Ich budowanie wymaga współpracy specjalistów z różnych dyscyplin naukowych oraz ze świata praktyki. Obserwując stale rosnące zapotrzebowanie na tego typu rozwiązania, szczególnie na systemy dopasowane do konkretnych inwestycji, należy postrzegać rozwój monitoringu eksperckiego w kategoriach jednego z głównych nurtów badawczo-rozwojowych w kraju i na świecie. □

### Podziękowania

Za współpracę podczas pisania niniejszego artykułu autor dziękuje swojej żonie dr inż. Izabeli Karszni z Zakładu Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, która prowadzi badania nad zastosowaniem uczenia maszynowego w generalizacji kartograficznej.