

Jan Bień

**Modelowanie obiektów mostowych
w procesie ich eksploatacji**

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2002

SPIS TREŚCI

1. SYSTEMOWE WSPOMAGANIE EKSPLOATACJI OBIEKTÓW MOSTOWYCH	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Cel i zakres pracy.....	12
1.3. Komputerowe wspomaganie gospodarowania obiettami mostowymi.....	14
1.3.1. Systemy, informacje i systemy informacyjne	14
1.3.2. Bazy danych, bazy wiedzy i systemy ekspertowe.....	18
1.3.3. Informacyjne podstawy zarządzania obiektami mostowymi	22
1.3.4. Ewolucja komputerowych systemów gospodarowania mostami.....	32
1.3.5. Strategie tworzenia i architektura systemów wspomagających gospodarowanie mostami.....	38
1.4. Zarządzanie obiektami mostowymi w Polsce.....	46
1.4.1. Infrastruktura mostowa	46
1.4.2. Komputerowe wspomaganie zarządzania eksploatacją mostów w Polsce	51
2. PODSTAWY NUMERYCZNEGO MODELOWANIA OBIEKTÓW MOSTOWYCH	61
2.1. Modele stosowane w systemach wspomagających eksploatację mostów	61
2.2. Modele geometrii obiektów mostowych.....	65
2.3. Ewidencyjne modele obiektów mostowych.....	69
2.3.1. Struktura informacji ewidencyjnych	69
2.3.2. Ewidencyjne modele obiektów a modele geometrii.....	72
3. MODELOWANIE USZKODZEŃ OBIEKTÓW MOSTOWYCH	78
3.1. Wprowadzenie	78
3.2. Systematyka uszkodzeń	84
3.2.1. Kryteria klasyfikacji uszkodzeń.....	84
3.2.2. Podstawowe typy uszkodzeń	86
3.2.3. Hierarchiczny system klasyfikacji uszkodzeń.....	90
3.3. Zasoby informacji o uszkodzeniach	92
3.4. Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^0	98
3.4.1. Metoda segmentów	98
3.4.2. Rozległość uszkodzeń	101
3.4.3. Intensywność uszkodzeń	102
3.4.3.1. Podstawowe założenia.....	102
3.4.3.2. Destrukcyjna materiału	103
3.4.3.3. Utrata ciągłości materiału.....	104
3.4.3.4. Ubytki materiału.....	104
3.4.3.5. Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych	106
3.4.3.6. Deformacje, uszkodzenia związane ze zmianą położenia, zanieczyszczenia	107

3.4.4.	Lokalizacja uszkodzeń	107
3.4.5.	Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń.....	108
3.5.	Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^1	110
3.5.1.	Wprowadzenie	110
3.5.2.	Intensywność uszkodzeń.....	111
3.5.2.1.	Uwagi ogólne	111
3.5.2.2.	Deformacje.....	112
3.5.2.3.	Destrukcja materiału	113
3.5.2.4.	Utrata ciągłości materiału.....	115
3.5.2.5.	Ubytki materiału.....	116
3.5.2.6.	Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych	117
3.5.2.7.	Uszkodzenia związane ze zmianą położenia	119
3.5.2.8.	Zanieczyszczenia.....	120
3.5.3.	Rozległość uszkodzeń	122
3.5.4.	Lokalizacja uszkodzeń	122
3.5.5.	Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń.....	123
3.6.	Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^2	126
3.6.1.	Wprowadzenie	126
3.6.2.	Intensywność uszkodzeń.....	126
3.6.2.1.	Uwagi ogólne	126
3.6.2.2.	Deformacje.....	127
3.6.2.3.	Destrukcja materiału	128
3.6.2.4.	Utrata ciągłości materiału.....	130
3.6.2.5.	Ubytki materiału.....	131
3.6.2.6.	Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych	132
3.6.2.7.	Uszkodzenia związane ze zmianą położenia	134
3.6.2.8.	Zanieczyszczenia.....	135
3.6.3.	Rozległość uszkodzeń	136
3.6.4.	Lokalizacja uszkodzeń	136
3.6.5.	Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń.....	137
3.7.	Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^3	139
3.7.1.	Wprowadzenie	139
3.7.2.	Intensywność uszkodzeń.....	139
3.7.3.	Rozległość uszkodzeń	141
3.7.4.	Lokalizacja uszkodzeń	141
3.7.5.	Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń.....	142
4.	FUNKCJE EKSPERTOWE.....	143
4.1.	Wprowadzenie	143
4.1.1.	Funkcje ekspertowe w zarządzaniu obiektami mostowymi	143
4.1.2.	Metody i techniki reprezentacji wiedzy	146
4.2.	Sieci hybrydowe jako tworzywo funkcji ekspertowych	150
4.2.1.	Koncepcja sieci hybrydowych	150
4.2.2.	Komputerowe wspomaganie tworzenia funkcji ekspertowych.....	154
4.2.2.1.	Kreator funkcji ekspertowych	154
4.2.2.2.	Projektowanie struktury funkcji ekspertowej	157
4.3.	Komponenty funkcyjne.....	160
4.3.1.	Funkcje modelujące – podstawowe określenia	160
4.3.2.	Tworzenie komponentów funkcyjnych.....	160

4.4. Komponenty neuronowe.....	165
4.4.1. Sieci neuronowe – podstawowe określenia.....	165
4.4.2. Wielowarstwowe sieci jednokierunkowe.....	168
4.4.3. Uczenie sieci neuronowych	171
4.4.4. Tworzenie komponentów neuronowych.....	174
4.5. Komponenty rozmyte	183
4.5.1. Modelowanie rozmyte – podstawowe określenia	183
4.5.2. Operacje na zbiorach rozmytych.....	187
4.5.2.1. Uwagi ogólne	187
4.5.2.2. Przecięcie zbiorów rozmytych	187
4.5.2.3. Połączenie zbiorów rozmytych	188
4.5.3. Przybliżone wnioskowanie	189
4.5.4. Tworzenie komponentów rozmytych.....	191
4.5.4.1. Definiowanie właściwości komponentów	191
4.5.4.2. Operacja rozmywania (fuzyfikacja)	195
4.5.4.3. Operacja wnioskowania (inferencja)	197
4.5.4.4. Operacja ostrzenia (defuzyfikacja).....	201
5. POZYSKIWANIE WIEDZY NA POTRZEBY FUNKCJI EKSPERTOWYCH.....	204
5.1. Źródła wiedzy i metody jej pozyskiwania	204
5.2. Analiza baz danych i dokumentacji technicznej.....	206
5.3. Analiza konstrukcji.....	214
5.3.1. Narzędzia analizy konstrukcji.....	214
5.3.2. Wyznaczanie wartości wielkości statycznych.....	217
5.3.3. Ocena wykorzystania cech konstrukcji.....	218
5.3.4. Wpływ uszkodzeń na wielkości statyczne	221
5.3.5. Wpływ uszkodzeń na wykorzystanie cech konstrukcji	224
5.3.6. Funkcje i obwiednie wrażliwości.....	227
5.3.7. Analiza konstrukcji z wykorzystaniem funkcji i obwiedni wrażliwości	230
5.4. Akwizycja wiedzy ekspertów	236
6. OCENA KONDYCJI OBIEKTÓW MOSTOWYCH.....	239
6.1. Kryteria i metody oceny	239
6.2. Ocena stanu technicznego obiektów mostowych przy wykorzystaniu narzędzi ekspertowych	249
6.2.1. Modele geometrii typu E^0	249
6.2.1.1. Zasady oceny stanu technicznego	249
6.2.1.2. Architektura funkcji ekspertowej	251
6.2.1.3. Architektura sieci hybrydowych.....	253
6.2.1.4. Implementacja komputerowa	260
6.2.2. Modele geometrii typu E^1	263
6.2.2.1. Zasady oceny stanu technicznego	263
6.2.2.2. Architektura funkcji ekspertowej	267
6.2.2.3. Architektura sieci hybrydowych.....	267
6.2.2.3.1. Ogólna koncepcja.....	267
6.2.2.3.2. Pośrednia metoda wyznaczania funkcji wrażliwości.....	273
6.2.2.3.3. Bezpośrednia metoda wyznaczania funkcji wrażliwości.....	291

6.2.2.3.4. Ocena stanu technicznego na podstawie stopnia i zakresu uszkodzenia.....	293
6.2.3. Ocena stanu technicznego obiektów na podstawie ocen stanu ich części składowych.....	301
6.3. Ocena przydatności użytkowej obiektów mostowych przy wykorzystaniu narzędzi ekspertowych.....	303
6.3.1. Rozmyty model przydatności użytkowej.....	303
6.3.2. Funkcja ekspertowa wspomagająca ocenę przydatności użytkowej.....	306
6.3.2.1. Architektura funkcji ekspertowej.....	306
6.3.2.2. Ocena przydatności użytkowej ze względu na nośność.....	307
6.3.2.3. Ocena przydatności użytkowej ze względu na prędkość ruchu.....	311
6.3.2.4. Ocena przydatności użytkowej ze względu na skrajnie.....	312
6.3.3. Ocena przydatności użytkowej obiektów na podstawie ocen parametrów użytkowych.....	315
6.4. Ocena kondycji obiektów mostowych.....	316
6.4.1. Miary kondycji obiektów.....	316
6.4.2. Klasyfikacja obiektów na podstawie ocen ich kondycji.....	318
7. UWAGI KOŃCOWE.....	323
7.1. Podsumowanie.....	323
7.2. Kierunki dalszych badań.....	326
PRACE CYTOWANE.....	328

1. SYSTEMOWE WSPOMAGANIE EKSPLOATACJI OBIEKTÓW MOSTOWYCH

1.1. Wprowadzenie

Dziedzina wiedzy określana ogólną nazwą *inżynierii mostowej* obejmuje dwa podstawowe obszary zastosowań: proces projektowania i budowy nowych obiektów mostowych oraz proces eksploatacji obiektów po ich oddaniu do użytkowania, nazywany często procesem gospodarowania obiektami mostowymi. Granicą między tymi obszarami jest zakończenie fazy budowy obiektu mostowego i rozpoczęcie jego funkcjonowania jako elementu infrastruktury komunikacyjnej. Znaczna część wiedzy z zakresu inżynierii mostowej jest wykorzystywana w obu wymienionych wyżej obszarach zastosowań, ale istnieją też liczne zagadnienia specyficzne dla każdego z nich. Należy tu podkreślić przede wszystkim następujące różnice:

- zagadnienia projektowania i budowy dotyczą z reguły indywidualnych rozwiązań ukierunkowanych na pojedyncze obiekty, natomiast zagadnienia utrzymania i eksploatacji muszą być rozpatrywane w sposób systemowy zarówno w odniesieniu do każdego pojedynczego obiektu, jak i do całej infrastruktury mostowej układu komunikacyjnego;
- proces projektowania odbywa się przy założeniu pewnych idealnych, najczęściej określonych normowo, modeli materiałów konstrukcyjnych oraz przy przyjęciu zastępczych, uproszczonych modeli obciążeń konstrukcji – w zagadnieniach eksploatacji konieczne jest poznawanie i uwzględnianie rzeczywistych, zmieniających się w czasie, warunków pracy każdego obiektu;
- projektowany nowy obiekt musi spełniać określone, zdefiniowane w założeniach projektowych, wymagania użytkowe (np. nośność, sztywność, cechy dynamiczne, wymiary skrajni ruchu) – w trakcie eksploatacji niezbędne jest uwzględnianie zmieniających się wymagań użytkowników;
- w czasie eksploatacji obiekty mostowe ulegają degradacji, a w związku z tym do ich racjonalnego utrzymania niezbędny jest jednolity system wykrywania, identyfikacji i opisu uszkodzeń obiektów, a także obiektywna metodyka oceny ich stanu technicznego i przydatności użytkowej – problem ten nie występuje na etapie projektowania nowych konstrukcji;

- w projektowaniu są używane z reguły informacje o charakterze zdeterminowanym (np. wymiary przeszkody, normowe obciążenia, określone normowo cechy materiału) – w gospodarowaniu obiektami użytkowymi jest konieczne wykorzystywanie także informacji niepewnych i nieprecyzyjnych (np. subiektywne jakościowe oceny uszkodzeń, stanu technicznego itp.).

Wszystkie wymienione wyżej różnice decydują o istotnej odmienności metod modelowania obiektów mostowych na potrzeby procesu ich eksploatacji w stosunku do metod stosowanych w trakcie projektowania i budowy obiektów.

W ciągu swego rozwoju inżynieria mostowa aż do połowy XX wieku była zdominowana przez zagadnienia związane z projektowaniem i wznoszeniem budowli mostowych. Szczególnie szybki postęp w tej dziedzinie zaznaczył się w wieku XIX i XX, gdy potrzeby wynikające z intensywnego rozwoju transportu kolejowego, a następnie samochodowego, mogły być realizowane dzięki wykorzystaniu nowych materiałów (np. betonu), dokładniejszych metod analizy konstrukcji i bardziej zaawansowanych technologii budowy. Dość długo nie zwracano szczególnej uwagi na potrzeby w zakresie systemowego utrzymania eksploatowanych obiektów, gdyż stosunkowo nowe konstrukcje nie sygnalizowały zagrożeń i podbudowywały przekonanie o znacznej trwałości obiektów mostowych. Działania utrzymaniowe podejmowano z reguły doraźnie, gdy wystąpiła konieczność usunięcia uszkodzeń. Zdarzające się awarie i katastrofy obiektów dawały przede wszystkim impuls dośkonaleń metod projektowania i realizacji konstrukcji, a nie wprowadzaniu systematycznej kontroli ich stanu.

Przez długie wieki odpowiedzialność za naprawy obiektów mostowych obciążała zwyczajowo, w różnych formach, mieszkańców okolicznych obszarów lub właścicieli terenów, na których znajdowały się mosty. Z czasem zasady utrzymania obiektów w poszczególnych krajach były obejmowane szczegółowymi uregulowaniami prawnymi, czego przykładem może być *The Bridges Act* [338] wydany w roku 1530 przez króla Anglii Henryka VIII.

Intensywny rozwój układów komunikacyjnych, trwający praktycznie od połowy XIX wieku, doprowadził w wieku XX do sytuacji, w której w większości rozwiniętych gospodarczo krajów liczba projektowanych i budowanych każdego roku nowych konstrukcji mostowych nie przekracza 1% ogólnej liczby obiektów eksploatowanych. Racjonalne zarządzanie pozostałymi ponad 99% użytkowanej infrastruktury mostowej, o bardzo dużej wartości i jeszcze większym znaczeniu dla sprawnego funkcjonowania każdego państwa, wymaga coraz doskonalszych narzędzi.

Pierwsze próby w zakresie jednolitego ewidencjonowania obiektów mostowych i przeprowadzania ich systematycznych przeglądów podjęto w drugiej połowie XX wieku, co zapoczątkowało tworzenie systemowych rozwiązań w gospodarowaniu obiektami mostowymi. Początkowo były to systemy ewidencyjne, gromadzące podstawowe dane o lokalizacji, parametrach technicznych oraz parametrach użytkowych obiektów. Dane te były przechowywane w formie ksiąg inwentarzowych,

kart katalogowych, zestawień tabelarycznych itp. Z czasem gromadzone zasoby wzbogacano dokumentacją rysunkową i fotograficzną, danymi z przeglądów i informacjami o wykonanych robotach utrzymaniowych. W miarę gromadzenia doświadczeń w zarządzaniu infrastrukturą komunikacyjną oraz informacji o zarządzanych obiektach i dotyczących ich procesach wprowadzano elementy systemowej oceny stanu technicznego i przydatności użytkowej obiektów. Szersze wykorzystywanie tych informacji w zarządzaniu było limitowane przede wszystkim technicznymi możliwościami gromadzenia, przetwarzania i udostępniania niezbędnych danych.

Wyraźny postęp w tej dziedzinie rozpoczął się w latach sześćdziesiątych XX wieku, gdy w inżynierii mostowej – jak i w całej inżynierii lądowej – nastąpił intensywny rozwój metod komputerowych stymulowany systematycznie zwiększającymi się możliwościami sprzętu komputerowego oraz oprogramowania. W obszarze projektowania i budowy obiektów mostowych powstały nowe dziedziny, takie jak komputerowe wspomaganie projektowania (ang. *Computer Aided Design* – CAD) czy komputerowe wspomaganie wytwarzania (ang. *Computer Aided Manufacturing* – CAM), a w zakresie gospodarowania eksploatowanymi obiektami mostowymi pojawiły się wspomagane komputerowo systemy zarządzania (ang. *Bridge Management Systems* – BMS). Obecnie prawie wszystkie rozwinięte gospodarczo kraje świata stosują wspomagane komputerowo systemy zarządzania obiektami mostowymi (np. [96], [97], [173], [189], [203], [245], [317], [319], [340]). Systemy te z reguły służą do realizacji strategii systematycznego kontrolowania stanu zarządzanych elementów infrastruktury mostowej i wspomagają podejmowanie decyzji w zakresie eksploatacji obiektów.

Określenie *system zarządzania (gospodarowania) obiektami mostowymi* nie doczekało się dotychczas precyzyjnej, powszechnie akceptowanej definicji. Najczęściej spotykane interpretacje tego pojęcia to:

- komputerowy system wspomagający procesy decyzyjne, zawierający racjonalne modele oraz wiedzę ekspertową o procesach degradacji mostów i efektywności działań utrzymaniowych, jak również modele ekonomiczne umożliwiające prognozowanie nakładów i zysków w procesie utrzymania określonego poziomu przydatności użytkowej przy minimalnych kosztach [324];
- uporządkowane środowisko formalizujące proces podejmowania decyzji dotyczących utrzymania, rehabilitacji i wymiany mostów, w którym stosuje się inżynierię systemów do asystowania decydentom w definiowaniu optymalnej strategii utrzymania mostów na wymaganym poziomie w ciągu określonego czasu [5];
- racjonalne podejście do organizacji i prowadzenia działalności związanej z planowaniem, projektowaniem, konstruowaniem, utrzymaniem, rehabilitacją i wymianą mostów, obiektów o żywotnym znaczeniu dla infrastruktury komunikacyjnej [6];

- połączenie modeli inżynierskich i ekonomicznych umożliwiające analizę konsekwencji podejmowanych decyzji w całym okresie użytkowania obiektu [342];
- narzędzie wspomagające decyzje związane z alokacją ograniczonych środków na utrzymanie, rehabilitację i wymianę obiektów mostowych, z zapewnieniem minimalizacji kosztów przy zachowaniu wymaganego bezpieczeństwa i przydatności użytkowej [148], [322].

W niniejszej pracy, przyjmując zgodnie z pracą [81] ogólną definicję *zarządzania* jako „celowego działania polegającego na podejmowaniu i realizacji przez organ zarządzający decyzji w odniesieniu do obiektu zarządzania”, przez pojęcie *system zarządzania eksploatacją obiektów mostowych* będzie rozumiany *kompleksowy system wspomagający, przy wykorzystaniu technik komputerowych, podejmowanie decyzji w zakresie zarządzania utrzymaniem i użytkowaniem obiektów mostowych*.

Określenie *utrzymanie* dotyczy tu systemowych działań mających na celu zapewnienie właściwego stanu technicznego oraz wymaganej przydatności użytkowej obiektów mostowych. Działania te obejmują zarówno prace diagnostyczne mające na celu ocenę kondycji obiektów, jak i roboty utrzymaniowe (konserwacje, remonty, modernizacje, wymiany konstrukcji).

Pojęcie *użytkowanie* obejmuje systemowe działania związane z wykorzystywaniem obiektów mostowych przez użytkowników, takie jak np. zarządzanie ruchem w obszarze obiektu, zarządzanie specjalnymi przewozami, zarządzanie oddziaływaniem na środowisko, zarządzanie zdarzeniami.

Specyficzne potrzeby w zakresie naukowych i technicznych podstaw systemowego wspomagania eksploatacji obiektów mostowych przy wykorzystaniu technik komputerowych zainicjowały proces wyodrębniania się wyspecjalizowanego obszaru, który można nazwać *inżynierią komputerowych systemów wspomagających eksploatację mostów*. Ten stosunkowo nowy obszar wiedzy ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje wybrane działy: inżynierii mostowej, mechaniki budowli, wytrzymałości materiałów, badań materiałów i konstrukcji, informatyki, teorii i techniki systemów, inżynierii systemów informacyjnych, inżynierii wiedzy, nauki o zarządzaniu, ekonomii i innych pokrewnych dziedzin. Przy rozwiązywaniu niektórych zagadnień wymaga także sięgania do psychologii (np. dostosowanie sposobu obsługi systemu komputerowego do preferencji i predyspozycji użytkowników) czy dydaktyki (np. organizacja systemu szkoleń użytkowników).

Inżynierię komputerowych systemów wspomagających eksploatację mostów można ogólnie zdefiniować jako *obszar wiedzy i umiejętności związanych z projektowaniem oraz realizowaniem komputerowych systemów informacyjnych wspomagających zarządzanie utrzymaniem i użytkowaniem infrastruktury mostowej*.

Problematyka inżynierii komputerowych systemów wspomagających eksploatację mostów jest obecnie jednym z istotnych obszarów prac naukowo-badawczych w inżynierii mostowej. Zagadnienia te są ważnym tematem konferencji z zakresu

inżynierii mostowej na całym świecie, a także przedmiotem ożywionej współpracy międzynarodowej. Od początku lat 80. ubiegłego wieku odbywają się również coraz liczniejsze specjalistyczne konferencje dotyczące wyłącznie systemowego gospodarowania obiektami mostowymi, jak na przykład International Bridge Management Conference organizowana cyklicznie w USA przez Transportation Research Board. Duże znaczenie dla rozwoju inżynierii komputerowych systemów gospodarowania mostami miały także specjalistyczne konferencje i seminaria nie mające charakteru cyklicznego. Należy wymienić tu między innymi: „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering” (Pekin 1993), „Maintenance of Bridges and Civil Structures” (Paryż 1994), „Maintenance of Railway Bridges and Civil Engineering Structures” (Utrecht 1995), „Knowledge Support Systems in Civil Engineering” (Bergamo 1995), „The Management of Highway Structures” (Londyn 1998), „Safety of Bridge Structures” (Wrocław 1975, 1982, 1987, 1992).

Prace z zakresu komputerowych systemów wspomagających eksploatację obiektów mostowych publikują obecnie praktycznie wszystkie czasopisma związane z inżynierią mostową. Z ogólnie znanych tytułów o znaczeniu międzynarodowym należy wymienić przede wszystkim:

- czasopisma American Society of Civil Engineers (ASCE): kwartalniki – „Journal of Bridge Engineering” oraz „Journal of Infrastructure Systems”, a także dwumiesięcznik – „Journal of Transportation Engineering”;
- wydawnictwa Transportation Research Board (TRB): „Transportation Research Records”;
- kwartalnik „Structural Engineering International” wydawany przez International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).

W Polsce publikacje z zakresu inżynierii komputerowych systemów gospodarowania mostami ukazują się w miesięcznikach „Inżynieria i Budownictwo”, „Drogownictwo”, w kwartalnikach „Metody Komputerowe w Inżynierii Lądowej” oraz „Archiwum Inżynierii Lądowej”, a także w innych czasopismach o zbliżonym profilu.

Potwierdzeniem szerokiego zainteresowania wyraźnie wyodrębniającą się problematyką utrzymania i eksploatacji obiektów mostowych jest utworzenie zajmujących się tymi zagadnieniami specjalnych komisji w takich organizacjach jak: IABSE, ASCE czy TRB, a także powołanie w roku 1999 specjalistycznej międzynarodowej organizacji – International Association for Bridge Maintenance and Safety (IABMAS).

Rozwój komputerowych systemów wspomagających zarządzanie mostami stworzył zapotrzebowanie na nowe efektywne metody i narzędzia numerycznego modelowania obiektów mostowych oraz procesów związanych z ich eksploatacją. Dotyczy to przede wszystkim takich zagadnień jak:

- tworzenie numerycznych modeli ewidencyjnych obiektów,
- modelowanie uszkodzeń,

- wspomaganie procesu przeglądów, badań oraz monitorowania (ciągłej, nieprzerwanej kontroli) stanu obiektów,
- modelowanie stanu technicznego obiektów i wspomaganie procesów jego oceny,
- modelowanie i ocena przydatności użytkowej obiektów,
- akwizycja, reprezentacja i udostępnianie wiedzy w systemach komputerowych wspomagających utrzymanie i eksploatację infrastruktury mostowej,
- tworzenie systemów ekspertowych i ich zastosowania w systemowym zarządzaniu obiektami mostowymi,
- modelowanie procesów degradacji i rehabilitacji z możliwością prognozowania zmian stanu obiektów,
- optymalizacja planowania działań utrzymaniowych z określeniem niezbędnych środków finansowych oraz sposobu ich alokacji.

Wybrane zagadnienia numerycznego modelowania obiektów mostowych i procesów związanych z tymi obiektami, ukierunkowane na zastosowania w komputerowych systemach gospodarowania mostami, stanowią przedmiot niniejszej monografii. Ze względu na rozległość zagadnienia główną uwagę skupiono na modelowaniu technicznych aspektów zarządzania infrastrukturą mostową.

1.2. Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy jest stworzenie jednolitej, kompleksowej metodyki numerycznego modelowania obiektów mostowych oraz opracowanie efektywnych metod pozyskiwania, reprezentacji i wykorzystywania wiedzy na potrzeby komputerowych systemów wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej, a w szczególności:

- a) uściślenie i ujednoczenie terminologii związanej z inżynierią komputerowych systemów wspomagających eksploatację obiektów mostowych;
- b) określenie metod numerycznego modelowania technicznych i użytkowych cech obiektów mostowych, istotnych z punktu widzenia ich eksploatacji;
- c) opracowanie jednolitych zasad klasyfikacji uszkodzeń obiektów mostowych oraz metodyki ich numerycznego opisu w systemach komputerowych;
- d) opracowanie technologii tworzenia komputerowych narzędzi ekspertowych wspomagających procesy decyzyjne związane z gospodarowaniem obiektami mostowymi;
- e) opracowanie metodyki pozyskiwania, reprezentacji i udostępniania wiedzy na potrzeby narzędzi ekspertowych wykorzystywanych w komputerowych systemach wspomagających eksploatację obiektów mostowych;
- f) opracowanie metodyki oceny stanu technicznego obiektów mostowych na podstawie numerycznych modeli ich uszkodzeń oraz przygotowanie narzędzi ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego;

- g) określenie metod systemowej oceny przydatności użytkowej obiektów mostowych oraz opracowanie narzędzi ekspertowych wspomagających ocenę przydatności użytkowej;
- h) opracowanie metodyki klasyfikacji obiektów mostowych na podstawie ocen ich kondycji.

Zakres prac, których rezultaty są prezentowane w niniejszej monografii, obejmuje:

- a) opracowanie merytorycznych koncepcji i projektów rozwiązań teoretycznych;
- b) opracowanie szczegółowych algorytmów numerycznych;
- c) opracowanie projektów funkcjonalnych oprogramowania komputerowego;
- d) przeprowadzenie akwizycji i dokonanie reprezentacji wiedzy na potrzeby opracowanych narzędzi ekspertowych;
- e) przeprowadzenie wielostronnych testów sprawdzających merytoryczną i funkcjonalną poprawność zaproponowanych metod modelowania obiektów.

Praca zawiera monograficzne przedstawienie zagadnień związanych z numerycznym modelowaniem obiektów mostowych na potrzeby komputerowych systemów wspomagających eksploatację infrastruktury komunikacyjnej, a jej układ jest zgodny z chronologią działań związanych z tworzeniem kompleksowego systemu wspomagającego eksploatację infrastruktury mostowej.

Rozdział 1. zawiera wprowadzenie w zagadnienia inżynierii komputerowych systemów wspomagających zarządzanie obiektami mostowymi oraz próbę ujednoczenia podstawowej terminologii związanej z prezentowaną tematyką. Scharakteryzowano zasoby informacji wykorzystywanych w gospodarowaniu infrastrukturą mostową oraz przedstawiono ewolucję systemów wspomagających zarządzanie eksploatacją mostów. Na tle przeglądu rozwiązań stosowanych w świecie zaprezentowano komputerowe systemy gospodarowania obiektami mostowymi użytkowane w naszym kraju.

Ogólną systematykę numerycznych modeli obiektów mostowych zaproponowano w rozdziale 2., gdzie przedstawiono także możliwości modelowania geometrii obiektów na potrzeby systemów wspomagających ich eksploatację. Omówiono możliwości tworzenia ewidencyjnych modeli obiektów w zależności od klasy zastosowanego modelu geometrii.

Przedmiotem rozdziału 3. jest metodyka numerycznego modelowania uszkodzeń obiektów mostowych. Zaproponowano tu ogólne zasady hierarchicznej systematyki, które zastosowano do klasyfikacji najczęściej występujących uszkodzeń. Dla modeli geometrii tworzonych z elementów bezwymiarowych, a także jedno-, dwu- i trójwymiarowych przedstawiono koncepcję jakościowego i ilościowego modelowania podstawowych typów uszkodzeń.

W rozdziale 4. zaproponowano metodykę tworzenia wyspecjalizowanych funkcji ekspertowych wspomagających procesy decyzyjne z wykorzystaniem bazy danych i bazy wiedzy systemu. Przedstawiono koncepcję wielopoziomowych sieci hybrydowych jako technologii tworzenia funkcji ekspertowych przy wykorzystaniu

opracowanego przez autora kreatora funkcji ekspertowych NEURITIS. Szczegółowo omówiono zasady tworzenia zaproponowanych komponentów sieci hybrydowych, a mianowicie: komponentów funkcyjnych służących do symbolicznej reprezentacji wiedzy przy użyciu operacji matematycznych, komponentów neuronowych umożliwiających niesymboliczną reprezentację wiedzy przy wykorzystaniu sieci neuronowych oraz komponentów rozmytych stosowanych do symbolicznej reprezentacji wiedzy przy użyciu rozwiązań teorii zbiorów rozmytych. Źródła wiedzy przydatnej w systemach wspomagających gospodarowanie mostami oraz zastosowane w pracy metody jej pozyskiwania i reprezentacji przedstawiono w rozdziale 5.

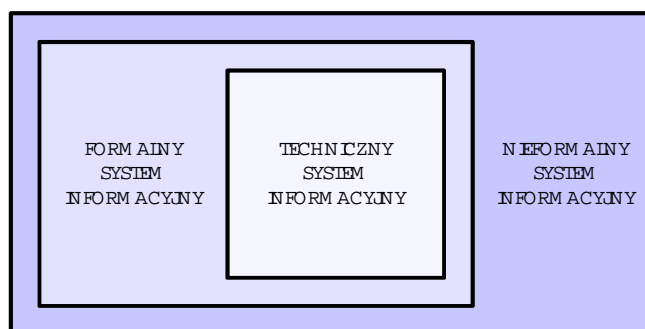
Rozdział 6. zawiera propozycje kryteriów i metod oceny kondycji obiektów mostowych na podstawie numerycznych modeli ich uszkodzeń. Zaprezentowano metodykę tworzenia i wykorzystywania funkcji ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego poszczególnych części składowych obiektów dla różnych modeli geometrii konstrukcji oraz sposoby globalnej oceny stanu technicznego obiektów mostowych. W rozdziale tym przedstawiono także koncepcję zastosowania rozmytego modelu przydatności użytkowej do oceny zgodności parametrów użytkowych obiektów mostowych z wymaganiami eksploatacyjnymi. Zaproponowano sposoby klasyfikacji obiektów na podstawie ocen ich stanu technicznego, przydatności użytkowej oraz na podstawie globalnych miar kondycji.

W rozdziale 7. zamieszczono syntetyczne podsumowanie ze wskazaniem oryginalnych elementów pracy oraz określeniem kierunków dalszych badań. Monografię uzupełnia wykaz cytowanej literatury.

1.3. Komputerowe wspomaganie gospodarowania obiektami mostowymi

1.3.1. Systemy, informacje i systemy informacyjne

Używany w wielu kontekstach termin *system* może być ogólnie zdefiniowany jako „pewna całość, w której współdziałają wyodrębnione części składowe” [81] lub jako „spójny zbiór niezależnych składowych, które istnieją w jakimś celu, mają pewną stabilność i mogą być przydatne przy ich łącznym rozpatrywaniu” [16]. Jako ogólny model systemu przyjmuje się zwykle układ: wejście-proces-wyjście, działający w określonym otoczeniu. W przypadku systemów wspomagających działania organizacji do ogólnego modelu musi być dodany dodatkowy składnik, którym są ludzie tworzący organizację. Za otoczenie systemu uważa się wszystko to, co znajduje się poza systemem, a ma wpływ na jego działanie. Wejściami do systemu są zasoby, które system pozyskuje z otoczenia lub z innych systemów, a wyjściami – to, co system dostarcza do otoczenia lub do innych systemów. Przekształcenie wejść w wyjścia następuje w wyniku procesów specyficznych dla każdego systemu.



Rys. 1.1. Podstawowe poziomy systemu informacyjnego

Systemy wspomagające gospodarowanie infrastrukturą mostową, jak większość systemów związanych z działalnością człowieka, są systemami otwartymi, posiadającymi powiązania ze swoim otoczeniem oraz z innymi systemami. Integralną częścią każdego ogólnie rozumianego systemu wspomagającego działalność organizacji jest *system informacyjny* mający za zadanie obsługę działań w zakresie informacji. W ramach każdej organizacji można z reguły rozróżnić trzy poziomy systemu informacyjnego [16]:

- *nieformalny system informacyjny* – wykorzystujący niesformalizowane wzorce komunikowania się ludzi w ramach wspólnej działalności;
- *formalny system informacyjny* – działający w ramach zdefiniowanych form organizacyjnych i struktur hierarchicznych, z określonym schematem przepływu informacji;
- *techniczny system informacyjny* – realizujący pewną część formalnego systemu informacyjnego przy użyciu technologii informacyjnej, obecnie zdominowanej przez techniki komputerowe.

Wymienione wyżej poziomy systemu informacyjnego występują z reguły równocześnie, co należy uwzględniać zarówno w fazie projektowania i realizacji, jak i podczas eksploatacji systemu. Należy także brać pod uwagę fakt, że system formalny obejmuje przeważnie tylko część nieformalnego systemu wymiany informacji, a system komputerowy obsługuje tylko część sformalizowanego obszaru przepływu informacji, co schematycznie przedstawiono na rys. 1.1.

Opisana wyżej trójpoziomowa struktura systemów informacyjnych występuje także w organizacjach zajmujących się utrzymaniem i eksploatacją infrastruktury mostowej. Uproszczony schemat przepływu informacji związanych z działalnością takich organizacji przedstawiono na rys. 1.2. Informacje o każdym obiekcie objętym zarządzaniem są systemowo zbierane (np. w formie dokumentacji technicznej, wyników przeglądów), a następnie są kodowane przy użyciu symboli (znaków), uzyskując postać danych zdalnych do wykorzystywania za pomocą programów komputerowych. Zgromadzone dane są przetwarzane i udostępniane przy użyciu technicznego (komputerowego) systemu informacyjnego. Dane wyjściowe uzyskane z systemu komputerowego po zinterpretowaniu, czyli umieszczeniu w znaczącym

kontekście, są ponownie przekształcane w informacje. Dzięki przetwarzaniu, agregacji i analizie danych możliwe jest uzyskanie w ten sposób nowych, bogatszych informacji wykorzystywanych w procesie podejmowania decyzji. Należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, że procesy przekształcania informacji w dane wejściowe oraz procesy tworzenia informacji poprzez interpretację danych wyjściowych systemu komputerowego mają charakter subiektywny, zależny od kontekstu odbiorcy i od wiedzy osoby dokonującej przekształceń. Te realizowane przez ludzi działania są

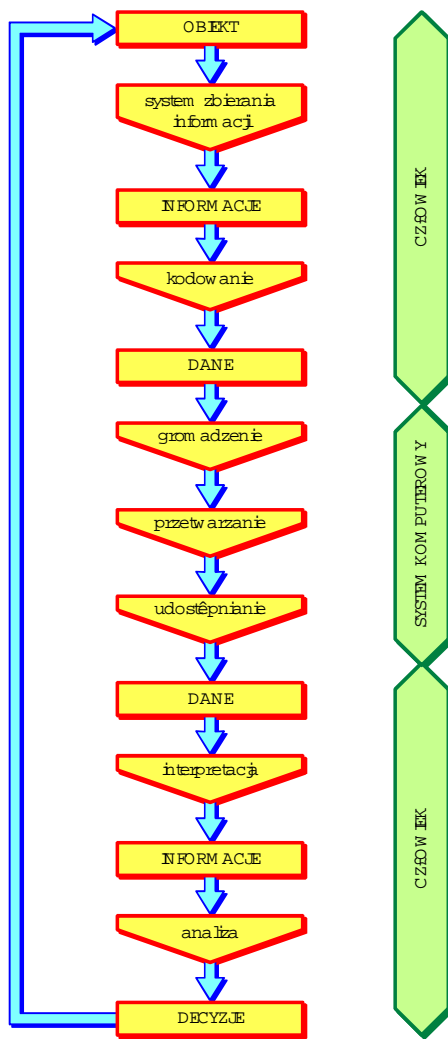
elementami formalnego, a często także nieformalnego systemu informacyjnego.

Komputerowe systemy informacyjne są klasyfikowane na wiele sposobów, co przedstawiono między innymi w pracach [225], [249], [370]. Biorąc pod uwagę podstawowe cechy funkcjonalne systemów, można za pracą [229] przyjąć następujące trzy kryteria klasyfikacji:

- *wspomaganie dostarczania informacji* – polegające na gromadzeniu, wyszukiwaniu, przetwarzaniu i udostępnianiu informacji niezbędnych dla sprawnego działania organizacji;
- *wspomaganie procesów decyzyjnych* – obejmujące wykorzystywanie informacji w celu zapewnienia inteligentnego wspomaganie podejmowania decyzji, szczególnie w obszarach trudnych lub nieosiągalnych dla sformalizowanego opisu;
- *wspomaganie wymiany informacji* – umożliwiające współdzielenie i wymianę informacji pomiędzy wieloma użytkownikami.

Komputerowe systemy wspomagające eksploatację obiektów mostowych powinny w jednakowym, wysokim stopniu realizować wszystkie trzy wymienione wyżej funkcje, co lokuje je wśród najbardziej złożonych systemów. Graficzną prezentację omawianej klasyfikacji przedstawiono na rys. 1.3.

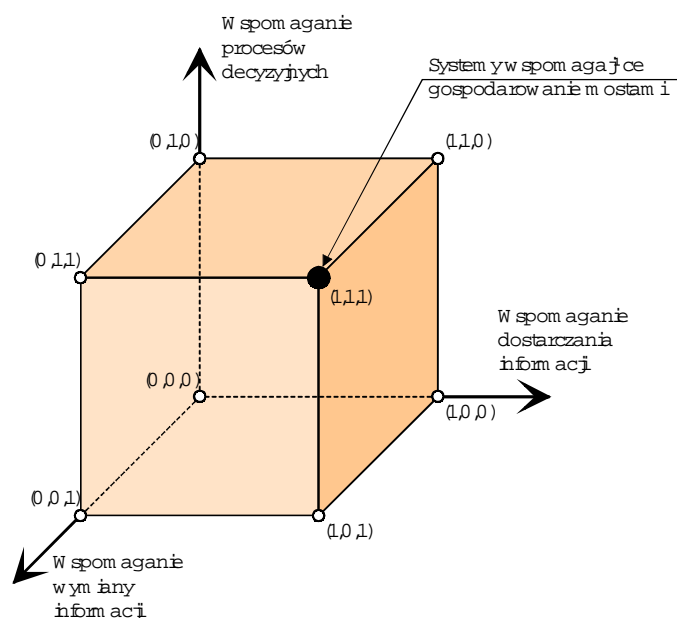
Fundamentalne dla systemów informacyjnych pojęcia *informacja* oraz *dane*



Rys. 1.2. Ogólny schemat przepływu informacji w systemach wspomaganych komputerowo

mają wiele definicji wynikających z różnych interpretacji podkreślających stronę techniczną, informatyczną lub informacyjną, a także często uwzględniających aspekty filozoficzne i socjologiczne systemów informacyjnych (np. [16], [170], [229], [345], [370]). W niniejszej pracy przyjęto następujące określenia:

- *informacja* – obiekt abstrakcyjny, który może być w postaci zakodowanej zapisywany, przesyłany, przetwarzany za pomocą programów komputerowych, a także efekt interpretacji danych umieszczonych w znaczącym kontekście;
- *dane* – informacje przedstawione w postaci umożliwiającej ich przetwarzanie za pomocą programów komputerowych lub będące wynikiem takiego przetwarzania.



Rys. 1.3. Systemy wspomagające gospodarowanie mostami w klasyfikacji funkcjonalnej według [229]

W ciągu ostatnich lat coraz większego znaczenia w obszarze komputerowych systemów gospodarowania obiektami mostowymi nabierają *multimedialne systemy informacyjne*, nazywane także *multimedialnymi bazami danych*. Jednym z rodzajów systemów multimedialnych są *systemy hipermedialne* charakteryzujące się siecią architekturą węzłów i powiązań, a także specyficzną formą dostępu, zwaną nawigacją. Rozwiązania te integrują różne formy prezentacji i przekazu informacji, łącząc je w jednym systemie. Najczęściej wykorzystywane media to:

- dane – przechowywane tradycyjnie w bazie danych, ale też np. w arkuszach kalkulacyjnych;

- hipertekst – odmiana konwencjonalnych danych tekstowych, które mogą być specjalnie zorganizowane za pomocą modelu liniowego, hierarchicznego lub sieciowego;
- grafika – zdjęcia, rysunki, wykresy itp.;
- obrazy ruchome – film, animacje;
- dźwięk – efekty dźwiękowe, komentarze.

Rozwój technologii multi- i hipermedialnych jest ściśle powiązany z rozpowszechnianiem się Internetu, czyli globalnego zbioru połączonych sieci komputerowych. Sieć internetowa nie jest dotychczas wykorzystywana w profesjonalnych systemach wspomagających zarządzanie infrastrukturą mostową, ale prowadzone są intensywne prace zmierzające w tym kierunku (np. [198], [277], [366]). W najbliższym czasie należy spodziewać się zastosowań technologii internetowej w sieciach typu Intranet, obsługujących poszczególne organizacje zajmujące się zarządzaniem infrastrukturą komunikacyjną.

1.3.2. Bazy danych, bazy wiedzy i systemy ekspertowe

Dane wykorzystywane przez system komputerowy są przechowywane w *bazie danych* systemu, którą można zdefiniować jako *uporządkowany zbiór danych modelujących określony obszar analizy*. W prezentowanych zastosowaniach obszar ten obejmuje sferę związaną z eksploatacją obiektów mostowych.

Obsługa bazy danych, rozumianej jako zorganizowane repozytorium danych, wymaga stosowania wyspecjalizowanych narzędzi informatycznych tworzących *system zarządzania bazą danych*. System taki realizuje z reguły następujące podstawowe działania:

- *obsługa strukturalna*: tworzenie, modyfikowanie i usuwanie struktur danych;
- *obsługa transakcji*: wprowadzanie, aktualizacja i usuwanie danych;
- *wyszukiwanie danych*: obsługa przeszukiwania struktur danych zgodnie z wymaganiami użytkowników lub programów korzystających z bazy danych;
- *administrowanie bazą danych*: definiowanie użytkowników i określanie ich uprawnień w zakresie dostępu do danych, monitorowanie działania bazy, zabezpieczanie zasobów bazy danych.

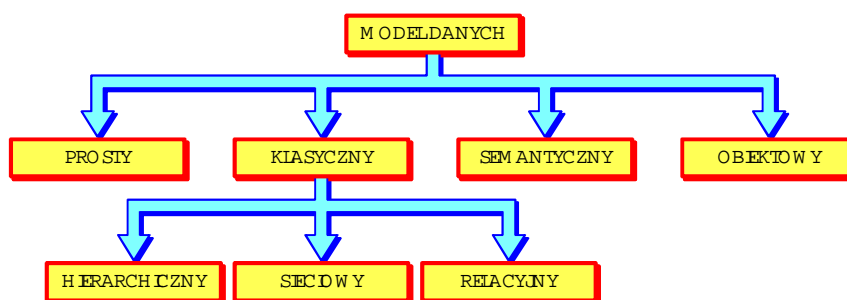
Określenie baza danych, oprócz interpretacji podanej wyżej, ma też szersze znaczenie, obejmujące łącznie uporządkowany zbiór danych oraz system zarządzania bazą danych. W niniejszej pracy termin ten będzie z reguły używany w takim właśnie rozumieniu.

Każda baza danych funkcjonuje przy wykorzystaniu określonego modelu danych, nazywanego też architekturą danych. Model danych tworzą:

- zbiór struktur (definicji) danych;
- zbiór operatorów danych;
- zbiór zasad integralności.

W pracach dotyczących baz danych (np. [15], [16], [110]) wyróżnia się najczęściej cztery podstawowe typy modeli danych (rys. 1.4):

- *proste modele danych*, w których modelowane obiekty są reprezentowane przez struktury rekordów;
- *klasyczne modele danych*, wśród których model hierarchiczny i sieciowy są bardziej zaawansowanymi odmianami prostego modelu danych; model relacyjny wykorzystuje specyficzną strukturę danych – relację oraz operatory tworzące algorytm operacyjną;
- *semantyczne modele danych*, które zgodnie z nazwą próbują dostarczać bardziej skutecznych sposobów reprezentowania znaczenia danych niż jest to możliwe w modelach klasycznych; głównym celem prac nad semantycznymi modelami danych jest tworzenie strukturalnych abstrakcji ułatwiających reprezentację danych;
- *obiektywne modele danych*, które są ukierunkowane na tworzenie abstrakcji zachowania, czyli na ułatwienie operowania danymi; niektórzy autorzy (np. [15]) uważają, że modele obiektywne powinny być klasyfikowane jako rodzaj modeli semantycznych.



Rys. 1.4. Podstawowe typy modeli danych w systemach informacyjnych

Przedstawiona klasyfikacja typów modeli danych ma charakter orientacyjny i dotyczy rozwiązań standardowych, reprezentatywnych dla poszczególnych klas. Oprócz tego istnieje obfitość modeli łączących cechy różnych klas i w związku z tym nie podlegających jednoznacznej klasyfikacji.

Szacuje się [15], [208], że relacyjne bazy danych, których koncepcję i podstawy teoretyczne opracował E.F. Codd (np. [88], [89]), stanowią aktualnie około 95% wszystkich aplikacji. W użytkowanych obecnie komputerowych systemach wspomagających utrzymanie i eksploatację infrastruktury mostowej stosowane są w zasadzie wyłącznie różne odmiany tej technologii. Oprócz zalet relacyjne bazy danych mają także liczne wady i wydaje się, że przyszłość będzie należeć do rozwiązań obiektowych [15], [110], [169]. Z punktu widzenia zastosowań

w systemach wspomagających zarządzanie infrastrukturą mostową szczególnie cenne są następujące cechy obiektowych baz danych:

- wprowadzenie nowej jakości i ujednoczenie strategii modelowania przez zastosowanie obiektowego podejścia do analizy zagadnienia oraz do projektowania i implementacji bazy danych,
- możliwość reprezentowania obiektu świata rzeczywistego przez odpowiadający mu obiekt w bazie danych,
- łatwość opisu danych o strukturze hierarchicznej oraz danych dynamicznie zmieniających rozmiar,
- łatwość definiowania złożonych typów danych i złożonych zależności między obiektami przy wykorzystaniu mechanizmu agregacji,
- łatwość wykonywania działań na złożonych obiektach,
- możliwość specjalizacji typów danych z wykorzystaniem mechanizmu dziedziczenia,
- duża elastyczność umożliwiająca łatwe wprowadzanie zmian, w tym definiowania własnych niestandardowych typów obiektów, metod itd.,
- integracja struktury danych z regułami i mechanizmami ich przetwarzania oraz modyfikacji,
- dobra integracja z językami programowania ogólnego przeznaczenia (np. C++).

Wyniki szczegółowej analizy porównawczej technologii relacyjnych i obiektowych wykazują większą efektywność rozwiązań obiektowych w złożonych zagadnieniach zarządzania infrastrukturą mostową. W związku z tym obiektowy model danych zastosowano we wszystkich autorskich rozwiązaniach prezentowanych w niniejszej monografii.

Pojęcie danych i informacji jest związane z pojęciem *wiedzy*. Niektórzy autorzy definiują nawet informację jako „przyrost wiedzy, który może być uzyskany na podstawie danych” [345]. Inne określenia mówią, że: „wiedza jest otrzymywana z informacji poprzez jej zintegrowanie z wiedzą istniejącą” [16], „wiedza to symboliczna reprezentacja aspektów pewnej nazwanej dziedziny rozważań” [358] lub też, że wiedza to „ogół wiarygodnych informacji o rzeczywistości wraz z umiejętnością ich wykorzystania” [256]. Według bardziej pragmatycznych klasycznych definicji wiedza składa się z trzech części: faktów, reguł i wnioskowania, które muszą być reprezentowane w systemie komputerowym przy użyciu stosownych metod i technik. Podobnie jak w innych zagadnieniach związanych z systemami informacyjnymi mamy tu więc do czynienia z dużą różnorodnością interpretacji jednego z podstawowych pojęć. Wśród przyczyn takiego stanu rzeczy istotną rolę odgrywa z pewnością stosunkowo krótka historia rozwoju komputerowych systemów informacyjnych wykorzystujących wiedzę.

Próby wykorzystywania wiedzy w komputerowych systemach informacyjnych doprowadziły do powstania pojęcia *baza wiedzy*, nawiązującego do określenia *baza*

danych. Spotykane interpretacje tego terminu mają wiele elementów wspólnych, ale akcentują różne aspekty pojęcia, definiując bazę wiedzy na przykład jako:

- repozytorium informacyjne (wraz ze środkami przechowywania, utrzymywania i udostępniania), które oprócz danych przechowuje także reguły logiczne, reguły aktywne, grafy wiedzy, sieci semantyczne itp. [325];
- zbiór reguł, definicji i opisów faktów z określonej dziedziny, umożliwiający logiczny wywód wniosków lub podejmowanie decyzji w komputerowym systemie eksperckim [256].

W niniejszej pracy przyjęto za [81] ogólną definicję mówiącą, że *baza wiedzy to komputerowa realizacja reprezentacji wiedzy*. Takie ogólne określenie, abstrahujące od konkretnych metod czy technik reprezentacji wiedzy, wydaje się najtrafniej ujmować istotę zagadnienia.

Wykorzystywanie wiedzy w systemach komputerowych wymaga rozwiązania trzech podstawowych grup zagadnień:

- akwizycji (ujawniania, pozyskiwania) wiedzy;
- numerycznej reprezentacji wiedzy oraz jej przetwarzania;
- udostępniania wiedzy.

Akwizycja wiedzy może być zdefiniowana jako „proces pobierania wiedzy od jednego lub więcej ekspertów” [16] lub jako „proces wydobywania wiedzy obejmujący opis, powiązania (relacje) i procedury w określonym obszarze zainteresowania; główną funkcją tego procesu jest uzyskiwanie wiedzy od ekspertów oraz jej analizowanie i formalizowanie w formie przydatnej komputerowo” [370]. Są to działania o charakterze metodycznym obejmujące cały proces współdziałania z ekspertami lub wykorzystywania innych źródeł wiedzy, a także proces dokumentowania zgromadzonej wiedzy.

Reprezentacja wiedzy to metodyka jej przechowywania i przetwarzania w bazie wiedzy przy zastosowaniu technik numerycznych odpowiednich dla przewidywanych zastosowań oraz właściwych z uwagi na postać (formę) pozyskanej wiedzy.

Udostępnianie wiedzy to proces jej przekazywania użytkownikom systemu lub programom korzystającym z zasobów systemu. Bardzo istotnym zadaniem na tym etapie jest ujednoczenie i zobiektywizowanie interpretacji wiedzy uzyskiwanej z systemu komputerowego, z uwzględnieniem kontekstu jej zastosowań. Procesy akwizycji i udostępniania wiedzy to zagadnienia z pogranicza części formalnej, nieformalnej oraz technicznej systemu informacyjnego, reprezentacja wiedzy to natomiast domena części technicznej, czyli systemu komputerowego.

Programy komputerowe wykorzystujące bazy wiedzy do rozwiązywania specjalistycznych problemów są nazywane *systemami ekspertowymi*. W literaturze spotyka się także wiele innych, ale z reguły zbliżonych, definicji systemu ekspertowego, jak np.:

- program komputerowy przeznaczony do rozwiązywania specjalistycznych problemów, które wymagają profesjonalnej ekspertyzy [247];

- komputerowy program doradczy, który próbuje naśladować lub zastępować proces rozumowania i wiedzę ekspertów w rozwiązywaniu określonych problemów [346], [370];
- program komputerowy zaprojektowany tak, aby naśladował rozumowanie i proces podejmowania decyzji przez eksperta oraz zawierający fakty i wiedzę z określonego obszaru [228];
- program komputerowy wykorzystujący wiedzę w formie symbolicznej do symulacji postępowania człowieka-eksperta [2];
- program komputerowy wspomagający podejmowanie decyzji, w którym można wyróżnić bazę wiedzy zawierającą wiedzę dziedzinową istotną dla podejmowanych decyzji oraz system wnioskujący korzystający z bazy wiedzy dla wypracowania tych decyzji [255].

Zagadnienia związane z bazami wiedzy i systemami ekspertowymi cieszą się od wielu lat bardzo dużym zainteresowaniem, a szeroki przegląd rozwiązań stosowanych w tej dziedzinie zawierają m.in. prace: [109], [127], [177], [231], [247], [269], [278], [318], [355]. Oprócz klasycznych systemów ekspertowych wykorzystujących informacje w postaci symbolicznej (np. [247], [255]) coraz częściej są stosowane niesymboliczne metody przetwarzania informacji, jak np.:

- sieci neuronowe, np. [113], [153], [174], [176], [178], [186], [187], [188], [204], [224], [257], [258], [334], [335], [354], [379];
- algorytmy genetyczne, np. [195], [230], [296];
- rozwiązania hybrydowe, np. [172], [225], [295], [310].

Nową jakość do systemów ekspertowych wniosły zastosowania teorii zbiorów rozmytych, umożliwiające opis i przetwarzanie informacji nieprecyzyjnych i niepewnych, np. [135], [175], [193], [211], [227], [261], [365].

Prace nad zastosowaniami systemów ekspertowych we wspomaganiu gospodarowania infrastrukturą mostową, prowadzone w wielu ośrodkach na świecie (np. [11], [65], [124], [126], [155], [360]), podjęto także w naszym kraju (np. [21], [26], [28], [283]). Wybrane rezultaty tych prac w zakresie pozyskiwania, reprezentacji i udostępniania wiedzy oraz w zakresie praktycznej implementacji wiedzy w użytkowanych systemach zaprezentowano w dalszej części niniejszej monografii. Wiele zagadnień z tego obszaru znajduje się w fazie prac badawczych i koncepcyjno-projektowych, a niektóre doczekały się już praktycznych aplikacji.

1.3.3. Informacyjne podstawy zarządzania obiektami mostowymi

System wspomagający gospodarowanie obiektami mostowymi to z reguły wyspecjalizowany system wspomagania decyzji, który może być zdefiniowany jako:

- interaktywny system komputerowy pomagający decydentom w wykorzystywaniu danych i modeli do rozwiązywania problemów [229], [249];

- zestaw danych, systemów, narzędzi i technik, wraz z niezbędnym oprogramowaniem i sprzętem komputerowym, dzięki którym organizacja gromadzi i interpretuje istotne informacje o firmie i jej środowisku oraz zamienia je w podstawę do podejmowania działań [92];
- system informatyczny, w którym komputer wyznacza decyzje na podstawie dostarczonych informacji [81].

Wszystkie przedstawione wyżej definicje podkreślają kluczową rolę informacji oraz danych, stanowiących ich numeryczną reprezentację, dla systemowego wspomaganie decyzji. Bardzo ważnym kryterium klasyfikacji informacji wykorzystywanych w systemach zarządzania mostami jest poziom ich precyzji i pewności.

W użytkowanych obecnie systemach informacje wykorzystywane do wspomaganie procesów decyzyjnych są traktowane jak informacje precyzyjne i pewne, a do ich przetwarzania stosuje się metody tradycyjnej matematyki i logiki dwuwartościowej (Boole'a). W rzeczywistości wiele informacji związanych z utrzymaniem i eksploatacją obiektów mostowych ma charakter nieprecyzyjny i niepewny. Informacje takie nazywane są *informacjami rozmytymi* [373], [374]. Do grupy tej możemy zaliczyć na przykład następujące stwierdzenia:

- występują bardzo intensywne przecieki wody w pobliżu podpory,
- stan techniczny przęsła jest dość dobry,
- rysa jest zlokalizowana w pobliżu środka rozpiętości dźwigara,
- wytrzymałość materiału zmniejszyła się o ponad 20%.

Informacje o charakterze rozmytym wydają się niezastąpione wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z wielkościami, dla których nie stworzono żadnych obiektywnych narzędzi pomiarowych. W przytoczonych przykładach są to pojęcia: „intensywność przecieków wody”, „stan techniczny przęsła” oraz słowne (lingwistyczne) jakościowe miary tych pojęć: „bardzo intensywne”, „dość dobry”. Innym obszarem zastosowań informacji rozmytej są sytuacje, w których teoretycznie możliwe jest uzyskanie precyzyjnej informacji ilościowej, ale koszt uzyskania takiej informacji jest nieadekwatny do spodziewanego efektu. Często są także sytuacje, w których przybliżona, rozmyta informacja jest wystarczająca na potrzeby analizowanego zagadnienia. W przedstawionych wyżej przykładach dotyczy to określeń: „w pobliżu środka rozpiętości” oraz „ponad 20%”.

Podane przykłady – mimo dużej nieprecyzyjności – są zrozumiałe, a więc są nośnikami informacji. Co więcej, informacje tego typu są powszechnie i z powodzeniem wykorzystywane w komunikacji pomiędzy ludźmi. Jest to możliwe dzięki temu, że umysł człowieka posiada, częściowo tylko rozpoznane, narzędzia umożliwiające pomiar i ocenę wielkości rozmytych, a także pozwalające na posługiwanie się pojęciami rozmytymi w odniesieniu do rzeczywistych obiektów i procesów.

W zagadnieniach związanych z zarządzaniem obiektami mostowymi można wyróżnić dwa podstawowe aspekty rozmytości informacji:

- *rozmycie definicji* wielkości, których dotyczą informacje,
- *rozmycie miar* stosowanych do opisu i oceny rozpatrywanych wielkości.

Z uwagi na precyzję definicji stosowane pojęcia można podzielić na trzy podstawowe klasy:

- 1) *wielkości zdefiniowane precyzyjnie* (N) – jak na przykład podstawowe parametry techniczne obiektów (geometria, charakterystyki materiałowe), których definicje są zawarte w normach, instrukcjach, przepisach itp.;
- 2) *wielkości o nieprecyzyjnych, rozmytych definicjach* (R) – można tu zaliczyć takie określenia, jak np.: stan techniczny, przydatność użytkowa; pojęcia należące do tej klasy są zdefiniowane z reguły bardzo ogólnie, a ich interpretacje mają charakter w znacznym stopniu subiektywny;
- 3) *wielkości nie posiadające definicji* (B) – przykładem może być estetyka obiektów mostowych, której ocena – mimo zdecydowanie indywidualnego, subiektywnego charakteru – ma często znaczący wpływ na przebieg procesu decyzyjnego.

Pojęcia należące do każdej z tych grup mogą być charakteryzowane zarówno przy użyciu miar nierozmytych (n), jak i rozmytych (r). Biorąc pod uwagę dwa wymienione wyżej parametry rozmytości informacji, zaproponowano w tab. 1.1 klasyfikację informacji ze względu na sposób zdefiniowania pojęć oraz stosowane miary. Wyróżniono sześć klas, a dla ich identyfikacji przyjęto dwuliterowe oznaczenia.

Tab. 1.1. Klasyfikacja rozmytości informacji ze względu na sposób ich definiowania i stosowane miary

Sposób definiowania wielkości	Miara wielkości	
	nierozmyta (n)	rozmyta (r)
nierozmyty (N)	N_n	N_r
rozmyty (R)	R_n	R_r
brak definicji (B)	B_n	B_r

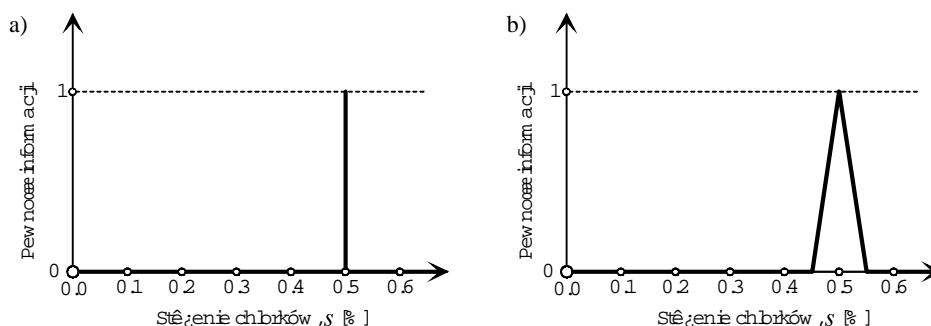
Warto zwrócić uwagę na fakt, że nawet wielkości zdefiniowane precyzyjnie, dla których istnieją zobiektywizowane metody pomiaru, mogą być w niektórych sytuacjach poprawniej reprezentowane przy użyciu miar rozmytych niż nierozmytych. Żeby wytłumaczyć ten pozorny paradoks, rozpatrzmy przykład numerycznej reprezentacji wyniku badań zawartości chlorków w próbce betonu. Przyjmijmy, że w rezultacie badań wykonanych zgodnie ze standardową procedurą określono zawartość chlorków na $s = 0,5\%$ masy betonu. Załóżmy także, że dokładność zastosowanej metody badań wynosi $\pm 10\%$ wyznaczonej wartości. W ujęciu

nierozmytym uzyskany wynik jest reprezentowany przez wartość liczbową „0,5%”, a informacja ta jest traktowana jako całkowicie pewna, zgodnie z graficzną interpretacją przedstawioną na rys. 1.5a. W ujęciu rozmytym wynik może być przedstawiony w postaci liczby rozmytej „około 0,5%”, w której uwzględniono dokładność użytej metody badań (rys. 1.5b). W efekcie więc zastosowana miara rozmyta zawiera pełniejszą informację niż nierozmyta miara liczbowa.

Przedstawione zagadnienie pomiaru zawartości chlorków w betonie może być też rozpatrywane z punktu widzenia oceny poziomu szkodliwości stwierdzonego stężenia badanego składnika. Modelowanie procesu oceny szkodliwości przy użyciu klasycznej logiki dwuwartościowej oraz miar nierozmytych polega na określeniu granicznego stężenia (w przykładzie przyjęto $s_{gr} = 0,4\%$ zgodnie z [294]) i założeniu, że stężenia mniejsze od granicznego są nieszkodliwe, a większe od granicznego – szkodliwe dla materiału konstrukcyjnego. Graficznie model ten przedstawiono na rys. 1.6a. W ujęciu rozmytym do modelowania możemy użyć różnej liczby tzw. ziaren informacji [375]. Jeżeli zastosujemy dwa ziarna informacji w postaci zbiorów rozmytych „stężenie nieszkodliwe” oraz „stężenie szkodliwe”, to model analizowanej wielkości może być przedstawiony w postaci pokazanej na rys. 1.6b. Przykładowe sposoby modelowania z wykorzystaniem trzech i siedmiu ziaren informacji zaprezentowano odpowiednio na rys. 1.6c oraz rys. 1.6d.

Stosując kolejno wszystkie cztery przedstawione modele do oceny szkodliwości stężenia wynoszącego na przykład $s = 0,35\%$, otrzymujemy:

- w przypadku miary nierozmytej (rys. 1.6a) – ocenę poziomu stężenia jako nieszkodliwe;
- w przypadku miary rozmytej o dwóch ziarnach informacji (rys. 1.6b) – ocenę w postaci stopnia przynależności do zbioru „stężenie nieszkodliwe” wynoszącego 0,58 oraz stopnia przynależności do zbioru „stężenie szkodliwe” równego 0,42;
- przy użyciu miary rozmytej o trzech ziarnach informacji (rys. 1.6c) stopień przynależności do zbioru „stężenie mało szkodliwe” wynosi 0,17, a do zbioru „stężenie średnio szkodliwe” wynosi 0,83;



Rys. 1.5. Miary stężenia chlorków w betonie: a) nierozmyta: $s = 0,5\%$, b) rozmyta: $s = \text{„około } 0,5\%$ ”

- przy zastosowaniu siedmiu ziaren informacji (rys. 1.6d) stopnie przynależności do zbioru „stężenie dość szkodliwe” oraz do zbioru „stężenie średnio szkodliwe” wynoszą po 0,5.

Przedstawione porównanie pokazuje zalety logiki rozmytej, która umożliwia opis pośrednich stanów szkodliwości, co zasadniczo odróżnia ją od tradycyjnej logiki binarnej pozwalającej jedynie na dwuwartościową klasyfikację: szkodliwe/nieszkodliwe. Widać to szczególnie wyraźnie w przypadku stężeń bliskich wartości granicznej. W klasyfikacji dwuwartościowej stężenie $s = 0,39\%$ jest oceniane jako nieszkodliwe, a stężenie $s = 0,41\%$ – jako szkodliwe. Jest to sprzeczne zarówno z intuicyjnym odczuciem, jak i wynikami badań rzeczywistego wpływu tak niewielkiej różnicy stężeń na stan materiału. Stosowanie miar rozmytych pozwala na unikanie takich sytuacji.

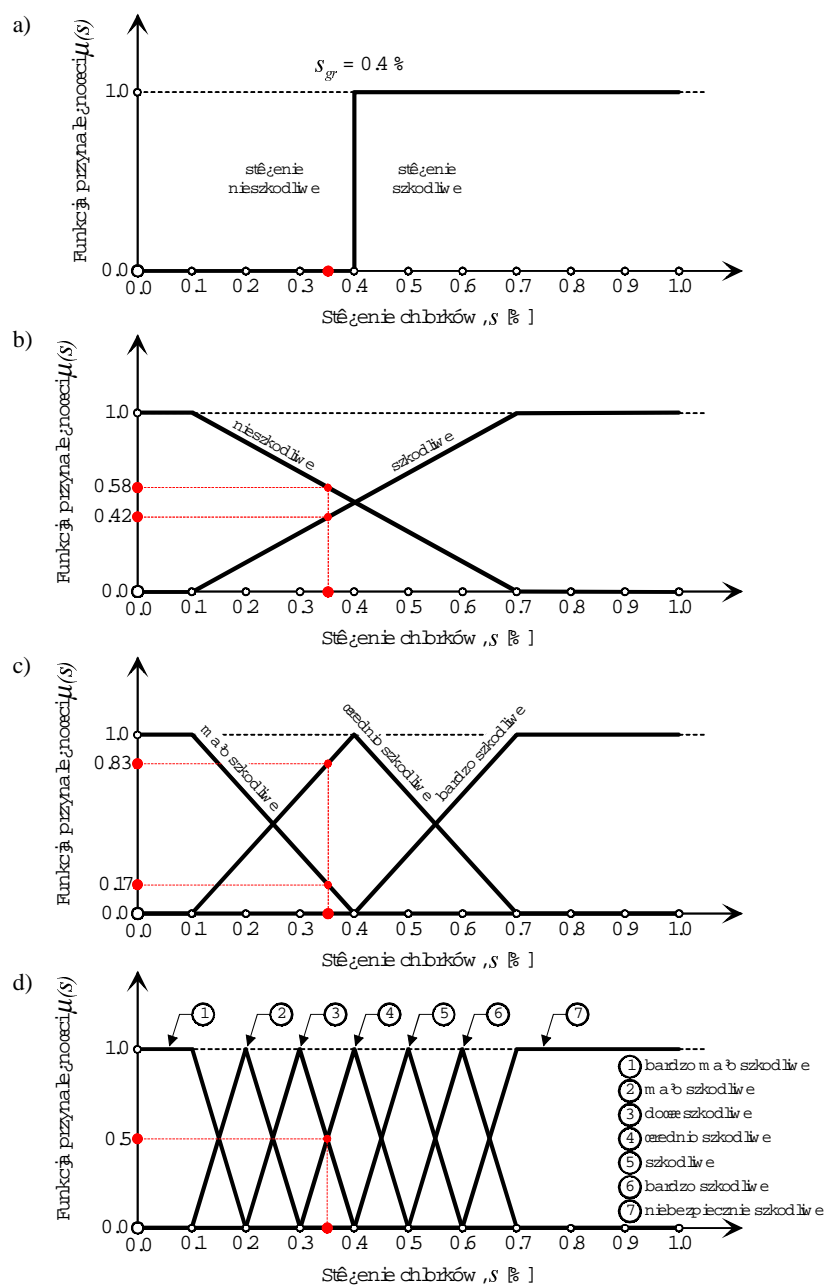
Wyniki badań wykazują, że umysł człowieka jest w stanie rozróżnić i zapamiętać maksymalnie siedem do dziewięciu stanów modelowanej wielkości (obiektu, procesu itp.) [193], [261], a więc maksymalna liczba ziaren informacji charakteryzujących każdą zmienną nie powinna przekraczać dziewięciu. Dotychczasowe zastosowania praktyczne wskazują, że gwarantuje to opis wystarczająco precyzyjny nawet do sterowania samolotami czy skomplikowanymi procesami technologicznymi, zob. np. [211], [295], [296], [365].

Innym ważnym zagadnieniem jest stosowanie precyzyjnych miar liczbowych w odniesieniu do wielkości zdefiniowanych w sposób nieprecyzyjny lub nawet wielkości nie posiadających definicji. Przykładem mogą tu być liczbowe skale ocen stanu technicznego obiektów mostowych używane powszechnie w systemach wspomagających zarządzanie, pomimo przeważnie bardzo nieprecyzyjnych określeń pojęcia „stan techniczny”. Główną przyczyną takiej sytuacji wydaje się być brak narzędzi komputerowych umożliwiających modelowanie obiektów i procesów z wykorzystaniem informacji rozmytych.

Praktyczne wykorzystanie informacji rozmytych w systemach komputerowych stało się możliwe dzięki rozwojowi teorii zbiorów rozmytych, który został zapoczątkowany w roku 1965 przez Lotfi Zadeha [373]. Od lat 70. ubiegłego wieku trwa intensywny rozwój tej dziedziny wiedzy, owocujący wieloma zastosowaniami praktycznymi, a liczba publikacji wydanych na całym świecie jest szacowana obecnie na dziesiątki tysięcy. Wiele prac z tego obszaru zostało opublikowanych także w naszym kraju, w tym cenne monografie książkowe, np. [211], [247], [261], [295], [296], podsumowujące aktualny stan wiedzy.

W odróżnieniu od podejścia tradycyjnego narzędzia teorii zbiorów rozmytych umożliwiają definiowanie częściowej przynależności elementu do zbioru, poprzez tzw. funkcję przynależności μ (funkcja $\mu(s)$ na rys. 1.6) przyjmującą wartości z przedziału od 1 (pełna przynależność elementu do zbioru) do 0 (brak przynależności elementu do zbioru). Rozwiązania logiki rozmytej pozwalają także na stosowanie

zmiennych lingwistycznych, które jako swe wartości przyjmują wyrażenia języka naturalnego. Stwarza to nowe możliwości jakościowego opisu i oceny rzeczywistości.



Rys. 1.6. Miary szkodliwości zawartości chlorków w betonie: a) miara nierozmyta, b) miara rozmyta – 2 ziarna informacji, c) miara rozmyta – 3 ziarna informacji, d) miara rozmyta – 7 ziaren informacji

Precyzja przedstawienia informacji zależy w decydującym stopniu od źródeł jej pochodzenia. Informacje formułowane przez ludzi mają z reguły bardziej rozmyty, jakościowy charakter niż informacje uzyskane przy użyciu aparatury, których precyzja zależy od dokładności stosowanych urządzeń oraz metod pomiarowych. W tabeli 1.2 przedstawiono podstawowe źródła informacji wykorzystywane w trakcie eksploatacji obiektów mostowych oraz klasy dostarczanych informacji, oceniane z punktu widzenia sposobu ich zdefiniowania oraz używanych miar. Oznaczenia poszczególnych klas informacji przyjęto zgodnie z tab. 1.1.

Tab. 1.2. Źródła i klasy rozmytości informacji wykorzystywanych w procesie eksploatacji obiektów mostowych

Lp.	Źródło informacji	Klasa rozmytości informacji					
		N_n	R_n	B_n	N_r	R_r	B_r
1.	Dokumentacja techniczna	✓					
2.	Przepisy prawne	✓	✓				
3.	Wymagania techniczne	✓	✓				
4.	Przeglądy obiektów	✓	✓		✓	✓	
5.	Teoretyczne analizy konstrukcji	✓					
6.	Oceny kondycji obiektów	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7.	Wymagania użytkowe	✓	✓				
8.	Zdarzenia eksploatacyjne	✓	✓				
9.	Środowisko	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10.	Przepisy ekonomiczno-finansowe	✓					
11.	Eksperci	✓	✓	✓	✓	✓	✓

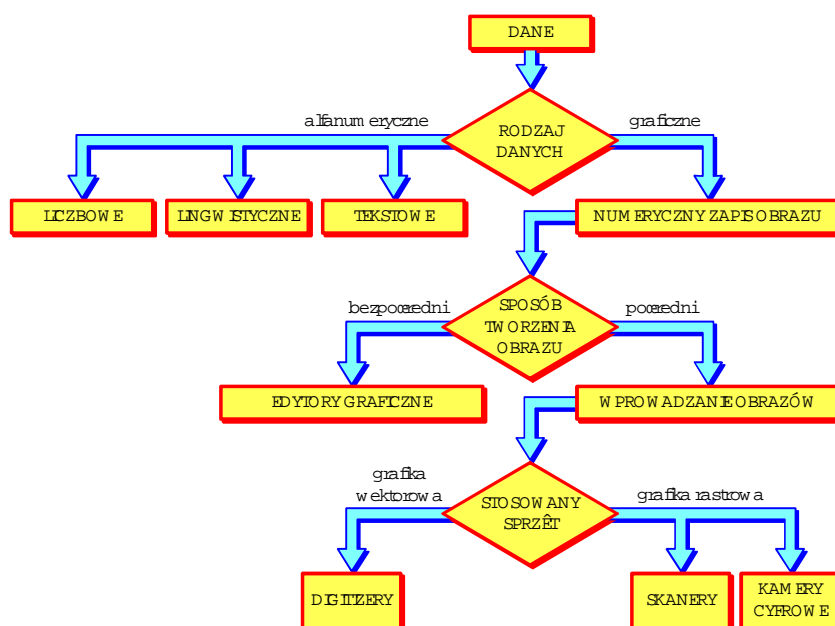
Za główne źródła informacji zasilające komputerowe systemy wspomagające można uznać:

- *dokumentację techniczną* obejmującą: dokumentację projektową, powykonawczą, wyniki badań materiałów i elementów konstrukcji, dokumentację zrealizowanych działań utrzymaniowych itp.;
- *przepisy prawne* określające zasady organizacji procesu utrzymania i eksploatacji infrastruktury mostowej;
- *wymagania techniczne* normujące wymagania dotyczące parametrów technicznych obiektów;
- *wyniki przeglądów* obiektów zawierające informacje o uszkodzeniach;
- *wyniki analiz* statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji;

- *oceny kondycji obiektów*, a w szczególności stanu technicznego i przydatności użytkowej;
- *wymagania użytkowe* definiujące aktualne potrzeby użytkowników w zakresie parametrów użytkowych;
- *informacje o zdarzeniach eksploatacyjnych* (transporty ponadnormatywne, wypadki, awarie itp.);
- *wzajemne oddziaływania zarządzanych obiektów mostowych i szeroko rozumianego środowiska* (skażenia, hałas, drgania, warunki klimatyczne itp.);
- *przepisy ekonomiczno-finansowe* dotyczące utrzymania i eksploatacji zarządzanej infrastruktury mostowej;
- *gromadzoną w systemie wiedzę ekspertów*.

Informacje uzyskiwane z wymienionych wyżej źródeł, oprócz różnej precyzji, mają także zróżnicowane formy i wymagają stosowania szerokiego wachlarza metod ich reprezentacji w systemie komputerowym. Ze względu na postać danych oraz sposób ich wprowadzania do systemów komputerowych można wyróżnić (rys. 1.7):

- dane alfanumeryczne w formie ciągu znaków literowych i cyfrowych;
- dane graficzne w formie obrazów graficznych (rysunki, zdjęcia itp.) wprowadzane przy użyciu specjalistycznych urządzeń.



Rys. 1.7. Techniki wprowadzania danych stosowane w systemach gospodarowania mostami

Dane alfanumeryczne są najczęściej wprowadzane jako:

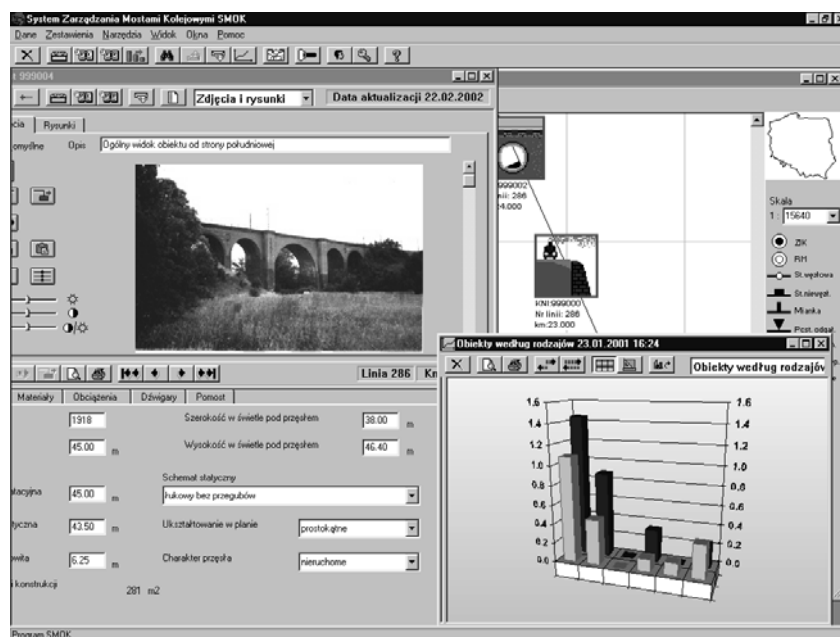
- dane liczbowe;

- dane lingwistyczne, których wartości są wyrażeniami języka naturalnego;
- dane typu tekstowego w formie ciągu znaków;
- dane definiowane przez wybór z listy; wybór może być jedno- lub wielokrotny;
- dane wprowadzane przy użyciu dodatkowych narzędzi informatycznych (np. daty kodowane przy wykorzystaniu komputerowego kalendarza).

Dane graficzne w postaci rysunków, zdjęć, filmów, odwzorowań mapowych itp. mogą być wprowadzane do systemu komputerowego dwoma sposobami:

- przez tworzenie obrazu, przy wykorzystaniu edytorów graficznych, bezpośrednio w systemie komputerowym wspomagającym zarządzanie;
- przy wykorzystaniu urządzeń takich jak: digitizer, skaner, cyfrowe kamery fotograficzne i filmowe itp., które umożliwiają włączanie do zasobów systemu obrazów stworzonych przy użyciu narzędzi zewnętrznych.

Integracja różnych metod numerycznej prezentacji informacji staje się w ostatnich latach standardem w systemach wspomagających zarządzanie mostami (rys. 1.8).



Rys. 1.8. Integracja różnych form prezentacji danych alfanumerycznych i graficznych w systemie wspomagającym zarządzanie mostami (system SMOK w wersji 2.2)

W użytkowanych obecnie systemach wspomagających gospodarowanie obiektami mostowymi wszystkie gromadzone informacje są z reguły traktowane jako informacje o jednakowej, wysokiej precyzji i pewności, co odpowiada klasie N_n według kryteriów przyjętych w tab. 1.1. W rzeczywistości jednak znaczny zasób informacji ma

charakter nieprecyzyjny, co zachęca do stosowania metod logiki rozmytej obok rozwiązań opartych na tradycyjnej logice dwuwartościowej.

Szczególnym obszarem wykorzystywania informacji rozmytych i nierozmytych jest baza wiedzy i korzystające z niej funkcje ekspertowe. Systemowe wykorzystywanie niejednorodnego, pod każdym praktycznie względem, zbioru informacji wymaga z jednej strony stosowania efektywnych metod akwizycji wiedzy zapewniających uzyskiwanie możliwie precyzyjnych i pewnych informacji, a z drugiej strony rodzi potrzebę tworzenia metod oraz narzędzi umożliwiających racjonalną numeryczną reprezentację informacji o różnej precyzji i różnym poziomie pewności.

Szczególną cechą informacji wykorzystywanych w systemowym zarządzaniu obiektami mostowymi jest potrzeba definiowania informacji w trzech przestrzeniach:

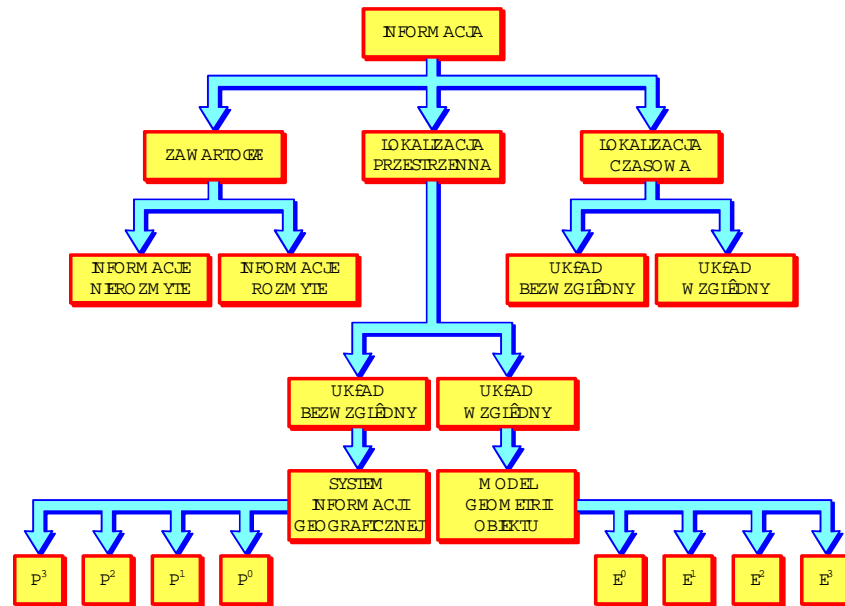
- *przestrzeni zawartości*, z której wybierane są sposoby numerycznej reprezentacji treści informacji z uwzględnieniem jej postaci, precyzji, pewności itp.;
- *przestrzeni lokalizacji* – umożliwiającej określenie fizycznego usytuowania informacji w przestrzeni; pojęcie lokalizacji dotyczy tu zarówno orientacji informacji w układzie bezwzględny, najczęściej geograficznym, co jest domeną systemów informacji geograficznej (ang. *Geographic Information Systems – GIS*), jak i zlokalizowania informacji w lokalnej, względnej przestrzeni przyjętego modelu geometrii obiektu (np. usytuowanie uszkodzenia konstrukcji);
- *przestrzeni czasu* – służącej do umiejscowienia informacji w czasie; niektóre informacje wymagają zorientowania w bezwzględny układzie czasu (np. data wykonania przeglądu), inne potrzebują orientacji we względny układzie odniesienia (np. powiązanie zmian stanu technicznego z wiekiem obiektu).

Wymienione wyżej podstawowe atrybuty informacji zaprezentowano na rys. 1.9.

Lokalizacja informacji w bezwzględny układzie odniesienia może być dokonana w przestrzeni:

- bezwymiarowej p^0 , gdy informacja jest przyporządkowana obiektowi przy wykorzystaniu bezwymiarowego identyfikatora, na przykład numeru inwentaryzacyjnego obiektu;
- jednowymiarowej p^1 , gdy obiekt jest identyfikowany przestrzennie przy użyciu jednej współrzędnej, na przykład kilometraża drogi;
- dwuwymiarowej p^2 , gdy orientacja obiektu jest dokonywana przy wykorzystaniu dwóch współrzędnych, np: długości i szerokości geograficznej;
- trójwymiarowej p^3 , gdy lokalizacja jest definiowana przy stosowaniu pełnego trójwymiarowego odwzorowania terenu.

Możliwości opisu lokalizacji informacji w układzie względny (układzie obiektu) są analogiczne i zależą od przyjętego w systemie modelu geometrii obiektu. Mogą to być modele typu E^0 tworzone z elementów bezwymiarowych e^0 , modele typu E^1 z elementów jednowymiarowych e^1 itd.



Rys. 1.9. Podstawowe atrybuty informacji wykorzystywanych w systemach zarządzania mostami

Przedstawione wyżej uwagi dotyczące informacyjnych podstaw zarządzania obiektami mostowymi prezentują olbrzymie zróżnicowanie wykorzystywanych informacji, a także podkreślają ich złożoność. Postać i cechy zasobów informacyjnych mają decydujący wpływ na metody modelowania obiektów i procesów, przedstawione w dalszej części pracy.

1.3.4. Ewolucja komputerowych systemów gospodarowania mostami

Komputerowe systemy wspomagające zarządzanie eksploatacją obiektów mostowych mają stosunkowo krótką historię, sięgającą przełomu lat 60. i 70. ubiegłego wieku. Jednym z pierwszych znaczących rozwiązań wykorzystujących w praktyce technikę komputerową był wprowadzony w roku 1971 system ewidencji i przeglądów mostów na drogach federalnych w Stanach Zjednoczonych, który doprowadził do powstania systemów wspomagających zarządzanie na poziomie ogólnokrajowym [72], [90], [93], [119], [136], [143], [160], [223], [279], [314], [316], [348], jak i w poszczególnych stanach [5], [75], [134], [139], [180], [221], [226], [302], [313], [324], [367], [368], [369], [372].

Jest rzeczą charakterystyczną, że w wielu krajach bezpośrednim impulsem do wprowadzenia lub intensyfikacji prac nad wdrażaniem systemowych, wspomaganych komputerowo rozwiązań w utrzymaniu i eksploatacji były tragiczne w skutkach wydarzenia. Reprezentatywnym przykładem mogą tu być Stany Zjednoczone, gdzie

jednolite ewidencjonowanie i systemowe przeglądy obiektów mostowych wprowadzono po katastrofie Silver Bridge, która miała miejsce w roku 1967 i spowodowała śmierć 46 osób. Podstawy prawne ogólnokrajowych rozwiązań systemowych obowiązujących w USA zostały sformułowane w „Federal Highway Act of 1968”, co pozwoliło na wprowadzenie w roku 1971 Krajowego Standardu Przeglądów Mostów (National Bridge Inspection Standard) określającego jednolite wymagania dotyczące przeglądów obiektów mostowych i procedur oceny ich stanu [72]. Intensyfikacja prac nad bardziej zaawansowanymi systemami wspomagającymi zarządzanie mostami w USA nastąpiła po katastrofie Mianus River Bridge w roku 1983 oraz Schoharie Creek Bridge w roku 1987.

W latach 70. i 80. prace nad systemowym wspomaganie gospodarowania obiektami mostowymi podjęto także w większości krajów europejskich. Na szczególne wyróżnienie zasługują wyniki prac prowadzonych na Wyspach Brytyjskich [1], [67], [71], [95], [96], [97], [102], [106], [173], [344], w Danii [6], [144], [145], [201], [202], [203], Szwecji [68], [77], [206], [207], Belgii [100], Francji [91], [101], [288], Finlandii [66], [69], [74], [319], [321], [322], Szwajcarii [137], [179], Norwegii [115], Austrii [309], Holandii [289], a także w Niemczech [138], we Włoszech [79], [80], na Węgrzech [183], [184], [245] i w Rosji [311], [371]. Istotny wpływ na ukierunkowanie tych prac miały raporty OECD dotyczące zasad przeglądów [70] oraz utrzymania [73] obiektów mostowych. Poza Europą i Stanami Zjednoczonymi intensywne prace nad systemami zarządzania obiektami mostowymi są prowadzone między innymi w Japonii [142], [326] oraz w Kanadzie [189], [340]. Na przełomie lat 80. i 90. wspomagane komputerowo systemy zarządzania mostami pojawiły się już praktycznie we wszystkich krajach o rozwiniętej infrastrukturze transportowej, w tym także w naszym kraju [18], [19], [36], [48], [241], [274], [286], [287].

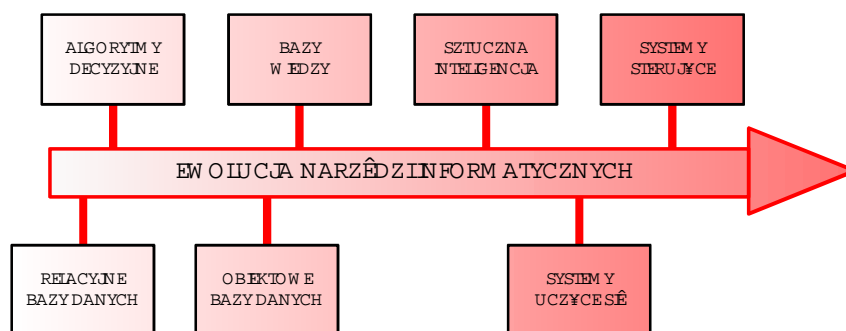
Od początku swego istnienia komputerowe systemy wspomagające zarządzanie utrzymaniem i eksploatacją obiektów mostowych podlegają systematycznej ewolucji, stymulowanej intensywnym postępem w dziedzinie szeroko rozumianych technologii komputerowych. Ewolucja ta odbywa się w dwóch podstawowych obszarach, a mianowicie:

- w zakresie metod modelowania obiektów mostowych i procesów związanych z zarządzaniem nimi oraz technologii informatycznych umożliwiających realizację tych modeli,
- w dziedzinie wykorzystywanego sprzętu komputerowego.

W ewolucji eksploatowanych obecnie systemów można wyróżnić następujące podstawowe etapy rozwoju (rys. 1.10):

- zastosowania profesjonalnych relacyjnych baz danych wraz z oprogramowaniem umożliwiającym wprowadzanie, przetwarzanie i udostępnianie danych w systemach o charakterze ewidencyjno-informacyjnym;

- wprowadzenie do systemów algorytmów decyzyjnych wspomagających proces podejmowania decyzji;
- rozwój obiektowych baz danych oferujących wyższą efektywność niż bazy relacyjne.



Rys. 1.10. Etapy rozwoju technologii informatycznych związanych z systemami wspomagającymi zarządzanie mostami [52]

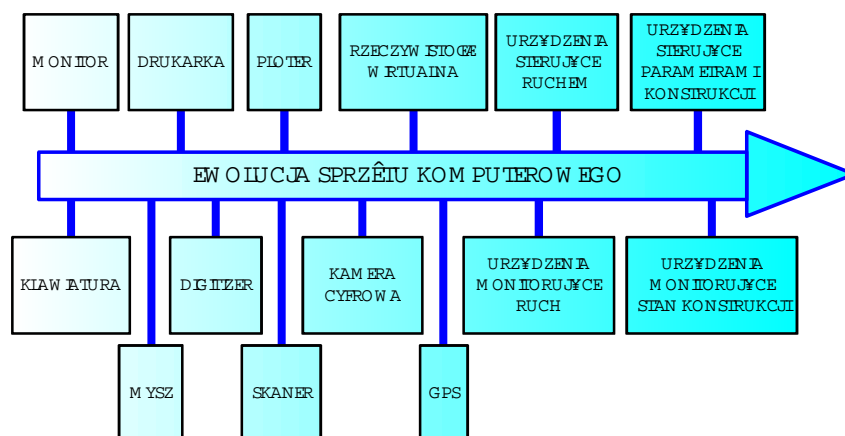
Na podstawie analizy głównych kierunków badań, jako kolejne kroki w rozwoju systemów zarządzania mostami można przewidywać:

- rozwój metod reprezentacji wiedzy w systemach komputerowych oraz jej implementacja w formie baz wiedzy;
- zastosowania systemów ekspertowych, wspomagających proces zarządzania profesjonalną ekspertyzą wykorzystującą wiedzę;
- wprowadzenie elementów sztucznej inteligencji umożliwiających uczenie się systemów komputerowych;
- tworzenie systemów sterujących parametrami konstrukcji na podstawie wyników bieżącego, realizowanego w czasie rzeczywistym, monitorowania stanu obiektu oraz działających na niego obciążeń.

Wraz z rozwojem metod modelowania oraz technik informatycznych postępuje ewolucja sprzętu komputerowego stosowanego w systemach wspomagających zarządzanie obiektami mostowymi. Ze względu na znaczną liczbę gromadzonych komputerowych przetwarzanych danych szczególnie istotny jest tu postęp w zakresie mocy obliczeniowej procesorów oraz w zakresie pamięci operacyjnej i pamięci zewnętrznych. Duży wpływ na możliwości systemów ma też rozwój komputerowych urządzeń peryferyjnych przedstawiony na rys. 1.11.

Podstawowy zestaw urządzeń do wprowadzania i wyprowadzania danych, składający się początkowo z klawiatury, monitora i drukarki, został w pierwszej kolejności wzbogacony o urządzenia do obsługi grafiki wektorowej (digitizer, ploter), a następnie grafiki rastrowej (skaner, aparat i kamera cyfrowa). W połączeniu z wprowadzeniem środowiska operacyjnego Microsoft® Windows™ stworzyło to

nowe możliwości gromadzenia informacji w postaci graficznej. Są one szeroko wykorzystywane w komputerowych systemach wspomagających zarządzanie obiektami mostowymi, zarówno do ewidencyjnej identyfikacji obiektów, jak i do dokumentowania ich stanu technicznego.



Rys. 1.11. Sprzęt komputerowy znajdujący zastosowanie w systemach wspomagających zarządzanie mostami [52]

Kolejnym ważnym krokiem w rozwoju omawianych systemów jest wzbogacenie ich o podsystemy informacji przestrzennej (np. [2], [83], [197], [249], [250], [304]) oferujące mapy numeryczne, najczęściej sprzężone z bazą danych systemu. Do przestrzennej orientacji obiektów stanowiących przedmiot zarządzania wykorzystywane są coraz powszechniej systemy nawigacji satelitarnej (ang. *Global Positioning System* – GPS).

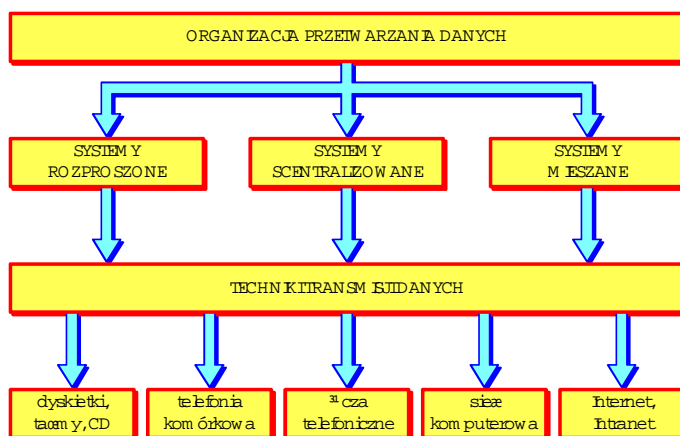
Pozostałe urządzenia przedstawione na rys. 1.11 nie są jeszcze powszechnie stosowane w eksploatowanych systemach, ale w wielu krajach trwają intensywne prace nad ich wdrożeniem. Dotyczy to przede wszystkim:

- zastosowań trójwymiarowej grafiki w formie tzw. rzeczywistości wirtualnej umożliwiającej m.in. precyzyjne ewidencjonowanie i modelowanie uszkodzeń obiektów;
- urządzeń monitorujących (czujniki, kamery itp.) przekazujących do systemu w sposób ciągły dane o ruchu na obiekcie oraz o oddziaływaniach środowiska;
- urządzeń monitorujących i przekazujących do systemu w czasie rzeczywistym dane o stanie konstrukcji (przemieszczenia, odkształcenia, emisja akustyczna, siły wciągach, obciążenie łożysk, stan nawierzchni itp.);
- urządzeń do automatycznego sterowania ruchem (sygnalizacja, znaki zmiennej treści, zapory itp.) na podstawie danych gromadzonych i przetwarzanych w systemie;

- urządzeń do automatycznego sterowania parametrami konstrukcji w czasie rzeczywistym (regulacja naciągu cięgien, rektyfikacja łożysk, zmiana cech tłumików dynamicznych itp.) w zależności od aktualnie wymaganych charakterystyk technicznych lub użytkowych obiektu.

Z rozwojem technik komputerowych i telekomunikacyjnych związany jest też olbrzymi postęp w dziedzinie sposobów przetwarzania i transmisji danych w obrębie systemu, a także w zakresie możliwości wymiany danych pomiędzy systemami. Na rysunku 1.12 wyróżniono trzy metody organizacji przetwarzania danych stosowane w systemach wspomagających gospodarowanie mostami:

- przetwarzanie na każdym stanowisku komputerowym wykorzystywanym na potrzeby systemu (system rozproszony),
- centralne przetwarzanie wszystkich danych przy wykorzystaniu pozostałych stanowisk komputerowych jako inteligentnych terminali do wprowadzania i udostępniania danych (system scentralizowany),
- system mieszany, posiadający cechy zarówno systemu rozproszonego, jak i scentralizowanego.



Rys. 1.12. Sposoby organizacji przetwarzania i transmisji danych w systemach wspomagających zarządzanie mostami

W zakresie technik transmisji danych użytkowane obecnie systemy zarządzania mostami można podzielić na dwie grupy:

- systemy wykorzystujące zewnętrzne nośniki (dyskietyki, taśmy magnetyczne, płyty kompaktowe itp.) jako narzędzia wymiany danych,
- systemy sieciowe korzystające z łącz telefonicznych lub dedykowanych sieci komputerowych.

W wielu krajach trwają też intensywne prace nad wykorzystaniem do transmisji danych telefonii komórkowej [44] oraz możliwości stwarzanych przez technologie internetowe i intranetowe [128], [141], [198], [277], [366].

Podsumowując przedstawione wyżej uwagi na temat stosunkowo krótkiej, ale burzliwej historii ewolucji komputerowych systemów wspomagających zarządzanie utrzymaniem i eksploatacją obiektów mostowych, a także biorąc pod uwagę przewidywane kierunki rozwoju, można wyodrębnić kilka generacji tych systemów (tab. 1.3). Z punktu widzenia zaawansowania stosowanych rozwiązań technologicznych wśród aktualnie użytkowanych systemów można wyróżnić:

- *systemy I generacji* wykorzystujące standardowe bazy danych z oprogramowaniem zarządzającym bazą danych i umożliwiającym wprowadzanie, podstawowe przetwarzanie i udostępnianie danych gromadzonych w systemie;
- *systemy II generacji* posiadające oprócz wyspecjalizowanej bazy danych także algorytmy decyzyjne określające procedury wspomaganie podejmowania decyzji na podstawie zgromadzonego zasobu danych.

Tab. 1.3. Generacje systemów wspomagających eksploatację obiektów mostowych

Oznaczenie generacji systemów	Elementy systemu				
	baza danych	procedury decyzyjne	systemy ekspertowe	systemy uczące się	systemy sterujące
I	✓				
II	✓	✓			
III	✓	✓	✓		
IV	✓	✓	✓	✓	
V	✓	✓	✓	✓	✓

Przedstawiony wyżej zarys ewolucji systemów wspomagających zarządzanie obiektami mostowymi wydaje się wskazywać na to, że znajdujemy się w przededniu upowszechnienia kolejnej generacji systemów wykorzystujących obok tradycyjnych baz danych także bazy wiedzy. Będą to *systemy III generacji* wyposażone dodatkowo w bazy wiedzy oraz systemy wnioskujące, co umożliwi wspomaganie procesu decyzyjnego przez systemy lub funkcje ekspertowe. Narzędzia sztucznej inteligencji wspomagające podejmowanie decyzji są obecnie przedmiotem intensywnych prac badawczych i projektowych w wielu krajach, np. [7], [124], [155], [209], [225], [227], [228], [246], [326].

Można przewidywać, że kolejnymi etapami ewolucji będą:

- *systemy IV generacji* wzbogacone w stosunku do systemów III generacji o zaawansowane narzędzia umożliwiające automatyczne generowanie i aktualizowanie wiedzy (uczenie się systemu) na podstawie gromadzonych

danych i wykorzystywanie tej wiedzy do wspomaganie procesów decyzyjnych [123], [243], [251], [336];

- *systemy V generacji* posiadające dodatkowo zdolność samodzielnego podejmowania decyzji na podstawie zasobów systemu oraz bezpośredniego oddziaływania na obiekty przy wykorzystaniu systemów sterujących parametrami konstrukcji, systemów sterujących ruchem itp. (np. [196], [260]).

Systemy wspomagające gospodarowanie infrastrukturą mostową w naszym kraju, podobnie jak systemy użytkowane obecnie w większości innych krajów, mogą być generalnie sklasyfikowane jako systemy II generacji. W najnowszych wersjach niektórych z tych systemów zaczynają się już pojawiać narzędzia umożliwiające gromadzenie, przetwarzanie i udostępnianie wiedzy (np. [26], [28], [29], [268]), a więc cechy charakterystyczne dla systemów III generacji.

Proponowane w niniejszej pracy rozwiązania dotyczące technicznych aspektów wspomaganie procesów zarządzania są ukierunkowane na zastosowania w systemach III oraz IV generacji. Prezentowana kompleksowa metodyka modelowania obiektów i procesów związanych z eksploatacją mostów zapewnia jednolitość reprezentacji obiektów o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i materiałowych.

1.3.5. Strategie tworzenia i architektura systemów wspomagających gospodarowanie mostami

Architektura systemu wspomagającego zarządzanie zależy w dużym stopniu od strategii gospodarowania przyjętej przez organizację zarządzającą infrastrukturą mostową [99], [117], [343]. Spotykane w praktyce strategie utrzymania i eksploatacji obiektów inżynierskich można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- *strategie awarii* – polegające na podejmowaniu działań utrzymaniowych po stwierdzeniu, że obiekt, jego część lub element znajdują się w stanie awaryjnym, stwarzającym zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników lub obiektu;
- *strategie zużycia* – gdy działania utrzymaniowe są wykonywane po osiągnięciu przez obiekt, jego część lub element założonego poziomu zużycia określonego poprzez okres użytkowania, historię obciążeń itp.;
- *strategie monitorowania kondycji* – zgodnie z którymi działania utrzymaniowe zależą od wyników ocen aktualnej kondycji obiektu, określanej na podstawie ocen stanu technicznego i przydatności użytkowej; oszacowanie stanu obiektu jest dokonywane na podstawie rezultatów systematycznie prowadzonych obserwacji i badań.

W tabeli 1.4 porównano zakresy funkcjonalne systemów wspomagających, niezbędne do realizacji poszczególnych strategii. Większość eksploatowanych obecnie na świecie systemów gospodarowania obiektami inżynierskimi stosuje strategie systematycznego monitorowania kondycji obiektów.

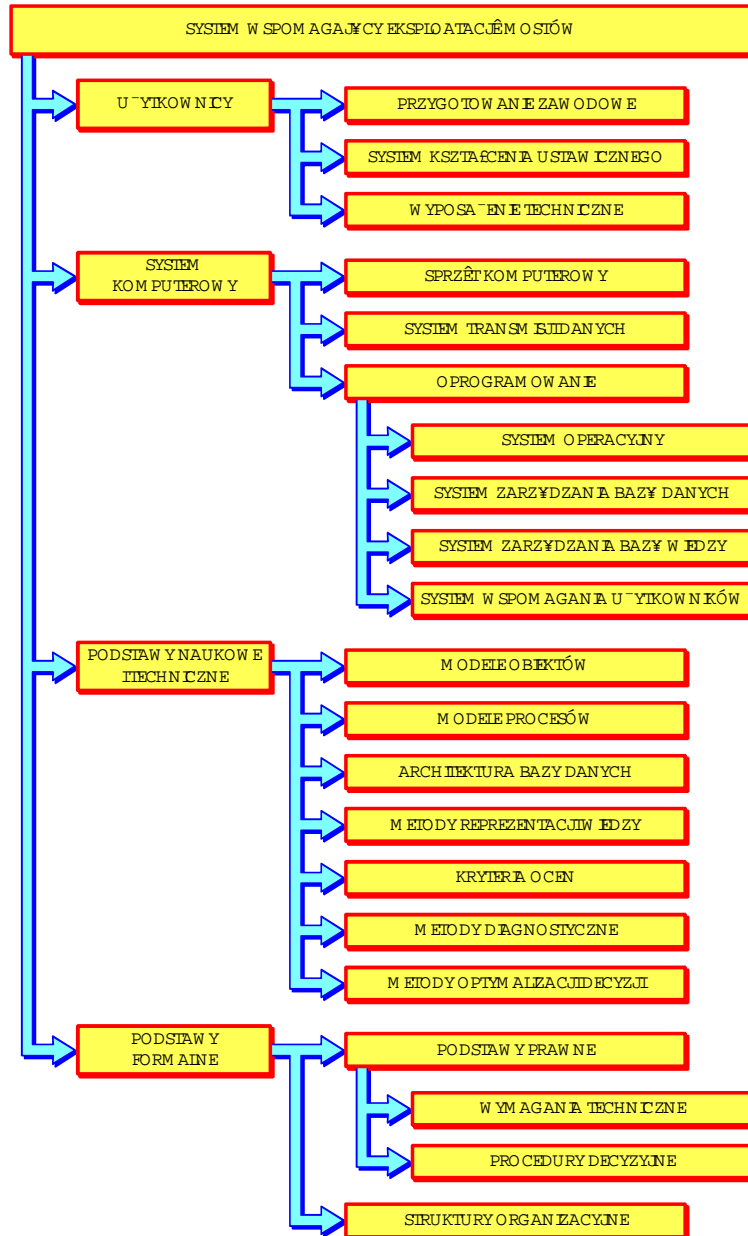
Tab. 1.4. Zakres funkcjonalny systemów wspomagających realizację różnych strategii utrzymania obiektów mostowych

Modele obiektów i procesów	Strategia		
	awarii	zużycia	monitorowania kondycji
Identyfikacja i lokalizacja obiektów	✓	✓	✓
Parametry techniczne obiektów		✓	✓
Parametry użytkowe obiektów	✓		✓
Jakościowy opis uszkodzeń	✓		✓
Ilościowy opis uszkodzeń			✓
Ocena stanu technicznego			✓
Ocena przydatności użytkowej	✓		✓
Procesy degradacji		✓	✓
Planowanie robót utrzymaniowych		✓	✓
Alokacja środków finansowych		✓	✓
Monitorowanie realizacji robót utrzymaniowych	✓	✓	✓
Historia życia obiektu		✓	✓

Nowoczesny wspomagany komputerowo system zarządzania infrastrukturą mostową jest kompleksowym przedsięwzięciem wykraczającym daleko poza obszary bezpośrednio związane z techniką komputerową. Na podstawie analizy wielu użytkowanych na świecie systemów (m.in. [68], [76], [268], [322]), a także biorąc pod uwagę doświadczenia krajowe [44], [50], [156], można wyróżnić cztery podstawowe części składowe niezbędne dla sprawnego i skutecznego działania systemu. Ogólną strukturę takiego wspomaganego komputerowo systemu przedstawiono schematycznie na rys. 1.13.

Pierwszym z wyróżnionych elementów systemu są jego *podstawy prawno-organizacyjne* określające formalne zasady realizacji procesu zarządzania obiektami mostowymi oraz definiujące formalny system informacyjny. Spójny zbiór przepisów powinien określać: wymagania techniczne, procedury decyzyjne, organizację służb utrzymaniowo-eksploatacyjnych, zakresy odpowiedzialności itp. Wprowadzenie komputerowego wspomaganego zarządzania obiektami mostowymi wymaga z reguły gruntownej modyfikacji lub nawet całkowitej zmiany istniejących uregulowań prawno-organizacyjnych w taki sposób, aby zapewnić ich pełną zgodność z pozostałymi częściami składowymi systemu. Przykładem mogą tu być dokonane w naszym kraju zmiany przepisów związane z wprowadzeniem wspomaganych

komputerowo systemów zarządzania, tak w zakresie obiektów drogowych [162], [163], [164], [166], jak i kolejowych [165].



Rys. 1.13. Podstawowe części składowe kompleksowego systemu wspomagającego eksploatację obiektów mostowych

Drugi z istotnych składników systemu to jego *podstawy naukowe i techniczne* tworzące merytoryczny fundament formalnego systemu informacyjnego. Każdy duży system wspomagający zarządzanie obiektami mostowymi jest z reguły projektowany indywidualnie, z uwzględnieniem specyficznych potrzeb i możliwości przyszłych użytkowników systemu. Indywidualizacja ta dotyczy przede wszystkim stosowanych w systemie rozwiązań teoretycznych i obejmuje w szczególności:

- metody numerycznego modelowania obiektów i procesów,
- rodzaj i architekturę bazy danych,
- metody akwizycji i reprezentacji wiedzy w systemie,
- metody i techniki diagnostyczne wraz z zasadami ocen wyników badań,
- metody i kryteria optymalizacji decyzji.

Zastosowane w systemie rozwiązania teoretyczne decydują w znacznym stopniu o jego efektywności.

Kolejnym nieodzownym składnikiem współczesnych systemów wspomagających gospodarowanie mostami jest *część komputerowa*, na którą składa się sprzęt komputerowy, system wymiany (transmisji) danych oraz oprogramowanie, czyli techniczny system informacyjny. Głównym zadaniem systemu komputerowego jest gromadzenie, przetwarzanie i udostępnianie danych oraz wiedzy na potrzeby procesu zarządzania. Sprawność działania systemu komputerowego, a w szczególności szybkość przepływu informacji, mająca kluczowe znaczenie dla procesu zarządzania, zależy zarówno od technicznych możliwości zastosowanego sprzętu, jak i od efektywności oprogramowania. Ze względu na duży z reguły obszar działania systemu zarządzania, obejmujący często całe terytorium kraju, bardzo istotne znaczenie ma system transmisji (wymiany) danych pomiędzy poszczególnymi użytkownikami systemu. Najczęściej stosowane rozwiązania to: łącza telefoniczne (w tym telefonii komórkowej), dedykowane sieci komputerowe, Internet lub Intranet.

W zakresie oprogramowania nowoczesnego systemu można wyróżnić następujące podstawowe elementy:

- system operacyjny tworzący środowisko pracy całej komputerowej części systemu wspomagającego zarządzanie; większość eksploatowanych obecnie systemów wykorzystuje środowisko Microsoft® Windows™,
- baza danych oraz system zarządzania bazą danych,
- baza wiedzy z systemem zarządzania bazą wiedzy,
- system wspomagania użytkowników.

Na samym szczycie pokazanej na rys. 1.13 struktury systemu wspomagającego gospodarowanie mostami znajdują się *użytkownicy systemu*. Korzystanie z zaawansowanych technicznie i technologicznie, wspomaganych komputerowo systemów zarządzania wymaga specjalnego przygotowania użytkowników w trakcie studiów, a także objęcia ich programem specjalistycznych szkoleń i treningów będących częścią procesu wdrażania poszczególnych modułów i wersji systemów. Jednym z głównych celów szkoleń jest zapewnienie spójności i jednolitej interpretacji

danych wprowadzanych do systemu oraz danych uzyskiwanych z systemu. Szkolenia umożliwiają praktyczne kształtowanie i wdrażanie formalnych oraz nieformalnych systemów informacyjnych. Jest to szczególnie istotne w rozległych systemach współużytkowanych przez kilkuset, a nawet przez kilka tysięcy użytkowników. Istotnym elementem warunkującym poprawne działanie systemu wspomagającego zarządzanie jest też zapewnienie użytkownikom niezbędnego wyposażenia technicznego, a w szczególności sprzętu diagnostycznego, środków łączności, środków transportu itp., przewidzianych w projekcie systemu.

Współdziałanie wszystkich przedstawionych wyżej elementów składowych systemu wspomagającego gospodarowanie obiektami mostowymi powinno zapewniać realizację planowanych *użytkowych funkcji systemu*. Mimo znacznego zindywidualizowania systemów eksploatowanych w poszczególnych krajach, prawie w każdym systemie można wyodrębnić wspólne podstawowe funkcje użytkowe wspomagające następujące obszary procesu zarządzania:

- ewidencja,
- utrzymanie,
- użytkowanie,
- planowanie.

Na rysunku 1.14 zestawiono podstawowe funkcje użytkowe, podając także główne zagadnienia wchodzące z reguły w zakres poszczególnych funkcji.

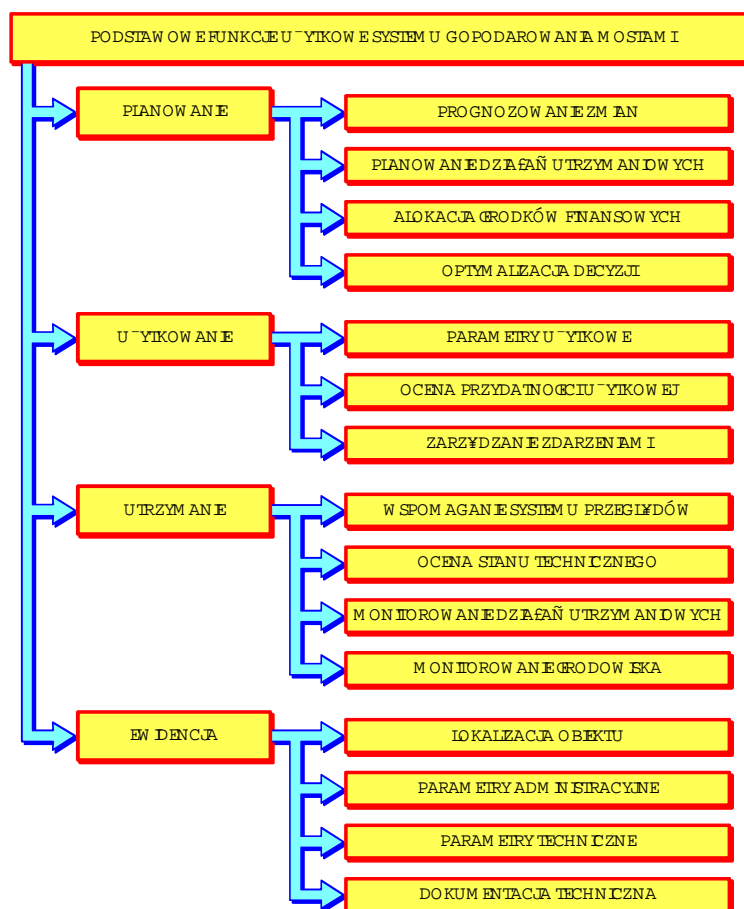
Zadaniem części *ewidencyjnej* systemu jest zdefiniowanie przedmiotu zarządzania, czyli dostarczenie niezbędnych informacji o obiektach mostowych objętych systemem. Informacje ewidencyjne obejmują z reguły:

- identyfikację obiektu (rodzaj obiektu, kod identyfikacyjny itp.);
- lokalizację w powiązaniu z układem komunikacyjnym oraz układem geograficznym;
- parametry administracyjne (zarządzający, właściwe terytorialnie władze państwowe, lokalne itp.);
- parametry techniczne (geometria konstrukcji, cechy materiałów, wyposażenie, urządzenia obce itp.).

Funkcja użytkowa związana z *utrzymaniem* wspomaga system przeglądów obiektów, szczególnie w zakresie gromadzenia i dokumentowania informacji o uszkodzeniach, a także w dziedzinie ocen stanu technicznego formułowanych jako miara zgodności aktualnych wartości parametrów technicznych obiektu z wartościami projektowanymi. Z reguły funkcja ta wspomaga też wstępne określanie niezbędnego zakresu i rodzaju działań utrzymaniowych wraz z oszacowaniem kosztów. Ważnym obszarem związanym z utrzymaniem obiektów jest też monitorowanie środowiska, w jakim znajduje się obiekt (warunki klimatyczne, agresywność itp.) oraz śledzenie wpływu użytkowania obiektów na otoczenie (hałas, zanieczyszczenia itp.).

Funkcja odpowiedzialna za wspomaganie zarządzania *użytkowaniem* obiektów gromadzi, przetwarza i udostępnia informacje na temat parametrów użytkowych

obiektu, takich jak: nośność, skrajnie ruchu na obiekcie i pod nim, dopuszczalne prędkości ruchu taboru itp. Funkcja ta wspomaga także najczęściej ocenę przydatności użytkowej, rozumianej jako miara zgodności aktualnych wartości parametrów użytkowych obiektu z wymaganymi wartościami tych parametrów. W obszarze działania funkcji znajduje się również zarządzanie wszelkimi zdarzeniami związanymi z obiektem, jak np. transporty specjalne (ponadnormatywne), wypadki komunikacyjne, awarie.



Rys. 1.14. Podstawowe funkcje użytkowe systemów wspomagających gospodarowanie obiektami mostowymi

Część systemu związana z *planowaniem* obejmuje w większości systemów zagadnienia prognozowania zmian stanu technicznego i przydatności użytkowej, wykorzystywane następnie do optymalizacji decyzji dotyczących planowania działań utrzymaniowych i związanej z tym alokacji środków finansowych.

Projektowanie, realizacja i wdrażanie dużego systemu wspomagającego gospodarowanie obiektami mostowymi jest procesem złożonym i długotrwałym, trwającym najczęściej kilka, a czasem i ponad 10 lat. Zarządzanie tak skomplikowanymi projektami wymaga przyjęcia strategii tworzenia systemu dostosowanej do konkretnych potrzeb i możliwości. Wśród stosowanych na świecie rozwiązań można wyróżnić następujące podstawowe strategie budowy komputerowych systemów wspomagających zarządzanie [15], [16], [169]:

- strategia kaskadowa, nazywana także strategią liniową;
- strategia przyrostowa;
- strategia ewolucyjna;
- strategia prototypowania.

Strategia kaskadowa zakłada kompleksowe całościowe tworzenie systemu poprzez realizację kolejnych etapów prac. Podstawowe wyróżnione kroki to:

- określenie wymagań stawianych systemowi;
- kompleksowa analiza wymagań oraz uwarunkowań planowanego systemu, w wyniku której tworzony jest logiczny model systemu, nazywany też funkcjonalnym projektem systemu;
- wykonanie szczegółowych projektów wszystkich części składowych systemu;
- realizacja części składowych zgodnie z przyjętym projektem;
- testowanie oraz ocena poprawności funkcjonowania oraz współdziałania wszystkich części systemu;
- wdrożenie całego systemu w organizacji, dla której jest przeznaczony;
- użytkowanie systemu przy równoczesnym prowadzeniu niezbędnych prac konserwacyjnych (zarządzanie systemem, zabezpieczanie zasobów, obsługa serwisowa itp.).

Strategia kaskadowa jest chętnie i często stosowana podczas realizacji projektów dotyczących zarządzania infrastrukturą mostową. Ważną zaletą tej strategii jest kompleksowe podejście do tworzenia systemu, a więc równoczesne prowadzenie prac obejmujących wszystkie elementy składające się na system. Za wady można uważać trudności we wprowadzaniu ewentualnych zmian w zakresie zakończonych już etapów tworzenia systemu oraz stosunkowo długi okres od rozpoczęcia prac nad systemem do uzyskania pierwszych efektów użytkowych. Strategia kaskadowa szczególnie dobrze nadaje się do wykorzystania w tzw. *środowiskach dobrze zdefiniowanych informacyjnie*, w których użytkowany jest już jakiś system informacyjny wymagający wymiany lub rozbudowy.

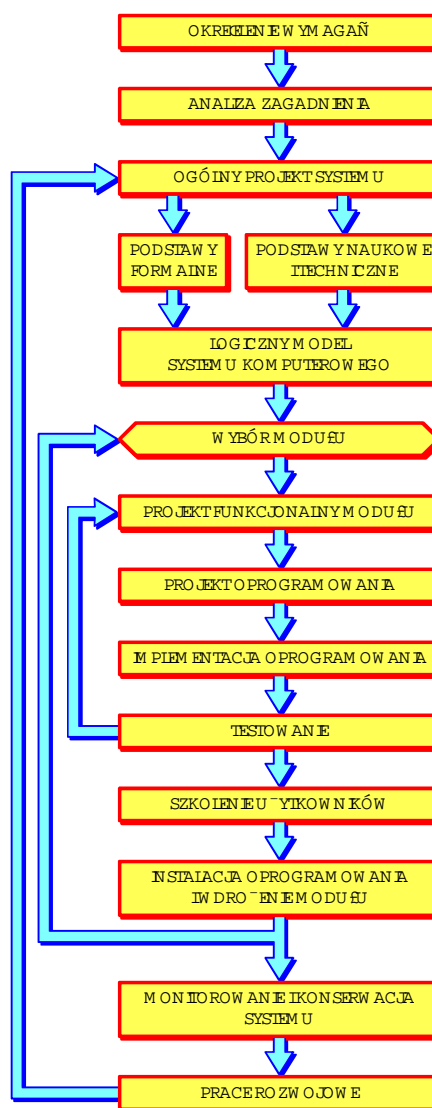
W *strategii przyrostowej* (rys. 1.15) przyjmuje się podział realizacji planowanego docelowego zakresu funkcjonalnego systemu na etapy (moduły, funkcje) i tworzenie finalnego produktu metodą przyrostową przez dołączanie kolejnych części. Po określeniu wymagań i przeprowadzeniu całościowej analizy zagadnienia opracowywany jest ogólny projekt systemu. Dalsza część prac wykonywana jest kolejno dla poszczególnych wydzielonych funkcjonalnie modułów systemu, aż do

wdrożenia i rozpoczęcia użytkowania każdego modułu. Zaletą strategii jest stosunkowo szybkie udostępnianie użytkownikom możliwości korzystania z praktycznych efektów wprowadzanego systemu. Strategia przyrostowa okazuje się przeważnie najefektywniejsza w tzw. *środowiskach słabo zdefiniowanych informacyjnie*, gdzie praktycznie nie funkcjonują żadne sformalizowane rozwiązania.

Pewną odmianą strategii przyrostowej jest *strategia ewolucyjna*. Zakłada się w niej, że ostateczna wersja systemu, spełniająca wszystkie wymagania użytkowników, zostanie uzyskana na drodze ewolucji systemu od wersji wstępnej do wersji docelowej. W rozwiązaniu tym każda wersja ma określoną zdolność użytkową, a jednocześnie służy do precyzowania wymagań dotyczących kolejnej wersji. Schemat tworzenia kolejnych wersji jest z reguły analogiczny do przyjmowanego w modelu kaskadowym.

Strategia prototypowania wprowadza do prac nad systemem dodatkowy etap polegający na stworzeniu prototypu planowanego systemu. Prototyp jest tu rozumiany jako wczesna wersja systemu, wykazująca pewne cechy systemu docelowego. Prototypowanie traktowane jest najczęściej jako narzędzie służące sprecyzowaniu wymagań dotyczących systemu [16].

Szczególną cechą komputerowych systemów wspomagających gospodarowanie infrastrukturą mostową jest potrzeba ich systematycznego doskonalenia i rozwoju. Przez cały okres tworzenia i eksploatacji systemu jego działanie powinno być monitorowane, a ewentualne usterki w jego funkcjonowaniu – usuwane w ramach obsługi serwisowej. Wnioski z monitorowania są też przeważnie podstawą prac rozwojowych przygotowujących kolejne wersje systemu. Głównymi stymulatorami prac rozwojowych są zmieniające się potrzeby i wymagania użytkowników, coraz większe możliwości sprzętu komputerowego i technologii



Rys. 1.15. Schemat realizacji przyrostowej strategii tworzenia systemu wspomagającego gospodarowanie obiektami mostowymi

oprogramowania, a także postęp w dziedzinie wykorzystywanych w systemie rozwiązań naukowych i technicznych.

1.4. Zarządzanie obiektami mostowymi w Polsce

1.4.1. Infrastruktura mostowa

Określenia: *mosty*, *obiekty mostowe*, *obiekty inżynierskie* lub *obiekty inżynieryjne* nie mają ścisłych powszechnie akceptowanych definicji i są często używane zamiennie. Wprowadzanie systemowych rozwiązań w gospodarowaniu tymi obiektami wymusza sprecyzowanie stosowanej terminologii, ale nie doprowadziło dotąd do pełnego ujednoczenia we wszystkich systemach zarządzania użytkowanych w naszym kraju. W związku z tym w niniejszej pracy przyjęto następujące podstawowe określenia:

- *budowla* – obiekt budowlany nie będący budynkiem lub obiektem małej architektury [349]; ogólne określenie obejmujące między innymi *budowle komunikacyjne*, takie jak: drogi, linie kolejowe, obiekty inżynierskie (inżynieryjne);

Tab. 1.5. Definicje drogowych i kolejowych obiektów mostowych

Rodzaj obiektu	Obiekt drogowy	Obiekt kolejowy
Most	Obiekt służący do zapewnienia komunikacji drogowej nad przeszkodą wodną	Obiekt inżynieryjny umożliwiający przeprowadzenie linii kolejowej nad przeszkodami wodnymi, o szerokości w świetle pod co najmniej jednym przęsłem większej od 3,00 m
Wiadukt	Obiekt służący do zapewnienia komunikacji drogowej nad drogą lub linią kolejową	Obiekt inżynieryjny umożliwiający przeprowadzenie linii kolejowej nad przeszkodami innymi niż przeszkody wodne, o szerokości w świetle pod co najmniej jednym przęsłem większej od 3,00 m
Estakada	Obiekt służący do zapewnienia komunikacji drogowej nad przeszkodą inną niż przeszkoda wodna, droga lub linia kolejowa	Nie wyróżnia się
Kładka dla pieszych	Obiekt inżynieryjny umożliwiający przeprowadzenie nad linią kolejową lub inną przeszkodą ciągu ruchu pieszego	Obiekt służący do przeprowadzenia ruchu pieszego nad przeszkodą

- *obiekty inżynierskie (inżynieryjne)* – ogólne określenie obejmujące obiekty mostowe (mosty, wiadukty, estakady, kładki) oraz tunele, podziemne przejścia dla pieszych, przepusty, konstrukcje oporowe;
- *obiekty mostowe* – konstrukcje złożone z podpór i przęseł, przeznaczone do przeprowadzenia ciągu komunikacyjnego nad przeszkodą; w zależności od rodzaju prowadzonego ciągu komunikacyjnego różni się obiekty: drogowe, kolejowe, drogowo-kolejowe, tramwajowe, kładki dla pieszych itp., a w zależności od pokonywanej przeszkody najczęściej wyróżnia się: mosty, wiadukty i estakady.

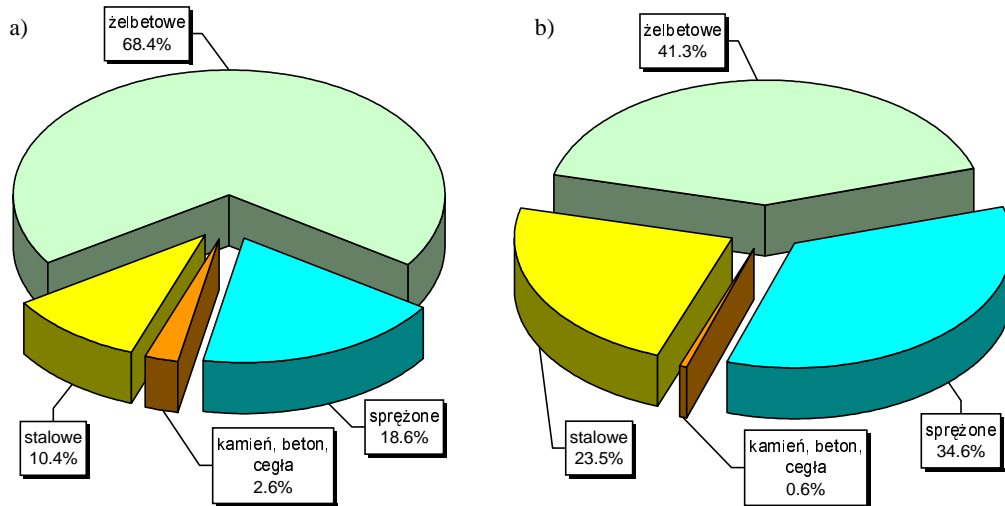
Przyjęte w obowiązujących w naszym kraju przepisach szczegółowe definicje poszczególnych rodzajów drogowych [32], [291], [294] i kolejowych [165], [292], [352] obiektów mostowych różnią się nieco między sobą. Określenia te zestawiono w tab. 1.5.

Infrastruktura mostowa w Polsce, bez uwzględnienia przepustów, obejmuje ponad 38000 obiektów, na które składają się: mosty, wiadukty, estakady, kładki, tunele, przejścia podziemne oraz konstrukcje oporowe. Ze względu na odmienną organizację procesów zarządzania utrzymaniem i eksploatacją odrębnego przedstawienia wymagają obiekty drogowe oraz kolejowe.

Według informacji przedstawionych między innymi w pracach [58], [240], [242], [327] na sieci dróg publicznych w Polsce – o całkowitej długości ponad 370 tys. km – znajduje się około 29000 obiektów inżynierskich, bez uwzględnienia przepustów. Łączna długość tych obiektów wynosi ponad 564 km. Dane o obiektach inżynierskich usytuowanych w ciągach dróg poszczególnych kategorii, według stanu w roku 1999, przedstawiono w tab. 1.6.

Tab. 1.6. Obiekty mostowe na drogach publicznych w Polsce (bez przepustów)

Kategoria dróg	Długość dróg [km]	Obiekty inżynierskie		Liczba jednostek zarządzających
		Liczba obiektów [szt.]	Długość obiektów [m]	
Krajowe	18 120	3 517	144 685	1
Wojewódzkie	28 465	3 491	65 235	16
Powiatowe	127 793	9 167	130 611	308
Gminne	197 351	7 744	95 726	2 489
Miejskie		5 090	127 883	65
Razem	371 729	29 009	564 140	2 879



Rys. 1.16. Materiał dźwigarów głównych obiektów mostowych na drogach krajowych: a) według liczby obiektów, b) według pola powierzchni przęseł

W skali całego kraju średnia długość drogowego obiektu inżynierskiego wynosi ok. 19,4 m, a przeciętna odległość pomiędzy obiektami osiąga 12,8 km. W ciągu sieci dróg publicznych znajduje się stosunkowo niewiele dużych obiektów. W całym kraju eksploatowane są 182 obiekty inżynierskie o długości przekraczającej 200 m. Drogowe obiekty inżynierskie charakteryzują się dużym zróżnicowaniem rozwiązań konstrukcyjnych oraz wykorzystywanych materiałów. Jako przykład na rys. 1.16 przedstawiono dane dotyczące materiałów konstrukcyjnych dźwigarów głównych obiektów mostowych usytuowanych w ciągu dróg krajowych. Rysunek 1.16a prezentuje zestawienie według liczby obiektów, a rysunek 1.16b – według pola powierzchni przęseł w planie. Porównanie na podstawie powierzchni przęseł pokazuje, że udział trzech podstawowych materiałów: stali, betonu zbrojonego i betonu sprężonego jako tworzywa dźwigarów głównych jest zbliżony. W obiektach mniejszych dominuje beton zbrojony, co widać wyraźnie na rys. 1.16a.

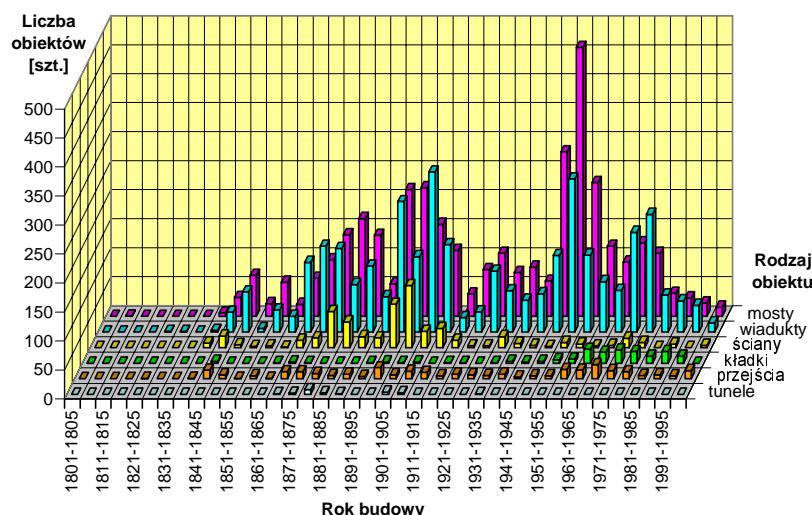
W posiadaniu i w zarządzie Polskich Kolei Państwowych w roku 2000 znajdowało się 33276 obiektów inżynierskich. Podstawowe dane statystyczne dotyczące poszczególnych rodzajów obiektów, opracowane na podstawie danych ewidencyjnych zgromadzonych w bazie danych systemu SMOK [41], przedstawiono w tab. 1.7. Łączna długość linii kolejowych wynosi około 23600 km, a średnia odległość pomiędzy obiektami inżynierskimi to około 700 m.

Sumaryczna liczba kolejowych obiektów mostowych, a więc: mostów, wiaduktów i kładek dla pieszych, wynosi 7902 szt. (23,7% wszystkich kolejowych obiektów inżynierskich). Pole powierzchni obiektów mostowych w planie wynosi 1401067 m², co stanowi 48,9% pola powierzchni wszystkich kolejowych obiektów inżynierskich. Średnia długość obiektów mostowych to prawie 30 m.

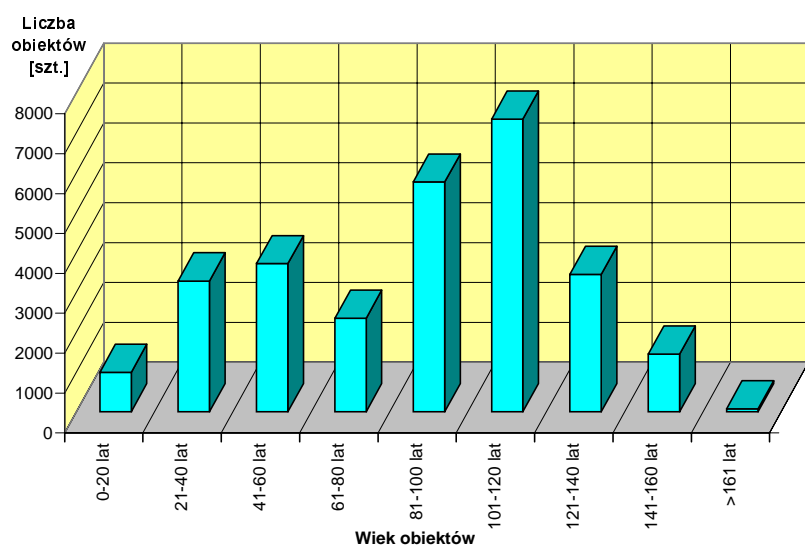
Tab. 1.7. Kolejowe obiekty inżynierijne w Polsce (stan w roku 2000)

Rodzaj obiektów	Liczba obiektów [szt.]	Długość eksploatacyjna [m]	Pole powierzchni w planie [m ²]
Mosty	4 047	136 461	793 701
Wiadukty	3 647	77 787	456 228
Kładki dla pieszych	208	19 193	151 138
Przejścia pod torami	388	10 197	529 396
Tunele liniowe	26	18 152	93 290
Ściany oporowe	771	61 756	382 608
Przepusty	24 189	417 307	456 244
Razem	33 276	740 853	2 862 605

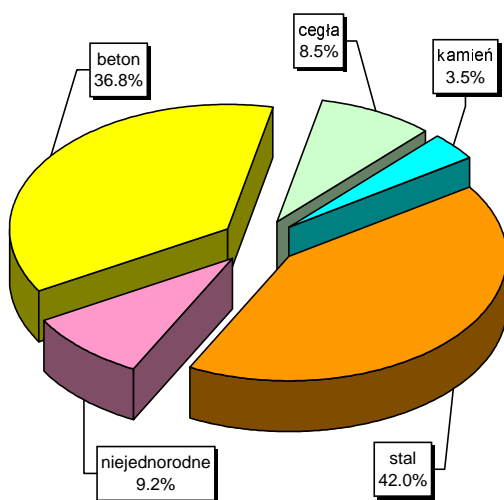
Najstarsze, istniejące dotąd, kolejowe obiekty mostowe powstały na początku XIX wieku, a intensywny rozwój sieci kolejowej rozpoczął się na przełomie lat 30. i 40. tego wieku. Liczbę obiektów wybudowanych na terenie naszego kraju w kolejnych okresach 5-letnich w ciągu XIX oraz XX wieku przedstawiono na rys. 1.17. Prezentowane dane obejmują jedynie obiekty istniejące do dnia dzisiejszego. Z przytoczonych danych jasno wynika, że eksploatowane w naszym kraju kolejowe obiekty inżynierijne są w znacznej części budowlami zaawansowanymi wiekowo (rys. 1.18). Blisko 45% obiektów jest w wieku powyżej 100 lat, a jedynie około 15% konstrukcji – poniżej 40 lat.



Rys. 1.17. Kolejowe obiekty inżynierijne według roku budowy

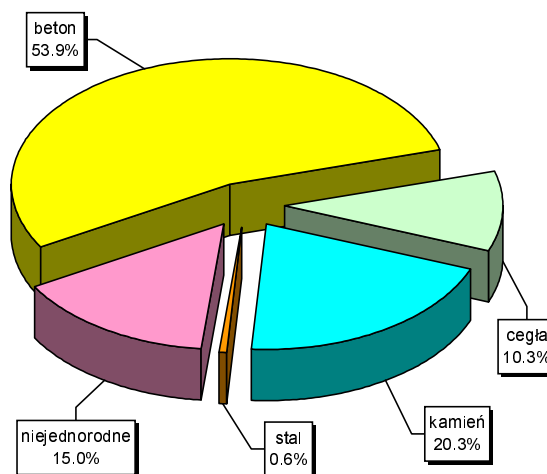


Rys. 1.18. Struktura wiekowa kolejowych obiektów inżynieryjnych w Polsce – stan w roku 2000



Rys. 1.19. Materiał konstrukcyjny dźwigarów głównych mostów i wiaduktów kolejowych

Kolejowe obiekty mostowe wykazują, podobnie jak obiekty drogowe, duże zróżnicowanie pod względem wykorzystywanych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych. Na rysunku 1.19 przedstawiono procentowy udział podstawowych materiałów konstrukcyjnych zastosowanych jako tworzywo dźwigarów głównych przęseł mostów i wiaduktów. Dominujący udział mają tu dźwigary stalowe oraz dźwigary betonowe, głównie z betonu zbrojonego. Wśród materiałów wykorzystywanych do budowy podpór zdecydowaną przewagę ma beton (rys. 1.20).



Rys. 1.20. Materiał konstrukcyjny podpór mostów i wiaduktów kolejowych

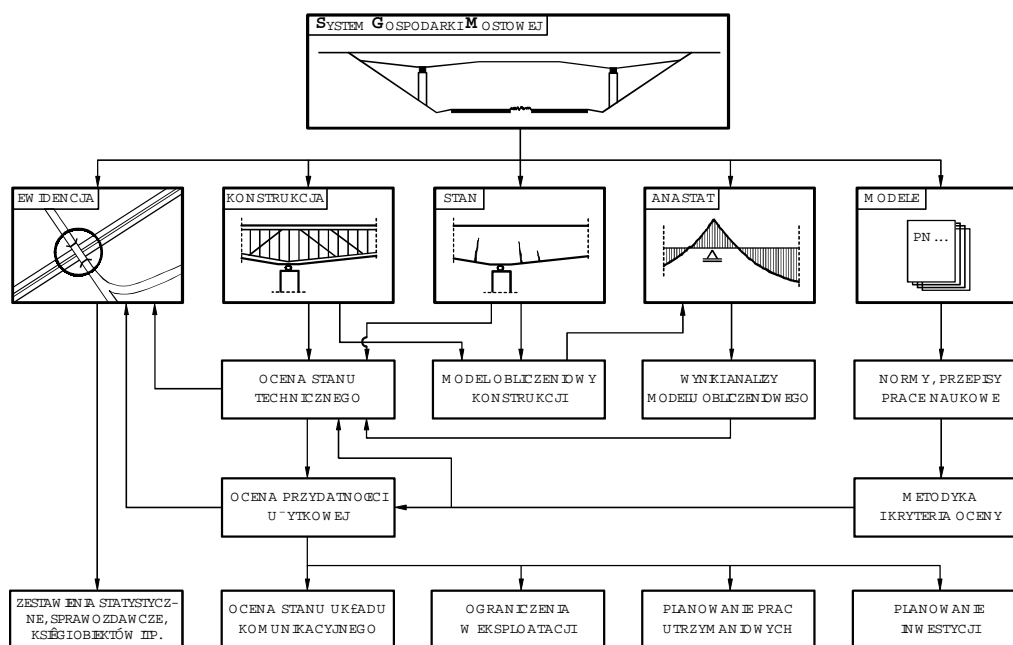
1.4.2. Komputerowe wspomaganie zarządzania eksploatacją mostów w Polsce

Odzyskanie przez Polskę niepodległości po I wojnie światowej umożliwiło zorganizowanie państwowych struktur zarządzających infrastrukturą komunikacyjną. Specjalistyczne służby zarządzania mostami drogowymi powstały w roku 1919, gdy w Ministerstwie Robót Publicznych powołano Wydział Mostowy. Gospodarowanie obiektami kolejowymi było w gestii powstałych w roku 1918 Polskich Kolei Państwowych, działających początkowo jako instytucja podległa bezpośrednio organom władzy państwowej (Ministerstwo Kolei Żelaznych, Ministerstwo Komunikacji), a następnie jako wyodrębnione przedsiębiorstwo. Interesujące informacje o historii tych służb zawierają między innymi prace [233], [237], [259].

Jednolite zasady ewidencjonowania i przeglądów drogowych obiektów mostowych w naszym kraju opracowano w latach 1954–1956 [233], [237], a ich wdrożenie przyspieszyła katastrofa wiaduktu w Zabrze w roku 1959. W tym samym czasie podobne unormowania wprowadzono także w zarządzaniu kolejowymi obiektami mostowymi [161], [347], a jednolity system dokumentacji ewidencyjnej i utrzymaniowej obiektów kolejowych wdrożono w roku 1962 [272]. Wprowadzone rozwiązania zainicjowały systemowe gromadzenie informacji o obiektach mostowych. Wykorzystywanie tych informacji w procesie zarządzania obiektami było znacznie ograniczone z uwagi na istniejące techniczne możliwości ich przetwarzania i udostępniania. Istotny przełom nastąpił tu wraz z powstaniem i rozwojem technik komputerowych.

Potrzebę wprowadzenia wspomaganych komputerowo systemów zarządzania obiektami mostowymi dostrzegano i dyskutowano w Polsce od połowy lat 80. (m.in. [18], [45], [46], [47], [48], [94], [182], [241], [274], [276], [281], [282]). Pierwsze prace projektowe dotyczące systemu zarządzania drogowymi obiektami mostowymi

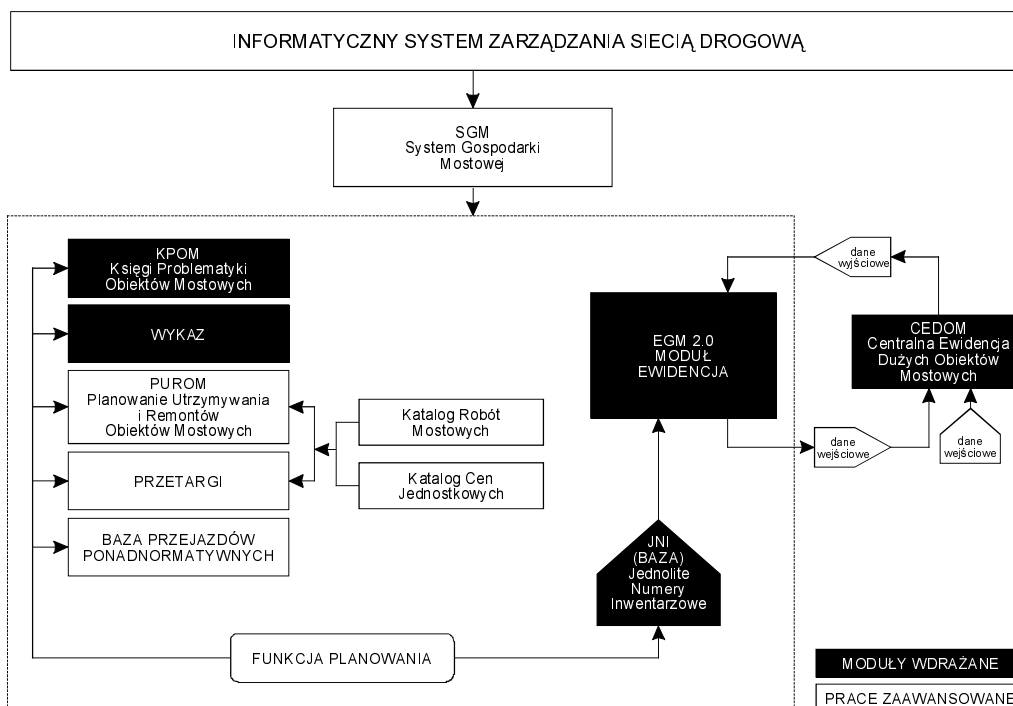
[17], [19], [286], [287] wykonano w latach 1987–1991 na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych, rozpoczynając tworzenie Systemu Gospodarki Mostowej (SGM). Pierwszy projekt koncepcyjny rozwiązań funkcjonalnych systemu przedstawiono na rys. 1.21.



Rys. 1.21. Wstępna koncepcja układu funkcjonalnego Systemu Gospodarki Mostowej (SGM)

Zrealizowana ostatecznie wersja systemu różniła się istotnie od pierwotnych koncepcji, gdyż zamiast kompleksowego i jednorodnego systemu powstał pakiet autonomicznych programów współpracujących ze sobą w zakresie wymiany danych [32], [85], [157], [158], [159], [213], [214], [234], [235], [236], [238], [239].

Ogólny schemat oprogramowania Systemu Gospodarki Mostowej w wersji 2.0 przedstawiono na rys. 1.22. Wersja ta została wdrożona w latach 1993–1994 i objęła swoim zasięgiem wszystkie drogowe obiekty inżynierskie (z wyłączeniem przepustów) usytuowane w ciągu dróg krajowych [363], [364]. Oprogramowanie systemu było od roku 1995 z powodzeniem użytkowane w jednostkach administrujących drogami publicznymi, przy jednoczesnym prowadzeniu działań rozwojowych [242]. Od początku 1999 roku, wraz ze zmianą administracyjnego podziału kraju, wprowadzono głęboką reorganizację systemu zarządzania drogami publicznymi. Spowodowało to potrzebę modernizacji oprogramowania Systemu Gospodarki Mostowej [156].



Rys. 1.22. Schemat funkcjonowania SGM [363]

Najnowsza wersja oprogramowania systemu została opracowana w roku 2000 i nosi oznaczenie SGM 2000. Systemy wspomagające eksploatację drogowych obiektów mostowych są rozwijane w powiązaniu z ogólnokrajowym Bankiem Danych Drogowych [152] oraz Drogowym Systemem Referencyjnym [361].

W ostatnich latach nowe zadania w zakresie gospodarowania infrastrukturą mostową powstały w naszym kraju w związku z rozpoczęciem realizacji szerokiego programu budowy autostrad. Autostradowe obiekty mostowe ze względu na szczególne znaczenie dla układu komunikacyjnego kraju wymagają szczególnie precyzyjnych narzędzi informatycznych wspomagających podejmowanie decyzji eksploatacyjnych. Zagadnienia związane z tą tematyką oraz propozycje rozwiązań są szczegółowo prezentowane m.in. w pracach [33], [37], [38], [43], [51], [52], [240], [242].

W gospodarowaniu mostami kolejowymi pierwszą próbą wprowadzenia technik komputerowych było opracowanie w latach 1988–1990 przez zespół Instytutu Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej, przy udziale Dolnośląskiej Dyrekcji Okręgowej Kolei Państwowych, koncepcji „Informatycznej bazy danych o mostach kolejowych z uwzględnieniem historii ich eksploatacji” [274]. Uzyskane doświadczenia umożliwiły Polskim Kolejom Państwowym precyzyjniejsze określenie założeń do dalszych prac związanych z systemowym zarządzaniem mostami kolejowymi.



Rys. 1.23. Tytułowy ekran oprogramowania systemu SMOK

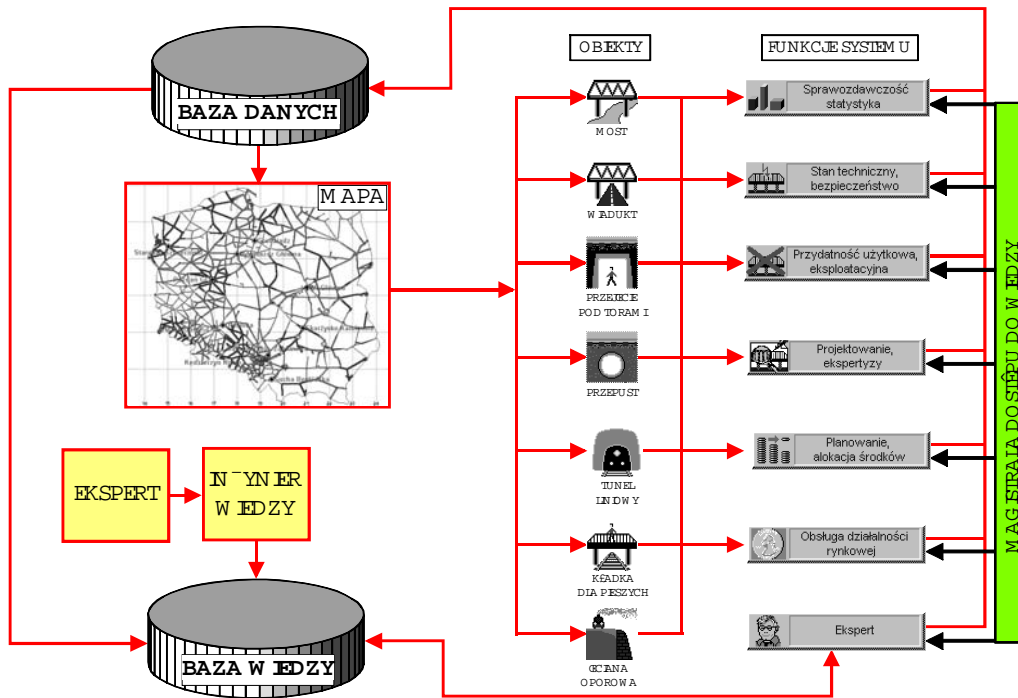
Zadania zaprojektowania, realizacji i wdrożenia kompleksowego systemu wspomagającego zarządzanie wszystkimi rodzajami kolejowych obiektów inżynierskich podjął się zespół złożony z pracowników Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, a także wrocławskich firm: Komputerowej Asocjacji Informacyjnej BOGART Sp. z o.o. oraz Universal Systems s.c. Prace nad tym projektem, o nazwie: „System Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK” (rys. 1.23), rozpoczęto w roku 1992. Autor niniejszej monografii jest od początku realizacji tego systemu koordynatorem całości prac oraz, wspólnie z mgr. inż. Stefanem Rewińskim, głównym jego projektantem.

Ogólny schemat funkcjonalny systemu SMOK pokazano na rys. 1.24 [50], a szczegółowe rozwiązania merytoryczne i informatyczne przedstawiono między innymi w pracach

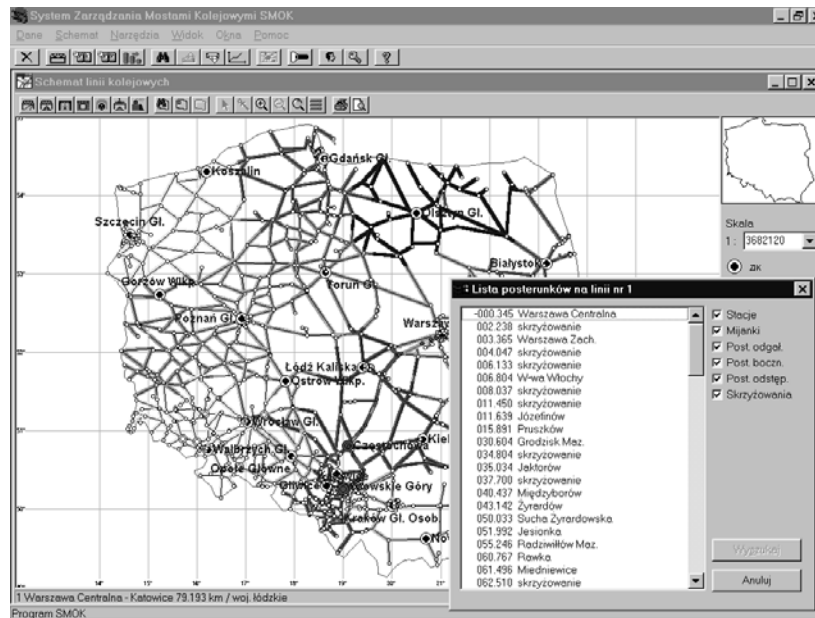
[20], [39], [49], [53], [55], [190], [191], [192].

System SMOK jest projektowany i wdrażany metodą przyrostową, a cały projekt został podzielony na trzy etapy. Pierwszy etap prac obejmował:

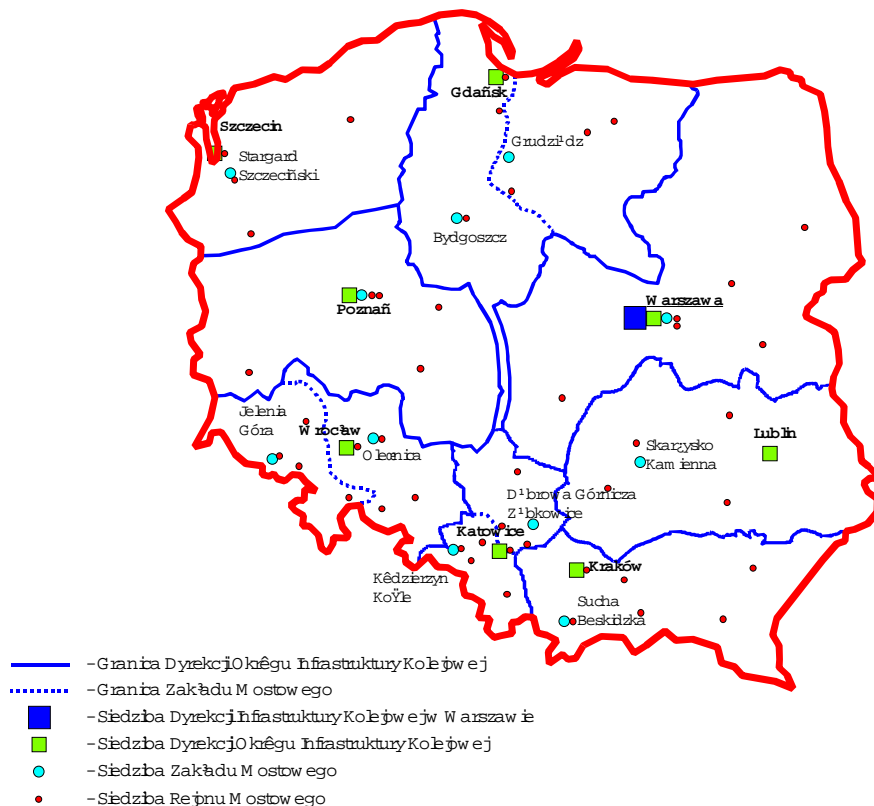
- opracowanie prawnych podstaw systemu [165], [352];
- reorganizację służb zajmujących się utrzymaniem i eksploatacją obiektów inżynierskich, w wyniku której od początku 1995 r. rozpoczęły funkcjonowanie nowe specjalistyczne jednostki organizacyjne – Oddziały Mostowe [306];
- prace nad naukowymi i technicznymi podstawami systemu, ze szczególnym uwzględnieniem ewidencyjnych modeli obiektów [18], [39], [50];
- zaprojektowanie, wykonanie i wdrożenie we wszystkich specjalistycznych jednostkach organizacyjnych PKP oprogramowania umożliwiającego tworzenie ewidencyjnych modeli obiektów z wykorzystaniem numerycznej mapy linii kolejowych (rys. 1.25) [40], [50], [305];
- przygotowanie i przeprowadzenie szkoleń przyszłych użytkowników systemu wraz z opracowaniem niezbędnych podręczników i innych materiałów pomocniczych [24], [25], [35], [41], [131], [132].



Rys. 1.24. Schemat funkcjonalny Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK [50]



Rys. 1.25. Numeryczna mapa linii kolejowych PKP w systemie SMOK [41]



Rys. 1.26. Rozmieszczenie instalacji Systemu SMOK na terenie kraju

Proces wdrożeń systemu we wszystkich jednostkach PKP zajmujących się zarządzaniem obiektami inżynierskimi (67 instalacji) zakończono wiosną 1997 r. Lokalizację poszczególnych instalacji systemu na terenie kraju pokazano na rys. 1.26. Wyniki realizacji pierwszego etapu tworzenia systemu przedstawiono szczegółowo w pracach [41] oraz [50].

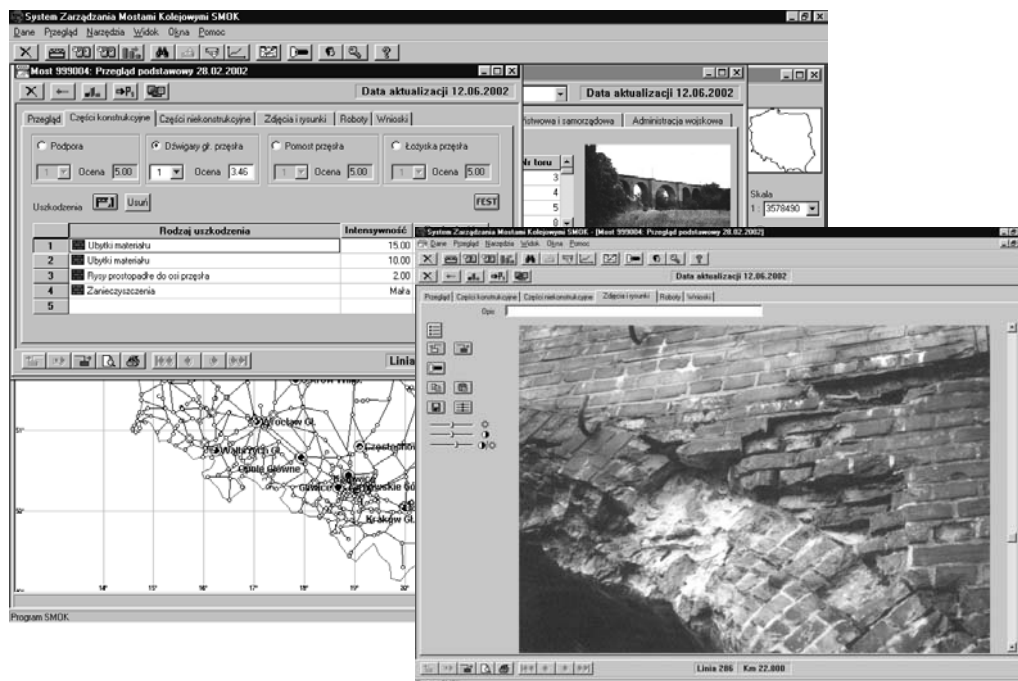
W kolejnych latach zrealizowano drugi etap tworzenia systemu, obejmujący przede wszystkim zagadnienia związane z przeglądami obiektów, a więc ujednolicony system gromadzenia informacji o uszkodzeniach (rys. 1.27), metodykę oceny stanu technicznego obiektów [55], [307] oraz systemowe planowanie działań utrzymaniowych w zakresie rzeczowym i finansowym [54], [56]. W oprogramowaniu systemu zaimplementowano opracowaną przez autora testową wersję narzędzi ekspertowych wykorzystujących rozwiązania przedstawione w pracach [26], [27], [28]. Podstawowe prace tego etapu zakończono pilotażowym wdrożeniem systemu jesienią 2000 roku w wybranych 12 jednostkach organizacyjnych PKP. Zakres funkcjonalny oprogramowania tej wersji systemu oraz zastosowane rozwiązania merytoryczne przedstawiono w pracach [24], [25], [29], [35], [51], [52]. Ostatni, trzeci

etap budowy systemu, planowany na lata 2002–2003, zapewni realizację pełnego zakresu funkcjonalnego, przedstawionego na rys. 1.24.

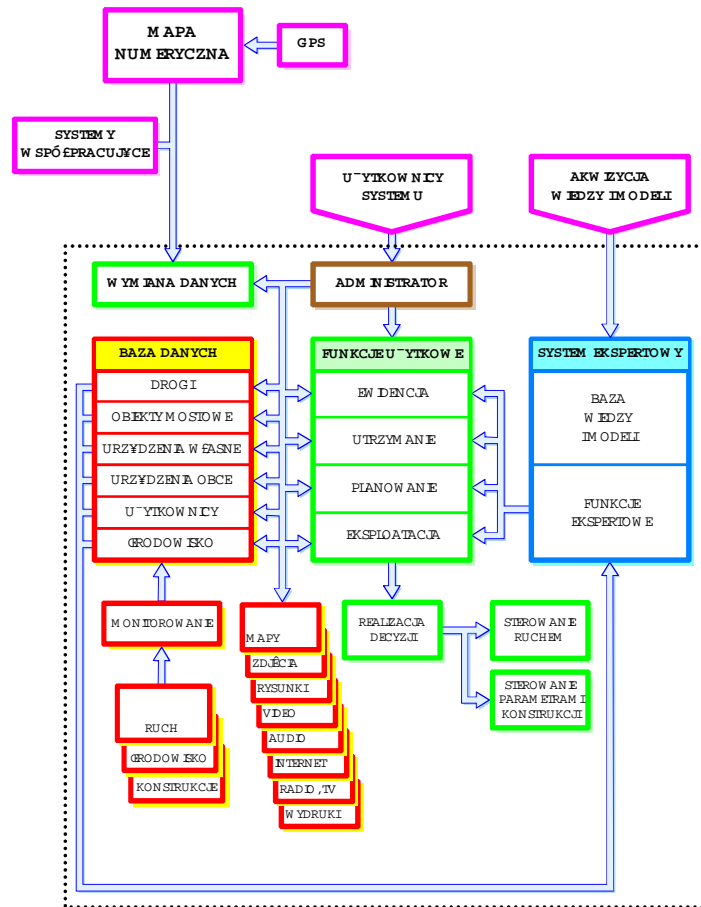
W latach 1997–2002 zostało opracowanych w naszym kraju także kilka innych systemów wspomagających eksploatację obiektów mostowych, których głównym projektantem jest autor niniejszej monografii. Można tu wymienić:

- System Zarządzania Eksploatacją i Utrzymaniem Drogowej Trasy Średnicowej Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego ZEUS [33], [34];
- system wspomagający eksploatację i utrzymanie mostu im. Armii Krajowej w ciągu autostrady A1 przez Wisłę koło Torunia RUBIKON [30], [31];
- System Zarządzania Obiektami Komunikacyjnymi SZOK [43], [44].

System ZEUS powstał w latach 1997–1998 w formie szczegółowego projektu koncepcyjnego oraz implementacji modelowych. Była to, wydaje się, pierwsza w Polsce próba opracowania kompleksowego systemu integrującego zarządzanie drogowymi obiektami mostowymi, drogami, infrastrukturą podziemną na obszarze trasy oraz wzajemnymi oddziaływaniami układu komunikacyjnego i środowiska [33], [34]. Ogólną koncepcję funkcjonalną tego systemu przedstawiono na rys. 1.28.



Rys. 1.27. Fotograficzna dokumentacja uszkodzeń stwierdzonych w trakcie przeglądu i ich numeryczny model



Rys. 1.28. Schemat funkcjonalny systemu ZEUS [33]

W latach 1999–2000 został zaprojektowany, oprogramowany i wdrożony system RUBIKON, przeznaczony i wykorzystywany do wspomagania monitorowania oraz zarządzania eksploatacją jednego dużego obiektu – mostu w ciągu autostrady A1 przez Wisłę, zlokalizowanego w pobliżu Torunia. Rekordowe w Polsce rozpiętości przęsła tego mostu z betonu sprężonego, nowatorskie technologie jego wznoszenia oraz szczególne warunki realizacji budowy spowodowały potrzebę zindywidualizowanego monitorowania stanu obiektu w trakcie budowy, a następnie eksploatacji. W oprogramowaniu szeroko wykorzystano elementy grafiki komputerowej, ułatwiające między innymi dostęp do zasobów systemu oraz prezentację zgromadzonych danych (rys. 1.29).



Rys. 1.29. System RUBIKON [31]: a) ekran tytułowy, b) monitorowanie odkształceń konstrukcji mostu

Geneza powstania Systemu Zarządzania Obiektami Komunikacyjnymi SZOK jest związana z decentralizacją systemu zarządzania drogową infrastrukturą komunikacyjną, wprowadzoną od początku 1999 roku, równocześnie ze zmianą administracyjnego podziału kraju. W województwach, powiatach, gminach i wydzielonych miastach powstało prawie 3000 nowych jednostek odpowiedzialnych za utrzymanie i eksploatację sieci drogowej, w tym obiektów mostowych (patrz tab. 1.6). Szeroki zakres uprawnień i odpowiedzialności spoczywający na stosunkowo nielicznej kadrze specjalistów mostowych stworzył potrzebę systemowego,



Rys. 1.30. Ekran tytułowy Systemu Zarządzania Obiektami Komunikacyjnymi SZOK [44]

kompleksowego wspomaganie procesów zarządzania. System ten został opracowany i wdrożony w kilku wersjach: dla zarządców dróg wojewódzkich, powiatowych, gminnych i miejskich [43], a także dla zarządców autostrad [43]. Jedną z ważniejszych jego cech jest integracja gospodarowania obiektami mostowymi i drogami w jednym systemie wspomagającym zarządzanie utrzymaniem i eksploatacją wydzielonej części układu komunikacyjnego. Tytułowy ekran systemu przedstawia rys. 1.30.

Jedną ze znaczących form rozwoju inżynierii komputerowych systemów gospodarowania mostami jest międzynarodowa współpraca mająca na celu

zintegrowanie systemów użytkowanych w poszczególnych krajach, a także prowadzenie wspólnych prac naukowo-badawczych. Z działań realizowanych ostatnio w tym zakresie przy udziale przedstawicieli naszego kraju warto wspomnieć:

- opracowanie w latach 1997–1999 projektu koncepcyjnego Zintegrowanego Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi (Integrated Railway Bridge Management System) ECOBRIDGE [23]; projekt ten został opracowany na potrzeby Międzynarodowej Unii Kolei (International Union of Railways) we współpracy przedstawicieli Francji, Szwecji, Holandii i Polski;
- prace nad systemami ekspertowymi wspomagającymi ocenę stanu obiektów mostowych wykonane w latach 1994–1999 w ramach programu NATO „Science for Stability” realizowanego przez Politechnikę Wrocławską oraz Istanbul Technical University [21].

Prezentowane w dalszej części niniejszej monografii wybrane rezultaty prac naukowo-badawczych autora dotyczących inżynierii komputerowych systemów gospodarowania mostami zostały w znacznym stopniu zainspirowane potrzebami powstałymi w trakcie tworzenia wymienionych wyżej systemów wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej.

2. PODSTAWY NUMERYCZNEGO MODELOWANIA OBIEKTÓW MOSTOWYCH

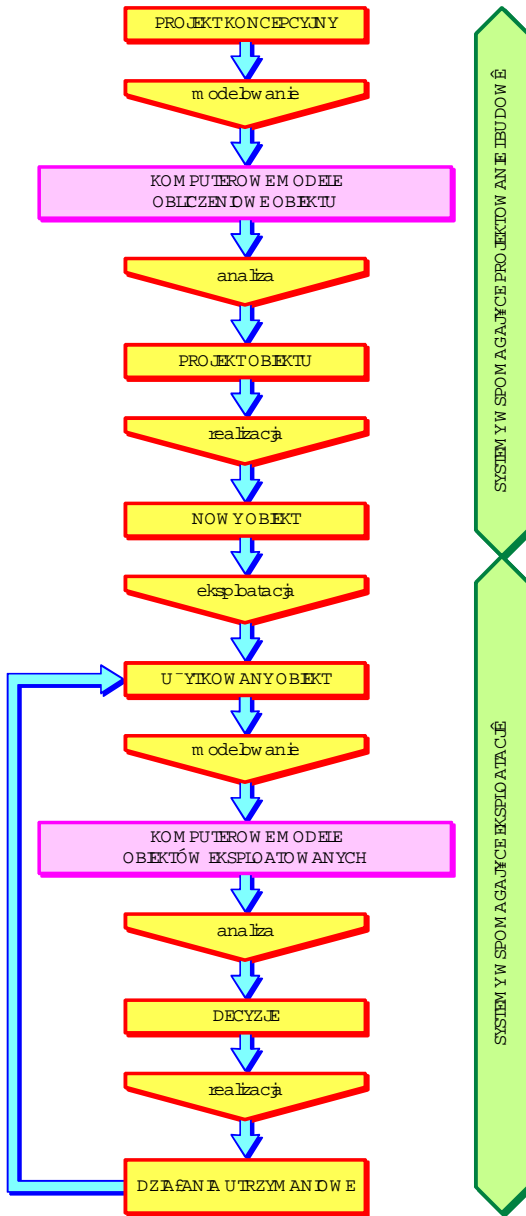
2.1. Modele stosowane w systemach wspomagających eksploatację mostów

Pojęcie *model* jest w niniejszej monografii używane do określenia modelu teoretycznego, którego analiza umożliwia poznawanie cech badanego (modelowanego) obiektu lub procesu. *Modele teoretyczne* są najczęściej określane jako hipotetyczne konstrukcje myślowe, będące uproszczonym obrazem fragmentu rzeczywistości, opartym na myślowej eliminacji elementów (cech, relacji) rzeczywistości, nieistotnych dla danego celu lub w danym etapie badania [357], [365]. W ogólnym ujęciu model określa relacje pomiędzy zmiennymi (parametrami) systemu oraz jego spójnikami (funktorami), a celem modelu jest symulacja funkcjonowania modelowanego systemu. Z uwagi na stosowany typ spójników można wyróżnić dwie podstawowe klasy modeli:

- *modele matematyczne* – wykorzystujące jako spójniki operacje algebraiczne (np. dodawanie, całkowanie) wykonywane na wartościach liczbowych;
- *modele logiczne* – w których stosowane są spójniki typu logicznego (np. „lub”, „i”, „jeżeli-to”), a wykonywane operacje dotyczą przeważnie wartości lingwistycznych.

Do lat 70. ubiegłego wieku dominującą rolę we wszystkich praktycznie dziedzinach odgrywały modele matematyczne. W następnych dziesięcioleciach nastąpił dynamiczny wzrost zastosowań modeli logicznych związany z rozwojem technologii komputerowych, a w szczególności z postępami w dziedzinie sztucznej inteligencji. Powstanie i rozwój teorii zbiorów rozmytych [211], [261], [365], [373], [374], [375], a także technologii umożliwiających niesymboliczną reprezentację i przetwarzanie informacji, takich jak sztuczne sieci neuronowe (np. [153], [174], [258], [334], [335], [379]) czy też algorytmy ewolucyjne (np. [195], [230], [296]) stworzyły możliwości doskonalenia metod modelowania obiektów i procesów przez połączenie tradycyjnych modeli matematycznych z modelami logicznymi. W takich *hybrydowych* modelach (np. [247], [295], [296]) dokonuje się zazwyczaj podziału dziedziny problemu na zagadnienia składowe, co zmniejsza stopień trudności

modelowania oraz umożliwia zastosowanie metod i technik modelowania dobranych indywidualnie do wydzielonych części problemu.



Rys. 2.1. Komputerowe modele obiektów w systemach wspomagających projektowanie i budowę oraz w systemach wspomagających eksploatację mostów

W obu podstawowych obszarach inżynierii mostowej, a więc w dziedzinie projektowania i budowy obiektów oraz w dziedzinie zarządzania obiektami eksploatowanymi, są stosowane komputerowe systemy wspomagające, które wymagają wykorzystywania numerycznych modeli obiektów. Na rysunku 2.1 przedstawiono ogólny schemat działań dotyczących obiektu mostowego od momentu powstania koncepcji jego budowy do ostatecznej fizycznej likwidacji obiektu. W procesie projektowania modelowanie dotyczy obiektu nieistniejącego fizycznie, którego parametry techniczne (wymiary, cechy materiału itp.) są przyjmowane zgodnie z projektem koncepcyjnym oraz wymaganiami norm projektowania. Także obciążenia projektowanej konstrukcji są przyjmowane według przepisów normowych i mają charakter obciążeń wirtualnych, nie odwzorowujących bezpośrednio obciążeń rzeczywistych. Ostatecznym rezultatem procesu projektowania jest obiekt przekazywany do eksploatacji jako fizyczna realizacja decyzji o budowie. W zagadnieniach zarządzania eksploatacją infrastruktury mostowej przedmiotem modelowania są rzeczywiste obiekty, a ich numeryczne modele są wykorzystywane w procesie podejmowania decyzji oraz nadzoru nad realizacją działań utrzymaniowych.

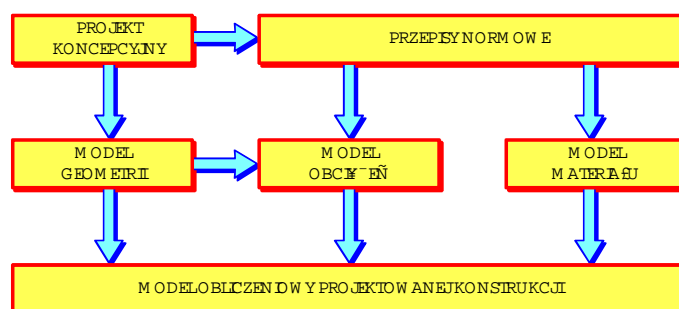
W komputerowych systemach wspomagających projektowanie są

wykorzystywane tzw. *modele obliczeniowe* konstrukcji [181], umożliwiające numeryczną analizę projektowanych obiektów. Model obliczeniowy stosowany w fazie projektowania obiektów tworzą:

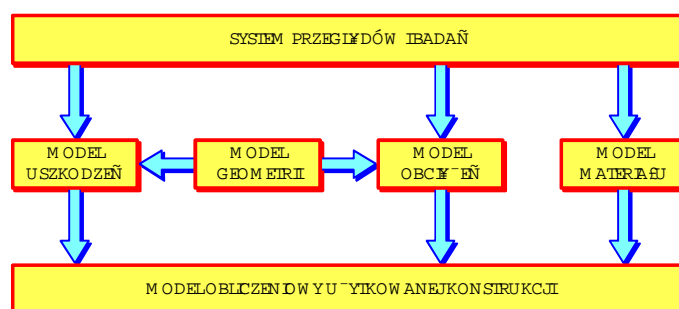
- *model geometrii* – określający sposób odwzorowania w modelu obliczeniowym geometrii projektowanej konstrukcji,
- *model obciążeń* – opisujący sposób numerycznego przedstawienia normowych obciążeń konstrukcji,
- *model materiału* – definiujący sposób numerycznego opisu normowych cech materiału konstrukcyjnego.

Powiązania pomiędzy poszczególnymi elementami modelu obliczeniowego przedstawiono na rys. 2.2. W modelach obliczeniowych wykorzystywanych do analizowania konstrukcji w trakcie ich eksploatacji niezbędne jest najczęściej uwzględnienie dodatkowego składnika, a mianowicie *modelu uszkodzeń* opisującego numerycznie uszkodzenia obiektu (rys. 2.3).

Znacznie bardziej złożoną strukturę mają numeryczne modele wykorzystywane w systemach wspomagających eksploatację obiektów mostowych.



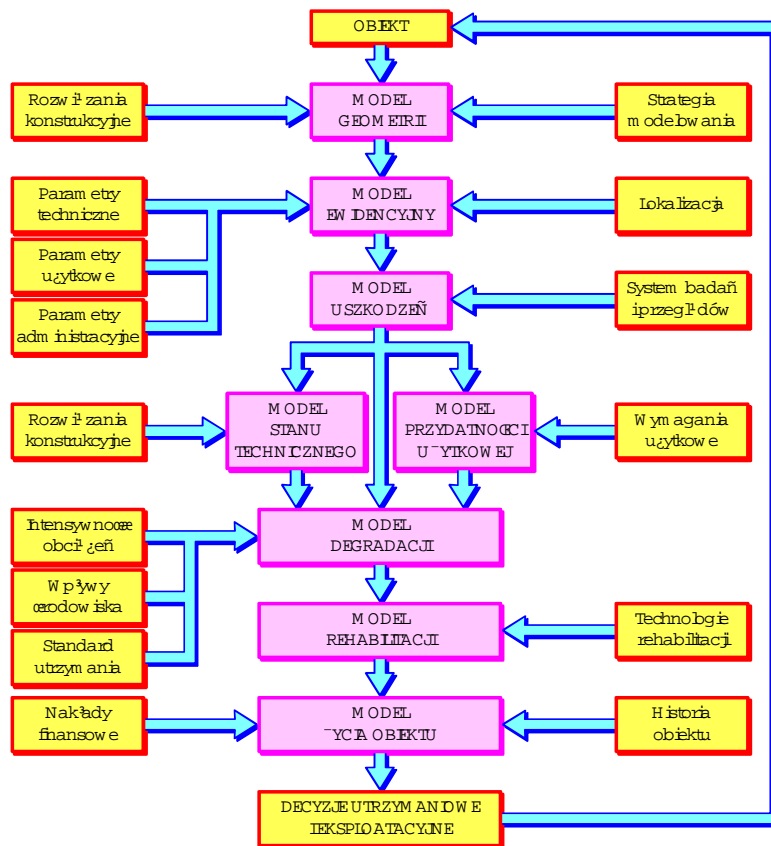
Rys. 2.2. Modele wykorzystywane w procesie wspomaganego komputerowo projektowania nowych konstrukcji mostowych



Rys. 2.3. Modele wykorzystywane w analizach statyczno-wytrzymałościowych użytkowanych konstrukcji mostowych

Podstawowe modele tworzące numeryczny obraz obiektu mostowego w systemie komputerowym przedstawiono na rys. 2.4. Wyróżniono tu następujące rodzaje modeli:

- *model geometrii* – określający sposób numerycznego odwzorowania rzeczywistej geometrii konstrukcji;
- *model ewidencyjny* – zawierający numeryczną reprezentację podstawowych parametrów lokalizacyjnych i administracyjnych obiektu, a także zaprojektowane wartości jego parametrów technicznych oraz użytkowych;
- *model uszkodzeń* – prezentujący numeryczny opis uszkodzeń obiektu;
- *model stanu technicznego* – zawierający aktualne wartości parametrów technicznych oraz oceny stanu technicznego obiektu;
- *model przydatności użytkowej* – zawierający numeryczny opis parametrów użytkowych oraz oceny obiektu z punktu widzenia wymagań użytkowych;



Rys. 2.4. Podstawowe modele obiektów wykorzystywane w komputerowych systemach wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej

- *model degradacji* – umożliwiający prognozowanie zmian kondycji obiektu będących wynikiem procesu degradacji;
- *model rehabilitacji* – służący do prognozowania zmian kondycji obiektu będących wynikiem działań utrzymaniowych;
- *model życia obiektu* – pozwalający na kompleksową symulację stanu obiektu mostowego w dowolnym momencie jego życia.

Wszystkie wymienione wyżej modele wykorzystywane w komputerowych systemach wspomagających zarządzanie infrastrukturą mostową powinny spełniać specyficzne wymagania, wśród których za najistotniejsze można uznać:

- *uniwersalność* – rozumianą jako możliwość wykorzystywania modeli w odniesieniu do wszystkich rodzajów obiektów objętych systemem;
- *spójność* – oznaczającą zgodność wszystkich modeli, która umożliwia stosowanie ich jako elementów jednego systemu;
- *elastyczność* – pozwalającą na używanie modeli zarówno w skali całego układu komunikacyjnego, jak i w odniesieniu do pojedynczego obiektu lub jego części;
- *otwartość* – oznaczającą zdolność wykorzystywania różnych rodzajów informacji;
- *jednoznaczność informacji* – umożliwiającą gromadzenie, przetwarzanie i udostępnianie informacji jednakowo interpretowanych przez wszystkich użytkowników systemu.

Przedstawione uwagi obrazują złożoność problematyki modelowania obiektów i procesów związanych z zarządzaniem infrastrukturą mostową. Brak jednoznacznych, sformalizowanych zasad modelowania, różnorodność wykorzystywanych informacji o bardzo zróżnicowanej precyzji i pewności, a także specyficzne, często sprzeczne, wymagania stawiane modelom powodują, że sukces w ich tworzeniu wymaga specjalistycznej interdyscyplinarnej wiedzy.

2.2. Modele geometrii obiektów mostowych

Model *geometrii obiektu*, czyli sposób modelowania jego ukształtowania i orientacji w przestrzeni, ma fundamentalne znaczenie dla numerycznej reprezentacji obiektów mostowych, zarówno w zagadnieniach komputerowego wspomaganie projektowania, jak i w komputerowych systemach wspomagających eksploatację.

Modele geometrii wykorzystywane w projektowaniu można jednoznacznie sklasyfikować, przyjmując dwa parametry [181]:

- *wymiar elementów* używanych do skonstruowania modelu geometrii, z wyróżnieniem elementów: jednowymiarowych (e^1), dwuwymiarowych (e^2) oraz trójwymiarowych (e^3);
- *wymiar przestrzeni*, w której model geometrii jest tworzony, z wyróżnieniem przestrzeni: jednowymiarowej (p^1), dwuwymiarowej (p^2) oraz trójwymiarowej (p^3).

Geometria elementu jednowymiarowego (e^1) jest opisywana przy użyciu jednej zmiennej x w układzie lokalnym, elementu dwuwymiarowego (e^2) – przy użyciu dwóch zmiennych lokalnych: x oraz y , a elementu trójwymiarowego (e^3) – w lokalnym układzie współrzędnych x, y, z . Wzajemne usytuowanie elementów może być, w układzie globalnym obiektu, definiowane w przestrzeni:

- jednowymiarowej (p^1) – przy użyciu współrzędnej X ;
- dwuwymiarowej (p^2) – przy użyciu współrzędnych X, Y ;
- trójwymiarowej (p^3) – przy użyciu współrzędnych X, Y, Z .

Możliwe kombinacje wymienionych parametrów tworzą sześć podstawowych klas modeli geometrii, co pokazano w tab. 2.1. Każda z tych klas zawiera modele jednorodnie, to znaczy utworzone przy użyciu tylko jednego rodzaju elementów. Dla poszczególnych klas modeli przyjęto za [181] oznaczenie (e^n, p^m), gdzie e^n oznacza element n -wymiarowy, natomiast p^m – przestrzeń m -wymiarową.

Tab. 2.1. Klasy jednorodnych modeli geometrii w systemach wspomagających projektowanie mostów według [181]

Wymiar przestrzeni	p^1	p^2	p^3	
e^1	e^1, p^1	e^1, p^2	e^1, p^3	x
e^2		e^2, p^2	e^2, p^3	x, y
e^3			e^3, p^3	x, y, z
	X	X, Y	X, Y, Z	Współrzędne lokalne
				Współrzędne globalne

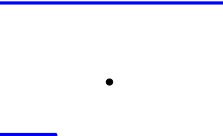
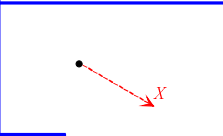
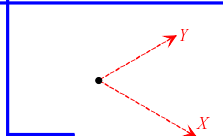
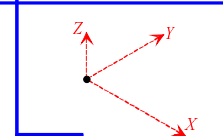
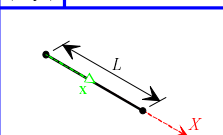
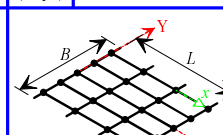
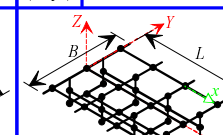
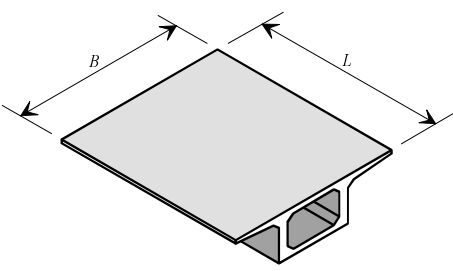
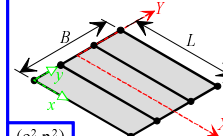
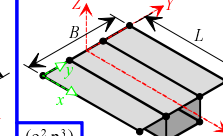
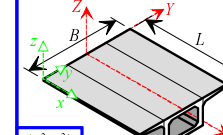
W zagadnieniach projektowania obiektów mostowych, oprócz modeli jednorodnych, bywają także stosowane niejednorodnie modele geometrii wykorzystujące różne rodzaje elementów w jednym modelu. W przestrzeni dwuwymiarowej mogą to być modele klasy (e^1+e^2, p^2), a w przestrzeni trójwymiarowej na przykład modele klas (e^1+e^2, p^3), (e^2+e^3, p^3) lub (e^1+e^3, p^3).

Podobną klasyfikację modeli geometrii obiektów można zaproponować także na potrzeby systemów wspomagających gospodarowanie infrastrukturą mostową. W tym wypadku niezbędne jest jednak wprowadzenie dodatkowego rodzaju elementów, a mianowicie elementów bezwymiarowych (e^0) oraz pojęcia przestrzeni bezwymiarowej (p^0). Elementy bezwymiarowe (e^0) są odpowiednikami geometrycznego pojęcia punktu, podczas gdy elementy jednowymiarowe (e^1) są elementami liniowymi, elementy dwuwymiarowe (e^2) – powierzchniowymi, a trójwymiarowe (e^3) – bryłowymi. Przestrzeń bezwymiarowa (p^0) jest tu umowną

„przestrzenia”, która nie ma wymiarów. Można ją sobie wyobrazić jako przestrzeń skupioną w jednym punkcie.

Proponowane zasady klasyfikacji numerycznych modeli geometrii na potrzeby komputerowych systemów wspomagających zarządzanie przedstawiono na rys. 2.5. Prezentuje on, na przykładzie skrzynekowego przęsła mostowego, możliwości geometrycznego odwzorowania konstrukcji przy użyciu dziesięciu różnych klas modeli jednorodnych. Wszystkie klasy modeli geometrii wykorzystujące ten sam rodzaj elementów e^n są zaliczane do jednego *typu modeli geometrii*, oznaczanego tu jako E^n . W rezultacie można wyróżnić cztery podstawowe typy modeli geometrii, a mianowicie:

- E^0 – zawierający klasy: (e^0, p^0) , (e^0, p^1) , (e^0, p^2) oraz (e^0, p^3) ;
- E^1 – obejmujący klasy: (e^1, p^1) , (e^1, p^2) , (e^1, p^3) ;
- E^2 – zawierający klasy: (e^2, p^2) , (e^2, p^3) ;
- E^3 – obejmujący klasę (e^3, p^3) .

e \ p		Wymiar przestrzeni			
		$p^0(-)$	$p^1(X)$	$p^2(X,Y)$	$p^3(X,Y,Z)$
Wymiar elementów	$e^0(-)$	 (e^0, p^0)	 (e^0, p^1)	 (e^0, p^2)	 (e^0, p^3)
	$e^1(x)$		 (e^1, p^1)	 (e^1, p^2)	 (e^1, p^3)
	$e^2(x,y)$			 (e^2, p^2)	 (e^2, p^3)
	$e^3(x,y,z)$				 (e^3, p^3)

Rys. 2.5. Klasyfikacja modeli geometrii na potrzeby komputerowych systemów wspomagających gospodarowanie mostami

W najprostszych modelach wykorzystujących elementy (e^0) geometryczną reprezentacją obiektu mostowego jest punkt, któremu przyporządkowano zbiór danych (parametrów) charakteryzujących obiekt. Analogicznie modelowane mogą też być poszczególne części składowe obiektu, a modelem obiektu jest wtedy zbiór elementów (e^0) reprezentujących części składowe. W modelach geometrii typu E^0 parametry charakteryzujące obiekt lub jego części są powiązane logicznie z bezwymiarowymi elementami modelu.

Z modelami klasy (e^0, p^0) mamy do czynienia wtedy, gdy jedyną cechą referencyjną obiektu w systemie komputerowym jest bezwymiarowy identyfikator, na przykład numer inwentarzowy. W odniesieniu do części składowych takim identyfikatorem jest najczęściej numer podpory lub przęsła. Modele tej klasy nie umożliwiają przestrzennej lokalizacji obiektu lub jego części składowych. W modelach klasy (e^0, p^1) obiekt jest lokalizowany w przestrzeni jednowymiarowej, a więc jego położenie może być opisane przy użyciu jednej współrzędnej. W systemach wspomagających zarządzanie infrastrukturą mostową jest to najczęściej kilometr drogi lub linii kolejowej, w ciągu której obiekt się znajduje. Zastosowanie modeli geometrii klasy (e^0, p^2) pozwala na zorientowanie punktu reprezentującego obiekt w przestrzeni dwuwymiarowej (np. długość i szerokość geograficzna), co stanowi warunek wykorzystywania odwzorowań mapowych. Pełna trójwymiarowa identyfikacja położenia obiektów jest możliwa przy użyciu modeli geometrii klasy (e^0, p^3).

Modele typu E^1 umożliwiają odwzorowanie geometrii obiektu przy wykorzystaniu elementów jednowymiarowych (e^1). W najprostszej należącej do tego typu klasie (e^1, p^1) części składowe obiektu (np. poszczególne przęsła) są opisywane geometrycznie przy użyciu jednej zmiennej x w układzie lokalnym oraz jednej zmiennej X w układzie globalnym. W modelach klas (e^1, p^2) oraz (e^1, p^3) geometria jest odwzorowywana przy użyciu jednej zmiennej x w układzie lokalnym oraz odpowiednio – dwóch (X, Y) i trzech (X, Y, Z) zmiennych w układzie globalnym. Analogicznie konstruowane mogą być modele typu E^2 , wśród których można wyróżnić odwzorowania klasy (e^2, p^2) oraz (e^2, p^3). We wszystkich modelach tego typu jest stosowany dwuwymiarowy lokalny układ współrzędnych x, y . Najwierniejszy opis geometrii zapewniają modele typu E^3 wykorzystujące trójwymiarowy lokalny układ współrzędnych x, y, z oraz trójwymiarowy globalny układ współrzędnych X, Y, Z .

Podobnie jak w przypadku modelowania na potrzeby projektowania, oprócz zaprezentowanych na rys. 2.5 modeli jednorodnych, w systemach wspomagających eksploatację mostów mogą być wykorzystywane modele niejednorodne, tworzone z elementów różnych rodzajów. Rozwiązania takie mogą być szczególnie efektywne w sytuacji, gdy poszczególne części składowe modelowanego obiektu wymagają różnej precyzji odwzorowania geometrii.

W użytkowanych obecnie systemach wspomagających gospodarowanie mostami modelowanie geometrii obiektów jest dokonywane praktycznie *wyłącznie przy wykorzystaniu modeli typu E^0* . Najczęściej stosowane są modele klasy (e^0, p^1) lub

(e^0, p^2). Za najważniejsze przyczyny tak dużej popularności bezwymiarowych modeli geometrii obiektów można uznać:

- prostotę numerycznego opisu modeli typu E^0 ,
- istniejące jeszcze do niedawna ograniczenia w stosowaniu dokładniejszych modeli geometrii wynikające z technicznych możliwości systemów komputerowych,
- brak specjalistycznych komputerowych narzędzi do tworzenia i wykorzystywania bardziej zaawansowanych modeli geometrii obiektów mostowych.

Najistotniejszą wadą modeli typu E^0 jest brak możliwości szczegółowego przestrzennego przyporządkowania informacji gromadzonych w systemie komputerowym. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do opisu uszkodzeń, których lokalizacja ma zasadniczy wpływ na precyzję ocen stanu technicznego i przydatności użytkowej obiektów.

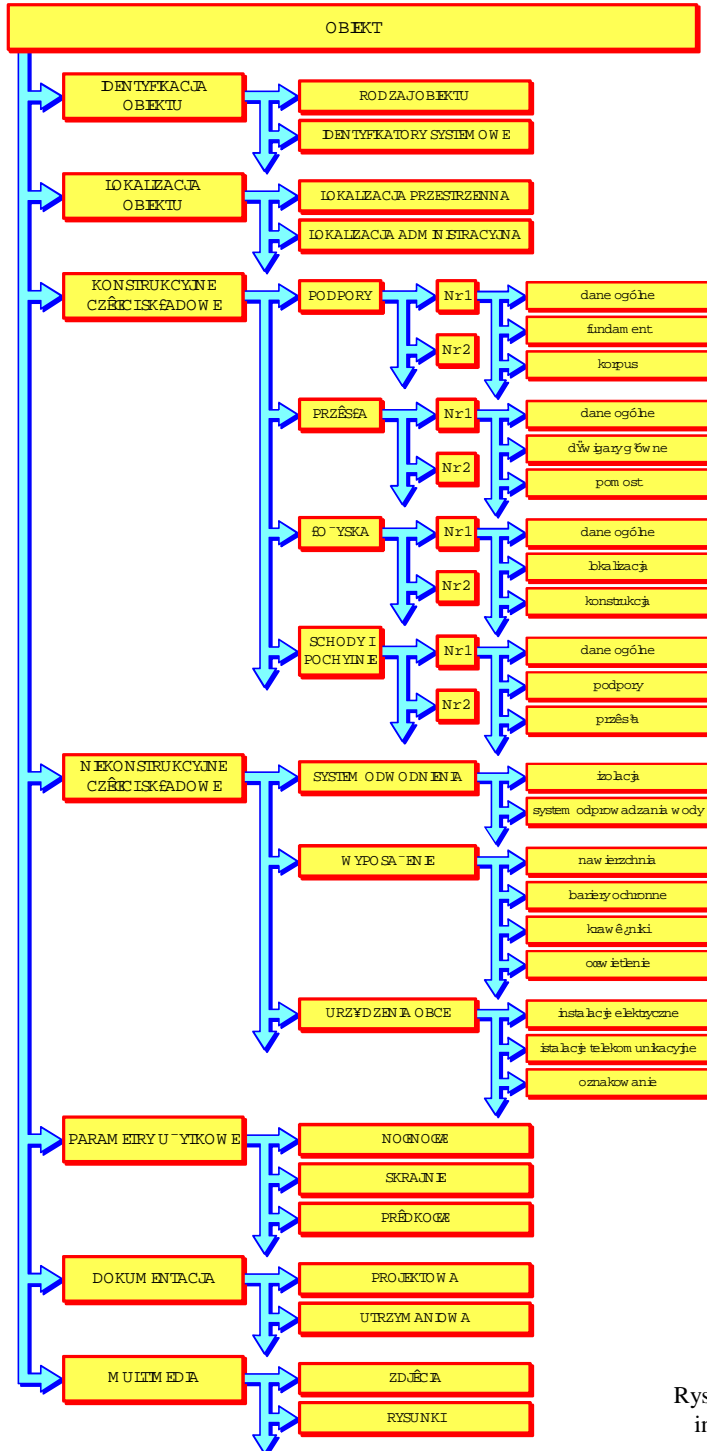
Rosnące potrzeby systemów wspomagających zarządzanie oraz szybki rozwój systemów komputerowych stwarzają warunki do stosowania w najbliższej przyszłości bardziej zaawansowanych modeli geometrii wykorzystujących elementy jedno-, dwu- lub trójwymiarowe. Niektóre rozwiązania w tym zakresie zaproponowano w dalszej części pracy.

2.3. Ewidencyjne modele obiektów mostowych

2.3.1. Struktura informacji ewidencyjnych

Podstawę każdego systemu wspomagającego gospodarowanie infrastrukturą mostową stanowią informacje ewidencyjne o zarządzanych obiektach. Szczególną cechą tej grupy informacji jest fakt, że charakteryzują się one długim okresem aktualności, a wiele z nich nie ulega zmianie przez cały okres życia obiektu. W systemach komputerowych informacje dotyczące każdego obiektu są uporządkowane w formie *ewidencyjnego modelu obiektu*, który określa ich zakres, strukturę oraz sposób numerycznego zapisu. We wszystkich praktycznie systemach można wyodrębnić następujące grupy informacji ewidencyjnych:

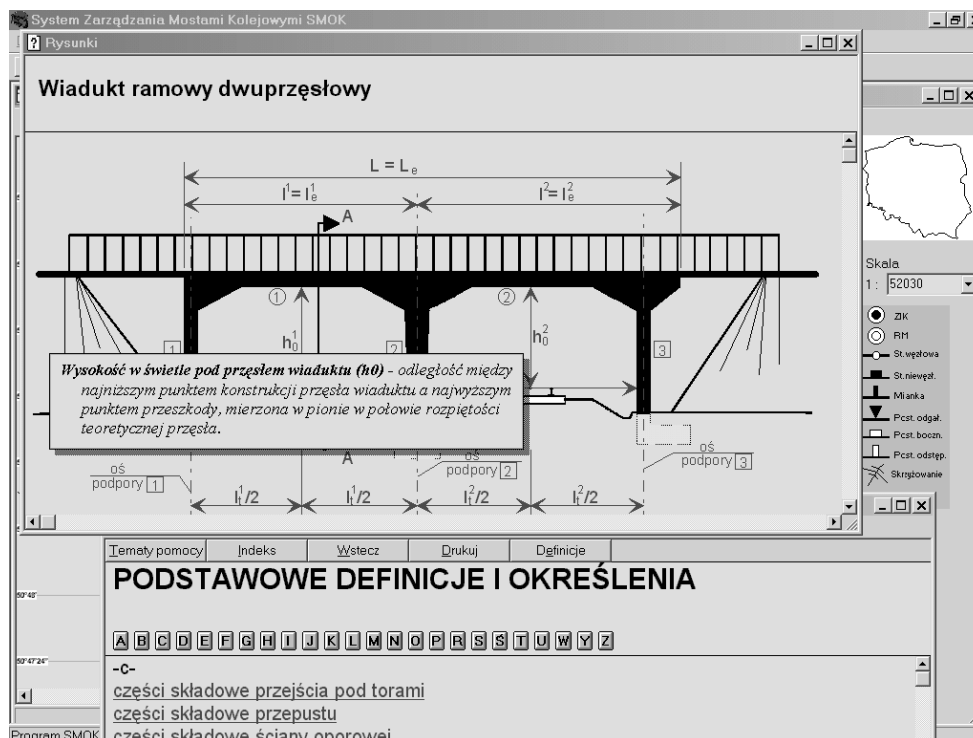
- *informacje identyfikacyjne i lokalizacyjne* określające rodzaj obiektu oraz jego usytuowanie przestrzenne zgodnie z przyjętymi układami odniesienia, a także charakteryzujące trasę komunikacyjną prowadzoną na obiekcie;
- *informacje administracyjne* dotyczące właściciela lub administratora obiektu zarządzającego jego utrzymaniem i eksploatacją, a także określające usytuowanie obiektu w strukturze administracji państwowej, regionalnej i lokalnej;



Rys. 2.6. Hierarchiczny model informacji ewidencyjnych

- *parametry techniczne konstrukcyjnych części składowych* obiektu, takich jak: podpory, przęsła, łożyska itp., określające przede wszystkim rozwiązania konstrukcyjne, geometrię oraz rodzaj materiału konstrukcyjnego każdej z wyróżnionych części składowych;
- *parametry techniczne niekonstrukcyjnych części składowych* obiektu, takich jak: system odwodnienia, wyposażenie, urządzenia obce;
- *parametry użytkowe* obejmujące informacje o nośności, skrajniach ruchu na obiekcie i pod nim, dopuszczalnych prędkościach ruchu taboru itp.;
- *informacje o przeszkodzie* lub przeszkodach, które są pokonywane przy wykorzystaniu opisywanego obiektu;
- informacje o dokumentacji związanej z obiektem.

W użytkowanych aktualnie systemach wymienione wyżej informacje są w większości kodowane jako dane alfanumeryczne, ale coraz częściej są wykorzystywane też dane typu graficznego lub ogólniej – dane multimedialne. Przykładową strukturę logiczną uporządkowanych hierarchicznie podstawowych grup danych ewidencyjnych obiektu mostowego przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.7. Narzędzia wspomagające ujednolicenie interpretacji danych ewidencyjnych obiektów mostowych [41]

W większości krajów obligatoryjny zakres danych ewidencyjnych gromadzonych w systemach wspomagających zarządzanie mostami jest określony przepisami obejmującymi całą infrastrukturę komunikacyjną państwa, np. [72], [74], [76], [268], [344]. W Polsce wymagany zakres informacji ewidencyjnych dotyczących drogowych obiektów mostowych definiują rozporządzenia [291], [293], a sposób kodowania danych precyzują opracowania związane z Systemem Gospodarki Mostowej [32], [194]. W odniesieniu do kolejowych obiektów mostowych jako powszechnie obowiązujące zostały przyjęte rozwiązania zastosowane w Systemie Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK [41].

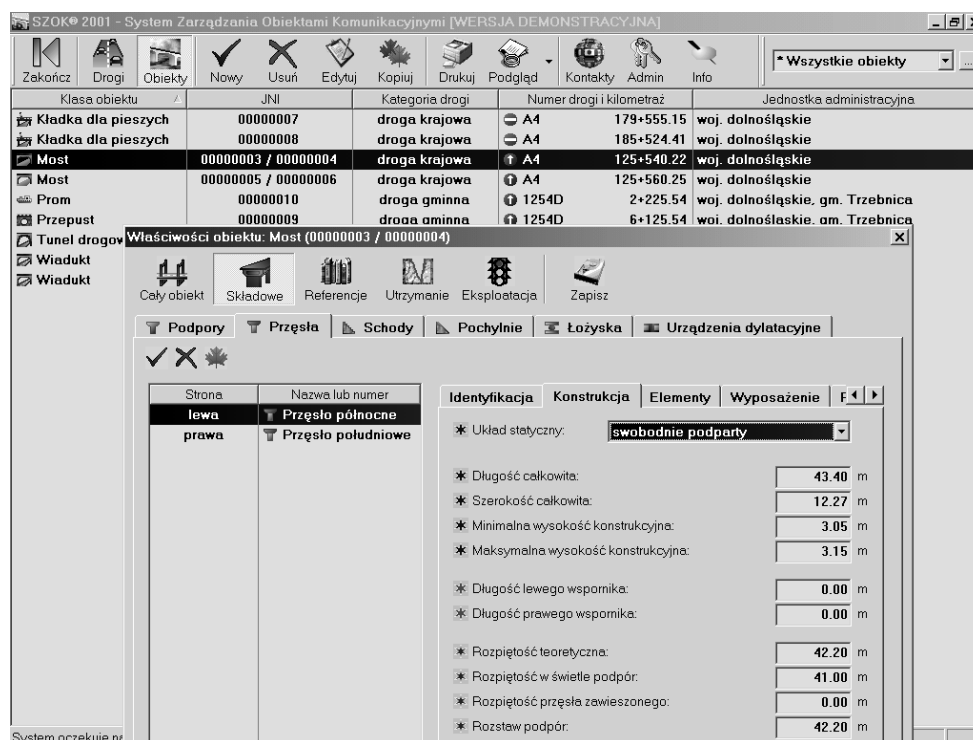
Systemowy opis ewidencyjny obiektów wymaga jednolitego, precyzyjnego zdefiniowania każdej gromadzonej w systemie danej ewidencyjnej. W tym celu wiele systemów jest wyposażanych w narzędzia wspomagające użytkowników w poprawnej interpretacji danych. Sposób określania parametrów geometrycznych może być prezentowany na przykład w formie rysunków typowych obiektów z możliwością wyświetlenia na ekranie definicji każdego określenia (rys. 2.7). Zapewnia to znaczne zwiększenie jednolitości interpretacji wprowadzanych danych. Z punktu widzenia pewności i precyzji większość informacji ewidencyjnych można, według klasyfikacji zaproponowanej w tab. 1.1, zaliczyć do klasy N_n .

2.3.2. Ewidencyjne modele obiektów a modele geometrii

Sposób przekształcenia informacji ewidencyjnych w dane ewidencyjne zależy od przyjętego modelu geometrii (patrz p. 2.2), a więc od wymaganej dokładności geometrycznego odwzorowania modelowanego obiektu. Klasa zastosowanego modelu geometrii oraz wynikająca z niego klasa modelu ewidencyjnego decydują nie tylko o sposobie numerycznej reprezentacji informacji ewidencyjnych, ale także o możliwościach modelowania pozostałych cech obiektu. Modele ewidencyjne obiektów mogą być więc klasyfikowane na podstawie modeli geometrii stosowanych przy opisie ewidencyjnym, zgodnie z systematyką przedstawioną na rys. 2.5.

Modele ewidencyjne w użytkowanych obecnie systemach wspomagających zarządzanie eksploatacją obiektów mostowych wykorzystują praktycznie wyłącznie modele geometrii typu E^0 . W modelach takich poszczególne części składowe obiektu, a także cały obiekt, są traktowane w sensie geometrycznym jako punkty, którym przyporządkowane są dane ewidencyjne. Przykład ewidencyjnego opisu przęsła mostu, w którym przyjęto model geometrii klasy (e^0, p^1) przedstawiono na rys. 2.8.

Tego typu bezwymiarowe modele nie umożliwiają precyzyjnego opisu ewidencyjnego takich cech obiektu, jak np.: sztywność elementów konstrukcyjnych, właściwości materiału, rozwiązania konstrukcyjne – w sytuacji, gdy cechy te zmieniają się w obszarze poszczególnych części składowych lub elementów. Konsekwencją stosowania bezwymiarowych modeli ewidencyjnych jest także brak możliwości przestrzennej lokalizacji stwierdzanych uszkodzeń obiektu, co często ma pierwszorzędne znaczenie dla precyzji oceny kondycji obiektu.



Rys. 2.8. Opis ewidencyjny przęsła mostu w systemie SZOK [44] – model klasy (e^0, p^1)

Zastosowanie nawet najprostszych modeli typu E^1 zasadniczo zwiększa, w porównaniu z modelami typu E^0 , jakościowe i ilościowe możliwości opisu ewidencyjnego. Optymalnym rozwiązaniem wydaje się w tej sytuacji stworzenie w systemach wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej możliwości swobodnego wyboru klasy modelu ewidencyjnego obiektu. Wykorzystywanie zaawansowanych geometrycznie modeli ewidencyjnych wymaga stosowania specjalistycznych edytorów graficznych wspomagających procesy tworzenia modeli. Jako przykład przedstawiono tu edytor modeli ewidencyjnych zaimplementowany w systemie SEZAM, opracowanym przez autora niniejszej pracy i wykorzystywanym do celów badawczo-rozwojowych oraz testowych. Tytułowy ekran tego systemu przedstawiono na rys. 2.9.

Jednym z rozwiązań testowanych w systemie SEZAM jest możliwość indywidualnego doboru modeli geometrii poszczególnych części składowych obiektu mostowego.

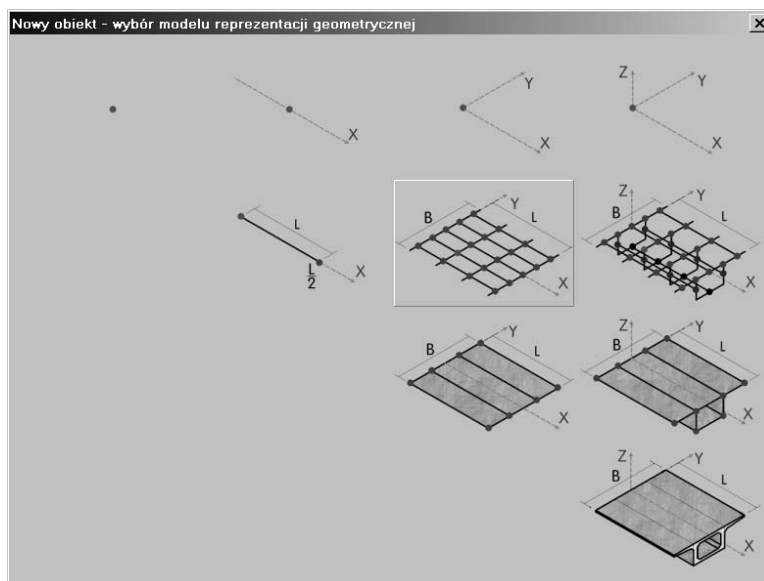


Rys. 2.9. Tytułowy ekran Systemu Zarządzania Mostami SEZAM

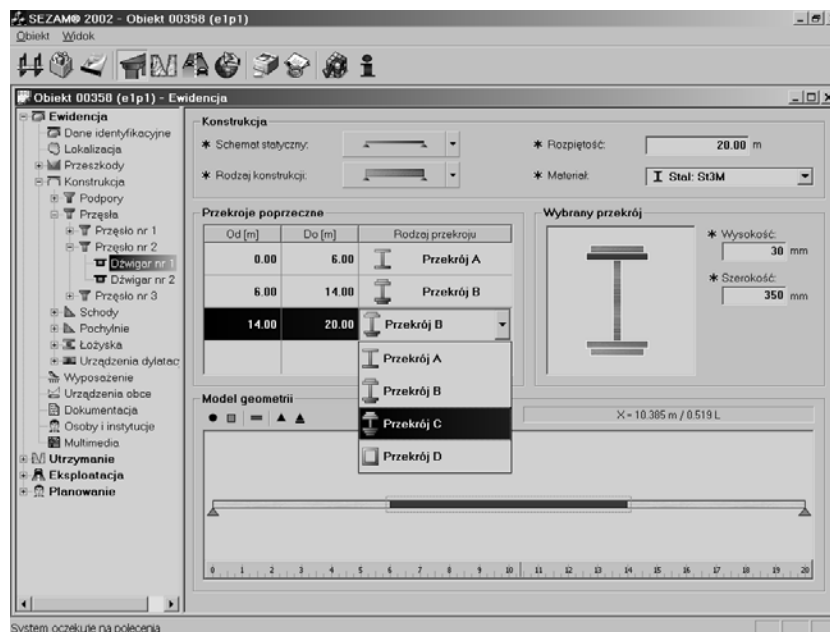
Potencjalne możliwości wyboru sposobu reprezentacji geometrii modelowanego obiektu pokazano na rys. 2.10. Dostępne klasy modeli geometrii są zgodne z systematyką przedstawioną na rys. 2.5. Konsekwencją wyboru konkretnej klasy odwzorowania geometrii jest przyjęcie sposobu definiowania modelu ewidencyjnego. W przypadku wykorzystywania modeli typu E^1 , E^2 oraz E^3 do wspomaganie opisu ewidencyjnego zastosowano specjalistyczne edytory graficzne.

Przykład tworzenia ewidencyjnego modelu klasy (e^1, p^1) blachownicowego dźwigara głównego o skokowo zmiennej sztywności przedstawia rys. 2.11. Kolejne etapy budowy modelu przy wykorzystaniu prezentowanej technologii są następujące:

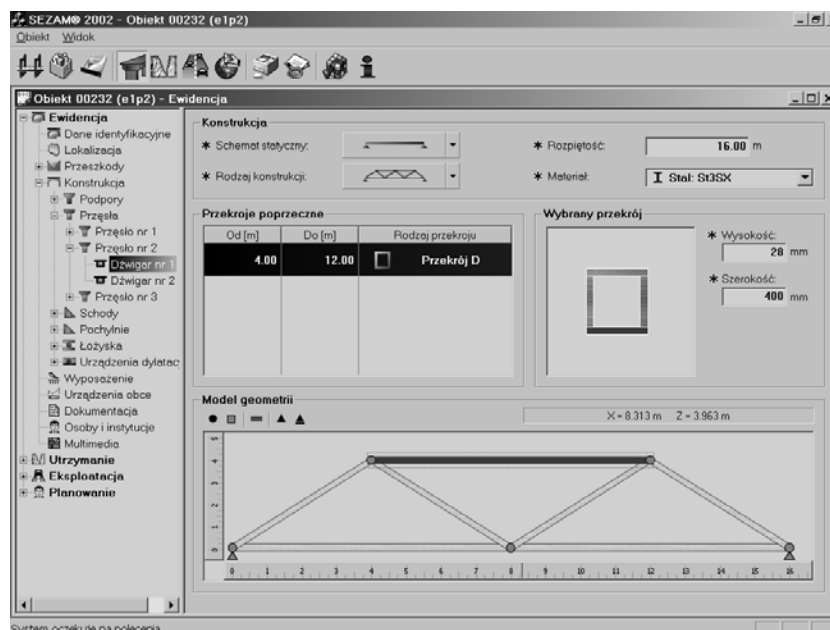
- określenie schematu statycznego modelowanego dźwigara (wybór z listy);
- określenie rodzaju konstrukcji dźwigara (wybór z listy);
- podanie rozpiętości modelowanego dźwigara;
- zdefiniowanie położenia przekrojów zmiany charakterystyk elementu (edytor graficzny);
- określenie rodzaju (kształtu) przekroju poprzecznego każdego odcinka dźwigara (wybór z listy);
- opisanie wymiarów elementów składowych przekroju poprzecznego oraz materiału konstrukcyjnego każdego odcinka dźwigara.



Rys. 2.10. Graficzny edytor modeli ewidencyjnych w systemie SEZAM
– wybór klasy modeli geometrii obiektu



Rys. 2.11. Blachownicowy dźwigar główny – tworzenie modelu ewidencyjnego klasy (e¹,p¹)
przy użyciu edytora graficznego (system SEZAM)

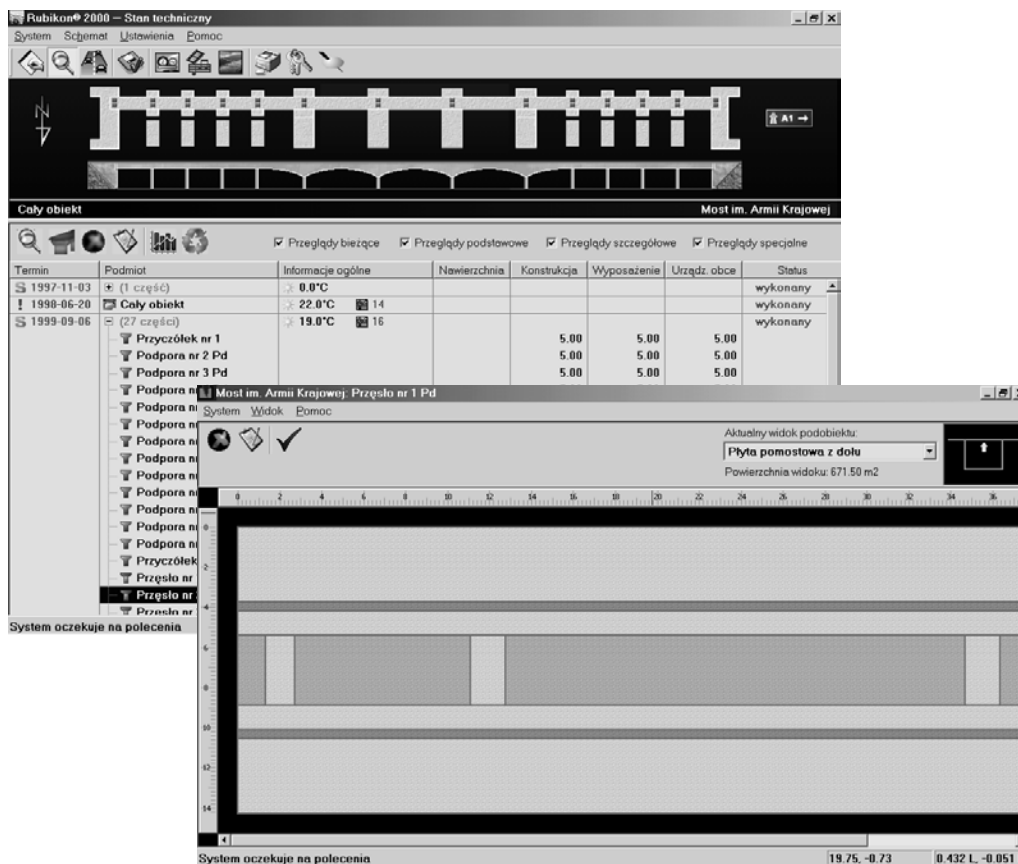


Rys. 2.12. Kratownicowy dźwigar główny – tworzenie modelu ewidencyjnego klasy (e^1, p^2) w systemie SEZAM

Przykład modelowania dźwigara kratowniczowego przy wykorzystaniu tego samego edytora graficznego przedstawia rys. 2.12. Ogólny schemat tworzenia modelu jest analogiczny do procedury stosowanej w przypadku dźwigara pełnościennego. Jediną różnicą jest zastąpienie etapu określania położenia przekrojów, w których zmieniają się charakterystyki elementu, definiowaniem położenia węzłów dźwigara kratowniczowego. Ostatecznie uzyskuje się model ewidencyjny klasy (e^1, p^2) opisujący zarówno geometrię całego dźwigara, jak i ukształtowanie przekroju poprzecznego każdego składowego elementu (pręta) kratownicy.

Prezentowana testowa wersja edytora modeli ewidencyjnych umożliwia proste i szybkie generowanie modeli wykorzystujących elementy bezwymiarowe (e^0) oraz jednowymiarowe (e^1) w przestrzeni jednowymiarowej (p^1) lub dwuwymiarowej (p^2) . Dotychczasowe doświadczenia potwierdzają dużą efektywność i praktyczną przydatność przedstawionego narzędzia.

W szczególnych przypadkach celowe może okazać się stosowanie jeszcze bardziej zaawansowanych modeli ewidencyjnych wykorzystujących elementy dwuwymiarowe (e^2) lub nawet trójwymiarowe (e^3) . Rozwiązanie takie zastosowano na przykład w systemie RUBIKON [31] wspomagającym długookresowe monitorowanie kondycji obiektu mostowego. Do ewidencyjnego opisu konstrukcji obiektu zastosowano tu model geometrii klasy (e^2, p^3) .



Rys. 2.13. Opis ewidencyjny mostu przy wykorzystaniu modelu geometrii klasy (e^2, p^3) – widok dolnej powierzchni płyty pomostowej [31]

Na rysunku 2.13 pokazano sposób wizualizacji całego mostu oraz widok dolnej powierzchni płyty pomostowej w jednym z przęseł. Zastosowany edytor graficzny umożliwia prezentację dowolnego widoku (z góry, z dołu, z boku) każdej części składowej obiektu. Prezentowany model ewidencyjny wymaga indywidualnego przygotowania, ale gwarantuje dużą precyzję odwzorowania geometrii.

3. MODELOWANIE USZKODZEŃ OBIEKTÓW MOSTOWYCH

3.1. Wprowadzenie

Terminem *uszkodzenia* są w niniejszej pracy określane *efekty powodujące pogorszenie parametrów technicznych, a w rezultacie stanu technicznego obiektu mostowego w stosunku do stanu zaprojektowanego*. Przyczynami uszkodzeń mogą być czynniki zewnętrzne, takie jak obciążenia, oddziaływania środowiska itp., a także czynniki wewnętrzne, jak na przykład procesy reologiczne zachodzące w materiale konstrukcji.

Uszkodzenia mogą być jednoznacznie scharakteryzowane przez następujące cztery podstawowe cechy:

- 1) *charakter uszkodzenia* – przedstawiający jakościową specyfikę uszkodzenia;
- 2) *intensywność uszkodzenia* – opisującą poziom zaawansowania uszkodzenia;
- 3) *rozległość uszkodzenia* – charakteryzującą wielkość obszaru występowania uszkodzenia;
- 4) *lokalizację uszkodzenia* – podającą przestrzenne usytuowanie uszkodzenia.

Numeryczny zapis tych parametrów tworzy *numeryczny model uszkodzenia*.

Sposoby numerycznego opisu uszkodzeń w użytkowanych obecnie systemach wspomagających eksploatację obiektów mostowych są bardzo zróżnicowane. Porównanie rozwiązań stosowanych w kilkunastu wybranych dużych systemach przedstawiono w tab. 3.1. W zakresie *klasyfikacji i identyfikacji* uszkodzeń można wyróżnić następujące metody:

- stosowanie *tekstowego, niesformalizowanego opisu* charakteru uszkodzeń wykorzystującego wiedzę i doświadczenie osoby dokonującej oceny; sugestie mające na celu ujednoczenie opisów są zazwyczaj zawarte w materiałach szkoleniowych i instrukcjach związanych z systemem, np. [76], [189];
- dokonywanie klasyfikacji uszkodzeń na podstawie *sformalizowanej listy* odzwierciedlającej systematykę uszkodzeń przyjętą w całym systemie, np. [77], [91], [138], [235], [288], [344];
- wprowadzenie *zdefiniowanych z góry kombinacji uszkodzeń* odwzorowujących podstawowe procesy (mechanizmy) degradacji zamiast opisu poszczególnych rodzajów uszkodzeń; typowe kombinacje uszkodzeń są w takim rozwiązaniu

skojarzone z poszczególnymi rodzajami elementów obiektu, z uwzględnieniem typu rozwiązania konstrukcyjnego oraz materiału, np. [148], [210], [322], [341].

Tab. 3.1. Metody opisu uszkodzeń w wybranych systemach zarządzania obiektami mostowymi

Lp.	Rodzaj systemu	Identyfikacja uszkodzeń			Intensywność uszkodzeń			Rozległość uszkodzeń			Lokalizacja uszkodzeń		
		opis tekstowy	wybór z listy	predefiniowane kombinacje	opis jakościowy	opis ilościowy dyskretny	opis ilościowy ciągły	opis jakościowy	opis ilościowy dyskretny	opis ilościowy ciągły	opis tekstowy	grupa części składowych	część składowa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.	System zarządzania mostami drogowymi (Wielka Brytania) – [1], [67], [71], [102], [344]		✓		✓				✓		✓		
2.	System zarządzania mostami drogowymi (USA) – [3], [72], [75], [93], [302], [348]		✓		✓			✓				✓	
3.	System zarządzania mostami drogowymi SIHA (Finlandia) – [66], [69], [74], [320], [322]			✓		✓				✓			✓
4.	System zarządzania mostami drogowymi DANBRO (Dania) – [6], [76], [87], [203]	✓			✓			✓				✓	
5.	System zarządzania mostami drogowymi SAFE (Szwecja) – [68], [77], [206]		✓				✓		✓				✓
6.	System zarządzania mostami kolejowymi (Francja) – [91]		✓			✓			✓				✓
7.	System zarządzania mostami drogowymi PONTIS (USA) – [64], [268], [339], [341], [342]			✓		✓				✓			✓
8.	System zarządzania mostami drogowymi BRIDGIT (USA) – [146], [147], [148]			✓		✓				✓			✓
9.	System zarządzania miejskimi mostami drogowymi (Kanada) – [189]	✓			✓			✓					✓
10.	System zarządzania mostami drogowymi OBMS (Kanada) – [340]			✓		✓				✓			✓

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
11.	System zarządzania mostami drogowymi KUBA-MS (Szwajcaria) – [104], [210]			✓		✓				✓			✓
12.	System zarządzania mostami kolejowymi BRÜCKEN-CONTROL (Niemcy) – [138]		✓			✓			✓				✓
13.	System zarządzania mostami drogowymi (Francja) – [288]		✓			✓			✓			✓	
14.	System zarządzania mostami drogowymi SGM (Polska) – [32], [235], [363]		✓									✓	
15.	System zarządzania mostami kolejowymi SMOK (Polska) – [25], [35], [50]		✓				✓			✓			✓

Najczęściej stosowane sposoby opisu *intensywności* uszkodzeń to:

- *opis jakościowy* charakteryzujący zaawansowanie uszkodzenia w formie tekstowej; można wyróżnić dwie odmiany tej metody: niesformalizowany opis tekstowy z wykorzystaniem zaleceń podanych w opisie systemu, np. [72], [76] oraz wykorzystywanie sformalizowanego opisu jakościowego definiującego klasy (poziomy) intensywności uszkodzeń, np. [344];
- *dyskretny opis ilościowy*, w którym klasy (poziomy) intensywności uszkodzeń są zdefiniowane przy wykorzystaniu miar ilościowych, np. [91], [148]; definicje poszczególnych przedziałów intensywności uszkodzeń są często dodatkowo wspomagane jakościową charakterystyką zaawansowania uszkodzeń [267], [322];
- *opis ilościowy*, bez definiowania przedziałów intensywności uszkodzeń, umożliwiające określanie zaawansowania uszkodzenia przy użyciu metodyki i jednostek miar przyjętych w systemie; miary intensywności uszkodzeń są z reguły zindywidualizowane dla poszczególnych rodzajów uszkodzeń, np. [77].

Sposoby opisu *rozległości* uszkodzeń można podzielić na następujące grupy:

- *opis jakościowy*, najczęściej jako niesformalizowany opis tekstowy, charakteryzujący wielkość obszaru objętego uszkodzeniem, np. [72], [189]; w niektórych systemach zasady jakościowego opisu rozległości uszkodzeń są ujednolicone, np. [76];
- *opis ilościowy o charakterze dyskretnym* ze zdefiniowaniem określonych ilościowo przedziałów rozległości uszkodzeń, np. [91];
- *opis ilościowy bez dyskretyzacji* na poszczególne przedziały, w którym rozległość uszkodzeń jest określana zgodnie z przyjętą w systemie miarą

rozległości, np. [148], [267]; miary te mogą być zróżnicowane dla poszczególnych rodzajów uszkodzeń, np. [77], [322].

Lokalizacja uszkodzeń w większości systemów jest definiowana z dokładnością do podstawowych części składowych obiektu, a więc rozróżniane są uszkodzenia podpory *i*, dźwigarów głównych przęsła *j* itd. W niektórych systemach, np. [203], [235], lokalizacja uszkodzeń jest mniej szczegółowa i polega na wskazaniu grup części składowych, np. podpory, dźwigary główne przęsła, których dotyczą opisywane uszkodzenia. W nielicznych przypadkach stosowany jest niesformalizowany opis tekstowy określający lokalizację uszkodzenia, np. [1].

Podsumowując przedstawione wyniki analizy, można wyróżnić – z uwagi na sposób modelowania uszkodzeń – cztery podstawowe grupy komputerowych systemów wspomagających gospodarowanie infrastrukturą mostową:

- systemy, w których nie są tworzone numeryczne modele uszkodzeń, a gromadzone są jedynie oceny stanu technicznego obiektów wynikające z jakościowej charakterystyki stwierdzonych uszkodzeń, np. [72], [138], [189], [203], [235];
- systemy, w których budowane są jakościowe modele uszkodzeń wykorzystywane jako informacje uzupełniające ocenę stanu technicznego, np. [71];
- systemy wykorzystujące modele uszkodzeń, które zawierają jakościowe (rodzaj) oraz ilościowe (intensywność, rozległość, lokalizacja) dane o uszkodzeniach, stanowiące informacje wykorzystywane przy formułowaniu ocen stanu obiektu przez osoby dokonujące tych ocen, np. [77], [91];
- systemy, w których są wykorzystywane predefiniowane modele mechanizmów degradacji złożone z uszkodzeń różnych typów, a oceny kondycji obiektów wynikają z kryteriów wykorzystujących ilościowe i jakościowe miary uszkodzeń zawarte w modelach, np. [104], [148], [322], [341].

W przedstawionych wyżej rozwiązaniach modele uszkodzeń są tworzone na podstawie dość ogólnych zasad pozostawiających znaczny margines swobody w zakresie numerycznego opisu stwierdzonych uszkodzeń. W większości systemów wspomagających gospodarowanie infrastrukturą mostową modele uszkodzeń pełnią pomocniczą rolę nośnika informacji o pogorszeniu parametrów technicznych obiektu. Informacje zawarte w modelu uszkodzeń są następnie transponowane na oceny kondycji obiektu przy wykorzystaniu indywidualnego zasobu wiedzy osoby dokonującej oceny. Podejście takie powoduje dość dużą dowolność zarówno w trakcie opisu uszkodzeń, jak i w interpretacji stworzonego modelu uszkodzeń, co w efekcie wpływa na znaczną subiektywność finalnych ocen stanu obiektu. Prowadzi to często do bardzo dużych rozbieżności w ocenach tej samej sytuacji dokonywanych przez różne osoby. Są to zjawiska bardzo niekorzystne z punktu widzenia spójności i porównywalności danych gromadzonych w systemie, a także z punktu widzenia racjonalności decyzji podejmowanych na ich podstawie.

W ostatnich latach w kilku dużych systemach wspomagających gospodarowanie obiektami mostowymi (np. [104], [148], [322], [341]) zamiast opisu poszczególnych typów stwierdzonych uszkodzeń zastosowano metodę klasyfikacji stanu uszkodzeń elementów obiektu według skali ocen opracowanej na podstawie najczęściej spotykanych mechanizmów rozwoju uszkodzeń. Zindywidualizowane skale są z góry określone (predefiniowane) w systemie dla poszczególnych typów elementów klasyfikowanych na podstawie rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Głównym celem takiego podejścia jest zobjektywizowanie gromadzonych w systemie informacji o kondycji obiektu. Jako przykład omawianego podejścia przedstawiono sposoby definiowania poziomów uszkodzeń płyty pomostowej z betonu zbrojonego stosowane w amerykańskim systemie BRIDGIT (tab. 3.2) oraz w fińskim systemie SIHA (tab. 3.3).

Tab. 3.2. Poziomy uszkodzeń płyty pomostowej z betonu zbrojonego w systemie BRIDGIT (USA) – [148]

Poziom uszkodzeń	Opis uszkodzeń
1	Powierzchnia płyty bez śladów materiału lub rozwarstwień oraz bez znaczących rys.
2	Nieznaczna destrukcja powierzchni betonu. Ubytki materiału lub rozwarstwienia o głębokości mniejszej niż 2,5 cm i rozległości mniejszej niż 15 cm w każdym kierunku. Dopuszczalne nieznaczne zarysowania.
3	Średnio zaawansowana destrukcja materiału. Lokalne ubytki materiału lub rozwarstwienia o głębokości od 2,5 cm do 5 cm i o rozległości od 15 cm do 60 cm w każdym kierunku. Możliwa korozja zbrojenia z lokalnymi ubytkami materiału. Mogą występować wyraźne zarysowania, nie wpływające jednak znacząco na nośność elementu oraz całego obiektu.
4	Zaawansowana powierzchniowa destrukcja betonu. Ubytki materiału lub rozwarstwienia o głębokości większej niż 5 cm i/lub rozległości większej niż 60 cm w każdym kierunku. Zarysowania, korozja zbrojenia i/lub ubytki materiału powodują konieczność analizy nośności elementu i całego obiektu.

Modelowanie uszkodzeń poprzez określanie zaawansowania zdefiniowanego wcześniej procesu degradacji ma kilka wad, spośród których należy wymienić przede wszystkim:

- trudności w klasyfikacji stanu elementu, gdy jego uszkodzenia nie spełniają wszystkich warunków określonych w definicjach skali ocen;
- brak możliwości wykorzystywania skali w przypadku wystąpienia innych typów lub innych kombinacji uszkodzeń niż przyjęte w definicjach;
- utrudnione monitorowanie przebiegu procesów degradacji o scenariuszach innych niż zdefiniowane w systemie.

Tab. 3.3. Poziomy uszkodzeń płyty pomostowej z betonu zbrojonego w systemie SIHA (Finlandia) – [322]

Poziom uszkodzeń	Opis uszkodzeń
1	Na powierzchni betonu widoczne rysy o układzie nieregularnym; destrukcja zaprawy cementowej na powierzchni elementu, ale bez odsłonięcia ziarn kruszywa.
2	Głębokość destrukcji betonu: 0 – 10 mm; widoczne ziarna kruszywa.
3	Głębokość destrukcji betonu: 0 – 20 mm; ubytki zaprawy cementowej pomiędzy ziarnami kruszywa.
4	Głębokość destrukcji betonu przekracza 20 mm; luźne ziarna kruszywa z możliwością odsłonięcia prętów zbrojenia.

Zaproponowany w niniejszej pracy sposób numerycznego modelowania uszkodzeń różni się istotnie od rozwiązań stosowanych w obecnie użytkowanych systemach wspomagających eksploatację obiektów mostowych. Zasadniczą nowością jest tu próba wprowadzenia jednolitej metodyki numerycznego opisu wszystkich identyfikowanych w systemie uszkodzeń, a następnie zastosowania modelu uszkodzeń jako podstawy generowania ocen stanu technicznego przy wykorzystaniu specjalistycznej wiedzy zgromadzonej w systemie komputerowym i udostępnianej przy użyciu narzędzi ekspertowych. Głównymi celami proponowanego rozwiązania są:

- wprowadzenie jednolitej systematyki i zasad identyfikacji uszkodzeń wszystkich rodzajów obiektów mostowych, z uwzględnieniem specyfiki różnych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych;
- opracowanie sposobów modelowania uszkodzeń nadających się do stosowania przy różnych typach modeli geometrii obiektów;
- ujednoczenie procedury numerycznego opisu intensywności, rozległości i lokalizacji wszystkich typów uszkodzeń definiowanych w systemie;
- zapewnienie możliwości wykorzystywania informacji rozmytych (nieprecyzyjnych, niepełnych) do opisu uszkodzeń obiektów;
- zastosowanie ciągłego opisu intensywności i rozległości uszkodzeń (bez stosowania przedziałów wartości), co umożliwia systematyczne monitorowanie zmian kondycji obiektu;
- zapewnienie możliwości opisu dowolnych kombinacji uszkodzeń;
- umożliwienie niezależnego śledzenia procesów degradacji związanych z każdym identyfikowanym w systemie typem uszkodzeń;
- umożliwienie zastosowania funkcji ekspertowych wykorzystujących numeryczne modele uszkodzeń oraz wiedzę gromadzoną w systemie do obiektywizacji ocen kondycji obiektów.

Dla osiągnięcia przedstawionych celów niezbędne jest rozwiązanie dwóch podstawowych zagadnień:

- jednoznacznej *identyfikacji uszkodzeń* na podstawie jednolitego sposobu ich klasyfikacji w całym systemie;
- efektywnej *numerycznej reprezentacji uszkodzeń* w systemie komputerowym, stosownie do użytego modelu geometrii obiektu, z zapewnieniem możliwości wykorzystania przyjętego modelu uszkodzeń do kompleksowej oceny kondycji obiektu.

3.2. Systematyka uszkodzeń

3.2.1. Kryteria klasyfikacji uszkodzeń

Fundamentalnym elementem modelu uszkodzeń we wspomaganym komputerowo systemie gospodarowania obiektami mostowymi są jednolite zasady klasyfikacji uszkodzeń. Zagadnienie to ma szczególne znaczenie w dużych systemach, w których identyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń dokonuje znaczna liczba niezależnie działających użytkowników. Obszar zastosowań stawia przed systematyką uszkodzeń specyficzne wymagania, wśród których za podstawowe można uznać:

- *jednoznaczność* kryteriów oraz zasad klasyfikacji gwarantującą jednakowy sposób identyfikacji uszkodzeń przez wszystkich użytkowników systemu;
- *uniwersalność* zastosowań przyjętych rozwiązań w odniesieniu do wszystkich typów obiektów mostowych, rodzajów konstrukcji i materiałów, przy dowolnych modelach geometrii obiektów;
- *jednolitość* zasad klasyfikacji uszkodzeń konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych części składowych obiektów mostowych;
- *komplementarność* gwarantującą możliwość jednoznacznego opisu każdego złożonego stanu uszkodzeń poprzez kombinację podstawowych uszkodzeń zdefiniowanych w systemie;
- *otwartość* systemu klasyfikacji umożliwiającą jego łatwą rozbudowę i modyfikację;
- *elastyczność* oznaczającą możliwość dostosowywania precyzji identyfikacji uszkodzeń do szczególności modelowania innych cech obiektów;
- *dostosowanie* zasad klasyfikacji uszkodzeń do metod ich identyfikacji w trakcie przeglądów obiektów.

Po szczegółowym przeanalizowaniu metod klasyfikacji uszkodzeń stosowanych we wspomaganym komputerowo systemach gospodarowania mostami (m.in. [74], [75], [76], [77], [91], [235], [268], [344]) stwierdzono, że żadne z rozpatrywanych rozwiązań nie spełnia wszystkich sformułowanych wyżej wymagań. W związku z powyższym zaproponowano własną systematykę uszkodzeń wszystkich typów obiektów na potrzeby numerycznych modeli uszkodzeń wykorzystywanych

w zarządzaniu infrastrukturą mostową. W trakcie prac nad tym zagadnieniem przeanalizowano wiele rozwiązań, prezentowanych między innymi w publikacjach: [8], [57], [59], [60], [61], [62], [82], [90], [91], [105], [107], [112], [120], [149], [151], [167], [199], [200], [212], [235], [248], [299], [323], [331], [372].

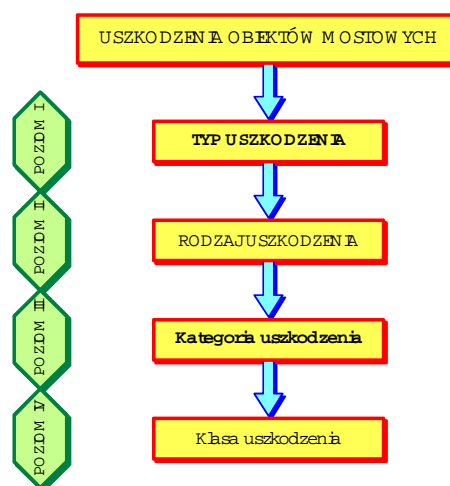
Zasadniczym problemem tworzenia każdego systemu klasyfikującego jest określenie kryterium klasyfikacji. Kryteria stosowane zazwyczaj przy formułowaniu zasad systematyki uszkodzeń obiektów mostowych można podzielić na trzy grupy:

- *kryteria przyczynowe* – związane z przyczyną lub przyczynami uszkodzenia,
- *kryteria skutkowe* – dotyczące skutków (efektów) uszkodzenia,
- *kryteria przyczynowo-skutkowe* – starające się łączyć przyczyny i skutki uszkodzeń jako podstawę ich klasyfikacji.

Przyczyny spotykanych w praktyce uszkodzeń obiektów inżynierskich często nie są ewidentne lub też stwierdzane uszkodzenia mają więcej niż jedną przyczynę, a więc kryteria przyczynowe nie gwarantują właściwej podstawy jednoznacznej klasyfikacji. Z tych samych powodów trudne okazuje się stworzenie jednolitego systemu klasyfikacji uszkodzeń wykorzystującego hybrydowe kryteria przyczynowo-skutkowe. W rezultacie najbardziej racjonalne wydaje się przyjęcie *skutków* stwierdzanych uszkodzeń jako kryterium ich klasyfikacji. Rozwiązanie takie zastosowano w niniejszej pracy.

W proponowanej systematyce przyjęto hierarchiczne uporządkowanie uszkodzeń z wyróżnieniem następujących czterech poziomów klasyfikacji (rys. 3.1):

- poziom I: typ uszkodzenia;
- poziom II: rodzaj uszkodzenia;
- poziom III: kategoria uszkodzenia;
- poziom IV: klasa uszkodzenia.



Rys. 3.1. Hierarchiczny system klasyfikacji uszkodzeń obiektów mostowych

Na najwyższym poziomie klasyfikacyjnym wyróżniono osiem podstawowych typów uszkodzeń, przyjmując ich następujące definicje:

- 1) *deformacje* – uszkodzenia polegające na niezgodnych z projektem zmianach geometrii, powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów obiektu lub jego części;
- 2) *destrukcja materiału* – uszkodzenia polegające na pogorszeniu wartości cech fizyko-chemicznych materiału w stosunku do wartości projektowanych;
- 3) *utrata ciągłości materiału* – uszkodzenia polegające na niezgodnym z projektem przerwaniu ciągłości materiału konstrukcji;
- 4) *ubytki materiału* – uszkodzenia *polegające* na zmniejszeniu ilości materiału konstrukcji w stosunku do ilości zaprojektowanej;
- 5) *uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych* – *uszkodzenia* polegające na częściowej lub całkowitej dysfunkcji powłok zabezpieczających materiał konstrukcji;
- 6) *uszkodzenia związane ze zmianą położenia* – *uszkodzenia* polegające na niezgodnych z projektem przemieszczeniach obiektu lub jego części, przy którym wzajemne odległości wszystkich punktów przemieszczonej konstrukcji (lub elementu konstrukcji) nie ulegają zmianie; do tego typu uszkodzeń zaliczane są także niezgodne z projektem ograniczenia możliwości przemieszczeń;
- 7) *zanieczyszczenia* – uszkodzenia polegające na *występowaniu* wszelkiego rodzaju zabrudzeń, a także na nieprzewidzianej w projekcie wegetacji roślin na obiekcie;
- 8) *awarie* – uszkodzenia powodujące utratę *przydatności* użytkowej obiektu lub jego części.

Podział uszkodzeń na typy ma charakter uniwersalny, to znaczy pozwala na jednoznaczne kwalifikowanie uszkodzeń niezależnie od rodzaju elementu, rozwiązania konstrukcyjnego czy materiału. Prezentowana systematyka uszkodzeń może być stosowana przy dowolnym modelu geometrii obiektu, a jej hierarchiczna struktura umożliwia dostosowanie szczegółowości identyfikacji uszkodzeń do precyzji modelowania innych cech obiektu.

3.2.2. Podstawowe typy uszkodzeń

Klasyfikację najczęściej spotykanych uszkodzeń obiektów mostowych, z podziałem na typy, rodzaje i kategorie, przedstawiono w tab. 3.4. Wyróżniono tu siedem podstawowych typów uszkodzeń, a kolejne – coraz bardziej szczegółowe – poziomy klasyfikacyjne są dla poszczególnych typów uszkodzeń zróżnicowane ze względu na rodzaj materiału konstrukcyjnego czy też charakter uszkodzeń. Przedstawiona systematyka uszkodzeń może być stosowana do opisu stanu zarówno konstrukcyjnych, jak i niekonstrukcyjnych części składowych obiektów. Poszczególne typy uszkodzeń scharakteryzowano poniżej.

Deformacje są to niezgodne z projektem zmiany geometrii (odkształcenia) konstrukcji powodujące zmiany wzajemnych odległości jej punktów, zachodzące bez zmiany położenia całej konstrukcji lub jej części. Można wyróżnić dwa rodzaje uszkodzeń tego typu: deformacje o charakterze *trwałym* (np. wygięcie elementu dźwigara w wyniku uderzenia pojazdu) oraz deformacje o charakterze *nietrwałym* (np. nadmierne ugięcia dźwigarów pod obciążeniami użytkowymi). Do najczęściej spotykanych kategorii uszkodzeń zaliczanych do tego typu należą trwałe wygięcia lub skręcenia elementów konstrukcyjnych.

Destrukcja materiału to typ uszkodzeń polegających na pogorszeniu wartości cech fizyko-chemicznych materiału konstrukcyjnego w stosunku do wartości zaprojektowanych. Podstawowe rodzaje tego typu uszkodzeń to:

- zmiany cech fizycznych,
- zmiany cech chemicznych.

Tab. 3.4. Klasyfikacja najczęstszych uszkodzeń obiektów mostowych

Typ uszkodzenia	Rodzaj uszkodzenia	Kategoria uszkodzenia
1	2	3
DEFORMACJE	trwałe	wygięcie
		skręcenie
		zmiana wymiarów
	nietrwałe	wygięcie
		skręcenie
		zmiana wymiarów
DESTRUKCJA MATERIAŁU	zmiany cech fizycznych	obniżenie wytrzymałości
		obniżenie mrozoodporności
		podwyższenie nasiąkliwości
	zmiany cech chemicznych	zwiększenie stężenia jonów wodorowych
		zwiększenie stężenia chlorków
		zwiększenie stężenia siarczanów
		zwiększenie stężenia azotanów
UTRATA CIĄGŁOŚCI MATERIAŁU	rysy	prostopadłe do głównego kierunku pracy elementu
		równoległe do głównego kierunku pracy elementu
		ukośne do głównego kierunku pracy elementu
		nieregularne
		w strefach obciążeń skupionych
	pęknięcia	prostopadłe do głównego kierunku pracy elementu
		równoległe do głównego kierunku pracy elementu
		ukośne do głównego kierunku pracy elementu
		nieregularne
		w strefach obciążeń skupionych

1	2	3
UBYTKI MATERIAŁU (u)	ubytki materiału konstrukcji z betonu	ubytki betonu konstrukcyjnego
		ubytki materiału zbrojenia głównego
		ubytki materiału zbrojenia pomocniczego
		ubytki materiału cięgien sprężających
	ubytki materiału konstrukcji stalowych	ubytki materiału elementów ze stali konstrukcyjnej
		ubytki materiału cięgien
	ubytki materiału konstrukcji murowanych	ubytki cegieł
		ubytki kamienia
		ubytki wypełnienia spoin
USZKODZENIA ZABEZPIECZEŃ ANTYKOROZYJNYCH (a)	uszkodzenia strukturalne	utrata szczelności
		ubytek powłoki zabezpieczającej
	zmiany cech fizycznych	obniżenie przyczepności
		obniżenie wytrzymałości
		obniżenie mrozoodporności
		obniżenie nasiąkliwości
	zmiany cech chemicznych	zwiększenie stężenia jonów wodorowych
		zwiększenie stężenia chlorków
		zwiększenie stężenia siarczanów
		zwiększenie stężenia azotanów
USZKODZENIA ZWIĄZANE ZE ZMIANĄ POŁOŻENIA (p)	nadmierne przemieszczenia	przesunięcie
		obrót
	ograniczenie przemieszczeń	przesunięcie
		obrót
ZANIECZYSZCZENIA (z)	zabrudzenia	w wyniku działania środowiska
		w wyniku działania ludzi
	wegetacja roślin	powierzchniowa
		penetrująca

Bardziej szczegółowa klasyfikacja zależy tu w decydującym stopniu od rodzaju materiału. W przypadku konstrukcji z betonu, cegły i kamienia jedną z najważniejszych kategorii są uszkodzenia powodujące obniżenie wytrzymałości materiału. Inne często spotykane kategorie uszkodzeń wymienionych wyżej materiałów to: zaniżona mrozoodporność, zwiększona nasiąkliwość, karbonatyzacja betonu, zanieczyszczenia szkodliwymi związkami chemicznymi. W konstrukcjach stalowych ten typ uszkodzeń jest najczęściej związany z obniżeniem wytrzymałości materiału w wyniku zmęczenia.

Kolejny typ uszkodzeń to *utrata ciągłości materiału*. Wyróżniono tu dwa podstawowe rodzaje uszkodzeń;

- rysy – które mogą być zdefiniowane jako uszkodzenia polegające na utracie ciągłości materiału konstrukcyjnego na części przekroju elementu;

- *pęknięcia* – polegające na utracie ciągłości materiału konstrukcyjnego na całej powierzchni przekroju elementu.

Pęknięcie jest w istocie szczególnym przypadkiem rysy obejmującej całą powierzchnię przekroju elementu, ale z uwagi na różne konsekwencje wystąpienia tych dwóch rodzajów uszkodzeń dla oceny kondycji obiektu zdecydowano się na ich rozróżnienie w systemie klasyfikacji. Dla obu rodzajów uszkodzeń zaproponowano podział na kategorie w zależności od orientacji rysy lub pęknięcia względem głównego kierunku pracy ocenianego elementu, a mianowicie:

- rysy (pęknięcia) prostopadłe do głównego kierunku pracy elementu, czyli usytuowane pod kątem $90^\circ (\pm 10^\circ)$ do podłużnej osi elementu,
- rysy (pęknięcia) równoległe (z dokładnością $\pm 10^\circ$) do głównego kierunku pracy elementu,
- rysy (pęknięcia) ukośne względem głównego kierunku pracy elementu, czyli usytuowane pod kątem od 10° do 90° w stosunku do podłużnej osi elementu,
- rysy (pęknięcia) o układzie nieregularnym,
- rysy (pęknięcia) w strefach obciążeń skupionych (np. w strefach zakotwień cięgien lub w pobliżu łożysk).

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w proponowanej systematyce utrata ciągłości betonu na całej powierzchni przekroju elementu z betonu zbrojonego nie powoduje zakwalifikowania uszkodzenia jako *pęknięcia*, jeżeli została zachowana ciągłość zbrojenia. Uszkodzenie takie jest klasyfikowane jako *rysa*.

Ubytki materiału to uszkodzenia polegające na zmniejszeniu pola powierzchni przekroju elementu w stosunku do wielkości zaprojektowanej. Bardziej szczegółowa klasyfikacja uszkodzeń tego typu jest zróżnicowana dla poszczególnych materiałów konstrukcyjnych. Na przykład dla konstrukcji z betonu sprężonego jako oddzielne kategorie uszkodzeń są definiowane: ubytki betonu konstrukcyjnego, ubytki materiału zbrojenia głównego i dodatkowego oraz ubytki materiału cięgien (sprężających lub nośnych). Podobnie dla konstrukcji murowanych wyróżniane są ubytki cegły lub kamienia oraz ubytki materiału wypełnienia spoin. Dla konstrukcji stalowych rozróżniono ubytki materiału elementów ze stali konstrukcyjnej oraz ubytki materiału cięgien.

Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych to uszkodzenia zmniejszające lub, w skrajnym przypadku, całkowicie likwidujące skuteczność zaprojektowanych powłok chroniących materiał konstrukcji przed korozją. Podstawowe rodzaje uszkodzeń należących do tego typu to:

- *uszkodzenia strukturalne* obejmujące utratę szczelności zabezpieczeń oraz ubytki materiału powłok zabezpieczających;
- *zmiany cech fizycznych* materiału powłok zabezpieczających, takich jak: przyczepność do podłoża, wytrzymałość, mrozoodporność, nasiąkliwość;

- *zmiany cech chemicznych* materiału powłok zabezpieczających, takich jak: stężenie jonów wodorowych, stężenie chlorków, stężenie siarczanów oraz azotanów.

Uszkodzenia związane ze zmianą położenia obejmują wszelkie niezgodne z projektem przemieszczenia obiektu bez zmiany jego kształtu, czyli bez zmiany wzajemnych odległości jego punktów oraz niezgodne z projektem ograniczenia możliwości takich przemieszczeń. W związku z powyższym rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje uszkodzeń tego typu:

- *nadmierne przemieszczenia* obiektu z podziałem na takie kategorie, jak przesunięcia, obroty itp.;
- *ograniczenia przemieszczeń*, a w tym: ograniczenia swobody przesuwu, ograniczenia swobody obrotu itp.

Zanieczyszczenia to typ uszkodzeń, w którym można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje:

- *zabrudzenia*, z rozróżnieniem dwóch kategorii: zabrudzeń gromadzących się w wyniku naturalnego oddziaływania środowiska (nanoszenie przez wiatr, wodę itp.) oraz zabrudzeń powodowanych przez ludzi (na przykład graffiti),
- *nieprzewidziana projektem wegetacja roślin* na obiekcie.

Jako osobny typ uszkodzeń wyróżniono w prezentowanej klasyfikacji *awarie*, przez które należy rozumieć uszkodzenia powodujące utratę przydatności użytkowej rozpatrywanej części lub elementu obiektu. Ten specyficzny typ uszkodzeń jest przeznaczony głównie do identyfikacji stanów dysfunkcji niekonstrukcyjnych części składowych obiektów. Dotyczy to przede wszystkim takich sytuacji, jak np. awaria systemu izolacji czy systemu oświetlenia.

3.2.3. Hierarchiczny system klasyfikacji uszkodzeń

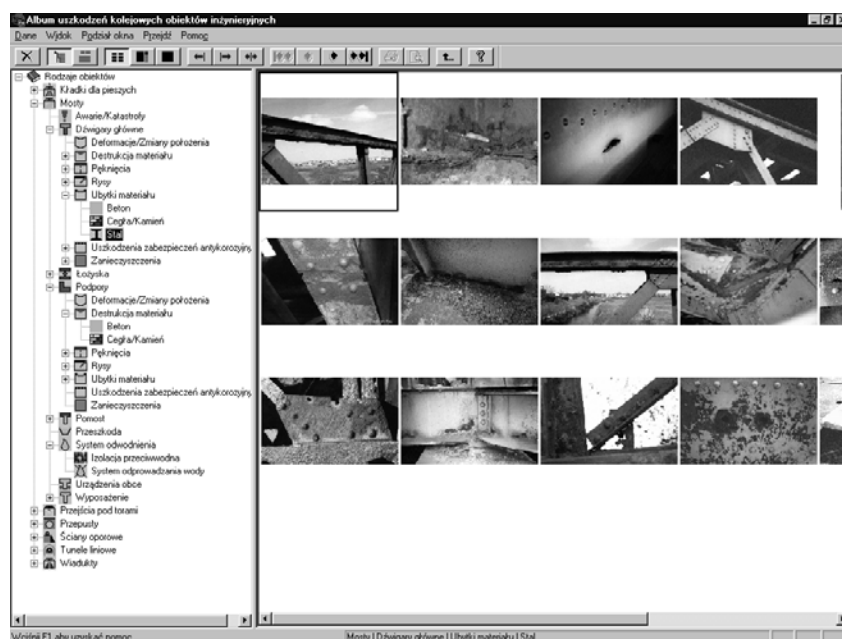
Prezentowana systematyka obejmuje najczęściej występujące uszkodzenia obiektów mostowych. Została ona opracowana na podstawie wyników analizy bogatego materiału dokumentującego uszkodzenia kilku tysięcy kolejowych i drogowych obiektów mostowych.

Proponowany system klasyfikacji uszkodzeń przedstawiono w albumie uszkodzeń kolejowych obiektów inżynierskich [25], zawierającym szczegółowe zasady jednolitej identyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń wszystkich typów kolejowych obiektów mostowych. W części książkowej oraz w oprogramowaniu znajdującym się na płycie kompaktowej (rys. 3.2) i stanowiącym integralną część wydawnictwa zaprezentowano około 1600 zdjęć ilustrujących przyjętą systematykę uszkodzeń. Zdjęcia przedstawiające przykłady poszczególnych typów uszkodzeń są uporządkowane w układzie hierarchicznym, uwzględniającym rodzaj obiektu, rodzaj części składowej i rodzaj materiału konstrukcyjnego (rys. 3.3). Po wybraniu jednego z przykładowych zdjęć jest ono prezentowane w formie pokazanej na rys. 3.4.

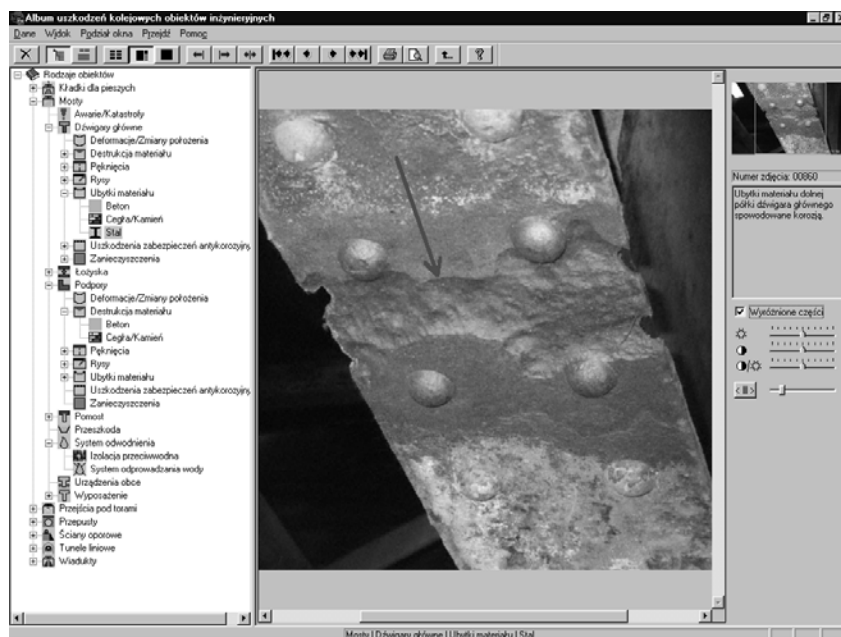
Oprogramowanie umożliwia skalowanie zdjęcia, a także uzyskanie informacji tekstowej związanej z uszkodzeniem.



Rys. 3.2. Tytułowy ekran oprogramowania „Album uszkodzeń kolejowych obiektów inżynierskich” [25]



Rys. 3.3. Katalog zdjęć prezentujących przykłady uszkodzeń typu *ubytki materiału* stalowych dźwigarów głównych mostów [25]



Rys. 3.4. Przykład ubytku materiału dźwigara stalowego [25]

3.3. Zasoby informacji o uszkodzeniach

Podstawowy zasób informacji o uszkodzeniach obiektów mostowych jest pozyskiwany w trakcie ich przeglądów, a metody pozyskiwania tych informacji przedstawiono m.in. w pracach: [9], [78], [118], [133], [140], [150], [168], [244], [252], [330], [356]. W Polsce, podobnie jak w większości innych krajów, wykonywane są cztery zasadnicze rodzaje przeglądów (bieżące, podstawowe, szczegółowe, specjalne), w trakcie których następuje akwizycja informacji o uszkodzeniach. Charakterystyki poszczególnych rodzajów przeglądów kolejowych obiektów inżynierskich oraz drogowych obiektów mostowych zestawiono odpowiednio w tab. 3.5 oraz w tab. 3.6.

Postać uzyskiwanych informacji o uszkodzeniach zależy w decydującym stopniu od stosowanych metod badań, których szeroki przegląd prezentują między innymi prace: [10], [59], [77], [86], [90], [116], [130], [162], [163], [164], [165], [167], [168], [219], [220], [266], [298], [377]. Podstawowe rodzaje technik badawczych i metod pomiarowych wykorzystywanych w trakcie przeglądów obiektów mostowych zestawiono w tab. 3.7. Zestawienie wykonano dla poszczególnych typów uszkodzeń wyróżnionych w klasyfikacji przedstawionej w tab. 3.4. Dla każdego typu badań podano rodzaje przeglądów, w których jest on zazwyczaj stosowany, a także określono klasę rozmytości uzyskiwanych informacji, posługując się systematyką zaproponowaną w tab. 1.1.

Tab. 3.5. Metody wykonywania przeglądów i opisu uszkodzeń kolejowych obiektów inżynierskich [165]

Rodzaj przeglądu	Przedmiot przeglądu	Częstość wykonywania przeglądu	Wykonawca przeglądu	Metoda wykonywania przeglądu	Sposób opisu uszkodzeń			Dokumentacja przeglądu
					Lokalizacja	Jakościowy	Ilościowy	
Bieżący	Wszystkie obiekty na liniach eksploatowanych	<p>Obiekty stałe – co 3 miesiące</p> <p>Obiekty prowizoryczne – co 2 tygodnie</p> <p>Obiekty na szkodach górniczych – indywidualnie</p>	Inspektor Mostowy	Kompleksowa ocena wizualna całego obiektu	Cały obiekt	Typ uszkodzeń + opis tekstowy	-	Karta przeglądu bieżącego w systemie SMOK
Podstawowy	Wszystkie obiekty na liniach kolejowych	Raz w roku	Inspektor Mostowy	Kompleksowa ocena wizualna oraz podstawowe badania i pomiary	Poszczególne konstrukcyjne oraz niekonstrukcyjne części składowe	Typ uszkodzeń + zdjęcia /rysunki	Intensywność + rozległość	Karta przeglądu podstawowego w systemie SMOK
Szczegółowy	Obiekty wytypowane na podstawie przeglądów podstawowych	Na indywidualny wniosek	Główny Inżynier Diagnostyki Mostowej oraz Inspektor Mostowy	Kompleksowa ocena wizualna oraz badania przy użyciu sprzętu wg [165]	Poszczególne konstrukcyjne oraz niekonstrukcyjne części składowe	Typ uszkodzeń + zdjęcia /rysunki	Intensywność + rozległość	Karta przeglądu szczegółowego w systemie SMOK
Specjalny	Obiekty wytypowane na podstawie przeglądów szczegółowych	Na indywidualny wniosek	Specjalistyczna jednostka badawcza	Badania przy użyciu sprzętu specjalistycznego	Rozwiązania indywidualne	Rozwiązania indywidualne	Rozwiązania indywidualne	Karta przeglądu specjalnego w systemie SMOK Raport specjalistyczny

Tab. 3.6. Metody wykonywania przeglądów i opisu uszkodzeń drogowych obiektów mostowych [162], [163], [164], [166], [235]

Rodzaj przeglądu	Przedmiot przeglądu	Częstość wykonywania przeglądu	Wykonawca przeglądu	Metoda wykonywania przeglądu	Sposób opisu uszkodzeń			Dokumentacja przeglądu
					Lokalizacja	Jakościowy	Ilościowy	
Bieżący	Wszystkie obiekty mostowe zlokalizowane w ciągach dróg publicznych	Minimum co 3 miesiące	Inspektor Mostowy	Lustracja z poziomu jezdni widocznych elementów konstrukcji i wyposażenia oraz otoczenia obiektu	Cały obiekt	Typ uszkodzeń + opis tekstowy	-	Karta przeglądu bieżącego
Podstawowy	Wszystkie obiekty mostowe zlokalizowane w ciągach dróg publicznych	Minimum raz w roku	Inspektor Mostowy	Kompleksowa ocena wizualna wszystkich części obiektu oraz podstawowe badania i pomiary wg [163]	Poszczególne części składowe obiektu	Typ uszkodzeń + zdjęcia /rysunki	-	Karta przeglądu podstawowego w systemie SGM
Szczegółowy	Rodzaje obiektów określone w [164] oraz obiekty wytypowane na podstawie przeglądów podstawowych	Minimum co pięć lat	Zespół specjalistów mostowych	Kompleksowa ocena wizualna wszystkich części obiektu oraz badania przy użyciu sprzętu wg [164]	Poszczególne części składowe obiektu	Typ uszkodzeń + zdjęcia /rysunki	-	Karta przeglądu szczegółowego w systemie SGM
Specjalny	Obiekty wytypowane na podstawie przeglądów szczegółowych	Na indywidualny wniosek	Specjalistyczna jednostka badawcza	Badania przy użyciu sprzętu specjalistycznego	Rozwiązania indywidualne	Rozwiązania indywidualne	Rozwiązania indywidualne	Raport specjalistyczny (ekspertyza)

Tab. 3.7. Rodzaje badań związanych z poszczególnymi typami uszkodzeń – zakresy zastosowań i klasa rozmytości uzyskiwanych informacji

Typ uszkodzenia	Badana cecha	Rodzaj badań	Przeгляд				Rozmytość informacji						
			Bieżący	Podstawowy	Szczegółowy	Specjalny	N_n	R_n	B_n	N_r	R_r	B_r	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
DEFORMACJE	Zmiana kształtu	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓					✓		
		Pomiar przemieszczeń			✓	✓	✓						
		Pomiar odkształceń				✓	✓						
DESTRUKCJA MATERIAŁU	Stan powierzchni	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓					✓		
	Wewnętrzne uszkodzenia struktury materiału	Badania ultradźwiękowe				✓		✓					
		Metoda „Impact-Echo”				✓		✓					
		Badania endoskopowe			✓	✓		✓			✓		
		Badania radiograficzne				✓		✓					
		Badania radarowe				✓		✓					
	Wytrzymałość materiałów	Ocena wizualna		✓	✓	✓					✓		
		Próbki wycinane				✓		✓					
		Metoda pull-out			✓	✓		✓					
		Metoda pull-off			✓	✓		✓					
		Badania sklerometryczne			✓	✓		✓					
	Nasiąkliwość	Próbki wycinane				✓		✓					
	Mrozoodporność	Próbki wycinane				✓		✓					
	Karbonatyzacja	Odczyn Ph			✓	✓		✓					
	Skład chemiczny	Badania zanieczyszczeń			✓	✓		✓					
	Lokalizacja zbrojenia	Odkrywki + pomiar		✓	✓	✓	✓						
Badania elektromagnetycz.				✓	✓	✓							
Badania radiograficzne					✓	✓							

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
UTRATA CIĄGŁOŚCI MATERIAŁU	Rodzaj i kategoria uszkodzenia	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓	✓					
	Rozwartość i długość	Pomiar bezpośredni		✓	✓	✓	✓					
		Barwny penetrant			✓	✓	✓					
		Cząsteczki magnetyczne			✓	✓	✓					
		Badania ultradźwiękowe				✓			✓			
		Badania radiograficzne				✓	✓					
		Badania radarowe				✓	✓					
		Pomiar emisji akustycznej				✓					✓	
UBYTKI MATERIAŁU	Rodzaj i rozmiar ubytków	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓	✓					
		Pomiar bezpośredni		✓	✓	✓	✓					
USZKODZENIA ZABEZPIECZEŃ ANTYKOROZYJNYCH	Stan powłok zabezpieczających	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓					✓	
		Cechy mechaniczne			✓	✓			✓			
	Obszar uszkodzeń	Pomiar bezpośredni		✓	✓	✓	✓					
		Odkrywki		✓	✓	✓	✓					
	Grubość powłoki	Badania elektromagnetycz.			✓	✓	✓					
		Badania ultradźwiękowe			✓	✓	✓					
	Karbonatyzacja	Odczyn Ph			✓	✓			✓			
Skład chemiczny	Badania zanieczyszczeń			✓	✓			✓				
ZANIECZY- SZCZENIA	Rodzaj i kategoria uszkodzeń	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓					✓	
	Obszar uszkodzeń	Pomiar bezpośredni		✓	✓	✓	✓					
ZMIANY POŁOŻENIA	Przemieszczenia	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓				✓		
		Pomiar przemieszczeń			✓	✓	✓					
	Ograniczenia przemieszczeń	Ocena wizualna	✓	✓	✓	✓					✓	
		Pomiar przemieszczeń				✓	✓					

Poziom rozmytości informacji został tu oceniony z punktu widzenia możliwości wykorzystania wyników rozpatrywanego rodzaju badań do precyzyjnego i dokładnego charakteryzowania poszczególnych typów uszkodzeń. Przedstawione oceny obejmują zarówno rozmytość relacji pomiędzy wynikiem badań a badaną cechą, jak i relacji pomiędzy badaną cechą a analizowanym typem uszkodzeń.

Informacje gromadzone w trakcie przeglądów powinny umożliwiać:

- *zidentyfikowanie* uszkodzeń zgodnie z przyjętą jednolitą systematyką;
- zdefiniowanie numerycznej reprezentacji podstawowych parametrów uszkodzeń, a mianowicie: *intensywności*, *rozległości* oraz *lokalizacji*.

Metodyka numerycznego opisu parametrów uszkodzeń w decydującym stopniu zależy od przyjętego modelu geometrii obiektu, co przedstawiono w tab. 3.8.

Tab. 3.8. Parametry opisu uszkodzenia w zależności od typu modelu geometrii obiektu

Parametry opisu uszkodzenia	Typ modelu geometrii			
	E^0	E^1	E^2	E^3
Intensywność uszkodzenia	I	$I(x)$	$I(x,y)$	$I(x,y,z)$
Rozległość uszkodzenia	R	$R(x)$	$R(x,y)$	$R(x,y,z)$
Lokalizacja uszkodzenia	L	$L(x)$	$L(x,y)$	$L(x,y,z)$

Przy użyciu powszechnie stosowanych bezwymiarowych modeli geometrii obiektów typu E^0 zarówno intensywność, jak i rozległość uszkodzenia są najczęściej opisywane wartościami liczbowymi (I , R , L), charakteryzującymi poszczególne części składowe lub elementy obiektu. W rzeczywistości wiele informacji wykorzystywanych do modelowania uszkodzeń obiektu ma charakter rozmyty. Wynika to zarówno z nieprecyzyjnych, najczęściej jakościowych, definicji poszczególnych typów, rodzajów i kategorii uszkodzeń, jak i ze zróżnicowanej precyzji informacji uzyskiwanych różnymi metodami i technikami diagnostycznymi (patrz tab. 3.7). W przedstawionych dalej rozwiązaniach, uwzględniając rozmytość wielu informacji, zaproponowano używanie do opisu niektórych uszkodzeń – oprócz wartości liczbowych – także wartości lingwistycznych.

W przypadku zastosowania modeli geometrii typu E^1 , tworzonych z elementów jednowymiarowych (e^1), parametry uszkodzenia mogą być przedstawione w postaci funkcji lokalnej współrzędnej x , mierzonej wzdłuż osi elementu prętowego (e^1). Do opisu każdego uszkodzenia w takim modelu należy zdefiniować:

- funkcję intensywności uszkodzenia – $I(x)$;
- funkcję rozległości uszkodzenia – $R(x)$;
- funkcję lokalizacji uszkodzenia – $L(x)$.

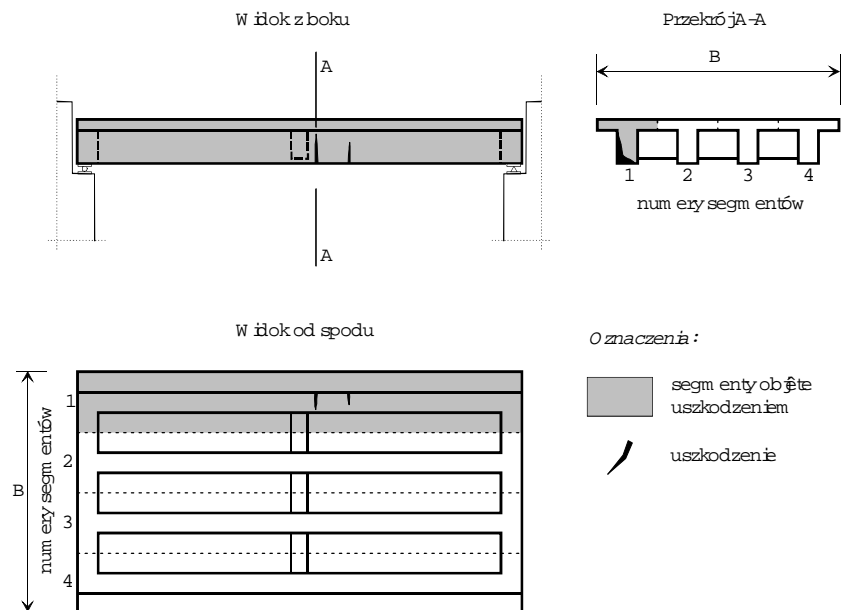
Przy przyjęciu modeli geometrii typu E^2 lub E^3 parametry uszkodzenia mogą być opisywane za pomocą analogicznych funkcji, ale – odpowiednio – dwóch lub trzech zmiennych (tab. 3.8).

3.4. Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^0

3.4.1. Metoda segmentów

Konsekwencją stosowania modeli geometrii typu E^0 jest przyjęcie geometrycznej reprezentacji obiektu w postaci zbioru punktów odpowiadających częściom składowym oraz elementom obiektu, których kondycja podlega odrębnej ocenie. Każdemu elementowi takiego zbioru przyporządkowywane są dane charakteryzujące poszczególne stwierdzone uszkodzenia, a mianowicie:

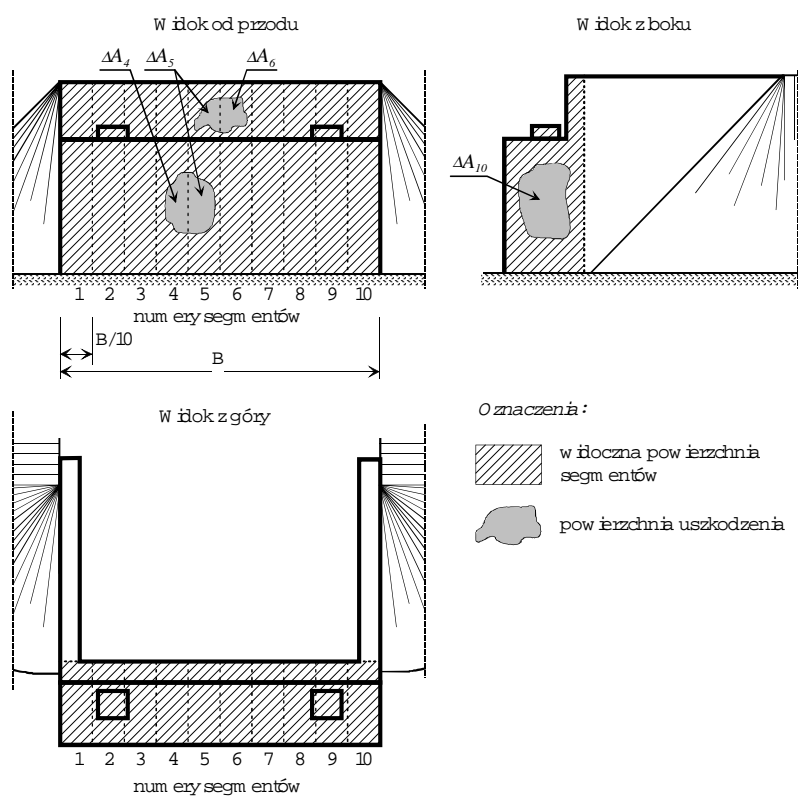
- intensywność uszkodzenia I ;
- rozległość uszkodzenia R ;
- lokalizacja uszkodzenia L .



Rys. 3.5. Podział przęsla płytowo-belkowego na segmenty w modelowaniu uszkodzeń dźwigarów głównych (uszkodzenia typu *utrata ciągłości materiału*)

Poniżej przedstawiono koncepcję metodyki określania i numerycznego opisu parametrów wszystkich typów uszkodzeń dla przypadku bezwymiarowego modelu geometrii obiektu. Proponowane rozwiązanie umożliwia:

- stosowanie jednakowej metodyki modelowania uszkodzeń w odniesieniu do różnych rodzajów materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych obiektów mostowych;
- opis intensywności i rozległości uszkodzeń w sposób ciągły w całym obszarze wartości, bez stosowania jego dyskretyzacji;
- opis dowolnych kombinacji uszkodzeń identyfikowanych w systemie;
- dobór sposobów modelowania parametrów uszkodzeń do klasy rozmytości wykorzystywanych informacji.

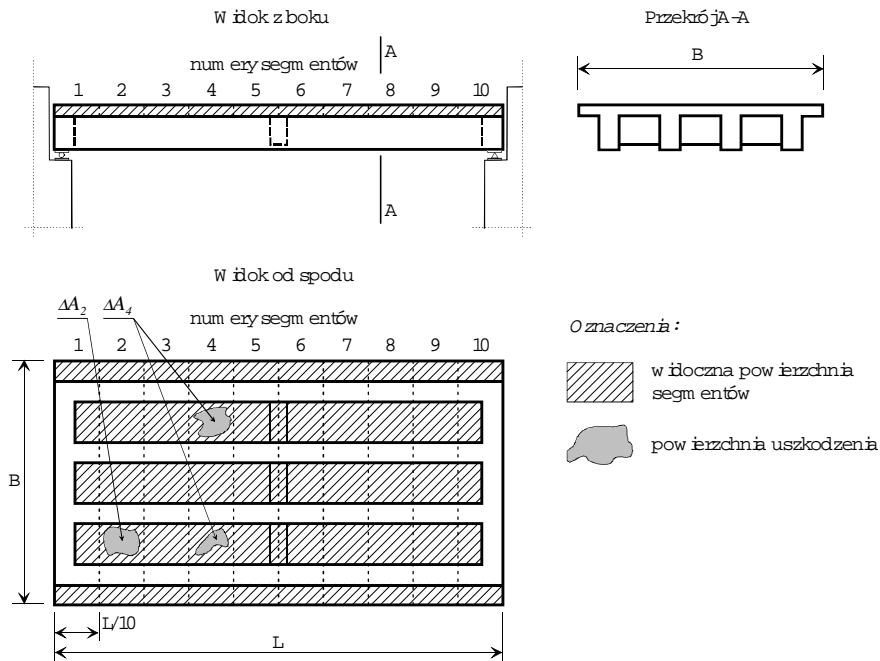


Rys. 3.6. Podział na segmenty podpory o masywnej konstrukcji korpusu (uszkodzenia typu *zanieczyszczenia*)

W celu zunifikowania zasad określania parametrów uszkodzeń proponuje się wprowadzenie pojęcia *segmentu*, to jest umownie wydzielonego obszaru części składowej obiektu. Linie podziału na segmenty powinny przebiegać równolegle do

głównego kierunku pracy analizowanej części składowej obiektu. W przypadku części składowych o wyraźnym podziale konstrukcyjnym na elementy – segmentami wykorzystywanymi do opisu uszkodzeń są poszczególne elementy. Przykład podziału konstrukcji przęsła płytowo-belkowego na segmenty, stosowanego przy opisie uszkodzeń dźwigarów głównych, przedstawiono na rys. 3.5. Oddzielnymi segmentami są tu poszczególne dźwigary główne.

Do określania rozległości uszkodzeń części składowych obiektu, które nie mają konstrukcyjnie wyróżnionych elementów przyjęto podział na minimum 10 umownych segmentów, tak jak to pokazano na rys. 3.6 na przykładzie korpusu podpory o konstrukcji masywnej. Takie same zasady należy stosować także w opisie uszkodzeń innych części składowych obiektów mostowych. Ilustracją tej reguły jest pokazany na rys. 3.7 podział na segmenty płyty pomostowej przęsła płytowo-belkowego.



Rys. 3.7. Modelowanie uszkodzeń płyty pomostowej przęsła płytowo-belkowego (uszkodzenia z zabezpieczeń antykorozyjnych) – podział na segmenty

Prezentowany sposób dyskretyzacji obiektów na potrzeby numerycznego modelowania uszkodzeń nazwano *metodą segmentów*.

3.4.2. Rozległość uszkodzeń

Korzystając z przedstawionej wyżej *metody segmentów*, rozległość uszkodzeń R należy określać według następujących zasad:

- rozległość każdego uszkodzenia jest określana w procentach i może wynosić od 0% (uszkodzenie nie występuje) do 100% (uszkodzenie obejmuje całą ocenianą część konstrukcji);
- rozległości uszkodzeń należących do następujących typów: *deformacje, destrukcja materiału, utrata ciągłości materiału, ubytki materiału, uszkodzenia związane ze zmianą położenia* określa się jako iloraz liczby segmentów objętych rozpatrywanym uszkodzeniem i sumarycznej liczby segmentów ocenianej części konstrukcyjnej, wyrażony w procentach:

$$R = \frac{m}{n} 100\% \quad (3.1)$$

gdzie:

R – rozległość uszkodzenia [%],

m – liczba objętych uszkodzeniem segmentów ocenianej części konstrukcyjnej [szt.],

n – sumaryczna liczba segmentów ocenianej części konstrukcyjnej [szt.];

- rozległość uszkodzeń należących do typów: *uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych oraz zanieczyszczenia* określa się jako iloraz objętego uszkodzeniem pola powierzchni i sumarycznego pola widocznej powierzchni ocenianej części konstrukcyjnej, wyrażony w procentach:

$$R = \frac{1}{n} \sum_i \frac{\Delta A_i}{A_i} 100\% \quad (3.2)$$

gdzie:

R – rozległość uszkodzenia [%],

n – sumaryczna liczba segmentów ocenianej części konstrukcyjnej [szt.],

ΔA_i – objęte uszkodzeniem pole widocznej powierzchni segmentu i ocenianej części konstrukcyjnej [m^2],

A_i – pole widocznej powierzchni segmentu i ocenianej części konstrukcyjnej [m^2].

Przykład wykorzystania metody segmentowej do określania rozległości uszkodzeń typu *utrata ciągłości materiału* dźwigarów głównych przedstawiono na rys. 3.5. Uszkodzenie w postaci rysy występuje tu jedynie w segmencie nr 1, a więc liczba segmentów objętych uszkodzeniem wynosi $m = 1$, a sumaryczna liczba segmentów $n = 4$. Stąd zgodnie ze wzorem (3.1) rozległość uszkodzenia wynosi:

$$R = \frac{m}{n} 100\% = \frac{1}{4} 100\% = 25\%$$

Zasadę podziału na segmenty, części składowych obiektu nie wykazujących konstrukcyjnego zróżnicowania na elementy, przedstawiono na rys. 3.6, na przykładzie podpory o konstrukcji masywnej. Podział na 10 umownych segmentów zastosowano tu przy ocenie rozległości uszkodzeń typu *zanieczyszczenia*. Pola objętych uszkodzeniem powierzchni poszczególnych segmentów wynoszą: $\Delta A_4 = 1,0 \text{ m}^2$, $\Delta A_5 = 2,5 \text{ m}^2$, $\Delta A_6 = 0,8 \text{ m}^2$ oraz $\Delta A_{10} = 3,0 \text{ m}^2$, a pola powierzchni widocznej segmentów skrajnych: $A_1 = A_{10} = 8,0 \text{ m}^2$ oraz segmentów pośrednich po $4,0 \text{ m}^2$. Według wzoru (3.2) otrzymuje się rozległość uszkodzenia:

$$R = \frac{1}{n} \sum_i \frac{\Delta A_i}{A_i} 100\% = \frac{1}{10} \left(\frac{1,0}{4,0} + \frac{2,5}{4,0} + \frac{0,8}{4,0} + \frac{3,0}{8,0} \right) 100\% = 14,5\%$$

Przykład określania rozległości uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych płyty pomostowej pokazano na rys. 3.7. Uszkodzenia występują w segmentach nr 2 oraz nr 4, a pola powierzchni objętych uszkodzeniem wynoszą odpowiednio: $\Delta A_2 = 2,0 \text{ m}^2$ oraz $\Delta A_4 = 2,8 \text{ m}^2$. Pola powierzchni widocznej uszkodzonych segmentów wynoszą: $A_2 = A_4 = 8,0 \text{ m}^2$. Rozległość uszkodzenia można wyznaczyć ze wzoru (3.2):

$$R = \frac{1}{n} \sum_i \frac{\Delta A_i}{A_i} 100\% = \frac{1}{10} \left(\frac{2,0}{8,0} + \frac{2,8}{8,0} \right) 100\% = 6\%$$

Prezentowana segmentowa metoda określania rozległości uszkodzeń może być stosowana w odniesieniu do wszystkich typów uszkodzeń oraz wszystkich rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych obiektów mostowych. Szczegółowe zasady zastosowania tej metody do oceny rozległości uszkodzeń kolejowych obiektów mostowych przedstawiono w pracy [24].

3.4.3. Intensywność uszkodzeń

3.4.3.1. Podstawowe założenia

W proponowanej metodyce numerycznego modelowania uszkodzeń przyjęto następujące podstawowe zasady określania intensywności poszczególnych uszkodzeń:

- za intensywność I_i uszkodzenia w segmencie i uważa się intensywność wyznaczoną dla najbardziej uszkodzonego przekroju segmentu, czyli takiego przekroju, w którym intensywność I_i jest największa;
- intensywność uszkodzenia I_i może być w każdym segmencie inna – w takiej sytuacji należy podawać oddzielne parametry uszkodzenia dla każdego segmentu, indywidualnie określając intensywność I_i oraz rozległość uszkodzenia R_i ;

- miary intensywności mogą być różne dla poszczególnych typów, rodzajów, kategorii i klas uszkodzeń; intensywność uszkodzeń może być określana liczbowo lub przy użyciu wartości lingwistycznych.

Miary intensywności uszkodzeń oraz ogólne zasady jej numerycznego opisu dla podstawowych typów uszkodzeń zaprezentowano poniżej.

3.4.3.2. Destrukcja materiału

Intensywność uszkodzeń typu *destrukcja materiału*, przy użyciu liczbowych parametrów uszkodzeń, można określać według wzoru:

$$I_i^d = D_i^d S_i^d = D_i^d \frac{\Delta F_i^d}{F_i} \quad (3.3)$$

gdzie:

- I_i^d – intensywność destrukcji materiału w segmencie i ocenianej części obiektu,
- D_i^d – poziom destrukcji w najbardziej uszkodzonym przekroju segmentu i decydującym o intensywności uszkodzenia segmentu i ,
- $S_i^d = \Delta F_i^d / F_i$ – strefa uszkodzenia w segmencie i ,
- ΔF_i^d – objęte uszkodzeniem pole powierzchni przekroju poprzecznego segmentu i ocenianej części obiektu [m^2],
- F_i – zaprojektowane pole powierzchni przekroju poprzecznego segmentu i ocenianej części obiektu [m^2].

Poziom destrukcji materiału D_i^d we wzorze (3.3) jest znormalizowaną miarą pogorszenia cech fizycznych i chemicznych materiału w uszkodzonej strefie przekroju poprzecznego segmentu i o powierzchni ΔF_i^d . W przypadku zróżnicowanego poziomu destrukcji na objętym uszkodzeniem obszarze ΔF_i^d we wzorze (3.3) należy przyjmować średnią wartość D_i^d . Poziom destrukcji określa się jako wartość liczbową z przedziału od 0,0 (cechy materiału zgodne z projektowanymi) do 1,0 (kompletna destrukcja materiału) dla najbardziej uszkodzonego przekroju segmentu decydującego o ocenie intensywności uszkodzenia całego segmentu i .

Pojęcie destrukcji materiału ma charakter nieprecyzyjny, raczej jakościowy niż ilościowy, a w związku z tym relacje pomiędzy poziomem destrukcji a jej objawami (ocena wizualna, wyniki badań materiału) są też typu rozmytego (patrz tab. 3.7). W tej sytuacji naturalną miarą poziomu destrukcji mogą też być wartości lingwistyczne, na przykład z zakresu (*nieznaczny, średni, znaczny*). Przy stosowaniu wartości lingwistycznych do opisu *poziomu destrukcji* D_i^d wynikową *intensywność uszkodzenia* I_i^d można określić metodami wnioskowania rozmytego, co przedstawiono w dalszej części pracy.

3.4.3.3. Utrata ciągłości materiału

W konstrukcjach stalowych i żeliwnych intensywność uszkodzeń typu *utrata ciągłości materiału* może być określana według wzoru:

$$I_i^c = \frac{\Delta F_i^c}{F_i} \quad (3.4)$$

gdzie:

I_i^c – intensywność uszkodzenia typu utrata ciągłości materiału w segmencie i ocenianej części obiektu,

ΔF_i^c – pole przekroju poprzecznego segmentu i ocenianej części obiektu, na którym nastąpiła utrata ciągłości materiału [m²],

F_i – zaprojektowane pole przekroju poprzecznego segmentu i ocenianej części obiektu [m²].

Intensywność wynosząca $I_i^c = 1,0$ odpowiada utracie ciągłości materiału na całej powierzchni przekroju poprzecznego segmentu i , czyli pęknięciu.

W konstrukcjach masywnych (betonowych, ceglanych i kamiennych) jako miarę intensywności uszkodzeń typu *utrata ciągłości materiału* można przyjąć rozwartość rys lub pęknięć, określaną według wzoru:

$$I_i^c = w_i^{\max} \quad (3.5)$$

gdzie:

I_i^c – intensywność uszkodzenia typu utrata ciągłości materiału w segmencie i ocenianej części obiektu [mm],

w_i^{\max} – maksymalna rozwartość rys (pęknięć) w segmencie i ocenianej części obiektu [mm].

3.4.3.4. Ubytki materiału

Intensywność uszkodzeń typu *ubytki materiału* można określać według wzoru:

$$I_i^u = \frac{\Delta F_i^u}{F_i} \quad (3.6)$$

gdzie:

I_i^u – intensywność ubytków materiału w segmencie i ocenianej części obiektu,

ΔF_i^u – zmniejszenie pola przekroju poprzecznego segmentu i ocenianej części obiektu w wyniku ubytku materiału [m²],

F_i – zaprojektowane pole przekroju poprzecznego segmentu i ocenianej części obiektu [m²].

Modelowanie ubytków materiału jest zróżnicowane dla poszczególnych materiałów konstrukcyjnych i obejmuje:

- w konstrukcjach z betonu niezbrojonego – ubytki betonu,
- w konstrukcjach z betonu zbrojonego – ubytki betonu oraz ubytki zbrojenia głównego i pomocniczego,
- w konstrukcjach z betonu sprężonego – ubytki betonu konstrukcyjnego, ubytki zbrojenia oraz ubytki materiału cięgien sprężających,
- w konstrukcjach stalowych i żeliwnych – ubytki materiału elementów konstrukcyjnych,
- w konstrukcjach murowanych – ubytki materiału konstrukcji ceglanych i kamiennych.

Intensywność ubytków betonu w segmencie i można określać ze wzoru:

$$I_{b,i}^u = \frac{\Delta F_{b,i}^u}{F_{b,i}} \quad (3.7)$$

gdzie:

$\Delta F_{b,i}^u$ – ubytek pola powierzchni betonu w przekroju poprzecznym segmentu i [m^2],

$F_{b,i}$ – zaprojektowane pole powierzchni betonu w przekroju poprzecznym segmentu i [m^2].

Intensywność ubytków materiału zbrojenia w segmencie i opisuje zależność:

$$I_{z,i}^u = \frac{\Delta F_{z,i}^u}{F_{z,i}} \quad (3.8)$$

gdzie:

$\Delta F_{z,i}^u$ – ubytek pola powierzchni zbrojenia w przekroju poprzecznym segmentu i [m^2],

$F_{z,i}$ – zaprojektowane pole powierzchni zbrojenia w przekroju poprzecznym segmentu i [m^2],

natomiast intensywność ubytków materiału cięgien sprężających:

$$I_{c,i}^u = \frac{\Delta F_{c,i}^u}{F_{c,i}} \quad (3.9)$$

gdzie:

$\Delta F_{c,i}^u$ – ubytek pola powierzchni cięgien sprężających w przekroju poprzecznym segmentu i [m^2],

$F_{c,i}$ – zaprojektowane pole powierzchni cięgien sprężających w przekroju poprzecznym segmentu i [m^2].

Analogicznie intensywność ubytków materiału elementów stalowych i żeliwnych określa wzór:

$$I_{s,i}^u = \frac{\Delta F_{s,i}^u}{F_{s,i}} \quad (3.10)$$

gdzie:

$\Delta F_{s,i}^u$ – ubytek pola powierzchni materiału w przekroju poprzecznym segmentu i elementu stalowego lub żeliwnego [m^2],
 $F_{s,i}$ – zaprojektowane pole powierzchni przekroju poprzecznego segmentu i elementu stalowego lub żeliwnego [m^2],
 a ubytków materiału elementów murowanych:

$$I_{m,i}^u = \frac{\Delta F_{m,i}^u}{F_{m,i}} \quad (3.11)$$

gdzie:

$\Delta F_{m,i}^u$ – ubytek pola powierzchni materiału w przekroju poprzecznym segmentu i elementu murowanego [m^2],
 $F_{m,i}$ – zaprojektowane pole powierzchni przekroju poprzecznego segmentu i elementu murowanego [m^2].

3.4.3.5. Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych

Intensywność uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych, przy użyciu liczbowych parametrów uszkodzeń, można określać według wzoru:

$$I_i^a = D_i^a S_i^a = D_i^a \frac{\Delta h_i^a}{h_i} \quad (3.12)$$

gdzie:

I_i^a – intensywność uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych w segmencie i ocenianej części obiektu,
 D_i^a – poziom uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych segmentu i ocenianej części obiektu,
 $S_i^a = \Delta h_i^a / h_i$ – strefa uszkodzenia w segmencie i ,
 Δh_i^a – objęta uszkodzeniem grubość zabezpieczeń antykorozyjnych w segmencie i ocenianej części obiektu [mm],
 h_i – zaprojektowana grubość zabezpieczeń antykorozyjnych w segmencie i ocenianej części obiektu [mm].

Poziom uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych D_i^a jest znormalizowaną miarą obniżenia skuteczności zabezpieczeń w strefie uszkodzonej o grubości Δh_i^a . W przypadku zróżnicowanego poziomu destrukcji w objętej uszkodzeniem strefie Δh_i^a we wzorze (3.12) należy przyjmować średnią wartość D_i^a . Parametr poziomu uszkodzenia może przyjmować wartości z przedziału od 0,0 (parametry zabezpieczeń zgodne z projektowanymi) do 1,0 (dysfunkcja zabezpieczeń antykorozyjnych) dla najbardziej uszkodzonego przekroju segmentu, decydującego o ocenie intensywności uszkodzenia całego segmentu i .

Podobnie jak w odniesieniu do uszkodzeń typu *destrukcja materiału* miarą poziomu destrukcji mogą też być wartości lingwistyczne. Przy stosowaniu miar rozmytych do opisu *poziomu uszkodzenia* D_i^a , a wartości liczbowych do określenia rozmiaru strefy uszkodzenia S_i^a , wynikową *intensywność uszkodzenia* I_i^a można wyznaczyć metodami wnioskowania rozmytego.

3.4.3.6. Deformacje, uszkodzenia związane ze zmianą położenia, zanieczyszczenia

Informacje wykorzystywane do opisu uszkodzeń należących do typów: *deformacje, uszkodzenia związane ze zmianą położenia oraz zanieczyszczenia* mają w większości charakter rozmyty (patrz tab. 3.7). W związku z tym naturalnym rozwiązaniem wydaje się potraktowanie *intensywności uszkodzeń* I_i jako zmiennej lingwistycznej i przyjęcie wartości lingwistycznych jako miar intensywności uszkodzeń. Przeprowadzone symulacje oraz wyniki analiz rezultatów wdrożeń pilotażowych świadczą o tym, że już nawet przy niewielkiej ziarnistości tak opisywanych informacji (np. *mala intensywność, średnia intensywność, duża intensywność*) uzyskuje się przydatne praktycznie numeryczne modele rozpatrywanych typów uszkodzeń. Sposoby implementacji oraz wykorzystywania lingwistycznych miar uszkodzeń w systemie komputerowym przedstawiono w dalszej części pracy.

3.4.4. Lokalizacja uszkodzeń

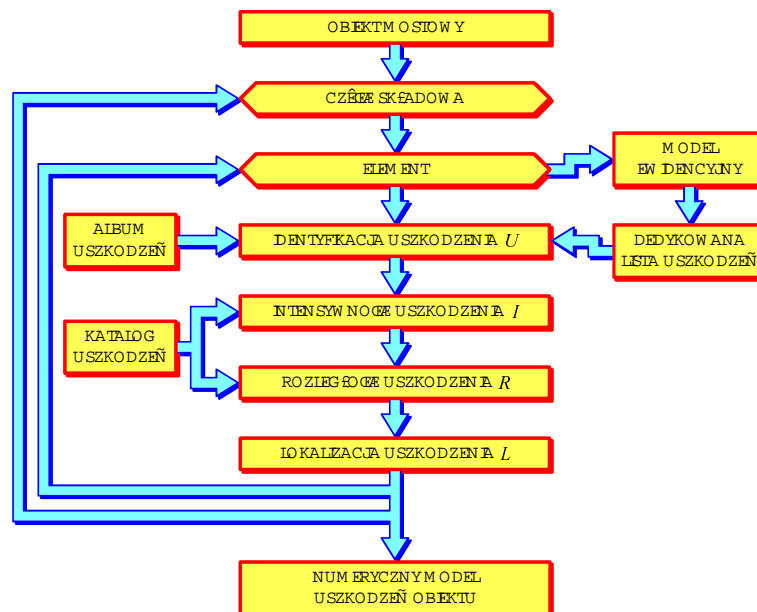
Przyjęcie modeli geometrii typu E^0 determinuje zarówno sposób tworzenia modeli ewidencyjnych, jak i związany z nimi sposób lokalizacji uszkodzeń. Stosowanie bezwymiarowych elementów (e^0) do modelowania geometrii powoduje, że stwierdzone uszkodzenia mogą być lokalizowane z dokładnością jedynie co do części składowych lub elementów obiektów.

3.4.5. Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń

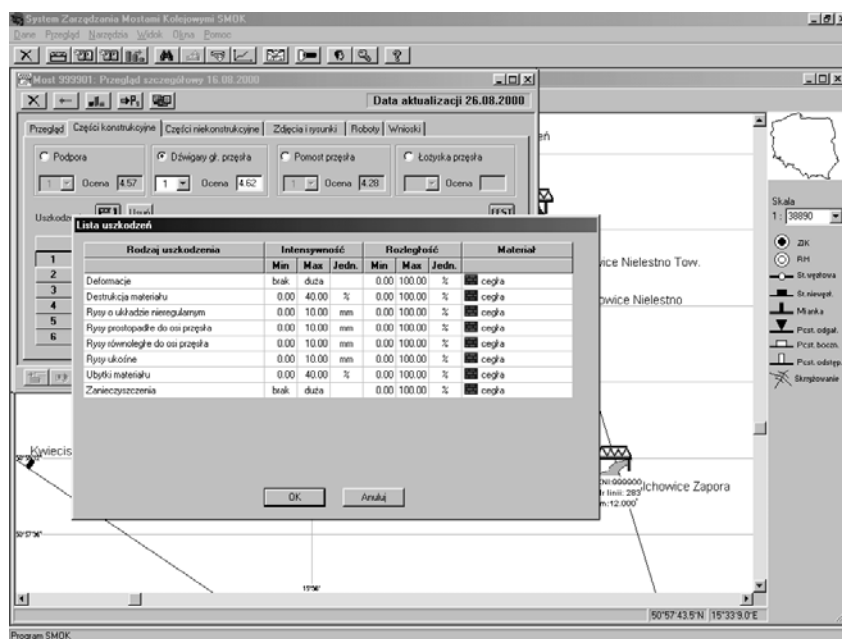
Przedstawiona wyżej koncepcja numerycznego modelowania uszkodzeń może być stosowana zarówno w odniesieniu do drogowych, jak i kolejowych obiektów mostowych, dla których przyjęto geometryczną reprezentację wykorzystującą elementy bezwymiarowe (e^0). Ogólny schemat proponowanego procesu numerycznego modelowania uszkodzeń w systemie komputerowym wspomagającym gospodarowanie infrastrukturą mostową przedstawia rys. 3.8.

Kolejne etapy tworzenia modelu uszkodzeń to:

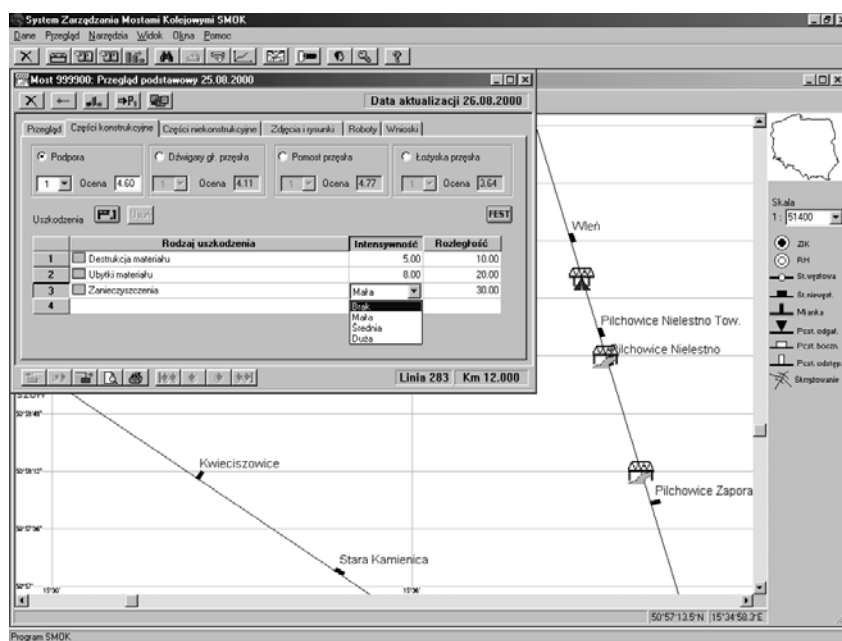
- wybór ocenianego obiektu, jego części składowej lub elementu;
- automatyczne wygenerowanie przez system komputerowy listy uszkodzeń dedykowanej ocenianemu elementowi, a utworzonej na podstawie parametrów technicznych zawartych w modelu ewidencyjnym (typ konstrukcji, rodzaj materiału np.) poprzez wyselekcjonowanie z globalnej listy tych uszkodzeń, które mogą wystąpić w ocenianym elemencie – przykład przedstawia rys. 3.9;
- identyfikacja każdego uszkodzenia zaobserwowanego w trakcie przeglądu obiektu zgodnie z przyjętą systematyką;
- ocena intensywności i rozległości uszkodzenia zgodnie z obowiązującymi w systemie zasadami określonymi w katalogu uszkodzeń;
- automatyczne przyporządkowanie opisanego uszkodzenia rozpatrywanemu elementowi obiektu.



Rys. 3.8. Schemat funkcjonalny procesu numerycznego modelowania uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^0



Rys. 3.9. Lista potencjalnych uszkodzeń wyselekcjonowana dla rozpatrywanego elementu obiektu

Rys. 3.10. Opis intensywności uszkodzeń typu *zanieczyszczenia* przy użyciu wartości lingwistycznych

Możliwości praktycznych zastosowań prezentowanych rozwiązań przetestowano w wersji pilotażowej Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK [35] oraz w wersji testowej Systemu Zarządzania Obiektami Komunikacyjnymi SZOK [44]. Nowością w tych aplikacjach jest zastosowanie pełnego jakościowego i ilościowego modelu uszkodzeń, a także użycie wartości lingwistycznych do opisu intensywności niektórych typów uszkodzeń. W prezentowanym rozwiązaniu zastosowano jedynie trzy wartości lingwistyczne: „mała”, „średnia”, „duża” (rys. 3.10), ale mimo stosunkowo małej ziarnistości informacji uzyskano znaczną precyzję opisu uszkodzeń. Prezentowane rozwiązanie potwierdziło swoją przydatność w trakcie pilotażowej eksploatacji w kilkunastu jednostkach organizacyjnych PKP.

3.5. Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^1

3.5.1. Wprowadzenie

Zastosowanie modeli konstruowanych z elementów jednowymiarowych (e^1) jako reprezentacji obiektów w komputerowych systemach wspomagających zarządzanie mostami wydaje się rozwiązaniem ze wszech miar pożądanym. Modele geometrii typu E^1 , a więc modele klas (e^1, p^1), (e^1, p^2) oraz (e^1, p^3) zgodnie z klasyfikacją podaną na rys. 2.5, umożliwiają precyzyjniejszy, niż w tradycyjnie stosowanych modelach typu E^0 , opis parametrów technicznych, które często zmieniają się zarówno na długości konstrukcji przęseł (np. geometria przekroju poprzecznego), jak i na wysokości podpór. Informacje takie są praktycznie niemożliwe do uwzględnienia w modelach tworzonych z elementów e^0 . Szczególnie jednak istotną zaletą modeli geometrii typu E^1 jest możliwość dokładniejszego opisu parametrów uszkodzeń, zgodnie z ich lokalizacją na długości elementów. Ma to w konsekwencji fundamentalne znaczenie dla zwiększenia precyzji oceny wpływu stwierdzonych uszkodzeń na kondycję obiektów mostowych.

Zastosowania modeli geometrii typu E^1 , oprócz wspomnianych wyżej zalet, charakteryzują się także specyficznymi wymaganiami, wśród których do najważniejszych można zaliczyć:

- konieczność zwiększenia zbiorów danych gromadzonych w systemie komputerowym;
- potrzebę wykorzystywania narzędzi grafiki komputerowej w procesie tworzenia zarówno modeli ewidencyjnych, jak i modeli uszkodzeń obiektów;
- konieczność stosowania specjalistycznych narzędzi informatycznych umożliwiających przetwarzanie informacji zawartych w zaawansowanych modelach obiektów.

Wraz z rozwojem technik komputerowych wymienione wyżej wymagania stają się coraz mniej uciążliwe, a potencjalne korzyści – coraz bardziej dostępne. Biorąc te fakty pod uwagę, opracowano i przedstawiono poniżej koncepcję metodyki numerycznego modelowania uszkodzeń w przypadku zastosowania modeli typu E^1 do odwzorowania geometrii obiektów. Prezentowane rozwiązanie jest rozszerzeniem na elementy jednowymiarowe (e^1) opisanej wcześniej koncepcji modelowania uszkodzeń dla modeli geometrii typu E^0 . Przedstawiona metodyka ma charakter ogólny i może być stosowana do modelowania parametrów uszkodzeń wszystkich części składowych i elementów obiektów mostowych, z uwzględnieniem specyfiki wynikającej z typu konstrukcji oraz rodzaju materiału konstrukcyjnego.

Zgodnie z zasadami przyjętymi w systematyce modeli geometrii (patrz rys. 2.5) każdy element (e^1) jest opisywany w lokalnym układzie współrzędnych, którego oś x pokrywa się z osią geometryczną modelowanego elementu konstrukcji.

3.5.2. Intensywność uszkodzeń

3.5.2.1. Uwagi ogólne

Najistotniejszą cechą związaną z przyjęciem modelu geometrii typu E^1 jest możliwość odwzorowania rozkładu intensywności uszkodzenia na długości ocenianego elementu. W tym celu proponuje się wprowadzenie pojęcia *funkcji intensywności uszkodzenia* $I(x)$, której wartości są równe intensywności modelowanego uszkodzenia w poszczególnych przekrojach elementu (e^1). Intensywność uszkodzenia może być w ogólnym przypadku opisana dowolną funkcją ciągłą zdefiniowaną na długości rozpatrywanego elementu. W odniesieniu do niektórych typów uszkodzeń bezpośrednie definiowanie funkcji intensywności uszkodzeń $I(x)$ nie zawsze jest wygodne i w takim przypadku proponuje się wykorzystywanie następujących funkcji pomocniczych:

- *funkcji poziomu uszkodzenia* $D(x)$ – określającej stopień (poziom) zaawansowania uszkodzenia w poszczególnych przekrojach na długości elementu (np. poziom zaawansowania destrukcji materiału konstrukcyjnego),
- *funkcji strefy uszkodzenia* $S(x)$ – określającej rozmiar objętej uszkodzeniem części przekroju poprzecznego rozpatrywanego elementu.

Stwierdzone uszkodzenia konstrukcji są w prezentowanym rozwiązaniu opisywane indywidualnie dla każdego elementu (e^1) wchodzącego w skład modelu geometrii obiektu. Metodykę modelowania intensywności podstawowych typów uszkodzeń obiektów mostowych zilustrowano na przykładzie swobodnie podpartego dźwigara o prostokątnym przekroju poprzecznym.

3.5.2.2. Deformacje

Jako miarę intensywności uszkodzenia przyjęto wartości niezgodnych z projektem przemieszczeń osi elementu, powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów modelowanego elementu konstrukcji, określane w stosunku do długości modelowanego elementu. Funkcja intensywności uszkodzenia może być zapisana w postaci:

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi x :

$$I_x^f(x) = \frac{\Delta x^f(x)}{L} \quad (3.13)$$

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi y :

$$I_y^f(x) = \frac{\Delta y^f(x)}{L} \quad (3.14)$$

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi z :

$$I_z^f(x) = \frac{\Delta z^f(x)}{L} \quad (3.15)$$

gdzie:

$\Delta x^f(x)$ – przemieszczenie osi elementu w kierunku równoległym do osi x w wyniku deformacji niezgodnej z projektem [m],

$\Delta y^f(x)$ – przemieszczenie osi elementu w kierunku równoległym do osi y w wyniku deformacji niezgodnej z projektem [m],

$\Delta z^f(x)$ – przemieszczenie osi elementu w kierunku równoległym do osi z w wyniku deformacji niezgodnej z projektem [m],

L – długość modelowanego elementu [m].

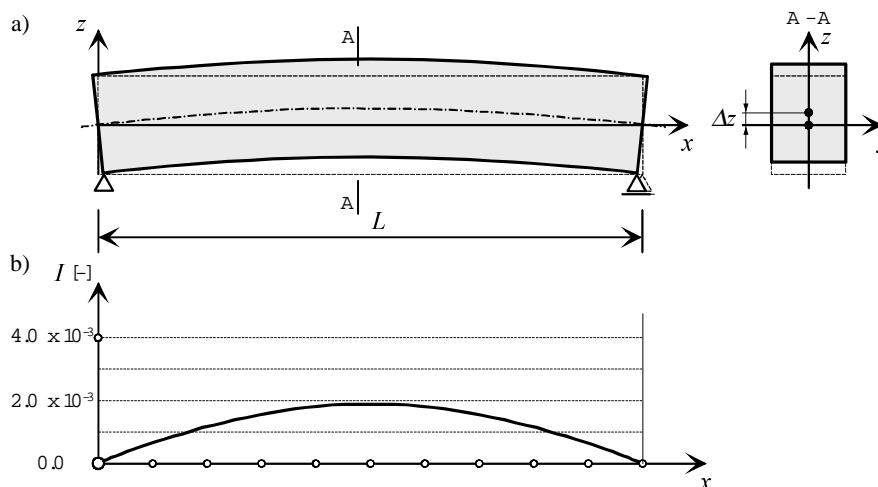
Na rysunku 3.11 pokazano przykład modelowania uszkodzenia w postaci wygięcia elementu konstrukcyjnego w płaszczyźnie xz .

Dla uszkodzeń należących do kategorii *skręcenie* jako miarę uszkodzenia przyjęto niezgodny z projektem kąt obrotu przekroju poprzecznego w stosunku do położenia zaprojektowanego. Funkcja intensywności uszkodzenia może być wtedy opisana jako:

$$I_\varphi^f(x) = \Delta\varphi(x) \quad (3.16)$$

gdzie:

$\Delta\varphi(x)$ – niezgodny z projektem kąt skręcenia elementu (kąt obrotu w stosunku do położenia zaprojektowanego) w płaszczyźnie prostopadłej do osi x [rad].



Rys. 3.11. Przykład modelowania intensywności uszkodzenia typu *deformacje*:
a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I_z^f(x)$

3.5.2.3. Destrukcja materiału

Funkcja intensywności uszkodzeń typu *destrukcja materiału* może być ogólnie zdefiniowana jako:

$$I^d(x) = D^d(x)S^d(x) = D^d(x)\frac{\Delta F^d(x)}{F(x)} \quad (3.17)$$

gdzie:

$D^d(x)$ – bezwymiarowa *funkcja poziomu uszkodzenia* określająca stopień destrukcji materiału w poszczególnych przekrojach elementu,

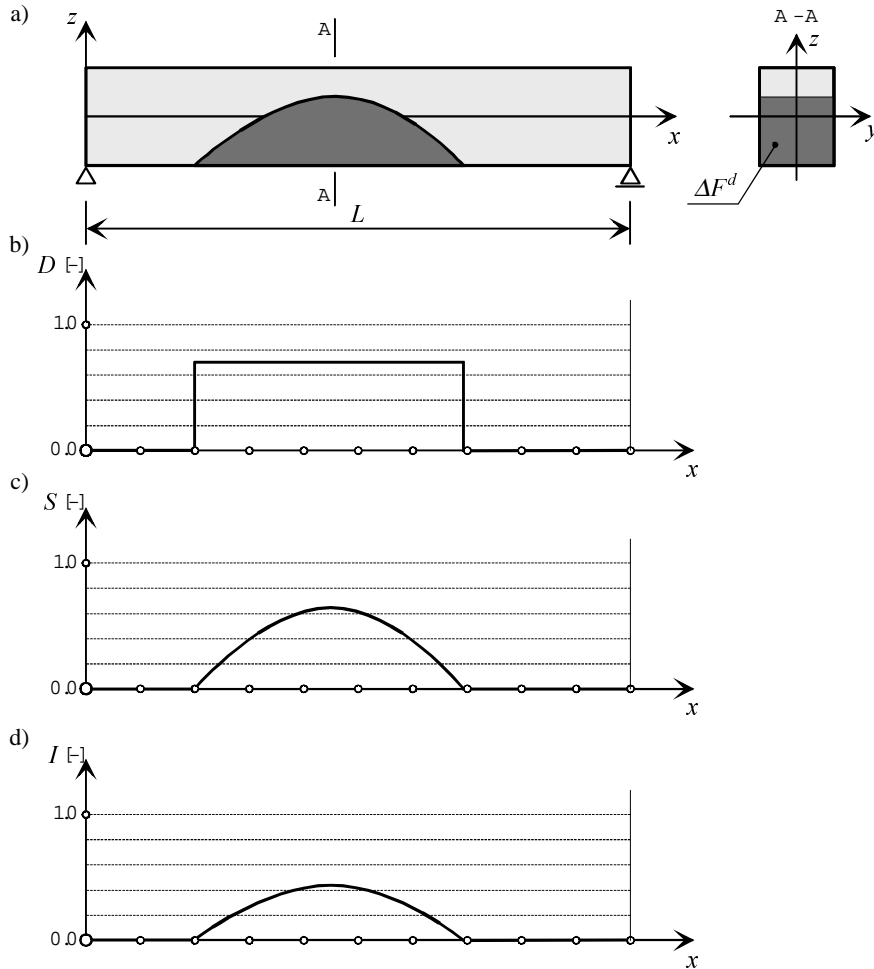
$S^d(x) = \Delta F^d(x)/F(x)$ – *funkcja strefy uszkodzenia* określająca, jaka część przekroju poprzecznego elementu jest objęta destrukcją w poszczególnych przekrojach elementu,

$\Delta F^d(x)$ – objęte uszkodzeniem pole przekroju poprzecznego elementu [m^2],

$F(x)$ – zaprojektowane pole przekroju poprzecznego elementu [m^2].

Funkcja poziomu uszkodzenia $D^d(x)$ we wzorze (3.17) jest znormalizowaną miarą pogorszenia cech fizycznych i chemicznych materiału w uszkodzonej strefie przekroju poprzecznego elementu. W przypadku zróżnicowanego poziomu destrukcji na objętym uszkodzeniem obszarze ΔF^d w przekroju o współrzędnej x we wzorze (3.17) należy przyjmować średnią wartość poziomu uszkodzenia. Poziom destrukcji może być definiowany jako wartość liczbowa z przedziału od 0,0 (cechy materiału zgodne z projektowanymi) do 1,0 (kompletna destrukcja materiału). Przykład definiowania

funkcji intensywności uszkodzenia $I^d(x)$ na podstawie funkcji poziomu uszkodzenia $D^d(x)$ oraz funkcji strefy uszkodzenia $S^d(x)$ przedstawiono na rys. 3.12. W prezentowanym przykładzie przyjęto dla uproszczenia, że w całym uszkodzonym obszarze poziom uszkodzenia jest stały (rys. 3.12b).



Rys. 3.12. Przykład modelowania uszkodzeń typu *destrukcja materiału*:
 a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja poziomu uszkodzenia $D^d(x)$,
 c) funkcja strefy uszkodzenia $S^d(x)$, d) funkcja intensywności uszkodzenia $I^d(x)$

W związku z rozmytym charakterem pojęcia *poziom destrukcji materiału* (patrz tab. 3.7) efektywnym rozwiązaniem jest także zastosowanie do opisu poziomu

uszkodzenia wartości lingwistycznych. Wynikowa funkcja intensywności uszkodzeń $I^d(x)$ jest w takim rozwiązaniu określana metodą wnioskowania rozmytego na podstawie funkcji $D^d(x)$ o wartościach lingwistycznych oraz funkcji $S^d(x)$.

3.5.2.4. Utrata ciągłości materiału

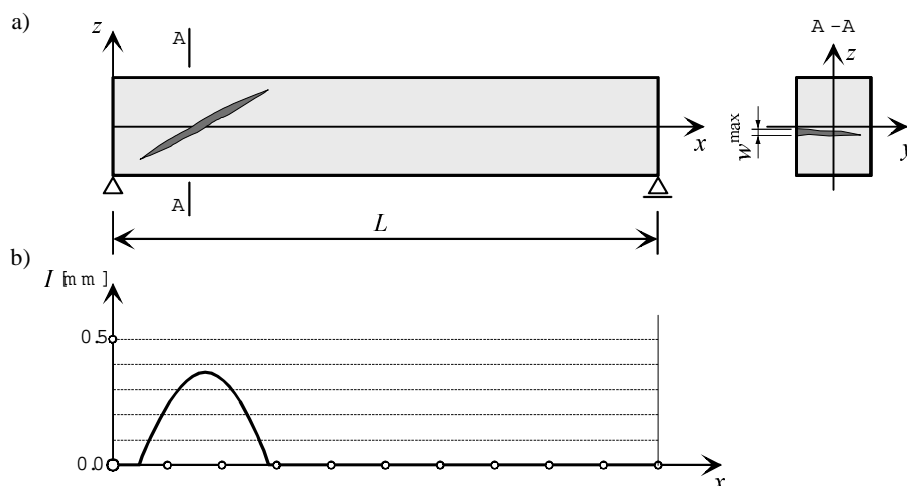
W odniesieniu do konstrukcji stalowych i żeliwnych funkcja intensywności uszkodzeń typu *utrata ciągłości materiału* może być przedstawiona w postaci:

$$I^c(x) = \frac{\Delta F^c(x)}{F(x)} \quad (3.18)$$

gdzie:

$\Delta F^c(x)$ – pole przekroju poprzecznego, na którym wystąpiła utrata ciągłości materiału elementu [m^2],

$F(x)$ – zaprojektowane pole przekroju poprzecznego elementu [m^2].



Rys. 3.13. Przykład modelowania uszkodzeń typu *utrata ciągłości materiału* (kategoria: rysy ukośne):

a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I^c(x)$

W konstrukcjach betonowych, kamiennych i ceglanych jako miarę uszkodzenia przyjęto rozwartość rys (pęknięć), a funkcja intensywności uszkodzenia ma postać:

$$I^c(x) = w^{\max}(x) \quad (3.19)$$

gdzie:

$w^{\max}(x)$ – maksymalna rozwartość rysy (pęknięcia) w przekroju o współrzędnej x [mm].

W przypadku występowania w tym samym przekroju poprzecznym więcej niż jednej rysy:

$$I^c(x) = \text{MAX}[w_1^{\max}(x), w_2^{\max}(x), \dots, w_n^{\max}(x)] \quad (3.20)$$

Przykład modelowania intensywności uszkodzenia typu *utrata ciągłości materiału* pokazano na rys. 3.13. Miarą intensywności uszkodzenia w postaci ukośnej rysy jest jej rozwartość.

3.5.2.5. Ubytki materiału

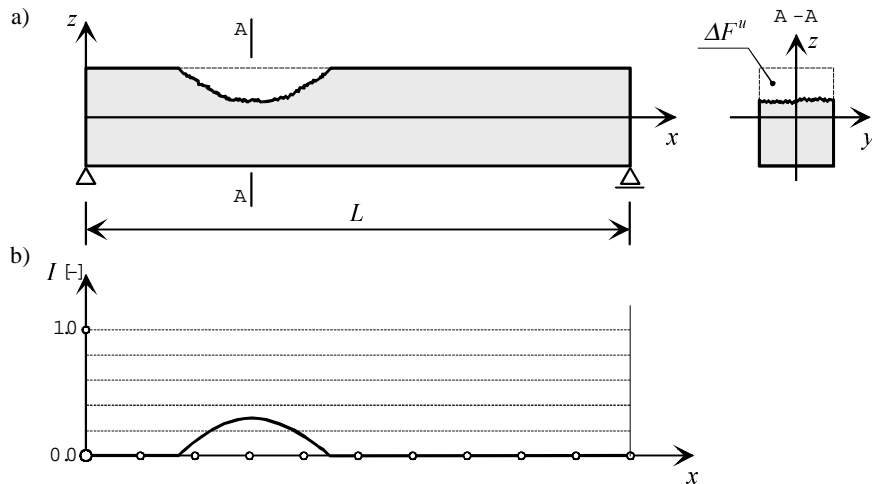
Funkcję intensywności uszkodzeń należących do typu *ubytki materiału* można zapisać ogólnym wzorem (rys. 3.14):

$$I^u(x) = \frac{\Delta F^u(x)}{F(x)} \quad (3.21)$$

gdzie:

$\Delta F^u(x)$ – ubytek pola powierzchni materiału w przekroju poprzecznym elementu [m^2],

$F(x)$ – zaprojektowane pole przekroju poprzecznego elementu [m^2].



Rys. 3.14. Przykład modelowania uszkodzeń typu *ubytki materiału*: a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I^u(x)$

Modelowanie ubytków materiału jest zróżnicowane dla poszczególnych materiałów konstrukcyjnych i obejmuje:

- w konstrukcjach z betonu niezbrojonego – ubytki betonu ($\Delta F_b^u(x)$),
- w konstrukcjach z betonu zbrojonego – ubytki betonu ($\Delta F_b^u(x)$), ubytki zbrojenia głównego ($\Delta F_z^u(x)$) oraz ubytki zbrojenia pomocniczego ($\Delta F_z^u(x)$),
- w konstrukcjach z betonu sprężonego – ubytki betonu ($\Delta F_b^u(x)$), ubytki zbrojenia głównego ($\Delta F_z^u(x)$), ubytki zbrojenia pomocniczego ($\Delta F_z^u(x)$) oraz ubytki materiału cięgien sprężających ($\Delta F_c^u(x)$),
- w konstrukcjach stalowych i żeliwnych – ubytki materiału elementów konstrukcyjnych ($\Delta F_s^u(x)$),
- w konstrukcjach murowanych – ubytki materiału konstrukcji ceglanych i kamiennych ($\Delta F_m^u(x)$).

3.5.2.6. Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych

Intensywność wszystkich kategorii *uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych* można przedstawić w postaci:

$$I^a(x) = D^a(x)S^a(x) = D^a(x)\frac{\Delta F^a(x)}{F^a(x)} \quad (3.22)$$

gdzie:

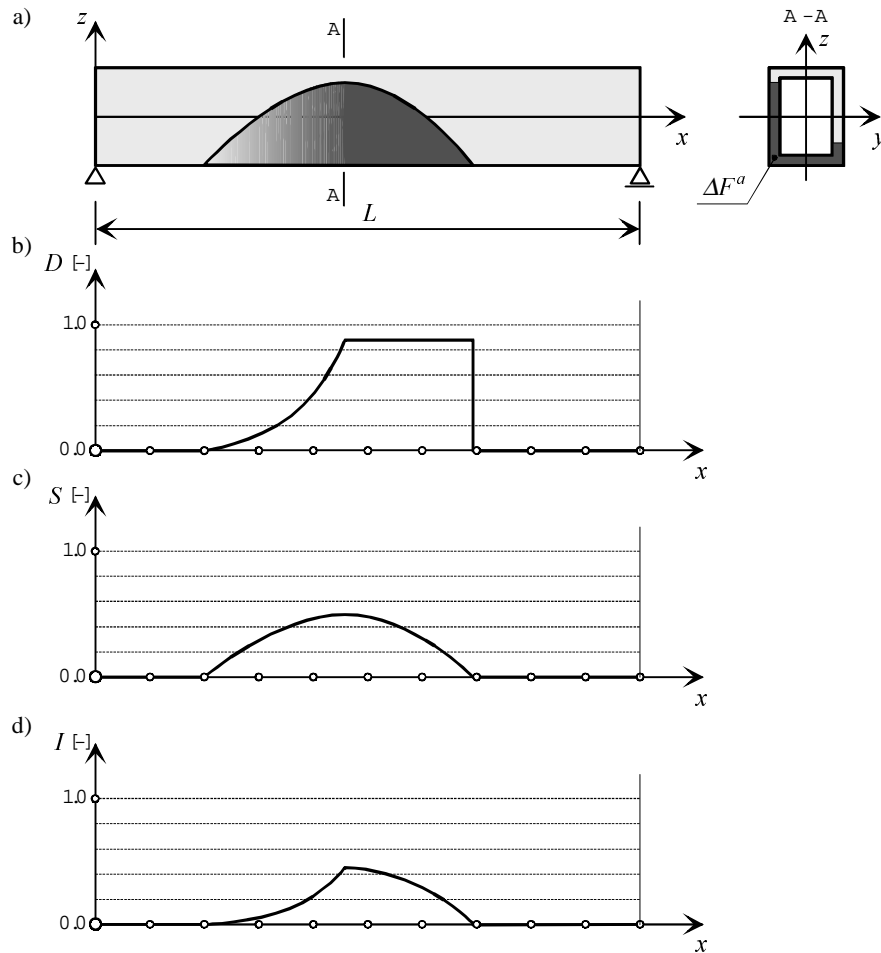
$D^a(x)$ – bezwymiarowa *funkcja poziomu uszkodzenia* określająca stopień uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych w poszczególnych przekrojach elementu,

$S^a(x) = \Delta F^a(x)/F^a(x)$ – *funkcja strefy uszkodzenia* określająca, jaka część warstwy zabezpieczenia antykorozyjnego jest objęta uszkodzeniem w poszczególnych przekrojach elementu,

$\Delta F^a(x)$ – objęta uszkodzeniem powierzchnia przekroju poprzecznego warstwy zabezpieczenia antykorozyjnego elementu (w przekroju o współrzędnej x) [m^2],

$F^a(x)$ – zaprojektowana powierzchnia przekroju poprzecznego warstwy zabezpieczenia antykorozyjnego elementu (w przekroju o współrzędnej x) [m^2].

Na rysunku 3.15 przedstawiono przykład modelowania intensywności uszkodzeń otuliny zbrojenia. Poziom zaawansowania uszkodzenia $D^a(x)$ na długości rozpatrywanego elementu jest zróżnicowany (rys. 3.15b), tak jak i wielkość strefy uszkodzenia $S^a(x)$ (rys. 3.15c). Wynikową funkcję intensywności uszkodzenia $I^a(x)$ prezentuje rys. 3.15d.



Rys. 3.15. Przykład modelowania uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych:
 a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja poziomu uszkodzenia $D^a(x)$,
 c) funkcja strefy uszkodzenia $S^a(x)$, d) funkcja intensywności uszkodzenia $I^a(x)$

Poziom uszkodzenia $D^a(x)$ występujący we wzorze (3.22) jest znormalizowaną miarą zaawansowania uszkodzenia i może być definiowany przy użyciu wartości liczbowych z przedziału od 0,0 (parametry zabezpieczeń zgodne z projektowanymi) do 1,0 (całkowita dysfunkcja zabezpieczeń antykorozyjnych).

Ze względu na rozmyty charakter niektórych informacji wykorzystywanych do opisu zaawansowania uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych (patrz tab. 3.7) w niektórych przypadkach niezbędne okazuje się zastosowanie wartości lingwistycznych do oceny i opisu poziomu uszkodzenia. W tego typu opisie

wynikowa funkcja intensywności uszkodzeń $I^a(x)$ jest określana metodą wnioskowania rozmytego na podstawie funkcji $D^a(x)$ o wartościach lingwistycznych oraz funkcji $S^a(x)$ o wartościach liczbowych.

3.5.2.7. Uszkodzenia związane ze zmianą położenia

W przypadku nadmiernych przemieszczeń przekraczających wartości określone w projekcie, ale nie powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów modelowanego elementu konstrukcji – jako miarę intensywności uszkodzenia przyjęto wartości przemieszczeń osi elementu – określone w odniesieniu do długości modelowanego elementu. Funkcja intensywności uszkodzenia może być zdefiniowana jako:

- dla przemieszczenia równoległego do osi elementu (kierunek równoległy do osi x):

$$I_x^p(x) = \frac{\Delta x^p(x)}{L} \quad (3.23)$$

- dla przemieszczenia prostopadłego do osi elementu (kierunek równoległy do osi y):

$$I_y^p(x) = \frac{\Delta y^p(x)}{L} \quad (3.24)$$

- dla przemieszczenia prostopadłego do osi elementu (kierunek równoległy do osi z):

$$I_z^p(x) = \frac{\Delta z^p(x)}{L} \quad (3.25)$$

gdzie:

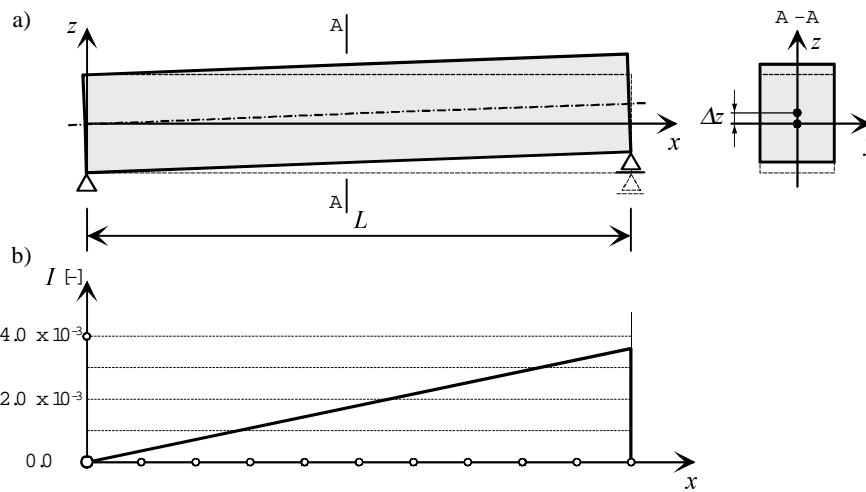
- $\Delta x^p(x)$ – przemieszczenie osi elementu w kierunku równoległym do osi x w wyniku niezgodnej z projektem zmiany jego położenia [m],
- $\Delta y^p(x)$ – przemieszczenie osi elementu w kierunku równoległym do osi y w wyniku niezgodnej z projektem zmiany jego położenia [m],
- $\Delta z^p(x)$ – przemieszczenie osi elementu w kierunku równoległym do osi z w wyniku niezgodnej z projektem zmiany jego położenia [m],
- L – długość modelowanego elementu [m].

Dla uszkodzeń należących do kategorii *obrót* jako miarę uszkodzenia przyjęto niezgodny z projektem kąt obrotu elementu dookoła osi x , wyznaczony w stosunku do położenia zaprojektowanego. Funkcja intensywności uszkodzenia może być wtedy opisana jako:

$$I_{\varphi}^p(x) = \Delta\varphi(x) \quad (3.26)$$

gdzie:

$\Delta\varphi(x)$ – niezgodny z projektem kąt obrotu elementu (w stosunku do położenia zaprojektowanego) w płaszczyźnie prostopadłej do osi x [rad].



Rys. 3.16. Przykład modelowania uszkodzenia związanego ze zmianą położenia:
a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I_z^p(x)$

Przykład modelowania zmiany położenia dźwigara spowodowanej przemieszczeniem podpory przedstawiono na rys. 3.16.

3.5.2.8. Zanieczyszczenia

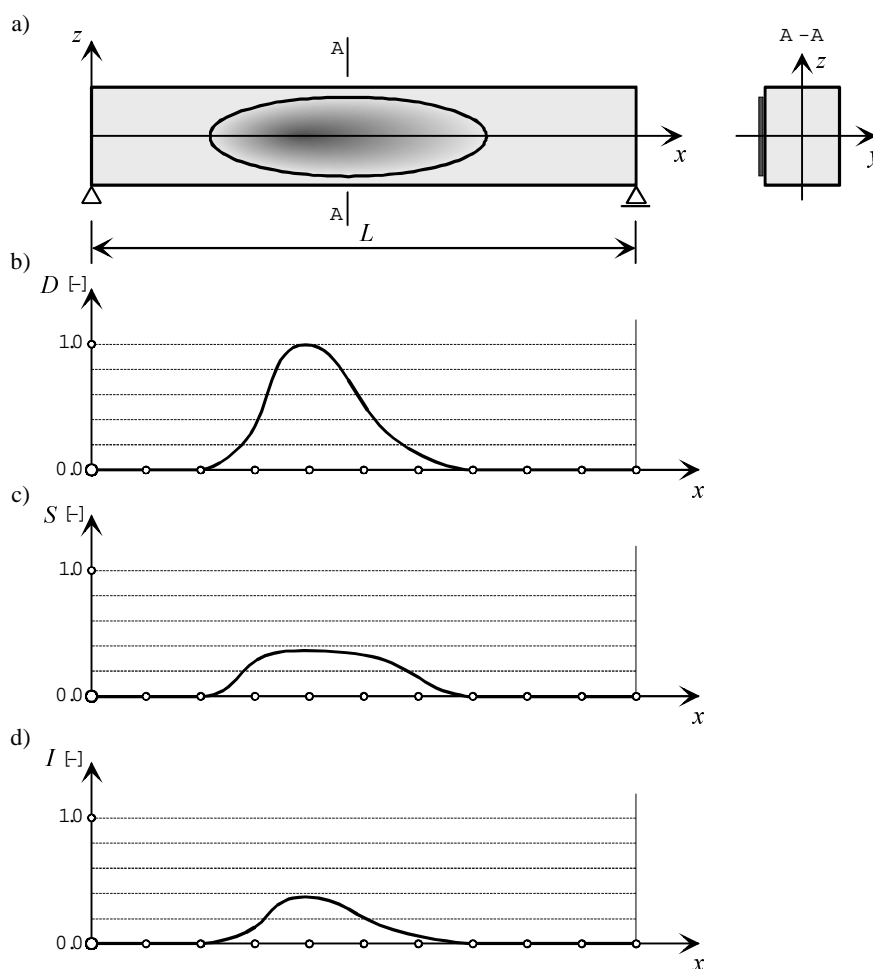
Funkcja intensywności uszkodzeń typu *zanieczyszczenia* ma następującą ogólną postać:

$$I^z(x) = D^z(x)S^z(x) = D^z(x) \frac{\Delta A^z(x)}{A(x)} \quad (3.27)$$

gdzie:

$D^z(x)$ – bezwymiarowa *funkcja poziomu uszkodzenia* określająca stopień zaawansowania uszkodzenia w poszczególnych przekrojach elementu,

$S^z(x)$ – funkcja strefy uszkodzenia określająca, jaka część zewnętrznej powierzchni elementu jest objęta uszkodzeniem w poszczególnych przekrojach, $\Delta A^z(x)$ – część pola zewnętrznej powierzchni rozpatrywanego elementu konstrukcji (na jednostkę długości), na której występują zanieczyszczenia [m^2/m], $A(x)$ – pole zewnętrznej powierzchni rozpatrywanego elementu konstrukcji (na jednostkę długości) [m^2/m].



Rys. 3.17. Przykład modelowania uszkodzeń typu *zanieczyszczenia*: a) uszkodzony element konstrukcji, b) funkcja poziomu uszkodzenia $D^z(x)$, c) funkcja strefy uszkodzenia $S^z(x)$, d) funkcja intensywności uszkodzenia $I^z(x)$

Poziom uszkodzenia $D^z(x)$ jest we wzorze (3.27) znormalizowaną miarą zaawansowania uszkodzenia i może być definiowany przy użyciu wartości liczbowych z przedziału od 0,0 (zanieczyszczenia nie występują) do 1,0 (bardzo zaawansowane zanieczyszczenia). Rysunek 3.17 przedstawia przykład modelowania rozpatrywanego typu uszkodzeń. Poziom zanieczyszczeń $D^z(x)$ w obszarze uszkodzenia jest zróżnicowany, z koncentracją w jego centrum (rys. 3.17b). Rozmiar strefy objętej zanieczyszczeniami $S^z(x)$ jest w przybliżeniu stały na długości uszkodzonego odcinka.

Do opisu zaawansowania uszkodzeń typu zanieczyszczenia wykorzystywane są głównie informacje typu rozmytego, uzyskane na podstawie oceny wizualnej (patrz tab. 3.7). Naturalnym rozwiązaniem jest w tej sytuacji wykorzystanie wartości lingwistycznych do oceny poziomu uszkodzenia. W przypadku stosowania takiego opisu funkcja intensywności uszkodzeń $I^z(x)$ jest określana metodą wnioskowania rozmytego na podstawie funkcji $D^z(x)$ o wartościach lingwistycznych oraz funkcji $S^z(x)$ o wartościach liczbowych.

3.5.3. Rozległość uszkodzeń

W przypadku wykorzystywania modeli geometrii typu E^1 rozległość uszkodzenia jest opisywana *funkcją rozległości uszkodzenia* $R(x)$, definiowaną na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia $I(x)$ jako:

$$R(x) = \begin{cases} 1 & \text{dla } I(x) \neq 0 \\ 0 & \text{dla } I(x) = 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

3.5.4. Lokalizacja uszkodzeń

Miejsce zlokalizowania uszkodzenia przy wykorzystywaniu modelu geometrii typu E^1 jest opisywane przez określenie:

- części składowej lub elementu obiektu, którego uszkodzenie dotyczy,
- *funkcji lokalizacji uszkodzenia* $L(x)$ określającej położenie uszkodzenia na długości elementu, a definiowanej na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia $I(x)$ zgodnie z zależnościami:

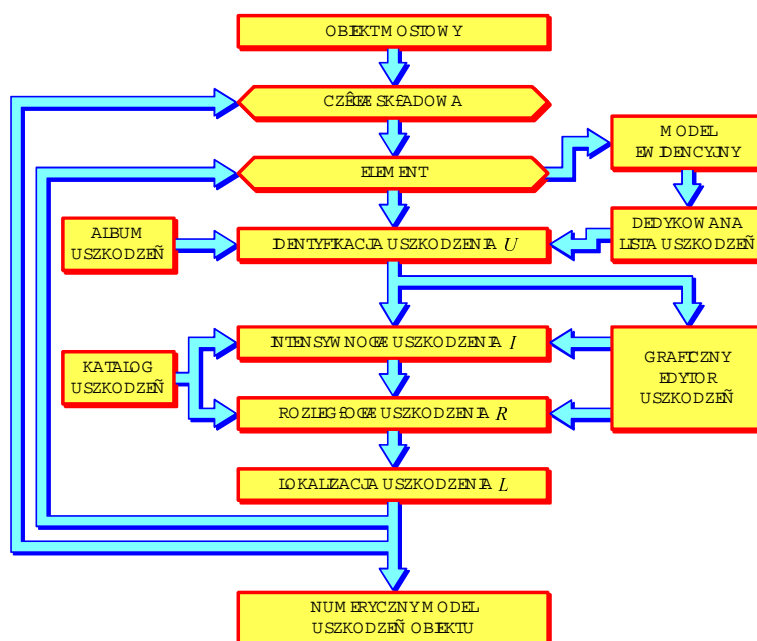
$$L(x) = \begin{cases} 1 & \text{dla } I(x) \neq 0 \\ 0 & \text{dla } I(x) = 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

3.5.5. Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń

Przejście od zastosowań modeli geometrii typu E^0 do modeli typu E^1 wydaje się bardzo istotnym skokiem jakościowym w zakresie zwiększania precyzji numerycznego modelowania obiektów i związanych z nimi procesów. Większa dokładność modelu uszkodzeń zapewnia możliwość uściślenia ocen kondycji obiektów, a w rezultacie zwiększenie efektywności systemu wspomagającego zarządzanie obiektami mostowymi.

Funkcjonalny schemat organizacji procesu numerycznego modelowania uszkodzeń przy wykorzystywaniu modelu geometrii typu E^1 przedstawia rys. 3.18. Kolejne etapy tworzenia modelu uszkodzeń to:

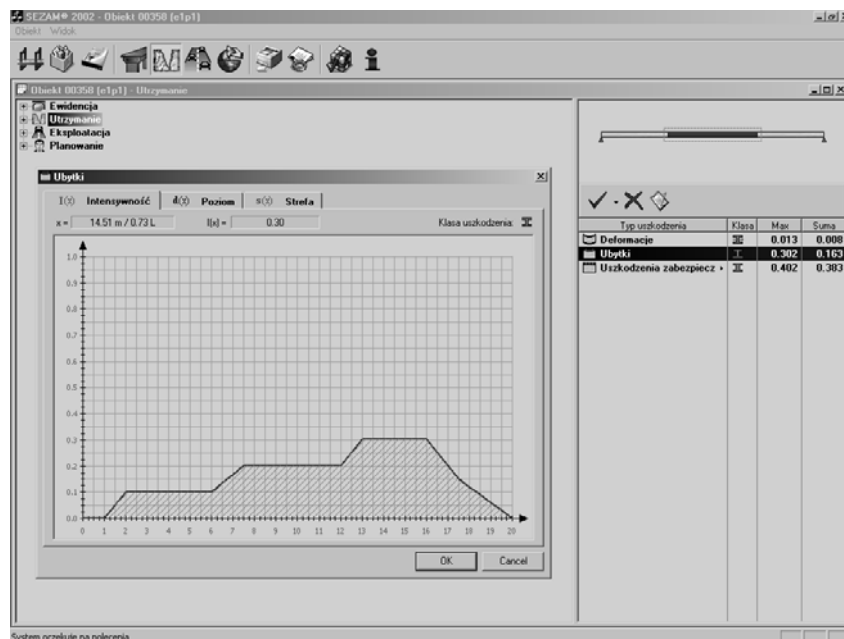
- wybór z bazy danych systemu ocenianego obiektu, jego części składowej lub elementu;
- automatyczne wygenerowanie przez system komputerowy listy uszkodzeń dedykowanej ocenianemu elementowi, a utworzonej na podstawie parametrów technicznych zawartych w modelu ewidencyjnym (typ konstrukcji, rodzaj materiału itp.) poprzez wyselekcjonowanie z globalnej listy uszkodzeń;
- identyfikacja poszczególnych uszkodzeń zaobserwowanych w trakcie przeglądu obiektu, zgodnie z przyjętą systematyką – określenie typu, rodzaju, kategorii oraz klasy modelowanego uszkodzenia;



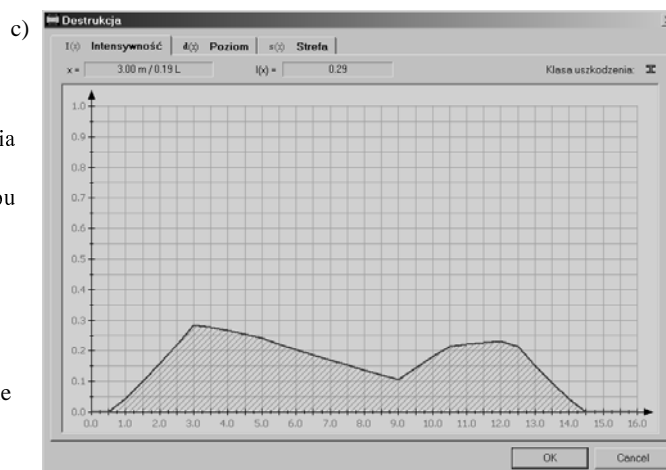
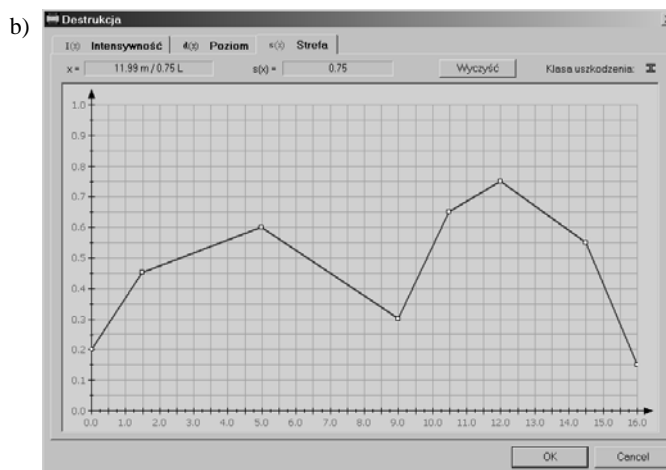
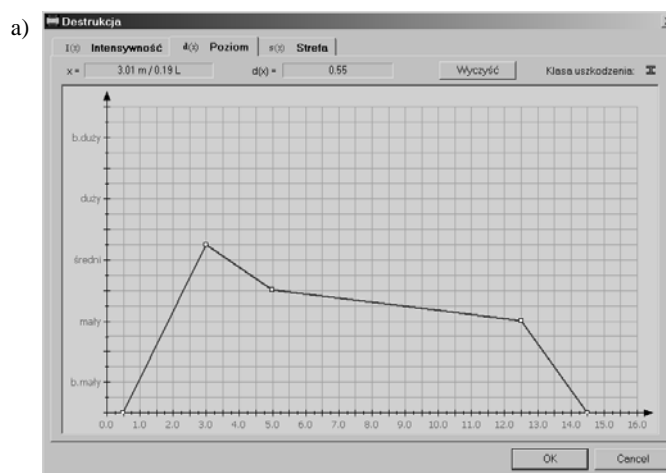
Rys. 3.18. Schemat funkcjonalny procesu numerycznego modelowania uszkodzeń – modele geometrii typu E^1

- zdefiniowanie funkcji intensywności $I(x)$ poszczególnych uszkodzeń, przy wykorzystaniu graficznego edytora uszkodzeń (rys. 3.19, rys. 3.20);
- automatyczne wygenerowanie przez system funkcji rozległości $R(x)$ oraz funkcji lokalizacji $L(x)$ uszkodzenia, na podstawie wcześniej wprowadzonych danych.

Na rysunku 3.19 przedstawiono przykład zastosowania graficznego edytora uszkodzeń do bezpośredniego określania funkcji *intensywności uszkodzeń* obiektów mostowych w systemie SEZAM. System ten, rozwijany przez autora od kilku lat, ma charakter doświadczalny i służy do pilotażowych implementacji oraz testowania rozwiązań z zakresu komputerowych systemów wspomagających zarządzanie mostami. Prezentowany przykład pokazuje sposób modelowania uszkodzeń typu *ubytki materiału* stalowych blachownicowych dźwigarów głównych przęsła mostowego. Funkcja *intensywności uszkodzenia* $I(x)$ jest tu modelowana bezpośrednio na ekranie komputera przez użytkownika systemu. Funkcja intensywności uszkodzenia jest definiowana dla poszczególnych klas uszkodzeń należących do typu *ubytki materiału*. Klasy te w prezentowanym przykładzie są zróżnicowane z uwagi na lokalizację ubytku w przekroju poprzecznym (dolna lub górna półka blachownicy, środek, równomierny ubytek po obwodzie przekroju itp.).



Rys. 3.19. Definiowanie funkcji intensywności uszkodzeń przy użyciu edytora graficznego (system SEZAM)



Rys. 3.20. Przykład zastosowania edytora graficznego systemu SEZAM do opisu uszkodzeń typu *destrukcja materiału*:

- definiowanie funkcji poziomu uszkodzenia $D(x)$,
- definiowanie funkcji strefy uszkodzenia $S(x)$,
- wygenerowana automatycznie funkcja intensywności uszkodzenia $I(x)$

W prezentowanej aplikacji zastosowano aproksymację przebiegu funkcji odcinkami o zmienności liniowej, co – biorąc pod uwagę możliwość dowolnego zwiększania liczby punktów węzłowych – zapewnia wystarczającą praktycznie dokładność modelowania. W ogólnym przypadku funkcje intensywności uszkodzeń mogą być opisywane przy użyciu dowolnych funkcji ciągłych na długości poszczególnych elementów (e^1).

Przykład pokazany na rys. 3.20 ilustruje sposób modelowania uszkodzeń w postaci destrukcji materiału. Funkcja *intensywności uszkodzenia* $I(x)$ (rys. 3.20c) jest tu generowana automatycznie na podstawie funkcji *poziomu uszkodzenia* $D(x)$ (rys. 3.20a) oraz funkcji *strefy uszkodzenia* $S(x)$ (rys. 3.20b), zdefiniowanych przy użyciu graficznego edytora. W prezentowanym przykładzie zastosowano wartości lingwistyczne do określania poziomu uszkodzenia.

Graficzny sposób definiowania funkcji opisujących uszkodzenia pozwala na uniknięcie konieczności określania jawnej postaci tych funkcji, a dzięki temu umożliwia szybkie i efektywne tworzenie precyzyjnych numerycznych modeli uszkodzeń.

3.6. Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^2

3.6.1. Wprowadzenie

Logicznym rozwinięciem przedstawionej wyżej metodyki numerycznego modelowania uszkodzeń jest jej zastosowanie w powiązaniu z modelami geometrii typu E^2 . Użycie dokładniejszych modeli geometrii obiektów mostowych umożliwia precyzyjniejszy opis parametrów uszkodzeń, które przy stosowaniu elementów (e^2) mogą być definiowane jako funkcje dwóch zmiennych. Wykorzystywanie modeli geometrii typu E^2 wymaga stosowania zarówno bardziej zaawansowanego modelu ewidencyjnego, jak i specjalistycznych edytorów graficznych wspomagających opis uszkodzeń. Podejście takie stawia odpowiednio wyższe wymagania przed projektantami i wykonawcami systemu wspomagającego, ale w zamian za to użytkownicy uzyskują narzędzie umożliwiające naturalne, niemal intuicyjne modelowanie uszkodzeń.

3.6.2. Intensywność uszkodzeń

3.6.2.1. Uwagi ogólne

Przedstawiona w poprzednich podrozdziałach metodyka opisu intensywności uszkodzeń ma charakter ogólny i może być stosowana także w przypadku modeli

geometrii typu E^2 . Odwzorowanie rozkładu intensywności uszkodzeń na powierzchni elementu (e^2) wymaga użycia funkcji dwóch zmiennych. Dotyczy to:

- *funkcji intensywności uszkodzenia* $I(x, y)$, której wartości są równe intensywności modelowanego uszkodzenia w poszczególnych punktach elementu (e^2);
- *funkcji poziomu uszkodzenia* $D(x, y)$ określającej stopień (poziom) zaawansowania uszkodzenia w poszczególnych punktach elementu (e^2);
- *funkcji strefy uszkodzenia* $S(x, y)$ określającej dla poszczególnych punktów elementu (e^2) wielkość objętej uszkodzeniem części grubości elementu.

Od wymienionych wyżej funkcji wymaga się, aby były funkcjami ciągłymi, określonymi na całej powierzchni elementu dwuwymiarowego. Funkcje te dla każdego elementu (e^2) są definiowane w lokalnym układzie współrzędnych x, y, z , którego płaszczyzna xy pokrywa się z powierzchnią środkową elementu.

3.6.2.2. Deformacje

Jako miary intensywności uszkodzenia przyjęto wartości niezgodnych z projektem przemieszczeń powierzchni środkowej analizowanego elementu, powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów rozpatrywanego elementu, odniesione do długości elementu. Funkcja intensywności uszkodzenia może być ogólnie zapisana w postaci:

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi x :

$$I_x^f(x, y) = \frac{\Delta x^f(x, y)}{L} \quad (3.30)$$

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi y :

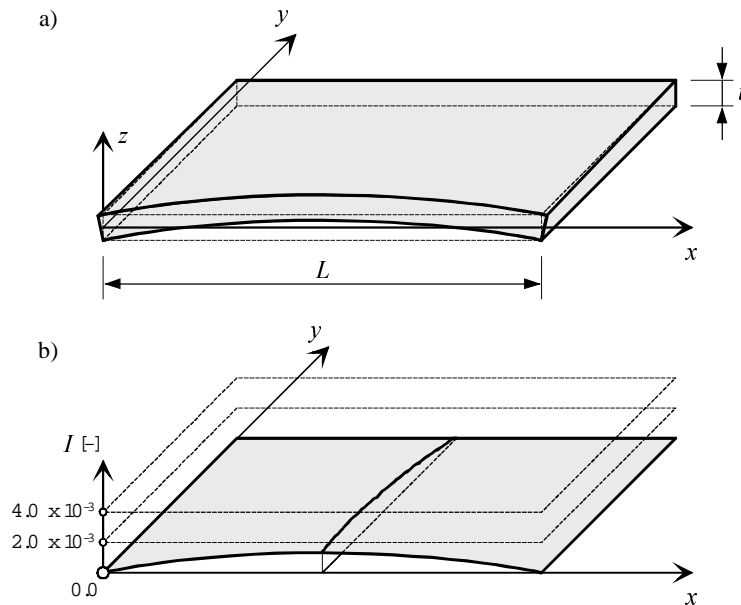
$$I_y^f(x, y) = \frac{\Delta y^f(x, y)}{L} \quad (3.31)$$

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi z (rys. 3.21):

$$I_z^f(x, y) = \frac{\Delta z^f(x, y)}{L} \quad (3.32)$$

gdzie:

- $\Delta x^f(x, y)$ – przemieszczenie punktu powierzchni środkowej w kierunku równoległym do osi x w wyniku niezgodnej z projektem deformacji [m],
- $\Delta y^f(x, y)$ – przemieszczenie punktu powierzchni środkowej w kierunku równoległym do osi y w wyniku niezgodnej z projektem deformacji [m],
- $\Delta z^f(x, y)$ – przemieszczenie punktu powierzchni środkowej w kierunku równoległym do osi z w wyniku niezgodnej z projektem deformacji [m],



Rys. 3.21. Przykład modelowania uszkodzenia typu *deformacje*: a) uszkodzony element obiektu, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I_z^f(x, y)$

L – długość modelowanego elementu mierzona równoległe do głównego kierunku jego pracy [m].

3.6.2.3. Destrukcja materiału

Funkcja intensywności uszkodzenia typu *destrukcja materiału* ma postać:

$$I^d(x, y) = D^d(x, y)S^d(x, y) = D^d(x, y) \frac{\Delta t^d(x, y)}{t(x, y)} \quad (3.33)$$

gdzie:

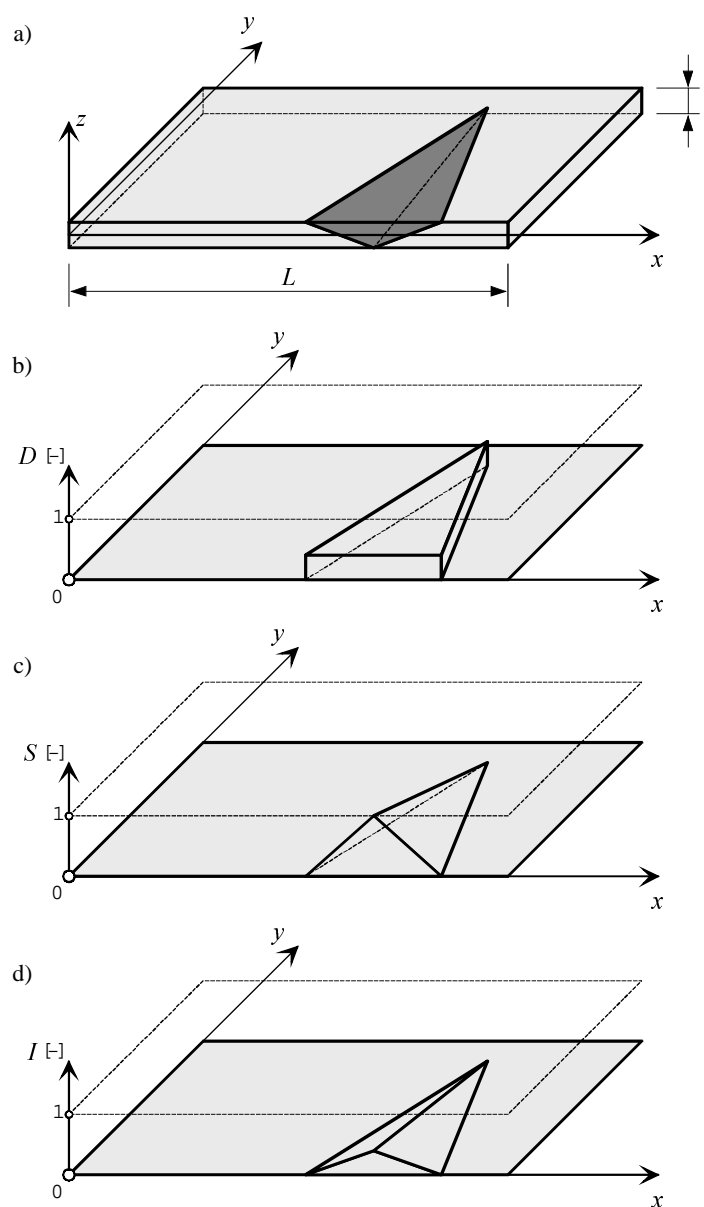
$D^d(x, y)$ – bezwymiarowa *funkcja poziomu uszkodzenia* określająca stopień destrukcji materiału w poszczególnych punktach elementu; funkcja ta może przyjmować wartości liczbowe z przedziału od 0,0 (cechy materiału zgodne z projektowanymi) do 1,0 (całkowita destrukcja materiału, utrata wartości konstrukcyjnych materiału) lub wartości lingwistyczne,

$S^d(x, y) = \Delta t^d(x, y)/t(x, y)$ – *funkcja strefy uszkodzenia* określająca, jaka część grubości elementu jest objęta degradacją,

$\Delta t^d(x, y)$ – objęta uszkodzeniem grubość elementu [m],

$t(x, y)$ – zaprojektowana grubość elementu [m].

Przykład modelowania uszkodzenia w postaci destrukcji materiału zaprezentowano na rys. 3.22.



Rys. 3.22. Przykład modelowania uszkodzeń typu *destrukcja materiału*:
 a) uszkodzony element obiektu, b) funkcja poziomu uszkodzenia $D^d(x, y)$,
 c) funkcja strefy uszkodzenia $S^d(x, y)$, d) funkcja intensywności uszkodzenia $I^d(x, y)$

3.6.2.4. Utrata ciągłości materiału

W odniesieniu do konstrukcji stalowych i żeliwnych funkcja intensywności uszkodzeń typu *utrata ciągłości materiału* może być opisana wzorem:

$$I^c(x, y) = \frac{\Delta t^c(x, y)}{t(x, y)} \quad (3.34)$$

gdzie:

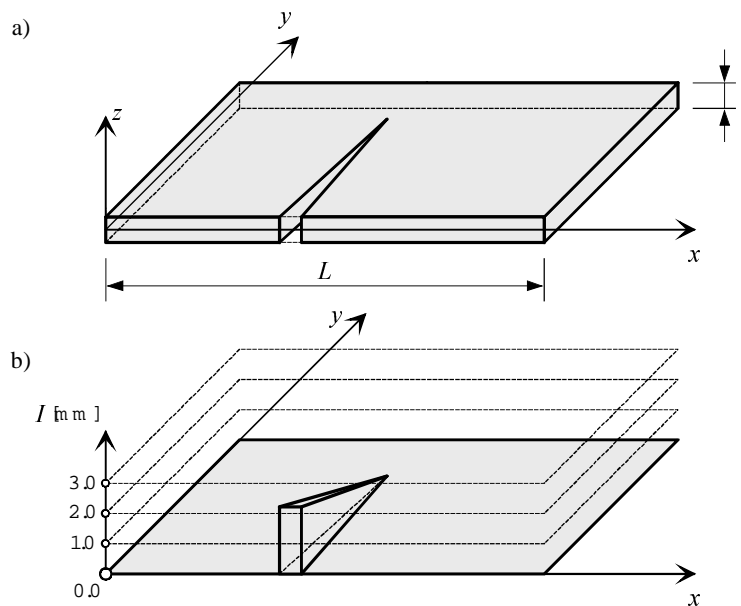
$\Delta t^c(x, y)$ – część grubości elementu, na której wystąpiła utrata ciągłości materiału [m],
 $t(x, y)$ – zaprojektowana grubość elementu [m].

W przypadku konstrukcji betonowych, kamiennych i ceglanych jako miarę uszkodzenia przyjęto rozwartość rys lub pęknięć, a funkcja intensywności uszkodzenia ma postać (rys. 3.23):

$$I^c(x, y) = w^{\max}(x, y) \quad (3.35)$$

gdzie:

$w^{\max}(x, y)$ – maksymalna rozwartość rysy (pęknięcia) w punkcie o współrzędnych x, y [mm].



Rys. 3.23. Przykład modelowania uszkodzenia typu *utrata ciągłości materiału*:

a) uszkodzony element, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I^c(x, y)$

3.6.2.5. Ubytki materiału

Modelowanie ubytków materiału jest zróżnicowane dla poszczególnych materiałów konstrukcyjnych i obejmuje:

- w konstrukcjach z betonu niezbrojonego – ubytki betonu,
- w konstrukcjach z betonu zbrojonego – ubytki betonu oraz ubytki zbrojenia głównego i pomocniczego,
- w konstrukcjach z betonu sprężonego – ubytki betonu, ubytki zbrojenia oraz ubytki materiału cięgien sprężających,
- w konstrukcjach stalowych i żeliwnych – ubytki materiału elementów konstrukcyjnych,
- w konstrukcjach murowanych – ubytki materiału konstrukcji ceglanych i kamiennych.

Funkcje intensywności ubytków betonu w konstrukcjach z betonu niezbrojonego, zbrojonego i sprężonego oraz ubytków materiału konstrukcji stalowych, żeliwnych i murowanych można opisać ogólnym wzorem (rys. 3.24):

$$I^u(x, y) = \frac{\Delta t^u(x, y)}{t(x, y)} \quad (3.36)$$

gdzie:

$\Delta t^u(x, y)$ – zmniejszenie grubości elementu w punkcie o współrzędnych x, y w wyniku ubytku materiału [m],

$t(x, y)$ – zaprojektowana grubość elementu w punkcie o współrzędnych x, y [m].

Funkcję intensywności uszkodzeń *ubytki materiału zbrojenia* można zapisać w postaci:

$$I^u(x, y) = \frac{\Delta F_z^u(x, y)}{F_z(x, y)} \quad (3.37)$$

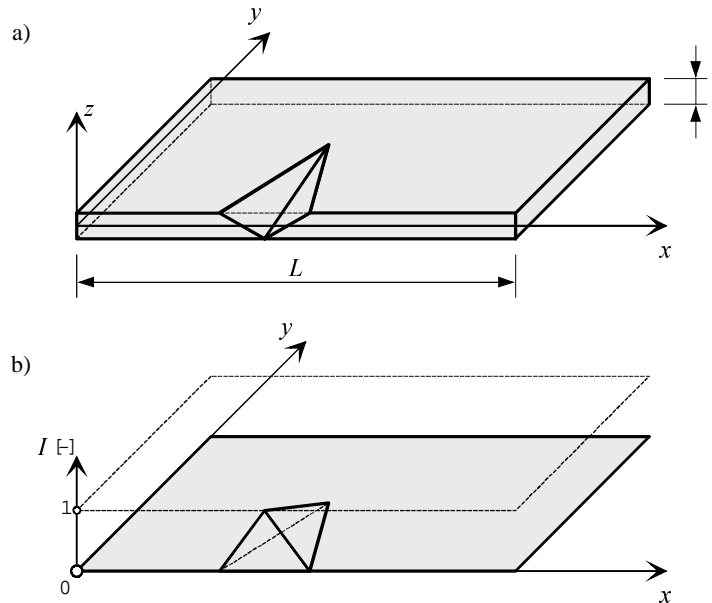
gdzie:

$\Delta F_z^u(x, y)$ – objęte uszkodzeniem pole powierzchni przekroju poprzecznego zbrojenia w przeliczeniu na jednostkę powierzchni elementu [cm^2/m^2],

$F_z(x, y)$ – zaprojektowane pole powierzchni przekroju poprzecznego zbrojenia w przeliczeniu na jednostkę powierzchni elementu [cm^2/m^2].

Analogicznie funkcja intensywności uszkodzeń *ubytki materiału cięgien sprężających* może być zapisana jako:

$$I^u(x, y) = \frac{\Delta F_c^u(x, y)}{F_s(x, y)} \quad (3.38)$$



Rys. 3.24. Przykład modelowania uszkodzeń typu *ubytki materiału*:
a) uszkodzony element, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I^u(x, y)$

gdzie:

$\Delta F_c(x, y)$ – objęte uszkodzeniem pole powierzchni przekroju poprzecznego cięgien sprężających w przeliczeniu na jednostkę powierzchni elementu [cm^2/m^2],

$F_c(x, y)$ – zaprojektowane pole powierzchni przekroju poprzecznego cięgien sprężających w przeliczeniu na jednostkę powierzchni elementu [cm^2/m^2].

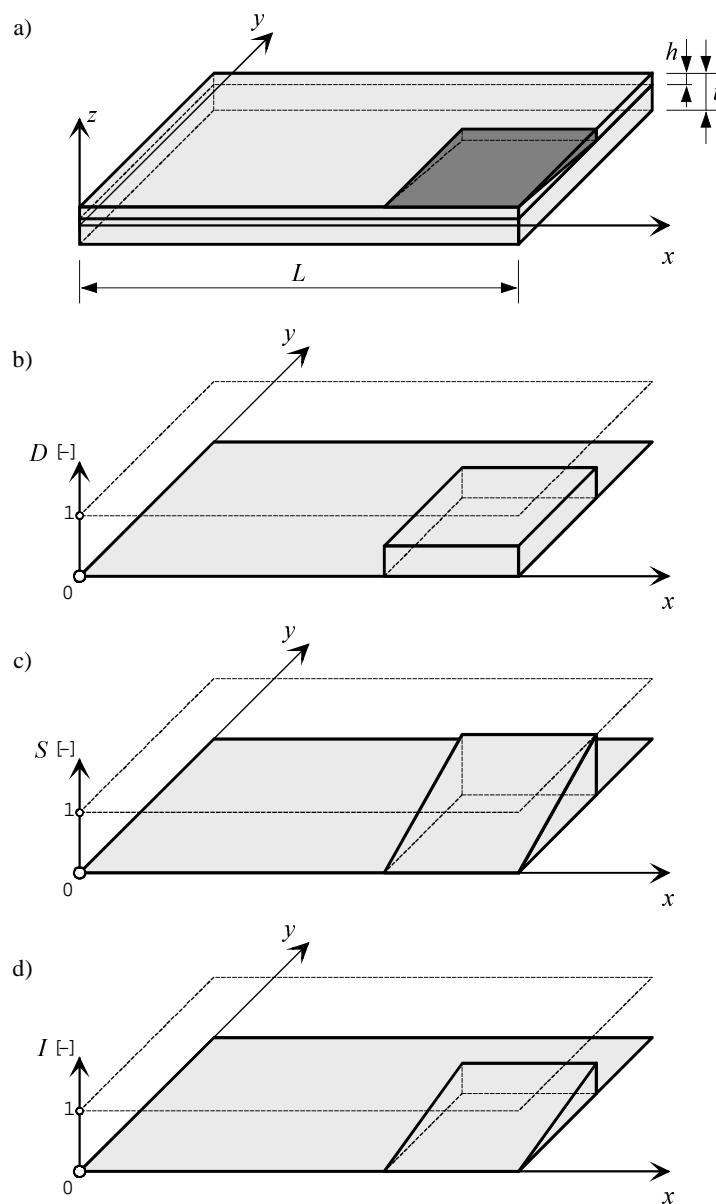
3.6.2.6. Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych

Intensywność *uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych* można opisać wzorem:

$$I^a(x, y) = D^a(x, y)S^a(x, y) = D^a(x, y) \frac{\Delta h^a(x, y)}{h(x, y)} \quad (3.39)$$

gdzie:

$D^a(x, y)$ – bezwymiarowa *funkcja poziomu uszkodzenia* określająca stopień uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych w poszczególnych punktach elementu (e^2); funkcja ta może przyjmować wartości liczbowe z przedziału od 0,0 (cechy zabezpieczenia zgodne z projektowanymi) do 1,0 (całkowita utrata właściwości zabezpieczających) lub wartości lingwistyczne,



Rys. 3.25. Przykład modelowania uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych: a) uszkodzony element, b) funkcja poziomu uszkodzenia $D^a(x, y)$, c) funkcja strefy uszkodzenia $S^a(x, y)$, d) funkcja intensywności uszkodzenia $I^a(x, y)$

$S^a(x, y) = \Delta h^a(x, y) / h(x, y)$ – funkcja strefy uszkodzenia określająca, jaka część grubości warstwy zabezpieczenia antykorozyjnego jest objęta uszkodzeniem w poszczególnych punktach elementu (e^2),

$\Delta h^a(x, y)$ – objęta uszkodzeniem grubość warstw zabezpieczenia antykorozyjnego elementu w punkcie o współrzędnych x, y [mm],

$h(x, y)$ – zaprojektowana grubość warstw zabezpieczenia antykorozyjnego elementu w punkcie o współrzędnych x, y [mm].

Sposób modelowania uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych prezentuje przykład przedstawiony na rys. 3.25.

3.6.2.7. Uszkodzenia związane ze zmianą położenia

W przypadku nadmiernych przemieszczeń, przekraczających wartości określone w projekcie, ale nie powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów elementu, jako miarę uszkodzenia przyjęto przemieszczenia powierzchni środkowej elementu odniesione do długości modelowanego elementu. Funkcja intensywności uszkodzenia może być wtedy zdefiniowana następująco:

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi x (rys. 3.26):

$$I_x^p(x, y) = \frac{\Delta x^p(x, y)}{L} \quad (3.40)$$

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi y :

$$I_y^p(x, y) = \frac{\Delta y^p(x, y)}{L} \quad (3.41)$$

- dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi z :

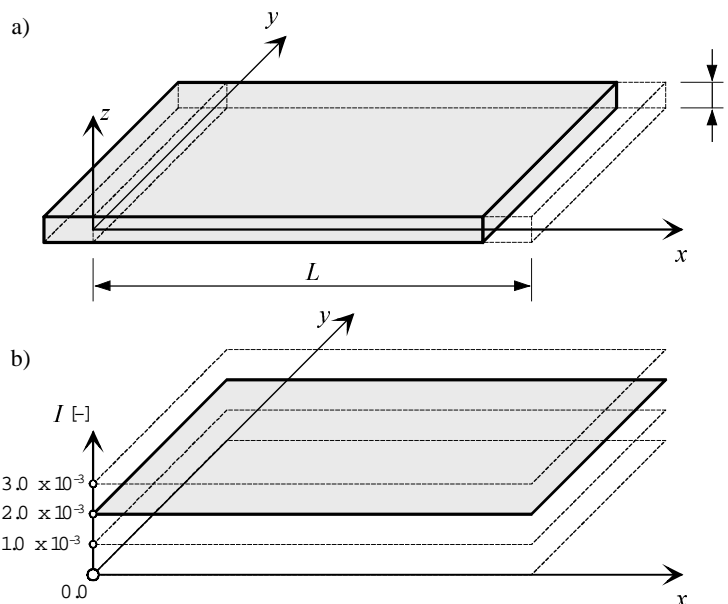
$$I_z^p(x, y) = \frac{\Delta z^p(x, y)}{L} \quad (3.42)$$

gdzie:

$\Delta x^p(x, y)$ – przemieszczenie punktu powierzchni środkowej elementu w kierunku równoległym do osi x w wyniku niezgodnej z projektem zmiany jego położenia [m],

$\Delta y^p(x, y)$ – przemieszczenie punktu powierzchni środkowej elementu w kierunku równoległym do osi y w wyniku niezgodnej z projektem zmiany jego położenia [m],

$\Delta z^p(x, y)$ – przemieszczenie punktu powierzchni środkowej elementu w kierunku równoległym do osi z w wyniku niezgodnej z projektem zmiany jego położenia [m],



Rys. 3.26. Przykład modelowania zmiany położenia elementu (przemieszczenie w kierunku równoległym do osi x): a) uszkodzony element, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I_x^p(x, y)$

L – długość modelowanego elementu mierzona równoległe do głównego kierunku jego pracy [m].

3.6.2.8. Zanieczyszczenia

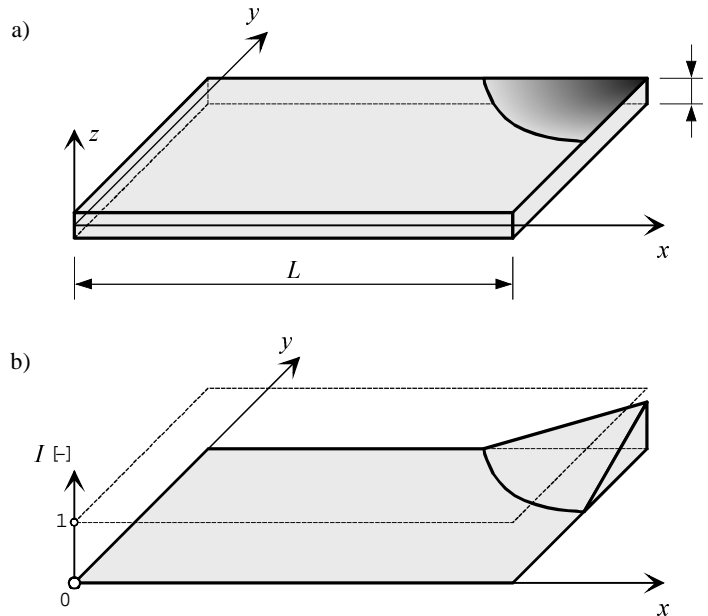
Funkcja intensywności uszkodzeń typu *zanieczyszczenia* może być określona jako:

$$I^z(x, y) = D^z(x, y) \quad (3.43)$$

gdzie:

$D^z(x, y)$ – bezwymiarowa *funkcja poziomu uszkodzenia* określająca stopień zaawansowania uszkodzenia w punkcie o współrzędnych x, y ; funkcja ta może przyjmować wartości liczbowe z przedziału od 0,0 (zanieczyszczenia nie występują) do 1,0 (uszkodzenia stwarzają zagrożenie awarią) lub wartości lingwistyczne.

Sposób określania funkcji intensywności uszkodzenia zilustrowano na rys. 3.27.



Rys. 3.27. Przykład modelowania uszkodzeń typu *zanieczyszczenia*: a) uszkodzony element, b) funkcja intensywności uszkodzenia $I^z(x, y)$

3.6.3. Rozległość uszkodzeń

Przestrzenny zasięg uszkodzenia jest modelowany *funkcją rozległości uszkodzenia* $R(x, y)$ definiowaną w następujący sposób:

$$R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{dla } I(x, y) \neq 0 \\ 0 & \text{dla } I(x, y) = 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

3.6.4. Lokalizacja uszkodzeń

Przy wykorzystywaniu modelu geometrii typu E^2 położenie uszkodzenia jest opisywane przez określenie:

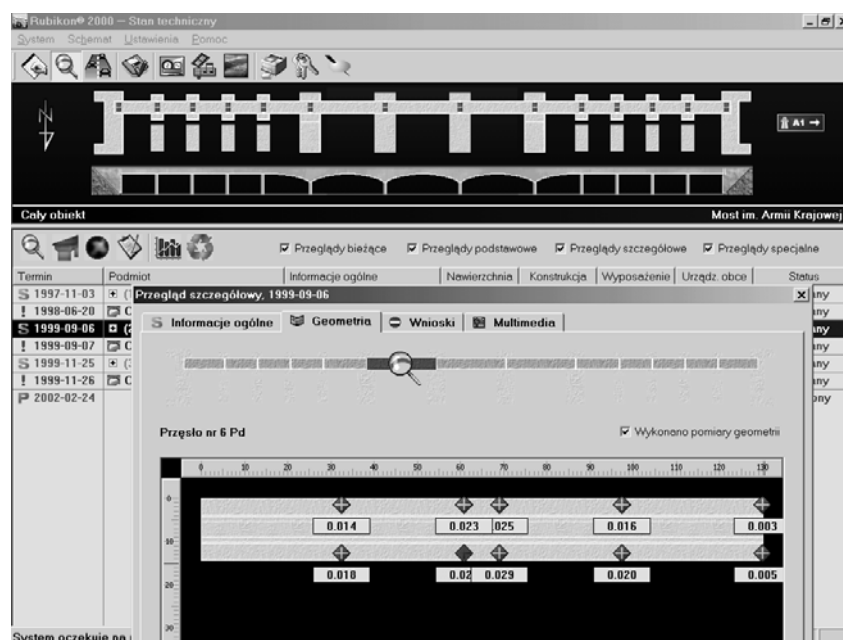
- części składowej lub elementu obiektu, którego uszkodzenie dotyczy,
- *funkcji lokalizacji uszkodzenia* $L(x, y)$ określającej położenie uszkodzenia na powierzchni elementu, a definiowanej na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia $I(x, y)$ zgodnie z zależnościami:

$$L(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{dla } I(x, y) \neq 0 \\ 0 & \text{dla } I(x, y) = 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

3.6.5. Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń

Wprowadzenie modeli geometrii typu E^2 udostępnia nowe, dokładniejsze narzędzia numerycznego opisu stanu obiektów. Systemy wykorzystujące takie modele wymagają stosunkowo dużych nakładów na opracowanie i wdrożenie, a także zwiększonego wkładu pracy w procesie tworzenia modeli obiektów. Można przypuszczać, że z wymienionych wyżej powodów wykorzystywanie modeli tego typu będzie w najbliższej przyszłości ograniczone do specjalnych obszarów zastosowań. Należy spodziewać się takich rozwiązań przede wszystkim w systemach wspomagających monitorowanie stanu obiektów szczególnie ważnych lub konstrukcji znajdujących się w bardzo złej kondycji, czyli tam gdzie jest wymagana wyjątkowa precyzja informacji.

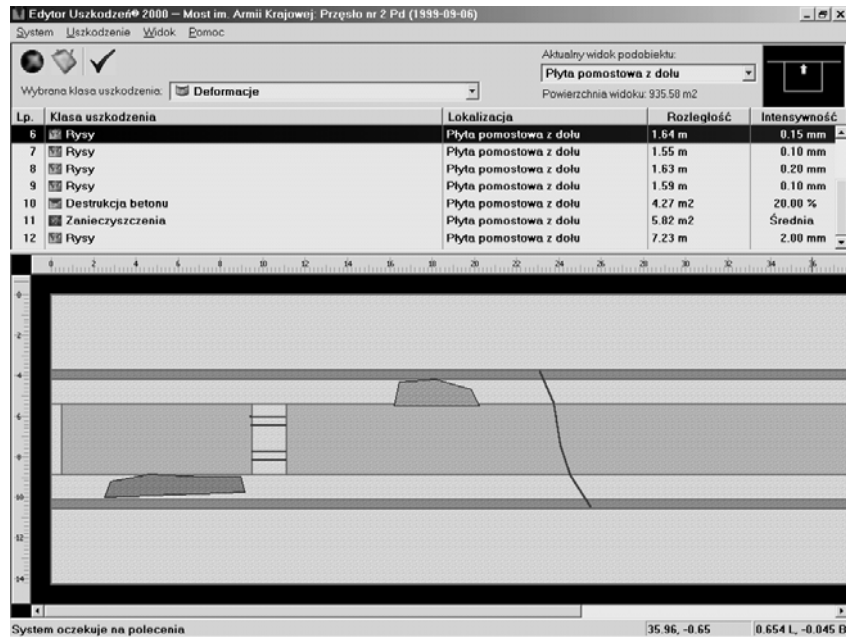
Ogólny schemat tworzenia numerycznego modelu uszkodzeń w przypadku geometrii typu E^2 jest analogiczny jak dla geometrii wykorzystującej elementy jednowymiarowe (rys. 3.18), z tym że parametry opisujące uszkodzenia są funkcjami dwóch zmiennych.



Rys. 3.28. System RUBIKON – sposób rejestracji zmian geometrii konstrukcji prześła

Praktyczne możliwości wykorzystywania zawansowanych modeli geometrii potwierdzono zastosowaniami w komputerowym systemie RUBIKON [31] wspomagającym monitorowanie stanu technicznego mostu przez Wisłę koło Torunia usytuowanego w ciągu autostrady A1. Przyjęto tu model geometrii klasy (e^2, p^3) , a do

tworzenia modelu uszkodzeń opracowano specjalistyczny edytor graficzny. Edytor ten umożliwia precyzyjne odwzorowanie lokalizacji wszystkich typów uszkodzeń, a także automatycznie wylicza ich charakterystyki geometryczne, np. długość uszkodzenia, pole powierzchni objętej uszkodzeniem.



Rys. 3.29. Opis parametrów uszkodzeń przy wykorzystaniu modelu geometrii klasy (e^2, p^3) – system RUBIKON [31]

Na rysunku 3.28 pokazano sposób numerycznego modelowania przemieszczeń konstrukcji na podstawie pomiarów geodezyjnych. Uzyskane dane są wykorzystywane do wygenerowania funkcji intensywności uszkodzeń typu *deformacje* oraz typu *zmiany położenia*. Rysunek 3.29 prezentuje przykład numerycznego modelu uszkodzeń stwierdzonych na dolnej powierzchni płyty pomostowej. Uszkodzenia są tu przedstawione w formie graficznej oraz w postaci listy zawierającej wartości parametrów stwierdzonych uszkodzeń.

3.7. Modelowanie uszkodzeń przy reprezentacji geometrii typu E^3

3.7.1. Wprowadzenie

Pełne trójwymiarowe odwzorowanie geometrii obiektu stwarza możliwość najbardziej precyzyjnego opisu uszkodzeń. Ogólne zasady modelowania uszkodzeń, zastosowane wcześniej w przestrzeni jedno- oraz dwuwymiarowej, mogą być uogólnione także na modele geometrii tworzone z elementów trójwymiarowych (e^3). Funkcje opisujące parametry uszkodzeń (np. funkcje intensywności uszkodzeń) są w ujęciu trójwymiarowym funkcjami trzech zmiennych. Funkcje te muszą być określone w całej objętości elementu oraz muszą spełniać warunki ciągłości w tym obszarze.

3.7.2. Intensywność uszkodzeń

Jednoznaczny opis intensywności poszczególnych typów uszkodzeń zapewnia zdefiniowanie dla każdego z nich *funkcji intensywności uszkodzenia* $I(x,y,z)$, której wartości są równe intensywności modelowanego uszkodzenia w każdym punkcie rozpatrywanego elementu. Poniżej przedstawiono zasady modelowania intensywności podstawowych typów uszkodzeń przy zastosowaniu modelu klasy (e^3, p^3) do odwzorowania geometrii rozpatrywanej części lub elementu obiektu:

- *Deformacje* – jako miarę intensywności uszkodzenia przyjęto wartości niezgodnych z projektem przemieszczeń powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów analizowanego elementu. Funkcja intensywności uszkodzenia może być zapisana w postaci:
 - o dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi x :

$$I_x^f(x, y, z) = \frac{\Delta x^f(x, y, z)}{L} \quad (3.46)$$

- o dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi y :

$$I_y^f(x, y, z) = \frac{\Delta y^f(x, y, z)}{L} \quad (3.47)$$

- o dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi z :

$$I_z^f(x, y, z) = \frac{\Delta z^f(x, y, z)}{L} \quad (3.48)$$

gdzie:

$\Delta x^f(x, y, z)$, $\Delta y^f(x, y, z)$, $\Delta z^f(x, y, z)$ – spowodowane deformacją, niezgodne z projektem przemieszczenia w kierunku równoległym do – odpowiednio – osi x , y oraz z [m],

L – długość modelowanego elementu mierzona równoległe do głównego kierunku jego pracy [m].

- *Destrukcja materiału* – funkcja intensywności uszkodzeń ma postać:

$$I^d(x, y, z) = D^d(x, y, z) \quad (3.49)$$

i określa stopień destrukcji materiału w każdym punkcie elementu (e^3). Funkcja ta może przyjmować wartości liczbowe z przedziału od 0,0 (cechy materiału zgodne z projektowanymi) do 1,0 (całkowita destrukcja materiału, utrata wartości konstrukcyjnych materiału) lub wartości lingwistyczne.

- *Utrata ciągłości materiału* – funkcja intensywności uszkodzeń $I^c(x, y, z)$ jest równa:

$$I^c(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{– w punktach, w których nastąpiła utrata ciągłości} \\ 0 & \text{– w pozostałej objętości elementu.} \end{cases} \quad (3.50)$$

- *Ubytki materiału* – funkcja intensywności uszkodzeń $I^u(x, y, z)$ jest równa:

$$I^u(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{– w punktach, w których nastąpił ubytek materiału} \\ 0 & \text{– w pozostałej objętości elementu.} \end{cases} \quad (3.51)$$

- *Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych* – funkcja intensywności uszkodzeń ma postać:

$$I^a(x, y, z) = D^a(x, y, z) \quad (3.52)$$

i może przyjmować wartości liczbowe z przedziału od 0,0 (cechy zabezpieczenia zgodne z projektowanymi) do 1,0 (całkowita utrata właściwości zabezpieczających) lub wartości lingwistyczne. Funkcja intensywności uszkodzenia może przyjmować wartości niezerowe w całej objętości warstw zabezpieczeń antykorozyjnych. W pozostałej części objętości rozpatrywanego elementu funkcja ta ma wartość równą zero.

- *Uszkodzenia związane ze zmianą położenia* – funkcja intensywności uszkodzenia może być zdefiniowana jako:
 - o dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi x :

$$I_x^p(x, y, z) = \frac{\Delta x^p(x, y, z)}{L} \quad (3.53)$$

- o dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi y :

$$I_y^p(x, y, z) = \frac{\Delta y^p(x, y, z)}{L} \quad (3.54)$$

- o dla przemieszczeń w kierunku równoległym do osi z :

$$I_z^p(x, y, z) = \frac{\Delta z^p(x, y, z)}{L} \quad (3.55)$$

gdzie:

$\Delta x^p(x, y, z)$, $\Delta y^p(x, y, z)$, $\Delta z^p(x, y, z)$ – spowodowane zmianą położenia, niezgodne z projektem przemieszczenia w kierunku równoległym do – odpowiednio – osi x , y oraz z [m],

L – długość modelowanego elementu mierzona równoległe do głównego kierunku jego pracy [m].

- *Zanieczyszczenia* – funkcja intensywności uszkodzeń ma postać:

$$I^z(x, y, z) = D^z(x, y, z) \quad (3.56)$$

i może przyjmować wartości liczbowe z przedziału od 0,0 (zanieczyszczenia nie występują) do 1,0 (bardzo zaawansowane zanieczyszczenia) lub wartości lingwistyczne. Funkcja ta może przyjmować wartości niezerowe na zewnętrznych powierzchniach konstrukcji, a wewnątrz elementów (e^3) jest równa zero.

3.7.3. Rozległość uszkodzeń

Rozległość uszkodzenia jest modelowana przy użyciu *funkcji rozległości uszkodzenia* $R(x, y, z)$, która jest równa:

$$R(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{dla } I(x, y, z) \neq 0 \\ 0 & \text{dla } I(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (3.57)$$

3.7.4. Lokalizacja uszkodzeń

Przy wykorzystywaniu modelu geometrii typu E^3 położenie uszkodzenia jest opisywane przez zdefiniowanie:

- części składowej lub elementu obiektu, którego uszkodzenie dotyczy,
- *funkcji lokalizacji uszkodzenia* $L(x, y, z)$ określającej położenie uszkodzenia, a definiowanej na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia: $I(x, y, z)$:

$$L(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{dla } I(x, y, z) \neq 0 \\ 0 & \text{dla } I(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (3.58)$$

3.7.5. Komputerowa implementacja modelu uszkodzeń

Techniczna realizacja przedstawionej wyżej metodyki numerycznego modelowania uszkodzeń w pełnej trójwymiarowej przestrzeni wymaga stosowania zaawansowanego sprzętu komputerowego oraz specjalistycznego oprogramowania. Wśród dostępnych dziś możliwości praktycznych implementacji komputerowych należy wyróżnić dwa rozwiązania:

- zastosowania trójwymiarowej grafiki komputerowej przy wykorzystaniu tradycyjnego zestawu sprzętu komputerowego, z prezentacją obrazu na ekranie monitora,
- wykorzystanie technik tzw. rzeczywistości wirtualnej do gromadzenia, przetwarzania i udostępniania danych zorientowanych w przestrzeni trójwymiarowej.

Należy podkreślić, że spośród wszystkich przedstawionych w tym rozdziale sposobów numerycznego modelowania uszkodzeń – to właśnie modele trójwymiarowe umożliwiają najbardziej precyzyjny opis uszkodzeń i ściśle zorientowanie ich w przestrzeni. Modele te pozwalają na naturalną reprezentację rzeczywistości bez konieczności wprowadzania założeń upraszczających, niezbędnych w przypadku modeli typu E^0 , E^1 oraz E^2 . Wymienione zalety są jednak osiągane kosztem zwiększonego nakładu pracy przy tworzeniu wspomagającego systemu komputerowego, a także są okupione utrudnieniami przy budowie ewidencyjnych modeli obiektów. W związku z powyższym obszar racjonalnego stosowania pełnego trójwymiarowego odwzorowania uszkodzeń będzie prawdopodobnie ograniczony do stosunkowo niewielkiej grupy obiektów, dla których modele uproszczone nie gwarantują wymaganej precyzji opisu.

Można przewidywać, że w nieodległej przyszłości użytkownicy systemów wspomagających będą mogli swobodnie dobierać sposób modelowania geometrii obiektu oraz związaną z nim metodykę numerycznej reprezentacji uszkodzeń. W odniesieniu do całego obiektu, a także jego poszczególnych części składowych lub elementów, będzie możliwe przyjmowanie różnych typów modeli, a o wyborze sposobu modelowania zadecydują jedynie indywidualne potrzeby procesu zarządzania utrzymaniem i eksploatacją każdego obiektu.

4. FUNKCJE EKSPERTOWE

4.1. Wprowadzenie

4.1.1. Funkcje ekspertowe w zarządzaniu obiektami mostowymi

Przedstawione wcześniej zasady doboru modelu geometrii obiektów i tworzenia ich modeli ewidencyjnych (rozdział 2.) oraz reguły modelowania uszkodzeń (rozdział 3.) umożliwiają stworzenie jednolitej numerycznej reprezentacji podstawowych informacji charakteryzujących obiekty mostowe. Dalsze przetwarzanie i wykorzystywanie zgromadzonych informacji jest ukierunkowane na zastosowania w procesach decyzyjnych. Podejmowanie decyzji znacznie ułatwia możliwość skorzystania z profesjonalnej ekspertyzy wspomagającej rozwiązywanie specjalistycznych problemów. Wymaga to wiedzy z różnych dziedzin, wykraczających często daleko poza inżynierię mostową. Wielu uczestników procesu zarządzania, a równocześnie użytkowników systemów wspomagających, nie dysponuje dostatecznie szeroką wiedzą i doświadczeniem gwarantującym efektywne gospodarowanie powierzoną infrastrukturą. W przypadku systemów o skali ogólnokrajowej, obejmujących dziesiątki tysięcy obiektów i wykorzystywanych przez setki użytkowników, zapewnienie jednolitości i skuteczności działań składających się na proces zarządzania ma szczególne znaczenie, ale jest też zadaniem wyjątkowo trudnym. Doświadczenia z wdrażania i eksploatacji takich systemów w naszym kraju przekonują, że szkolenia użytkowników, choć przyteczne i niezbędne, nie zapewniają wystarczającego ujednoczenia decyzji podejmowanych przez różnych użytkowników w takich samych warunkach.

Biorąc pod uwagę sformułowane wyżej potrzeby, a także możliwości wynikające z rozwoju inżynierii wiedzy, a w szczególności metod pozyskiwania, reprezentacji oraz przetwarzania wiedzy, podjęto próbę opracowania specjalistycznych narzędzi informatycznych wspomagających użytkowników systemu w podejmowaniu decyzji, a nazwanych *funkcjami ekspertowymi* [26], [27], [28], [29]. Przez pojęcie *funkcja ekspertowa* będzie tu rozumiana *część oprogramowania systemu wspomagającego zarządzanie infrastrukturą mostową, przeznaczona do rozwiązywania, z wykorzystaniem bazy danych oraz bazy wiedzy systemu, problemów wymagających profesjonalnej ekspertyzy.*

Zagadnienia związane z funkcjami czy też systemami ekspertowymi są przez większość autorów zaliczane do dziedziny tzw. sztucznej inteligencji (np. [14], [81], [84], [247]). Pojęcia inteligencja oraz sztuczna inteligencja nie mają powszechnie akceptowanych definicji, a liczne spotykane w literaturze określenia podkreślają różne aspekty zagadnienia. W niniejszej pracy pojęcie *inteligencja* jest rozumiane za [247] jako: „zespół zdolności umożliwiających człowiekowi korzystanie z nabytej wiedzy oraz skuteczne zachowanie się wobec nowych zadań i warunków przez określone reagowanie w danej sytuacji”, a określenie *sztuczna inteligencja* będzie odnoszone do systemów komputerowych posiadających cechy zbliżone do inteligencji człowieka.

Funkcje ekspertowe są szczególnym rodzajem systemów ekspertowych i charakteryzują się następującymi specyficznymi cechami:

- zintegrowanie merytoryczne i funkcjonalne z oprogramowaniem systemu wspomagającego zarządzanie,
- specjalistyczna, wąska dziedzina zastosowań,
- równoczesne wykorzystywanie bazy danych i dziedzinowej bazy wiedzy systemu do wspomagania podejmowania decyzji.

Funkcje ekspertowe przeznaczone do wykorzystywania w systemach wspomagających eksploatację mostów to generalnie narzędzia o charakterze doradczym, proponujące użytkownikowi rozwiązania, które powinien on ocenić i zaakceptować lub odrzucić. Najistotniejsze korzyści płynące ze stosowania funkcji ekspertowych to:

- możliwość poprawnego rozwiązywania specjalistycznych zagadnień bez osobistego udziału eksperta,
- możliwość wykorzystywania skumulowanej wiedzy wielu ekspertów, także z wielu różnych dziedzin, w jednym systemie ekspertowym,
- możliwość uzyskiwania natychmiastowego rozwiązania problemu,
- możliwość wykorzystywania tego samego systemu ekspertowego przez wielu użytkowników,
- powtarzalność rozwiązań zagadnienia przy tych samych danych wejściowych.

Podstawowe obszary potencjalnych zastosowań narzędzi ekspertowych w poszczególnych funkcjach użytkowych systemów wspomagających gospodarowanie mostami przedstawiono w tab. 4.1. Z punktu widzenia formy wyników specjalistycznej porady można wyróżnić cztery kategorie funkcji ekspertowych:

- diagnostyczne – zapewniające ocenę istniejącej sytuacji (np. ocena stanu technicznego, ocena nośności); przykłady takich narzędzi ekspertowych przedstawiono m.in. w pracach: [11], [65], [111], [154], [155], [227], [243], [270];
- prognostyczne – przewidujące zmiany istniejącego stanu w przyszłości (np. prognozowanie zmian stanu technicznego czy przydatności użytkowej);

przykłady zastosowań prezentują m.in. prace: [123], [125], [129], [171], [228], [251], [308], [326];

- planistyczne – proponujące sposób reakcji na istniejącą sytuację (np. planowanie zakresu i technologii działań utrzymaniowych, dystrybucja środków finansowych); doświadczenia z prac nad takimi narzędziami przedstawiono m.in. w pracach: [79], [80], [124], [225], [246], [336], [351];
- monitorujące – kontrolujące istniejący stan i porównujące go z zadanymi ograniczeniami (np. kontrola logicznej spójności danych, monitorowanie zmian parametrów konstrukcji) [103], [303], [350].

Tab. 4.1. Podstawowe obszary zastosowań funkcji ekspertowych w systemach wspomagających eksploatację obiektów mostowych

Lp.	Obszar zastosowań	Funkcja użytkowa systemu			
		Ewidencja	Utrzymanie	Użytkowanie	Planowanie
1.	Kontrola zgodności danych	✓	✓	✓	✓
2.	Rozpoznawanie obrazów	✓	✓	✓	
3.	Ocena stanu technicznego		✓		
4.	Monitorowanie stanu obiektu		✓	✓	✓
5.	Prognozowanie zmian stanu technicznego		✓		✓
6.	Ocena nośności obiektów			✓	✓
7.	Ocena przydatności użytkowej			✓	
8.	Prognozowanie zmian przydatności użytkowej			✓	✓
9.	Planowanie przewozów			✓	✓
10.	Dobór technologii rehabilitacji		✓		✓
11.	Planowanie działań utrzymaniowych		✓		✓

Większość systemów ekspertowych związanych z gospodarowaniem obiektami mostowymi to samodzielne aplikacje wykorzystywane głównie do celów badawczych i testowych – bardziej zaawansowane bywają stosowane w praktyce. Brak integracji z oprogramowaniem i zasobami systemów gospodarowania infrastrukturą mostową znacznie utrudnia szersze wykorzystywanie takich systemów ekspertowych we wspomaganie decyzji. Zdecydowana większość użytkowanych obecnie komputerowych systemów zarządzania mostami nie posiada wbudowanych narzędzi (funkcji) ekspertowych. Za wyjątki można uznać systemy PONTIS [268], [339] oraz BRIDGIT [147], [148], w których zastosowano narzędzia ekspertowe wspomagające prognozowanie zmian kondycji obiektów.

Funkcje ekspertowe mogą być zaliczone do tzw. *dedykowanych* systemów ekspertowych, tworzonych od podstaw z przeznaczeniem do zastosowania w określonej specjalistycznej dziedzinie wiedzy. Funkcje te powinny powstawać wraz z całym systemem wspomagającym zarządzanie i być efektem współpracy projektantów systemu, inżynierów wiedzy i informatyków. Dostępne na rynku *szkieletowe (skorupowe)* systemy ekspertowe, nie posiadające zaimplementowanej bazy wiedzy, nie znajdują praktycznie zastosowań jako tworzywo funkcji ekspertowych ze względu na brak możliwości pełnej integracji z oprogramowaniem systemu wspomagającego zarządzanie.

4.1.2. Metody i techniki reprezentacji wiedzy

Przez pojęcie *wiedza* rozumiany jest przeważnie „ogół wiarygodnych informacji o rzeczywistości wraz z umiejętnością ich wykorzystania” [256], ale określenie to bywa także interpretowane jako „symboliczny opis świata rzeczywistego charakteryzujący aksjomatyczne i empiryczne relacje oraz zawierający procedury, które manipulują tymi relacjami” [247]. W niniejszej pracy określenie *wiedza* będzie używane w zawężonym zakresie *wiedzy specjalistycznej*, bezpośrednio związanej z utrzymaniem i eksploatacją obiektów mostowych.

Wykorzystywanie wiedzy w funkcjach ekspertowych wymaga zdefiniowania sposobów jej *reprezentacji*, czyli metod jej gromadzenia, przechowywania, przetwarzania i udostępniania z wykorzystaniem technik komputerowych. Zagadnienie reprezentacji wiedzy stanowi jeden z podstawowych, a nierozwiązanych jeszcze w pełni, problemów sztucznej inteligencji. Mimo intensywnych, trwających już kilka dziesięcioleci, prac związanych z tym problemem nie udało się stworzyć uniwersalnych i efektywnych rozwiązań. Szeroki przegląd tej problematyki oferują między innymi prace: [13], [14], [81], [84], [230], [247], [255], [257], [261], [295], [334], [379], zawierające także bogatą bibliografię.

Stosowane obecnie podstawowe metody, sposoby i techniki reprezentacji wiedzy zestawiono na rys. 4.1. Metody reprezentacji wiedzy można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- *metody symboliczne* – wykorzystujące informacje przedstawiane w postaci symboli, np. cyfr, liter itp.;
- *metody niesymboliczne* – stosujące techniki prezentacji i przetwarzania informacji niewykorzystujące odwzorowań symbolicznych, np. sieci neuronowe.

Wśród klasycznych, rozwijanych już od połowy XX wieku, metod symbolicznych można – w zależności od sposobu reprezentacji wiedzy – wyróżnić dwie grupy rozwiązań: reprezentację proceduralną oraz reprezentację deklaratywną.

Sposób *proceduralny* polega na zdefiniowaniu zbioru procedur, których działanie stanowi reprezentację wiedzy o rozpatrywanym obszarze rzeczywistości. Wiedza jest reprezentowana w takim rozwiązaniu łącznie ze sposobem jej użycia, na przykład poprzez zapisanie w postaci równania matematycznego. Reprezentacja proceduralna jest powiązana z konkretną dziedziną zastosowań, co zapewnia jej dużą efektywność dzięki odwzorowaniu specyficznych właściwości obiektów, relacji między nimi itp.

W sposobie *deklaratywnym* wiedza składa się z faktów reprezentatywnych dla rozpatrywanej dziedziny, a dostęp do niej polega na stosowaniu mechanizmów wnioskowania wykorzystujących zbiór faktów. Stosowane procedury wnioskowania są niezależne od obszaru wiedzy, co często ogranicza efektywność reprezentacji deklaratywnej ze względu na brak wykorzystania cech, zależności i relacji charakterystycznych dla danej dziedziny. Efektywność deklaratywnych sposobów reprezentacji wiedzy zdecydowanie maleje ze wzrostem rozmiaru zagadnienia, a więc i rozmiaru wykorzystywanej bazy wiedzy.

Symboliczna reprezentacja wiedzy może być realizowana przy wykorzystaniu różnych technik, wśród których na szczególną uwagę zasługują:

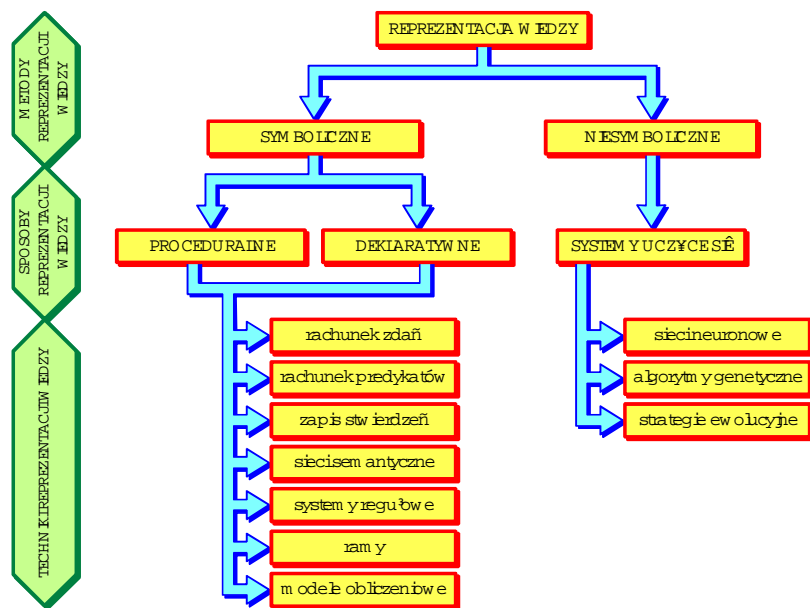
- bezpośrednie zastosowania logiki, takie jak technika rachunku zdań czy predykatów;
- techniki stosujące zapis stwierdzeń, nazywane też technikami atrybutowo-wartościowymi lub technikami zorientowanymi na trójkę „obiekt-atrybut-wartość”;
- sieci semantyczne, nazywane też asocjacyjnymi, które przedstawiają stwierdzenia oraz relacje pomiędzy tymi stwierdzeniami w formie grafu skierowanego;
- techniki regułowe wykorzystujące zbiór faktów oraz zbiór reguł (np. typu „jeśli-to”), tworzące łącznie bazę wiedzy;
- techniki reprezentacji za pomocą ram, czyli struktur reprezentujących informacje związane z określonym obiektem;

- techniki wykorzystujące tzw. modele obliczeniowe, czyli struktury umożliwiające wyznaczanie wartości zmiennych na podstawie zbioru operatorów wiążących te zmienne.

Podstawowe cechy charakterystyczne dla narzędzi ekspertowych wykorzystujących metody i techniki symbolicznej reprezentacji wiedzy to:

- duża efektywność przy kompletnej i poprawnie przedstawionej wiedzy,
- jawna reprezentacja wykorzystywanej wiedzy,
- uzyskiwanie przez użytkownika informacji wyjaśniających i uzasadniających proces wnioskowania realizowany przez system ekspertowy,
- bardzo ograniczone możliwości reorganizacji reprezentowanej wiedzy,
- brak możliwości zdobywania nowej wiedzy poprzez uczenie się w trakcie eksploatacji.

W metodach zaliczanych do grupy *niesymbolicznych* (rys. 4.1) wiedza jest rozproszona i nie jest bezpośrednio czytelna. Taki sposób reprezentacji bardzo utrudnia formalne określanie związku pomiędzy danymi wejściowymi i wyjściowymi oraz śledzenie procesu przekształcenia danych wejściowych w wyjściowe. Zależnie od stosowanej techniki wiedza może być reprezentowana na przykład przez strukturę i wartości wag połączeń pomiędzy neuronami (w sieciach neuronowych) lub może być zakodowana w genach (algorytmy genetyczne, strategie ewolucyjne).



Rys. 4.1. Podstawowe rozwiązania w zakresie reprezentacji wiedzy w systemach komputerowych

Najistotniejsze cechy rozwiązań stosujących niesymboliczną reprezentację wiedzy to:

- zdolność uczenia się, a w rezultacie poprawiania jakości wiedzy i efektywności działania na podstawie gromadzonych doświadczeń,
- możliwość rozwiązywania problemów trudnych do sformalizowania,
- możliwość wykorzystywania w przypadku niepewnej lub niepełnej wiedzy,
- zdolność do poprawnego działania przy stosunkowo ubogiej bazie wiedzy i możliwość stopniowego uzupełniania bazy w trakcie użytkowania systemu.

Przedstawione wyżej uwagi prezentują obszar dostępnych rozwiązań w zakresie reprezentacji wiedzy przy wykorzystaniu technik komputerowych. Przy wyborze sposobu reprezentacji wiedzy na potrzeby narzędzi ekspertowych wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej należy brać pod uwagę przede wszystkim następujące względy:

- złożoność zagadnień wymagających wsparcia narzędziami ekspertowymi, praktycznie uniemożliwiająca zgromadzenie sformalizowanej i kompletnej wiedzy związanej z dziedziną zastosowań;
- interdyscyplinarność systemów wspomagających gospodarowanie obiektami mostowymi, powodującą konieczność integrowania wiadomości z wielu dziedzin posługujących się często zasadniczo różną metodyką prezentacji wiedzy;
- niejednorodność zasobów informacji wykorzystywanych w procesach zarządzania, dotyczącą ich precyzji i pewności oraz postaci, w jakiej mogą być pozyskane;
- konieczność zachowania w całym systemie zgodności sposobów numerycznej reprezentacji wiedzy oraz danych;
- potrzebę stosowania systemów uczących się, zapewniających mechanizmy uzupełniania i modyfikacji zgromadzonej wiedzy, przede wszystkim na podstawie danych systematycznie wzbogacających zasoby systemu.

Wyniki analizy przedstawionych wyżej specyficznych uwarunkowań pokazują, że ani klasyczne metody symbolicznej reprezentacji wiedzy, ani metody reprezentacji niesymbolicznej nie odpowiadają w pełni potrzebom systemów wspomagających gospodarowanie mostami. Naturalnym efektem tej konstatacji jest próba zastosowania *hybrydowej reprezentacji wiedzy*, poprzez stworzenie możliwości efektywnego łączenia w funkcji ekspertowej komponentów wykorzystujących różne metody i techniki reprezentacji wiedzy.

4.2. Sieci hybrydowe jako tworzywo funkcji ekspertowych

4.2.1. Koncepcja sieci hybrydowych

W narzędziach ekspertowych wykorzystywanych w inżynierii mostowej najczęściej stosowane są metody symbolicznej reprezentacji wiedzy (np. [80], [329], [336], [350]), w tym klasyczne techniki regułowe [242], [247]. Zróznicowanie źródeł oraz metod efektywnej reprezentacji wiedzy związanej z eksploatacją obiektów mostowych zachęca do stosowania metodyki integrującej różne sposoby reprezentacji wiedzy w jednym narzędziu ekspertowym. Zaproponowana przez autora w pracach [21], [28], [29] koncepcja technologii tzw. *sieci hybrydowych* jest praktyczną realizacją *hybrydowej reprezentacji wiedzy* łączącej różne techniki reprezentacji, przetwarzania oraz udostępniania wiedzy.

Terminem *sieć hybrydowa* jest tu określanym sposób hybrydowej reprezentacji wiedzy zdefiniowany przez strukturę złożoną z *komponentów* sieci oraz *relacji* (*połączeń*) między tymi komponentami. *Komponent* to podstawowa część składowa sieci hybrydowej wykorzystująca określony sposób i technikę reprezentacji wiedzy. Podstawowe cechy definiujące każdy komponent to:

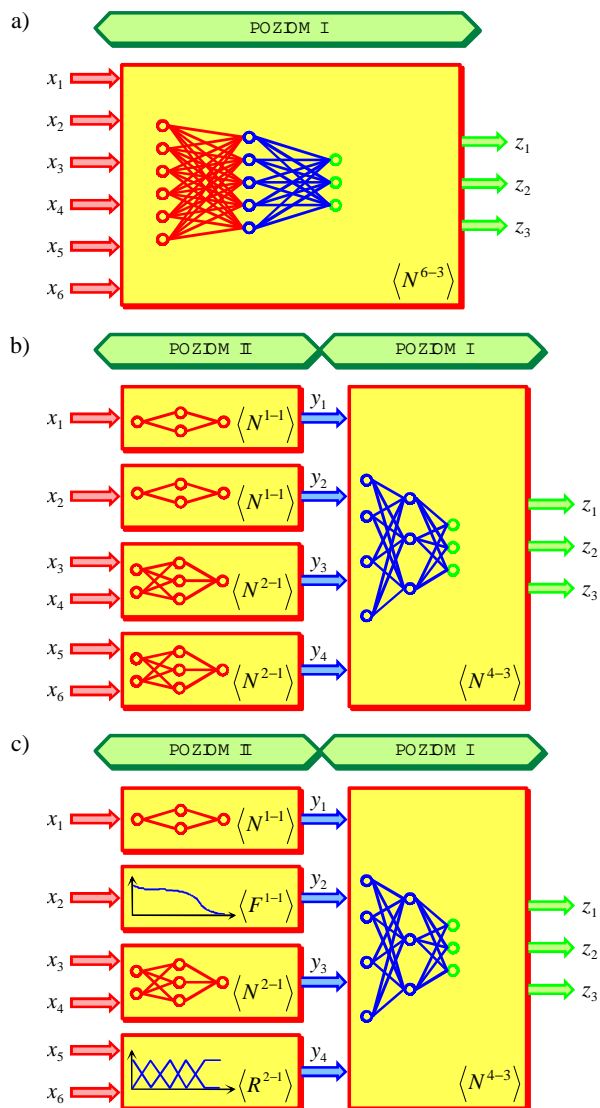
- liczba wejść i postać wprowadzanych danych;
- sposób i technika reprezentacji wiedzy;
- definiowalne zasoby komponentu;
- programowalne procedury przetwarzania danych w komponentcie;
- liczba wyjść i postać wyprowadzanych danych.

W sieciach hybrydowych prezentowanych w niniejszej monografii są stosowane trzy podstawowe typy komponentów:

- *komponenty funkcyjne* $\langle F \rangle$ – wykorzystywane jako narzędzia symbolicznej reprezentacji wiedzy przy użyciu funkcji matematycznych; komponenty funkcyjne przetwarzają dane przedstawione w postaci liczb rzeczywistych;
- *komponenty neuronowe* $\langle N \rangle$ – narzędzia niesymbolicznej reprezentacji wiedzy przy wykorzystaniu sieci neuronowych ([153], [224], [257], [258], [334], [335], [379]); przetwarzane dane są liczbami rzeczywistymi;
- *komponenty rozmyte* $\langle R \rangle$ – służące jako narzędzia symbolicznej reprezentacji obszarów wiedzy niepełnej i niepewnej przy wykorzystaniu metod logiki rozmytej ([175], [211], [261], [296], [365], [373], [374], [375], [376]); w komponentach tego typu możliwe jest stosowanie danych w postaci liczb rzeczywistych, wartości lingwistycznych lub liczb rozmytych.

Na rysunku 4.2 przedstawiono porównanie architektury funkcji ekspertowej skonstruowanej przy wykorzystaniu klasycznej sieci neuronowej (rys. 4.2a),

wielopoziomowej struktury złożonej z sieci neuronowych (rys. 4.2b) oraz wielopoziomowej sieci hybrydowej (rys. 4.2c). Każda z prezentowanych funkcji ekspertowych realizuje to samo zadanie, polegające na przetwarzaniu sześciu danych wejściowych w trzy dane wyjściowe.



Rys. 4.2. Przykłady architektury funkcji ekspertowych:
a) klasyczna jednopoziomowa trójwarstwowa sieć neuronowa,
b) dwupoziomowa sieć neuronowa,
c) dwupoziomowa sieć hybrydowa

Klasyczne sieci neuronowe okazują się technologią efektywną przy rozwiązywaniu niezbyt złożonych zagadnień o stosunkowo małej liczbie wejść i wyjść. Prezentowana sieć (rys. 4.2a) ma sześć neuronów w warstwie wejściowej, pięć neuronów w warstwie pośredniej (tzw. ukrytej) oraz trzy neurony w warstwie wyjściowej. Rozpatrywana sieć może więc być zastosowana do przetwarzania wektora sygnałów wejściowych (danych wejściowych) $\{X\}$ w wektor sygnałów wyjściowych (wektor wyników) $\{Z\}$, gdzie:

$$\{X\} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \quad (4.1)$$

$$\{Z\} = [z_1, z_2, z_3]^T \quad (4.2)$$

Prezentowana sieć może być zapisana w postaci $\langle N^{6-3} \rangle$, zgodnie z ogólnym formatem $\langle N^{n-m} \rangle$, gdzie:

n – liczba neuronów wejściowych,

m – liczba neuronów wyjściowych.

Proces przetwarzania sygnałów wejściowych w sygnały wyjściowe przy użyciu sieci neuronowej można zapisać jako:

$$\{X\} \Rightarrow \langle N^{n-m} \rangle \Rightarrow \{Z\} \quad (4.3)$$

Analiza złożonych problemów przy użyciu klasycznych sieci neuronowych wymaga z reguły żmudnego poszukiwania, najczęściej metodą eksperymentów numerycznych, optymalnej architektury i parametrów uczenia sieci, a także powoduje konieczność przygotowania i zastosowania dużej liczby wzorców uczących dla uzyskania zadowalającej dokładności.

Dążenie do zminimalizowania tych trudności doprowadziło do zastosowania koncepcji *wielopoziomowych sieci neuronowych* przedstawionej w pracach autora [26], [27]. Sieci te to hierarchiczne struktury złożone z połączonych ze sobą komponentów w postaci autonomicznych sieci neuronowych. Sieci wielopoziomowe znajdują zastosowanie do rozwiązywania problemów, w których można wydzielić zagadnienia cząstkowe, modelowane przy użyciu stosunkowo niedużych sieci neuronowych, łączonych następnie w strukturę hierarchiczną umożliwiającą rozwiązywanie całego złożonego zadania. Koncepcję sieci wielopoziomowych zilustrowano na rys. 4.2b, na którym pokazano przykładową dwupoziomą sieć neuronową, złożoną z czterech neuronowych komponentów na poziomie II oraz jednego komponentu na poziomie I.

Proponowany sposób formalnego zapisu struktury wielopoziomowej złożonej sieci neuronowej przedstawiono poniżej na przykładzie sieci z rys. 4.2b:

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \Rightarrow \langle N_1^{1-1} \rangle \Rightarrow y_1 \\ x_2 \Rightarrow \langle N_2^{1-1} \rangle \Rightarrow y_2 \\ \left. \begin{array}{l} x_3 \\ x_4 \end{array} \right\} \Rightarrow \langle N_3^{2-1} \rangle \Rightarrow y_3 \\ \left. \begin{array}{l} x_5 \\ x_6 \end{array} \right\} \Rightarrow \langle N_4^{2-1} \rangle \Rightarrow y_4 \end{array} \right\} \Rightarrow \langle N_5^{4-3} \rangle \Rightarrow \begin{cases} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{cases} \quad (4.4)$$

gdzie:

x_i – dana wejściowa i na poziomie I;

y_i – dana wyjściowa i na poziomie I, a równocześnie dana wejściowa na poziomie II;

z_i – dana wyjściowa i na poziomie II;

$\langle N_i^{n-m} \rangle$ – komponent neuronowy i o n wejściach oraz m wyjściach;

\Rightarrow – symbol operacji wprowadzania danych wejściowych do komponentu i wyprowadzania danych wyjściowych (wyników przetwarzania).

Przedstawiony wyżej schemat procesu przetwarzania danych przy wykorzystaniu wielopoziomowej sieci neuronowej można zapisać ogólnie w postaci:

$$\{X\} \Rightarrow \langle W^{6-3} \rangle \Rightarrow \{Z\} \quad (4.5)$$

gdzie $\langle W^{n-m} \rangle$ oznacza wielopoziomową złożoną sieć neuronową o n wejściach oraz m wyjściach. Podstawowe zalety sieci wielopoziomowych to:

- możliwość łatwiejszego i szybszego, w porównaniu z klasycznymi sieciami neuronowymi, konstruowania oraz uczenia prostych komponentów neuronowych przy zachowaniu zdolności całej struktury do rozwiązywania skomplikowanych zadań;
- możliwość wielokrotnego używania raz przygotowanych komponentów jako elementów składowych różnych sieci wielopoziomowych.

W trakcie dalszych prac nad funkcjami ekspertowymi autor zaproponował koncepcję wzbogacenia architektury wielopoziomowych sieci neuronowych innymi komponentami wykorzystującymi wiedzę zapisaną na przykład w postaci równania matematycznego czy też przy zastosowaniu metod logiki rozmytej [28], [29]. Umożliwia to połączenie w jednym narzędziu ekspertowym różnych technik symbolicznej i niesymbolicznej reprezentacji wiedzy. Takie złożone struktury, zawierające komponenty różnych typów, są tu nazywane *sieciami hybrydowymi*. Prezentowane na rys. 4.2 zadanie, polegające na przetwarzaniu sześciu danych

wejściowych w trzy dane wyjściowe, może być rozwiązane także przy użyciu sieci hybrydowej, na przykład o architekturze pokazanej na rys. 4.2c.

Przyjmując konwencję zapisu zastosowaną we wzorze (4.4), strukturę sieci hybrydowej z rys. 4.2c można przedstawić jako:

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \Rightarrow \langle N_1^{1-1} \rangle \Rightarrow y_1 \\ x_2 \Rightarrow \langle F_1^{1-1} \rangle \Rightarrow y_2 \\ \left. \begin{array}{l} x_3 \\ x_4 \end{array} \right\} \Rightarrow \langle N_2^{2-1} \rangle \Rightarrow y_3 \\ \left. \begin{array}{l} x_5 \\ x_6 \end{array} \right\} \Rightarrow \langle R_1^{2-1} \rangle \Rightarrow y_4 \end{array} \right\} \Rightarrow \langle N_3^{4-3} \rangle \Rightarrow \begin{cases} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{cases} \quad (4.6)$$

lub ogólnie jako:

$$\{X\} \Rightarrow \langle H^{6-3} \rangle \Rightarrow \{Z\} \quad (4.7)$$

gdzie:

- $\langle N_i^{n-m} \rangle$ – komponent neuronowy i o n wejściach oraz m wyjściach;
- $\langle F_j^{n-m} \rangle$ – komponent funkcyjny j o n wejściach oraz m wyjściach;
- $\langle R_k^{n-m} \rangle$ – komponent rozmyty k o n wejściach oraz m wyjściach;
- $\langle H^{n-m} \rangle$ – hybrydowa sieć o n wejściach oraz m wyjściach.

Najważniejsze cechy sieci hybrydowych to:

- możliwość doboru najwłaściwszego sposobu pozyskiwania i reprezentacji każdego obszaru wiedzy wykorzystywanej w narzędziu ekspertowym;
- możliwość łączenia praktycznie wszystkich metod i technik reprezentacji wiedzy;
- możliwość wykorzystywania poszczególnych komponentów w różnych sieciach hybrydowych, co znacznie przyspiesza proces ich tworzenia.

4.2.2. Komputerowe wspomaganie tworzenia funkcji ekspertowych

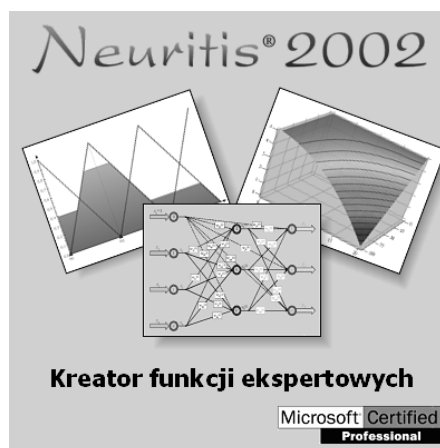
4.2.2.1. Kreator funkcji ekspertowych

Tworzenie funkcji ekspertowych przy użyciu technologii wielopoziomowych sieci hybrydowych wymaga stosowania wspomagających narzędzi komputerowych. W tym celu autor opracował specjalistyczne środowisko informatyczne, nazwane *Kreatorem Funkcji Ekspertowych* NEURITIS [22], [26]. Narzędzie to jest przeznaczone do wykorzystywania przez projektanta systemu, inżyniera wiedzy oraz informatyka,

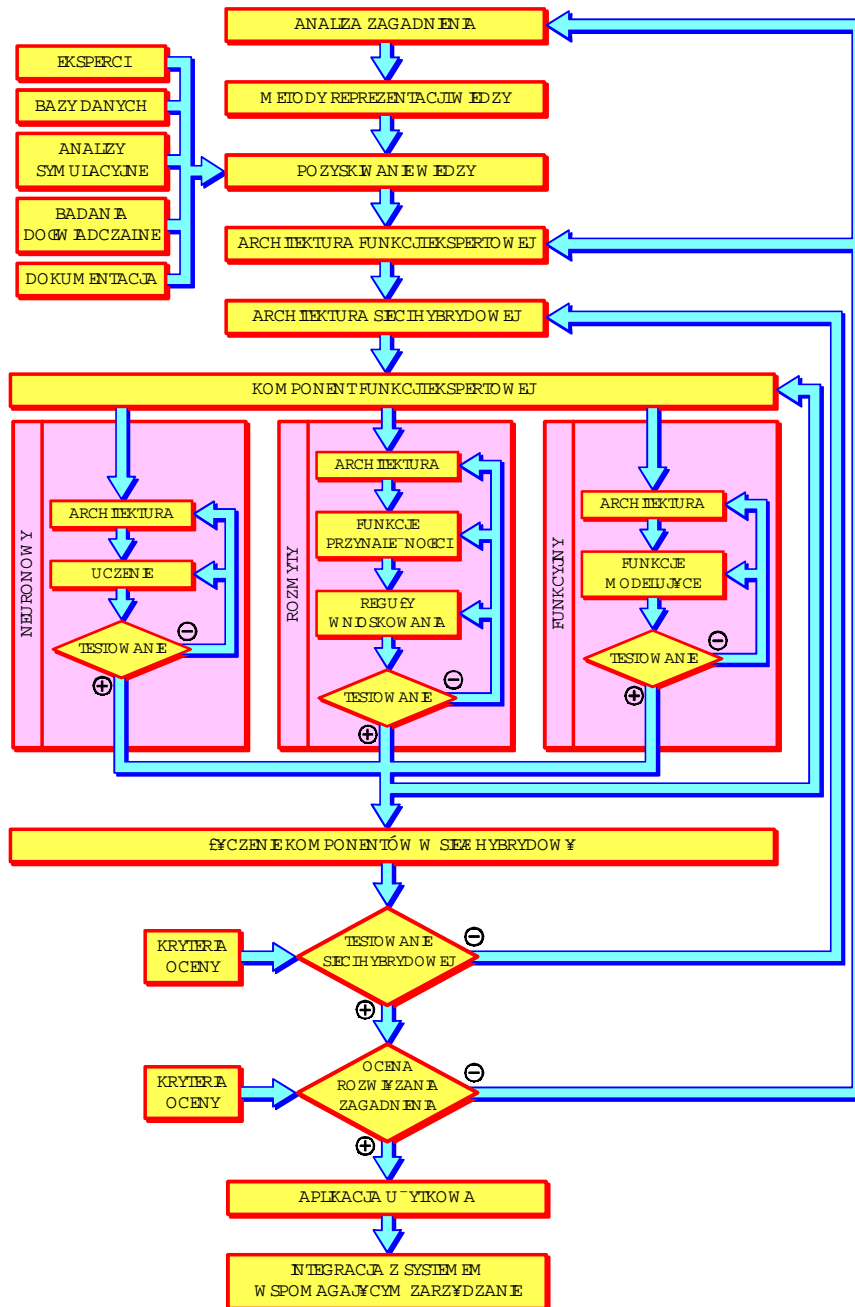
współpracujących ze sobą w całym procesie tworzenia funkcji ekspertowych na potrzeby systemu wspomagającego zarządzanie infrastrukturą mostową. Za najistotniejsze cechy systemu NEURITIS (rys. 4.3) należy uznać:

- możliwość spożytkowania do tworzenia zarówno jednokomponentowych funkcji ekspertowych (np. w postaci klasycznej pojedynczej sieci neuronowej), jak i funkcji wielokomponentowych o jednakowym typie komponentów (np. wielopoziomowych sieci neuronowych), a także funkcji złożonych z komponentów różnych typów (np. sieci hybrydowych);
- niezależność systemu od dziedziny zastosowań funkcji ekspertowej, co pozwala na wykorzystywanie go do kreowania bardzo szerokiej klasy narzędzi ekspertowych;
- otwartość systemu polegającą na możliwości łatwego rozszerzania jego środowiska przez wprowadzanie nowych typów komponentów;
- uniwersalizację metodyki modelowania złożonych zagadnień dzięki zastosowaniu ujednocionej technologii kaskadowego łączenia komponentów;
- łatwość zarządzania projektami poszczególnych funkcji ekspertowych w ciągu całego procesu ich tworzenia dzięki szerokiemu wykorzystywaniu narzędzi graficznych.

Ogólny schemat procesu tworzenia funkcji ekspertowej przy użyciu systemu NEURITIS przedstawiono na rys. 4.4, na przykładzie funkcji wykorzystującej hybrydową reprezentację wiedzy. Pierwszym etapem tworzenia funkcji ekspertowej jest szczegółowa analiza zagadnienia stanowiącego dziedzinę projektowanej funkcji. Analiza ta ma na celu przede wszystkim określenie informacji istotnych dla rozpatrywanego problemu, co pozwala na zdefiniowanie zbiorów danych wejściowych oraz danych wyjściowych funkcji ekspertowej. W trakcie wstępnej analizy zagadnienia należy także określić zasady docelowej integracji projektowanej funkcji ekspertowej z pozostałą częścią systemu wspomagającego zarządzanie obiektami mostowymi (np. zasoby systemu wykorzystywane przez funkcję ekspertową, sposób zastosowania rezultatów porad ekspertowych). Kolejnym etapem projektowania jest analiza dostępnych zasobów wiedzy oraz dobór metod jej reprezentacji, a następnie pozyskanie niezbędnej wiedzy.



Rys. 4.3. Tytułowy ekran
Kreatora Funkcji Ekspertowych NEURITIS



Rys. 4.4. Schemat procesu tworzenia funkcji ekspertowej o hybrydowej reprezentacji wiedzy

Kolejne fazy tworzenia funkcji ekspertowej mogą być wspomagane narzędziami systemu NEURITIS. Dotyczy to w szczególności projektowania ogólnej struktury i architektury funkcji ekspertowej, a następnie przygotowania poszczególnych komponentów wchodzących w skład sieci hybrydowej. Na rysunku 4.4 pokazano trzy typy komponentów: neuronowy, rozmyty i funkcyjny, wraz z charakterystycznymi etapami kreowania poszczególnych typów komponentów. Zasady tworzenia komponentów przedstawiono bardziej szczegółowo w dalszej części pracy.

Po uzyskaniu pozytywnych wyników testowania każdego z komponentów mogą być one połączone w wielopoziomową sieć hybrydową. Wynikowa sieć podlega testowaniu, a jego pozytywny wynik upoważnia do włączenia sieci jako samodzielnego składnika budowanej funkcji ekspertowej. W analogiczny sposób powstają kolejne sieci hybrydowe, które wspólnie tworzą zaprojektowaną architekturę funkcji ekspertowej. Kompletne narzędzie ekspertowe podlega ostatecznemu testowaniu pod kątem poprawności rozwiązań zagadnienia postawionego na początku procesu projektowania. Negatywna ocena zmusza do ponownej analizy problemu i poszukiwania innych rozwiązań. Ocena pozytywna pozwala na wygenerowanie aplikacji użytkowej oraz jej integrację z pozostałą częścią oprogramowania systemu wspomagającego zarządzanie infrastrukturą mostową.

Zastosowania narzędziowego systemu NEURITIS w procesie tworzenia funkcji ekspertowej obejmują:

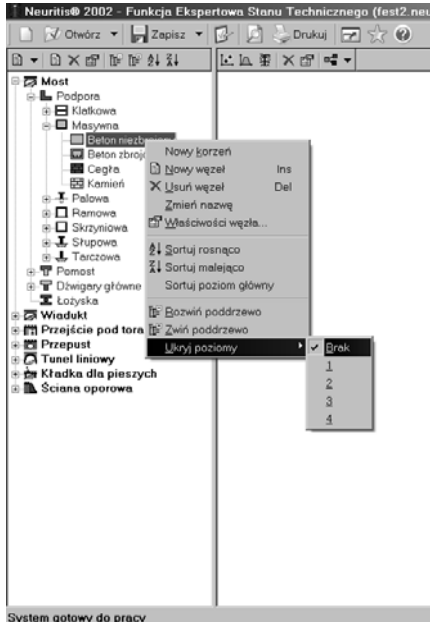
- projektowanie struktury funkcji ekspertowej;
- przygotowanie poszczególnych komponentów narzędzia ekspertowego;
- łączenie komponentów w złożone struktury sieciowe: wielopoziomowe sieci neuronowe lub wielopoziomowe sieci hybrydowe;
- integrację struktur sieciowych w wieloelementową funkcję ekspertową;
- wytworzenie aplikacji użytkowej.

4.2.2.2. Projektowanie struktury funkcji ekspertowej

Podstawowymi narzędziami wykorzystywanymi w systemie NEURITIS do wspomagania projektowania struktury funkcji ekspertowej są:

- *Drzewo Zagadnienia* – umożliwiające tworzenie hierarchicznej struktury obrazującej dziedzinę projektowanej funkcji ekspertowej, z podziałem na poziomy szczegółowości; narzędzie to służy do definiowania struktury funkcjonalnej złożonych funkcji ekspertowych;
- *Graf Ekspertowy* – przeznaczony do projektowania architektury sieci hybrydowych lub wielopoziomowych sieci neuronowych, złożonych z predefiniowanych komponentów.

Widok i sposób tworzenia *Drzewa Zagadnienia* jest zgodny ze standardem systemu Microsoft® Windows™ (funkcje rozwijania i zwijania, sortowanie, kopiowanie i przenoszenie itp.). Poszczególne węzły drzewa są reprezentowane przez symboliczne



Rys. 4.5. Tworzenie *Drzewa Zagadnienia* funkcji ekspertowej

oznaczenia (ikony) oraz opisy tekstowe. Dla ujednoczenia opisu węzłów w systemie NEURITIS zastosowano zunifikowane słowniki z dziedziny inżynierii mostowej.

Na rysunku 4.5 pokazano przykład definiowania *Drzewa Zagadnienia* dla funkcji ekspertowej wspomagającej ocenę stanu technicznego wszystkich rodzajów obiektów mostowych. Prezentowane drzewo ma cztery poziomy służące kolejno do definiowania:

- 1) rodzaju obiektu mostowego,
- 2) rodzaju części składowej obiektu,
- 3) rodzaju konstrukcji części składowej,
- 4) rodzaju materiału konstrukcyjnego części składowej.

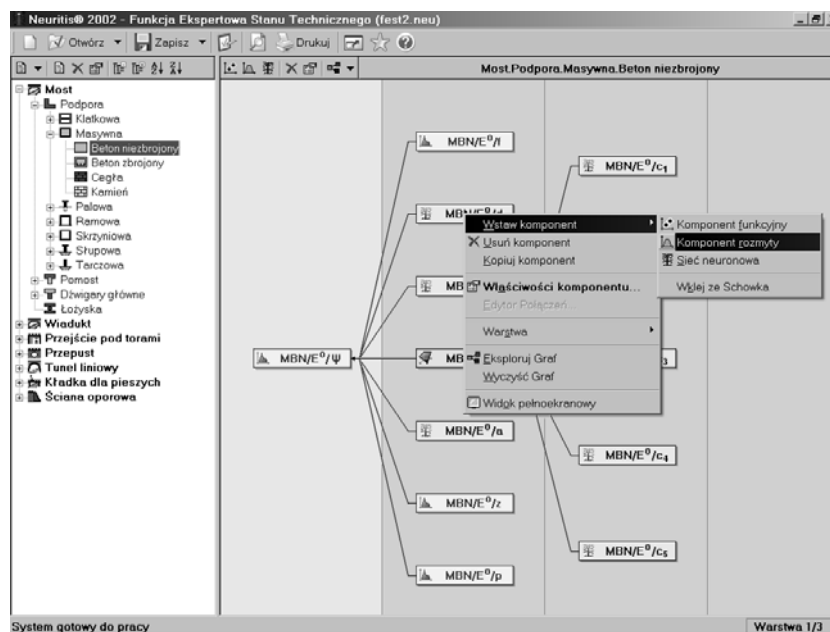
Do każdego węzła *Drzewa Zagadnienia* może być przypisany *Graf Ekspertowy* związany z kontekstem zagadnienia reprezentowanym przez ten węzeł. Każdy *Graf Ekspertowy* jest projektowany i definiowany przy wykorzystaniu edytora graficznego umożliwiającego jego wizualizację w formie

hierarchicznej struktury prezentującej wszystkie komponenty oraz relacje (połączenia) między nimi. Przykład definiowania *Grafu Ekspertowego* przedstawiono na rys. 4.6.

Komponenty są podstawowymi elementami służącymi w systemie NEURITIS do budowy sieci hybrydowych, wykorzystywanych następnie do tworzenia funkcji ekspertowych. Do konstruowania sieci hybrydowych mogą być stosowane następujące rodzaje komponentów: funkcyjne $\langle F \rangle$, neuronowe $\langle N \rangle$ oraz rozmyte $\langle R \rangle$.

Wymienione wyżej typy komponentów są zaprojektowane jako struktury wyposażone w narzędzia umożliwiające indywidualne definiowanie cech każdego komponentu, w dostosowaniu do zagadnienia modelowanego przez dany komponent. Cechy każdego typu komponentów można podzielić na następujące cztery grupy:

- *wejścia* – określające strukturę wejść oraz postać danych wejściowych;
- *zasoby komponentu* – definiowane w procesie kreowania komponentu; rodzaj zasobów zależy od typu komponentu;
- *operacje* – predefiniowane działania na zasobach komponentu lub danych wejściowych;
- *wyjścia* – opisujące strukturę wyjść oraz postać danych wyjściowych.



Rys. 4.6. Przykład definiowania *Grafu Ekspertowego*

Wszystkie rodzaje komponentów charakteryzują się ujednocionym sposobem definiowania wejść oraz wyjść, a także unifikacją operacji wykonywanych na komponentach (wstawianie, usuwanie, kopiowanie itp.). Rozwiązania zastosowane w systemie wspomagającym tworzenie funkcji ekspertowych umożliwiają:

- definiowanie dowolnych połączeń pomiędzy komponentami tego samego typu lub różnych typów;
- korektę działania każdego komponentu (np. usprawnienie komponentu neuronowego przez dodatkowe uczenie) bez ingerencji w zdefiniowaną wcześniej strukturę funkcji ekspertowej – pod warunkiem utrzymania pierwotnego układu wejść i wyjść;
- wzbogacanie systemu o nowe komponenty, które mogą być dołączane także do już istniejących funkcji ekspertowych.

4.3. Komponenty funkcyjne

4.3.1. Funkcje modelujące – podstawowe określenia

Komponenty funkcyjne są przeznaczone do reprezentacji wiedzy, która może być przedstawiona w postaci symbolicznej poprzez zdefiniowanie, dla analizowanego zagadnienia, funkcji modelujących oraz operacji wykonywanych na tych funkcjach, a także na danych wejściowych importowanych do komponentu. Algorytm przetwarzania danych wejściowych w dane wyjściowe może być zdefiniowany indywidualnie dla każdego komponentu funkcyjnego.

Dla każdego *wejścia* i komponentu należy zdefiniować postać wprowadzanych danych, wybierając spośród następujących możliwości:

- liczba rzeczywista x_i ;
- wektor liczb rzeczywistych

$$\{X_i\} = [x_{i,1}, \dots, x_{i,n}]^T ; \quad (4.8)$$

- macierz liczb rzeczywistych

$$[X_i] = \begin{bmatrix} x_{i,11} & \cdots & x_{i,1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i,n1} & \cdots & x_{i,nm} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

W ogólnym przypadku postać danych dla każdego wejścia komponentu może być inna. Postać *danych wyjściowych* jest definiowana automatycznie na podstawie formy danych wejściowych oraz operacji wykonywanych w komponentcie.

Zasobami komponentu mogą być dowolne funkcje n zmiennych przedstawione w postaci analitycznej lub jako zbiór dyskretnych wartości funkcji. W komponentcie mogą być też zdefiniowane *operacje* wykonywane na zasobach komponentu i na danych wejściowych.

4.3.2. Tworzenie komponentów funkcyjnych

Podstawowe informacje charakteryzujące komponenty funkcyjne zestawiono w tab. 4.2, a ogólny schemat procesu definiowania komponentu funkcyjnego przy wykorzystaniu systemu NEURITIS przedstawiono na rys. 4.7.

Na rysunku tym wyróżniono następujące etapy określania parametrów komponentu:

- zdefiniowanie liczby oraz charakterystyk wejść i wyjść komponentu;
- określenie liczby zmiennych (n) funkcji modelujących rozpatrywane zagadnienie;

- zdefiniowanie dopuszczalnych zakresów wartości poszczególnych zmiennych funkcji modelujących;
- określenie zakresu wartości funkcji modelujących;
- wybór typu poszczególnych funkcji modelujących (np. wielomian, funkcja wykładnicza itp.);
- określenie wartości parametrów funkcji modelujących;
- zdefiniowanie operacji wykonywanych w komponencie na jego zasobach oraz na danych wejściowych.

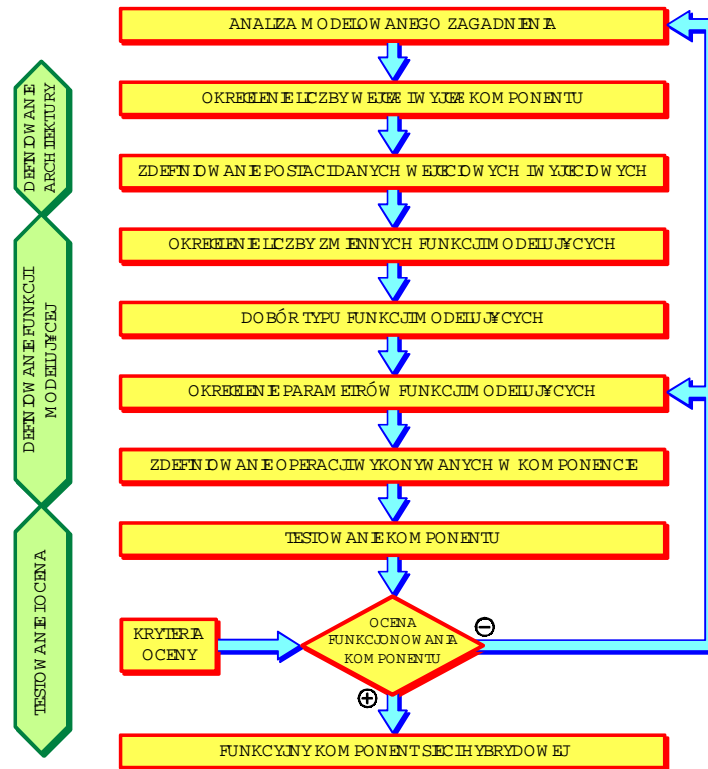
Tab. 4.2. Podstawowe cechy komponentów funkcyjnych

Cecha komponentu	Właściwości komponentu
Wejścia	<ul style="list-style-type: none"> • dopuszczalna postać danych: <ul style="list-style-type: none"> ◦ liczba rzeczywista x_i ◦ wektor liczb rzeczywistych $\{X_i\}$ ◦ macierz liczb rzeczywistych $[X_i]$ • liczba wejść komponentu: bez ograniczeń • sposób definiowania: indywidualnie dla każdego wejścia
Definiowalne zasoby komponentu	<ul style="list-style-type: none"> • funkcje n-zmiennych w postaci analitycznej • funkcje n-zmiennych w postaci dyskretnej
Definiowalne operacje	<ul style="list-style-type: none"> • operacje na danych wejściowych • operacje na zasobach komponentu
Wyjścia	<ul style="list-style-type: none"> • dopuszczalna postać danych: <ul style="list-style-type: none"> ◦ liczba rzeczywista y_i ◦ wektor liczb rzeczywistych $\{Y_i\}$ ◦ macierz liczb rzeczywistych $[Y_i]$ • liczba wyjść komponentu: bez ograniczeń • sposób definiowania: indywidualnie dla każdego wyjścia

Na rysunku 4.8 pokazano przykład określania charakterystyk wejść i wyjść komponentu przy wykorzystaniu systemu NEURITIS.

Sposób definiowania funkcji modelujących, stanowiących zasoby komponentu, przedstawiono na rys. 4.9 na przykładzie funkcji jednej zmiennej, a na rys. 4.10 na przykładzie funkcji dwóch zmiennych. W obu przypadkach zastosowano funkcje w postaci wielomianów. W trakcie definiowania funkcji są one prezentowane w postaci graficznej, co znacznie ułatwia kontrolę poprawności ich określenia.

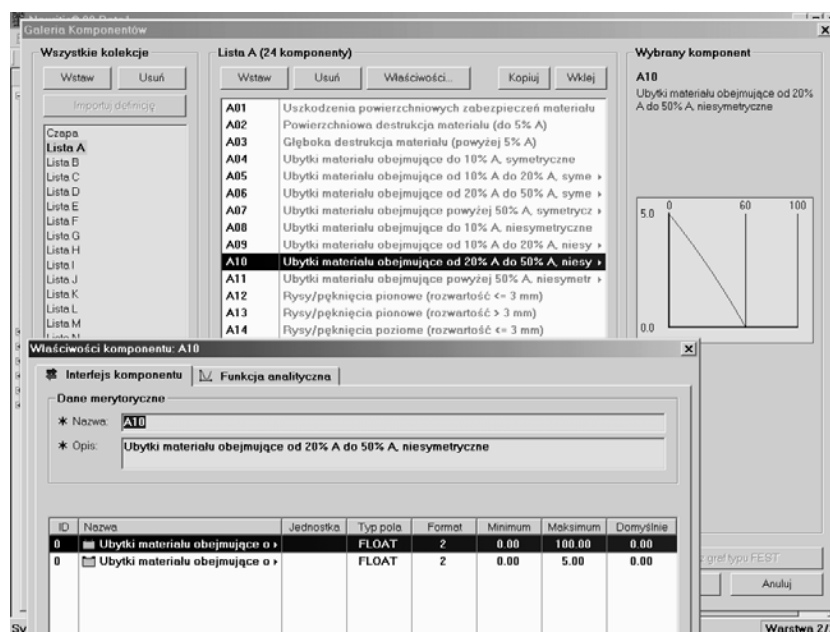
Po zdefiniowaniu funkcji stanowiących zasoby komponentu należy określić operacje wykonywane w komponencie na tych zasobach oraz na danych wejściowych. Sposób wprowadzania tych informacji do systemu ilustruje rys. 4.10a.



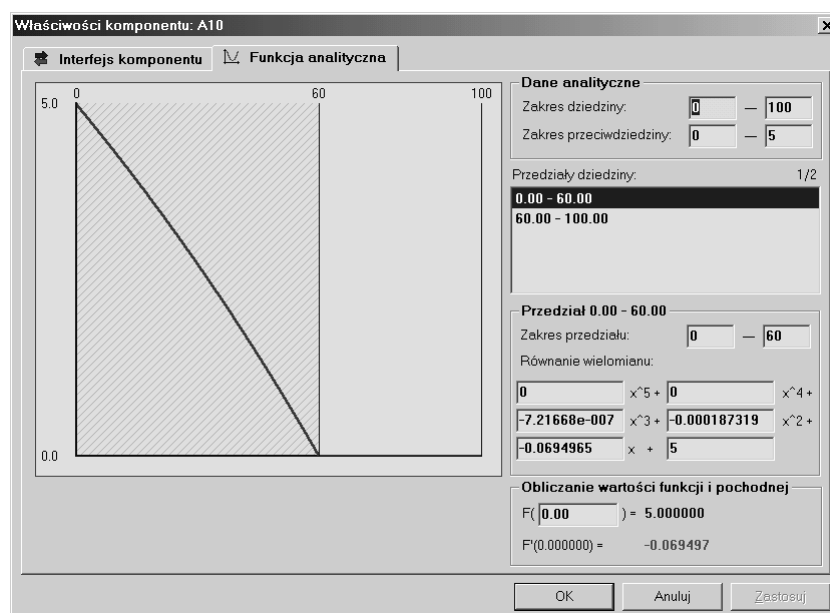
Rys. 4.7. Schemat procesu definiowania funkcyjnego komponentu sieci hybrydowej

Końcowym etapem procesu kreowania komponentu funkcyjnego jest przeprowadzenie testów poprawności jego działania oraz ocena przydatności komponentu jako modelu analizowanego zagadnienia. W przypadku niezadowolających wyników testowania komponentu należy przeprowadzić korektę parametrów lub zmienić typ funkcji modelującej. Negatywna ocena funkcjonalnej przydatności komponentu powoduje konieczność ponownego przeanalizowania doboru metody modelowania rozpatrywanego zagadnienia.

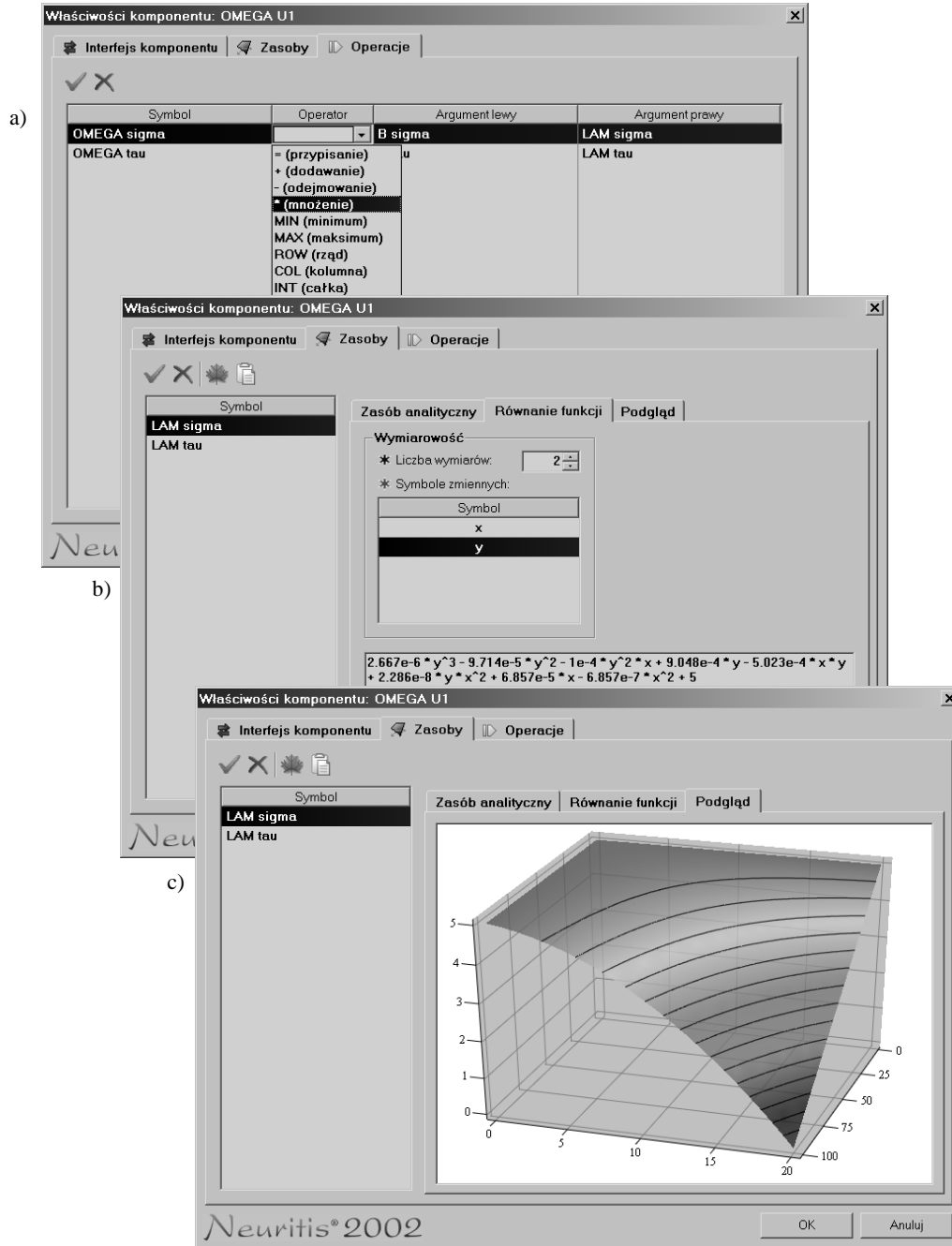
Pozytywne rezultaty testów pozwalają na umieszczenie zdefiniowanego komponentu w zasobach systemu i wykorzystywanie go do konstruowania sieci hybrydowych. Poszczególne komponenty mogą być stosowane wielokrotnie w obrębie jednej sieci, a także mogą być używane jako elementy składowe różnych sieci.



Rys. 4.8. Charakterystyki interfejsu komponentu funkcyjnego



Rys. 4.9. Komponent funkcyjny sieci hybrydowej – definiowanie funkcji jednej zmiennej



Rys. 4.10. Funkcyjny komponent sieci hybrydowej: a) programowanie operacji na danych wejściowych i zasobach komponentu, b) definiowanie zasobów komponentu w postaci funkcji dwóch zmiennych, c) graficzna prezentacja definiowanej funkcji

4.4. Komponenty neuronowe

4.4.1. Sieci neuronowe – podstawowe określenia

Sztuczne sieci neuronowe powstały dzięki poznaniu zasad działania systemów nerwowych istot żywych i wykorzystaniu tej wiedzy w poszukiwaniach nowych rozwiązań technologicznych. Początek prac nad sieciami neuronowymi jest datowany na przełom lat 50. i 60. ubiegłego wieku, gdy podjęto próby stworzenia sztucznych systemów przetwarzania informacji wykorzystujących wzorce biologiczne (np. [253], [290], [337]). Brak większych sukcesów oraz przekonanie o ograniczonym zakresie praktycznych zastosowań (np. [232]) spowodowały zahamowanie tempa badań nad sieciami neuronowymi od początku lat 70. do połowy 80. Rozwój technik komputerowych w latach 80. oraz opracowanie rozwiązań teoretycznych dotyczących sieci wielowarstwowych zapoczątkowały żywiołowy, trwający nieprzerwanie do dziś, rozkwit technologii neuronowych. Podstawy teoretyczne zastosowań sieci neuronowych jako narzędzi przetwarzania informacji oraz jako narzędzi niesymbolicznej reprezentacji wiedzy przedstawiają liczne specjalistyczne monografie, np.: [153], [224], [257], [258], [334], [335], [379]. Terminologia i oznaczenia zastosowane w niniejszej pracy są zgodne z rozwiązaniami przyjętymi w większości wymienionych wyżej publikacji.

Pojęcie *sieci neuronowej* nie ma jednej powszechnie akceptowanej definicji. Stosowane określenia najczęściej podkreślają biologiczne korzenie tej metody przetwarzania informacji, traktując sieć neuronową jako bardzo uproszczony model mózgu, zbudowany ze *sztucznych neuronów* powiązanych ze sobą w *układ sieciowy* o strukturze warstwowej. Przykładem innego sposobu charakteryzowania sieci neuronowej, uwzględniającego przede wszystkim jej możliwości użytkowe, może być przyjęta w pracy [258] definicja mówiąca, że jest to „uniwersalny układ aproksymacyjny odwzorowujący wielowymiarowe zbiory danych, mający zdolność uczenia się i adaptacji do zmieniających się warunków środowiskowych, zdolność uogólniania nabytej wiedzy, stanowiąc pod tym względem system sztucznej inteligencji”.

Sposób działania poszczególnych neuronów wchodzących w skład sieci jest zdefiniowany *funkcją aktywacji* f_a określającą związek między sygnałem pobudzenia neuronu a jego odpowiedzią. Połączenia neuronów są charakteryzowane *wagami połączeń* w_{ij} o wartościach określanych w trakcie uczenia (treningu) sieci. Zdolność adaptacyjna, umożliwiająca dobór parametrów sieci do realizacji określonego zadania, jest jedną z podstawowych zalet technologii neuronowej. Taki adaptacyjny, dokonywany technikami iteracyjnymi, dobór wag połączeń w_{ij} jest celem procesu uczenia sieci neuronowej. Wiedza zgromadzona w trakcie uczenia jest reprezentowana przez architekturę sieci oraz przez cechy połączeń neuronów.

Sieci neuronowe charakteryzują się bardzo dużą różnorodnością zarówno w zakresie *architektury* (struktury), jak i w obszarze *algorytmów uczenia*. Rozwiązania strukturalne są z reguły klasyfikowane według następujących trzech kryteriów:

- liczba warstw neuronów, gdzie wyróżnia się:
 - *sieci nie posiadające warstw pośrednich (ukrytych)*, składające się z warstwy wejściowej oraz wyjściowej; sygnały są przetwarzane jedynie przez neurony usytuowane w warstwie wyjściowej, a neurony warstwy wejściowej (tzw. *neurony hipotetyczne*) transmitują jedynie sygnały wejściowe x_i do wnętrza sieci,
 - *sieci zawierające pośrednie (ukryte) warstwy neuronów*, w których przetwarzanie sygnałów odbywa się w warstwach pośrednich oraz w warstwie wyjściowej;
- kierunek przepływu sygnałów, z podziałem na:
 - *sieci jednokierunkowe*, gdy przepływ sygnałów odbywa się w jednym kierunku – od warstwy wejściowej przyjmującej sygnały wejściowe x_i do warstwy wyjściowej generującej sygnały wyjściowe y_i ,
 - *sieci dwukierunkowe*, nazywane także sieciami ze sprzężeniem zwrotnym;
- rodzaj funkcji aktywacji neuronów, z wyróżnieniem:
 - neuronów o liniowej funkcji aktywacji,
 - neuronów o nieliniowej funkcji aktywacji.

Funkcja aktywacji neuronu to funkcja określająca sygnał wyjściowy neuronu u_i na podstawie sygnałów wejściowych x_j oraz wag w_{ij} przyporządkowanych poszczególnym wejściom:

$$u_i = f_a(e_i) = f_a\left(\sum_{j=1}^n (w_{ij}x_j + w_{i0})\right) \quad (4.10)$$

gdzie:

e_i – łączny sygnał pobudzenia neuronu i ,

w_{i0} – waga wyróżnionego wejścia x_0 , zwanego *obciążeniem*, którego sygnał jest zawsze równy 1.

W zakresie stosowanych *algorytmów uczenia* sieci są najczęściej klasyfikowane z uwagi na:

- *strategię uczenia*, z wyróżnieniem trzech podstawowych rozwiązań:
 - *uczenia z nadzorem* (z *nauczycielem*), gdy w procesie uczenia wykorzystywany jest *zbiór uczący* składający się z danych wejściowych i odpowiadających im pożądaných wartości danych wyjściowych; w trakcie uczenia elementy zbioru uczącego są kolejno prezentowane sieci, która uczy się je kojarzyć,

- *uczenia z krytykiem (uczenie ze wzmocnieniem)* – polegające na doborze wartości wag połączeń metodą prób; efektywność tego procesu jest oceniana, a jego działanie korygowane na podstawie sygnału, nazywanego *krytykiem*, generowanego w procesie uczenia,
- *uczenia bez nadzoru (bez nauczyciela)*, gdy uczenie odbywa się przy wykorzystaniu specyficznych właściwości sieci do *samoorganizacji*, a w efekcie do kojarzenia sygnałów wejściowych z wyjściowymi (np. uczenie sieci typu Hebb'a czy typu Kohonena);
- wpływ procesu uczenia na zmiany architektury sieci, z podziałem na:
 - *algorytmy modyfikujące* (optymalizujące) strukturę sieci w trakcie uczenia; modyfikacje dotyczą przeważnie zmiany liczby neuronów w warstwach pośrednich (ukrytych) lub usuwania połączeń neuronów o bardzo małych wagach,
 - *algorytmy nie modyfikujące* w procesie uczenia przyjętej struktury sieci.

Z punktu widzenia zastosowań w narzędziach ekspertowych sieci neuronowe są bardzo efektywną techniką niesymbolicznej reprezentacji wiedzy, a za ich najistotniejsze cechy można uznać:

- zastąpienie trudnego i czasochłonnego pozyskiwania wiedzy i tworzenia klasycznej bazy wiedzy o zapisie symbolicznym (np. w postaci reguł) procesem uczenia sieci neuronowej;
- możliwość rozwiązywania przy użyciu sieci neuronowych zagadnień, dla których istnieją trudności w sformułowaniu symbolicznego opisu wiedzy;
- możliwość wykorzystywania do uczenia sieci zarówno danych teoretycznych, jak i doświadczalnych;
- łatwość modyfikacji wiedzy reprezentowanej przez sieć neuronową poprzez douczanie sieci, na przykład na podstawie nowych, systematycznie gromadzonych danych doświadczalnych;
- dużą szybkość i niezawodność działania sieci neuronowych.

Szeroki przegląd zastosowań sieci neuronowych w inżynierii lądowej zawierają między innymi prace: [113], [114], [353], [354]. W literaturze są dostępne przykłady skutecznego wykorzystywania tej technologii do rozwiązywania niektórych problemów inżynierii mostowej, jak np.: projektowanie materiałów [178], [185], wspomaganie działań diagnostycznych [11], [65], [124], [155], wybór strategii i technologii działań utrzymaniowych [124]. W wielu ośrodkach są prowadzone także prace nad systemowym wykorzystaniem sieci neuronowych w specjalistycznych narzędziach ekspertowych wspomagających procesy decyzyjne w eksploatacji obiektów mostowych. Badania związane z tym obszarem zastosowań są realizowane także w naszym kraju, głównie w ramach projektów związanych z komputerowymi systemami zarządzania infrastrukturą mostową (np. [26], [27], [28], [29], [47], [51], [283], [284], [285]). Podczas opracowywania prezentowanej tu technologii

neuronowych komponentów sieci hybrydowych autor wykorzystał doświadczenia nabyte w trakcie tych prac.

4.4.2. Wielowarstwowe sieci jednokierunkowe

Olbrzymie zainteresowanie sieciami neuronowymi doprowadziło w ciągu ostatnich kilkunastu lat do opracowania bardzo wielu typów sieci różniących się zarówno architekturą (modele neuronów, topologia połączeń), jak i sposobami uczenia. Wiele z tych rozwiązań ma znaczenie głównie teoretyczne, ale istnieją też modele sieci neuronowych o bardzo dużej przydatności praktycznej. W zgodnej opinii wielu badaczy (np. [224], [296], [334]) największą efektywność w większości zastosowań wykazują nieliniowe sieci wielowarstwowe o jednym kierunku przepływu sygnałów, które są uczone z nadzorem, przy wykorzystaniu algorytmów wstecznej propagacji błędów. Sieci tego typu są także wykorzystywane w *neuronowych komponentach* stanowiących elementy sieci hybrydowych zaproponowanych w niniejszej pracy.

Przykładowy schemat trójwarstwowej nieliniowej sieci jednokierunkowej pokazano na rys. 4.11. Podstawowe cechy tego typu sieci można zdefiniować następująco:

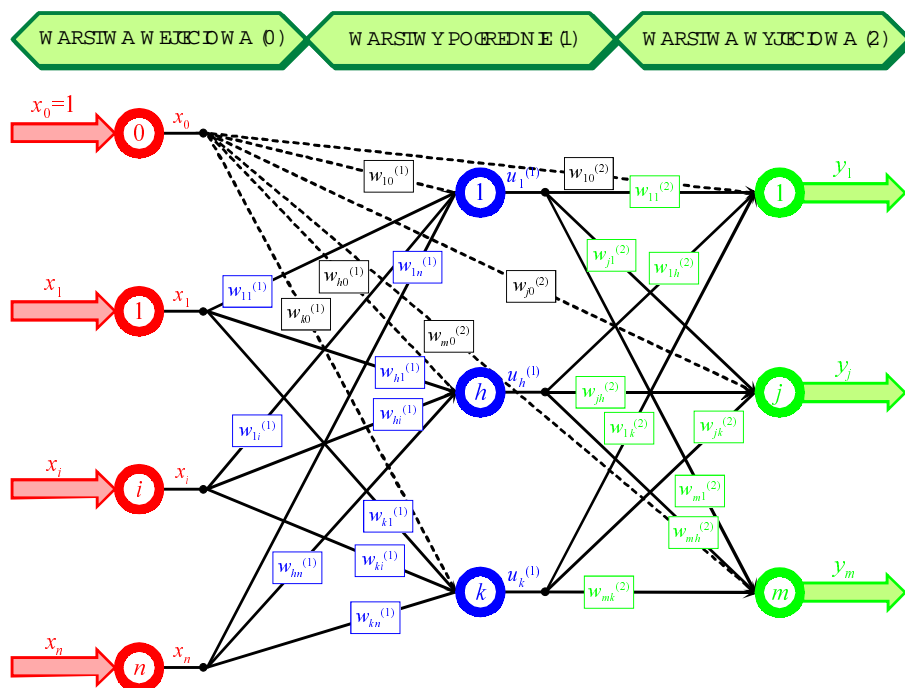
- sieć składa się z minimum trzech warstw: wejściowej, pośredniej (ukrytej) oraz wyjściowej; liczba warstw ukrytych może być dowolna;
- każda warstwa może składać się z dowolnej liczby neuronów; minimalnie warstwa może zawierać jeden neuron;
- sieć jest zbudowana z warstw neuronów o regularnych połączeniach, a wejście każdego neuronu z danej warstwy ma połączenia z wyjściami wszystkich neuronów w warstwie poprzedniej;
- jedynie neurony warstw sąsiadujących są połączone między sobą;
- neurony warstwy wejściowej (neurony hipotetyczne) nie przetwarzają sygnałów wejściowych x_i , a tylko przesyłają je do wnętrza sieci;
- wszystkie neurony w warstwach pośrednich i w warstwie wyjściowej mają jednakowe nieliniowe funkcje aktywacji f_a ;
- sygnały wyjściowe y_i są generowane przez neurony warstwy wyjściowej.

Działanie komponentu neuronowego $\langle N \rangle$ zawierającego wytrenowaną wielowarstwową jednokierunkową sieć neuronową polega na przetwarzaniu wektora sygnałów wejściowych sieci $\{X\}$ w wektor sygnałów wyjściowych $\{Y\}$ (rys. 4.11):

$$\{X\} \Rightarrow \langle N^{n-m} \rangle \Rightarrow \{Y\} \quad (4.11)$$

gdzie $\{X\}$ oznacza wektor wejściowy sieci

$$\{X\} = [x_1, \dots, x_n]^T \quad (4.12)$$



Rys. 4.11. Architektura trójwarstwowej sieci neuronowej

natomiast $\{Y\}$ – wektor wyjściowy sieci

$$\{Y\} = [y_1, \dots, y_m]^T \quad (4.13)$$

W powyższych wzorach n oraz m określają odpowiednio liczbę neuronów warstwy wejściowej oraz wyjściowej.

Dodatkowe wejście x_0 , zwane obciążeniem, ma stałą wartość sygnału równą 1.

Sygnały zewnętrzne w postaci wektora wejściowego sieci $\{X\}$ są przyjmowane przez wejściową warstwę neuronów, oznaczoną na rys. 4.11 jako (0). Sygnały te nie podlegają przetwarzaniu w neuronach warstwy wejściowej, a wektor sygnałów wyjściowych tej warstwy jest równy wektorowi wejściowemu sieci:

$$\{U^{(0)}\} = [u_1^{(0)}, \dots, u_n^{(0)}]^T = \{X\} = [x_1, \dots, x_n]^T \quad (4.14)$$

Macierz współczynników wag neuronów warstwy pośredniej (1) można zapisać w postaci:

$$[W^{(1)}] = \begin{bmatrix} w_{10}^{(1)} & \dots & w_{1n}^{(1)} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{k0}^{(1)} & \dots & w_{kn}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{W_1^{(1)}\}^T \\ \vdots \\ \{W_k^{(1)}\}^T \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

W rozpatrywanych jednokierunkowych sieciach wielowarstwowych sygnały wejściowe dochodzące do neuronów w każdej warstwie pośredniej pochodzą wyłącznie od sygnałów wyjściowych neuronów z warstw poprzednich, a sygnały wyjściowe dochodzą wyłącznie do neuronów następnych warstw. Biorąc to pod uwagę, wektor sumarycznych pobudzeń neuronów warstwy pośredniej (1) wywołanych wektorem wejściowym $\{X\}$ można przedstawić jako:

$$\{A^{(1)}\} = [W^{(1)}]\{X\} = [a_1^{(1)}, \dots, a_k^{(1)}]^T \quad (4.16)$$

gdzie $a_i^{(1)}$ oznacza sumaryczne pobudzenie neuronu i warstwy pośredniej (1).

Sygnały wyjściowe poszczególnych neuronów warstwy pośredniej (1) można wyznaczyć z zależności:

$$u_h^{(1)} = f_a(a_h^{(1)}) = f_a\left(\{W_h^{(1)}\}^T \cdot \{X\}\right) \quad (4.17)$$

gdzie f_a oznacza funkcję aktywacji neuronu, natomiast h jest numerem neuronu warstwy pośredniej.

Ostatecznie wektor sygnałów wyjściowych wszystkich k neuronów warstwy pośredniej (1) można zapisać jako:

$$\{U^{(1)}\} = [u_1^{(1)}, \dots, u_k^{(1)}]^T \quad (4.18)$$

Podobnie jak dla warstwy pośredniej (1), macierz współczynników wag neuronów warstwy wyjściowej (2) ma postać:

$$[W^{(2)}] = \begin{bmatrix} w_{10}^{(2)} & \dots & w_{1k}^{(2)} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{m0}^{(2)} & \dots & w_{mk}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{W_1^{(2)}\}^T \\ \vdots \\ \{W_m^{(2)}\}^T \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Analogicznie do wzoru (4.16), wektor sumarycznych pobudzeń neuronów warstwy wyjściowej (2) można przedstawić jako:

$$\{A^{(2)}\} = [W^{(2)}]\{U^{(1)}\} = [a_1^{(2)}, \dots, a_m^{(2)}]^T \quad (4.20)$$

Sygnały wyjściowe każdego z m neuronów warstwy (2) wyznacza się ze wzoru:

$$y_j = u_j^{(2)} = f_a\left(\{W_j^{(2)}\}^T \{U^{(1)}\}\right) = f_a\left(\{W_j^{(2)}\}^T \begin{Bmatrix} f_a\left(\{W_1^{(1)}\}^T \{X\}\right) \\ \vdots \\ f_a\left(\{W_k^{(1)}\}^T \{X\}\right) \end{Bmatrix}\right) \quad (4.21)$$

a wektor sygnałów wyjściowych całej sieci, będący ostatecznym efektem przetwarzania sygnałów wejściowych $\{X\}$, można przedstawić jako:

$$\{Y\} = [y_1, \dots, y_m]^T = \{U^{(2)}\} = [u_1^{(2)}, \dots, u_m^{(2)}]^T \quad (4.22)$$

4.4.3. Uczenie sieci neuronowych

Algorytm wstecznej propagacji błędów jest powszechnie stosowaną procedurą uczenia wielowarstwowych sieci jednokierunkowych. W rozwiązaniu tym każdemu wektorowi wejściowemu (patrz rys. 4.11):

$$\{X\} = [x_1, \dots, x_n]^T \quad (4.23)$$

towarzyszy wektor wyjściowy:

$$\{D\} = [d_1, \dots, d_m]^T \quad (4.24)$$

zawierający pożądane wartości sygnałów wyjściowych odpowiadające sygnałom wejściowym $\{X\}$. Dane uczące tworzą *ciąg uczący* – nazywany także *zbiorem uczącym* lub *zbiorem trenującym* – złożony z kolejnych *wzorców uczących*, którymi są pary odpowiadających sobie wektorów $\{X\}$ oraz $\{D\}$. Ciąg uczący można ogólnie zapisać w postaci:

$$(\{X\}_1, \{D\}_1); (\{X\}_2, \{D\}_2); \dots; (\{X\}_p, \{D\}_p) \quad (4.25)$$

gdzie p jest liczbą wykorzystywanych wzorców uczących. Jedna pełna prezentacja ciągu uczącego nosi nazwę *epoki uczenia sieci neuronowej*.

W momencie rozpoczęcia procesu uczenia sygnały wyjściowe sieci $\{Y\}$ odpowiadające sygnałom wejściowym $\{X\}$ z reguły różnią się od pożądanych wartości wyjściowych, określonych wektorem $\{D\}$. Dla każdego wzorca uczącego błąd ten w odniesieniu do poszczególnych wyjść sieci można zapisać w postaci

$$e_j = y_j - d_j \quad (4.26)$$

Celem uczenia jest minimalizacja tego błędów dla wszystkich wyjść sieci i wszystkich wzorców uczących. Przyjmując jako miarę sumę kwadratów błędów e_j wyznaczonych dla wszystkich m wyjść sieci oraz dla wszystkich p wzorców uczących, funkcję celu można przedstawić jako:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m [y_j(k) - d_j(k)]^2 \quad (4.27)$$

Biorąc pod uwagę zależności opisane wzorem (4.21), funkcjonal błędu sieci neuronowej przedstawionej na rys. 4.11 przyjmuje dla jednego wzorca uczącego postać:

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [y_j - d_j]^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[f_a \left(\sum_{h=0}^k w_{jh}^{(2)} u_h^{(1)} \right) - d_j \right]^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[f_a \left(\sum_{h=0}^k w_{jh}^{(2)} f_a \left(\sum_{i=0}^n w_{hi}^{(1)} x_i \right) \right) - d_j \right]^2
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Stosując do minimalizacji funkcjonału E gradientową metodę największego spadku, otrzymuje się dla warstwy wyjściowej sieci (2):

$$\frac{\partial E}{\partial w_{jh}^{(2)}} = (y_j - d_j) \frac{df_a(a_j^{(2)})}{d(a_j^{(2)})} u_h^{(1)} \tag{4.29}$$

Wprowadzając oznaczenie:

$$\delta_j^{(2)} = (y_j - d_j) \frac{df_a(a_j^{(2)})}{d(a_j^{(2)})} \tag{4.30}$$

korektę wag neuronów warstwy wyjściowej można wyznaczyć z zależności

$$\Delta w_{jh}^{(2)} = -\eta \delta_j^{(2)} u_h^{(1)} \tag{4.31}$$

gdzie η oznacza *współczynnik uczenia* określający wielkość kroku w analizie gradientowej. Ostatecznie reguła dyskretnej aktualizacji wag neuronów warstwy wyjściowej (2) ma postać:

$$w_{jh}^{(2)}(t+1) = w_{jh}^{(2)}(t) + \Delta w_{jh}^{(2)} \tag{4.32}$$

gdzie t oznacza numer kolejnej prezentacji wzorca uczącego.

Podobnie dla pośredniej warstwy neuronów (1):

$$\frac{\partial E}{\partial w_{hi}^{(1)}} = \sum_{j=1}^m \delta_j^{(2)} w_{jh}^{(2)} \frac{df_a(a_h^{(1)})}{d(a_h^{(1)})} x_i \tag{4.33}$$

oznaczając

$$\delta_h^{(1)} = \sum_{j=1}^m \delta_j^{(2)} w_{jh}^{(2)} \frac{df_a(a_h^{(1)})}{d(a_h^{(1)})} \tag{4.34}$$

korektę wag neuronów warstwy pośredniej można przedstawić jako:

$$\Delta w_{hi}^{(l)} = -\eta \delta_h^{(l)} x_i \quad (4.35)$$

Ostateczny wzór określający aktualizację wag neuronów warstwy pośredniej (1) ma postać:

$$w_{hi}^{(l)}(t+1) = w_{hi}^{(l)}(t) + \Delta w_{hi}^{(l)} \quad (4.36)$$

Aktualizacja wag może być przeprowadzana dla każdego wzorca uczącego zgodnie z zależnościami podanymi wyżej (*reguła delta*) lub po prezentacji całego ciągu uczącego, nazywanej *epoką uczenia*, z zastosowaniem sumarycznych korekt wag (*skumulowana reguła delta*).

W procesie oceny poprawności przebiegu procesu uczenia sieci neuronowej są z reguły rozpatrywane dwa rodzaje błędów charakteryzujących jakość działania sieci:

- *błędy uczenia sieci* – umożliwiające ocenę zgodności wektorów danych wyjściowych sieci $\{Y\}_j$ z wektorami pożądanymi wartości danych wyjściowych $\{D\}_j$, odpowiadających zadanym wektorom danych wejściowych $\{X\}_j$, gdzie poszczególne pary wektorów $\{X\}_j$ oraz $\{D\}_j$ są kolejnymi *wzorcami uczącymi*, tworzącymi tzw. *ciąg uczący* określony wzorem (4.25);
- *błędy testowania sieci* – służące do oceny zgodności wektora danych wyjściowych sieci $\{Y\}_j$ z wektorem pożądanymi wartości danych wyjściowych $\{\bar{D}\}_j$, odpowiadających zadanemu wektorowi danych wejściowych $\{\bar{X}\}_j$, gdzie elementy wektorów $\{\bar{X}\}_j$ oraz $\{\bar{D}\}_j$ są kolejnymi *wzorcami testującymi*, tworzącymi tzw. *ciąg testujący* o strukturze analogicznej do struktury *ciągu uczącego* (4.25).

W komponentach neuronowych prezentowanych w niniejszej pracy *błędy uczenia* oraz *błędy testowania* określano na podstawie:

- średniego błędu bezwzględnego E_b , wyznaczanego dla wszystkich p wzorców uczących lub testujących oraz dla wszystkich m wyjść sieci, zgodnie ze wzorem:

$$E_b = \frac{1}{pm} \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m |y_j(k) - d_j(k)| \quad (4.37)$$

- średniego błędu kwadratowego E_k , wyznaczanego także dla wszystkich p wzorców uczących lub testujących oraz dla wszystkich m wyjść sieci, zgodnie ze wzorem:

$$E_k = \frac{1}{pm} \sqrt{\sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m |y_j(k) - d_j(k)|^2} \quad (4.38)$$

4.4.4. Tworzenie komponentów neuronowych

W komponentach neuronowych prezentowanych w niniejszej pracy zastosowano wielowarstwowe jednokierunkowe sieci neuronowe o nieliniowych funkcjach aktywacji neuronów. Mimo trwających już kilka dziesięcioleci prac nad podstawami teoretycznymi i praktycznymi zastosowaniami sieci neuronowych, nie udało się dotąd opracować uniwersalnej metody umożliwiającej projektowanie sieci neuronowych, która z założenia gwarantowałaby najefektywniejsze rozwiązanie analizowanego zagadnienia. Stąd jedynym właściwie sposobem racjonalnego projektowania jest metoda prób, w której kolejne kroki określone są na podstawie wyników analizy wcześniejszych przybliżeń.

Najważniejsze cechy proponowanych w niniejszej pracy neuronowych komponentów sieci hybrydowych zestawiono w tab. 4.3, a kolejne etapy procesu definiowania właściwości komponentu zaprezentowano na rys. 4.12.

Tab. 4.3. Podstawowe cechy komponentów neuronowych

Cecha komponentu	Właściwości komponentu
Wejścia	<ul style="list-style-type: none"> dopuszczalna postać danych: liczba rzeczywista x_i liczba wejść komponentu: bez ograniczeń sposób definiowania: indywidualnie dla każdego wejścia
Definiowalne zasoby komponentu	<ul style="list-style-type: none"> topologia sieci neuronowej funkcje aktywacji neuronów
Definiowalne operacje	<ul style="list-style-type: none"> operacje uczenia operacje testowania
Wyjścia	<ul style="list-style-type: none"> dopuszczalna postać danych: liczba rzeczywista y_i liczba wyjść komponentu: bez ograniczeń sposób definiowania: indywidualnie dla każdego wyjścia

Pierwszym etapem kreowania sieci neuronowej jest określenie jej architektury, a w szczególności:

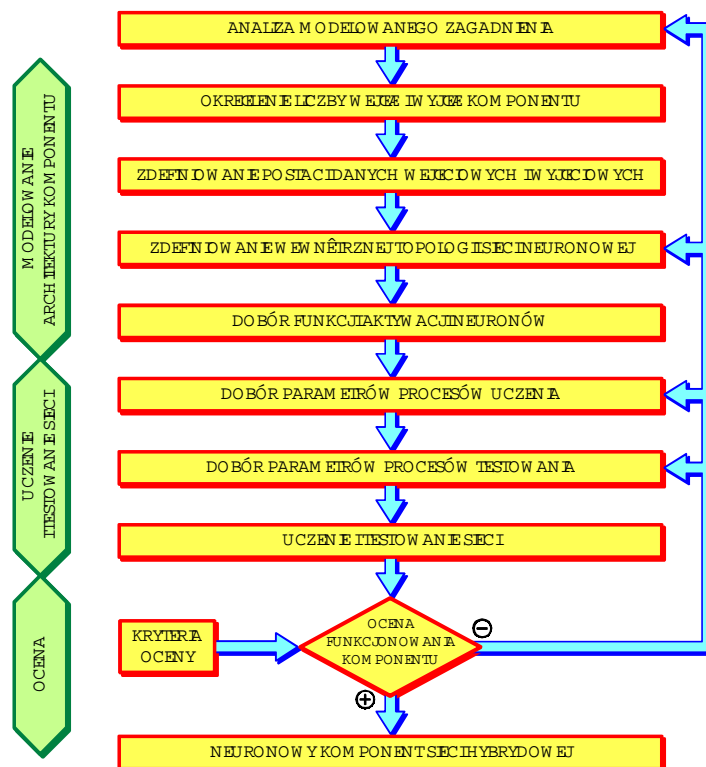
- zdefiniowanie liczby neuronów wejściowych i wyjściowych;
- określenie wewnętrznej topologii sieci (liczba warstw neuronów, liczba neuronów w każdej warstwie);
- dobór funkcji aktywacji neuronów.

Liczba neuronów w wejściowej i wyjściowej warstwie sieci zależy bezpośrednio od modelowanego zagadnienia. Przy wykorzystywaniu proponowanej w niniejszej pracy technologii sieci hybrydowych najbardziej racjonalnym rozwiązaniem okazuje się z reguły podział analizowanego problemu na mniejsze zagadnienia składowe, co

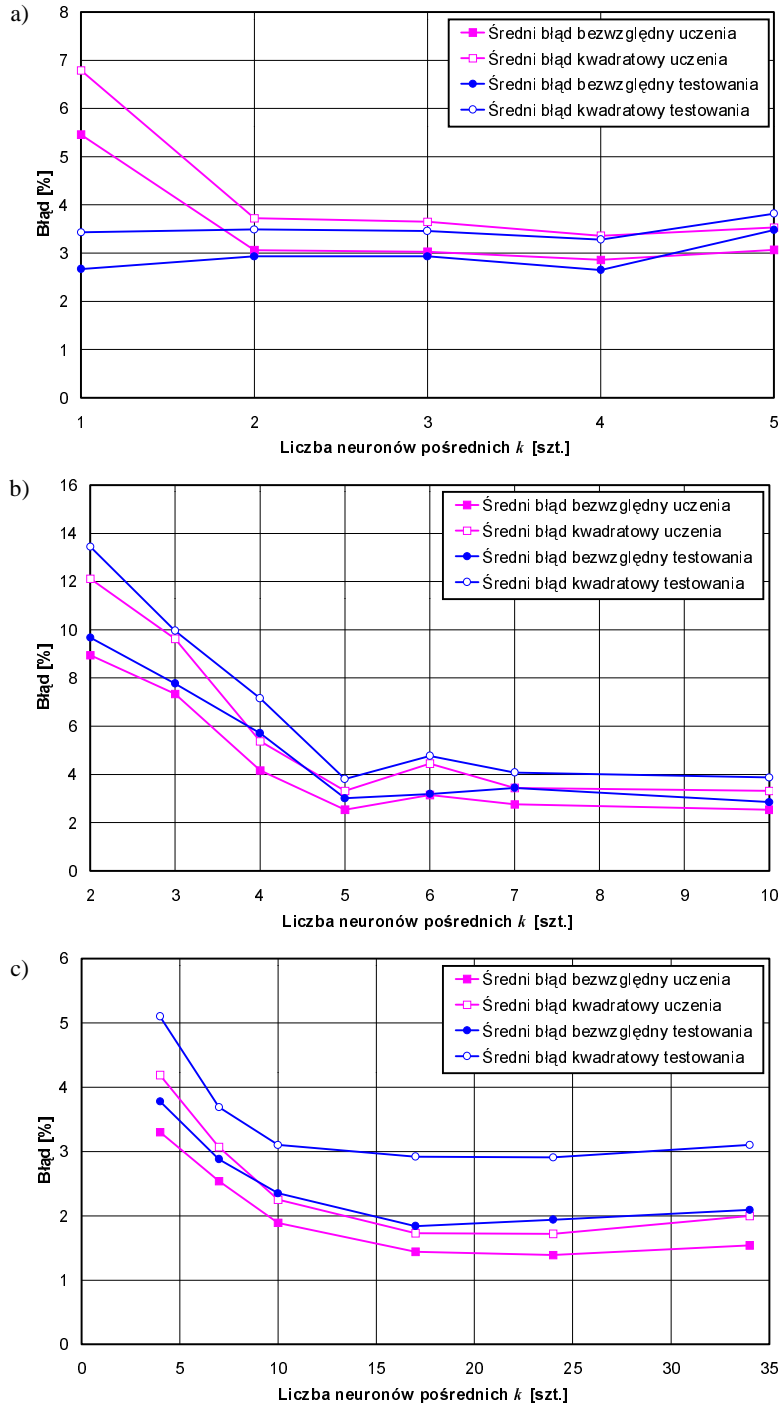
w efekcie prowadzi do kreowania mniejszych i łatwiejszych w przygotowaniu sieci neuronowych.

Jak wykazano w wielu pracach (np. [224], [296], [334]), w praktycznie wszystkich aplikacjach wielowarstwowych sieci jednokierunkowych wystarczające jest użycie jednej lub maksimum dwóch pośrednich (ukrytych) warstw neuronów. W neuronowych komponentach sieci hybrydowych liczba warstw pośrednich nie jest ograniczona, ale najczęściej jest stosowana jedna warstwa ukryta. Racjonalny dobór liczby neuronów w warstwie ukrytej wymaga z reguły przeprowadzenia indywidualnej analizy dla każdego modelowanego zagadnienia. Przykłady wyników takich analiz wykonanych dla sieci modelujących wpływ różnych typów uszkodzeń na ocenę stanu technicznego elementów konstrukcji mostowych przedstawiono na rys. 4.13.

Prezentowane wykresy pokazują wpływ liczby neuronów w warstwach pośrednich sieci trójwarstwowych na jakość sieci ocenianą na podstawie błędów uczenia i testowania. Wszystkie wyniki dotyczą sieci z jednym wyjściem, ale posiadających od dwóch (sieć N^{2-k-1}) do 24 wejść (sieć N^{24-k-1}). Porównanie rezultatów analiz umożliwia racjonalne zaprojektowanie struktury każdej z rozpatrywanych sieci.



Rys. 4.12. Schemat procesu definiowania komponentu neuronowego



Rys. 4.13. Wpływ liczby neuronów w warstwie pośredniej na wyniki uczenia i testowania wybranych sieci:
 a) sieć N^{2-k-1} ,
 b) sieć N^{4-k-1} ,
 c) sieć N^{24-k-1}

W zakresie wyboru *funkcji aktywacji neuronów*, po przeprowadzeniu analiz porównawczych, za najbardziej efektywną w rozpatrywanym obszarze zastosowań uznano unipolarną sigmoidalną funkcję aktywacji w postaci funkcji logistycznej określonej wzorem:

$$f_a(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.39)$$

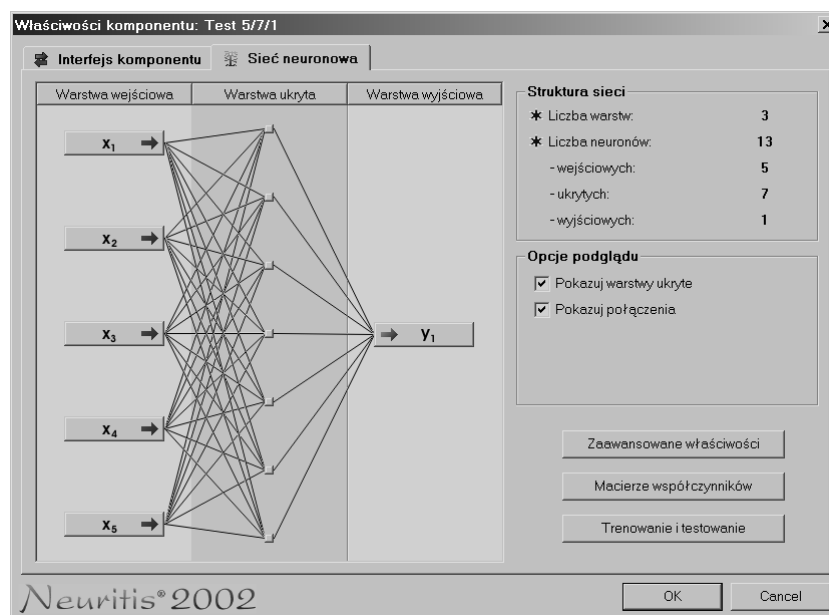
Tak zdefiniowana funkcja aktywacji jest funkcją ciągłą o wartościach rzeczywistych. Funkcja ta ma zawsze dodatnią pochodną określoną prostą zależnością:

$$f'_a(x) = f_a(x)[1 - f_a(x)] \quad (4.40)$$

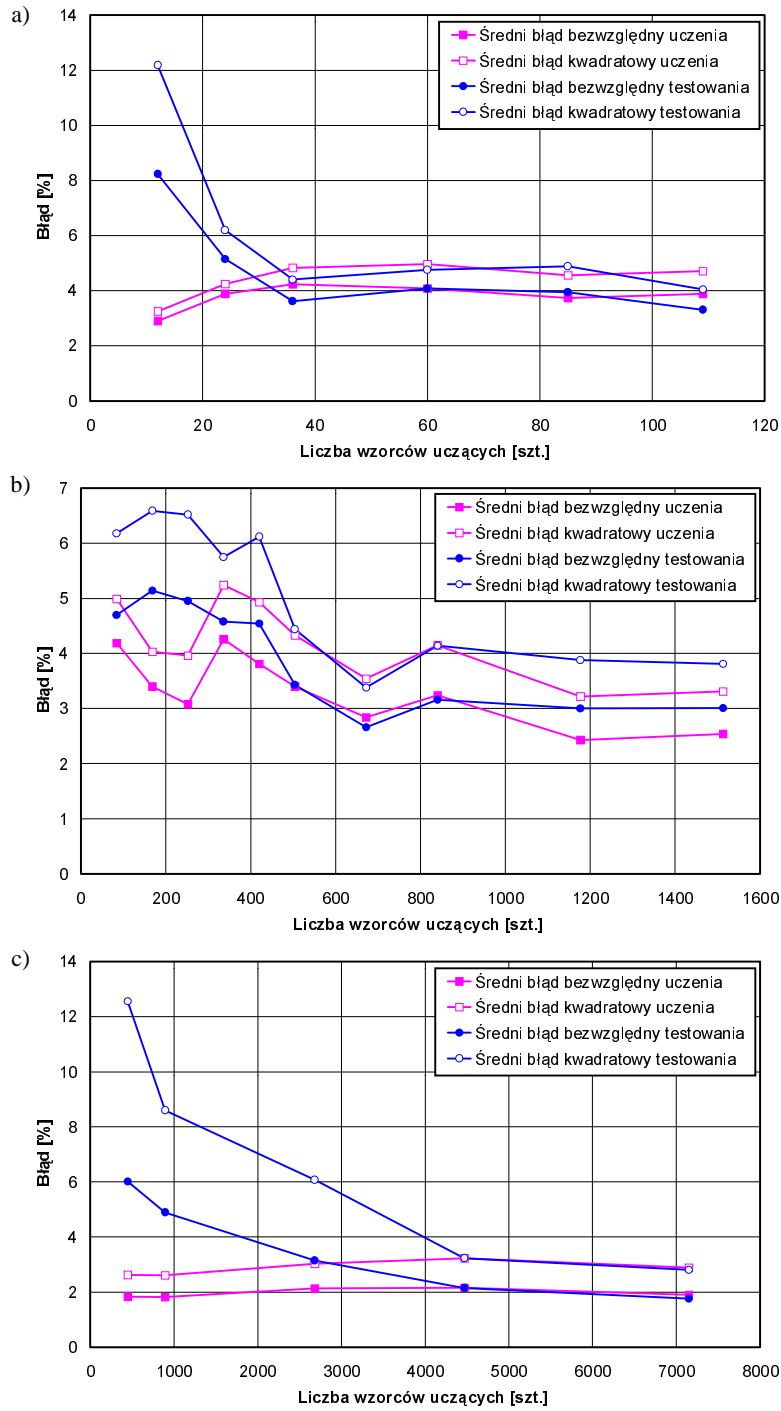
Oprogramowanie systemu NEURITIS umożliwia graficzną prezentację struktury sieci neuronowej implementowanej w komponencie, co pokazano na rys. 4.14.

Po zaprojektowaniu architektury sieć neuronowa podlega uczeniu i testowaniu przy wykorzystaniu pozyskanych zasobów wiedzy sformalizowanej w postaci ciągów uczących i testujących. Najważniejsze zagadnienia pojawiające się na tym etapie tworzenia sieci to:

- określenie niezbędnej liczby wzorców uczących i testujących;
- zdefiniowanie parametrów procesów uczenia i testowania.



Rys. 4.14. Komponent neuronowy – sposób prezentacji architektury zastosowanej sieci neuronowej

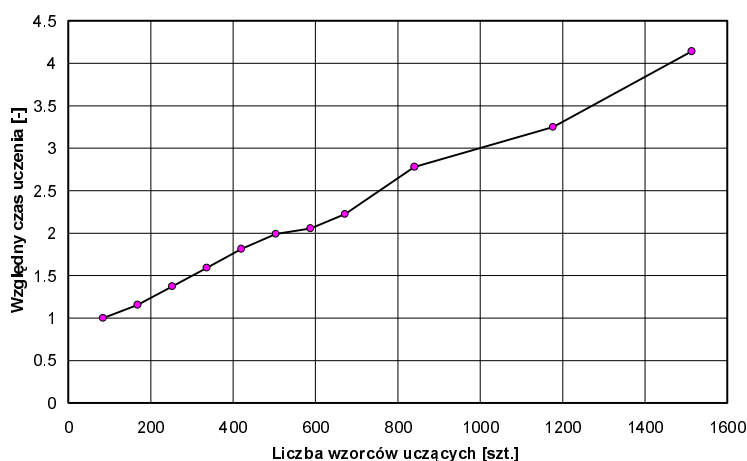


Rys. 4.15. Wpływ liczby wzorców uczących na wyniki uczenia oraz testowania sieci:
 a) sieć N^{2-2-1} ,
 b) sieć N^{4-5-1} ,
 c) sieć N^{6-12-1}

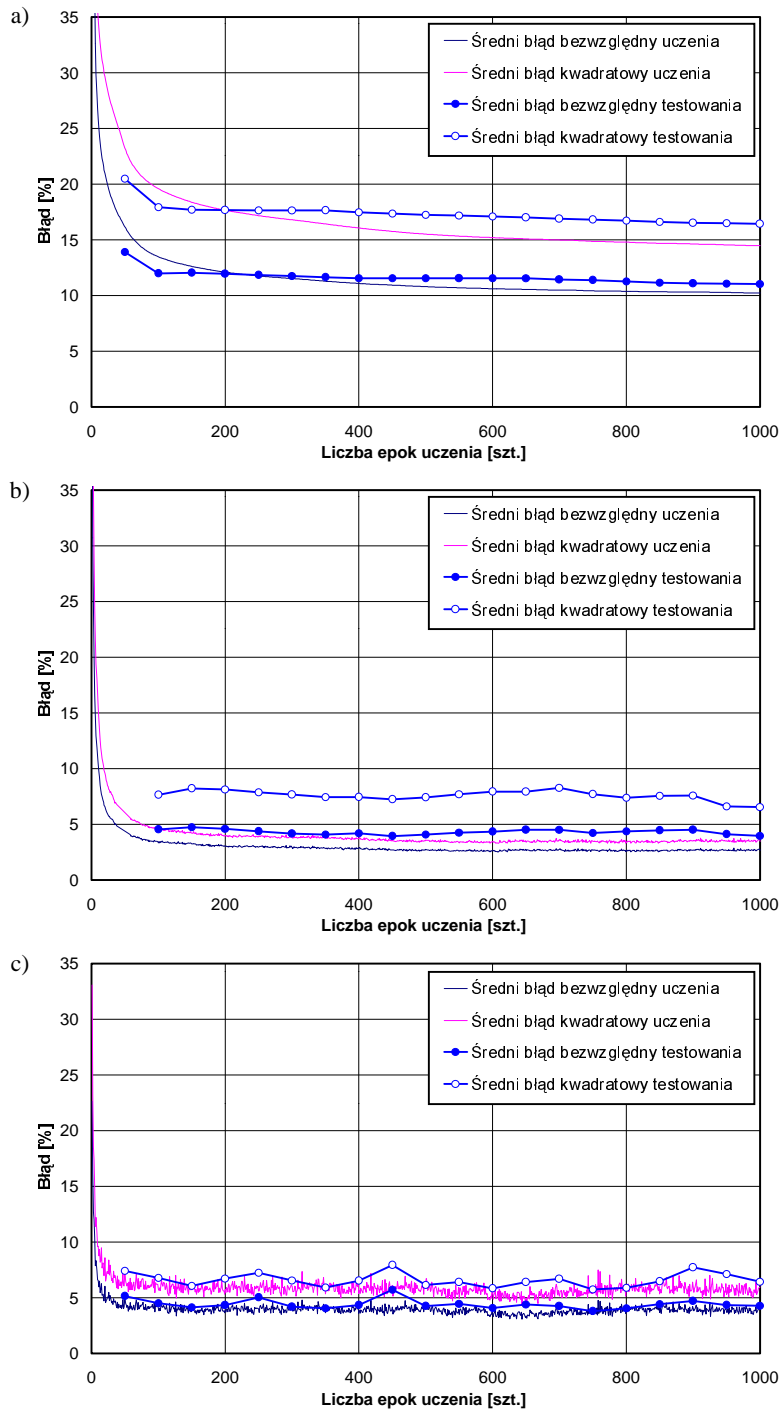
Zagadnienie określenia racjonalnej *liczebności ciągów uczących* i testujących wymaga z reguły przeprowadzenia indywidualnej analizy dla każdej kreowanej sieci. Wybrane wyniki takich analiz pokazuje rys. 4.15. Zastosowana ostatecznie liczba wzorców uczących zależy przede wszystkim od trzech czynników:

- wymaganej jakości (dokładności) działania sieci;
- możliwej do pozyskania liczby wzorców;
- akceptowalnego czasu uczenia sieci, który jest w przybliżeniu proporcjonalny do liczebności ciągu uczącego (rys. 4.16).

Końcowym krokiem tworzenia sieci jest proces jej uczenia. Zastosowane w komponentach neuronowych wielowarstwowe sieci jednokierunkowe podlegają uczeniu metodą wstecznej propagacji błędu. Istotne znaczenie dla efektywności i czasu uczenia ma dobór parametrów tego procesu, a w szczególności wartość *współczynnika uczenia* η występującego we wzorze (4.31) oraz (4.35). W trakcie prac nad neuronowymi komponentami sieci hybrydowych przeprowadzono szereg analiz mających na celu określenie racjonalnego sposobu doboru współczynnika η dla sieci neuronowych wykorzystywanych do modelowania kondycji obiektów mostowych. Wybrane wyniki analiz przedstawiono na rys. 4.17 oraz na rys. 4.18 na przykładzie trójwarstwowej sieci o 24 neuronach wejściowych, 17 neuronach w warstwie pośredniej i o 1 neuronie wyjściowym ($N^{24-17-1}$). We wszystkich przypadkach wykorzystano ten sam zbiór uczący i testujący, a parametry uczenia i testowania, poza współczynnikiem uczenia η , pozostawały niezmiennie.



Rys. 4.16. Względny czas uczenia sieci N^{4-5-1} w zależności od liczby wzorców uczących dla 5000 epok uczenia (w stosunku do czasu uczenia dla 100 wzorców)



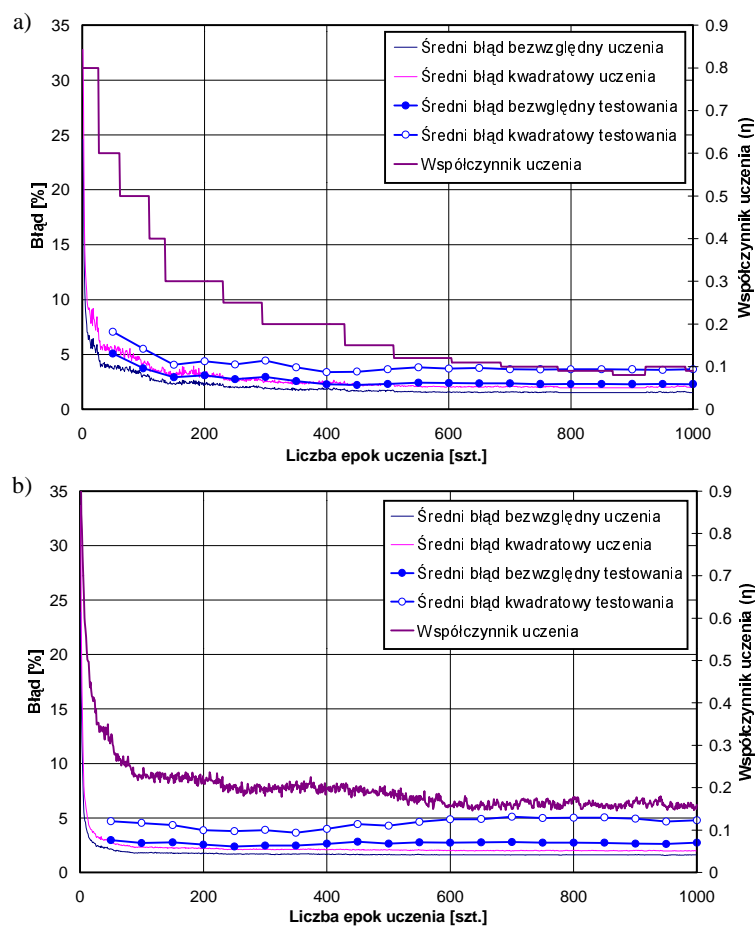
Rys. 4.17. Przebieg uczenia i testowania sieci $N^{24-17-1}$ przy stałym współczynniku uczenia:

- $\eta = 0,001$,
- $\eta = 0,01$,
- $\eta = 1,0$

Na rysunku 4.17 zaprezentowano przebieg procesu uczenia przy przyjęciu stałych wartości współczynnika uczenia η , wynoszącej kolejno: 0,001 (rys. 4.17a), 0,01 (rys. 4.17b) oraz 1,0 (rys. 4.17c). Do oceny skuteczności procesu uczenia zastosowano średni błąd bezwzględny uczenia E_b oraz testowania \bar{E}_b , a także średni błąd kwadratowy uczenia E_k i testowania \bar{E}_k , zgodnie ze wzorami (4.37) oraz (4.38).

Przebiegi procesu uczenia tej samej sieci przy współczynniku η zmieniającym się w trakcie uczenia pokazano na rys. 4.18. Przedstawiono tu dwa warianty:

- ręczne sterowanie wartością η przez operatora obserwującego na bieżąco przebieg procesu uczenia sieci – rys. 4.18a;



Rys. 4.18. Przebieg uczenia i testowania sieci $N^{24-17-1}$ przy zmiennym współczynniku uczenia: a) sterowanie ręczne, a) automatyczny dobór współczynnika η w zależności od rezultatów uczenia,

- automatyczną adaptację współczynnika η w zależności od bieżących efektów procesu uczenia (rys. 4.18b); w prezentowanym przykładzie zastosowano liniową zmianę η w przedziale od 1,0 do 0,1 w zależności od tego, dla jakiej części przykładów uczących różnice pomiędzy wartościami wyjściowymi sieci a wzorcami są mniejsze od założonej tolerancji (w przykładzie przyjęto tolerancję 5%).

Tab. 4.4. Wyniki uczenia i testowania sieci neuronowej $N^{24-17-1}$ przy różnych wartościach współczynnika uczenia η

Sposób definiowania współczynnika uczenia η	Uczenie		Testowanie	
	średni błąd bezwzględny [%]	średni błąd kwadratowy [%]	średni błąd bezwzględny [%]	średni błąd kwadratowy [%]
Stała wartość współczynnika uczenia $\eta = 0,001$	10,24	14,47	11,03	16,44
Stała wartość współczynnika uczenia $\eta = 0,01$	2,68	3,48	3,96	6,55
Stała wartość współczynnika uczenia $\eta = 0,7$	3,51	5,08	4,65	7,24
Stała wartość współczynnika uczenia $\eta = 1,0$	4,02	5,98	4,27	6,43
Dobór wartości współczynnika uczenia η z przedziału od 1,0 do 0,1 w zależności od poziomu zgodności działania sieci z wzorcami uczącymi	1,60	2,00	2,73	4,78
Wartość współczynnika uczenia η określana przez operatora monitorującego proces uczenia	1,53	2,00	2,29	3,65

Efekty uczenia oraz wyniki testowania analizowanej sieci przy zastosowaniu wymienionych wyżej sposobów zestawiono w tab. 4.4. Przedstawione rezultaty uzyskano w każdym przypadku dla 1000 epok uczenia (liczby prezentacji każdego wzorca uczącego). W rozpatrywanym przykładzie najlepsze wyniki otrzymano przy ręcznym sterowaniu wartością współczynnika η przez operatora na podstawie wyników bieżącej oceny przebiegu procesu uczenia. Rozwiązanie takie okazało się bardzo efektywne także w odniesieniu do większości innych sieci wykorzystywanych w komponentach neuronowych.

Prezentowana wersja autorskiego systemu NEURITIS umożliwia implementowanie w komponentach neuronowych sieci przygotowanych przy użyciu zewnętrznych narzędzi. Często korzystano z tej możliwości, importując do

komponentu sieci wykreowane przy użyciu takich narzędzi jak BrainMaker Professional [205] czy system NeuralWorks [98], [254]. W ogólnym przypadku w komponencie mogą być stosowane dowolne sieci jednokierunkowe o znanej strukturze.

4.5. Komponenty rozmyte

4.5.1. Modelowanie rozmyte – podstawowe określenia

Nieprecyzyjne, rozmyte pojęcia są bardzo często stosowane do jakościowej oceny zarówno zjawisk fizycznych, jak i stanów obiektów lub procesów. Określenia rozmyte stosowane są przede wszystkim do oceny takich wielkości, dla których nie opracowano dotychczas żadnych obiektywnych urządzeń pomiarowych. Jako przykład można podać tu ocenę stopnia destrukcji materiału na podstawie makroskopowej oceny wizualnej (np. *niski, średni, wysoki*) czy też ocenę rozwiązań kolorystycznych obiektu (np. *zdecydowanie nieudana, nieudana, obojętna, udana, bardzo udana*).

Miary rozmyte stosowane są także często w odniesieniu do wielkości, które mogą być dokładnie pomierzone, ale w momencie oceny nie dysponujemy odpowiednimi przyrządami lub, gdy zgrubna, rozmyta informacja jest wystarczająca do podjęcia prawidłowej decyzji. Miary takie są wykorzystywane między innymi w diagnostyce obiektów mostowych, np. do wstępnej oceny trwałego ugięcia dźwigarów głównych (*nieznaczące, wyraźne, duże, bardzo duże*). Jakościowe oceny rzeczywistości są formułowane w postaci subiektywnego opisu słownego (lingwistycznego). Posługując się takimi rozmytymi informacjami oraz własną logiką i inteligencją, ludzie potrafią nie tylko doskonale radzić sobie w otaczającym świecie, ale także efektywnie wymieniać informacje między sobą. Zastosowanie rozmytych miar jakościowych w systemach komputerowych stało się możliwe dzięki opracowaniu koncepcji zbiorów rozmytych, przedstawionej przez Zadeha [373], [374], [375], [376] i rozwijanej następnie przez wielu innych autorów. Rozwój teorii zbiorów rozmytych umożliwił zastosowanie rozmytych pojęć definiowanych przy użyciu zmiennych lingwistycznych do modelowania procesu ludzkiego myślenia, a w efekcie doprowadził do powstania nowej klasy systemów, zwanych *systemami rozmytymi*. Najistotniejszą cechą systemów rozmytych jest podział informacji na ziarna i kodowanie jej przy użyciu zbiorów rozmytych. Zastosowanie zbiorów rozmytych prowadzi do uogólnienia informacji wynikającego z uwzględnienia jej niedokładności. Jak już wspomniano wcześniej, w wielu zagadnieniach związanych ze wspomaganiami gospodarowania obiektami mostowymi możliwość posługiwania się informacjami nieprecyzyjnymi jest bardzo cenna, a nawet niezbędna. Odnosi się to w szczególności do pojęć o rozmytych definicjach lub miarach, które trudno ująć ilościowo przy wykorzystaniu narzędzi tradycyjnej matematyki.

Definicje i oznaczenia przyjęte w niniejszej pracy są generalnie zgodne ze stosowanymi w większości monografii poświęconych rozmytemu modelowaniu, np. [175], [211], [261], [295], [296], [365]. Poniżej przedstawiono wybrane określenia związane z teorią zbiorów rozmytych, wykorzystywane w dalszej części pracy:

Zmienna lingwistyczna to wielkość oceniana przy wykorzystaniu wartości lingwistycznych, czyli słów lub zdań wyrażonych w języku naturalnym. Praktycznie każda wielkość może być modelowana jako zmienna lingwistyczna. Zmienne lingwistyczne mogą być oceniane przy użyciu wartości lingwistycznych lub liczb rozmytych.

Wartość lingwistyczna to słowna ocena wielkości lingwistycznej, np. *mały, średni, duży, głęboki, płytki, powierzchniowy*. Wartość lingwistyczna może być zdefiniowana na zbiorze liczb rzeczywistych lub na zbiorze elementów nie będących liczbami.

Przestrzeń lingwistyczna zmiennej jest zbiorem wszystkich wartości lingwistycznych używanych do oceny określonej zmiennej lingwistycznej.

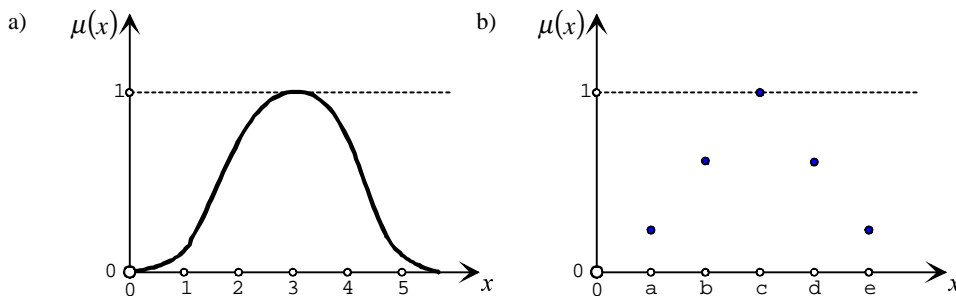
Przestrzeń numeryczna zmiennej to zbiór wszystkich wartości numerycznych, jakie może ta zmienna przyjąć.

Zbiorem rozmytym A , w pewnej przestrzeni rozważań X , nazywamy zbiór par:

$$A = \{(x, \mu_A(x))\}, \quad \forall x \in X \quad (4.41)$$

gdzie μ_A jest *funkcją przynależności* zbioru rozmytego A , która każdemu elementowi $x \in X$ przypisuje jego *stopień przynależności* $\mu_A(x)$ do zbioru rozmytego A .

Funkcja przynależności μ_A przyporządkowuje każdemu elementowi x przestrzeni X pewną wartość z zakresu $[0, 1]$. Funkcje przynależności mogą być określone w sposób ciągły (rys. 4.19a) lub dyskretny (rys. 4.19b).



Rys. 4.19. Funkcje przynależności zbioru rozmytego A : a) ciągła, b) dyskretna

Stosuje się następujący *symboliczny zapis* zbioru rozmytego:

- gdy X jest przestrzenią o nieskończonej liczbie elementów (patrz rys. 4.19a):

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (4.42)$$

- gdy X jest przestrzenią o skończonej liczbie elementów (patrz rys. 4.19b):

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (4.43)$$

Przedstawiony wyżej sposób zapisu zbioru rozmytego oznacza, że zbiór A jest sumą mnogościową par $(\mu_A(x_i), x_i)$ i nie symbolizuje operacji dzielenia mimo podobnego sposobu notacji.

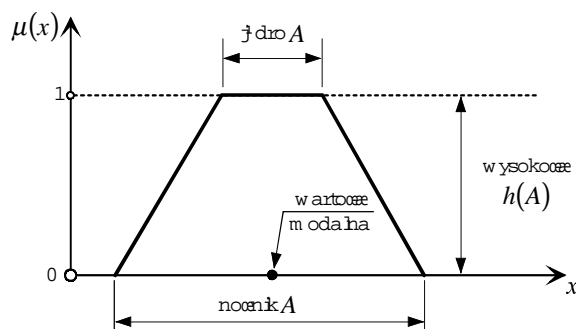
Stożek przynależności $\mu_A(x)$ jest równy wartości funkcji przynależności elementu x i określa, w jakim stopniu element ten należy do zbioru A :

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1], \quad \forall x \in X \quad (4.44)$$

Wektor przynależności zbioru rozmytego $\{\mu_A\}$ jest to wektor zawierający stopnie przynależności wszystkich elementów zbioru rozmytego A o ustalonej kolejności elementów.

Wysokość zbioru rozmytego A to maksymalna wartość funkcji przynależności w całej przestrzeni X zbioru (rys. 4.20):

$$h(A) = \sup_{x \in A} (\mu_A(x)) \quad (4.45)$$



Rys. 4.20. Podstawowe parametry zbioru rozmytego A

Zbiór rozmyty normalny to zbiór, którego wysokość jest równa 1 ($h(A)=1$).

Nośnik zbioru rozmytego A to zbiór elementów przestrzeni X mających niezerowy stopień przynależności do zbioru A (rys. 4.20), co można zapisać jako:

$$S(A) = \{x : \mu_A(x) > 0, x \in X\} \quad (4.46)$$

Jądro zbioru rozmytego A to podzbiór nierozmyty zbioru A w przestrzeni rozważań X , złożony ze wszystkich elementów o stopniu przynależności równym jeden (rys. 4.20):

$$C(A) = \text{core}(A) = \{x : \mu_A(x) = 1, x \in X\} \quad (4.47)$$

Wartość modalna zbioru rozmytego A :

- dla zbiorów rozmytych z jądrem zawierającym tylko jeden element – wartość jądra;
- dla zbiorów rozmytych z jądrem zawierającym więcej niż jeden element – średnia wartość jądra (rys. 4.20).

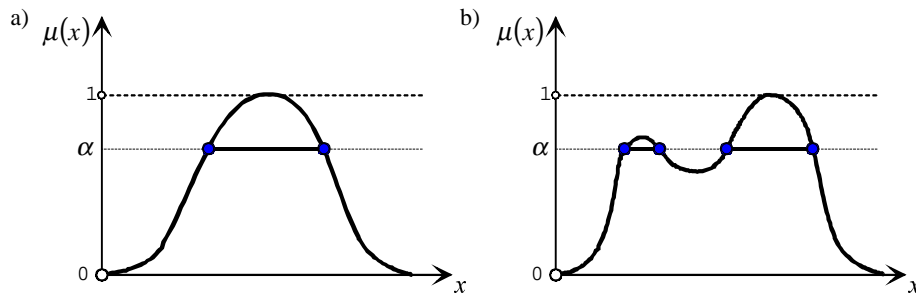
Rozmyty singleton to zbiór rozmyty A , którego nośnik jest pojedynczym punktem $\bar{x} \in X$, a funkcja przynależności jest równa jeden:

$$\mu_A(\bar{x}) = 1 \quad (4.48)$$

Poziomą reprezentacją zbioru rozmytego są α -przekroje, czyli zbiory elementów przestrzeni X , których stopień przynależności do zbioru A nie jest mniejszy niż α :

$$A^{\geq \alpha} = \{x : x \in X, \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (4.49)$$

Wypukły zbiór rozmyty charakteryzuje się tym, że wszystkie jego α -przekroje są zwartymi, jednoczęściowymi przedziałami przestrzeni X (rys. 4.21a). Zbiór niewypukły nie spełnia tego warunku (rys. 4.21b).



Rys. 4.21. Zbiór rozmyty: a) wypukły, b) niewypukły

Moc $\|A\|$ lub inaczej liczba kardynalna zbioru rozmytego $card(A)$ to suma stopni przynależności poszczególnych elementów do zbioru rozmytego:

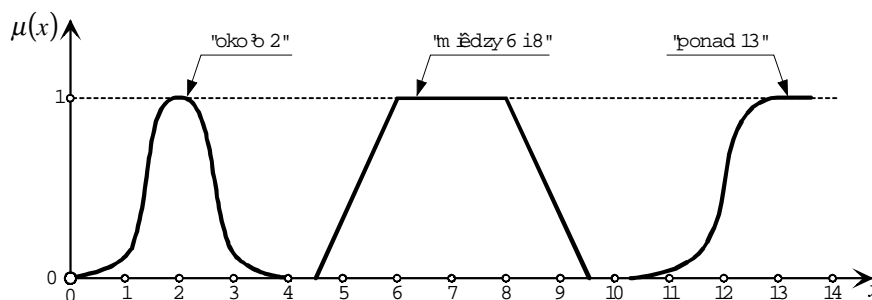
- w przypadku dyskretnego zbioru rozmytego:

$$\|A\| = card(A) = \sum_{x \in S(A)} \mu_A(x) \quad (4.50)$$

- w przypadku ciągłego zbioru rozmytego:

$$\|A\| = card(A) = \int_{x \in S(A)} \mu_A(x) dx \quad (4.51)$$

Liczba rozmyta to zbiór rozmyty określony na zbiorze liczb rzeczywistych, normalny, wypukły, o funkcji przynależności przedziałami ciągłej. Przykłady liczb rozmytych pokazano na rys. 4.22.



Rys. 4.22. Przykłady liczb rozmytych

Dopełnieniem zbioru rozmytego A jest zbiór rozmyty \bar{A} o funkcji przynależności:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.52)$$

4.5.2. Operacje na zbiorach rozmytych

4.5.2.1. Uwagi ogólne

Klasyczne operacje na zbiorach nierozmytych mogą być uogólnione na zbiory rozmyte. Operacje na zbiorach rozmytych, w odróżnieniu od operacji na zbiorach nierozmytych, mogą być wykonywane różnymi metodami (przy wykorzystaniu różnych operatorów), co jest przyczyną ich niejednoznaczności. Dobór operatorów przeprowadzany jest z reguły indywidualnie dla poszczególnych modelowanych zagadnień, najczęściej metodą prób, zgodnie z doświadczeniem i intuicją. Poniżej przedstawiono wybrane podstawowe operacje wykorzystywane w niniejszej pracy oraz stosowane operatory.

4.5.2.2. Przecięcie zbiorów rozmytych

Operator przecięcia (iloczynu logicznego) zbiorów rozmytych jest oznaczany symbolem \cap , a zbiór rozmyty C będący iloczynem logicznym zbiorów rozmytych A oraz B określonych w przestrzeni X można zapisać jako:

$$C = A \cap B \quad (4.53)$$

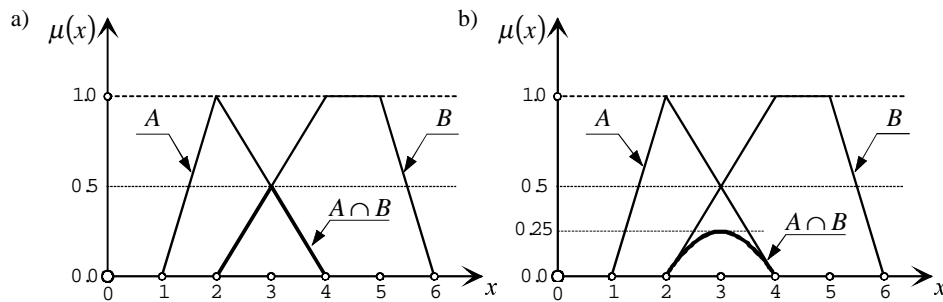
Najczęściej stosowanymi operatorami przecięcia zbiorów są:

- *operator minimum (MIN)* – zgodnie z którym funkcja przynależności iloczynu zbiorów jest opisana wzorem:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in X \quad (4.54)$$

- *operator iloczynu (PROD)* – przy zastosowaniu którego funkcja przynależności iloczynu zbiorów jest wyznaczana zgodnie ze wzorem:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (4.55)$$



Rys. 4.23. Funkcje przynależności zbioru rozmytego $A \cap B$ obliczone przy użyciu:
a) operatora *MIN*, b) operatora *PROD*

Porównanie efektów zastosowania wymienionych wyżej operatorów przedstawia rys. 4.23. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych A i B oraz funkcje przynależności iloczynu logicznego tych zbiorów uzyskane przy użyciu operatorów *MIN* i *PROD* zaprezentowano odpowiednio na rys. 4.23a oraz rys. 4.23b.

4.5.2.3. Połączenie zbiorów rozmytych

Operator połączenia (sumy logicznej) zbiorów rozmytych jest oznaczany symbolem \cup , a zbiór rozmyty C będący sumą logiczną zbiorów rozmytych A oraz B określonych w przestrzeni X można zapisać jako:

$$C = A \cup B \quad (4.56)$$

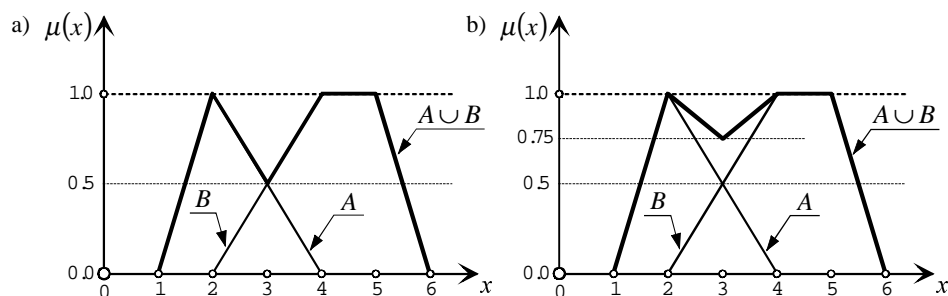
Najczęściej stosowanymi operatorami połączenia zbiorów są:

- *operator maksimum (MAX)*, zgodnie z którym funkcja przynależności iloczynu zbiorów jest opisana wzorem:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{MAX}(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in X \quad (4.57)$$

- *operator sumy algebraicznej*, przy zastosowaniu którego funkcja przynależności iloczynu zbiorów jest wyznaczana zgodnie ze wzorem:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (4.58)$$



Rys. 4.24. Funkcje przynależności zbioru rozmytego $A \cup B$ obliczone przy użyciu:
a) operatora MAX , b) operatora sumy algebraicznej

Funkcje przynależności przykładowych zbiorów rozmytych A oraz B , a także funkcje przynależności iloczynu logicznego tych zbiorów uzyskane przy użyciu operatorów MAX i operatora sumy algebraicznej, zaprezentowano odpowiednio na rys. 4.24a oraz rys. 4.24b.

4.5.3. Przybliżone wnioskowanie

Jednym z najciekawszych i najszerzej wykorzystywanych w praktyce zastosowań zbiorów rozmytych jest przybliżone wnioskowanie, którego koncepcję przedstawił Zadeh [373], [374]. Podstawą działania rozmytych systemów wnioskujących jest uogólniona (rozmyta) reguła wnioskowania *modus ponens*. Regułę tę określa następujący schemat wnioskowania:

Fakt: $x = A^*$
Implikacja: JEŻELI $(x = A)$ TO $(y = B)$
Wniosek: $y = B^*$

gdzie $A, A^* \subseteq X$ oraz $B, B^* \subseteq Y$ są zbiorami rozmytymi, a x oraz y oznaczają zmienne lingwistyczne.

Przykład wnioskowania typu *uogólniony modus ponens* może być przedstawiony następująco:

Fakt: *Bardzo duża intensywność uszkodzenia*
Implikacja: JEŻELI *(duża intensywność uszkodzenia)* TO *(stan techniczny zły)*
Wniosek: *Stan techniczny bardzo zły*

W powyższym przykładzie fakt i wniosek są stwierdzeniami nieprecyzyjnymi. Podobnie nieprecyzyjnie jest określona *przesłanka implikacji (intensywność uszkodzenia jest duża)* oraz jej *konkluzja (stan techniczny jest zły)*.

Zmiennymi lingwistycznymi są tu: intensywność uszkodzenia (x) oraz stan techniczny (y). Przestrzenie lingwistyczne obu rozpatrywanych zmiennych można przedstawić w postaci:

$$X_L = \{x_{L1}, x_{L2}, x_{L3}, x_{L4}\} = \{\text{mała}, \text{średnia}, \text{duża}, \text{bardzo duża}\} \quad (4.59)$$

$$Y_L = \{y_{L1}, y_{L2}, y_{L3}, y_{L4}, y_{L5}\} = \{\text{idealny}, \text{dobry}, \text{średni}, \text{zły}, \text{bardzo zły}\} \quad (4.60)$$

Każdy element zbiorów X_L oraz Y_L można sformalizować, przyporządkowując mu odpowiednio zdefiniowany zbiór rozmyty.

Warunkiem stosowania tautologii *uogólniony modus ponens* jest posiadanie przez regułę implikacji własności ekstrapolacyjnych, umożliwiających jej stosowanie także w przypadkach, gdy analizowany fakt nie pokrywa się dokładnie z przesłanką reguły (gdy x jest równy A^* i tylko w przybliżeniu równy A). Przy poprawnie zdefiniowanej regule generowane wnioski ($y = B^*$) powinny także w przybliżeniu pokrywać się z rzeczywistością.

W praktycznych zastosowaniach *uogólniona reguła modus ponens* okazuje się bardzo skuteczna i jest powszechnie stosowana w wielu zagadnieniach modelowania rozmytego [175], [211], [261], [296], [365]. Dotychczasowe doświadczenia autora także potwierdzają efektywność tego rozwiązania w modelowaniu obiektów i procesów na potrzeby komputerowych systemów wspomagających gospodarowanie infrastrukturą mostową. W prezentowanej monografii reguła ta będzie zastosowana w rozmytych komponentach wnioskujących, wykorzystywanych w sieciach hybrydowych.

Implikacja rozmyta stosowana w *uogólnionej regule modus ponens* jest najczęściej zapisywana symbolem:

$$A \rightarrow B \quad (4.61)$$

Funkcja przynależności implikacji $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ umożliwia określenie wyjścia (wniosku) modelu rozmytego na podstawie przedstawionych wejść (faktów). Funkcja przynależności implikacji $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ jest określana na podstawie funkcji przynależności przesłanki $\mu_A(x)$ oraz konkluzji $\mu_B(y)$ przy użyciu operatora implikacji.

Do najczęściej stosowanych operatorów implikacji należą:

- *reguła typu minimum (MIN)* nazywana operatorem Mamdaniego:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4.62)$$

- *reguła typu iloczyn (PROD)* nazywana też regułą Larsena:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \mu_B(y) \quad (4.63)$$

- reguła Łukasiewicza:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{MIN}(1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)) \quad (4.64)$$

- reguła typu MAX-MIN (reguła Zadeha):

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{MAX} \{ \text{MIN} [\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x) \} \quad (4.65)$$

4.5.4. Tworzenie komponentów rozmytych

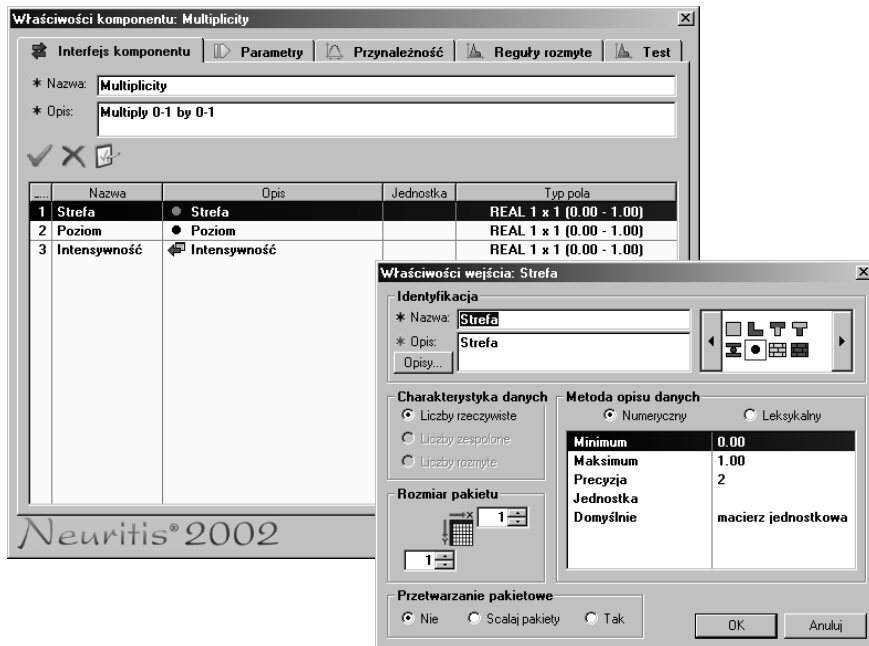
4.5.4.1. Definiowanie właściwości komponentów

Najistotniejsze cechy charakteryzujące rozmyte komponenty sieci hybrydowych zestawiono w tab. 4.5. *Danymi wejściowymi* komponentu mogą być liczby rzeczywiste, liczby rozmyte lub wartości lingwistyczne, a *dane wyjściowe* mają postać liczb rzeczywistych. Przykład sposobu definiowania wejść i wyjść komponentu pokazano na rys. 4.25.

Jako *zasoby komponentu* są definiowane funkcje przynależności wejść modelu rozmytego (przesłanek wnioskowania) oraz wyjść modelu (konkluzji), a także reguły wnioskowania. Zdefiniowania wymagają także operacje składające się na proces przybliżonego wnioskowania. Dodatkowo możliwe jest zaprogramowanie automatycznej modyfikacji predefiniowanych funkcji przynależności na podstawie danych wejściowych.

Tab. 4.5. Podstawowe cechy komponentów rozmytych

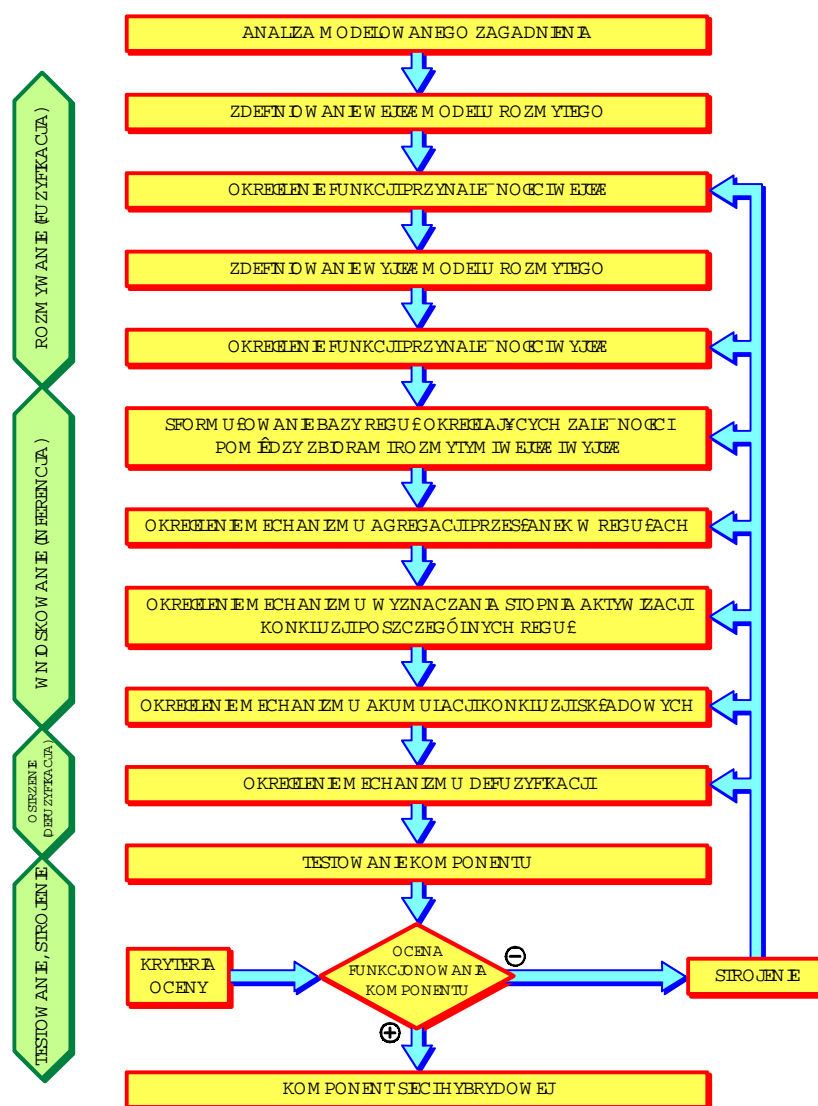
Cecha komponentu	Właściwości komponentu
Wejścia	<ul style="list-style-type: none"> • dopuszczalna postać danych: <ul style="list-style-type: none"> ◦ liczba rzeczywista x_i ◦ liczba rozmyta \hat{x}_i ◦ wartość lingwistyczna x_i^* • liczba wejść komponentu: bez ograniczeń • sposób definiowania: indywidualnie dla każdego wejścia
Definiowalne zasoby komponentu	<ul style="list-style-type: none"> • funkcje przynależności przesłanek • funkcje przynależności konkluzji • baza reguł wnioskowania
Definiowalne operacje	<ul style="list-style-type: none"> • operacje agregacji przesłanek reguł • operacje wyznaczania stopnia aktywizacji konkluzji • operacje akumulacji konkluzji reguł • operacje defuzyfikacji • modyfikacja funkcji przynależności
Wyjścia	<ul style="list-style-type: none"> • dopuszczalna postać danych: liczba rzeczywista y_i • liczba wyjść komponentu: 1 • sposób definiowania: indywidualnie dla każdego wyjścia



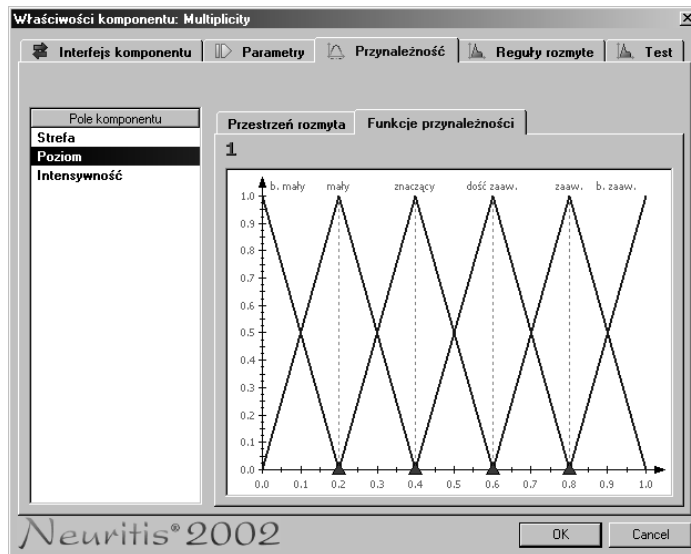
Rys. 4.25. Przykład definiowania charakterystyk wejścia komponentu rozmytego

Ogólny schemat definiowania komponentu rozmytego zaprezentowano na rys. 4.26, a proces ten można podzielić na następujące etapy:

- rozmywanie (fuzyfikacja) modelowanego zagadnienia mające na celu określenie wejść i wyjść modelu rozmytego oraz zdefiniowanie funkcji przynależności poszczególnych zbiorów rozmytych na podstawie indywidualnej analizy modelowanego systemu (obiektu, procesu); przykład zbioru funkcji przynależności modelujących wejścia komponentu rozmytego przedstawiono na rys. 4.27;
- zdefiniowanie zasad i procedur przybliżonego wnioskowania, a w szczególności określenie: bazy reguł, mechanizmu agregacji przesłanek, mechanizmu aktywizacji konkluzji reguł, mechanizmu akumulacji konkluzji (rys. 4.28);
- proces ostrzenia (defuzyfikacji) umożliwiający określenie ostrej (nierozmytej) wartości wyjścia, odpowiadającej wartościom wejść, na podstawie wynikowej funkcji przynależności wyjścia poprzez zdefiniowanie mechanizmu defuzyfikacji;
- testowanie poprawności działania komponentu i przeprowadzanie jego ewentualnego strojenia; strojenia można dokonywać, modyfikując poszczególne elementy składowe komponentu: funkcje przynależności, mechanizmy inferencji, mechanizm defuzyfikacji itp.



Rys. 4.26. Ogólny schemat tworzenia komponentu rozmytego



Rys. 4.27. Przykład sposobu graficznej prezentacji funkcji przynależności modelujących wejście komponentu rozmytego

a)

b)

Przesłanka	Konkluzja
Strefa = b. mała ORAZ Poziom = b. mały	Intensywność = 1
Strefa = b. mała ORAZ Poziom = mały	Intensywność = 1
Strefa = b. mała ORAZ Poziom = znaczący	Intensywność = 1
Strefa = b. mała ORAZ Poziom = dość zaaw.	Intensywność = 1
Strefa = b. mała ORAZ Poziom = zaaw.	
Strefa = b. mała ORAZ Poziom = b. zaaw.	
Strefa = mała ORAZ Poziom = b. mały	
Strefa = mała ORAZ Poziom = mały	
Strefa = mała ORAZ Poziom = znaczący	
Strefa = mała ORAZ Poziom = dość zaaw.	
Strefa = mała ORAZ Poziom = zaaw.	
Strefa = mała ORAZ Poziom = b. zaaw.	
Strefa = znacząca ORAZ Poziom = b.	
Strefa = znacząca ORAZ Poziom = ma	
Strefa = znacząca ORAZ Poziom = zn	
Strefa = znacząca ORAZ Poziom = do	
Strefa = znacząca ORAZ Poziom = za	
Strefa = znacząca ORAZ Poziom = b.	
Strefa = dość duża ORAZ Poziom = b.	
Strefa = dość duża ORAZ Poziom = m	

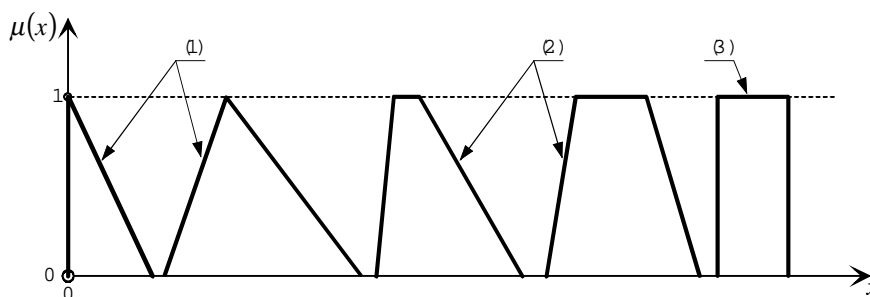
Rys. 4.28. Rozmyty komponent sieci hybrydowej: a) definiowanie procedur przybliżonego wnioskowania, b) definiowanie bazy reguł wnioskowania

4.5.4.2. Operacja rozmywania (fuzyfikacja)

Operacja rozmywania polega na zdefiniowaniu funkcji przynależności zbiorów rozmytych reprezentujących wejścia i wyjścia modelowanego systemu. Funkcje przynależności są głównym nośnikiem informacji zawartych w zbiorach rozmytych. Od typu zastosowanych funkcji oraz od sposobu ich zdefiniowania zależy w znacznym stopniu efektywność rozmytego modelowania.

Stosowane w praktyce funkcje przynależności zbiorów rozmytych można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- *funkcje odcinkowo-liniowe* – tworzone z odcinków prostych i przyjmujące kształt trapezu, trójkąta, prostokąta itp. (rys. 4.29);
- *funkcje nieliniowe* – tworzone z odcinków krzywoliniowych (np. symetryczne i niesymetryczne funkcje Gaussa, funkcje sigmoidalne, funkcje harmoniczne, funkcje wielomianowe).



Rys. 4.29. Odcinkowo-liniowe funkcje przynależności: trójkątne (1), trapezowe (2), prostokątna (3)

Dobór typu funkcji przynależności zależy od cech modelowanego systemu (obiektu, procesu) oraz od zasobów informacji o modelowanym systemie. Skromne zasoby informacji skłaniają do stosowania funkcji odcinkowo-liniowych, gdyż niedostatek informacji uniemożliwia zidentyfikowanie wszystkich parametrów funkcji nieliniowych. W wielu pracach (np. [193], [261]) podkreśla się także, że najprostsze wielokątne funkcje przynależności znacznie ułatwiają i przyspieszają proces kalibracji (strojenia) modeli rozmytych przy zachowaniu wysokiej dokładności odwzorowania. Doświadczenia autora potwierdzają te spostrzeżenia.

W związku z powyższym w prezentowanych aplikacjach zastosowano funkcje odcinkowo-liniowe. W systemie NEURITIS wspomagającym tworzenie komponentów rozmytych definiowanie funkcji przynależności zbiorów rozmytych odbywa się przy wykorzystaniu edytora graficznego. W procesie modelowania funkcji przynależności można wyróżnić dwa etapy:

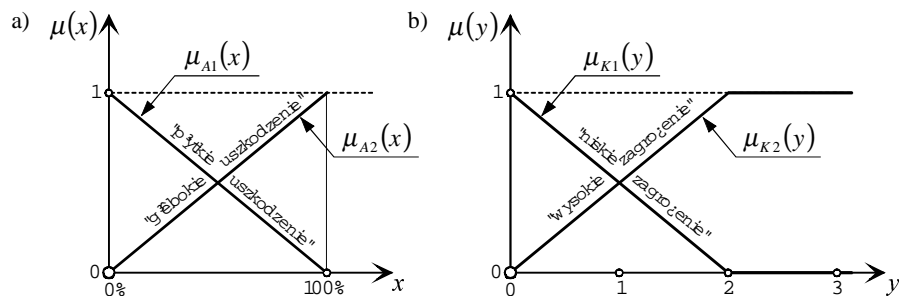
- wygenerowanie predefiniowanego zestawu funkcji przynależności dla przyjętej gęstości podziału informacji na ziarna;

- indywidualna modyfikacja poszczególnych funkcji przez zmianę położenia ich punktów węzłowych.

We wszystkich prezentowanych rozwiązaniach przyjęto zasadę, że zbiory rozmyte charakteryzujące zmienne wejściowe spełniają *warunek podziału jedności*, to znaczy suma wartości funkcji przynależności każdego elementu x z przestrzeni rozważań X jest równa 1:

$$\sum_i \mu_{A_i}(x) = 1, \quad \forall x \in X \quad (4.66)$$

Proces rozmywania zilustrowano na elementarnym przykładzie systemu o jednym wejściu i jednym wyjściu. Przyjęto, że wejściem systemu będzie informacja o głębokości uszkodzeń antykorozyjnych zabezpieczeń dźwigara stalowego (zmienna x), a wielkość ta może przyjmować wartości z przedziału od 0% (zabezpieczenie nieuszkodzone) do 100% (uszkodzenie zabezpieczenia na całej jego grubości). Założmy też, że oczekiwanym wyjściem z systemu jest ocena poziomu zagrożenia korozją materiału dźwigara (zmienna y), podawana w bezwymiarowej skali od 0 (nie ma zagrożenia) do 3 (bezpośrednie zagrożenie korozją). Na rys. 4.30 pokazano przykładowy sposób reprezentacji wejścia przy użyciu zbiorów rozmytych $A1$ („płytke uszkodzenie”) i $A2$ („głębokie uszkodzenie”) oraz reprezentacji wyjścia przy wykorzystaniu zbiorów rozmytych $K1$ („niskie zagrożenie”) oraz $K2$ („wysokie zagrożenie”). Funkcje przynależności wszystkich użytych zbiorów rozmytych są typu odcinkowo-liniowego.



Rys. 4.30. Funkcje przynależności: a) wejścia, b) wyjścia

Prezentowany przykład stanowi jedynie ilustrację procesu przybliżonego wnioskowania, nie jest natomiast rozwiązaniem zagadnienia technicznego ze względu na przyjęcie zbyt uproszczonych założeń. Pewien sens fizyczny rozpatrywanym wielkościom nadano dla przedstawienia potencjalnych obszarów zastosowań.

4.5.4.3. Operacja wnioskowania (inferencja)

W wyniku operacji inferencji jest wyznaczana wynikowa funkcja przynależności $\mu_w(y)$ wyjścia modelu, określana na podstawie danych wejściowych, bazy reguł oraz funkcji przynależności zbiorów rozmytych reprezentujących wejścia i wyjścia modelowanego systemu.

Zgodnie z procedurą tworzenia wnioskującego komponentu rozmytego, przedstawioną na rys. 4.26, pierwszym etapem pracy w części związanej z inferencją jest sformułowanie *bazy reguł*. Baza reguł definiuje związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy zbiorami rozmytymi wejść i wyjść. Zależności te są przedstawiane w formie reguł logicznych o następującej postaci:

JEŻELI (przesłanka 1) *ORAZ/LUB* ... *ORAZ/LUB* (przesłanka *n*) *TO* (konkluzja).

W ogólnym przypadku poszczególne przesłanki proste (jednoargumentowe) są łączone spójnikami logicznymi *ORAZ* albo *LUB*, tworząc przesłankę złożoną. Najprostsza baza reguł o przesłankach jednoargumentowych do przykładu przedstawionego na rys. 4.30 może mieć następującą postać:

Reguła 1: *JEŻELI* ($x = A1$) *TO* ($y = K1$);

Reguła 2: *JEŻELI* ($x = A2$) *TO* ($y = K2$).

W przypadku wnioskowania rozmytego stopień spełnienia przesłanek poszczególnych reguł może przyjmować wartości z przedziału $[0,1]$. W zależności od złożoności przesłanek można wyróżnić następujące metody wyznaczania stopnia spełnienia przesłanek przy wykorzystaniu *mechanizmów agregacji*:

- w przypadku najprostszej reguły o przesłance jednoargumentowej typu:

JEŻELI ($x = A1$)

dla dowolnego $x = \tilde{x}$ stopień spełnienia przesłanki $\mu_R(\tilde{x})$ jest równy wartości funkcji przynależności zbioru $A1$ dla $x = \tilde{x}$:

$$\mu_R(\tilde{x}) = \mu_{A1}(\tilde{x})$$

- w przypadku przesłanki złożonej z przesłanek jednoargumentowych połączonych spójnikiem logicznym *ORAZ*:

JEŻELI ($x_1 = A1$) *ORAZ* ($x_2 = B1$)

stopień spełnienia przesłanki dla danych $x_1 = \tilde{x}_1$ oraz $x_2 = \tilde{x}_2$ można wyznaczyć, agregując przesłanki za pomocą operatora *MIN* i wtedy zgodnie ze wzorem (4.54) otrzymuje się w rezultacie:

$$\mu_R(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \mu_{A1 \cap B1}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \text{MIN}(\mu_{A1}(\tilde{x}_1), \mu_{B1}(\tilde{x}_2)) \quad (4.67)$$

lub używając operatora *PROD* i wtedy zgodnie ze wzorem (4.55) uzyskuje się wynik w postaci:

$$\mu_R(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \mu_{A1 \cap B1}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \mu_{A1}(\tilde{x}_1) \mu_{B1}(\tilde{x}_2) \quad (4.68)$$

- w przypadku przesłanki złożonej z przesłanek jednoargumentowych połączonych spójnikiem logicznym *LUB*:

$$\text{JEŻELI } (x_1 = A1) \text{ LUB } (x_2 = B1)$$

stopień spełnienia przesłanki dla danych $x_1 = \tilde{x}_1$ oraz $x_2 = \tilde{x}_2$ można wyznaczyć, agregując przesłanki zgodnie ze wzorem:

$$\mu_R(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \mu_{A1 \cup B1}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \text{MAX}(\mu_{A1}(\tilde{x}_1), \mu_{B1}(\tilde{x}_2)) \quad (4.69)$$

Kolejnym etapem w procesie tworzenia komponentu (rys. 4.26) jest zdefiniowanie sposobu wyznaczania *stopnia aktywizacji konkluzji* poszczególnych reguł. Mechanizm ten jest definiowany poprzez wybór operatora implikacji. W prezentowanych zastosowaniach wykorzystywano:

- operator implikacji Mamdaniego (*MIN*) – patrz wzór (4.62);
- operator implikacji Larsena (*PROD*) – patrz wzór (4.63).

Ostatnią procedurą wchodzącą w skład procesu wnioskowania jest *mechanizm akumulacji konkluzji* poszczególnych reguł. Mechanizm ten określa sposób wyznaczania wynikowej funkcji przynależności konkluzji całej bazy reguł $\mu_w(y)$ na podstawie zmodyfikowanych funkcji przynależności konkluzji składowych $\mu_{K_i}(y)$. W prezentowanych tu rozwiązaniach akumulacja konkluzji jest przeprowadzana zgodnie ze wzorem:

$$\mu_w(y) = \text{MAX}[\mu_{K_1}(y), \mu_{K_2}(y), \dots, \mu_{K_n}(y)] \quad (4.70)$$

Dwie najczęściej i najchętniej stosowane procedury przybliżonego wnioskowania, na przykładzie pokazanego na rys. 4.30 systemu z jednym wejściem i jednym wyjściem, przedstawiono na rysunkach:

- metodę *MAX-MIN* – na rys. 4.31;
- metodę *MAX-PROD* – na rys. 4.32.

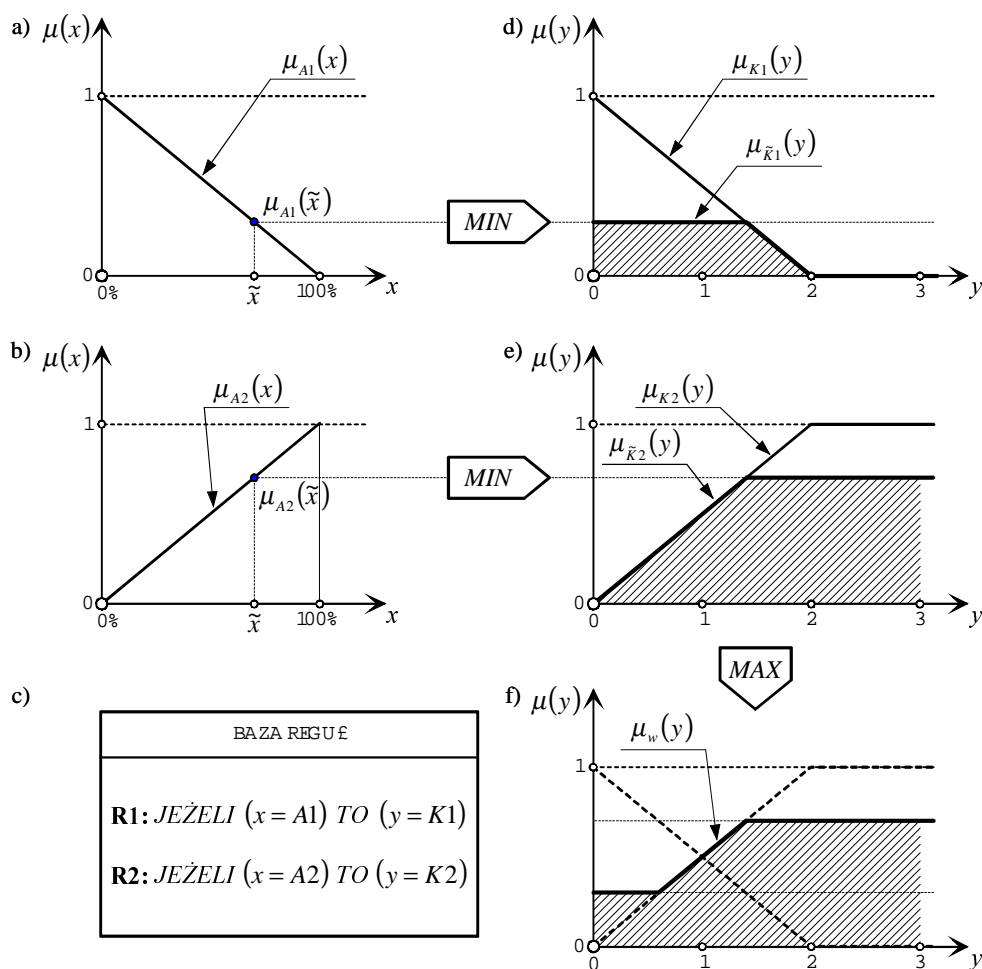
W metodzie *MAX-MIN* zastosowano operator implikacji Mamdaniego, a w metodzie *MAX-PROD* – operator implikacji typu *PROD* (Larsena). W obu metodach do akumulacji konkluzji reguł użyto operatora *MAX*.

Gdy dane wejściowe określone są w postaci liczby rozmytej \tilde{A} – wtedy dla jednoargumentowej przesłanki

$$\text{JEŻELI } (x = A)$$

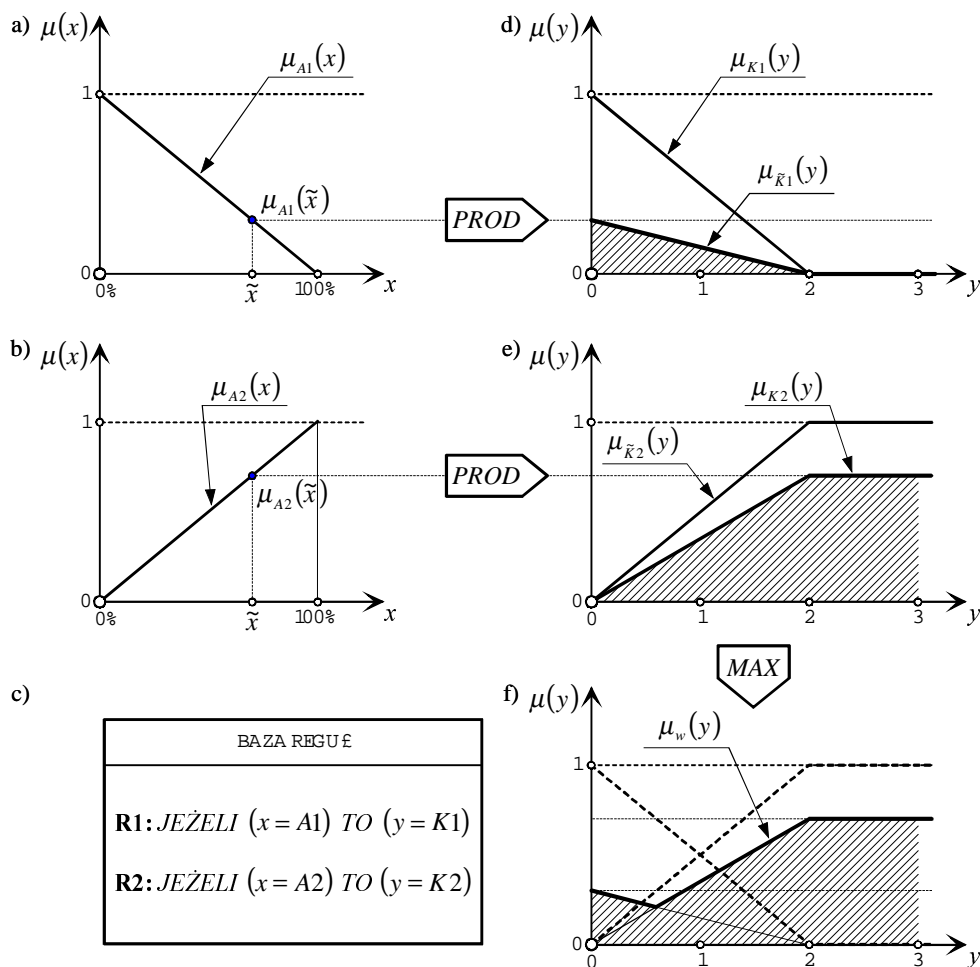
stopień spełnienia przesłanki reguły można określić ze wzoru:

$$h_R = \text{MAX}_{x \in X} \text{MIN}[\mu_A(x), \mu_{\tilde{A}}(x)] \quad (4.71)$$



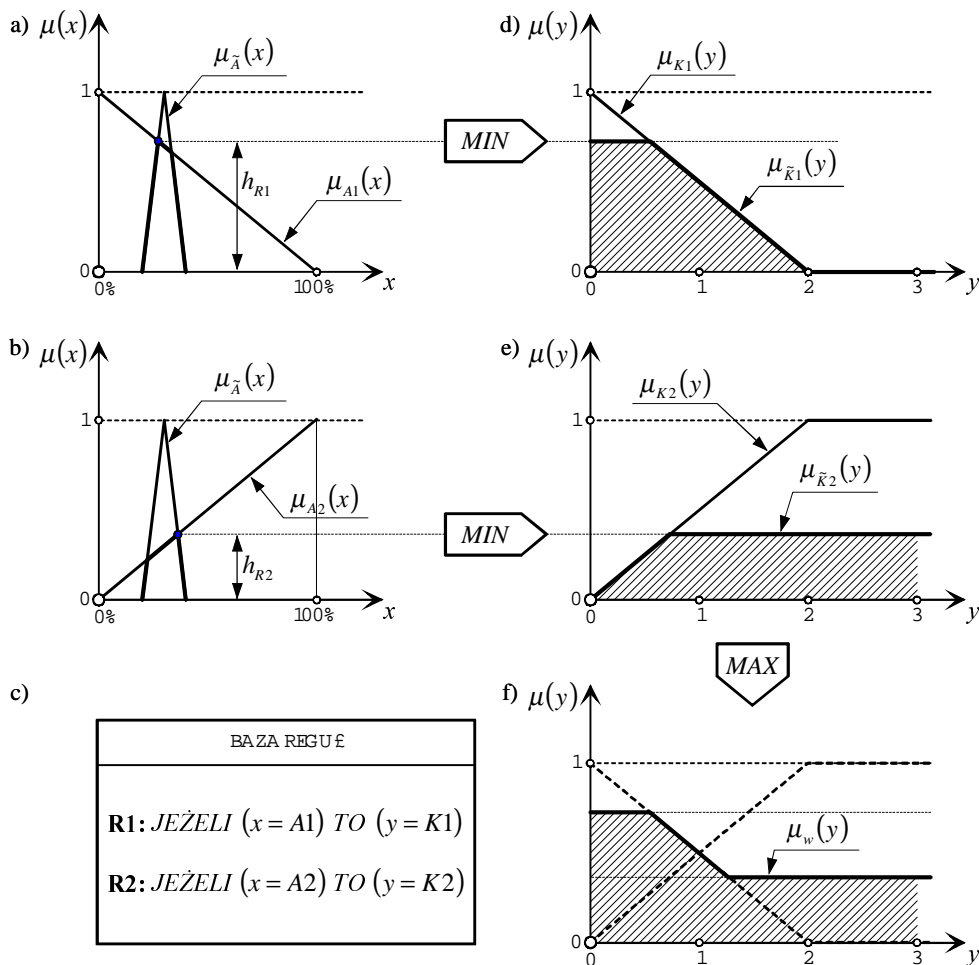
Rys. 4.31. Przykład rozmytego wnioskowania metodą *MAX-MIN* przy danej wejściowej w postaci liczby: a) funkcja przynależności $\mu_{A1}(x)$ przesłanki reguły **R1**, b) funkcja przynależności $\mu_{A2}(x)$ przesłanki reguły **R2**, c) baza reguł, d) funkcja przynależności $\mu_{K1}(y)$ konkluzji reguły **R1** i zmodyfikowana funkcja przynależności $\mu_{\tilde{K}1}(y)$, e) funkcja przynależności $\mu_{K2}(y)$ konkluzji reguły **R2** i zmodyfikowana funkcja przynależności $\mu_{\tilde{K}2}(y)$, f) wynikowa funkcja przynależności $\mu_w(x)$ konkluzji bazy reguł uzyskana w wyniku akumulacji

Na rysunku 4.33 przedstawiono procedurę przybliżonego wnioskowania metodą *MAX-MIN* w przypadku, gdy dane wejściowe są w postaci liczb rozmytych. Wszystkie mechanizmy wnioskowania przyjęto jak w przykładzie na rys. 4.31, a jako wartość wejściową przyjęto liczbę rozmytą „około 30%” o funkcji przynależności $\mu_{\tilde{x}}(x)$ pokazanej na rys. 4.33a.



Rys. 4.32. Przykład rozmytego wnioskowania metodą *MAX-PROD* przy danej wejściowej w postaci liczby: a) funkcja przynależności $\mu_{A1}(x)$ przesłanki reguły **R1**, b) funkcja przynależności $\mu_{A2}(x)$ przesłanki reguły **R2**, c) baza reguł, d) funkcja przynależności $\mu_{K1}(y)$ konkluzji reguły **R1** i zmodyfikowana funkcja przynależności $\mu_{\tilde{K}1}(y)$, e) funkcja przynależności $\mu_{K2}(y)$ konkluzji reguły **R2** i zmodyfikowana funkcja przynależności $\mu_{\tilde{K}2}(y)$, f) wynikowa funkcja przynależności $\mu_w(x)$ konkluzji bazy reguł uzyskana w wyniku akumulacji

Rezultatami uzyskanymi we wszystkich prezentowanych przykładach są wynikowe funkcje przynależności konkluzji całej bazy reguł $\mu_w(y)$. Nierozmyte (ostre) wartości wyjściowe \tilde{y} , odpowiadające rozpatrywanym danym wejściowym, można wyznaczyć stosując operację *defuzyfikacji*.



Rys. 4.33. Przykład przybliżonego wnioskowania metodą *MAX-MIN* przy danej wejściowej w postaci liczby rozmytej: a) funkcja przynależności $\mu_{A1}(x)$ przesłanki reguły **R1** oraz liczba rozmyta \tilde{A} , b) funkcja przynależności $\mu_{A2}(x)$ przesłanki reguły **R2** oraz liczba rozmyta \tilde{A} , c) baza reguł, d) funkcja przynależności $\mu_{K1}(y)$ konkluzji reguły **R1** i zmodyfikowana funkcja przynależności $\mu_{\tilde{K}1}(y)$, e) funkcja przynależności $\mu_{K2}(y)$ konkluzji reguły **R2** i zmodyfikowana funkcja przynależności $\mu_{\tilde{K}2}(y)$, f) wynikowa funkcja przynależności $\mu_w(x)$ konkluzji bazy reguł uzyskana w wyniku akumulacji

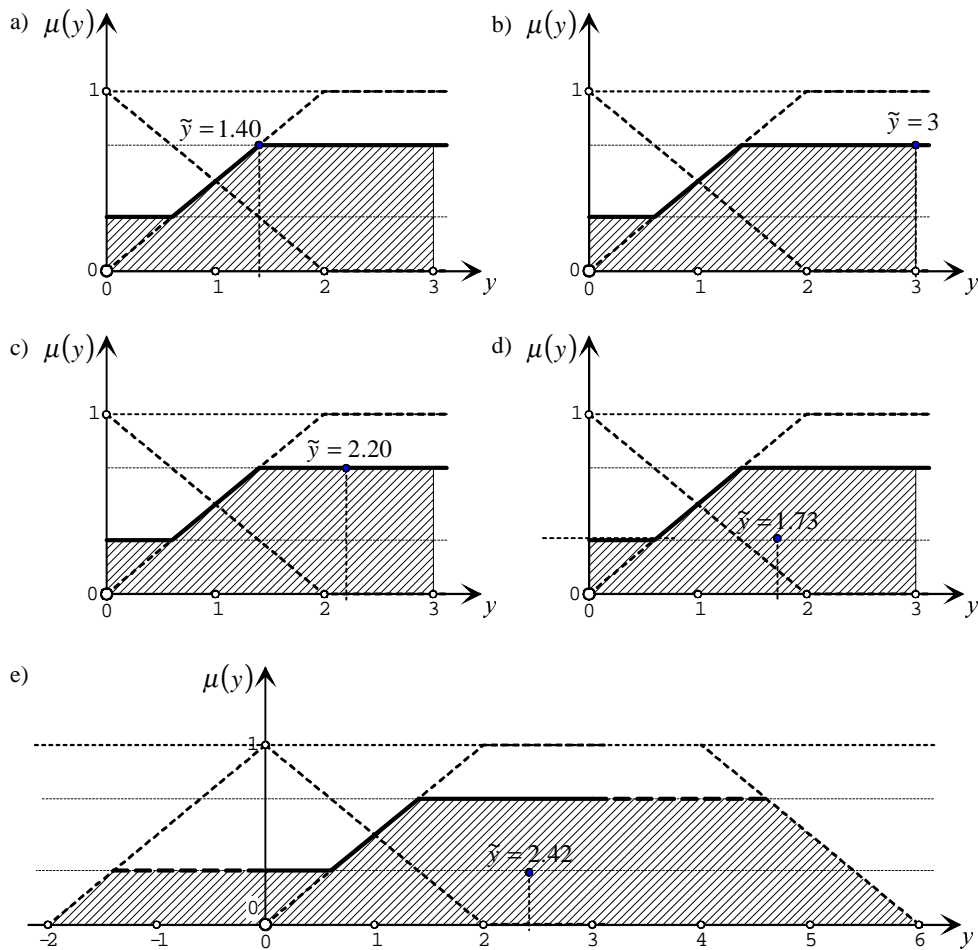
4.5.4.4. Operacja ostrzenia (defuzyfikacja)

Zastosowana metoda defuzyfikacji ma istotny wpływ na ostateczny wynik procesu rozmytego wnioskowania. Poniżej przedstawiono wybrane metody defuzyfikacji,

stosując je kolejno do wyznaczenia ostrej wartości \tilde{y} dla przykładu przedstawionego na rys. 4.31.

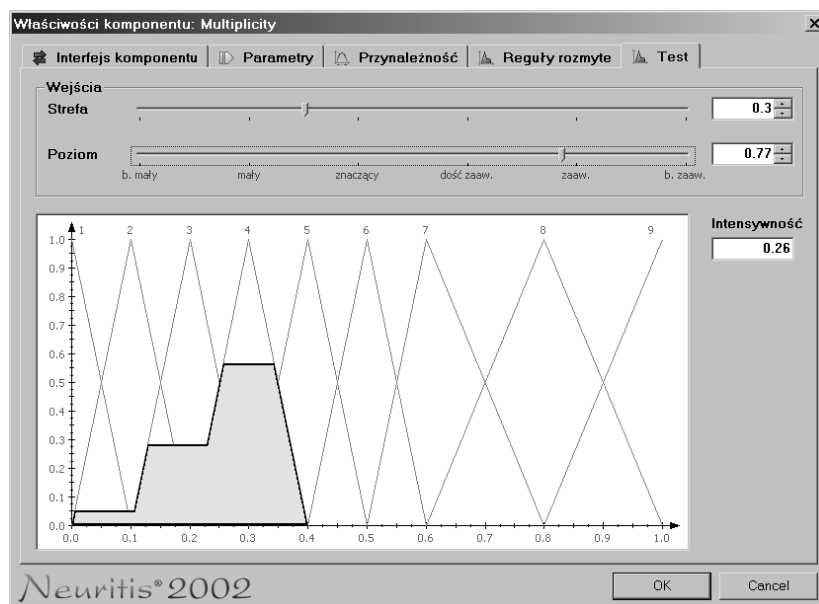
Zaprezentowano następujące rozwiązania:

- *metoda pierwszego maksimum* (rys. 4.34a) – za reprezentatywną wartość wyjściową \tilde{y} uznaje się najmniejszą wartość y odpowiadającą maksimum funkcji przynależności $\mu_w(y)$;
- *metoda ostatniego maksimum* (rys. 4.34b) – za reprezentatywną wartość wyjściową \tilde{y} uznaje się największą wartość y odpowiadającą maksimum funkcji przynależności $\mu_w(y)$;



Rys. 4.34. Metody defuzyfikacji: a) metoda pierwszego maksimum, b) metoda ostatniego maksimum, c) metoda środka maksimum, d) metoda środka ciężkości, e) rozszerzona metoda środka ciężkości

- *metoda środka maksimum* (rys. 4.34c) – za reprezentatywną wartość wyjściową \tilde{y} uznaje się średnią wartość y odpowiadającą maksimum funkcji przynależności $\mu_w(y)$;
- *metoda środka ciężkości* (rys. 4.34d) – za reprezentatywną wartość wyjściową \tilde{y} uznaje się współrzędną środka ciężkości powierzchni pomiędzy linią określoną funkcją przynależności $\mu_w(y)$ a osią y ;
- *rozszerzona metoda środka ciężkości* (rys. 4.34e) – za reprezentatywną wartość wyjściową \tilde{y} uznaje się współrzędną środka ciężkości powierzchni pomiędzy linią określoną funkcją przynależności $\mu_w(y)$ a osią y , po wprowadzeniu symetrycznych rozszerzeń brzegowych zbiorów rozmytych.



Rys. 4.35. Przykład sposobu prezentacji funkcji przynależności wyniku wnioskowania w komponencie rozmytym

W systemie NEURITIS rezultat procesu wnioskowania w komponencie rozmytym jest przedstawiany w postaci wynikowej funkcji przynależności oraz w postaci nierozmytej wartości wyjściowej, wyznaczonej zgodnie z przyjętą metodą defuzyfikacji. W przykładzie prezentowanym na rys 4.35 nierozmyta wartość wyjścia, wyznaczona metodą środka ciężkości, wynosi 0,26.

5. POZYSKIWANIE WIEDZY NA POTRZEBY FUNKCJI EKSPERTOWYCH

5.1. Źródła wiedzy i metody jej pozyskiwania

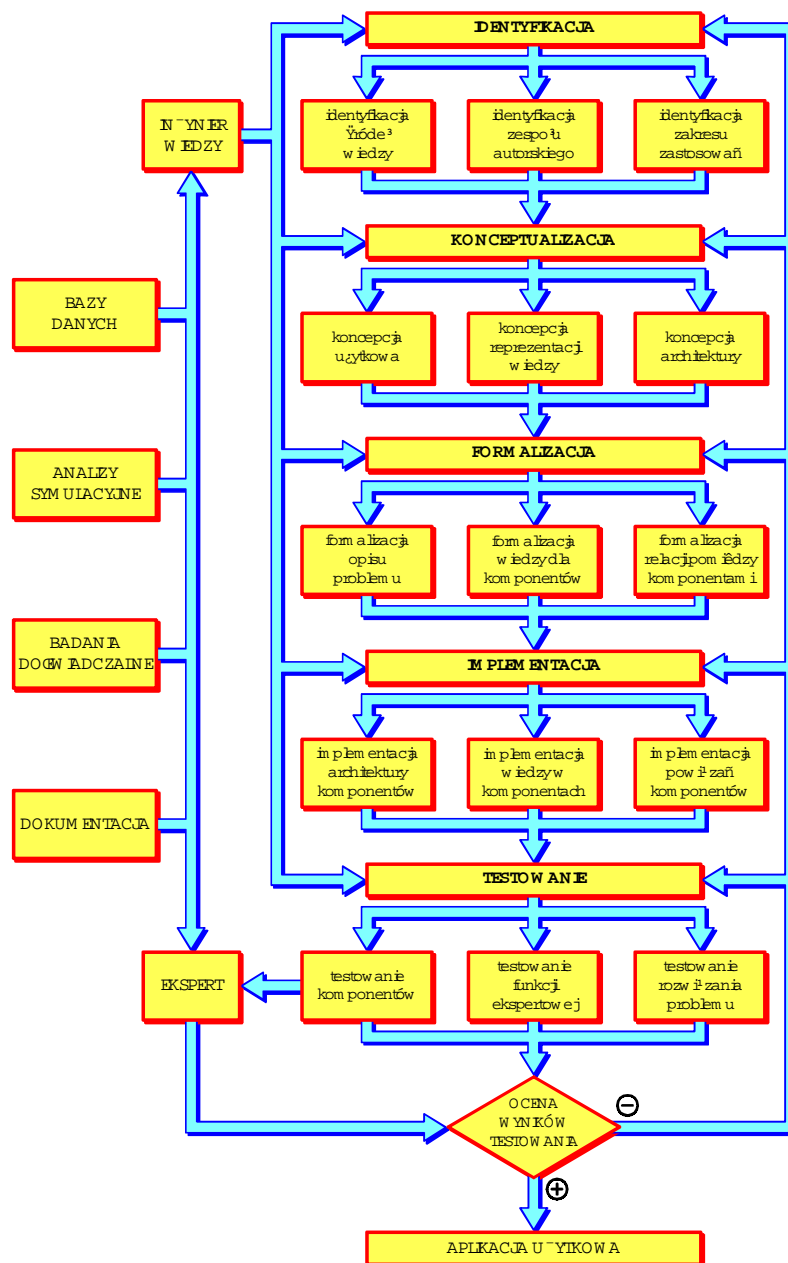
Pozyskiwanie wiedzy to proces wydobywania, analizowania i formalizowania wiedzy w formie przydatnej komputerowo. Zdaniem wielu autorów zajmujących się praktycznie tym zagadnieniem (np. [247], [335], [370]), problemy związane z pozyskiwaniem wiedzy należą do najtrudniejszych w całym procesie tworzenia komputerowych narzędzi ekspertowych. Sposoby realizacji procesu pozyskiwania wiedzy, nazywanego też akwizycją, zależą przede wszystkim od wykorzystywanych źródeł informacji, a forma przedstawienia wiedzy – od metod jej reprezentacji w systemie komputerowym.

Strategia akwizycji i ekstrakcji wiedzy musi być powiązana z konkretną dziedziną stanowiącą obszar zastosowań funkcji ekspertowej. Za podstawowe źródła wiedzy wykorzystywane na potrzeby funkcji ekspertowych wspomagających rozwiązywanie zagadnień związanych z eksploatacją obiektów mostowych można uznać:

- *zasoby baz danych* systemów informacyjnych związanych z infrastrukturą mostową; w przypadku budowli mostowych są to przede wszystkim dane ewidencyjne obiektów, wyniki przeglądów, badań i ekspertyz, próbnych obciążeń itp.;
- *dokumentację* zawierającą archiwalne dane o obiektach mostowych, a w szczególności: dokumentację projektową, dokumentację eksploatacyjną, przepisy, normy, publikacje itp.;
- *wyniki analiz symulacyjnych*, a głównie analiz statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji;
- *wiedzę ekspertów*, za których można uważać osoby „posiadające specjalistyczną wiedzę (najczęściej o charakterze niealgorytmicznym) z pewnej dziedziny i umiejętność stosowania jej dla rozwiązywania problemów tej dziedziny, nabyte w wyniku studiów i praktyki” [255].

Pozyskiwaniem i przetwarzaniem wiedzy zajmuje się *inżynier wiedzy*. Jest on odpowiedzialny za ekstrakcję wiedzy od eksperta (ekspertów) oraz za akwizycję, przy współudziale eksperta, wiedzy z innych źródeł. Inżynier wiedzy dokonuje

niezbędnych przetworzeń i strukturalizacji wiedzy, a następnie przedstawia ją w formie nadającej się do implementacji w funkcjach ekspertowych.



Rys. 5.1. Ogólny schemat procesu pozyskiwania wiedzy na potrzeby funkcji ekspertowych wykorzystujących technologię sieci hybrydowych

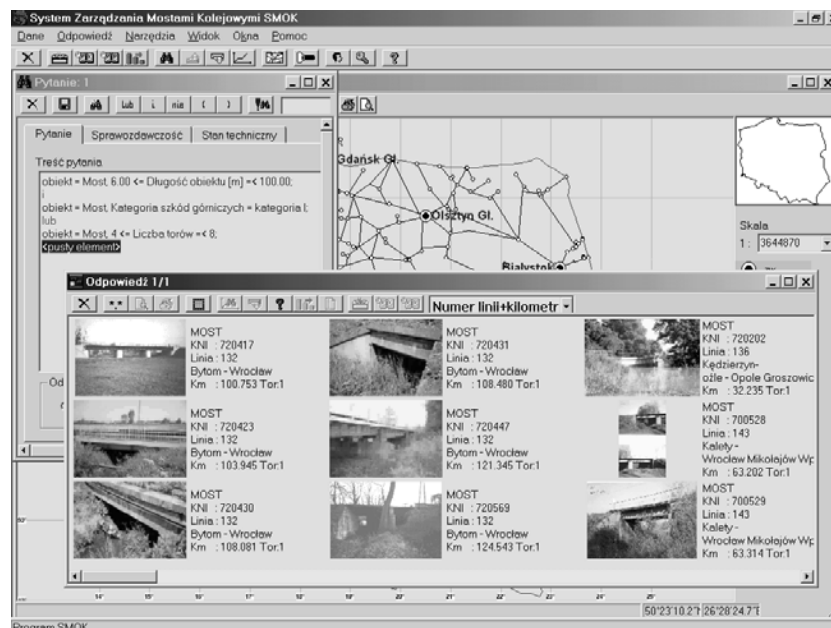
Proponowane w niniejszej pracy połączenie różnych metod i technik reprezentacji wiedzy przy wykorzystaniu technologii sieci hybrydowych wymaga zindywidualizowania metod pozyskiwania wiedzy wykorzystywanej w poszczególnych komponentach funkcji ekspertowych. Podstawowe etapy procesu pozyskiwania wiedzy na potrzeby narzędzi ekspertowych prezentowanych w tej monografii pokazano na rys. 5.1. Wyróżniono tu następujące fazy:

- *identyfikacja problemu*, na którą składają się: identyfikacja dostępnych źródeł wiedzy oraz rodzajów informacji, określenie składu zespołu pracującego nad rozwiązaniem problemu, określenie zakresu zastosowań tworzonej funkcji ekspertowej;
- *konceptualizacja rozwiązań*, a w tym: opracowanie ogólnej koncepcji użytkowej oraz architektury funkcji ekspertowej, a także sposobów reprezentacji wiedzy w poszczególnych komponentach tej funkcji;
- *formalizacja zapisu wiedzy* – określenie sposobów formalizacji gromadzonej wiedzy w powiązaniu z metodami jej reprezentacji w poszczególnych komponentach sieci hybrydowych oraz zdefiniowanie powiązań pomiędzy komponentami; bardzo ważnym elementem formalizacji zapisu wiedzy jest ujednolicenie terminologii stosowanej w procesie modelowania rozpatrywanej dziedziny;
- *implementacja wiedzy* w komponentach oraz implementacja ich powiązań jako elementów sieci hybrydowej;
- *testowanie wiedzy* zaimplementowanej w funkcji ekspertowej, na które składa się testowanie poszczególnych komponentów oraz testowanie pełnej postaci funkcji ekspertowej.

W kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano podstawowe techniki pozyskiwania wiedzy zastosowane przy tworzeniu narzędzi ekspertowych prezentowanych w niniejszej pracy. Zagadnienia te przedstawiono na przykładzie opracowanych przez autora narzędzi ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego obiektów mostowych [21], [26], [27], [28], [29].

5.2. Analiza baz danych i dokumentacji technicznej

Zasoby informacji o obiektach mostowych, gromadzone zarówno w postaci komputerowych baz danych, jak i w formie tradycyjnej dokumentacji projektowej, wykonawczej, eksploatacyjnej oraz utrzymaniowej, są bardzo cennym i jednym z podstawowych źródeł wiedzy na potrzeby narzędzi ekspertowych [83], [280], [328], [329]. Ten rodzaj informacji jest wykorzystywany praktycznie w całym procesie pozyskiwania wiedzy i tworzenia funkcji ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego przy wykorzystaniu technologii sieci hybrydowych.

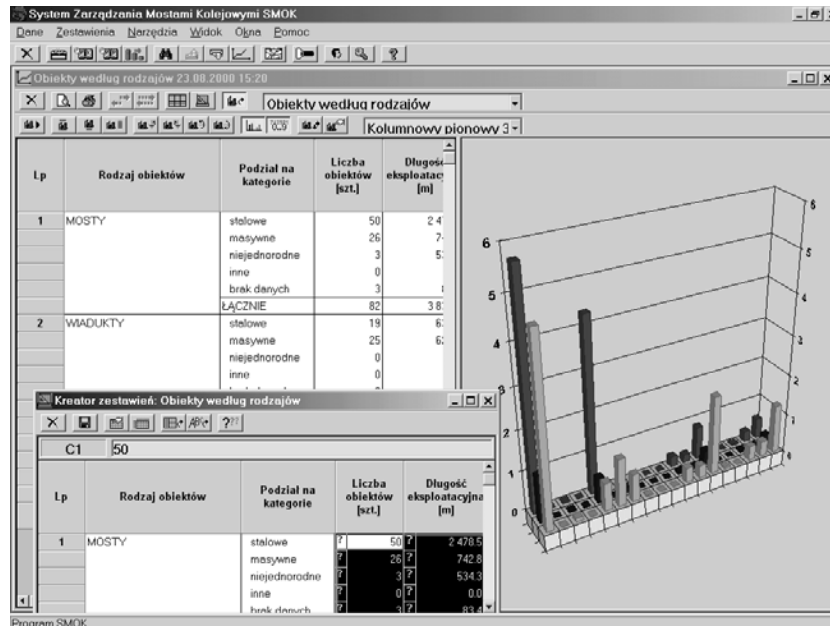


Rys. 5.2. Przykład narzędzia informatycznego służącego do eksploracji bazy danych systemu wspomagającego eksploatację obiektów mostowych [35], [41]

W trakcie projektowania hybrydowej bazy wiedzy dane te umożliwiają szczegółową identyfikację analizowanych problemów oraz opracowanie ogólnej struktury i architektury funkcji ekspertowej. Informacje te są szczególnie przydatne w procesie projektowania *Drzewa Zagadnienia* oraz *Grafu Ekspertowego*, zgodnie z technologią wielopoziomowych sieci hybrydowych (patrz rozdział 4.). Dostępne dane, po sformalizowaniu ich zapisu, są w trakcie dalszych prac implementowane w komponentach sieci hybrydowej oraz wykorzystywane do zdefiniowania relacji między komponentami. Rezultaty analiz baz danych oraz dokumentacji są także wykorzystywane w procesie testowania i weryfikacji poszczególnych komponentów oraz całej funkcji ekspertowej.

W pracach nad narzędziami ekspertowymi prezentowanymi w tej monografii stosowano trzy podstawowe *techniki wykorzystywania zasobów archiwalnych*:

- eksploracja baz danych systemów komputerowych za pomocą specjalistycznych narzędzi informatycznych;
- analiza dokumentacji projektowej i eksploatacyjnej obiektów mostowych;
- uzupełnianie informacji archiwalnych i ich weryfikacja w terenie na obiektach reprezentatywnych dla modelowanej populacji.

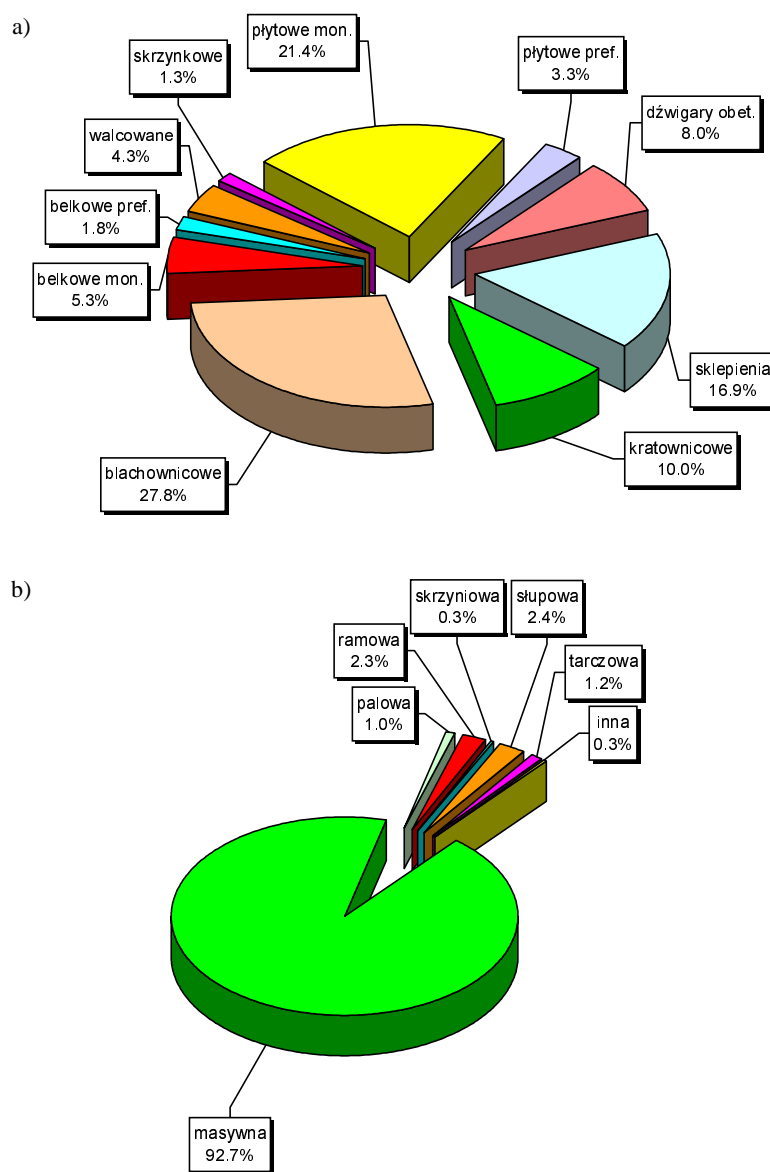


Rys. 5.3. Przykład narzędzi umożliwiających definiowanie oraz redagowanie zestawień danych zawartych w bazie systemu komputerowego [35], [41]

Do *eksploracji komputerowych baz danych* systemów wspomagających zarządzanie infrastrukturą mostową zastosowano głównie dwa rodzaje narzędzi:

- *funkcję wyszukiwania* – umożliwiającą zidentyfikowanie obiektów (lub ich części składowych) spełniających określone w pytaniu warunki, zdefiniowane w odniesieniu do dowolnych danych obiektu mostowego; przykładowy sposób redagowania takiego pytania z wykorzystaniem operatorów logicznych oraz uzyskanej odpowiedzi systemu komputerowego prezentuje rys. 5.2;
- *funkcję zestawień* – umożliwiającą agregację danych uzyskanych w wyniku przeszukiwania bazy danych oraz ich prezentację w formie tabelarycznej lub graficznej (rys. 5.3).

Przykładowe rezultaty uzyskiwane w wyniku analizy bazy danych systemu wspomagającego gospodarowanie obiektami mostowymi przedstawiono na kolejnych rysunkach na przykładzie systemu wspomagającego zarządzanie kolejową infrastrukturą mostową w naszym kraju [41], [50]. Na rysunku 5.4 pokazano procentowy udział podstawowych rodzajów konstrukcji podpór oraz konstrukcji dźwigarów głównych przęseł w ogólnej liczbie – odpowiednio – podpór i przęseł. Wśród podpór zdecydowanie dominują konstrukcje masywne, przęsła natomiast wykazują znaczne zróżnicowanie rozwiązań. Analizowane dane obejmowały wszystkie kolejowe obiekty mostowe w kraju (mosty, wiadukty, kładki dla pieszych).

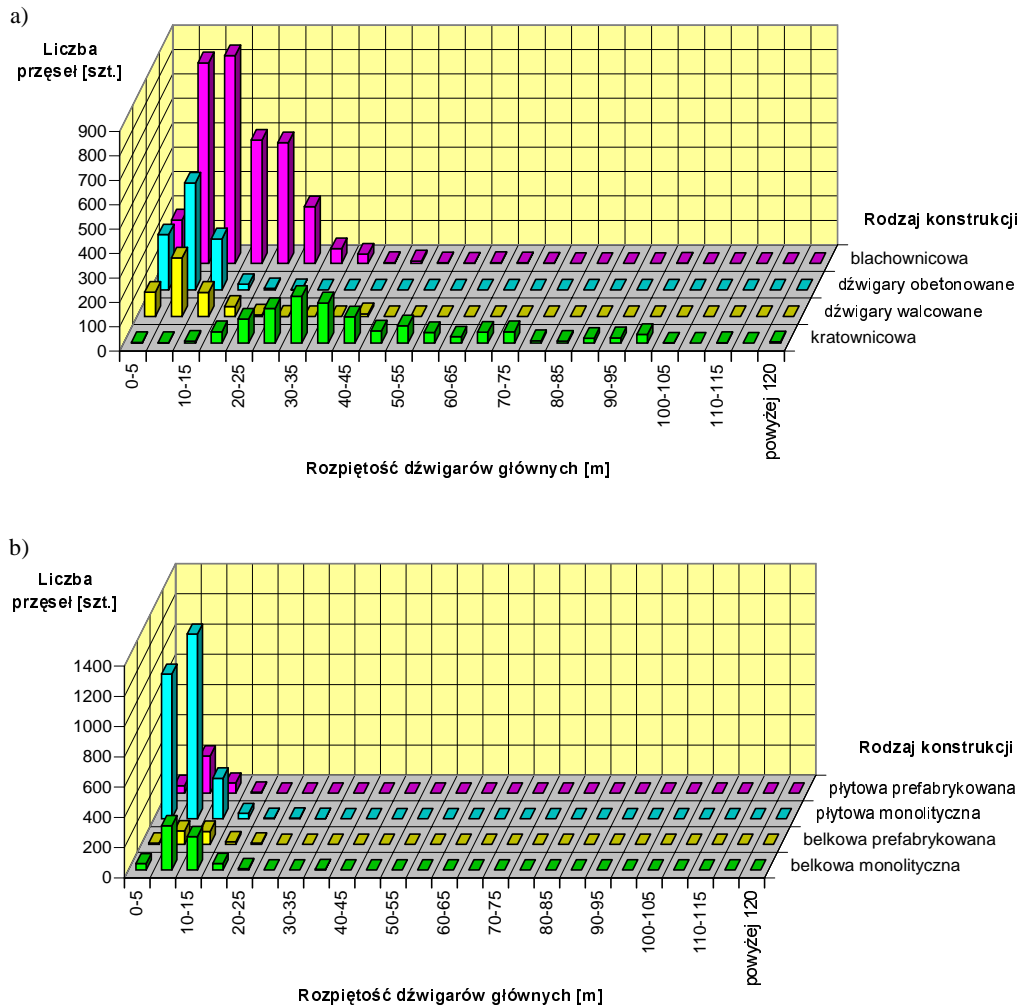


Rys. 5.4. Mosty i wiadukty kolejowe w Polsce: a) rodzaje konstrukcji dźwigarów głównych, b) rodzaje konstrukcji podpór

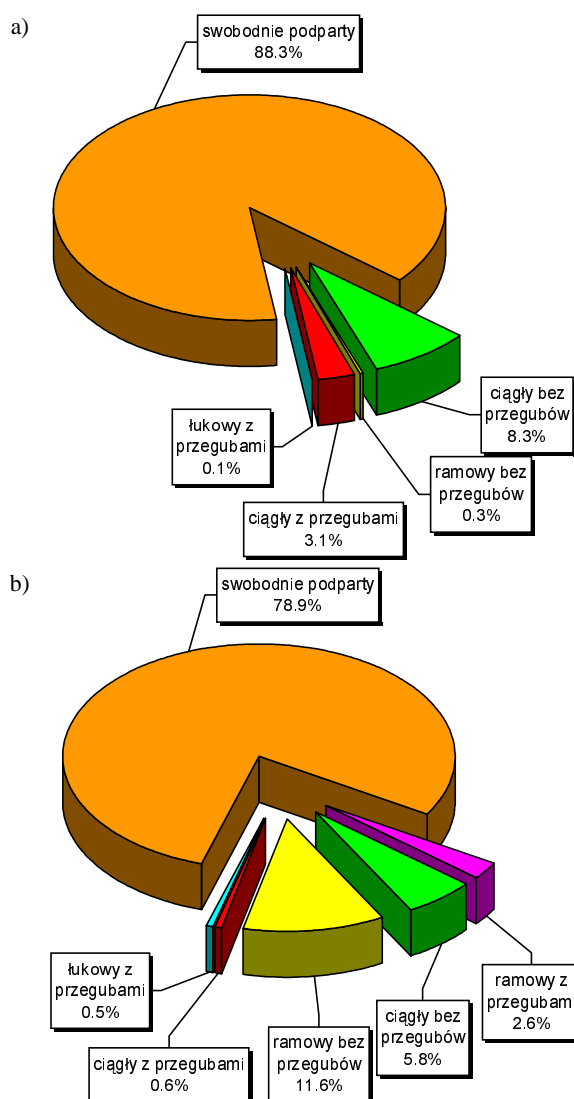
Zakresy rozpiętości przęseł o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych porównano na rys. 5.5.

Wyniki analizy rodzajów schematów statycznych dźwigarów głównych prezentuje rys. 5.6. Zarówno wśród dźwigarów stalowych, jak i betonowych (beton zbrojony i sprężony) bardzo wyraźną przewagę mają konstrukcje swobodnie podparte (80–

–90%). Na rysunku 5.7 przedstawiono wyniki analizy wieku przęseł obiektów kolejowych eksploatowanych w naszym kraju. Zaprezentowano liczbę eksploatowanych obecnie przęseł wybudowanych w kolejnych przedziałach 5-letnich w okresie od roku 1836 do roku 2000. Analizę wykonano oddzielnie dla każdego z podstawowych rozwiązań konstrukcyjnych przęseł stalowych (rys. 5.7a) oraz betonowych (5.7b).

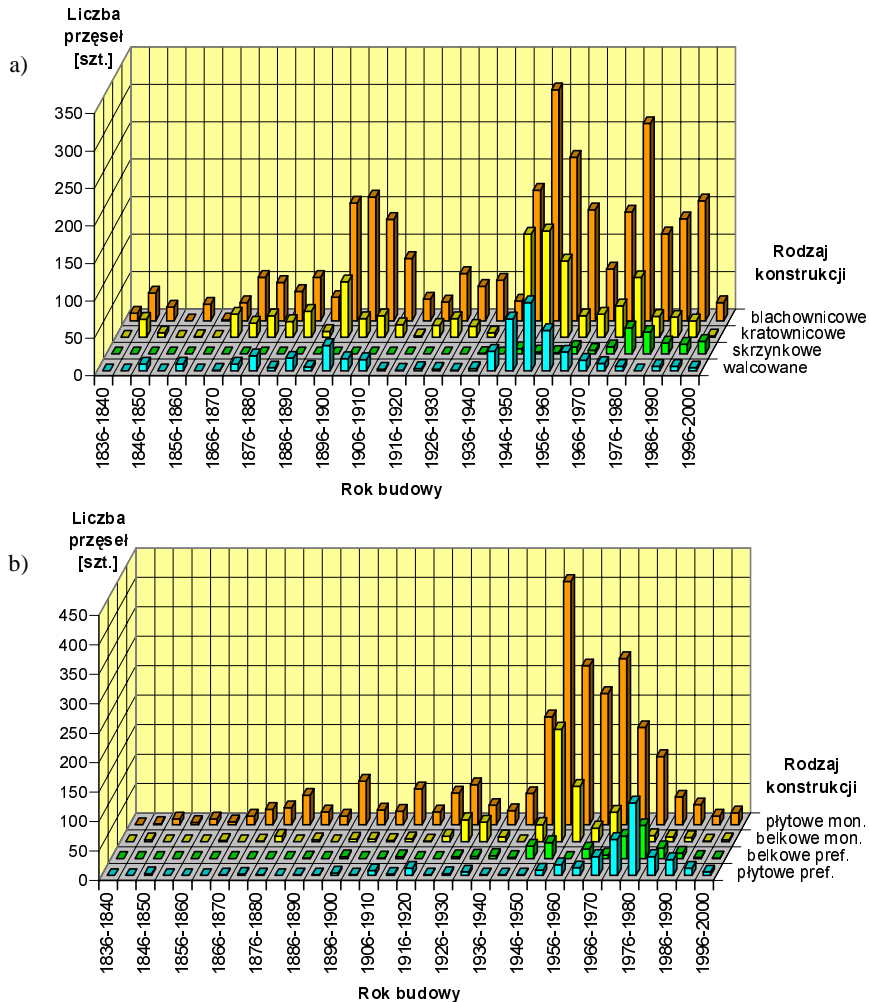


Rys. 5.5. Rozpiętości teoretyczne wybranych typów dźwigarów głównych przęseł mostów i wiaduktów kolejowych w Polsce: a) dźwigary stalowe, b) dźwigary betonowe



Rys. 5.6. Schematy statyczne dźwigarów głównych przęseł mostów i wiaduktów kolejowych w Polsce: a) dźwigary stalowe, b) dźwigary betonowe

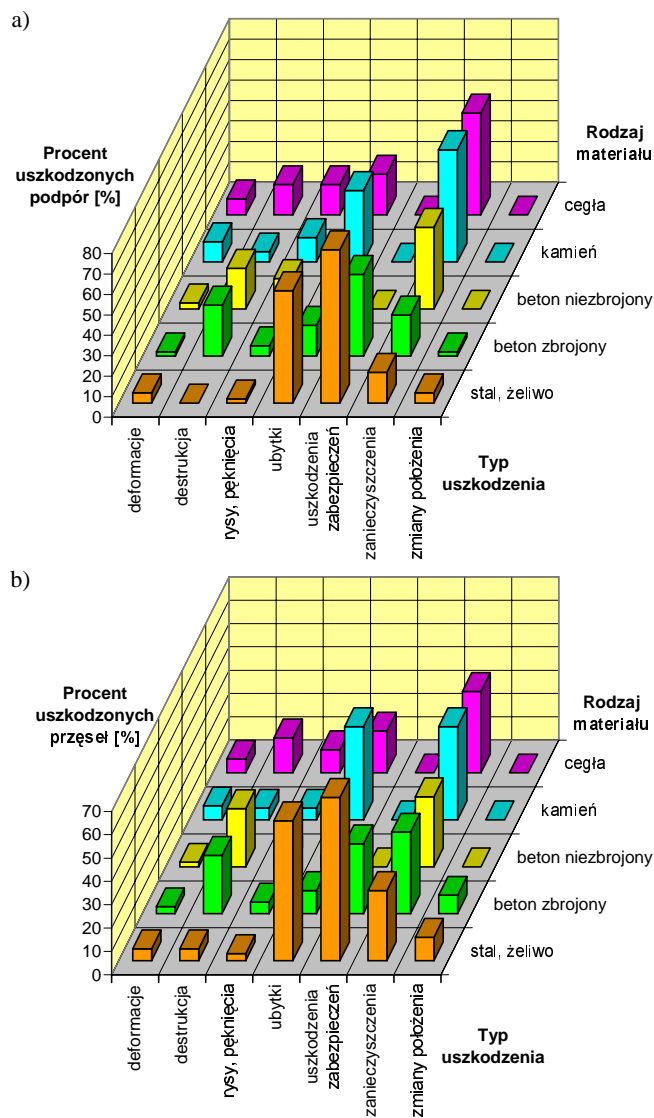
Systemy komputerowe wyposażone w efektywne narzędzia dostępu do danych związanych z eksploatacją obiektów mostowych są tworzone w naszym kraju dopiero od kilku lat. Wykorzystywanie wcześniejszych informacji wymaga zastosowania innej techniki pozyskiwania wiedzy w postaci *analizy dokumentacji projektowej i eksploatacyjnej* obiektów mostowych. Zasób danych zawartych w tych materiałach jest znacznie bogatszy od informacji gromadzonych standardowo w systemach komputerowych, ale niestety dostęp do nich jest często bardzo trudny.



Rys. 5.7. Rok budowy przeseł mostów i wiaduktów kolejowych w Polsce:
 a) przeseła stalowe (łącznie 4997 szt.), b) przeseła betonowe (łącznie 4375 szt.)

Żmudne i czasochłonne pozyskiwanie danych z archiwalnej dokumentacji jest jednak w wielu przypadkach niezastąpionym źródłem informacji. Informacje pozyskiwane na potrzeby narzędzi ekspertowych z zasobów baz danych oraz z archiwalnej dokumentacji wymagają często *dotatkowej weryfikacji na rzeczywistych obiektach* wytypowanych jako reprezentatywne dla poszczególnych typów rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych. Przykład rezultatów uzyskanych tą metodą przedstawiono na rys. 5.8, który prezentuje częstość występowania podstawowych typów uszkodzeń podpór i przeseł obiektów kolejowych. Analizę przeprowadzono na

podstawie przeglądów ok. 200 obiektów, stosując zasady identyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń zgodnie z rozwiązaniami zaproponowanymi w niniejszej pracy.



Rys. 5.8. Częstość występowania podstawowych typów uszkodzeń kolejowych obiektów mostowych w zależności od rodzaju materiału konstrukcji: a) uszkodzenia podpór, b) uszkodzenia przęseł

5.3. Analiza konstrukcji

5.3.1. Narzędzia analizy konstrukcji

Jednym z ważniejszych źródeł wiedzy o stanie obiektów mostowych są wyniki statyczno-wytrzymałościowych analiz konstrukcji przeprowadzanych z uwzględnieniem występujących uszkodzeń. Rezultaty takich analiz mogą i powinny być wykorzystywane w narzędziach ekspertowych wspomagających ocenę kondycji obiektów. Prowadzenie analiz symulacyjnych, umożliwiających ocenę wpływu uszkodzeń na stan obiektów, wymaga użycia efektywnych specjalistycznych narzędzi, dostosowanych do sposobu numerycznej reprezentacji obiektów w systemie komputerowym. Zestawienie narzędzi analitycznych używanych w procesie projektowania konstrukcji mostowych oraz narzędzi zaproponowanych i wykorzystywanych w niniejszej pracy do analizy konstrukcji dotkniętych procesami degradacji przedstawiono w tab. 5.1. Dla każdego z narzędzi ujętych w zestawieniu, oprócz nazwy i przyjętego w tej monografii ogólnego oznaczenia, podano:

- sposób określenia *rodzaju obciążenia*, który może być uwzględniony w analizie przy wykorzystaniu rozpatrywanego narzędzia, z wyróżnieniem:
 - obciążeń stałych o ustalonej intensywności oraz sprecyzowanym położeniu,
 - obciążeń ruchomych – rozumianych tu jako obciążenia o ustalonej intensywności (np. normowe obciążenia użytkowe), usytuowane w sposób wywołujący ekstremalne wartości rozpatrywanych wielkości statycznych w analizowanym modelu obiektu;
- sposób zdefiniowania *położenia uszkodzenia*, który może być uwzględniany przy użyciu rozpatrywanego narzędzia analizy, z podziałem na:
 - uszkodzenia o zdefiniowanej funkcji intensywności, których lokalizacja jest określona przed rozpoczęciem analizy,
 - uszkodzenia o zdefiniowanej funkcji intensywności, usytuowane w sposób powodujący ekstremalne wartości rozpatrywanych sił wewnętrznych.

Górna część zestawienia w tab. 5.1 prezentuje podstawowe narzędzia analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji bez uszkodzeń, stosowane tradycyjnie w projektowaniu obiektów mostowych. Wyróżniono tu narzędzia przeznaczone do:

- wyznaczania wartości wielkości statycznych, a mianowicie:
 - *funkcje rozkładu wielkości statycznej* (S),
 - *obwiednie wielkości statycznej* (B^S);
- oceny poziomu wykorzystania cech konstrukcji (np. wytrzymałości materiału, dopuszczalnych ugięć itp.) w postaci:
 - *funkcji wykorzystania wytrzymałości* (S_R),
 - *obwiedni wykorzystania wytrzymałości* (B_R^S).

Tab. 5.1. Wybrane narzędzia statyczno-wytrzymałościowej analizy konstrukcji mostowych

Lp.	Narzędzie analizy	Oznaczenie	Rodzaj obciążenia		Polożenie uszkodzenia	
			stałe	ruchome	ustalone	ekstremalne
NARZĘDZIA ANALIZY KONSTRUKCJI BEZ USZKODZEŃ						
1.	Funkcja rozkładu wielkości statycznej	S	✓			
2.	Obwiednia wielkości statycznej	B^S		✓		
3.	Funkcja wykorzystania wytrzymałości	S_R	✓			
4.	Obwiednia wykorzystania wytrzymałości	B_R^S		✓		
NARZĘDZIA ANALIZY KONSTRUKCJI Z USZKODZENIAMI						
5.	Funkcja rozkładu wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia	S_{u_i}	✓		✓	
6.	Obwiednia wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia	$B_{u_i}^S$		✓	✓	
7.	Obwiednia wpływu uszkodzenia	$W_{u_i}^S$		✓		✓
8.	Funkcja wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia	$S_{u_i,R}$	✓		✓	
9.	Obwiednia wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia	$B_{u_i,R}^S$		✓	✓	
10.	Obwiednia wpływu uszkodzenia na wykorzystanie wytrzymałości	$W_{u_i,R}^S$		✓		✓

W odniesieniu do obiektów z uszkodzeniami przydatne wydaje się wprowadzenie dodatkowych narzędzi analitycznych, które mogą być wykorzystywane w analizach dokonywanych na potrzeby oceny stanu technicznego. Proponowane narzędzia zestawiono w dolnej części tab. 5.1. W użyтым nazewnictwie starano się zachować analogię do pojęć: *funkcja rozkładu wielkości statycznej* oraz *obwiednia wielkości statycznej*.

Przedstawione narzędzia można podzielić na dwie grupy:

- narzędzia do oceny wpływu uszkodzeń na wartości wielkości statycznych, w skład których wchodzi:
 - funkcje rozkładu wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia (S_{u_i}),
 - obwiednie wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia ($B_{u_i}^S$),
 - obwiednie wpływu uszkodzenia ($W_{u_i}^S$);
- narzędzia do oceny wpływu uszkodzeń na poziom wykorzystania parametrów konstrukcji, obejmujące:
 - funkcje wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia ($S_{u_i,R}$),
 - obwiednie wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia ($B_{u_i,R}^\sigma$),
 - obwiednie wpływu uszkodzenia na wykorzystanie wytrzymałości ($W_{u_i,R}^S$).

Zestawione w tab. 5.1 narzędzia, przeznaczone do statyczno-wytrzymałościowych analiz konstrukcji, mogą być stosowane w odniesieniu do modeli geometrii klas od (e^1, p^1) do (e^3, p^3) .

Sposób wykorzystywania prezentowanych narzędzi analitycznych oraz proponowany system notacji przedstawiono poniżej na przykładzie analizy naprężeń normalnych σ w zginanym dźwigarze pryzmatycznym o prostokątnym przekroju poprzecznym. W prezentowanym przykładzie przyjęto model geometrii dźwigara klasy (e^1, p^1) wraz z klasycznymi założeniami stosowanymi w mechanice ustrojów prętowych. Dla uproszczenia przykładu przyjęto, że obciążeniem belki jest jedynie pojedyncza pionowa siła skupiona P . Siła ta jest traktowana bądź jako obciążenie o ustalonym położeniu, bądź jako obciążenie ruchome, które może być zlokalizowane w dowolnym przekroju dźwigara, co oznaczono na rysunkach poziomymi strzałkami umieszczonymi przy symbolu siły skupionej. Jako przykładowe uszkodzenie u_1 przyjęto ubytek materiału górnej części dźwigara, o stałej intensywności na długości uszkodzonego odcinka $I = \Delta F / F$, gdzie ΔF oznacza ubytek pola powierzchni przekroju poprzecznego, natomiast F – pole powierzchni przekroju nieuszkodzonego. Analizowaną wielkością statyczną są ekstremalne wartości naprężeń normalnych σ_x w poszczególnych przekrojach dźwigara. Dla uproszczenia notacji naprężenia te oznaczano dalej jako σ . Przyjęto, że jednorodny i izotropowy materiał rozpatrywanego dźwigara wykazuje jednakową wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie na całej długości elementu, a więc: $R^{\sigma, \max}(x) = R^{\sigma, \min}(x) = R^\sigma$.

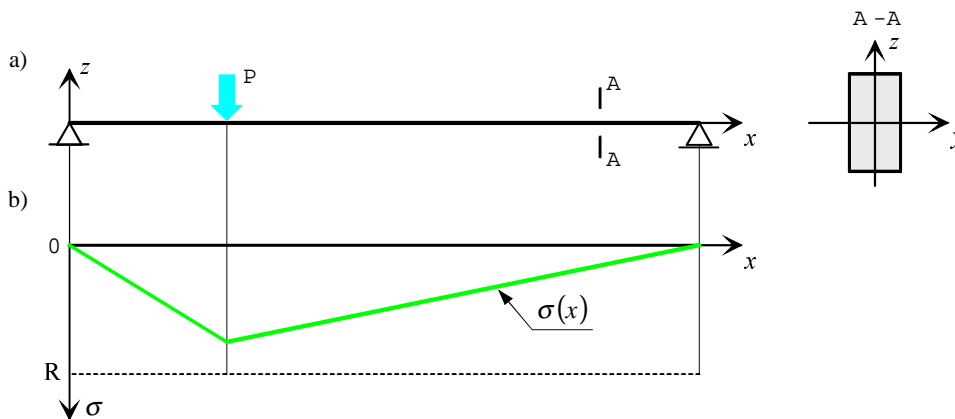
5.3.2. Wyznaczanie wartości wielkości statycznych

Do wyznaczania wartości wielkości statycznych w konstrukcjach nieuszkodzonych są wykorzystywane głównie następujące narzędzia analityczne (tab. 5.1):

- *funkcje rozkładu wielkości statycznej (S)*,
- *obwiednie wielkości statycznej (B^S)*.

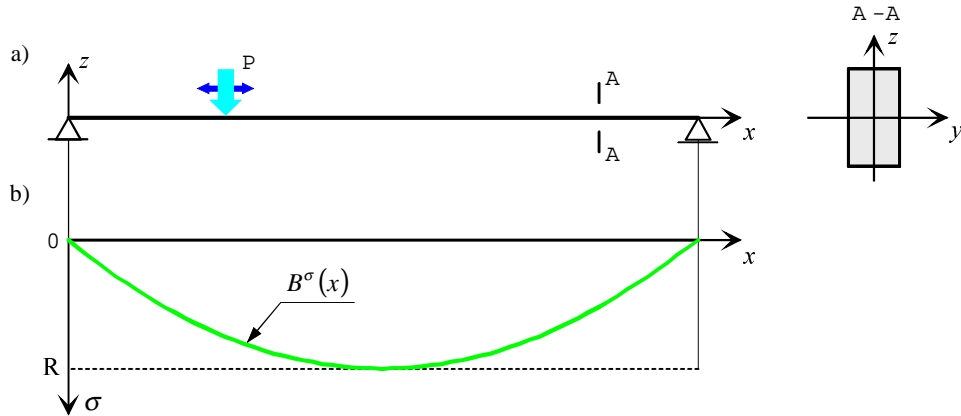
Funkcja rozkładu wielkości statycznej (S) określa wartości analizowanej wielkości statycznej S we wszystkich punktach modelu konstrukcji dla ustalonego obciążenia. Funkcje te są często prezentowane w postaci wykresów uogólnionych sił wewnętrznych, przemieszczeń lub innych analizowanych wielkości. Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcja S przyjmuje ogólną postać: $S(x)$.

W prezentowanym przykładzie bezwzględne wartości maksymalnych i minimalnych naprężeń normalnych są sobie równe, a więc: $|\sigma^{\max}(x)| = |\sigma^{\min}(x)| = \sigma(x)$. Rozpatrywane obciążenie oraz wykres funkcji $\sigma(x)$ pokazano na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Funkcja rozkładu bezwzględnych wartości maksymalnych i minimalnych naprężeń normalnych σ : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $\sigma(x)$

Obwiednie wielkości statycznej $B^{S,\min}$ oraz $B^{S,\max}$ określają dla każdego punktu modelu ekstremalne wartości rozpatrywanej wielkości statycznej S , jakie mogą wystąpić przy ekstremalnych obciążeniach uwzględnianych w analizie. Funkcje te są wykorzystywane do określania wartości wielkości przyjmowanych do wymiarowania konstrukcji, a dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) można je zapisać jako: $B^{S,\max}(x)$ oraz $B^{S,\min}(x)$.



Rys. 5.10. Obwiednia bezwzględnych wartości ekstremalnych naprężeń normalnych σ :
a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $B^\sigma(x)$

W przykładzie prezentowanym na rys. 5.10 bezwzględne wartości rzędnych obwiedni minimalnych i maksymalnych naprężeń normalnych, wywołanych pojedynczą pionową siłą skupioną poruszającą się wzdłuż dźwigara, są identyczne: $|B^{\sigma, \max}(x)| = |B^{\sigma, \min}(x)| = B^\sigma(x)$. W racjonalnie zaprojektowanym dźwigarze ekstremalne wartości naprężeń są zbliżone do wytrzymałości materiału (rys. 5.10b).

5.3.3. Ocena wykorzystania cech konstrukcji

Do określania poziomu wykorzystania cech konstrukcji, takich jak: wytrzymałość materiału, nośność przekroju, dopuszczalne ugięcie itp., można stosować narzędzia nazwane tu umownie *funkcjami wykorzystania wytrzymałości* (S_R) oraz *obwiedniami wykorzystania wytrzymałości* (B_R^S).

Funkcje wykorzystania wytrzymałości (S_R^{\max}, S_R^{\min}) określają przy ustalonych obciążeniach (intensywność, lokalizacja) poziom wykorzystania cech konstrukcji odpowiadających analizowanej wielkości statycznej S , w każdym punkcie modelu. Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcje S_R^{\max} oraz S_R^{\min} są określone zależnościami:

$$S_R^{\max}(x) = \frac{S^{\max}(x)}{R^{S, \max}(x)}; \quad S_R^{\min}(x) = \frac{S^{\min}(x)}{R^{S, \min}(x)} \quad (5.1)$$

Aby umożliwić określanie w każdym przekroju bezwzględnie najwyższego poziomu wykorzystania rozpatrywanej cechy konstrukcji, wprowadza się pojęcie *uogólnionej funkcji wykorzystania wytrzymałości* $S_R(x)$, zdefiniowanej jako:

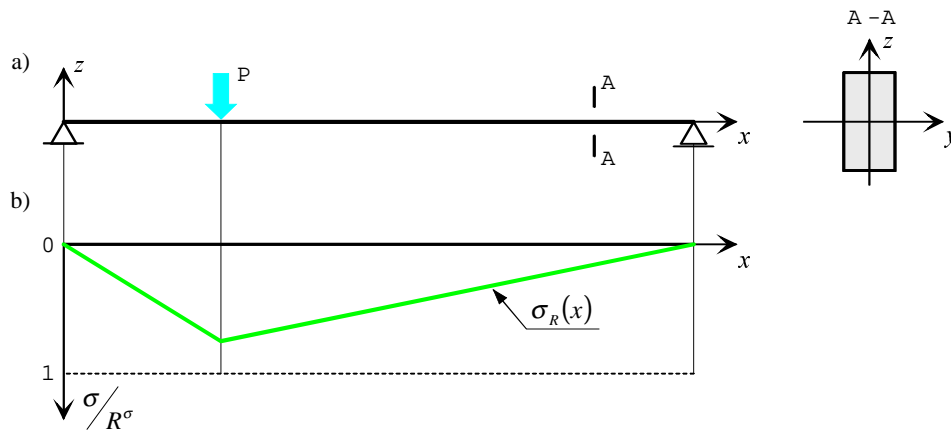
$$S_R(x) = \text{MAX} \left(\left| \frac{S^{\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \right|, \left| \frac{S^{\max}(x)}{R^{S,\max}(x)} \right| \right) \quad (5.2)$$

W podanych wyżej wzorach przyjęto następujące oznaczenia:

$R^{S,\max}(x)$ – wytrzymałość materiału lub inna wartość graniczna (np. dopuszczalne ugięcie) odpowiadająca rozpatrywanej wielkości statycznej S^{\max} ;

$R^{S,\min}(x)$ – wytrzymałość materiału lub inna wartość graniczna odpowiadająca rozpatrywanej wielkości statycznej S^{\min} .

Na rysunku 5.11 pokazano uogólnioną funkcję wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne dla dźwigara analizowanego w przykładzie, obciążonego w sposób przedstawiony na rys. 5.11a. Ponieważ w prezentowanym elemencie $|\sigma^{\max}(x)| = |\sigma^{\min}(x)| = \sigma(x)$ oraz $|R^{\sigma,\max}(x)| = |R^{\sigma,\min}(x)| = R^\sigma(x)$, z równania (5.2) otrzymuje się: $\sigma_R(x) = \sigma(x)/R^\sigma(x)$, gdzie $R^\sigma(x)$ jest funkcją określającą rozkład (na długości dźwigara) wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ . W rozpatrywanym dźwigarze wytrzymałość materiału nie zmienia się na długości elementu: $R^\sigma(x) = R^\sigma$, a więc ostatecznie $\sigma_R(x) = \sigma(x)/R^\sigma$.



Rys. 5.11. Uogólniona funkcja wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $\sigma_R(x)$

Obwiednie wykorzystania wytrzymałości $B_R^{S,\max}$ oraz $B_R^{S,\min}$ określają poziom wykorzystania cech konstrukcji (np. wytrzymałości materiału przy analizie naprężeń) w każdym punkcie modelu dla ekstremalnych wartości rozpatrywanej wielkości statycznej S , odpowiadający ekstremalnym (co do wartości i położenia) obciążeniom uwzględnianym w analizie. Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) obwiednie wykorzystania wytrzymałości są określone wzorami:

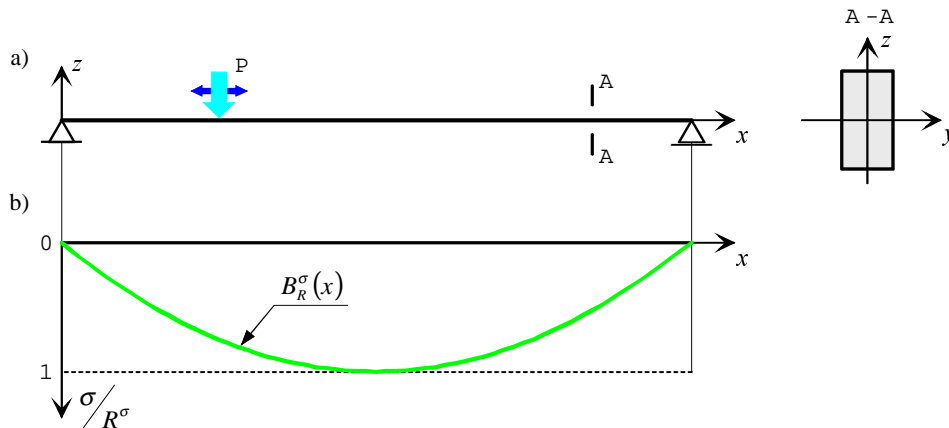
$$B_R^{S,\max}(x) = \frac{B^{S,\max}(x)}{R^{S,\max}(x)}; \quad B_R^{S,\min}(x) = \frac{B^{S,\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \quad (5.3)$$

Wprowadza się także pojęcie *uogólnionej obwiedni wykorzystania wytrzymałości materiału* (B_R^S), zdefiniowanej jako:

$$B_R^S(x) = \text{MAX} \left(\left| \frac{B^{S,\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \right|, \left| \frac{B^{S,\max}(x)}{R^{S,\max}(x)} \right| \right) \quad (5.4)$$

Funkcja ta dla każdego przekroju elementu konstrukcyjnego określa najwyższy, co do bezwzględnej wartości, poziom wykorzystania rozpatrywanej cechy konstrukcji z uwagi na wielkość statyczną S . W podanych wyżej wzorach przyjęto następujące oznaczenia:

$R^{S,\max}(x)$ – wytrzymałość materiału odpowiadająca wielkości statycznej użytej do wyznaczenia $B^{S,\max}$, np. wytrzymałość betonu na ściskanie w przypadku, gdy $B^{S,\max}$ jest obwiednią normalnych naprężeń ściskających;



Rys. 5.12. Uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $B_R^\sigma(x)$

$R^{S,\min}(x)$ – wytrzymałość materiału odpowiadająca wielkości statycznej użytej do wyznaczenia $B^{S,\min}$, np. wytrzymałość betonu na rozciąganie w przypadku, gdy $B^{S,\min}$ jest obwiednią normalnych naprężeń rozciągających.

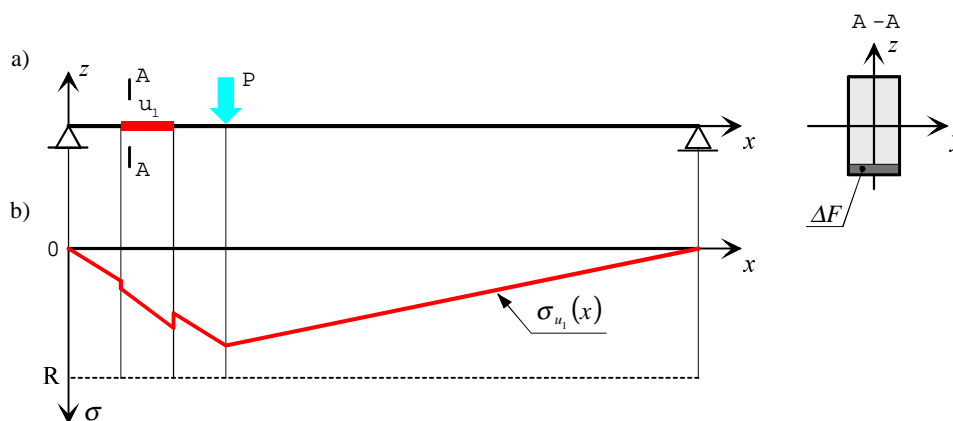
Uogólnioną obwiednię wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ w przykładowym dźwigarze przedstawiono na rys. 5.12.

W rozpatrywanym przykładzie $|B^{\sigma,\max}(x)| = |B^{\sigma,\min}(x)| = B^\sigma(x)$ oraz $|R^{\sigma,\max}(x)| = |R^{\sigma,\min}(x)| = R^\sigma$, a więc ostatecznie $B_R^\sigma(x) = B^\sigma(x)/R^\sigma$.

5.3.4. Wpływ uszkodzeń na wielkości statyczne

Do analizy wpływu uszkodzenia u_i o określonych parametrach (intensywność, rozległość, lokalizacja) na wartości wielkości statycznych S mogą być stosowane następujące instrumenty analityczne:

- funkcje rozkładu wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia (S_{u_i}),
- obwiednie wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia ($B_{u_i}^S$),
- obwiednie wpływu uszkodzenia ($W_{u_i}^S$).



Rys. 5.13. Funkcja rozkładu bezwzględnych wartości ekstremalnych wartości naprężeń normalnych σ z uwzględnieniem uszkodzenia u_1 w postaci ubytku materiału: a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $\sigma_{u_1}(x)$

Funkcja rozkładu wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia (S_{u_i}) określa wartości rozpatrywanej siły wewnętrznej S we wszystkich punktach modelu obiektu dla ustalonych obciążeń (intensywność, lokalizacja), z uwzględnieniem uszkodzenia

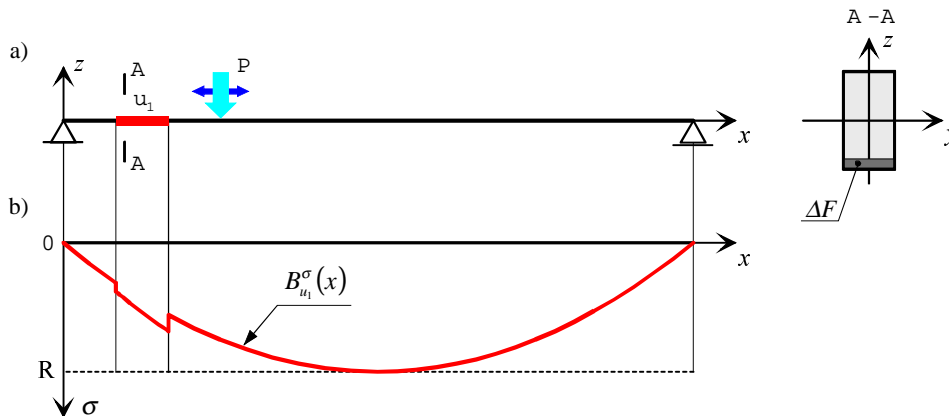
u_i o ustalonych parametrach (intensywność, rozległość, lokalizacja). Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcja ta przyjmuje ogólną postać: $S_{u_i}(x)$.

Jako uszkodzenie analizowane w prezentowanym przykładzie przyjęto ubytek materiału dolnej części dźwigara o intensywności $I = \Delta F / F$, występujące na części długości dźwigara, zgodnie z lokalizacją przedstawioną na rys. 5.13a. Rozpatrywaną klasę uszkodzeń (ubytek materiału dolnej części dźwigara) oznaczono tu jako u_i (rys. 5.20). W pokazanym dźwigarze bezwzględne wartości rzędnych funkcji rozkładu maksymalnych i minimalnych wartości naprężeń normalnych, z uwzględnieniem wpływu rozpatrywanego uszkodzenia u_i , są identyczne, a więc:

$$|\sigma_{u_i}^{\max}(x)| = |\sigma_{u_i}^{\min}(x)| = \sigma_{u_i}(x).$$

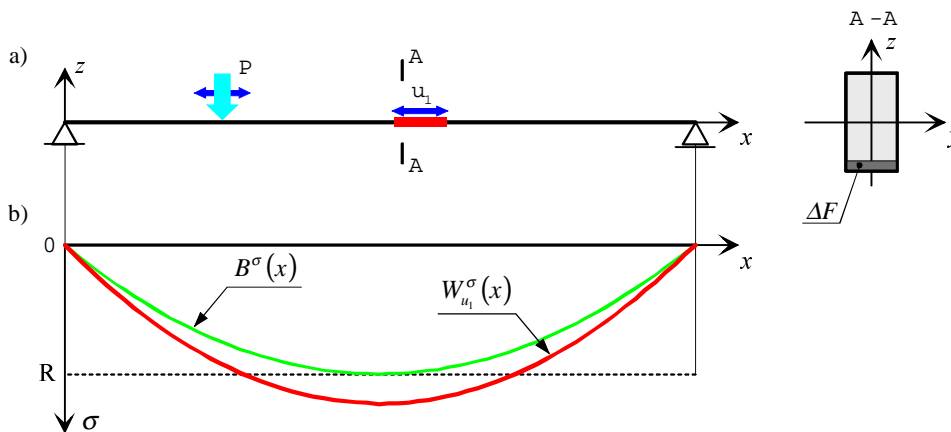
Obwiednie wielkości statycznej z uwzględnieniem uszkodzenia $B_{u_i}^{S, \max}$ oraz $B_{u_i}^{S, \min}$ określają dla każdego punktu modelu ekstremalne wartości rozpatrywanej wielkości statycznej S , jakie mogą wystąpić przy ekstremalnych obciążeniach stosowanych w analizie, z równoczesnym uwzględnieniem uszkodzenia u_i o ustalonych parametrach (intensywność, rozległość, lokalizacja). Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcje te przybierają postać: $B_{u_i}^{S, \max}(x)$ oraz $B_{u_i}^{S, \min}(x)$.

W dźwigarze prezentowanym jako przykład bezwzględne wartości rzędnych obwiedni minimalnych i maksymalnych wartości naprężeń normalnych są identyczne: $|B_{u_i}^{\sigma, \max}(x)| = |B_{u_i}^{\sigma, \min}(x)| = B_{u_i}^{\sigma}(x)$. Wykres tej funkcji, z uwzględnieniem występowania uszkodzenia u_i na części długości dźwigara, przedstawiono na rys. 5.14.



Rys. 5.14. Obwiednia bezwzględnych wartości ekstremalnych naprężeń normalnych σ z uwzględnieniem wpływu uszkodzenia u_i : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $B_{u_i}^{\sigma}(x)$

Obwiednie wpływu uszkodzenia $W_{u_i}^{S,\min}$ oraz $W_{u_i}^{S,\max}$ określają dla każdego punktu modelu ekstremalne wartości rozpatrywanej wielkości statycznej S , jakie mogą wystąpić przy ekstremalnych obciążeniach stosowanych w analizie, przy równoczesnym uwzględnieniu najniekorzystniejszego usytuowania uszkodzenia u_i o ustalonym rozkładzie intensywności. Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcje te można zapisać jako: $W_{u_i}^{S,\min}(x)$ oraz $W_{u_i}^{S,\max}(x)$.



Rys. 5.15. Obwiednia wpływu najniekorzystniej usytuowanego uszkodzenia u_1 na bezwzględne wartości maksymalnych i minimalnych naprężeń normalnych σ : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $W_{u_i}^\sigma(x)$ oraz funkcji $B^\sigma(x)$

W przedstawianym przykładzie (rys. 5.15) przeanalizowano wpływ ubytku materiału u_1 , o intensywności $I = \Delta F / F$, na wartości rzędnych obwiedni ekstremalnych naprężeń normalnych w każdym przekroju dźwigara. Bezwzględne wartości rzędnych obwiedni maksymalnych i minimalnych naprężeń normalnych są w prezentowanym przykładzie identyczne: $|W_{u_i}^{\sigma,\max}(x)| = |W_{u_i}^{\sigma,\min}(x)| = W_{u_i}^\sigma(x)$. Dla porównania na rys. 5.15 przedstawiono także wykres obwiedni naprężeń normalnych $B^\sigma(x)$ w dźwigarze bez uszkodzeń.

5.3.5. Wpływ uszkodzeń na wykorzystanie cech konstrukcji

Uszkodzenia powodują zmiany poziomu wykorzystania cech konstrukcji, takich jak: wytrzymałość materiału, nośność przekroju, dopuszczalne ugięcie itp., w stosunku do poziomu istniejącego w konstrukcji nieuszkodzonej. Do analizy tych wpływów mogą być stosowane:

- funkcje wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia ($S_{u_i,R}$),
- obwiednie wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia ($B_{u_i,R}^S$),
- obwiednie wpływu uszkodzenia na wykorzystanie wytrzymałości ($W_{u_i,R}^S$).

Funkcje wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia ($S_{u_i,R}^{\max}$ oraz $S_{u_i,R}^{\min}$) określają, przy ustalonych obciążeniach (intensywność, lokalizacja), poziom wykorzystania rozpatrywanej cechy konstrukcji odpowiadający analizowanej wielkości statycznej S , przy równoczesnym uwzględnieniu uszkodzenia u_i o ustalonych parametrach (intensywność, rozległość, lokalizacja). Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcje te można przedstawić jako:

$$S_{u_i,R}^{\max}(x) = \frac{S_{u_i}^{\max}(x)}{R^{S,\max}(x)}; \quad S_{u_i,R}^{\min}(x) = \frac{S_{u_i}^{\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \quad (5.5)$$

Do określania w każdym przekroju najwyższego poziomu wykorzystania rozpatrywanej cechy konstrukcji zastosowano w niniejszej pracy uogólnioną funkcję wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia $S_{u_i,R}(x)$:

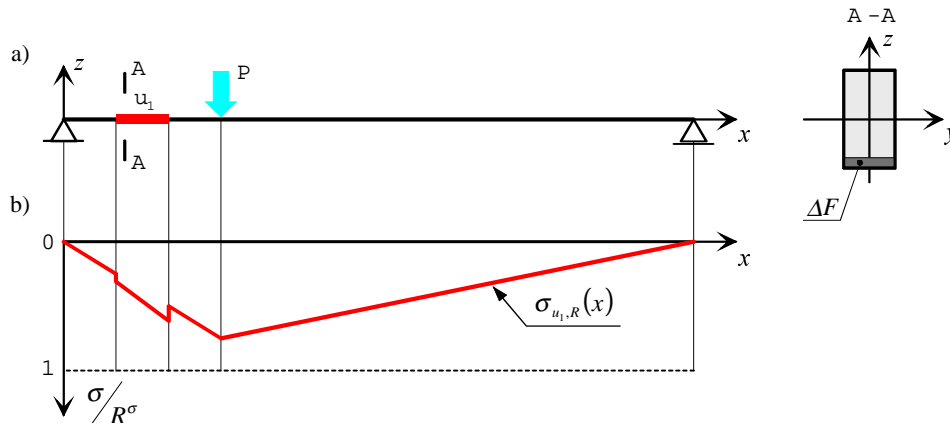
$$S_{u_i,R}(x) = \text{MAX} \left(\left| \frac{S_{u_i}^{\max}(x)}{R^{S,\max}(x)} \right|, \left| \frac{S_{u_i}^{\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \right| \right) \quad (5.6)$$

Dla prezentowanego przykładowego dźwigara uogólnioną funkcję wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne, z uwzględnieniem uszkodzenia u_1 , przedstawiono na rys. 5.16. Ponieważ $|\sigma_{u_1}^{\max}(x)| = |\sigma_{u_1}^{\min}(x)| = \sigma_{u_1}(x)$ oraz $|R^{\sigma,\max}(x)| = |R^{\sigma,\min}(x)| = R^\sigma$, ostatecznie więc w przedstawionym przykładzie: $\sigma_{u_1,R}(x) = \sigma_{u_1}(x) / R^\sigma$.

Obwiednie wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia $B_{u_i,R}^{S,\max}$ oraz $B_{u_i,R}^{S,\min}$ określają poziom wykorzystania cech konstrukcji (np. wytrzymałości materiału przy analizie naprężeń), odpowiadający analizowanej wielkości statycznej S , jaki może wystąpić przy ekstremalnych obciążeniach stosowanych w analizie, przy równoczesnym uwzględnieniu rozpatrywanego uszkodzenia u_i o ustalonych

parametrach (intensywność, rozległość, lokalizacja). Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcje wrażliwości odpowiadające maksymalnym i minimalnym wartościom analizowanej wielkości statycznej w poszczególnych przekrojach można przedstawić jako:

$$B_{u_i, R}^{S, \max}(x) = \frac{S_{u_i}^{\max}(x)}{R^{S, \max}(x)}; \quad B_{u_i, R}^{S, \min}(x) = \frac{S_{u_i}^{\min}(x)}{R^{S, \min}(x)} \quad (5.7)$$

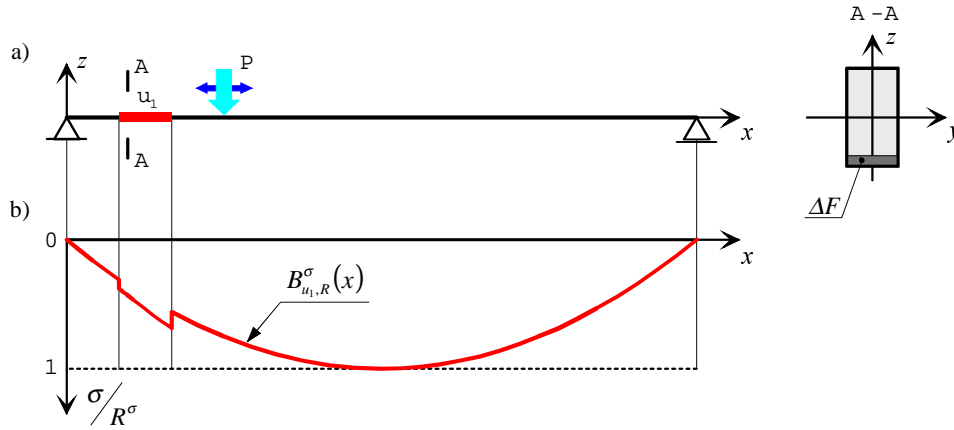


Rys. 5.16. Funkcja wykorzystania wytrzymałości materiału ze względu na naprężenia normalne σ z uwzględnieniem uszkodzenia u_1 : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $\sigma_{u_i, R}(x)$

W analizach statyczno-wytrzymałościowych prowadzonych na potrzeby funkcji ekspertowych szczególnie przydatna okazała się uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzenia $B_{u_i, R}^S(x)$, którą można przedstawić w postaci:

$$B_{u_i, R}^S(x) = \text{MAX} \left(\left| \frac{S_{u_i}^{\max}(x)}{R^{S, \max}(x)} \right|, \left| \frac{S_{u_i}^{\min}(x)}{R^{S, \min}(x)} \right| \right) \quad (5.8)$$

Dla dźwigara rozpatrywanego w przykładzie uogólnioną obwiednię $B_{u_i, R}^\sigma(x)$ wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ , z uwzględnieniem uszkodzenia u_1 , przedstawiono na rys. 5.17. Funkcja ta prezentuje dla każdego przekroju elementu poziom ekstremalnych naprężeń normalnych σ_{u_1} w konstrukcji uszkodzonej w stosunku do wytrzymałości materiału R^σ .



Rys. 5.17. Uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości materiału ze względu na naprężenia normalne σ , z uwzględnieniem uszkodzenia u_1 : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $B_{u_i,R}^\sigma(x)$

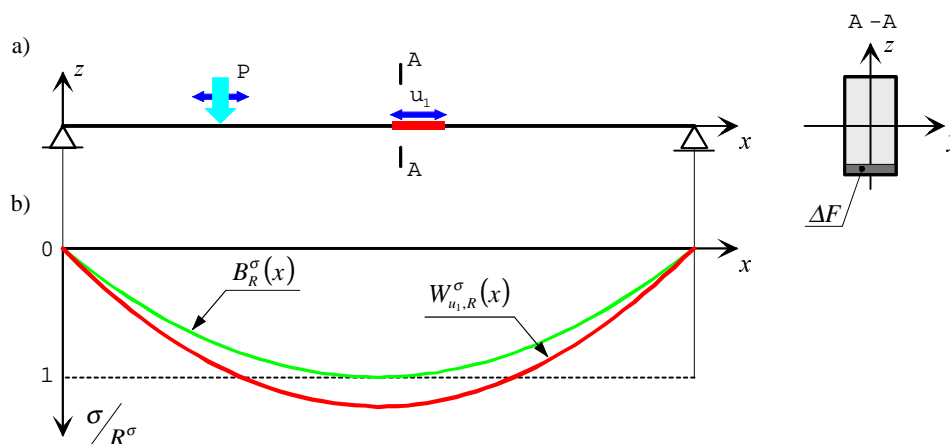
Ponieważ w prezentowanym przykładzie zachodzą zależności $|\sigma_{u_1}^{\max}(x)| = |\sigma_{u_1}^{\min}(x)| = \sigma_{u_1}(x)$ oraz $|R^{\sigma,\max}(x)| = |R^{\sigma,\min}(x)| = R^\sigma$, w rezultacie otrzymuje się: $B_{u_i,R}^\sigma(x) = \sigma_{u_1}(x)/R^\sigma$.

Obwiednie wpływu uszkodzenia na wykorzystanie wytrzymałości $W_{u_i,R}^{S,\max}$ oraz $W_{u_i,R}^{S,\min}$ określają poziom wykorzystania rozpatrywanych cech konstrukcji, odpowiadający analizowanej wielkości statycznej S , jaki może wystąpić przy ekstremalnych obciążeniach stosowanych w analizie przy równoczesnym uwzględnieniu najniekorzystniejszego usytuowania uszkodzenia u_i o ustalonym rozkładzie intensywności. Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) otrzymuje się zależności:

$$W_{u_i,R}^{S,\max}(x) = \frac{W_{u_i}^{S,\max}(x)}{R^{S,\max}(x)}; \quad W_{u_i,R}^{S,\min}(x) = \frac{W_{u_i}^{S,\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \quad (5.9)$$

Uogólniona obwiednia wpływu uszkodzenia u_i na wykorzystanie wytrzymałości ma postać:

$$W_{u_i,R}^S(x) = \text{MAX} \left(\left| \frac{W_{u_i}^{S,\min}(x)}{R^{S,\min}(x)} \right|, \left| \frac{W_{u_i}^{S,\max}(x)}{R^{S,\max}(x)} \right| \right) \quad (5.10)$$



Rys. 5.18. Uogólniona obwiednia wpływu uszkodzenia u_1 na wykorzystanie wytrzymałości materiału ze względu na naprężenia normalne σ : a) analizowana konstrukcja, b) wykres funkcji $W_{u_1,R}^\sigma(x)$ oraz $B_R^\sigma(x)$

Uogólniona obwiednia wpływu rozpatrywanego uszkodzenia u_1 na poziom wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ jest pokazana na rys. 5.18. W przykładzie tym $|W_{u_1}^{\sigma,\max}(x)| = |W_{u_1}^{\sigma,\min}(x)| = W_{u_1}^\sigma(x)$ oraz $|R^{\sigma,\max}(x)| = |R^{\sigma,\min}(x)| = R^\sigma$, a stąd ostatecznie: $W_{u_1,R}^\sigma(x) = W_{u_1}^\sigma(x)/R^\sigma$. Na rysunku 5.18b dla porównania przedstawiono także wykres uogólnionej obwiedni wykorzystania wytrzymałości $B_R^\sigma(x)$ w dźwigarze bez uszkodzeń.

5.3.6. Funkcje i obwiednie wrażliwości

Narzędzia analityczne zestawione w tab. 5.1 umożliwiają określanie wpływu uszkodzeń u_i poszczególnych typów, rodzajów i klas na wybraną wielkość statyczną (np. naprężenia normalne, naprężenia styczne, ugięcia itp.). Kompleksowa ocena stanu technicznego wymaga najczęściej określania wrażliwości konstrukcji na występujące uszkodzenia z uwzględnieniem równoczesnego wpływu różnych uszkodzeń na wszystkie składowe rozpatrywanej cechy konstrukcji. Na przykład podczas analizy stanów granicznych nośności należy w ogólnym przypadku określić poziom wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne, styczne, zastępcze itd. Na potrzeby takich analiz opracowano i zastosowano w niniejszej monografii koncepcję tzw. *funkcji wrażliwości* ω_{u_i} określających poziom wykorzystania cech konstrukcji (np. wytrzymałości materiału w analizie naprężeń) z uwzględnieniem sumarycznych efektów wystąpienia uszkodzeń u_i określonego

typu, rodzaju i klasy o zdefiniowanych parametrach, przy ekstremalnych rozpatrywanych obciążeniach.

Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcję wrażliwości elementu (e^1) na uszkodzenie u_i z uwagi na wielkości statyczne S_1, \dots, S_n można ogólnie przedstawić w postaci:

$$\omega_{u_i}^{S_1, \dots, S_n}(x) = \text{MAX} [B_{u_i, R}^{S_1}(x), \dots, B_{u_i, R}^{S_n}(x)] \quad (5.11)$$

gdzie $B_{u_i, R}^{S_n}(x)$ jest uogólnioną obwiednią wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na wielkość statyczną S_n , z uwzględnieniem wpływu uszkodzenia u_i .

W przypadku analizy poziomego wykorzystania wytrzymałości materiału funkcja wrażliwości może służyć na przykład do równoczesnego uwzględnienia wpływu uszkodzeń klasy u_i na zmianę naprężeń normalnych σ oraz naprężeń stycznych τ . Wtedy:

$$\omega_{u_i}^{\sigma, \tau}(x) = \text{MAX} [B_{u_i, R}^{\sigma}(x), B_{u_i, R}^{\tau}(x)] \quad (5.12)$$

gdzie:

$B_{u_i, R}^{\sigma}(x)$ – uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości materiału na naprężenia σ , z uwzględnieniem wpływu uszkodzenia u_i ;

$B_{u_i, R}^{\tau}(x)$ – uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości materiału na naprężenia τ , z uwzględnieniem wpływu uszkodzenia u_i .

Tak zdefiniowana funkcja $\omega_{u_i}^{\sigma, \tau}(x)$ obrazuje wrażliwość konstrukcji na uszkodzenie u_i z punktu widzenia wytrzymałości materiału w zakresie naprężeń σ oraz τ .

W pozyskiwaniu wiedzy na potrzeby funkcji ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego mostów wyjątkową przydatnością wyróżniają się uogólnione funkcje wrażliwości (ω), które umożliwiają uwzględnianie równoczesnego oddziaływania wszystkich występujących uszkodzeń. Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) funkcję tę można przedstawić w następującej ogólnej postaci:

$$\omega^{S_1, \dots, S_n}(x) = \text{MAX} [\omega_{u_1}^{S_1, \dots, S_n}(x), \dots, \omega_{u_m}^{S_1, \dots, S_n}(x)] \quad (5.13)$$

gdzie:

u_1, \dots, u_m – występujące równocześnie uszkodzenia konstrukcji,

$\omega_{u_m}^{S_1, \dots, S_n}(x)$ – funkcja wrażliwości na uszkodzenia u_m z uwagi na wielkości statyczne S_1, \dots, S_n .

W przypadku stosowania izostatycznych modeli konstrukcji *funkcje wrażliwości* $\omega_{u_i}^{S_j}$ mogą być w prosty sposób określone na podstawie *obwiedni wrażliwości* $\Omega_{u_i}^{S_j}$. *Obwiednia wrażliwości* $\Omega_{u_i}^{S_j}$ określa ekstremalny poziom wykorzystania cechy konstrukcji odpowiadającej analizowanej wielkości statycznej S_j , jaki może wystąpić w poszczególnych punktach modelu, przy ekstremalnych obciążeniach rozpatrywanych w analizie i przy równoczesnym uwzględnieniu wpływu uszkodzenia klasy u_i o dowolnych parametrach (intensywność, rozległość, lokalizacja).

Dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) obwiednię wrażliwości elementu na uszkodzenia u_i z uwagi na wielkość statyczną S_j można w ogólnej postaci zapisać jako:

$$\Omega_{u_i}^{S_j}(x, I) = B_R^{S_j}(x) \lambda_{u_i}^{S_j}(I) \quad (5.14)$$

gdzie:

x – współrzędna mierzona wzdłuż osi elementu (e^1),

u_i – oznaczenie uszkodzenia zależne od jego typu, rodzaju, kategorii i klasy,

I – intensywność uszkodzenia u_i ,

$B_R^{S_j}(x)$ – uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na wielkość statyczną S_j w konstrukcji bez uszkodzeń,

$\lambda_{u_i}^{S_j}(I)$ – funkcja czułości przekroju elementu na uszkodzenia u_i z uwagi na wielkość statyczną S_j (dla dowolnej intensywności uszkodzeń).

Występująca we wzorze (5.14) *funkcja czułości* $\lambda_{u_i}^{S_j}(I)$ określa stosunek ekstremalnej wartości analizowanej wielkości w przekroju występowania uszkodzenia u_i do ekstremalnej wartości tej wielkości w przekroju nieuszkodzonym, dla dowolnej intensywności uszkodzenia I , co można przedstawić jako:

$$\lambda_{u_i}^{S_j}(I) = \text{MAX} \left[\left| \frac{S_{j,u}^{\max}(I)}{S_j^{\max}} \right|, \left| \frac{S_{j,u}^{\min}(I)}{S_j^{\min}} \right| \right] \quad (5.15)$$

gdzie:

$S_{j,u}^{\max}(x), S_{j,u}^{\min}(x)$ – maksymalna i minimalna wartość analizowanej wielkości statycznej S_j w elemencie uszkodzonym,

$S_j^{\max}(x), S_j^{\min}(x)$ – maksymalna i minimalna wartość analizowanej wielkości statycznej S_j w elemencie nieuszkodzonym.

W ogólnym przypadku do skonstruowania *funkcji czułości* elementu są niezbędne następujące dane:

- rodzaj analizowanej wielkości statycznej,
- typ, rodzaj, kategoria i klasa uszkodzenia,
- rodzaj materiału elementu,
- geometryczne charakterystyki przekroju (kształt, proporcje wymiarów).

W przypadku równoczesnego uwzględniania w analizie kilku wielkości statycznych można wykorzystywać *globalną obwiednię wrażliwości* określoną zależnością:

$$\Omega_{u_i}^{S_1, \dots, S_n}(x, I) = \text{MAX}[\Omega_{u_i}^{S_1}(x, I), \dots, \Omega_{u_i}^{S_n}(x, I)] \quad (5.16)$$

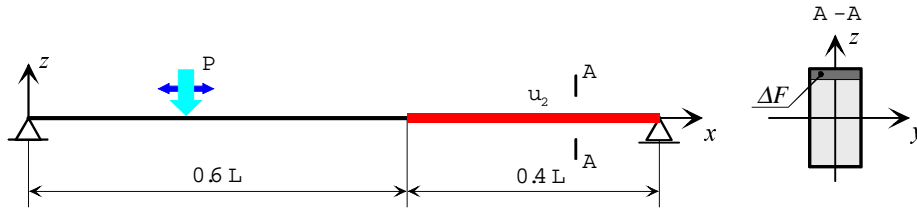
Globalna obwiednia wrażliwości $\Omega_{u_i}^{S_1, \dots, S_n}(x, I)$ umożliwia określanie wrażliwości elementu na uszkodzenia u_i dowolnej intensywności określonej funkcją $I(x)$. Przy wykorzystaniu globalnej obwiedni wrażliwości *funkcja wrażliwości elementu* może być wyznaczona jako:

$$\omega_{u_i}^{S_1, \dots, S_n}(x) = \Omega_{u_i}^{S_1, \dots, S_n}[x, I(x)] \quad (5.17)$$

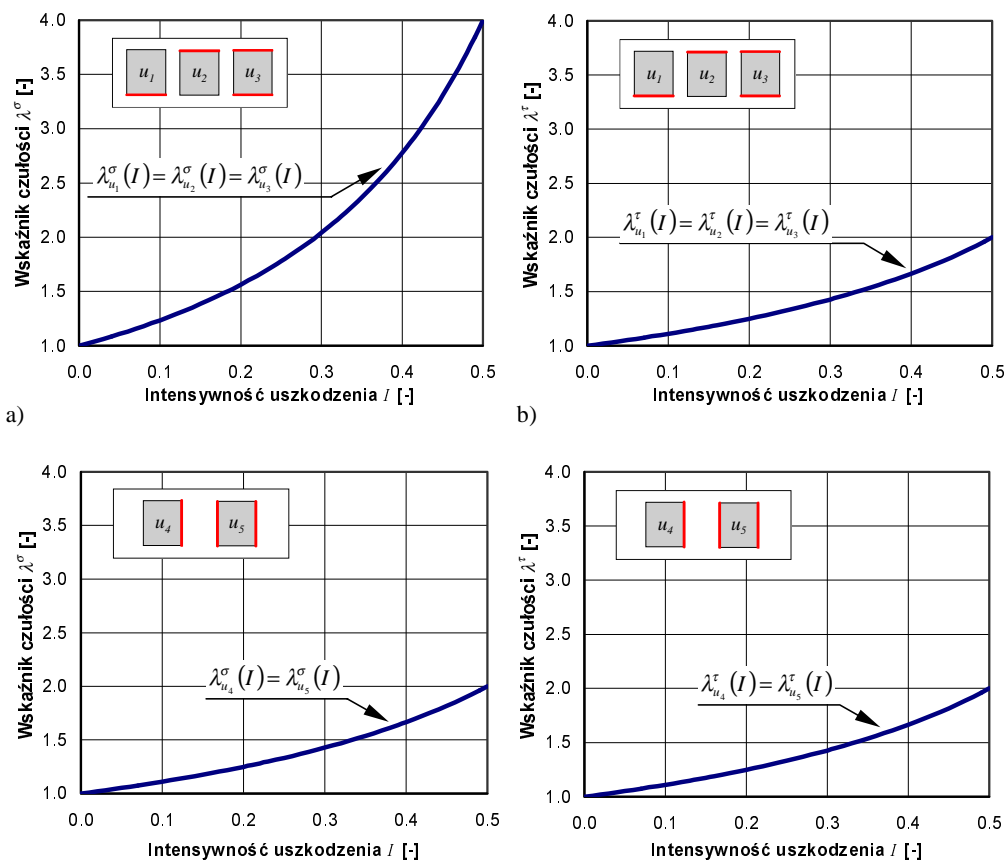
5.3.7. Analiza konstrukcji z wykorzystaniem funkcji i obwiedni wrażliwości

Sposób wykorzystywania funkcji czułości oraz funkcji i obwiedni wrażliwości w analizie konstrukcji przedstawiono na przykładzie pryzmatycznego dźwigara zginanego o prostokątnym przekroju poprzecznym (rys. 5.19). Materiał rozpatrywanego dźwigara ma jednakową wytrzymałość na naprężenia normalne ściskające i rozciągające, stałą na całej długości dźwigara $R^\sigma(x) = R^\sigma$ oraz stałą na długości elementu wytrzymałość materiału z uwagi na naprężenia styczne $R^\tau(x) = R^\tau$. Obciążenie dźwigara stanowi pojedyncza pionowa siła skupiona P , która może poruszać się po całej długości elementu. Dla uproszczenia prezentowanego przykładu pominięto wpływ ciężaru własnego dźwigara. Uszkodzeniem rozpatrywanego dźwigara jest niesymetryczny ubytek materiału górnej części elementu obejmujący 30% pola powierzchni przekroju poprzecznego. Lokalizację uszkodzenia pokazano na rys. 5.19.

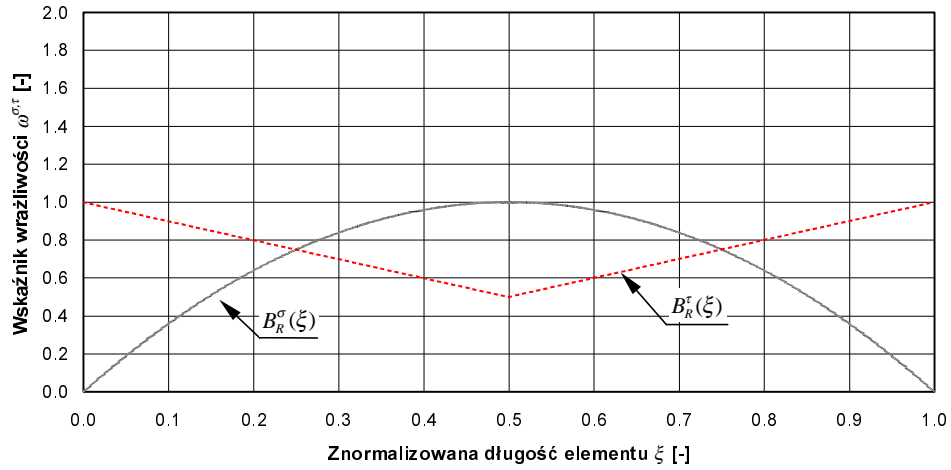
Funkcje czułości zginanego elementu o prostokątnym przekroju poprzecznym, z uwagi na naprężenia normalne $\lambda_{u_i}^\sigma(I)$ oraz styczne $\lambda_{u_i}^\tau(I)$, dla wybranych klas uszkodzeń typu *ubytki materiału* pokazano na rys. 5.20. W zginanych elementach o przekroju prostokątnym kształt funkcji czułości nie zależy od proporcji wymiarów przekroju poprzecznego.



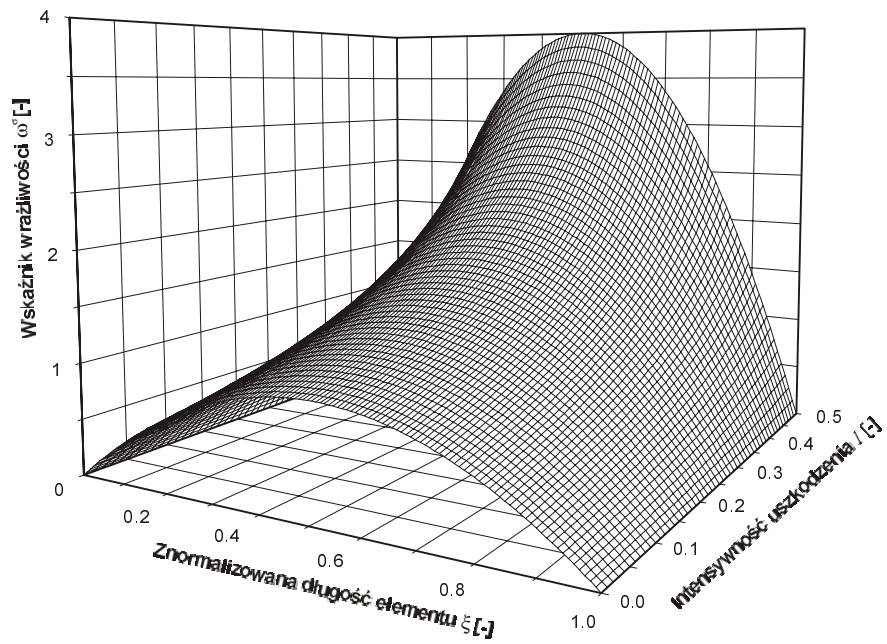
Rys. 5.19. Analizowany w przykładzie zginany dźwigar o prostokątnym przekroju poprzecznym

Rys. 5.20. Funkcje czułości zginanego elementu o prostokątnym przekroju poprzecznym na różne klasy uszkodzeń typu *ubytki materiału* – z uwagi na naprężenia: a) normalne $\lambda_{u_i}^{\sigma}(I)$, b) styczne $\lambda_{u_i}^{\tau}(I)$

Wykresy uogólnionych obwiedni wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne $B_R^{\sigma}(\xi)$ oraz naprężenia styczne $B_R^{\tau}(\xi)$ w nieuszkodzonym dźwigarze przedstawiono na rys. 5.21, gdzie ξ oznacza znormalizowaną współrzędną $\xi = x/L$.



Rys. 5.21. Uogólnione obwiednie wykorzystania wytrzymałości materiału w dźwigarze nieuszkodzonym – ze względu na naprężenia normalne $B_R^\sigma(\xi)$ oraz ze względu na naprężenia styczne $B_R^\tau(\xi)$



Rys. 5.22. Obwiednia wrażliwości $\Omega_{u_2}^\sigma(\xi, I)$ rozpatrywanego dźwigara na ubytki materiału klasy u_2 – ze względu na naprężenia normalne σ

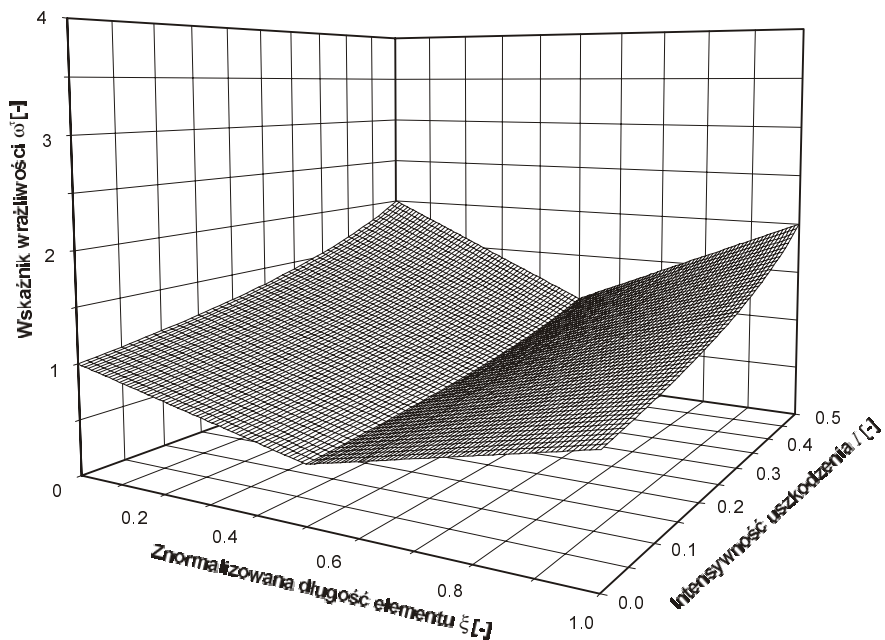
Znajomość uogólnionych obwiedni wykorzystania wytrzymałości materiału elementu oraz funkcji czułości na uszkodzenia umożliwi skonstruowanie obwiedni wrażliwości analizowanego elementu. Obwiednia wrażliwości na ubytki materiału klasy u_2 (według oznaczeń na rys. 5.20), z uwagi na naprężenia normalne σ , przyjmuje zgodnie ze wzorem (5.14) postać:

$$\Omega_{u_2}^{\sigma}(\xi, I) = B_R^{\sigma}(\xi) \lambda_{u_2}^{\sigma}(I) \quad (5.18)$$

Funkcja ta przedstawia poziom naprężeń normalnych σ_u w konstrukcji uszkodzonej w stosunku do wytrzymałości materiału R^{σ} . Prezentowana na rys. 5.22 funkcja umożliwi ocenę poziomu wykorzystania wytrzymałości materiału dla dowolnej intensywności i dowolnej lokalizacji uszkodzenia klasy u_2 na długości analizowanego elementu.

Podobnie obwiednia wrażliwości z uwagi na naprężenia styczne τ może być przedstawiona jako:

$$\Omega_{u_2}^{\tau}(\xi, I) = B_R^{\tau}(\xi) \cdot \lambda_{u_2}^{\tau}(I) \quad (5.19)$$



Rys. 5.23. Obwiednia wrażliwości $\Omega_{u_2}^{\tau}(\xi, I)$ rozpatrywanego dźwigara na ubytki materiału klasy u_2 – ze względu na naprężenia normalne τ

Funkcja ta (rys. 5.23) prezentuje poziom naprężeń stycznych τ_u w konstrukcji uszkodzonej w stosunku do wytrzymałości materiału R^t .

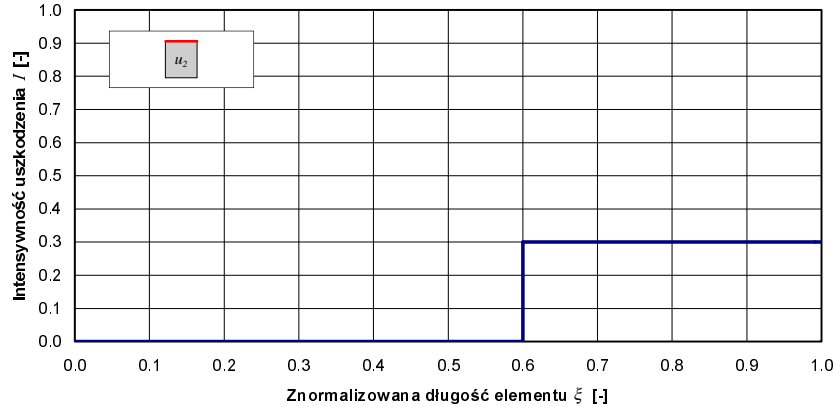
Globalna obwiednia wrażliwości elementu na ubytki materiału klasy u_2 , uwzględniająca zarówno wrażliwość z uwagi na naprężenia normalne σ , jak i z uwagi na naprężenia styczne τ , może być zdefiniowana jako (rys. 5.25a):

$$\Omega_{u_2}^{\sigma,\tau}(\xi, I) = \text{MAX}[\Omega_{u_2}^{\sigma}(\xi, I), \Omega_{u_2}^{\tau}(\xi, I)] \quad (5.20)$$

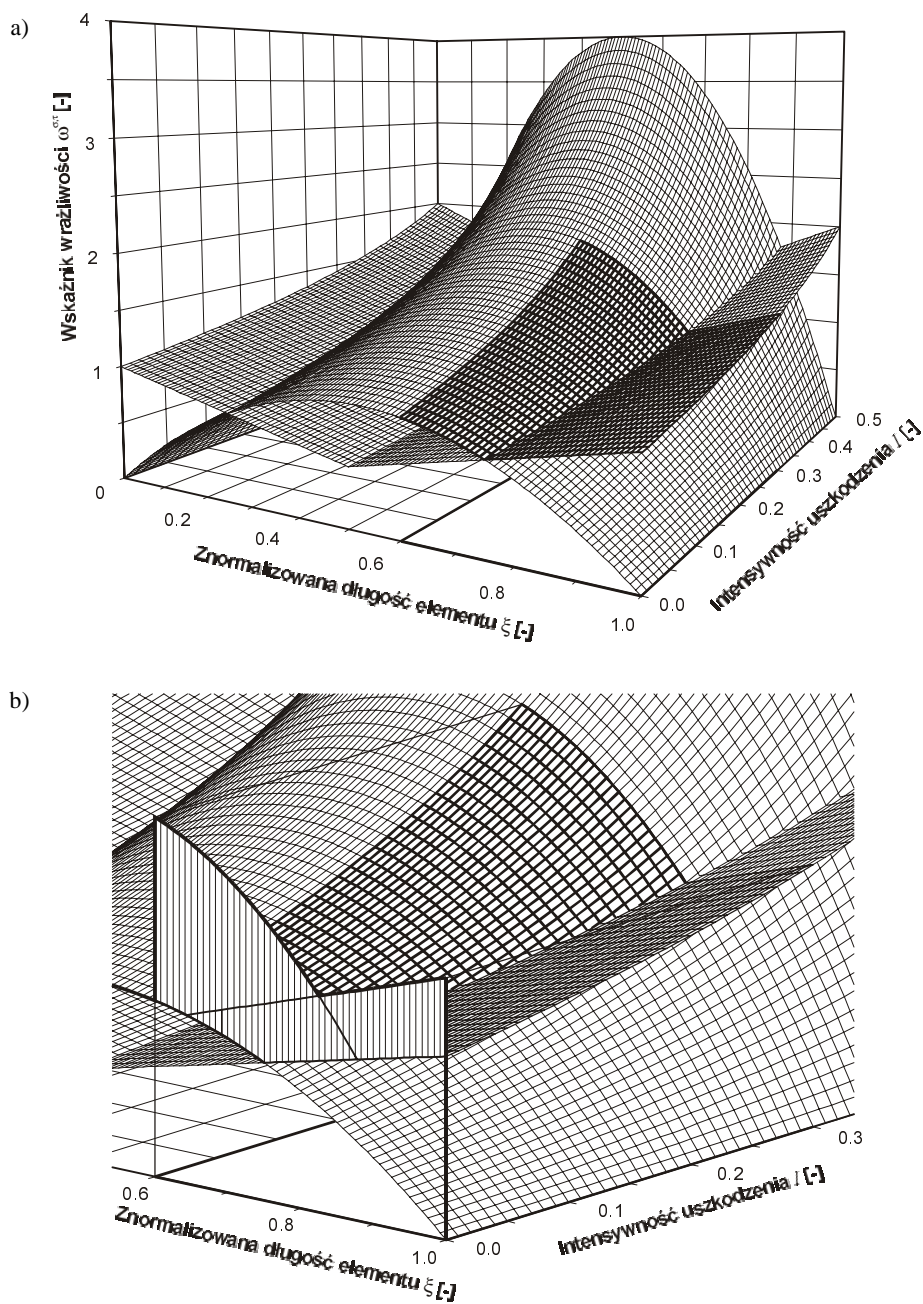
Funkcję intensywności uszkodzenia $I(\xi)$ dźwigara rozpatrywanego w przykładzie przedstawiono na rys. 5.24, a graficzną interpretację sposobu wyznaczania funkcji wrażliwości na podstawie obwiedni wrażliwości – na rys. 5.25b. W praktycznych zastosowaniach funkcje wrażliwości są wyznaczane metodami analitycznymi.

Przy wykorzystaniu obwiedni $\Omega_{u_2}^{\sigma,\tau}(\xi, I)$ można – na podstawie wzoru (5.17) – określić wrażliwość elementu na dowolne uszkodzenie klasy u_2 o znanych parametrach. W prezentowanym przykładzie funkcję wrażliwości dźwigara można zapisać jako:

$$\omega_{u_2}^{\sigma,\tau}(\xi) = \Omega_{u_2}^{\sigma,\tau}[\xi, I(\xi)] \quad (5.21)$$

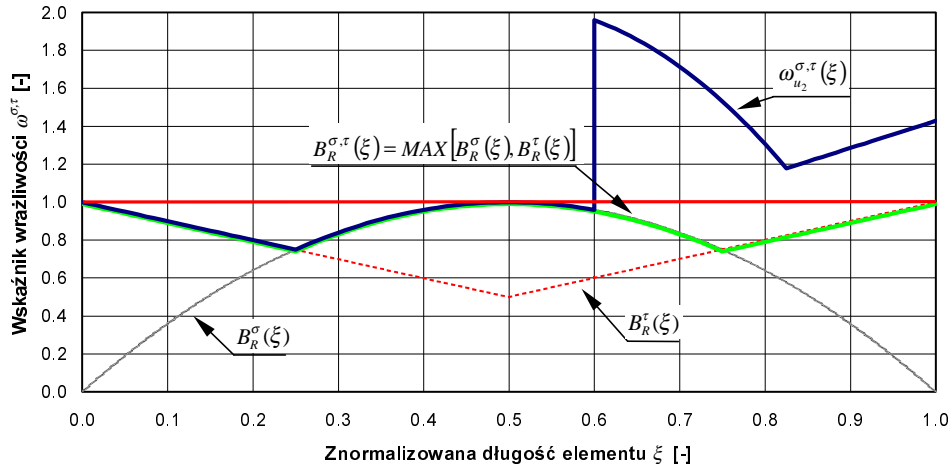


Rys. 5.24. Funkcja intensywności ubytków materiału klasy u_2 odpowiadająca uszkodzeniu analizowanego dźwigara (rys. 5.19)



Rys. 5.25. Globalna obwiednia wrażliwości analizowanego dźwigara na ubytki materiału klasy u_2 :

- a) złożenie obwiedni wrażliwości $\Omega_{u_2}^{\sigma}(\xi, I)$ oraz $\Omega_{u_2}^{\tau}(\xi, I)$, b) graficzna ilustracja sposobu wyznaczania funkcji wrażliwości $\omega_{u_2}^{\sigma, \tau}(\xi)$ na podstawie obwiedni wrażliwości



Rys. 5.26. Funkcja wrażliwości elementu $\omega_{u_2}^{\sigma,\tau}(\xi)$ na ubytki materiału klasy u_2

Wynikową funkcję wrażliwości elementu $\omega_{u_2}^{\sigma,\tau}(\xi)$ na ubytki materiału klasy u_2 o intensywności przedstawionej na rys. 5.24, z uwzględnieniem wpływu tych uszkodzeń na wykorzystanie wytrzymałości materiału na naprężenia normalne σ i styczne τ , pokazano na rys. 5.26. Funkcja ta prezentuje dla każdego przekroju elementu ekstremalny poziom wykorzystania wytrzymałości materiału. Znajomość funkcji wrażliwości umożliwia także określenie poziomu ewentualnego przekroczenia dopuszczalnego wyężenia materiału ($\omega > 1$) w zakresie analizowanych wielkości statycznych.

5.4. Akwizycja wiedzy ekspertów

Kluczową postacią w procesie pozyskiwania wiedzy są eksperci udostępniający swoją wiedzę oraz konsultujący wiedzę pochodzącą z innych źródeł. Ścisła współpraca ekspertów i inżyniera wiedzy jest z reguły niezbędna w całym procesie tworzenia funkcji ekspertowej. Sposób akwizycji wiedzy eksperta zależy od wielu czynników, a przede wszystkim od rozpatrywanego zagadnienia, rodzaju i formy przekazywanych informacji oraz od indywidualnych predyspozycji eksperta w zakresie syntezy i udostępniania posiadanej wiedzy.

Do pozyskiwania wiedzy ekspertów na potrzeby niniejszej pracy opracowano i stosowano kilka metod akwizycji, a mianowicie:

- *metodę obserwacji* – polegającą na obserwacji pracy eksperta przez inżyniera wiedzy, tworzącego opis i zapis wykorzystywanej przez eksperta wiedzy,

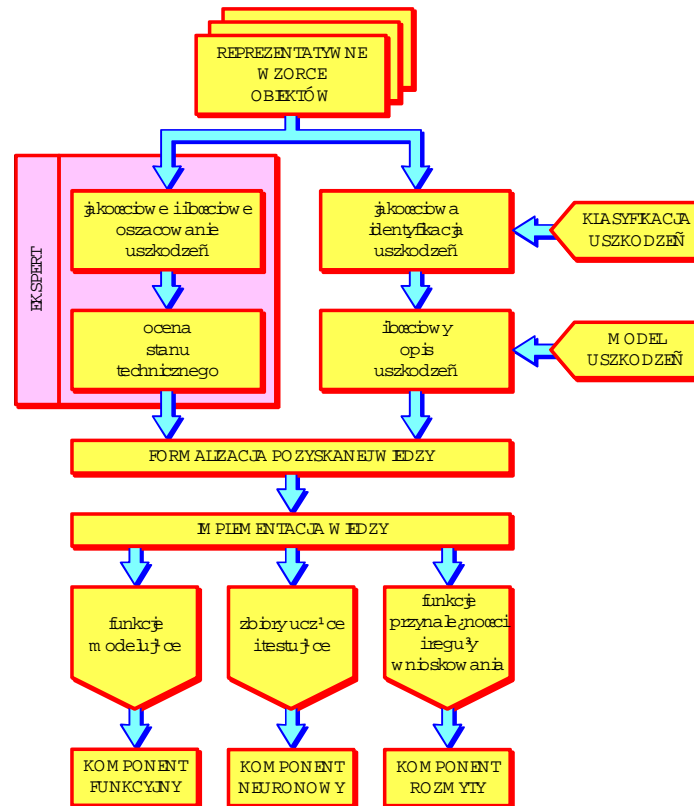
z uwzględnieniem bieżących wyjaśnień i komentarzy; metoda akwizycji nie jest tu bezpośrednio powiązana ze sposobem reprezentacji wiedzy;

- *metodę wzorców* – opracowanie przez eksperta rozwiązań zbioru problemów (zadań) przedstawionych przez inżyniera wiedzy, które mogą być traktowane jako wzorce reprezentatywne dla rozpatrywanego zagadnienia; rozwiązania przedstawiane przez eksperta nie są w tej metodzie adresowane do konkretnego sposobu reprezentacji wiedzy;
- *metodę analizy* – obejmującą wspólne analizy i dyskusje eksperta oraz inżyniera wiedzy ukierunkowane na sformułowanie sformalizowanego zapisu sposobu rozwiązywania konkretnych problemów należących do rozpatrywanej dziedziny wiedzy; stosowane techniki formalizacji opisu wiedzy są dedykowane określonym sposobom jej reprezentacji;
- *metodę opisu* – w ramach której ekspert samodzielnie tworzy opisy procedur rozwiązywania określonych zagadnień należących do analizowanego obszaru wiedzy, korzystając z formalizmów specyficznych dla stosowanego sposobu reprezentacji wiedzy.

We wszystkich wymienionych wyżej metodach stosowano zasadę konfrontacji rozwiązań tych samych problemów, opracowanych niezależnie przez dwóch lub więcej ekspertów. W przypadku istotnych rozbieżności organizowano dyskusje, mające na celu ujednoczenie stosowanych kryteriów ocen i sprecyzowanie uzyskanych wyników.

W pozyskiwaniu wiedzy związanej z oceną stanu obiektów mostowych na potrzeby funkcji ekspertowych wykorzystujących technologię sieci hybrydowych najbardziej efektywna okazała się *metoda wzorców*. Ogólny schemat realizacji tej metody przedstawiono na rys. 5.27, a kolejne etapy działań można zdefiniować następująco:

- określenie charakterystycznych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych, reprezentatywnych dla rozpatrywanej populacji obiektów mostowych; podstawą takiej klasyfikacji są wyniki analizy zasobów bazy danych systemu komputerowego wspomagającego eksploatację infrastruktury mostowej;
- wybór obiektów traktowanych jako wzorce dla wyodrębnionych grup obiektów o zbliżonych parametrach konstrukcyjno-materiałowych;
- prezentacja wybranych obiektów ekspertowi w formie przeglądu obiektów w terenie lub w formie dokumentacji (rysunki, zdjęcia, wyniki badań itp.);
- określenie przez eksperta stanu technicznego poszczególnych części składowych obiektu na podstawie własnej wiedzy i doświadczenia; oceny powinny być formułowane w skali przyjętej w systemie;
- jakościowy i ilościowy opis uszkodzeń obiektu, zgodnie z jednolitymi zasadami numerycznego modelowania uszkodzeń;
- skojarzenie numerycznego modelu uszkodzeń poszczególnych części składowych i odpowiadających im ocen dokonanych przez eksperta;



Rys. 5.27. Schemat procesu pozyskiwania wiedzy ekspertów na potrzeby komponentów sieci hybrydowej przy wykorzystaniu metody wzorców

- formalizacja pozyskanej wiedzy stosownie do techniki jej reprezentacji;
- implementacja wiedzy w komponentach sieci hybrydowej;
- udział eksperta w testowaniu poszczególnych komponentów oraz docelowej funkcji ekspertowej – z dokonywaniem korekt i uzupełnień zaimplementowanej wiedzy.

Prace wykonywane przez ekspertów wyróżniono na rys. 5.27. Pozostałe działania składające się na proces pozyskiwania wiedzy są domeną inżyniera wiedzy.

6. OCENA KONDYCJI OBIEKTÓW MOSTOWYCH

6.1. Kryteria i metody oceny

Podstawowymi elementami każdego systemu wspomagającego eksploatację infrastruktury mostowej są: metodyka oceny stanu technicznego obiektów mostowych oraz procedury oceny spełnienia przez obiekt wymagań eksploatacyjnych stawianych przez użytkowników. W wielu użytkowanych systemach oba wymienione wyżej aspekty oceny stanu obiektów traktuje się, w sposób mniej lub bardziej jawny, łącznie i nazywa oceną stanu technicznego lub oceną kondycji obiektów. Różne rozwiązania w zakresie oceny kondycji obiektów mostowych prezentują m.in. prace: [4], [12], [63], [108], [121], [219], [222], [273], [275], [312], [315], [378]. Porównanie kryteriów i metod oceny stanu obiektów mostowych stosowanych w wybranych systemach przedstawiono w tab. 6.1. Jako wynik analizy prezentowanych rozwiązań można sformułować następujące ogólne wnioski:

- we wszystkich systemach jest stosowana skala ocen stanu obiektów, licząca od 3 do 10 poziomów, umożliwiająca gradację formułowanych ocen;
- wszystkie rozpatrywane skale ocen mają charakter dyskretny i wymagają przyporządkowania ocenianemu obiektowi (lub jego części składowej) jednej oceny wybranej spośród zdefiniowanych możliwości;
- skale ocen są definiowane przy użyciu jakościowych wartości lingwistycznych (np. nieznaczne uszkodzenia, zaawansowane uszkodzenia, poważne uszkodzenia) lub przy wykorzystaniu mieszanych definicji jakościowo-ilościowych zawierających oprócz wartości lingwistycznych także wartości liczbowe (np. rozwarłość rys od 0,1 mm do 0,3 mm, ubytek do 10% przekroju elementu);
- jako kryterium definiowania skali ocen bywają przyjmowane:
 - rodzaje i zaawansowanie uszkodzeń w aspekcie potencjalnego zagrożenia awarią lub zniszczeniem (np. poz. 3, 7, 8, 9, 11 w tab. 6.1),
 - pilność wykonania napraw z uwagi na zagrożenie awarią lub zniszczeniem (np. poz. 1 oraz 4 w tab. 6.1),
 - wpływ degradacji na przydatność użytkową obiektu (np. poz. 2 w tab. 6.1),
 - prognozowany okres użytkowania do wystąpienia dysfunkcji, awarii lub katastrofy (np. poz. 1 oraz 5 w tab. 6.1);

Tab. 6.1. Ocena stanu technicznego obiektów mostowych w wybranych systemach wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej

Lp.	Rodzaj systemu	Skala ocen stanu technicznego	Skala ocen			Kryterium skali ocen	Liczba ocenianych części składowych lub elementów obiektu
			jakościowa	mieszana	ilościowa		
1.	System zarządzania mostami drogowymi (Wielka Brytania) – [1], [67], [71], [102], [344]	3	4	5	6	7	8
1.		Skala ocen stanu technicznego części składowych: 1 – nie ma znaczących uszkodzeń 2 – nieznaczne uszkodzenia nie wymagające pilnych działań 3 – uszkodzenia wymagające reakcji w ciągu najbliższych 2 lat 4 – poważne uszkodzenia wymagające działań w ciągu najbliższego roku	✓			pilność wykonania napraw ze względu na zagrożenie awarią	12 rodzajów części składowych
2.	System zarządzania mostami drogowymi (USA) – [3], [72], [75], [93], [302], [348]		✓			wpływ uszkodzeń na właściwości konstrukcyjne elementów	54 typy elementów
3.	System zarządzania mostami drogowymi SIHA (Finlandia) – [66], [69], [74], [319], [320], [322]	Skala ocen definiowana indywidualnie dla poszczególnych typów elementów: 1 – stan dobry 2 – nieznaczne uszkodzenia 3 – zaawansowane uszkodzenia 4 – poważne uszkodzenia	✓			wpływ uszkodzeń na przydatność użytkową	5 rodzajów części składowych
				✓		rodzaj i poziom zaawansowania uszkodzeń	9 rodzajów części składowych 68 typów elementów

1	2	3	4	5	6	7	8
4.	System zarządzania mostami drogowymi DANBRO (Dania) – [6], [76], [87], [203]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: 0 – bez istotnych uszkodzeń 3 – wymaga jak najszybszej naprawy 1 – nie wymaga napraw 4 – wymaga natychmiastowej naprawy 2 – wymaga naprawy przy okazji 5 – stan alarmowy	✓			pilność wykonania napraw w aspekcie zagrożenia awarią	13 rodzajów części składowych
5.	System zarządzania mostami drogowymi SAFE (Szwecja) – [68], [77], [206]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: 3 – dysfunkcja stwierdzona w czasie inspekcji 2 – dysfunkcja spodziewana w ciągu 3 lat 1 – dysfunkcja spodziewana w ciągu 10 lat 0 – ewentualna dysfunkcja po okresie > 10 lat	✓			przewidywany okres użytkowania do wystąpienia dysfunkcji	7 rodzajów części składowych
6.	System zarządzania mostami kolejowymi British Railways (Wielka Brytania) – [106], [130]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: G – stan bardzo dobry F – stan niezły P – stan zły U – konieczne pilne przeciwdziałanie	✓			zagrożenie awarią	20 rodzajów części składowych
7.	System zarządzania mostami drogowymi PONTIS (USA) – [64], [268], [339], [341], [342]	Skala ocen stanu technicznego zdefiniowana indywidualnie dla każdego typu elementów (od 3 do 5 klas zaawansowania uszkodzeń)		✓		rodzaj i poziom zaawansowania uszkodzeń	120 typów elementów
8.	System zarządzania mostami drogowymi BRIDGIT (USA) – [146], [147], [148]	Skala ocen stanu technicznego zdefiniowana indywidualnie dla każdego typu elementów (od 3 do 5 klas zaawansowania uszkodzeń)		✓		rodzaj i poziom zaawansowania uszkodzeń	7 rodzajów części składowych, 84 typy elementów, 9 typów zabezpieczeń, 5 typów nawierzchni
9.	System zarządzania mostami drogowymi OBMS (Kanada) – [340]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: 4 – stan doskonały 3 – stan dobry		✓		rodzaj i poziom zaawansowania uszkodzeń	9 rodzajów części składowych

1	2	3	4	5	6	7	8
10.	System zarządzania mostami kolejowymi TIFSA (Hiszpania) – [271]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: 0 – bez uszkodzeń 1 – nieistotne defekty, przeważnie natury estetycznej 2 – konstrukcja może być zagrożona w razie rozwoju uszkodzenia 3 – uszkodzenia wskazujące na początek zagrożenia 4 – uszkodzenia wskazujące na występowanie zagrożenia 5 – uszkodzenia mogące prowadzić do zmian w zachowaniu się konstrukcji 6 – uszkodzenia wskazujące na bliski stan zniszczenia konstrukcji	✓			poziom zagrożenia awarią lub katastrofą	6 rodzajów części składowych
11.	System zarządzania mostami drogowymi KUBA-MS (Szwajcaria) – [104], [210]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: od 1 (stan dobry, bez uszkodzeń) do 5 (stan alarmowy, niezbędna natychmiastowa akcja)		✓		rodzaj i poziom zaawansowania uszkodzeń	68 rodzajów części składowych
12.	System zarządzania mostami drogowymi SGM (Polska) – [32], [158], [235], [239], [241], [363]	Skala ocen stanu technicznego części składowych: 5 – bez uszkodzeń 4 – uszkodzenia obniżające estetykę 3 – uszkodzenia, których pozostawienie bez naprawy obniży trwałość 2 – uszkodzenia zagrażające bezpieczeństwu użytkownika, powodujące konieczność doraźnego zabezpieczenia i niezwłocznej naprawy 1 – uszkodzenia dyskwalifikujące wartość użytkową, powodujące konieczność wyłączenia z eksploatacji i wymiany 0 – stan awarii lub zniszczenia	✓			estetyka, trwałość, przydatność użytkowa, bezpieczeństwo	19 rodzajów części składowych
13.	System zarządzania mostami kolejowymi SMOK (Polska) – [20], [24], [50]	Skala ocen stanu technicznego od 5,0 (stan techniczny zgodny z projektem) do 0,0 (bepośrednie zagrożenie awarią)			✓	typy uszkodzeń oraz ich miary ilościowe w aspekcie zagrożenia awarią	każda podpora (1 ocena łączna) oraz każde przeszło (3 oceny: dźwigary główne, pomost, łożyska)

- w większości systemów ocenie stanu podlegają podstawowe konstrukcyjne (podpory, dźwigary główne przęsła, konstrukcja pomostu, łożyska) oraz niekonstrukcyjne (np. nawierzchnia, system odwodnienia, wyposażenie) części składowe obiektu mostowego;
- w niektórych systemach (np. poz. 3, 7, 8 w tab. 6.1) są wykorzystywane predefiniowane kategorie stanu technicznego, nazywane też stanami kondycji (ang. *condition state*), określone indywidualnie dla podstawowych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych głównych części składowych.

Ze względu na brak jednoznaczności i precyzji określeń używanych w dziedzinie definiowania i oceny stanu obiektów mostowych, przyjęto w niniejszej pracy pojęcie *kondycja obiektu mostowego* jako ogólne określenie obejmujące dwa podstawowe, ale wyraźnie rozdzielone, elementy oceny stanu obiektu, a mianowicie:

- *stan techniczny* – rozumiany jako poziom zgodności aktualnych wartości parametrów technicznych obiektu z wartościami projektowanymi;
- *przydatność użytkową* – charakteryzującą poziom zgodności aktualnych wartości parametrów użytkowych obiektu z wymaganymi wartościami tych parametrów.

W podanych w tym rozdziale definicjach przez *parametry techniczne obiektu* rozumiane są wielkości charakteryzujące obiekt pod względem konstrukcyjnym, a w szczególności parametry geometryczne obiektu oraz właściwości materiałów konstrukcyjnych. *Parametry użytkowe* natomiast to wielkości charakteryzujące obiekt pod względem eksploatacyjnym, obejmujące takie cechy jak:

- nośność,
- wymiary skrajni ruchu na obiekcie i pod nim,
- dopuszczalna prędkość ruchu pojazdów.

W prezentowanym rozwiązaniu układem odniesienia przy ocenie stanu technicznego jest zaprojektowany poziom parametrów technicznych charakteryzujący obiekt pod względem konstrukcyjnym, przy założeniu jego zgodności z normami i przepisami obowiązującymi w okresie wykonywania projektu. Przyjęcie tak zdefiniowanego układu odniesienia umożliwia uwzględnienie w ocenie stanu technicznego obiektu zarówno ewentualnych defektów powstałych w trakcie jego wykonywania, jak i uszkodzeń pojawiających się w okresie użytkowania. W przypadku modernizacji lub przebudowy obiektu mostowego, zmieniającej jego parametry techniczne, układem odniesienia w ocenie stanu technicznego stają się nowe wartości parametrów technicznych przyjęte w projekcie przebudowy. Tak zdefiniowaną ocenę stanu technicznego można przyjmować w całym okresie eksploatacji obiektu jako porównywalną *miarę zaawansowania procesu degradacji*.

Mimo dużego zróżnicowania metod oceny stanu technicznego mostów w poszczególnych krajach, a nawet pomiędzy różnymi systemami stosowanymi w tym samym kraju, można zauważyć, że praktycznie wszystkie skale ocen są skonstruowane w taki sposób, iż najwyższy stopień skali odpowiada pełnej zgodności

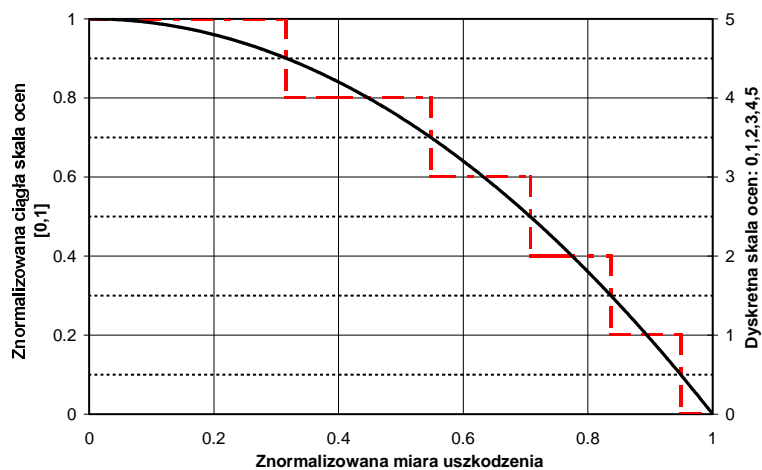
zaprojektowanych i rzeczywistych parametrów technicznych obiektu, natomiast najniższy stopień skali ocen sygnalizuje bezpośrednie zagrożenie awarią. Wobec tego proponuje się wprowadzenie *znormalizowanej skali ocen stanu technicznego* obiektów mostowych, zdefiniowanej w przedziale $[0,1]$. Miarą stanu technicznego jest w proponowanym rozwiązaniu wartość *znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego* ψ , a skala ocen ma następujące właściwości:

- wartość $\psi = 1$ oznacza pełną zgodność rzeczywistych parametrów technicznych obiektu z parametrami zaprojektowanymi;
- wartość $\psi = 0$ oznacza bezpośrednie zagrożenie awarią lub katastrofą;
- wszystkie oceny stanu technicznego są odnoszone do zaprojektowanego stanu obiektu;
- skala ocen jest ciągła, a więc oceny stanu technicznego mogą przyjmować dowolne wartości z przedziału $[0,1]$.

Oceny stanu technicznego wyrażone wartością wskaźnika stanu technicznego ψ w znormalizowanej ciągłej skali $[0,1]$ mogą być w prosty sposób transformowane do dowolnej innej skali nieznormalizowanej. Przykład przekształcenia ciągłej skali znormalizowanej w dyskretną skalę zawierającą oceny: 0, 1, 2, 3, 4 oraz 5 przedstawiono na rys. 6.1.

Stosowanie analogicznej znormalizowanej skali ocen proponuje się w odniesieniu do przydatności użytkowej, ocenianej za pomocą *znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej* $\bar{\psi}$. W znormalizowanej skali ocen przydatności użytkowej:

- wartość $\bar{\psi} = 1$ oznacza pełną zgodność wartości analizowanego parametru użytkowego obiektu z wartością wymaganą przez użytkowników;



Rys. 6.1. Porównanie ciągłej (linia ciągła) i dyskretniej (linia przerywana) skali ocen stanu technicznego obiektów mostowych

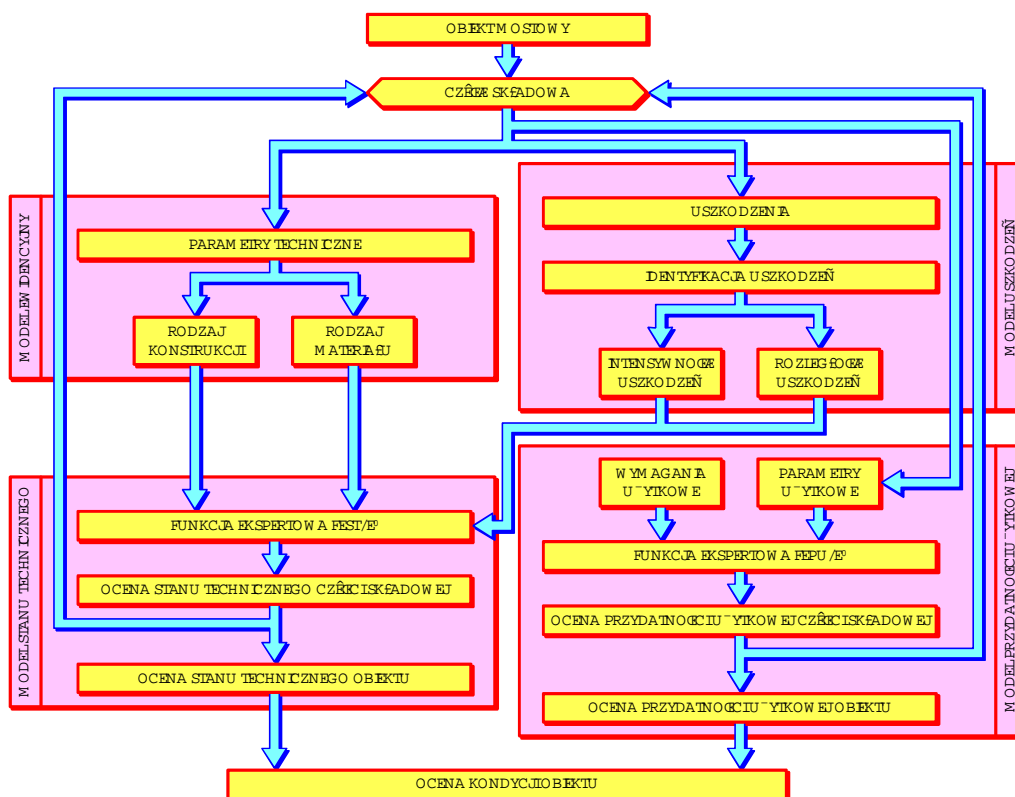
- wartość $\bar{\psi} = 0$ oznacza brak przydatności użytkowej obiektu z uwagi na rozpatrywany parametr.

Oceny przydatności użytkowej, w odróżnieniu od ocen stanu technicznego, są odnoszone do zmieniającego się poziomu wymagań eksploatacyjnych, a więc nie stanowią miar bezwzględnych, które można porównywać w całym okresie eksploatacji obiektu. Należy podkreślić, że stan techniczny obiektu wpływa z reguły bezpośrednio na przydatność użytkową – gorszy stan techniczny obiektu skutkuje przeważnie pogorszeniem jego cech użytkowych. Relacja taka nie obowiązuje w drugą stronę: obniżenie przydatności użytkowej może nastąpić nawet przy zachowaniu idealnego stanu technicznego obiektu, jako rezultat większych wymagań użytkowych w odniesieniu do obiektu.

Kondycja obiektów mostowych zależy od ich ewentualnych uszkodzeń. W tabeli 6.2 przedstawiono relacje pomiędzy podstawowymi typami uszkodzeń a poszczególnymi czynnikami tworzącymi wynikowy obraz kondycji obiektu. W ocenie stanu technicznego są z definicji uwzględniane wszystkie uszkodzenia, natomiast czynniki decydujące o poziomie przydatności użytkowej, zależą tylko od niektórych typów uszkodzeń. Nośność konstrukcji nie zależy na przykład od uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych czy też od zanieczyszczeń, a wpływ na ograniczenia skrajni ruchu mają najczęściej deformacje lub zmiany położenia elementów obiektu. Ewentualne ograniczenia prędkości ruchu mogą wynikać w sposób bezpośredni z deformacji lub zmiany położenia elementów powodujących na przykład nierówności nawierzchni lub mogą być pośrednim skutkiem obniżenia nośności w wyniku destrukcji, utraty ciągłości czy też ubytków materiału, co w efekcie wymaga zredukowania dopuszczalnych prędkości ruchu.

Tab. 6.2. Wpływ podstawowych typów uszkodzeń na kondycję obiektów mostowych

Lp.	Typ uszkodzeń	Stan techniczny	Przydatność użytkowa		
			nośność	skrajnia ruchu	prędkość ruchu
1.	Deformacje	✓	✓	✓	✓
2.	Destrukcja materiału	✓	✓		✓
3.	Ubytki materiału	✓	✓		✓
4.	Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych	✓			
5.	Utrata ciągłości materiału	✓	✓		✓
6.	Zanieczyszczenia	✓			
7.	Zmiany położenia	✓	✓	✓	✓



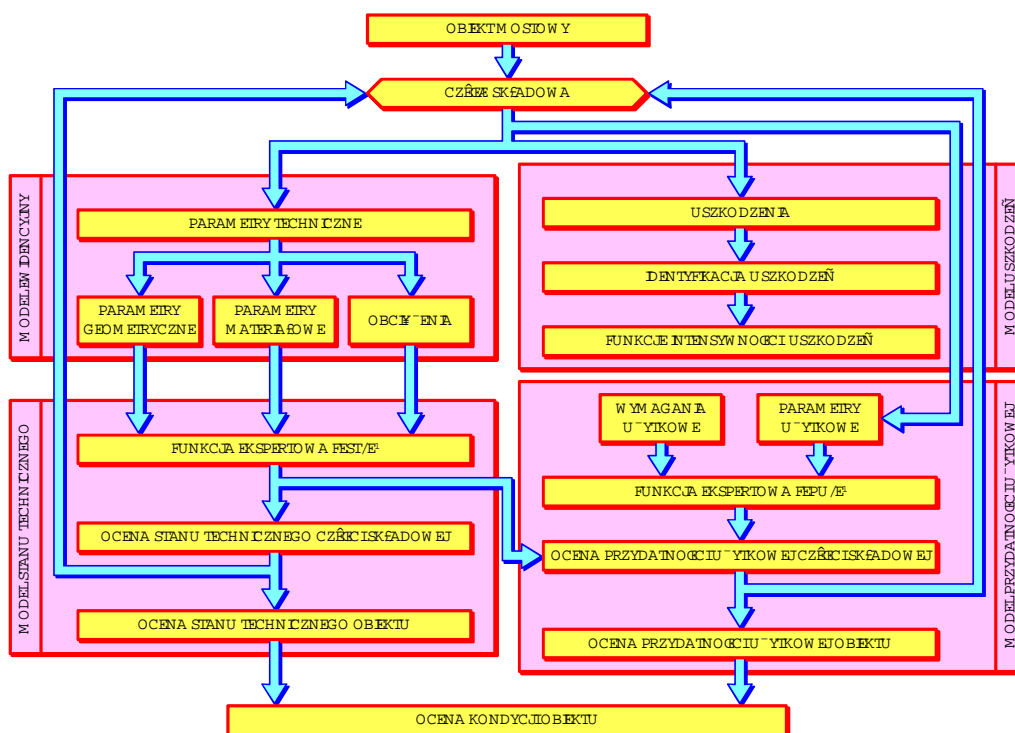
Rys. 6.2. Schemat procesu oceny kondycji obiektów mostowych przy zastosowaniu modeli geometrii typu E^0

Procedura oceny kondycji obiektów mostowych w decydującym stopniu zależy od sposobu reprezentacji geometrii obiektu i wynikającej z niego metodyki modelowania uszkodzeń. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono kompleksową koncepcję metodyki oceny kondycji obiektów mostowych reprezentowanych w sensie geometrycznym przy użyciu modeli typu E^0 oraz E^1 . Do wspomagania procesów oceny stanu technicznego oraz przydatności użytkowej zaproponowano zastosowanie opracowanych przez autora *funkcji ekspertowych* wykorzystujących technologię sieci hybrydowych, zgodnie z rozwiązaniami przedstawionymi m.in. w pracach [26], [28], [29].

Ogólny schemat funkcjonalny proponowanego procesu oceny kondycji obiektów mostowych, reprezentowanych geometrycznie przy użyciu modeli typu E^0 , przedstawiono na rys. 6.2. Ocenie stanu technicznego podlegają podstawowe części składowe obiektu i jest ona dokonywana przy użyciu *Funkcji Ekspertowej Stanu Technicznego* ($FEST/E^0$). Funkcja ekspertowa wspomaga proces oceny przy wykorzystaniu wybranych parametrów technicznych zawartych w *ewidencyjnym modelu obiektu* oraz na podstawie numerycznego *modelu uszkodzeń* ocenianej części

składowej. Podobnie *Funkcja Ekspertowa Przydatności Użytkowej* (FEPU/E⁰) wspomaga ocenę przydatności użytkowej poszczególnych części składowych obiektu, przy czym bierze się pod uwagę aktualne wartości parametrów użytkowych oraz wartości wymagane przez użytkowników. Oceny części składowych stanowią podstawę do sformułowania ocen stanu technicznego oraz przydatności użytkowej całego obiektu, a następnie globalnej oceny kondycji obiektu.

Schemat procesu oceny kondycji obiektów o modelach geometrii tworzonych z elementów e¹ (modele typu E¹) przedstawia rys. 6.3. Ogólna procedura oceny kondycji obiektu jest podobna do pokazanej na rys. 6.2, z tym że w *Funkcji Ekspertowej Stanu Technicznego* (FEST/E¹) jest wykorzystywany bardziej szczegółowy opis parametrów technicznych elementów obiektu. Parametry te są zdefiniowane jako funkcje długości poszczególnych elementów, podobnie jak uszkodzenia opisane przy użyciu funkcji intensywności uszkodzeń, zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdziale 3.



Rys. 6.3. Schemat procesu oceny kondycji obiektów mostowych przy zastosowaniu modeli geometrii typu E¹

We wszystkich narzędziach ekspertowych prezentowanych w niniejszej monografii zastosowano, przedstawioną w rozdziale 4., technologię wielopoziomowych sieci

hybrydowych łączących różne techniki reprezentacji wiedzy. Główne cechy proponowanych rozwiązań to:

- *obiektywizacja* ocen stanu obiektów dzięki zastosowaniu jednolitego systemu klasyfikacji oraz ilościowego opisu uszkodzeń wykorzystywanego jako podstawa oceny, a także dzięki użyciu narzędzi ekspertowych do generowania ocen kondycji obiektów;
- wykorzystywanie w narzędziach ekspertowych *wiedzy* kumulowanej w systemie komputerowym, z możliwością uwzględniania informacji o różnym stopniu precyzji i pewności;
- możliwość systematycznej *aktualizacji i uzupełniania wiedzy* zaimplementowanej w narzędziach ekspertowych, z uwzględnieniem nowych zasobów informacji gromadzonych w systemie;
- użycie *ciągłych znormalizowanych skal ocen* umożliwiających precyzyjniejszą ocenę kondycji obiektów niż stosowane powszechnie skale typu dyskretnego.

Wszystkie prezentowane w niniejszej pracy narzędzia ekspertowe mają za zadanie *wspomaganie* inspektorów mostowych oraz innych osób oceniających kondycję obiektów, a nadrzędnym celem jest *ujednocenie* kryteriów i zasad dokonywania ocen. Przedstawione rozwiązania umożliwiają zobiektywizowaną ocenę kondycji wszystkich obiektów mostowych objętych systemem, a w szczególności:

- wyodrębnienie obiektów zagrożonych awarią z uwagi na stan techniczny i objęcie tych obiektów indywidualnym nadzorem;
- obiektywną klasyfikację obiektów z uwagi na ich stan techniczny i przydatność użytkową, co jest warunkiem racjonalnego planowania działań utrzymaniowych i związanej z tym dystrybucji środków finansowych;
- zastosowanie jednolitej metodologii monitorowania zmian kondycji obiektów z możliwością wykorzystania gromadzonych informacji do prognozowania przebiegu procesów degradacji.

Proponowane w tej monografii kompleksowe wspomaganie procesu oceny kondycji obiektów mostowych przy wykorzystaniu narzędzi ekspertowych nie zostało dotąd, zgodnie z wiedzą posiadaną przez autora, zastosowane w żadnym z eksploatowanych systemów gospodarowania infrastrukturą mostową. Prezentowane w literaturze narzędzia ekspertowe dotyczą z reguły zagadnień związanych z oceną stanu wybranych typów rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych lub oceną wpływu określonego typu uszkodzeń, np. [7], [11], [65], [103], [111], [124], [154], [155], [176], [227], [228], [243].

6.2. Ocena stanu technicznego obiektów mostowych przy wykorzystaniu narzędzi ekspertowych

6.2.1. Modele geometrii typu E^0

6.2.1.1. Zasady oceny stanu technicznego

Proces projektowania, realizacji i wdrażania każdego narzędzia ekspertowego ma charakter indywidualny, wynikający ze specyficznych warunków obszaru zastosowań. Sposób tworzenia funkcji ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego obiektów mostowych, reprezentowanych w sensie geometrycznym przy użyciu modeli typu E^0 , przedstawiono poniżej na przykładzie opracowanej przez autora Funkcji Ekspertowej Stanu Technicznego [24], [26], [27], [28], [29].

W prezentowanym rozwiązaniu ocenie stanu technicznego podlegają kolejno poszczególne części składowe obiektu. Na podstawie wyników przeglądu obiektu dla ocenianej części należy podać charakterystyki każdego stwierdzonego uszkodzenia, obejmujące:

- rodzaj uszkodzenia,
- intensywność uszkodzenia I ,
- rozległość uszkodzenia R .

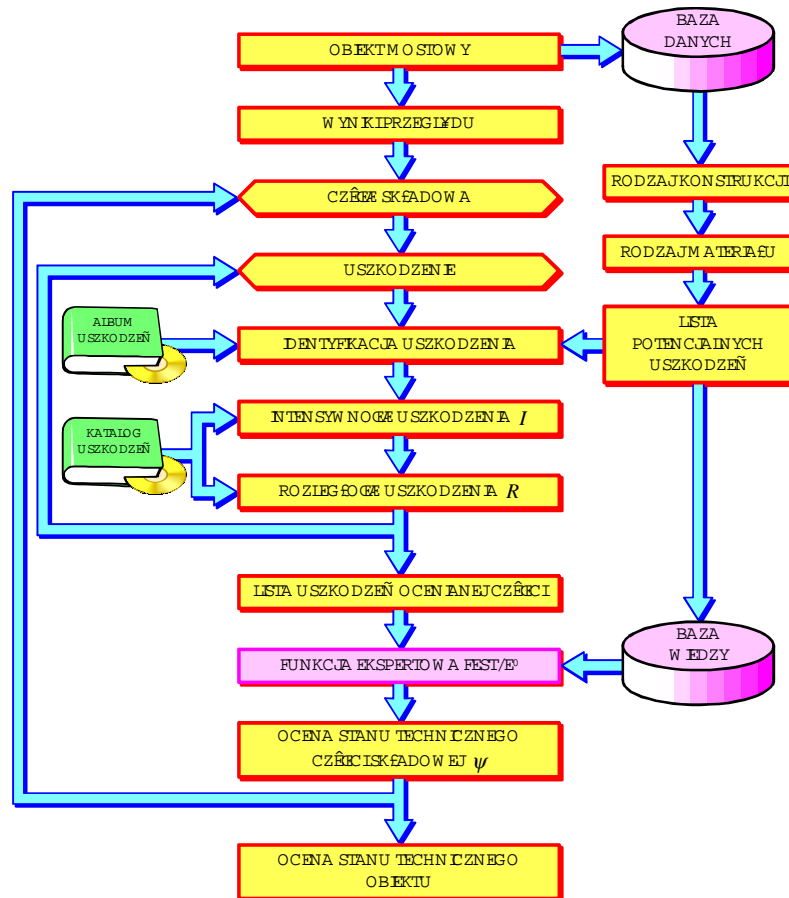
Parametry te powinny być zdefiniowane zgodnie z przyjętą klasyfikacją uszkodzeń i szczegółowymi zasadami numerycznego modelowania uszkodzeń, podanymi w rozdziale 3. Numeryczny model stwierdzonych uszkodzeń jest tworzony na podstawie listy potencjalnych uszkodzeń generowanej przez system komputerowy dla analizowanego:

- rodzaju obiektu,
- rodzaju części składowej,
- rodzaju konstrukcji ocenianej części składowej,
- rodzaju materiału ocenianej części składowej.

Lista ta jest tworzona na podstawie danych ewidencyjnych ocenianej części obiektu, zgromadzonych w bazie danych systemu. Wykorzystując numeryczny model uszkodzeń, funkcja ekspertowa generuje ocenę stanu technicznego poszczególnych części składowych obiektu. Ogólny schemat zastosowanej procedury oceny stanu technicznego przedstawia rys. 6.4.

Przy tworzeniu funkcji ekspertowej FEST/ E^0 przyjęto następujące podstawowe zasady:

- w procesie oceny stanu technicznego jest wykorzystywana głównie wiedza pozyskana od ekspertów;
- podstawą ocen stanu technicznego są wyniki przeglądów podstawowych zawierające głównie rezultaty wizualnych oględzin stanu uszkodzeń obiektów;



Rys. 6.4. Schemat funkcjonalny procesu oceny stanu technicznego obiektu mostowego przy użyciu funkcji ekspertowej FEST/E⁰

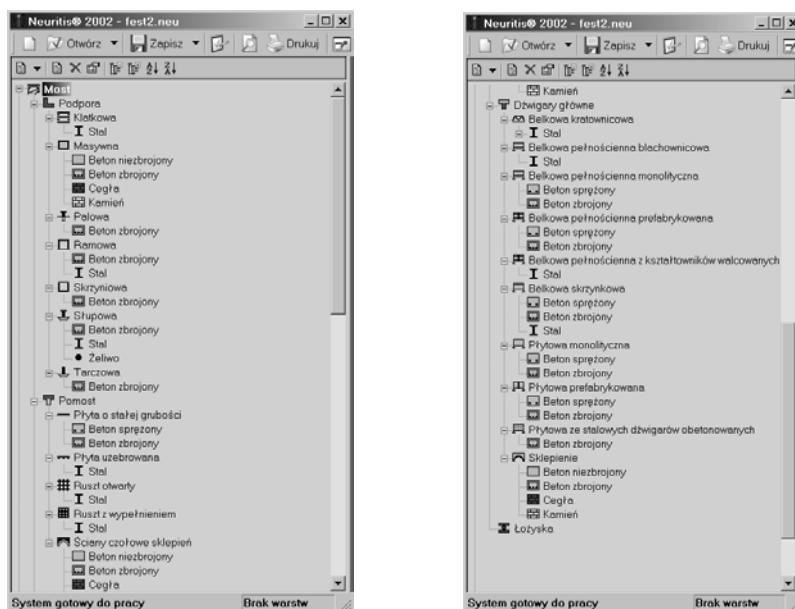
- numeryczny model uszkodzeń każdego obiektu jest definiowany zgodnie z zasadami opisanymi w rozdziale 3. dla modeli geometrii typu E⁰;
- przy ocenie wpływu poszczególnych uszkodzeń na stan techniczny obowiązuje zasada superpozycji;
- funkcja ekspertowa FEST/E⁰ wspomaga ocenę stanu technicznego następujących części składowych obiektów:
 - podpory,
 - dźwigary główne poszczególnych przęseł,
 - pomosty poszczególnych przęseł,
 - łożyska poszczególnych przęseł;
- oceny stanu technicznego są generowane przez funkcję ekspertową w znormalizowanej ciągłej skali ocen [0,1];

- baza wiedzy wykorzystywana w funkcji ekspertowej ma charakter otwarty, umożliwiając jej aktualizowanie oraz uzupełnianie w miarę gromadzenia w systemie informacji o stanie technicznym obiektów;
- funkcja ekspertowa jest zintegrowana z oprogramowaniem systemu i wykorzystuje zasoby jego bazy danych.

6.2.1.2. Architektura funkcji ekspertowej

Architekturę funkcji ekspertowej FEST/E⁰ zaprojektowano na podstawie wyników analizy danych ewidencyjnych obiektów mostowych i w rezultacie wspomaganie objęto najczęściej spotykane kombinacje rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, charakterystyczne dla poszczególnych typów obiektów i rodzajów części składowych. Obszar zastosowań funkcji przedstawiono w tab. 6.3, w której podano także oznaczenia poszczególnych sieci hybrydowych skonstruowanych na potrzeby prezentowanej funkcji ekspertowej. Hierarchiczne *Drzewo Zagadnienia* funkcji ekspertowej skonstruowano, biorąc pod uwagę następujące parametry:

- typ obiektu,
- rodzaj części konstrukcyjnej,
- rodzaj konstrukcji,
- rodzaj materiału.



Rys. 6.5. Drzewo Zagadnienia funkcji ekspertowej FEST/E⁰

Tab. 6.3. Zakres wspomagania oceny stanu technicznego mostów, wiaduktów i kładek dla pieszych przez funkcję ekspertową FEST/E⁰ oraz oznaczenia sieci hybrydowych

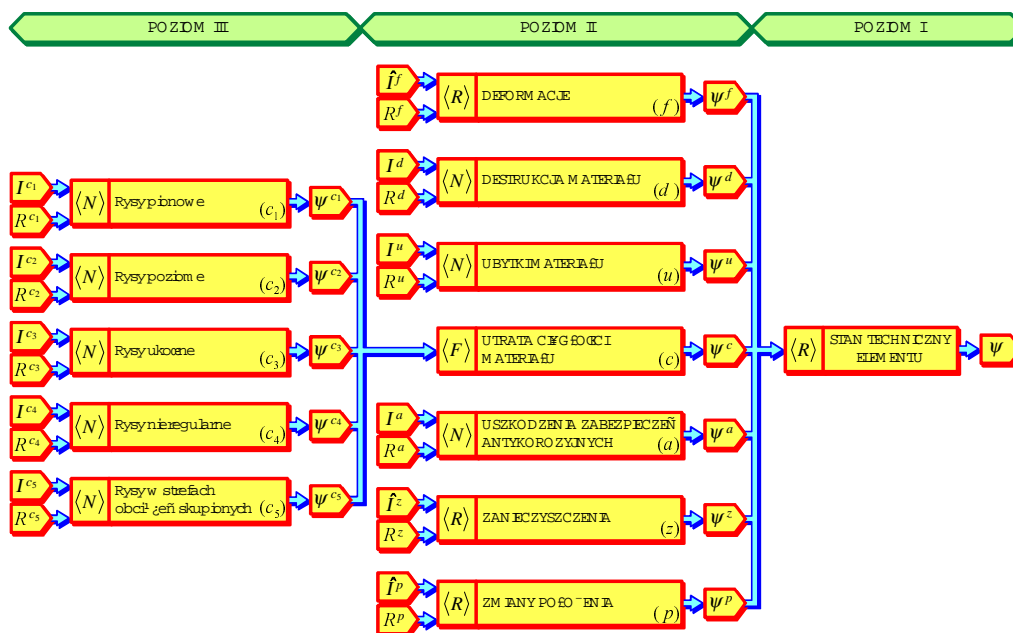
Rodzaj konstrukcji	Materiał konstrukcji						
	Beton niezbrojony (BN)	Beton sprężony (BS)	Beton zbrojony (BZ)	Cegła (C)	Kamień (K)	Stal (S)	Żelazo (Z)
PODPORY							
Masywna (M)	MBN		MBZ	MC	MK		
Pałowa (P)			PBZ				
Ramowa (R)			RBZ			RS	
Skrzyniowa (K)			KBZ				
Słupowa (S)			SBZ			SS	SZ
Tarczowa (T)			TBZ				
DŹWIGARY GŁÓWNE							
Belkowa kratownicowa (BK)						BKS	
Belkowa pełnościenna blachownicowa (BB)						BBS	
Belkowa pełnościenna monolityczna (BM)		BMBS	BMBZ				
Belkowa pełnościenna prefabrykowana (BP)		BPBS	BPBZ				
Belkowa z kształtowników walcowanych (BW)						BWS	
Belkowa skrzynkowa (BS)		BSBS	BSBZ			BSS	
Płytowa monolityczna (PM)		PMBS	PMBZ				
Płytowa prefabrykowana (PP)		PPBS	PPBZ				
Płytowa ze stalowych dźwigarów obetonowanych (PO)			POBZ				
Sklepienie (SK)	SKBN		SKBZ	SKC	SKK		
POMOST							
Płyta stałej grubości (PS)		PSBS	PSBZ				
Płyta uźebrowana (PU)						PUS	
Ruszt otwarty (RU)						RUS	
Ruszt z wypełnieniem (RW)						RWS	
Ściany czołowe sklepień (SC)	SCBN		SCBZ	SCC	SCK		
ŁOŻYSKA							
Płaskie, styczne, wałkowe (LL)						LLS	LLZ

Graficzną postać *Drzewa Zagadnienia* dla mostów przedstawiono na rys. 6.5. Każdej gałęzce znajdującej się na najniższym poziomie *Drzewa Zagadnienia* jest przyporządkowana indywidualnie skonfigurowana sieć hybrydowa generująca oceny stanu technicznego.

Łącznie w funkcji ekspertowej FEST/E⁰ zastosowano 42 sieci hybrydowe, z których każda składa się z 10 do 18 indywidualnie zdefiniowanych i skonfigurowanych komponentów. W sumie, z uwzględnieniem możliwości kilkakrotnego wykorzystania niektórych składników, na potrzeby funkcji ekspertowej opracowano ponad 300 zindywidualizowanych komponentów. Związany z tym stosunkowo duży nakład pracy jest rekompensowany tym, że zakres merytoryczny funkcji ekspertowej pozwala na wspomaganie oceny stanu technicznego ponad 95% konstrukcji obiektów mostowych istniejących w Polsce.

6.2.1.3. Architektura sieci hybrydowych

Każda z sieci hybrydowych wykorzystywanych w funkcji ekspertowej FEST/E⁰ ma indywidualnie zaprojektowaną architekturę i jest zbudowana z indywidualnie przygotowanych komponentów. Wykorzystywane tu sieci hybrydowe mają strukturę minimum 3-poziomową.



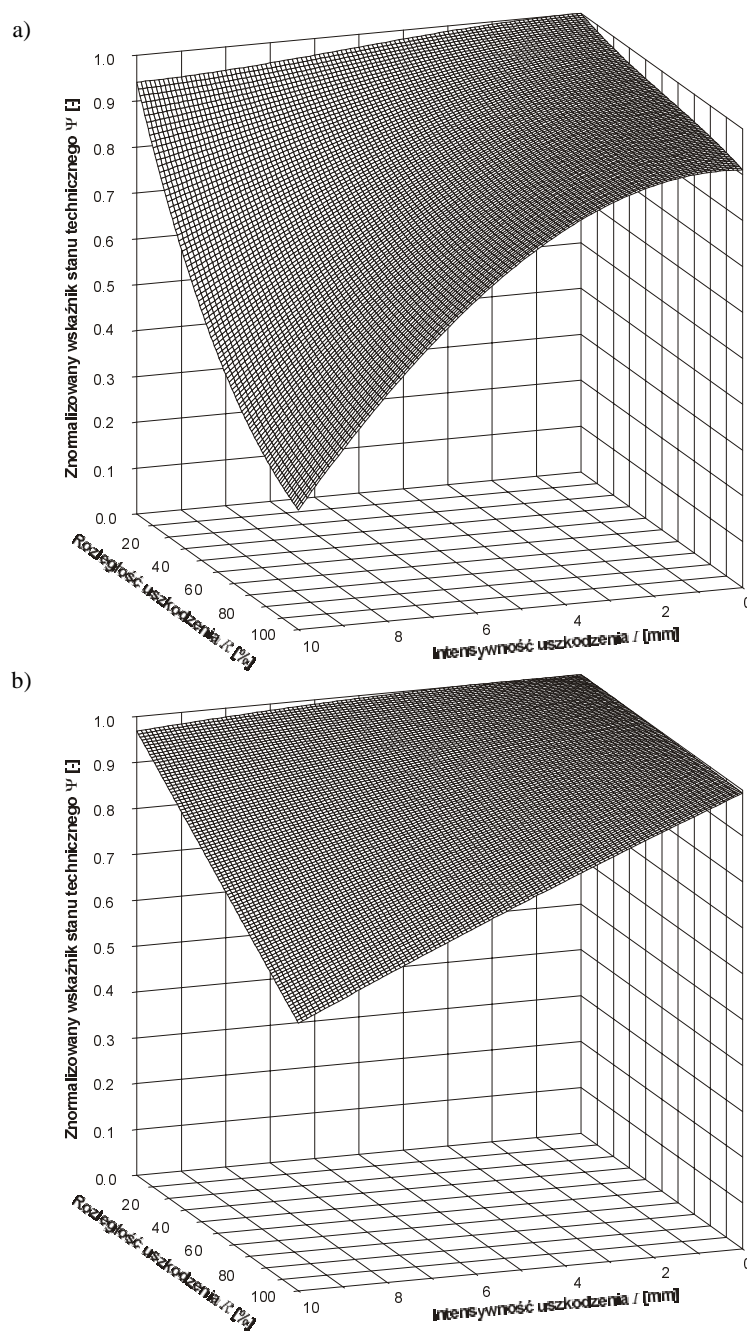
Rys. 6.6. Architektura sieci hybrydowej MBN do oceny stanu technicznego masywnych podpór z betonu niezbrojonego (funkcja ekspertowa FEST/E⁰)

Jako przykład pokazano na rys. 6.6 architekturę sieci hybrydowej MBN wykorzystywanej do oceny stanu technicznego masywnych podpór z betonu niezbrojonego. Na prezentowanym rysunku przyjęto następujące oznaczenia:

- I^k – intensywność uszkodzeń typu k wyrażona liczbą rzeczywistą;
- \hat{I}^k – intensywność uszkodzeń typu k wyrażona liczbą rozmytą;
- I^{k_i} – intensywność uszkodzeń rodzaju, kategorii lub klasy i , należących do typu k ;
- R^k – rozległość uszkodzeń typu k ;
- R^{k_i} – rozległość uszkodzeń rodzaju, kategorii lub klasy i , należących do typu k ;
- ψ^k – znormalizowany wskaźnik stanu technicznego z uwagi na uszkodzenia typu k ;
- ψ^{k_i} – znormalizowany wskaźnik stanu technicznego z uwagi na uszkodzenia rodzaju, kategorii lub klasy i , należące do typu k ;
- ψ – znormalizowany wskaźnik stanu technicznego ocenianej części składowej lub elementu obiektu mostowego;
- $\langle F \rangle$ – funkcyjny komponent sieci hybrydowej;
- $\langle N \rangle$ – neuronowy komponent sieci hybrydowej;
- $\langle R \rangle$ – rozmyty komponent sieci hybrydowej.

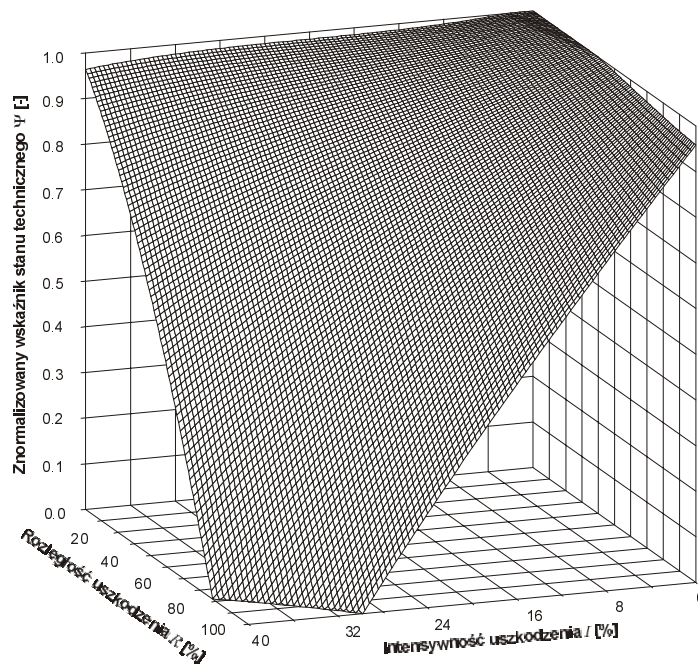
W rozpatrywanym przykładzie III poziom sieci hybrydowej zawiera pięć komponentów neuronowych $\langle N \rangle$, z których każdy generuje wskaźnik stanu technicznego ψ^{c_i} wynikający z uszkodzeń rodzaju c_i należących do typu *utrata ciągłości materiału* (c). Poszczególne wskaźniki ψ^{c_i} są określane na podstawie informacji o parametrach każdego stwierdzonego uszkodzenia należącego do rodzaju c_i , a mianowicie: intensywności uszkodzenia I^{c_i} oraz rozległości uszkodzenia R^{c_i} , określonych zgodnie z zasadami podanymi w rozdziale 3.

Przykładowe powierzchnie modelowania stanu technicznego uzyskane w wyniku treningu sieci neuronowych w komponentach (c_1) oraz (c_2) zaprezentowano na rys. 6.7. Powierzchnie te przedstawiają wartości wyjściowe komponentów neuronowych dla różnych kombinacji wartości wejściowych. W obu prezentowanych komponentach zastosowano trójwarstwowe sieci neuronowe typu N^{2-4-1} trenowane przy wykorzystaniu 80 wzorców uczących. Błędy uczenia i treningu wyniosły od 3% do 5%.



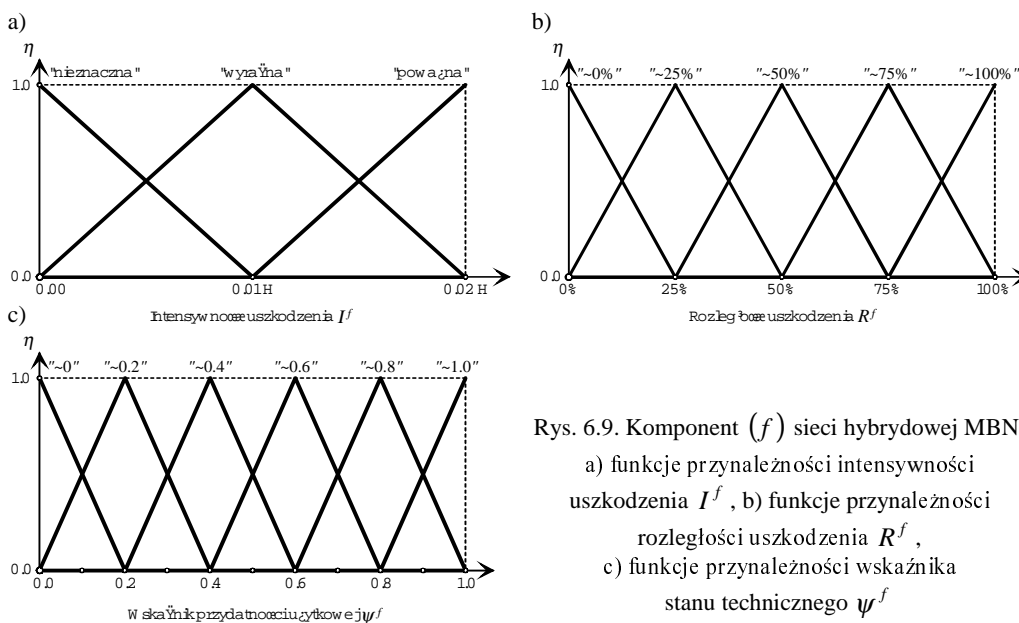
Rys. 6.7. Powierzchnie modelowania stanu technicznego w wybranych komponentach sieci hybrydowej MBN (funkcja ekspertowa FEST/E⁰): a) komponent (c_1) – rysy pionowe, b) komponent (c_2) – rysy poziome

Poziom II sieci hybrydowej MBN jest złożony z siedmiu komponentów odpowiadających podstawowym typom uszkodzeń wyróżnionych w przyjętej systematyce (patrz rozdział 3.). Komponenty na tym poziomie generują wskaźniki stanu technicznego ψ^j wynikające z uwzględnienia uszkodzeń należących do poszczególnych typów j . Wskaźnik stanu technicznego ψ^c , z uwagi na uszkodzenia typu *utrata ciągłości materiału*, jest tworzony na podstawie wskaźników ψ^{c_i} przesyłanych z III poziomu sieci, natomiast wskaźniki odpowiadające pozostałym typom uszkodzeń są generowane na podstawie parametrów uszkodzeń wprowadzanych jako dane wejściowe na poziomie II. Dla niektórych typów uszkodzeń parametry uszkodzeń mogą być określone w formie liczbowej, a dane wejściowe są liczbami rzeczywistymi I^j oraz R^j . Do wspomaganie oceny wpływu uszkodzeń o parametrach liczbowych na stan techniczny zastosowano komponenty neuronowe $\langle N \rangle$ oraz funkcyjne $\langle F \rangle$. Przykładową powierzchnię modelowania uzyskaną w komponentcie (u), uwzględniającym ubytki materiału, zaprezentowano na rys. 6.8.



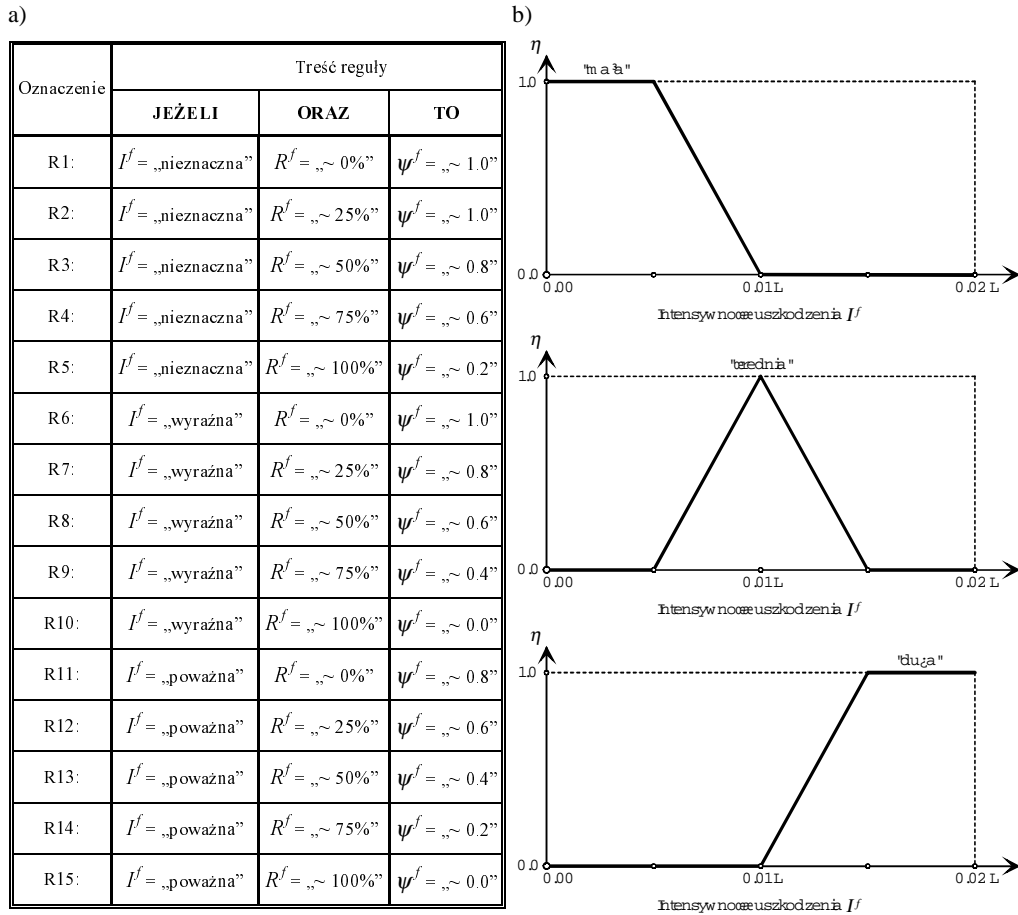
Rys. 6.8. Powierzchnia modelowania stanu technicznego w komponentcie (u) sieci hybrydowej MBN (funkcja ekspertowa FEST/E⁰)

W odniesieniu do pozostałych typów uszkodzeń, dla których liczbowe miary intensywności nie zostały zdefiniowane (np. zanieczyszczenia), a także w przypadku uszkodzeń, których intensywność nie może być precyzyjnie określona na podstawie oceny wizualnej (np. deformacje, zmiany położenia), zastosowano liczby rozmyte \hat{I}^j jako miary intensywności uszkodzeń. Wybór liczby rozmytej definiującej intensywność uszkodzeń następuje na podstawie jej etykiety lingwistycznej: *mała*, *średnia* lub *duża*. Użycie liczb rozmytych do opisu parametrów uszkodzeń wymaga stosowania komponentów rozmytych $\langle R \rangle$ jako narzędzi przetwarzania takich danych. Sposób zdefiniowania komponentu rozmytego dla uszkodzeń typu *deformacje* (komponent (f) na rys. 6.6) przedstawiono na rys. 6.9 oraz na rys. 6.10. Funkcje przynależności przesłanek: intensywności uszkodzenia I^f oraz rozległości uszkodzenia R^f , a także funkcje przynależności konkluzji ψ^f prezentuje rys. 6.9. Bazę reguł wnioskowania (rys. 6.10a) zdefiniowano na podstawie wiedzy pozyskanej od ekspertów. Liczby rozmyte wykorzystywane do opisu intensywności uszkodzeń określono na podstawie analizy intuicyjnej interpretacji użytych pojęć (*intensywność mała*, *średnia*, *duża*) przez inspektorów mostowych. Funkcje przynależności tych liczb przedstawiono na rys. 6.10b. Proces wnioskowania w prezentowanym komponencie jest realizowany metodą *MAX-MIN*, a w procesie defuzyfikacji zastosowano rozszerzoną metodę środka ciężkości. Zasady przybliżonego wnioskowania przy danych wejściowych w postaci liczb rozmytych przedstawiono szczegółowo w rozdziale 4.



Rys. 6.9. Komponent (f) sieci hybrydowej MBN:

- a) funkcje przynależności intensywności uszkodzenia I^f ,
- b) funkcje przynależności rozległości uszkodzenia R^f ,
- c) funkcje przynależności wskaźnika stanu technicznego ψ^f



Rys. 6.10. Komponent (f) sieci hybrydowej MBN: a) baza reguł wnioskowania, b) liczby rozmyte opisujące intensywność uszkodzenia: *mała*, *średnia* oraz *duża*

Najwyższy I poziom sieci hybrydowej MBN zawiera jeden komponent, który na podstawie znormalizowanych wskaźników stanu technicznego ψ^j , odpowiadających podstawowym typom uszkodzeń, określa sumaryczną ocenę stanu technicznego uwzględniającą wszystkie stwierdzone uszkodzenia. Zbiór wskaźników stanu technicznego ψ^j jest traktowany jako zbiór rozmyty S charakteryzujący stan techniczny ocenianej części składowej lub elementu obiektu. Wartości wskaźników ψ^j są jednocześnie stopniami przynależności ocenianej części składowej do zbioru opisującego idealny stan techniczny, z uwagi na uszkodzenia typu j .

Zbiór rozmyty S można zapisać w postaci:

$$S = \frac{\mu_s(f)}{f} + \frac{\mu_s(d)}{d} + \frac{\mu_s(u)}{u} + \frac{\mu_s(c)}{c} + \frac{\mu_s(a)}{a} + \frac{\mu_s(z)}{z} + \frac{\mu_s(p)}{p} =$$

$$= \frac{\psi^f}{f} + \frac{\psi^d}{d} + \frac{\psi^u}{u} + \frac{\psi^c}{c} + \frac{\psi^a}{a} + \frac{\psi^z}{z} + \frac{\psi^p}{p}$$
(6.1)

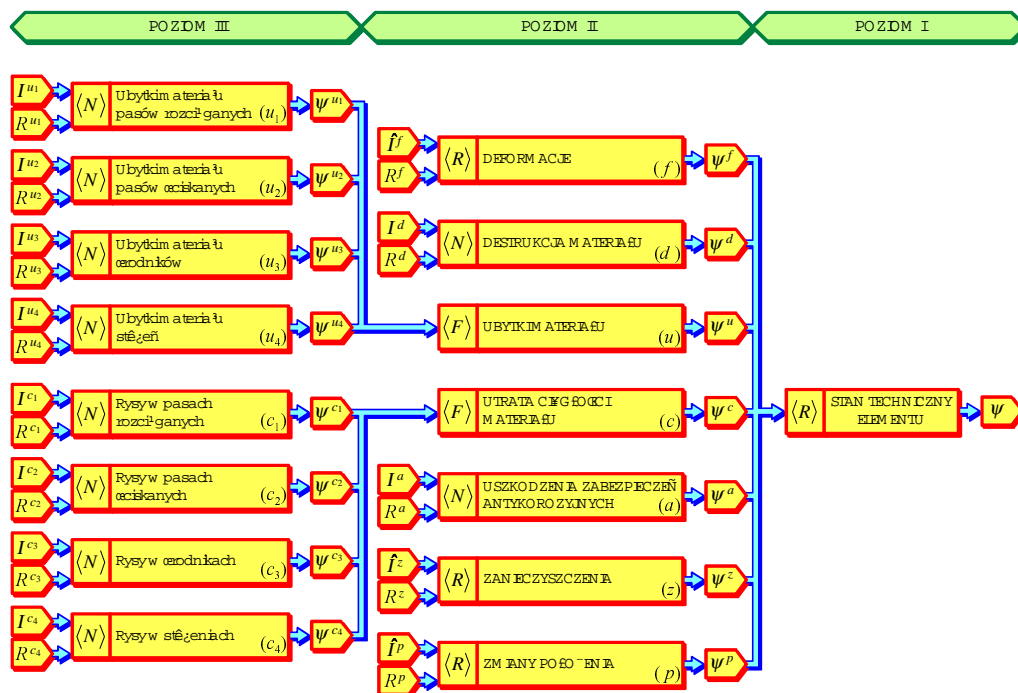
Ostatecznie wskaźnik stanu technicznego ocenianego elementu można wyznaczyć jako:

$$\psi = \begin{cases} 1 - \|\bar{S}\| & \text{dla } \|\bar{S}\| < 1 \\ 0 & \text{dla } \|\bar{S}\| \geq 1 \end{cases}$$
(6.2)

gdzie:

\bar{S} – zbiór rozmyty będący dopełnieniem zbioru rozmytego S ,

$\|\bar{S}\|$ – moc (liczba kardynalna) zbioru rozmytego \bar{S} według wzoru (4.50).



Rys. 6.11. Architektura sieci hybrydowej BBS do oceny stanu technicznego blachownicowych dźwigarów głównych przęseł

W zależności od sposobu zdefiniowania komponentu I poziomu może on generować znormalizowany wskaźnik stanu technicznego ocenianego elementu ψ lub też może tworzyć ocenę w innej określonej wcześniej skali.

Zasady tworzenia i funkcjonowania sieci hybrydowych, przedstawione wyżej na przykładzie sieci MBN, obowiązują w odniesieniu do wszystkich składników funkcji ekspertowej FEST/E⁰. Dla porównania na rys. 6.11 przedstawiono architekturę sieci BBS przeznaczonej do oceny stanu technicznego blachownicowych dźwigarów głównych. W tym przypadku zastosowano bardziej szczegółowy opis uszkodzeń typu *ubytki materiału* oraz typu *utrata ciągłości materiału*. Efektem tego są dodatkowe komponenty usytuowane na III poziomie sieci.

6.2.1.4. Implementacja komputerowa

Funkcja Ekspertowa Stanu Technicznego FEST/E⁰ może być użytkowana w dwóch trybach:

- *kontekstowym*, gdy wywołanie oprogramowania funkcji ekspertowej następuje w odniesieniu do określonej części składowej konkretnego obiektu znajdującego się w bazie danych systemu wspomagającego eksploatację infrastruktury mostowej;
- *bezkontekstowym*, gdy wywołanie funkcji ekspertowej odbywa się bez powiązania z określonym obiektem.

Sposób wykorzystania funkcji ekspertowej FEST/E⁰ w trybie *kontekstowym* do oceny stanu technicznego podpory mostowej o konstrukcji masywnej, wykonanej z betonu niezbrojonego, pokazano na rys. 6.12. Lista potencjalnych uszkodzeń ocenianej podpory (rys. 6.12a) jest dobierana automatycznie na podstawie następujących danych ewidencyjnych, znajdujących się w bazie danych systemu:

- rodzaj obiektu,
- rodzaj ocenianej części składowej,
- rodzaj konstrukcji ocenianej części składowej,
- rodzaj materiału ocenianej części składowej.

Równocześnie na podstawie tych samych danych identyfikowana jest sieć hybrydowa dedykowana rozpatrywanej kombinacji danych ewidencyjnych. W prezentowanym przykładzie jest to sieć MBN, której architekturę pokazano na rys. 6.6.

Po wprowadzeniu parametrów wszystkich uszkodzeń stwierdzonych w trakcie przeglądu (rodzaj, intensywność i rozległość) można wykorzystać funkcję ekspertową, używając przycisku *FEST* widocznego na rys. 6.12b po prawej stronie ekranu, nad listą uszkodzeń ocenianej części składowej obiektu. Powoduje to kontekstowe wywołanie odpowiedniej procedury funkcji (odpowiedniej sieci hybrydowej) i wygenerowanie proponowanej oceny stanu technicznego, która jest wyświetlana w polu *Ocena*. Oceną stanu technicznego jest tu wartość znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego, transformowana do przyjętej w prezentowanym

systemie skali ocen od 0,00 (bezpośrednie zagrożenie awarią) do 5,00 (stan techniczny zgodny z zaprojektowanym).

Przedstawiona procedura jest stosowana w odniesieniu do wszystkich ocenianych części składowych obiektu. Przykład oceny stanu technicznego blachownicowych dźwigarów głównych przęsa mostowego przy wykorzystaniu sieci hybrydowej BBS (rys. 6.11) prezentuje rys. 6.13.

a)

Rodzaj uszkodzenia	Intensywność			Rozległość			Materiał
	Min	Max	Jedn.	Min	Max	Jedn.	
Deformacje	brak	duża		0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Destrukcyjna materiału	0.00	40.00	%	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Prysy o układzie nieregularnym	0.00	20.00	mm	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Prysy pionowe	0.00	20.00	mm	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Prysy poziome	0.00	20.00	mm	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Prysy ukosne	0.00	20.00	mm	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Prysy w strefach obciążeń skupionych	0.00	20.00	mm	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Ubytki materiału	0.00	40.00	%	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych	0.00	100.00	%	0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Zanieczyszczenia	brak	duża		0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony
Zmiany położenia	brak	duża		0.00	100.00	%	<input type="checkbox"/> beton niezbrojony

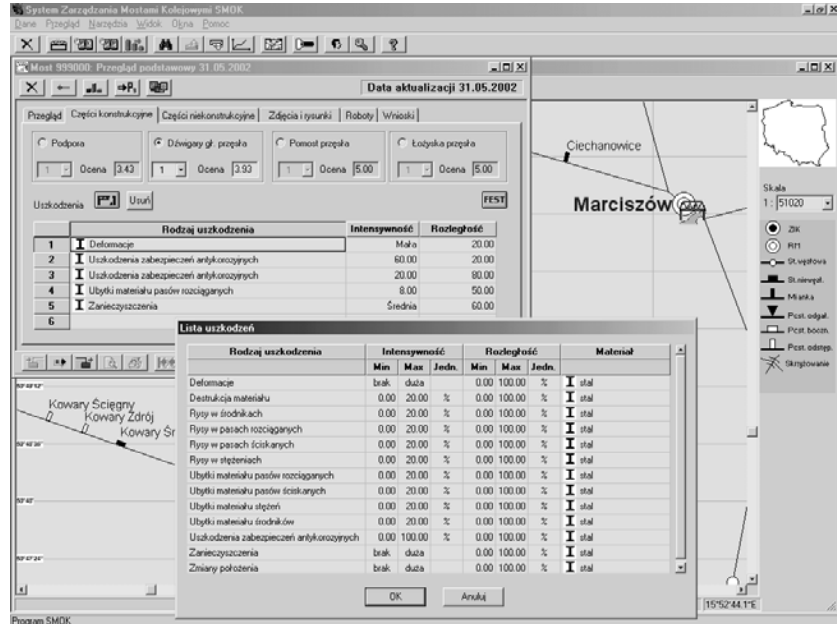
b)

The screenshot shows the 'System Zarecordzenia Mostami Kolejowymi SMOK' interface. The main window displays 'Most 999000: Przegląd podstawowy 31.05.2002' with a 'Data aktualizacji 31.05.2002'. The 'Przegląd' tab is active, showing a table of damage types and their technical condition ratings.

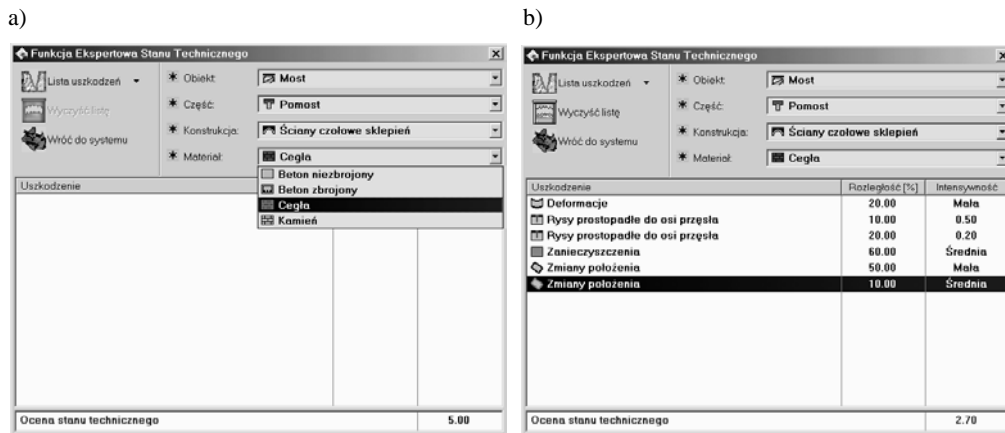
Uzkodzenia	Rodzaj uszkodzenia	Intensywność	Rozległość
1	Prysy pionowe	2.00	20.00
2	Ubytki materiału	5.00	30.00
3	Zanieczyszczenia	Miła	80.00
4	Destrukcyjna materiału	10.00	60.00
5			

The interface also includes a map showing the bridge structure with labels for 'Ciechanowice', 'Marciszów', 'Kowary Sr.', 'Kowary Górne', 'Ogorzelec', and 'Leszczyniec'. The map scale is 1:51020 and the line length is 274 km at 105,000 km.

Rys. 6.12. Ocena stanu technicznego podpory nr 1 (rodzaj konstrukcji: masywna, rodzaj materiału: beton niezbrojony) przy użyciu funkcji ekspertowej FEST/E⁰ w trybie kontekstowym:
a) lista potencjalnych uszkodzeń, b) parametry stwierdzonych uszkodzeń i ocena stanu technicznego



Rys. 6.13. Ocena stanu technicznego dźwigarów głównych przęsla nr 2 (rodzaj konstrukcji: blachownicowa, rodzaj materiału: stal) przy użyciu funkcji FEST/E⁰ w trybie kontekstowym



Rys. 6.14. Ocena stanu technicznego pomostu przęsła sklepięnego (rodzaj konstrukcji: ściany czołowe, rodzaj materiału: cegła) przy użyciu funkcji ekspertowej FEST/E⁰ w trybie bezkontekstowym: a) definiowanie parametrów części składowej, b) opis uszkodzeń i ocena stanu technicznego

Funkcja ekspertowa FEST/E⁰ może być też wykorzystywana w trybie *bezkontekstowym* jako samodzielna aplikacja. Używanie jej w takiej formie wymaga każdorazowo indywidualnego zdefiniowania przez użytkownika podstawowych danych identyfikujących przedmiot oceny (rodzaj obiektu i oceniana część składowa,

rodzaj konstrukcji i materiału). Dalsza procedura postępowania jest analogiczna jak w przypadku trybu kontekstowego: na podstawie jakościowych (rodzaj uszkodzenia) oraz ilościowych (intensywność, rozległość) charakterystyk stwierdzonych uszkodzeń funkcja ekspertowa generuje proponowaną ocenę stanu technicznego. Na rysunku 6.14 przedstawiono przykład oceny stanu technicznego ścian czołowych przęsła sklepionego przy wykorzystaniu funkcji ekspertowej w trybie bezkontekstowym.

Prezentowana funkcja ekspertowa FEST/E⁰ została z powodzeniem przetestowana jako narzędzie ekspertowe Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK oraz Systemu Zarządzania Obiektami Komunikacyjnymi SZOK. W aplikacjach tych ocena stanu technicznego proponowana przez funkcję ekspertową ma charakter wspomagający i może być zaakceptowana lub zmieniona przez uprawnionego użytkownika systemu. Szczegółowy opis funkcji ekspertowej FEST/E⁰ oraz metodyki jej wykorzystywania do oceny stanu technicznego obiektów mostowych zawierają prace [23], [24], [26], [27], [28], [29], [35], [52].

6.2.2. Modele geometrii typu E¹

6.2.2.1. Zasady oceny stanu technicznego

Do oceny stanu technicznego obiektów reprezentowanych przy użyciu modeli geometrii typu E¹ zastosowano, podobnie jak w przypadku modeli typu E⁰, znormalizowany wskaźnik stanu technicznego ψ . Wykorzystanie modeli geometrii typu E¹ do opisu cech obiektów mostowych umożliwia znacznie precyzyjniejszą ocenę ich kondycji niż w przypadku modeli typu E⁰. Zaproponowane w rozdziale 2. metody zapisu parametrów technicznych obiektu mostowego oraz przedstawione w rozdziale 3. zasady numerycznego opisu uszkodzeń pozwalają w takiej sytuacji na stworzenie uściślonego modelu eksploatowanego obiektu, z uwzględnieniem lokalizacji i rozkładu intensywności występujących uszkodzeń.

W procesie oceny stanu technicznego obiektów reprezentowanych przy użyciu modeli geometrii typu E¹ zastosowano w niniejszej pracy *funkcje wrażliwości na uszkodzenia* $\omega(\xi)$, których koncepcję przedstawiono w rozdziale 5. W proponowanym rozwiązaniu przyjęto dwa podstawowe *parametry stanu technicznego* wyznaczane na podstawie funkcji wrażliwości, a mianowicie:

- *stopień uszkodzenia* ρ – charakteryzujący maksymalny poziom wpływu rozpatrywanego uszkodzenia (uszkodzeń) na analizowaną cechę ocenianej części składowej obiektu:

$$\rho = \text{MAX}[\omega(\xi)] \quad (6.3)$$

gdzie operacja określona powyższym wzorem dotyczy tylko tych przedziałów wartości znormalizowanej współrzędnej $\xi = x/L$, dla których funkcja intensywności uszkodzeń jest różna od zera ($I(\xi) \neq 0$);

- *zakres uszkodzenia* χ – charakteryzujący rozmiar wpływu rozpatrywanego uszkodzenia (uszkodzeń) na analizowaną cechę ocenianej części składowej obiektu; dla modeli geometrii klasy (e^1, p^1) wskaźnik zakresu uszkodzenia można wyznaczyć z zależności:

$$\chi = \int_0^1 [\omega(\xi) - \omega^0(\xi)] d\xi \quad (6.4)$$

gdzie:

$\omega(\xi)$ – funkcja wrażliwości ocenianego elementu z uwagi na rozpatrywaną cechę, wyznaczona dla uszkodzeń o znanych parametrach i wyrażona jako funkcja znormalizowanej współrzędnej $\xi = x/L$,

$\omega^0(\xi)$ – funkcja wykorzystania rozpatrywanej cechy ocenianego elementu w konstrukcji bez uszkodzeń, wyrażona jako funkcja znormalizowanej współrzędnej $\xi = x/L$,

L – długość ocenianego elementu.

Zasady wyznaczania parametrów ρ oraz χ zilustrowano na rys. 6.15, na przykładzie funkcji wrażliwości $\omega_{u_2}^{\sigma, \tau}(\xi)$ zginanego dźwigara, analizowanego wcześniej w rozdziale 5. (patrz rys. 5.26). W prezentowanym przykładzie rozpatrywano wpływ uszkodzeń typu *ubytki materiału* na poziom wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ oraz naprężenia styczne τ . Zgodnie ze wzorem (6.3) stopień uszkodzenia ρ rozpatrywanego elementu wynosi (rys. 6.15):

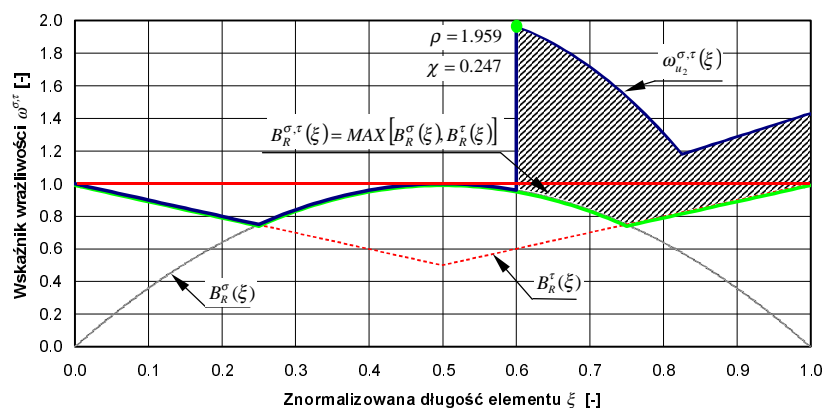
$$\rho^{u_2} = \text{MAX}[\omega_{u_2}^{\sigma, \tau}(\xi)] = 1,959$$

Zakres uszkodzenia χ w rozpatrywanym przykładzie może być zgodnie ze wzorem (6.4) wyznaczony jako:

$$\chi^{u_2} = \int_0^1 [\omega_{u_2}^{\sigma, \tau}(\xi) - B_R^{\sigma, \tau}(\xi)] d\xi = 0,247$$

Funkcja $\omega^0(\xi)$ jest w tym przypadku identyczna z obwiednią $B_R^{\sigma, \tau}(\xi)$ wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia σ oraz τ . Wartość parametru χ jest równa polu powierzchni obszaru przekroczenia poziomu wykorzystania analizowanych cech elementu (wytrzymałość z uwagi na naprężenia normalne σ oraz styczne τ) w rezultacie rozpatrywanych uszkodzeń, w porównaniu do poziomu wykorzystania tych cech w elemencie nieuszkodzonym. Przedmiotowy obszar, stanowiący podstawę wyznaczenia wartości wskaźnika χ , zaznaczono na rys. 6.15. Wartości *stopnia uszkodzenia* ρ oraz *zakresu uszkodzenia* χ są podstawą do

określenia wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego ψ stanowiącego ocenę stanu technicznego.



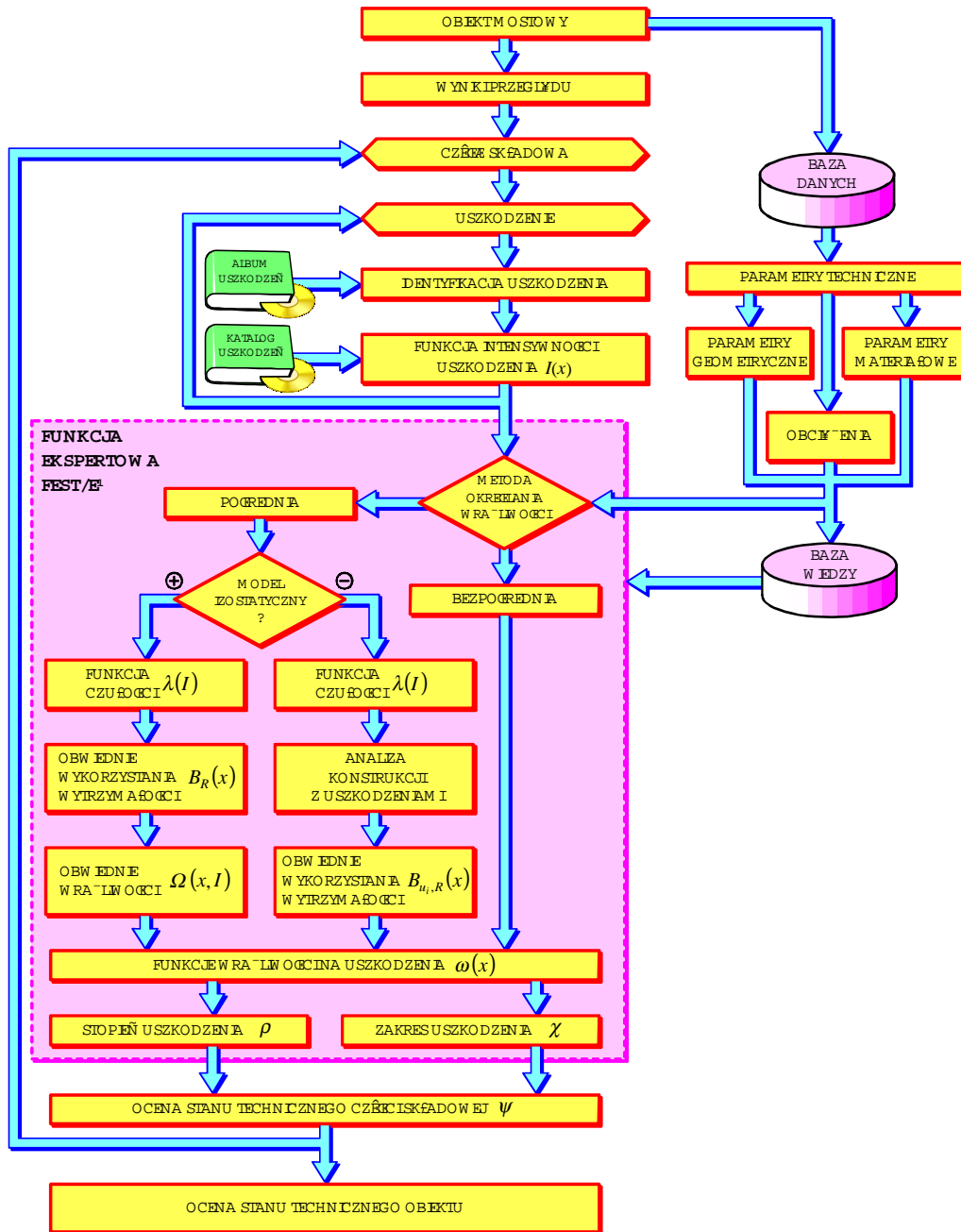
Rys. 6.15. Przykład sposobu określania stopnia uszkodzenia ρ oraz zakresu uszkodzenia χ w dźwigarze zginanym (patrz rys. 5.26)

Przedstawioną wyżej koncepcję wykorzystywania funkcji wrażliwości w procesie oceny stanu technicznego można uogólnić na wszystkie typy uszkodzeń. Szczegółowe procedury wyznaczania parametrów ρ oraz χ zależą od:

- typu rozpatrywanych uszkodzeń,
- rodzaju ocenianej części składowej obiektu,
- rodzaju konstrukcji ocenianej części,
- rodzaju materiału konstrukcyjnego.

Jako przykład narzędzia ekspertowego wykorzystującego tę technologię do wspomaganiania procesów oceny stanu technicznego obiektów mostowych przedstawiono w kolejnych podrozdziałach opracowaną przez autora funkcję ekspertową FEST/E¹. Przy tworzeniu tej aplikacji przyjęto następujące podstawowe zasady:

- wiedza wykorzystywana w funkcji ekspertowej jest pozyskiwana z bazy danych systemu, od ekspertów, a także jest uzyskiwana z wyników analiz statyczno-wytrzymałościowych;
- uszkodzenia stanowiące podstawę oceny stanu technicznego są modelowane przy wykorzystaniu funkcji intensywności uszkodzeń, zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdziale 3.;
- oceną stanu technicznego jest wartość znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego ψ ; oceny stanu technicznego mogą przyjmować dowolne wartości z przedziału $[0, 1]$;



Rys. 6.16. Schemat funkcjonalny procesu oceny stanu technicznego obiektu mostowego przy wykorzystaniu funkcji ekspertowej FEST/E¹

- funkcja ekspertowa FEST/E¹ jest tworzona w technologii sieci hybrydowych przy wykorzystaniu *Kreatora Funkcji Ekspertowych* NEURITIS (patrz rozdział 4.);
- baza wiedzy wykorzystywana w funkcji ekspertowej ma charakter otwarty, umożliwiając jej aktualizowanie oraz uzupełnianie w miarę gromadzenia w systemie informacji o stanie technicznym obiektów;
- funkcja ekspertowa jest zintegrowana z oprogramowaniem systemu wspomagającego eksploatację obiektów mostowych i wykorzystuje zasoby jego bazy danych.

Ogólny schemat zastosowanej procedury oceny stanu technicznego części składowych obiektu mostowego przedstawiono na rys. 6.16. Wybór bezpośredniej lub pośredniej metody określania funkcji wrażliwości, stanowiących podstawę wyznaczania parametrów stanu technicznego ρ oraz χ , zależy od typu rozpatrywanych uszkodzeń oraz cech przyjętego modelu geometrii. Szczegóły algorytmu zastosowanego w funkcji ekspertowej FEST/E¹ przedstawiono na przykładach w dalszej części rozdziału.

6.2.2.2. Architektura funkcji ekspertowej

Ogólna architektura funkcji ekspertowej FEST/E¹ jest analogiczna do struktury funkcji FEST/E⁰, ale *Drzewo Zagadnienia* zawiera w tym wypadku dodatkowy poziom reprezentujący ukształtowanie przekroju poprzecznego analizowanego elementu. Ostatecznie hierarchiczna budowa funkcji obejmuje następujące poziomy:

- typ obiektu,
- rodzaj części konstrukcyjnej,
- rodzaj konstrukcji,
- rodzaj materiału,
- sposób ukształtowania przekroju poprzecznego.

Na najniższym poziomie tej hierarchicznej struktury każdej gałęzi jest przypisana sieć hybrydowa wspomagająca ocenę stanu technicznego.

6.2.2.3. Architektura sieci hybrydowych

6.2.2.3.1. Ogólna koncepcja

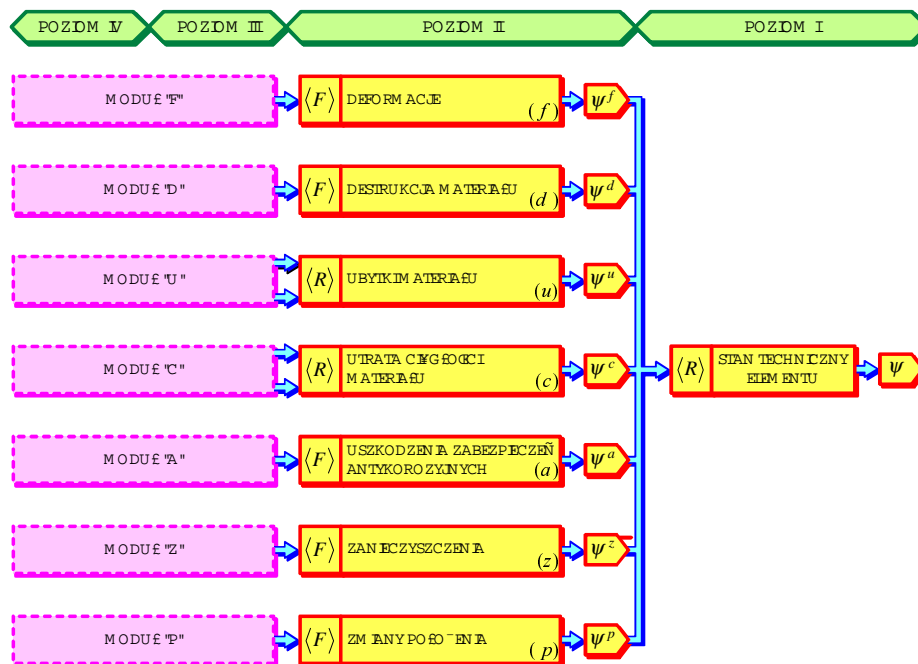
Każda z sieci hybrydowych wchodzących w skład funkcji ekspertowej ma własną specyficzną architekturę i jest zbudowana z indywidualnie definiowanych komponentów. Sieci hybrydowe wykorzystywane w funkcji ekspertowej FEST/E¹ są generalnie bardziej złożone niż sieci stosowane w funkcji FEST/E⁰. Wynika to zarówno z rozbudowanej, przeważnie 4-poziomowej struktury, jak i z konieczności definiowania bardziej skomplikowanych komponentów.

Technologię tworzenia takiej sieci zaprezentowano poniżej na przykładzie narzędzia wspomagającego ocenę stanu technicznego swobodnie podpartych stalo-

wych blachownicowych dźwigarów głównych. Model geometrii analizowanych dźwigarów przyjęto klasy (e^1, p^1) . Rozpatrywana sieć hybrydowa została oznaczona jako BBS1 w nawiązaniu do klasyfikacji przedstawionej w tab. 6.3. Cyfra „1” w nazwie sieci jest identyfikatorem rodzaju przekroju poprzecznego – w prezentowanym przykładzie jest to symetryczny przekrój dwuteowy. Ogólny schemat funkcjonalny rozpatrywanej sieci pokazano na rys. 6.17. Ze względu na dość złożoną strukturę i znaczną liczbę komponentów architekturę III i IV poziomu sieci przedstawiono oddzielnie na rys. 6.18 oraz 6.19, które prezentują wybrane moduły związane z poszczególnymi typami uszkodzeń. Architektura modułu „A”, nie przedstawiona na szczegółowych rysunkach, jest analogiczna do rozwiązania modułu „D” (rys. 6.18b), a modułu „P” – do układu przyjętego w module „F” (rys. 6.18a).

W prezentowanej sieci hybrydowej dane są przesyłane w jednym kierunku: z poziomu o najwyższym numerze do poziomu oznaczonego jako I. Zgodnie z ogólnym schematem funkcjonalnym (rys. 6.16) w proponowanym procesie oceny stanu technicznego można wyróżnić cztery podstawowe etapy:

- określenie funkcji wrażliwości $\omega_i(x)$ analizowanej części składowej obiektu na uszkodzenia opisane przy użyciu funkcji intensywności $I^i(x)$;

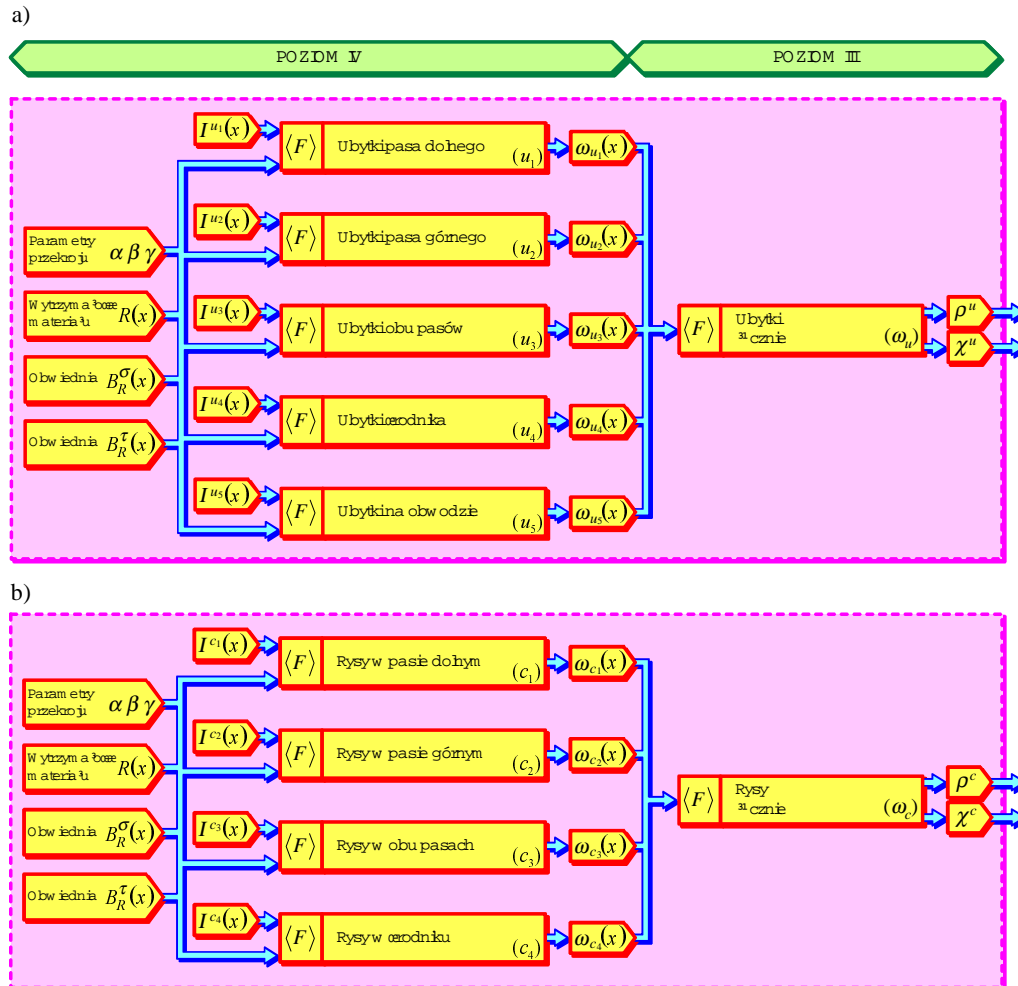


Rys. 6.17. Schemat funkcjonalny sieci hybrydowej BBS1 wspomagającej ocenę stanu technicznego stalowych blachownicowych dźwigarów głównych o dwuteowym przekroju poprzecznym (funkcja ekspertowa FEST/E¹)



Rys. 6.18. Schematy funkcjonalne wybranych modułów sieci hybrydowej BBS1 z rys. 6.17:
a) moduł „F”, b) moduł „D”, c) moduł „Z”

- wyznaczenie, na podstawie funkcji wrażliwości $\omega_i(x)$, parametrów stanu technicznego: stopnia uszkodzenia ρ^i oraz zakresu uszkodzenia χ^i – wynikających z występujących uszkodzeń;
- określenie wartości znormalizowanych wskaźników stanu technicznego ψ^i dla poszczególnych typów uszkodzeń;
- określenie ostatecznej oceny stanu technicznego rozpatrywanej części składowej obiektu, z uwzględnieniem wpływu wszystkich typów uszkodzeń, wyrażonej wartością znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego ψ .



Rys. 6.19. Schematy funkcjonalne modułów sieci hybrydowej BBS1 z rys. 6.17:
a) moduł „U”, b) moduł „C”

Na rysunkach 6.17, 6.18 oraz 6.19 przyjęto następujące oznaczenia:

$I^{ki}(x)$ – funkcja intensywności uszkodzeń rodzaju, kategorii lub klasy i , należących do typu k ;

$\omega_k(x)$ – uogólniona funkcja wrażliwości na uszkodzenia typu k ;

$\omega_{ki}(x)$ – uogólniona funkcja wrażliwości na uszkodzenia rodzaju, kategorii lub klasy i , należące do typu k ;

ρ^k – stopień uszkodzenia z uwagi na uszkodzenia typu k ;

χ^k – zakres uszkodzenia z uwagi na uszkodzenia typu k ;

- ρ^{k_i} – stopień uszkodzenia z uwagi na uszkodzenia rodzaju, kategorii lub klasy i , należące do typu k ;
- χ^{k_i} – zakres uszkodzenia z uwagi na uszkodzenia rodzaju, kategorii lub klasy i , należące do typu k ;
- ψ^k – znormalizowany wskaźnik stanu technicznego z uwagi na uszkodzenia typu k ;
- ψ^{k_i} – znormalizowany wskaźnik stanu technicznego z uwagi na uszkodzenia rodzaju, kategorii lub klasy i , należące do typu k ;
- ψ – znormalizowany wskaźnik stanu technicznego ocenianej części składowej lub elementu obiektu mostowego;
- $\langle F \rangle$ – funkcyjny komponent sieci hybrydowej;
- $\langle N \rangle$ – neuronowy komponent sieci hybrydowej;
- $\langle R \rangle$ – rozmyty komponent sieci hybrydowej.

Argumentem funkcji intensywności uszkodzeń $I^i(x)$ oraz funkcji wrażliwości $\omega_i(x)$, wykorzystywanych w prezentowanej funkcji ekspertowej, jest współrzędna x zdefiniowana w lokalnym układzie współrzędnych każdego elementu e^1 zastosowanego w modelu geometrii obiektu. W praktyce często jest wygodniej stosować znormalizowaną współrzędną $\xi = x/L$, gdzie L jest długością elementu e^1 . W niniejszej pracy, w zależności od potrzeb, oba te układy współrzędnych są stosowane zamiennie.

Sposób wyznaczania funkcji wrażliwości analizowanych części składowych obiektu na uszkodzenia oraz wykorzystywania tych funkcji do oceny stanu technicznego zależy w decydującym stopniu od rozpatrywanego typu uszkodzeń oraz od zastosowanego modelu geometrii obiektu. Można wyróżnić tu dwie metody (rys. 6.16):

- *bezpośrednią*, gdy funkcja intensywności uszkodzeń może być bezpośrednio przyjęta jako funkcja wrażliwości ocenianego elementu lub części składowej obiektu; rozwiązanie takie może być stosowane w odniesieniu do uszkodzeń nie powodujących skutków statyczno-wytrzymałościowych (np. uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych, zanieczyszczenia);
- *pośrednią*, gdy niezbędne jest przetworzenie funkcji intensywności uszkodzeń z uwzględnieniem statyczno-wytrzymałościowych efektów uszkodzeń – dotyczy to takich typów uszkodzeń, jak np. ubytki materiału, utrata ciągłości materiału, destrukcja powodująca obniżenie wytrzymałości.

Przy wyznaczaniu funkcji wrażliwości metodą pośrednią algorytm postępowania zależy, zgodnie z ogólnym schematem pokazanym na rys. 6.16, od tego, czy zastosowany model geometrii ocenianej konstrukcji jest statycznie wyznaczalny. W przypadku najprostszych statycznie wyznaczalnych modeli klasy (e^1, p^1) kolejne

etapy procesu oceny stanu technicznego, na przykładzie uszkodzeń typu *ubytki materiału* (moduł „U” na rys. 6.19a), można scharakteryzować następująco:

- określenie funkcji czułości $\lambda_{u_i}(I)$ z uwagi na rozpatrywaną klasę uszkodzeń u_i ; funkcje czułości $\lambda_{u_i}(I)$ lub obwiednie czułości są bezpośrednio predefiniowane jako zasoby komponentów funkcyjnych usytuowanych na IV poziomie sieci hybrydowej;
- określenie obwiedni wykorzystania wytrzymałości $B_R(x)$ z uwagi na rozpatrywane wielkości statyczne; obwiednie te są generowane przez moduł analityczny na podstawie szczegółowych parametrów technicznych wprowadzonych do systemu przy użyciu edytora graficznego (patrz np. rys. 2.11) oraz na podstawie informacji o obciążeniach uzyskiwanych z bazy danych systemu;
- wyznaczenie obwiedni wrażliwości $\Omega_{u_i}(x, I)$ elementu zgodnie ze wzorem (5.14) – w rezultacie wykonania operacji zaprogramowanych w komponencie funkcyjnym na IV poziomie sieci hybrydowej;
- określenie, przy wykorzystaniu wzoru (5.17), funkcji wrażliwości elementu $\omega_{u_i}(x)$ na podstawie obwiedni wrażliwości $\Omega_{u_i}(x, I)$ oraz funkcji intensywności uszkodzeń $I^{u_i}(x)$ wprowadzonej do systemu przy wykorzystaniu edytora graficznego (patrz np. rys. 3.19); operacja ta jest realizowana także przez komponent poziomu IV;
- skonstruowanie, zgodnie ze wzorem (5.13), uogólnionej funkcji wrażliwości $\omega_u(x)$ uwzględniającej równoczesny wpływ wszystkich uszkodzeń typu *ubytki materiału* i wyznaczenie stopnia uszkodzenia ρ^u oraz zakresu uszkodzenia χ^u zgodnie ze wzorami (6.3) i (6.4); działania te wykonuje komponent usytuowany na III poziomie sieci.

Kolejne kroki to wyznaczenie wartości wskaźnika stanu technicznego ψ^u (komponent na II poziomie sieci) oraz określenie wartości wskaźnika stanu technicznego ψ , uwzględniającego wpływ uszkodzeń wszystkich typów (komponent na poziomie I).

Zastosowanie statycznie niewyznaczalnego modelu analizowanej konstrukcji do wyznaczania funkcji wrażliwości metodą pośrednią wymaga uwzględnienia wpływu uszkodzeń u_i na redystrybucję sił wewnętrznych. W efekcie uzyskuje się obwiednie wykorzystania wytrzymałości z uwzględnieniem uszkodzeń $B_{u_i, R}(x)$, co pokazano na ogólnym schemacie funkcjonalnym (rys. 6.16). Na tej podstawie, zgodnie ze wzorem (5.11), jest określana funkcja wrażliwości $\omega_{u_i}(x)$, a następnie wyznaczane są

parametry stanu technicznego ρ'' oraz χ'' i w rezultacie – wskaźnik stanu technicznego ψ'' .

Dobór metody określenia funkcji wrażliwości musi być dokonany indywidualnie dla poszczególnych części składowych obiektu mostowego, z uwzględnieniem rodzaju konstrukcji, modelu geometrii, rodzaju materiału, typu uszkodzenia, kształtu przekroju itp. Z uwagi na daleko idącą indywidualizację sieci hybrydowych wspomagających ocenę stanu technicznego szczegółowe zasady prezentowanego rozwiązania przedstawiono poniżej na konkretnych przykładach.

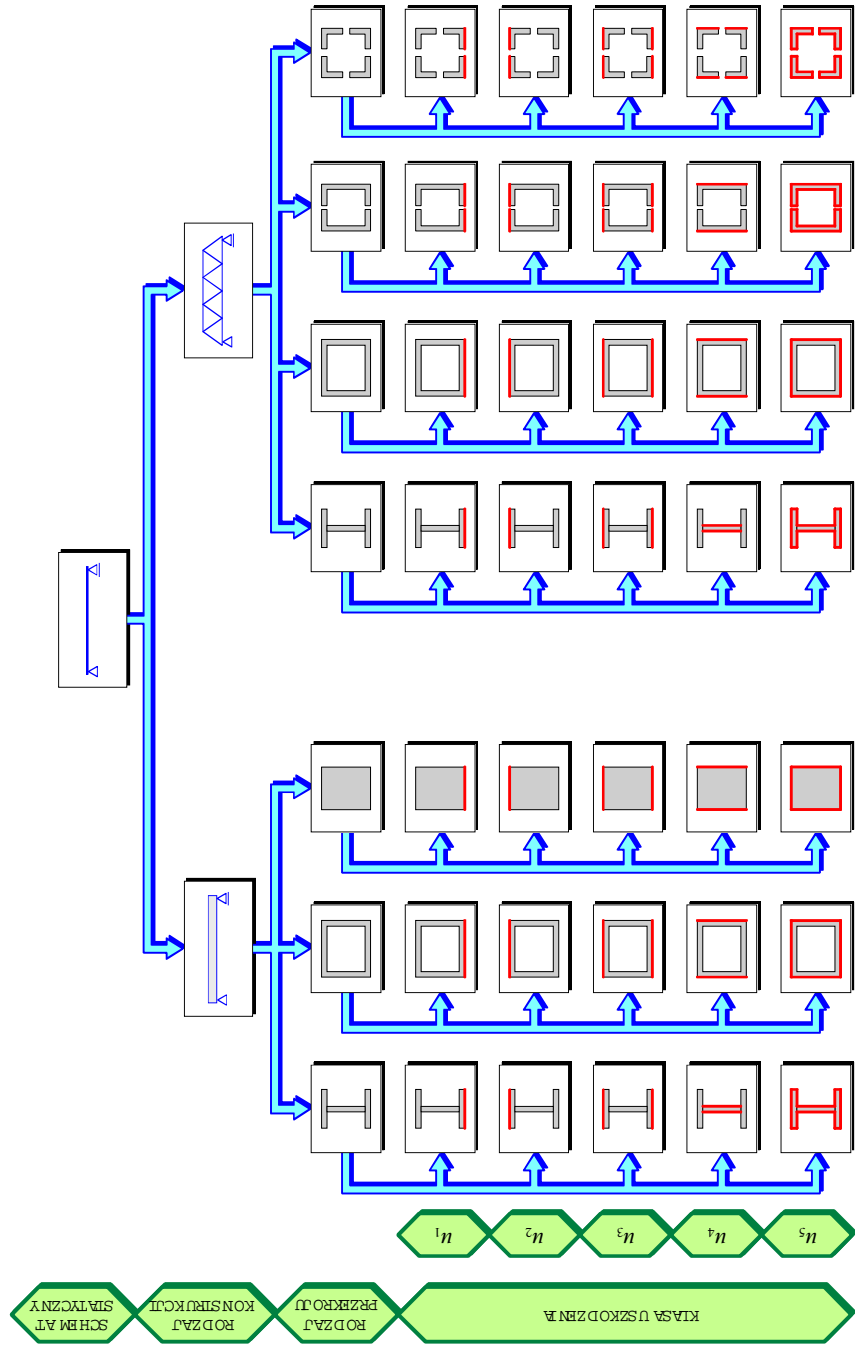
6.2.2.3.2. Pośrednia metoda wyznaczania funkcji wrażliwości

Pośrednią metodę tworzenia i wykorzystywania funkcji wrażliwości przedstawiono na przykładzie dźwigarów głównych przęsła pokazanego na rys. 6.21. Do analizy wybrano najczęściej stosowane w naszym kraju dźwigary główne w postaci stalowych blachownic o symetrycznym dwuteowym przekroju poprzecznym. W rozpatrywanym przykładzie geometrię przęsła odwzorowano przy wykorzystaniu najprostszego modelu klasy (e^1, p^1), a analizę przeprowadzono zgodnie z obowiązującym układem norm projektowania [262], [263]. Ogólna procedura konstruowania funkcji wrażliwości na uszkodzenia jest analogiczna do przedstawionej w rozdziale 5.

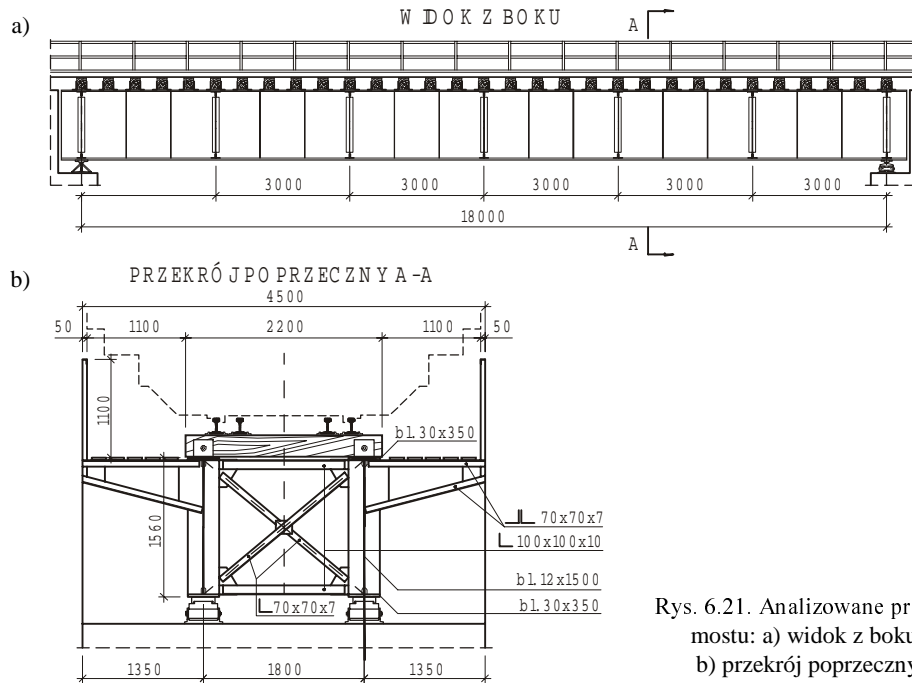
Na potrzeby funkcji ekspertowej FEST/E¹ opracowano systematykę podstawowych klas uszkodzeń występujących w analizowanych częściach składowych obiektów. Jako przykład na rys. 6.20 pokazano klasy uszkodzeń typu *ubytki materiału* przyjęte dla blachownicowych i kratownicowych dźwigarów głównych.

W prezentowanym przykładzie przyjęto uszkodzenia dźwigarów głównych w postaci ubytków materiału dolnej półki (uszkodzenie klasy u_1 według oznaczeń na rys. 6.20), których rozkład na długości przęsła jest opisany funkcją intensywności $I''(\xi)$ przedstawioną na rys. 6.22 jako funkcja znormalizowanej współrzędnej $\xi = x/L$. Miarą intensywności uszkodzenia jest tu stosunek ubytku pola powierzchni przekroju dolnego pasa $\Delta F_p(\xi)$ do zaprojektowanego pola powierzchni przekroju tego pasa $F_p(\xi)$. W analizie uwzględniono ciężar własny konstrukcji i elementów niekonstrukcyjnych oraz obciążenia ruchome taborem kolejowym klasy $k = -3$ według [263].

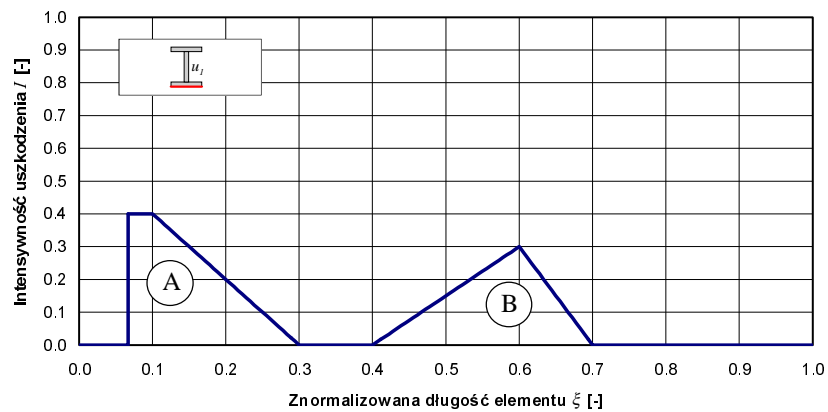
Funkcje czułości λ , określające stosunek naprężeń w dźwigarze uszkodzonym do naprężeń w dźwigarze nieuszkodzonym, w przypadku dźwigarów o przekroju dwuteowym zależą od proporcji wymiarów przekroju poprzecznego. Parametry α , β oraz γ charakteryzujące te proporcje zaprezentowano na rys. 6.23, na którym przedstawiono także zakresy zmienności tych parametrów, określone na podstawie analizy danych technicznych rzeczywistych obiektów.



Rys. 6.20. Klasyfikacja uszkodzeń typu ubytki materiału blachownicowych i kratownicowych dźwiągów głównych



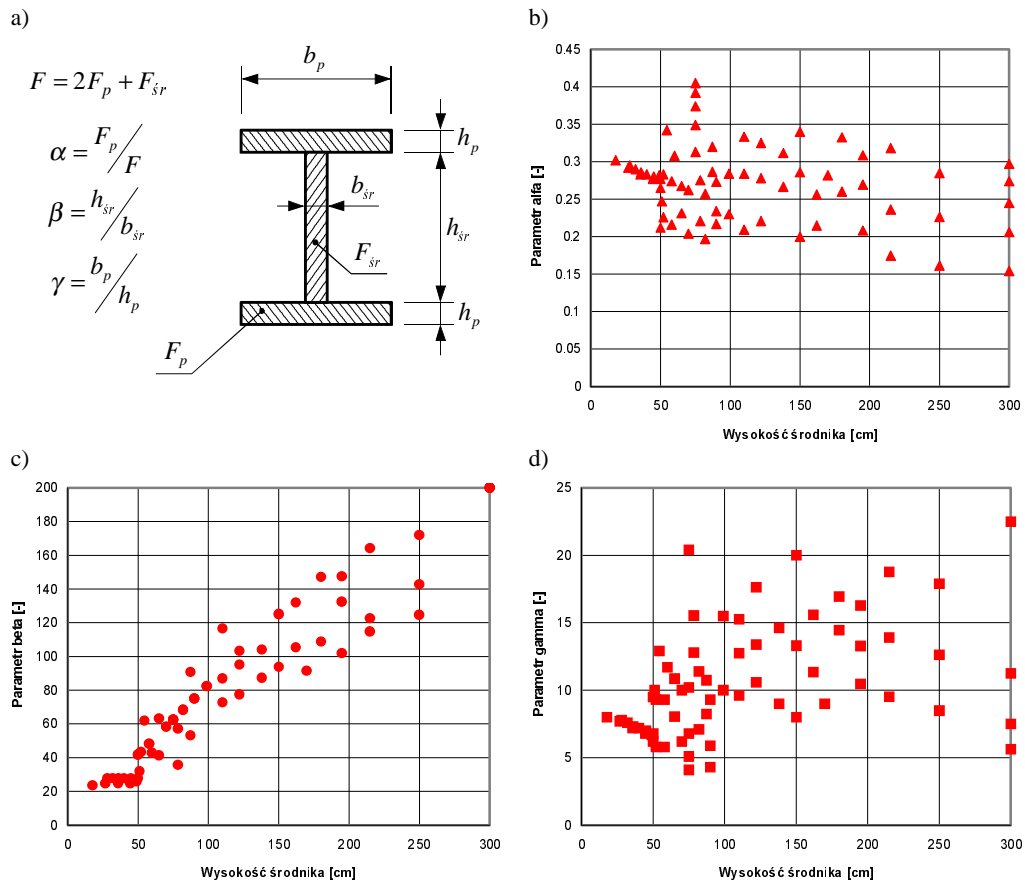
Rys. 6.21. Analizowane przęsło mostu: a) widok z boku, b) przekrój poprzeczny



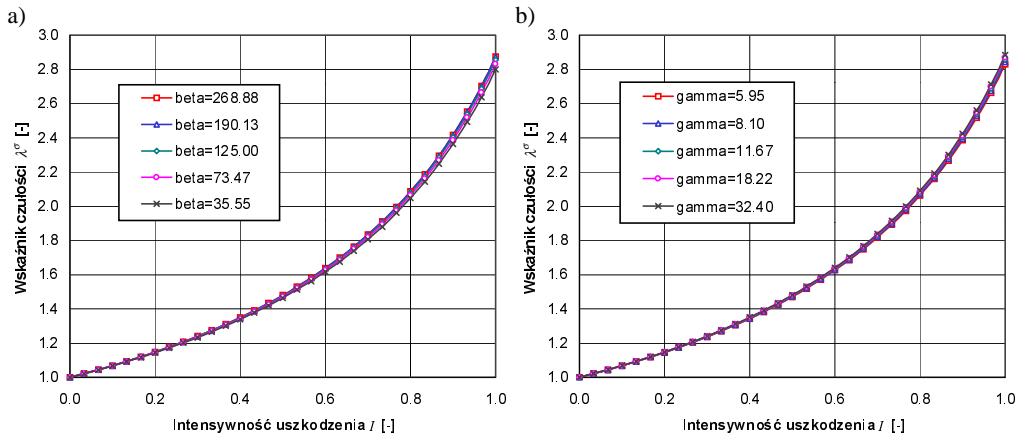
Rys. 6.22. Funkcja intensywności ubytków materiału klasy u_1 : $I^{u_1}(\xi) = \Delta F_p(\xi) / F_p(\xi)$

Wyniki analiz (rys. 6.24 oraz 6.25) pokazują, że funkcje czułości dźwigara na ubytki materiału klasy u_1 w minimalnym stopniu zależą od wartości parametrów β oraz γ . Zarówno dla naprężeń normalnych σ , jak i naprężeń stycznych τ wpływ ten nie przekracza 2–3% dla rzeczywistych zakresów zmienności wartości parametrów β i γ oraz dla spotykanych w praktyce zakresów intensywności uszkodzeń. Funkcje

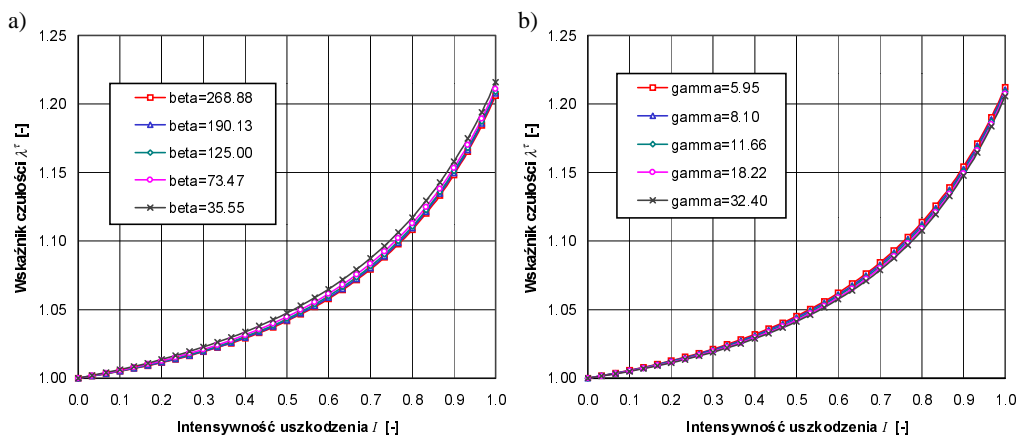
czułości z uwagi na naprężenia normalne σ , jak i z uwagi na naprężenia styczne τ zależą natomiast w istotny sposób od wartości parametru α , co pokazano odpowiednio na rys. 6.26a oraz 6.29a.



Rys. 6.23. Proporcje wymiarów przekroju poprzecznego swobodnie podpartych blachownicowych dźwigarów głównych o przekroju dwuteowym (na podstawie analizy wybranych przęseł kolejowych): a) przyjęte oznaczenia, b) wartości parametru α , c) wartości parametru β , d) wartości parametru γ

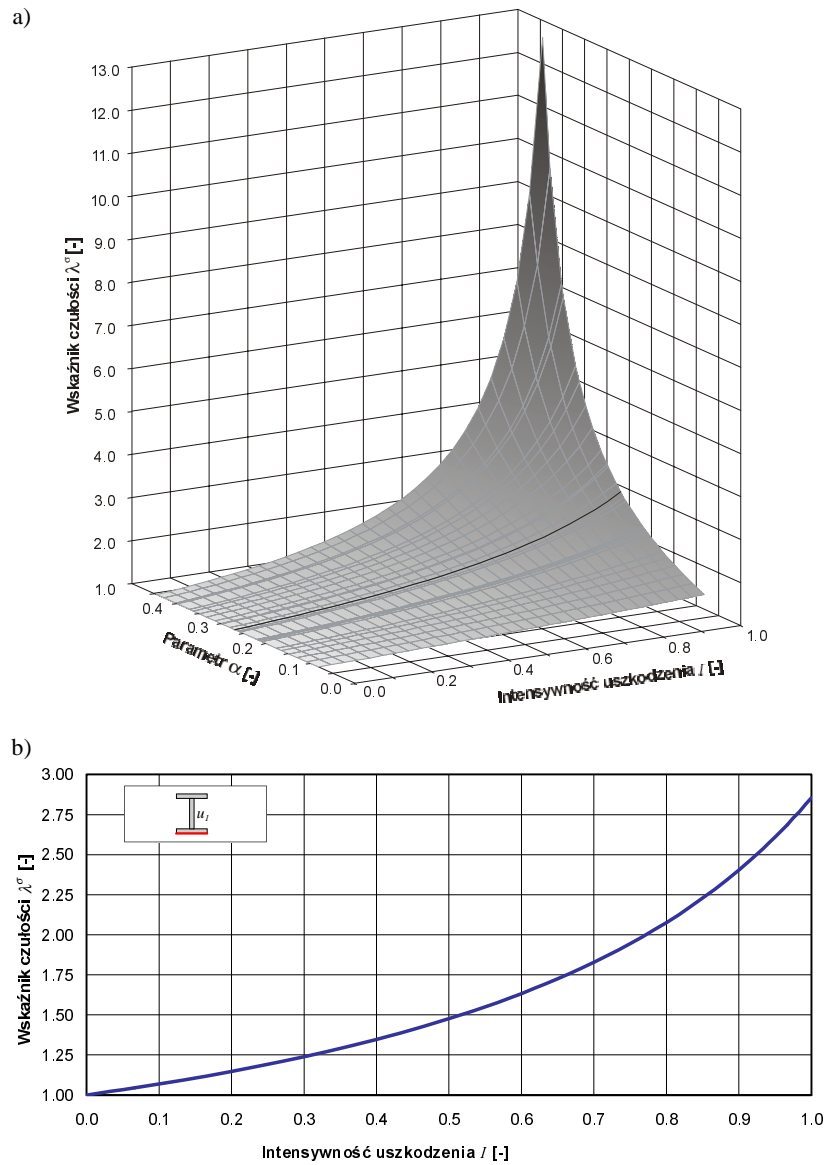


Rys. 6.24. Funkcje czułości dźwigarów dwuteowych na ubytki materiału klasy u_1 z uwagi na naprężenia σ : a) dla różnych wartości parametru β przy $\alpha = 0,269$ oraz $\gamma = 11,67$, b) dla różnych wartości parametru γ przy $\alpha = 0,269$ oraz $\beta = 125,0$



Rys. 6.25. Funkcje czułości dźwigarów dwuteowych na ubytki materiału klasy u_1 z uwagi na naprężenia τ : a) dla różnych wartości parametru β przy $\alpha = 0,269$ oraz $\gamma = 11,67$, b) dla różnych wartości parametru γ przy $\alpha = 0,269$ oraz $\beta = 125,0$

Obwiednię czułości $\lambda_{u_1}^{\sigma}(\alpha, I)$ z uwagi na naprężenia normalne σ dla dowolnych wartości parametru α oraz dla dowolnej intensywności ubytków materiału klasy u_1 przedstawiono na rys. 6.26a. Na rysunku 6.26b zaprezentowano funkcję czułości $\lambda_{u_1}^{\sigma}(I) = \Lambda_{u_1}^{\sigma}(0,269, I)$ dźwigara analizowanego w przykładzie, wyznaczoną na podstawie obwiedni czułości $\lambda_{u_1}^{\sigma}(\alpha, I)$.



Rys. 6.26. Czułość dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy – u_1 , z uwagi na naprężenia σ :

a) obwiednia czułości $\lambda_{u_1}^{\sigma}(\alpha, I)$, b) funkcja czułości $\lambda_{u_1}^{\sigma}(I)$ dla $\alpha = 0,269$

Na podstawie funkcji czułości $\lambda_{u_1}^{\sigma}(I)$ oraz uogólnionej obwiedni $B_R^{\sigma}(\xi)$ wykorzystania wytrzymałości z uwagi na naprężenia normalne σ , pokazanej na

rys. 6.27, można zdefiniować obwiednię wrażliwości analizowanego dźwigara na naprężenia σ . Zgodnie ze wzorem (5.14) operację tę można zapisać w postaci:

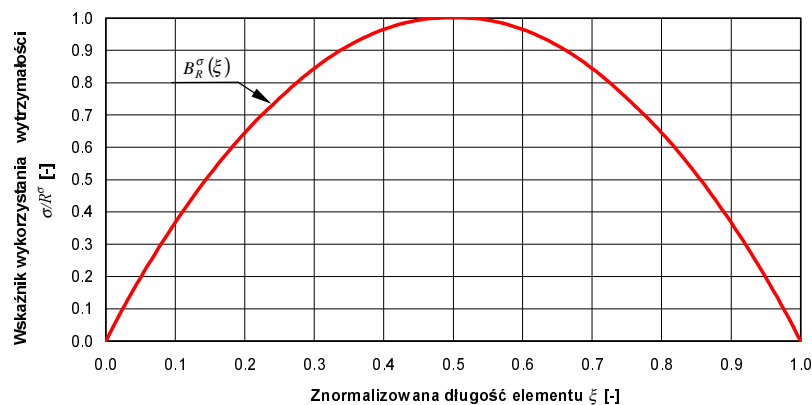
$$\Omega_{u_1}^\sigma(\xi, I) = B_R^\sigma(\xi) \lambda_{u_1}^\sigma(I) \quad (6.5)$$

Wykres obwiedni wrażliwości $\Omega_{u_1}^\sigma(\xi, I)$ przedstawia rys. 6.28a. Funkcja ta prezentuje stosunek maksymalnych naprężeń normalnych σ w konstrukcji uszkodzonej do wytrzymałości materiału R^σ , dla dowolnego przekroju dźwigara i dla dowolnej intensywności uszkodzenia.

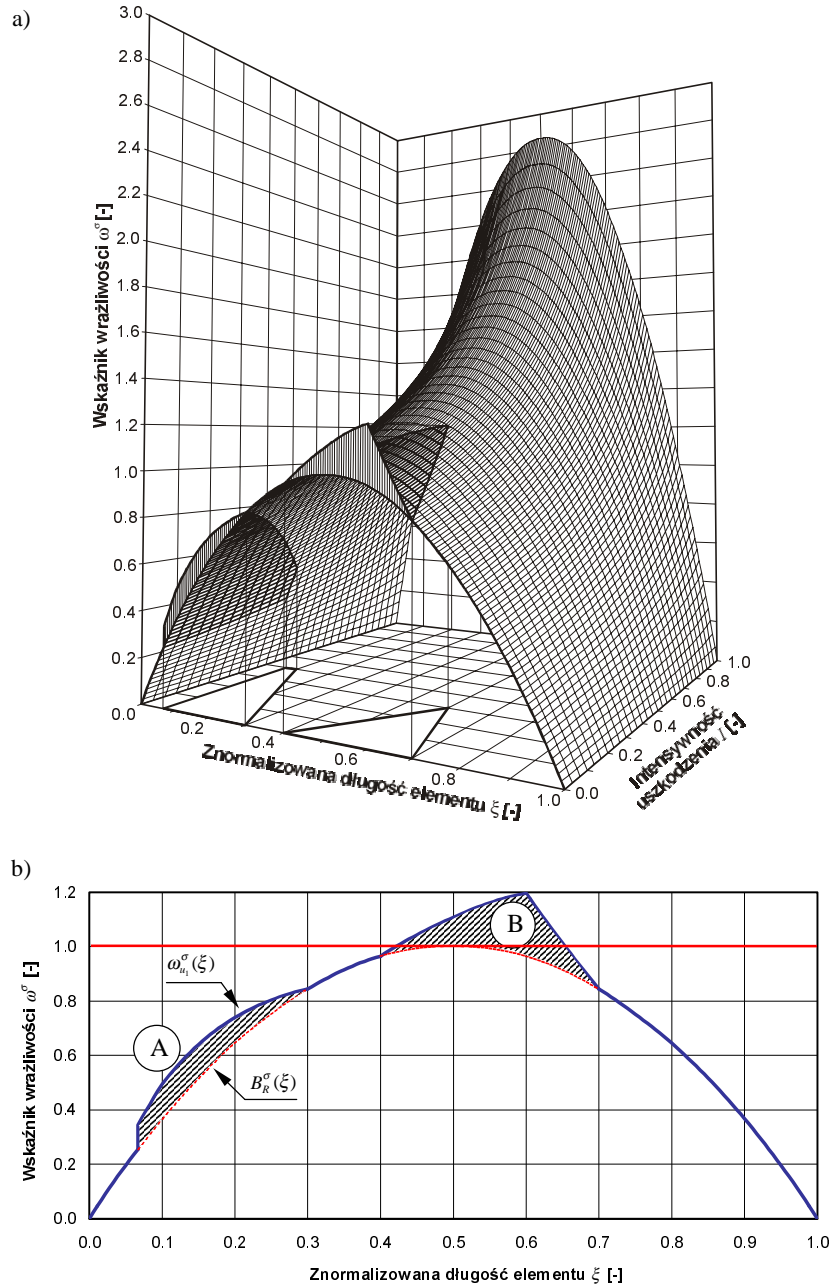
Na podstawie obwiedni wrażliwości $\Omega_{u_1}^\sigma(\xi, I)$ można w prosty sposób wyznaczyć funkcję wrażliwości $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$ elementu na uszkodzenia typu u_1 opisane funkcją intensywności $I^{u_1}(\xi)$ przedstawioną na rys. 6.22. Postać funkcji wrażliwości $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$ dla analizowanego dźwigara prezentuje rys. 6.28b.

Funkcję wrażliwości z uwagi na naprężenia styczne τ można wyznaczyć w analogiczny sposób jak w przypadku naprężeń σ . Kolejne etapy tego procesu to:

- wyznaczenie funkcji czułości $\lambda_{u_1}^\tau(I)$ na podstawie obwiedni czułości $\Lambda_{u_1}^\tau(\alpha, I)$ – rys. 6.29;
- zdefiniowanie uogólnionej obwiedni wykorzystania wytrzymałości z uwagi na naprężenia styczne $B_R^\tau(\xi)$ – rys. 6.30;
- skonstruowanie obwiedni wrażliwości $\Omega_{u_1}^\tau(\xi, I)$ dźwigara na uszkodzenia klasy u_1 z uwagi na naprężenia styczne τ – rys. 6.31a;
- określenie funkcji wrażliwości elementu $\omega_{u_1}^\tau(\xi)$ na uszkodzenia analizowane w przykładzie – rys. 6.31b.



Rys. 6.27. Uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości z uwagi na naprężenia normalne σ : $B_R^\sigma(\xi)$

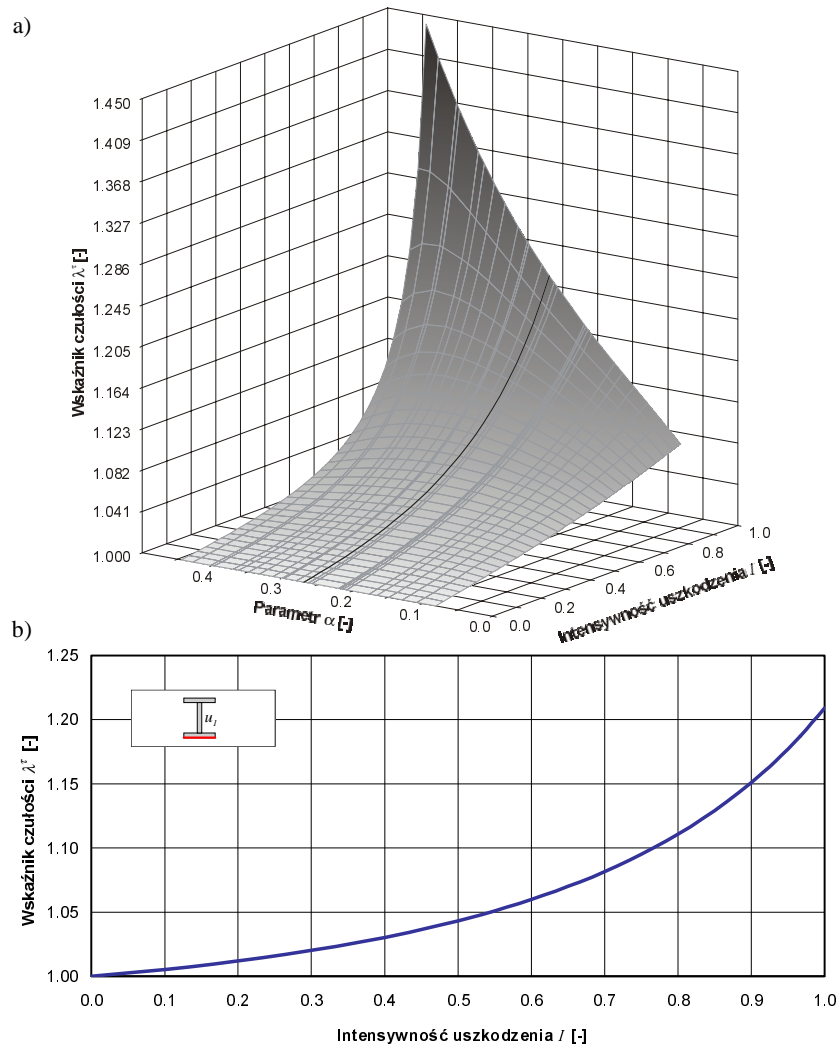


Rys. 6.28. Wrażliwość dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_1 – z uwagi na naprężenia σ :

- a) obwiednia wrażliwości $\Omega_{u_1}^\sigma(\xi, I)$, b) funkcja wrażliwości $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$ na uszkodzenia o intensywności jak na rys. 6.22

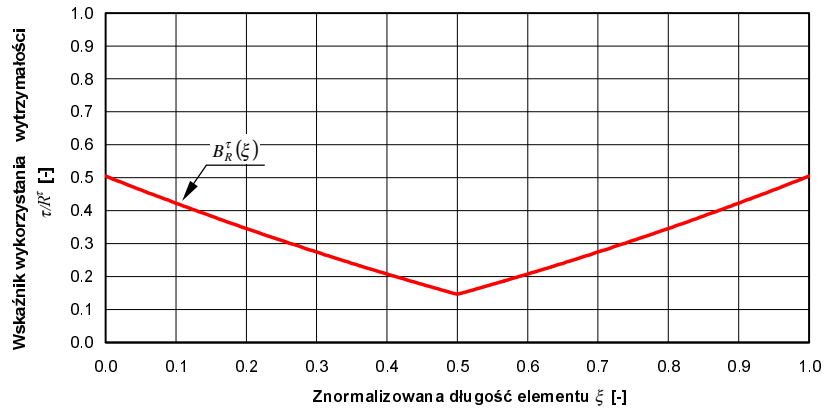
Rozpatrywane uszkodzenia powodują równoczesne zmiany zarówno naprężeń normalnych σ , jak i naprężeń stycznych τ , a więc do oceny stanu technicznego należy skonstruować funkcję wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma,\tau}(\xi)$ uwzględniającą obie te wielkości. Na podstawie wzoru (5.11) taka globalna funkcja wrażliwości może być wyznaczona jako:

$$\omega_{u_1}^{\sigma,\tau}(\xi) = \text{MAX} [B_R^\sigma(\xi), B_R^\tau(\xi)] \quad (6.6)$$

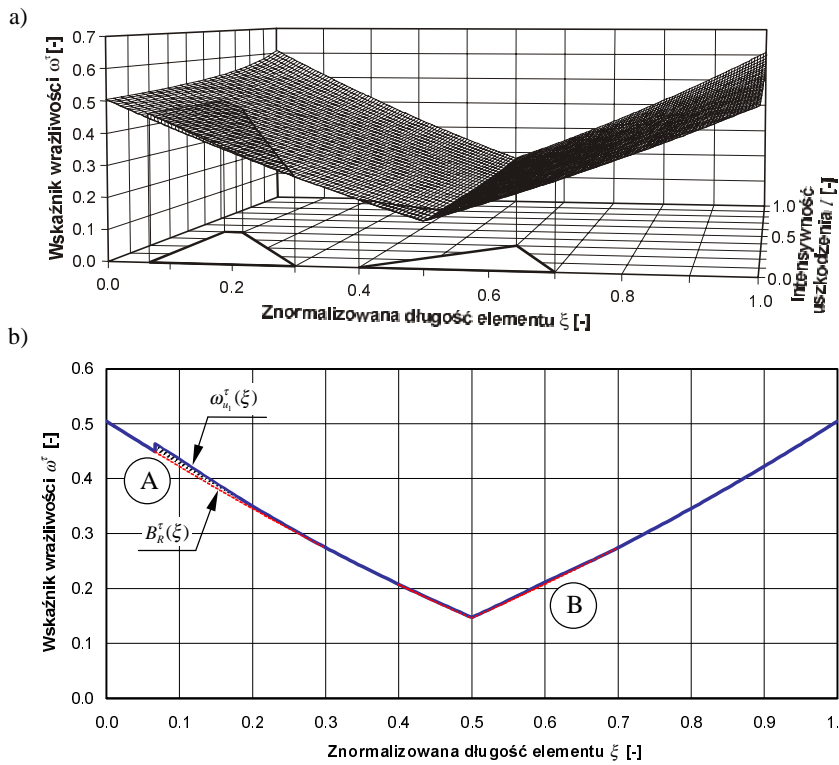


Rys. 6.29. Czułość dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_1 – z uwagi na naprężenia τ :

a) obwiednia czułości $\lambda_{u_1}^I(\alpha, I)$, b) funkcja czułości $\lambda_{u_1}^I(I)$ dla $\alpha = 0,269$

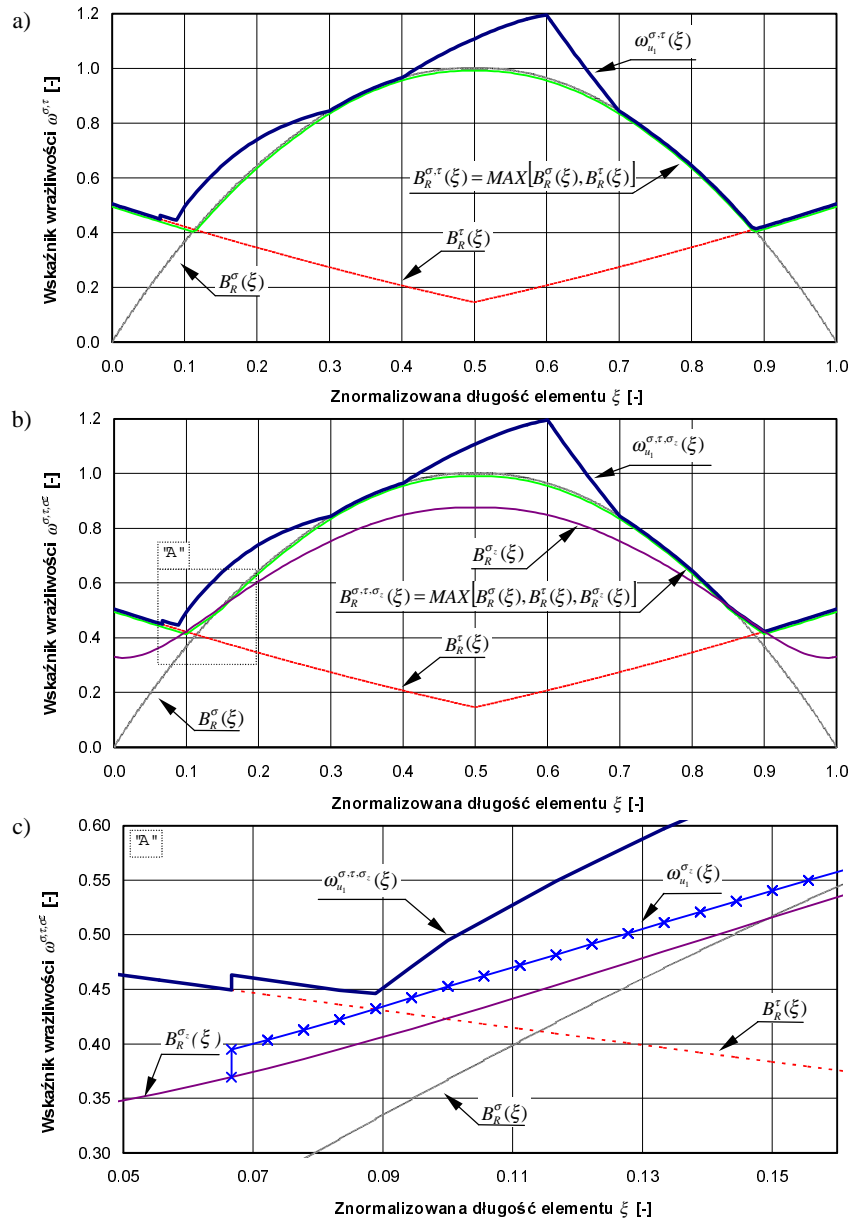


Rys. 6.30. Uogólniona obwiednia wykorzystania wytrzymałości z uwagi na naprężenia styczne τ : $B_R^\tau(\xi)$

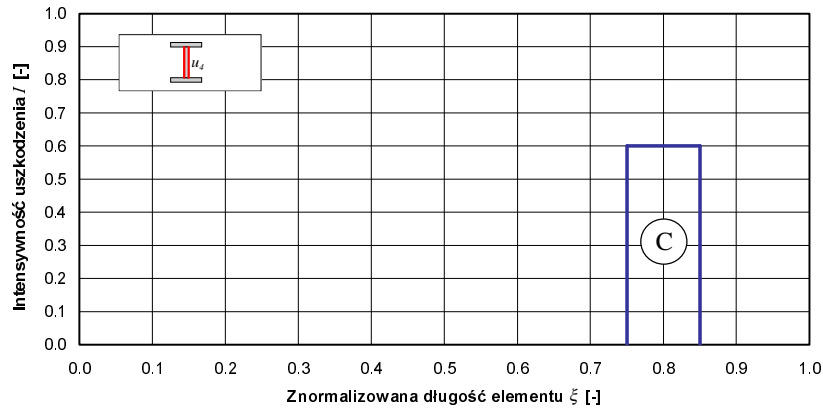


Rys. 6.31. Wrażliwość dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_1 – z uwagi na naprężenia τ :

a) obwiednia wrażliwości $\Omega_{u_1}^\tau(\xi, I)$, b) funkcja wrażliwości $\omega_{u_1}^\tau(\xi)$ na uszkodzenia o intensywności jak na rys. 6.22



Rys. 6.32. Funkcje wrażliwości dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_1 o intensywności jak na rys. 6.22: a) funkcja wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau}(\xi)$ uwzględniająca równocześnie naprężenia normalne σ oraz naprężenia styczne τ , b) funkcja wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau, \sigma_z}(\xi)$ uwzględniająca równocześnie naprężenia normalne σ , naprężenia styczne τ oraz naprężenia zastępcze σ_z , c) szczegół „A” konstrukcji funkcji wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau, \sigma_z}(\xi)$



Rys. 6.33. Funkcja intensywności ubytków materiału klasy u_4 : $I^{u_4}(\xi) = \Delta F_{sr}(\xi) / F_{sr}(\xi)$

Wykres tej funkcji dla analizowanego dźwigara przedstawia rys. 6.32a.

Zgodnie z przedstawioną wyżej procedurą można uwzględniać w analizie także inne wielkości statyczne istotne z punktu widzenia oceny kondycji obiektu mostowego. Na rysunkach 6.32b oraz 6.32c pokazano przykładowo wyniki uwzględnienia dodatkowo wrażliwości rozpatrywanego dźwigara z uwagi na naprężenia zastępcze σ_z . W takiej sytuacji globalna funkcja wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau, \sigma_z}(\xi)$ jest wyznaczana jako:

$$\omega_{u_1}^{\sigma, \tau, \sigma_z}(\xi) = \text{MAX} [B_R^\sigma(\xi), B_R^\tau(\xi), B_R^{\sigma_z}(\xi)] \quad (6.7)$$

Z porównania funkcji wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau}(\xi)$ oraz $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau, \sigma_z}(\xi)$, pokazanych odpowiednio na rys. 6.32a i 6.32b, wynika, iż uwzględnienie dodatkowo w analizie naprężeń σ_z wpływa na nieznaczną zmianę funkcji wrażliwości w przedziale od $\xi = 0,84$ do $\xi = 0,90$.

Przedstawiona metoda analizy umożliwia także uwzględnianie równoczesnego wpływu uszkodzeń różnych klas. Jako przykład rozpatrzono dodatkowe uszkodzenia analizowanego dźwigara w postaci ubytków materiału średnika (klasa uszkodzeń u_4 wg rys. 6.20). Funkcję intensywności tych uszkodzeń prezentuje rys. 6.33. Funkcje czułości elementu na ubytki materiału klasy u_4 z uwagi na naprężenia normalne σ oraz styczne τ pokazano odpowiednio na rys. 6.34 oraz rys. 6.35.

Wynikowe funkcje wrażliwości dźwigara na ubytki materiału, opisane funkcją intensywności $I_{u_4}(\xi)$ z rys. 6.33, przedstawiono kolejno na rys. 6.36:

- na rys. 6.36a – funkcję wrażliwości z uwagi na naprężenia normalne σ ,
- na rys. 6.36b – funkcję wrażliwości z uwagi na naprężenia styczne τ ,

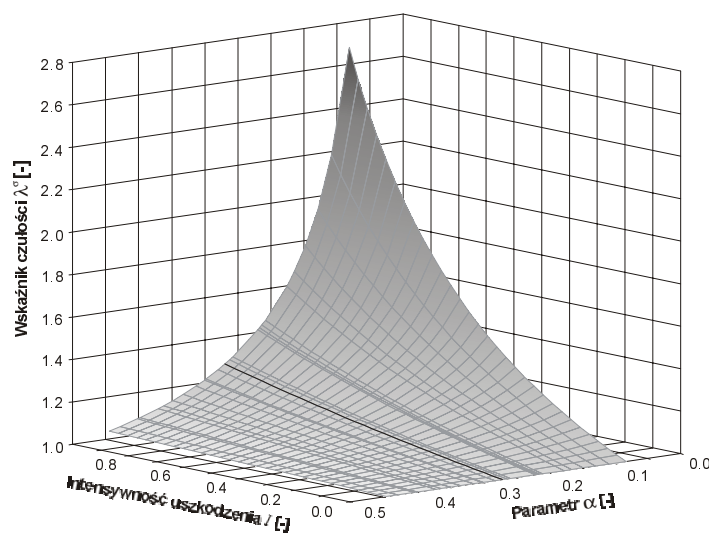
- na rys. 6.36c – funkcję wrażliwości uwzględniającą równocześnie naprężenia σ oraz τ .

Sumaryczną funkcją wrażliwości dźwigara na równoczesne wystąpienie ubytków materiału klasy u_1 wg rys. 6.22 oraz klasy u_4 wg rys. 6.33, z uwagi na naprężenia normalne σ oraz styczne τ , można wyznaczyć z zależności:

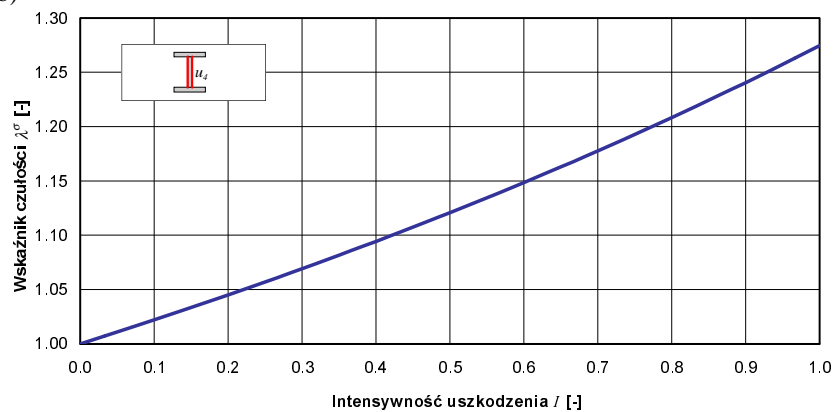
$$\omega^{\sigma,\tau}(\xi) = \text{MAX}[\omega_{u_1}^{\sigma,\tau}(\xi), \omega_{u_4}^{\sigma,\tau}(\xi)] \quad (6.8)$$

Wykres tej funkcji zaprezentowano na rys. 6.37.

a)

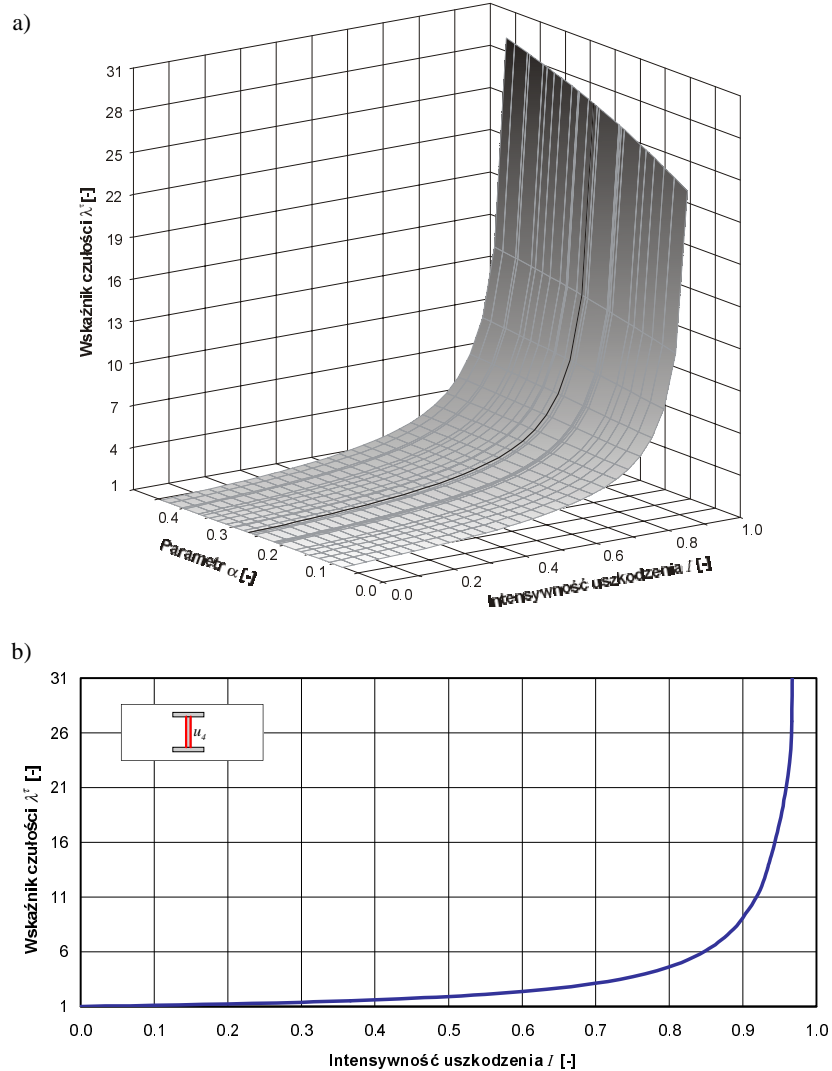


b)



Rys. 6.34. Czułość dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_4 – z uwagi na naprężenia σ :

- a) obwiednia czułości $\lambda_{u_4}^{\sigma}(\alpha, I)$, b) funkcja czułości $\lambda_{u_4}^{\sigma}(I)$ dla $\alpha = 0,269$



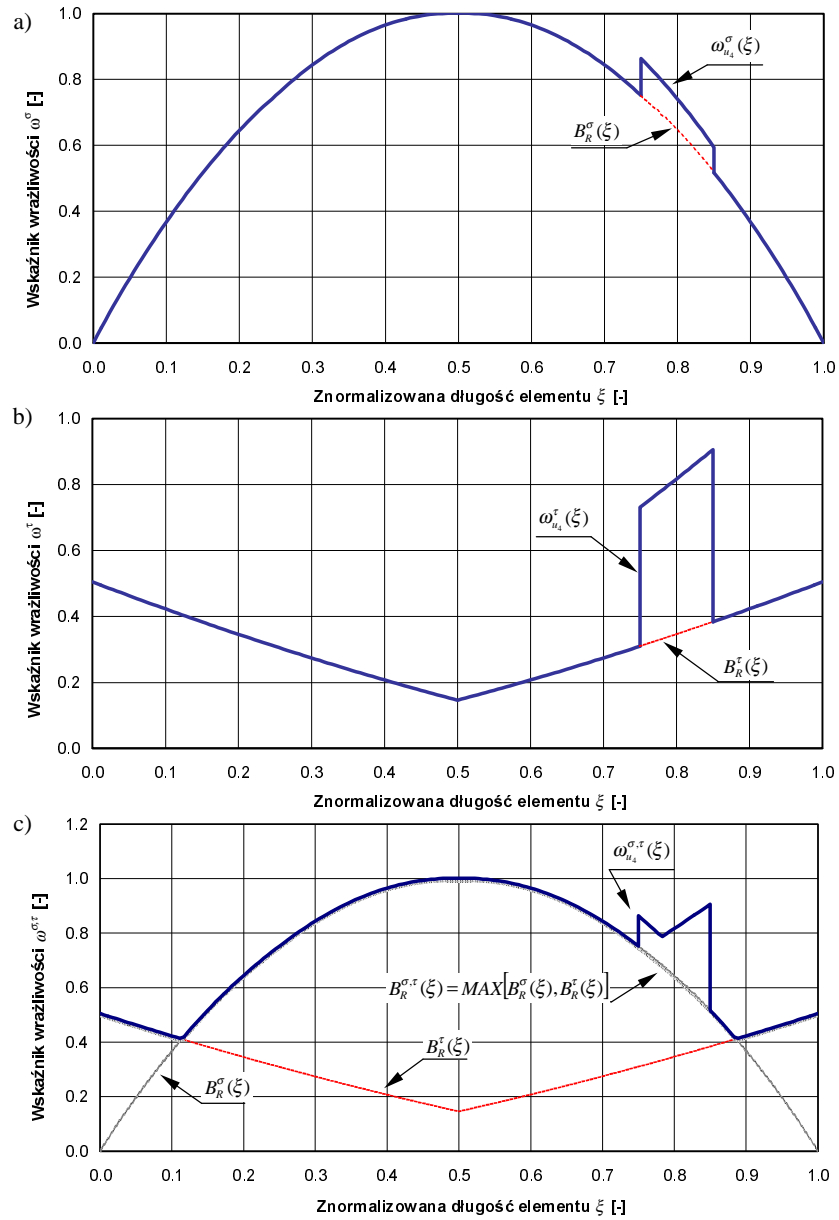
Rys. 6.35. Czułość dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_4 – z uwagi na naprężenia τ :

a) obwiednia czułości $\lambda_{u_4}^{\tau}(\alpha, I)$, b) funkcja czułości $\lambda_{u_4}^{\tau}(I)$ dla $\alpha = 0,269$

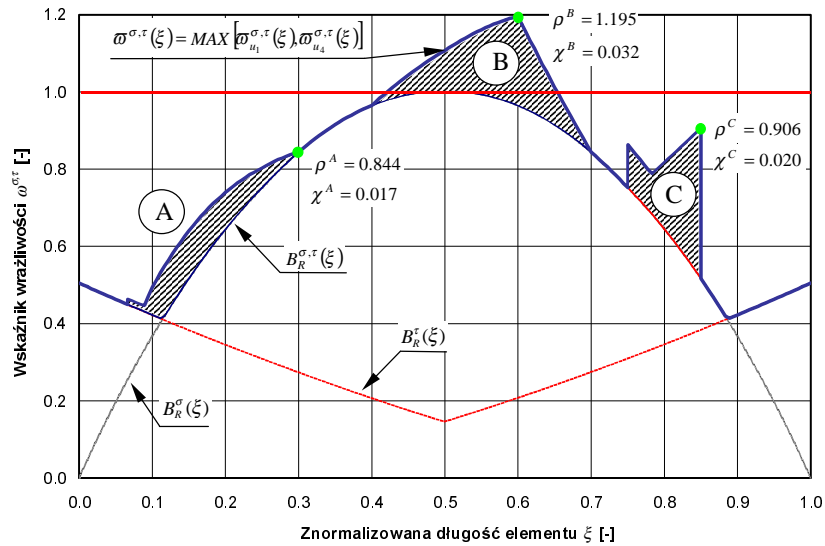
Stan techniczny rozpatrywanych w przykładzie dźwigarów charakteryzują:

- *stopień uszkodzenia* ρ , który dla każdego z analizowanych uszkodzeń i można wyznaczyć jako:

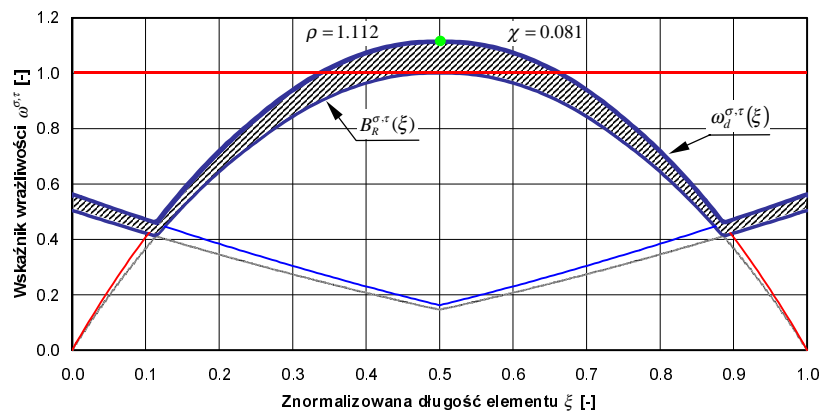
$$\rho^i = \text{MAX}[\omega_i^{\sigma, \tau}(\xi)] \quad (6.9)$$



Rys. 6.36. Funkcje wrażliwości dźwigarów głównych na ubytki materiału klasy u_4 o intensywności jak na rys. 6.33: a) funkcja wrażliwości z uwagi na naprężenia normalne σ – $\omega_{u_4}^\sigma(\xi)$,
 b) funkcja wrażliwości z uwagi na naprężenia styczne τ – $\omega_{u_4}^\tau(\xi)$,
 c) funkcja $\omega_{u_4}^{\sigma,\tau}(\xi)$ uwzględniająca wrażliwość z uwagi na naprężenia normalne σ oraz styczne τ



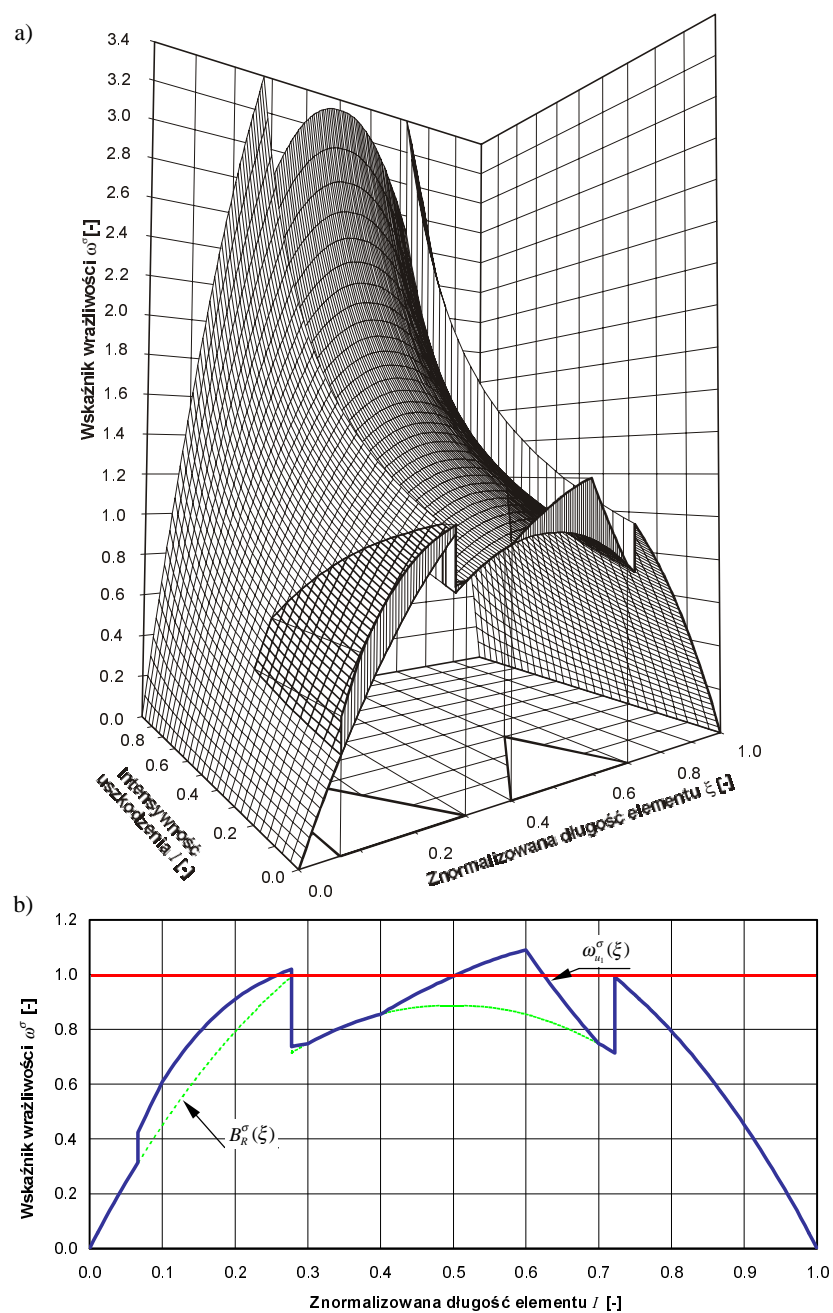
Rys. 6.37. Funkcja wrażliwości $\omega^{\sigma,\tau}(\xi)$ dźwigarów głównych na równoczesne wystąpienie ubytków materiału klasy u_1 wg rys. 6.22 oraz klasy u_4 wg rys. 6.33 – z uwagi na naprężenia normalne σ oraz styczne τ



Rys. 6.38. Funkcja wrażliwości $\omega_d^{\sigma,\tau}(\xi)$ dźwigarów głównych przęśla z rys. 6.21 na obniżenie wytrzymałości materiału o 10%

- zakres uszkodzenia χ , który w prezentowanym przykładzie można wyznaczyć jako:

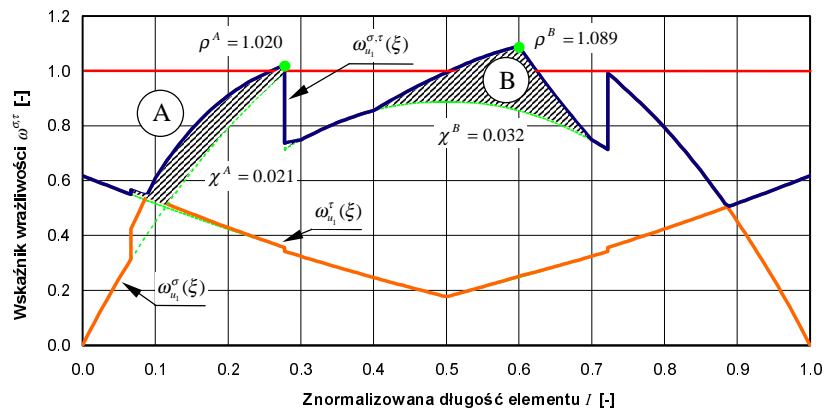
$$\chi^i = \int_0^1 [\omega_i^{\sigma,\tau}(\xi) - B_R^{\sigma,\tau}(\xi)] d\xi \quad (6.10)$$



Rys. 6.39 Wrażliwość dźwigarów głównych z nakładkami na ubytki materiału klasy u_1 – z uwagi na naprężenia σ : a) obwiednia wrażliwości $\Omega_{u_1}^\sigma(\xi, I)$, b) funkcja wrażliwości $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$ na uszkodzenia o intensywności jak na rys. 6.22

Wartości wskaźników ρ oraz χ dla analizowanych uszkodzeń A, B i C podano na rys. 6.37.

Przedstawiona wyżej procedura tworzenia i wykorzystywania funkcji wrażliwości konstrukcji na uszkodzenia typu *ubytki materiału* może być stosowana do modelowania wrażliwości obiektów mostowych także na inne typy uszkodzeń. Przykład analizy wrażliwości konstrukcji na obniżenie wytrzymałości materiału, czyli uszkodzenie należące do typu *destrukcja materiału*, przedstawia rys. 6.38. W przykładzie tym przyjęto, że w wyniku badań materiału dźwigarów głównych przęsła pokazanego na rys. 6.21 stwierdzono obniżenie wytrzymałości materiału o 10% w stosunku do wartości projektowanej. W efekcie w konstrukcji nie wykazującej żadnych innych uszkodzeń nastąpi przekroczenie dopuszczalnego poziomu wykorzystania wytrzymałości materiału. Projektowaną obwiednię wykorzystania wytrzymałości $B_R^{\sigma,\tau}(\xi)$ oraz funkcję wrażliwości na obniżenie wytrzymałości $\omega_d^{\sigma,\tau}(\xi)$ przedstawiono na rys. 6.38.



Rys. 6.40. Funkcja wrażliwość dźwigarów głównych z nakładkami $\omega_{d_1}^{\sigma,\tau}(\xi)$ uwzględniająca naprężenia normalne σ oraz styczne τ

Wszystkie przedstawione procedury definiowania obwiedni i funkcji wrażliwości mogą być zastosowane także w odniesieniu do dźwigarów o zmiennej sztywności. Możliwość tę zilustrowano na przykładzie przęsła z rys. 6.21, którego dźwigary główne wzmocniono dodatkowymi nakładkami pasa górnego i dolnego, każda o przekroju poprzecznym 300 mm na 12 mm. Nakładki, usytuowane symetrycznie względem środka rozpiętości przęsła, zastosowano na długości 8,00 m. Analizę przeprowadzono dla obciążeń stałych oraz obciążeń ruchomych taborem kolejowym klasy $k = 0$, przy przyjęciu uszkodzeń jak na rys. 6.22.

Obwiednię wrażliwości $\Omega_{u_1}^\sigma(\xi, I)$ z uwagi na naprężenia normalne σ oraz geometryczną ilustrację sposobu konstruowania funkcji wrażliwości $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$ pokazano na rys. 6.39a. Ostateczny kształt funkcji wrażliwości $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$ prezentuje rys. 6.39b. Po uwzględnieniu w analizie naprężeń stycznych τ można określić funkcję wrażliwości $\omega_{u_1}^{\sigma, \tau}(\xi)$, której wykres przedstawiono na rys. 6.40. Na rysunku tym podano także wartości stopnia uszkodzenia ρ oraz zakresu uszkodzenia χ odpowiadające analizowanym uszkodzeniom.

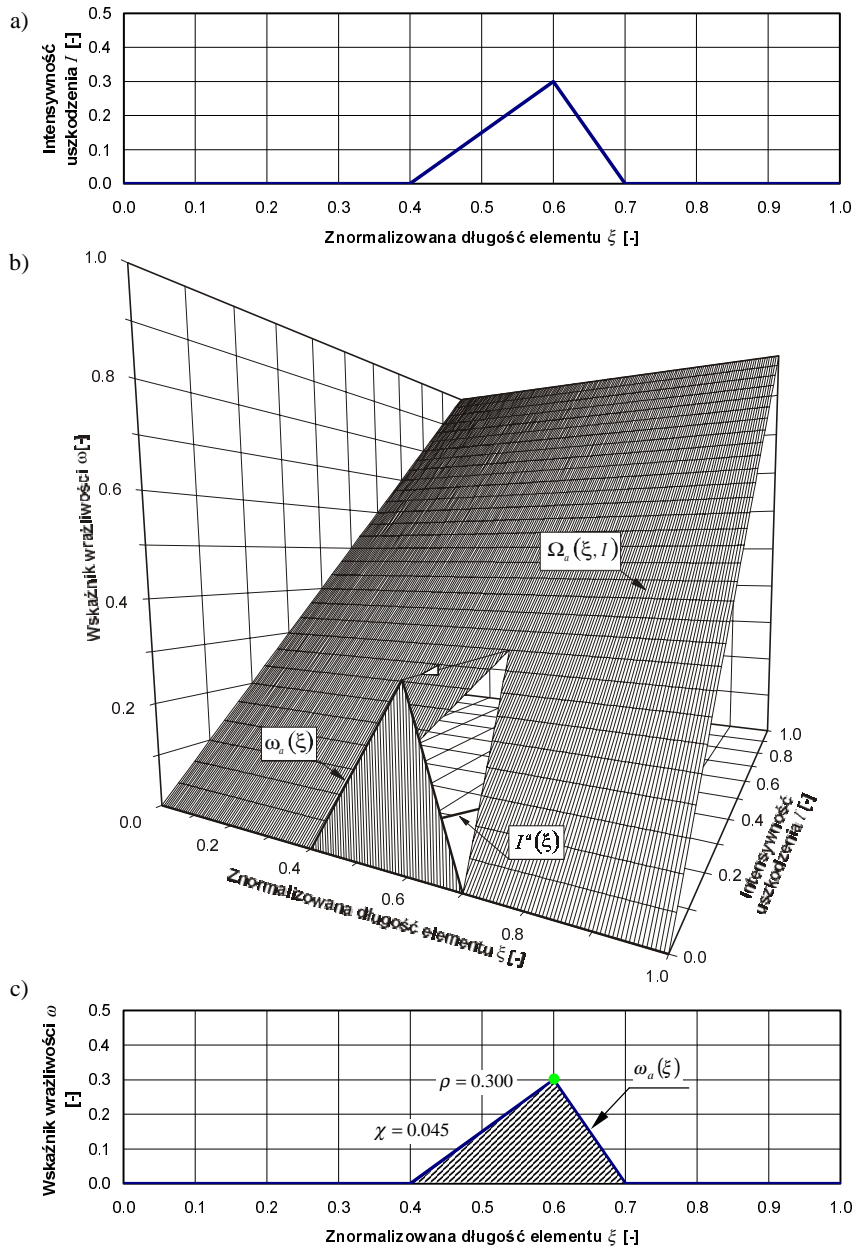
6.2.2.3.3. Bezpośrednia metoda wyznaczania funkcji wrażliwości

Zastosowania funkcji wrażliwości, zaproponowanych w rozdziale 5. jako jedno z narzędzi analizy statyczno-wytrzymałościowej, mogą być rozszerzone na inne typy uszkodzeń, w tym na uszkodzenia nie powodujące skutków statyczno-wytrzymałościowych. W odniesieniu do niektórych uszkodzeń (np. zanieczyszczeń czy uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych) ich lokalizacja na długości analizowanego elementu nie ma z reguły wpływu na ocenę stanu technicznego. W takich sytuacjach można przyjąć, że wrażliwość ocenianej części składowej obiektu mostowego jest wprost proporcjonalna do intensywności rozpatrywanego uszkodzenia. W sensie geometrycznym konsekwencją takiego założenia jest przyjęcie obwiedni wrażliwości $\Omega_a(\xi, I)$ w postaci płaszczyzny przechodzącej przez oś znormalizowanej współrzędnej ξ , co pokazano na rys. 6.41 prezentującym przykład modelowania wrażliwości elementu na uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych. Funkcja wrażliwości $\omega_a(\xi)$ jest tu wyznaczana bezpośrednio na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia $I^a(\xi)$. Funkcję intensywności uszkodzenia $I^a(\xi)$ przedstawia rys. 6.41a, natomiast obwiednię wrażliwości $\Omega_a(\xi, I)$ i sposób jej wykorzystania do określenia funkcji wrażliwości $\omega_a(\xi)$ – rys. 6.41b. Wyznaczoną funkcję wrażliwości $\omega_a(\xi)$ analizowanych dźwigarów na uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych opisane funkcją $I^a(\xi)$ zaprezentowano na rys. 6.41c.

Zgodnie z przyjętymi założeniami stan techniczny rozpatrywanego elementu charakteryzują dwa parametry wyznaczone przy wykorzystaniu funkcji wrażliwości:

- stopień uszkodzenia $\rho = \text{MAX}[\omega_a(\xi)] = 0,300$,
- zakres uszkodzenia $\chi = \int_0^1 \omega_a(\xi) d\xi = 0,045$.

Na podstawie tych parametrów oceniany jest stan techniczny analizowanego elementu, a jego miarą jest wartość znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego ψ .



Rys. 6.41. Bezpośrednia metoda wyznaczania funkcji wrażliwości na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia: a) funkcja intensywności uszkodzenia $I^a(\xi)$, b) obwiednia wrażliwości $\Omega_a(\xi, I)$ na uszkodzenia zabezpieczeń antykorozyjnych oraz geometryczna ilustracja sposobu konstruowania funkcji wrażliwości $\omega_a(\xi)$, c) funkcja wrażliwości $\omega_a(\xi)$ określona na podstawie funkcji intensywności uszkodzenia $I^a(\xi)$

6.2.2.3.4. Ocena stanu technicznego na podstawie stopnia i zakresu uszkodzenia

Zgodnie z proponowaną procedurą (rys. 6.16) ocena stanu technicznego poszczególnych części składowych obiektów mostowych jest formułowana na podstawie dwóch parametrów stanu technicznego: stopnia uszkodzenia ρ oraz zakresu uszkodzenia χ . Do tworzenia ocen są wykorzystywane rozmyte komponenty sieci hybrydowej, które na podstawie wartości parametrów ρ oraz χ , na drodze przybliżonego (rozmytego) wnioskowania, określają wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego ψ . Wartość wskaźnika ψ stanowi ocenę stanu technicznego rozpatrywanej części składowej obiektu mostowego.

Każdy komponent stosowany do oceny stanu technicznego jest definiowany i programowany indywidualnie, w zależności od:

- rodzaju ocenianej części składowej lub elementu obiektu,
- rozpatrywanego typu uszkodzeń,
- rodzaju rozwiązania konstrukcyjnego,
- rodzaju materiału,
- przyjętych kryteriów oceny stanu technicznego,
- zastosowanych algorytmów wnioskowania.

Proces generowania ocen stanu technicznego omówiono poniżej na przykładzie komponentu rozmytego, wspomagającego ocenę stanu technicznego stalowych dźwigarów blachownicowych z uwagi na ubytki materiału. Komponent ten jest usytuowany na II poziomie sieci hybrydowej BBS1 (rys. 6.17) i jest oznaczony jako „UBYTKI MATERIAŁU”.

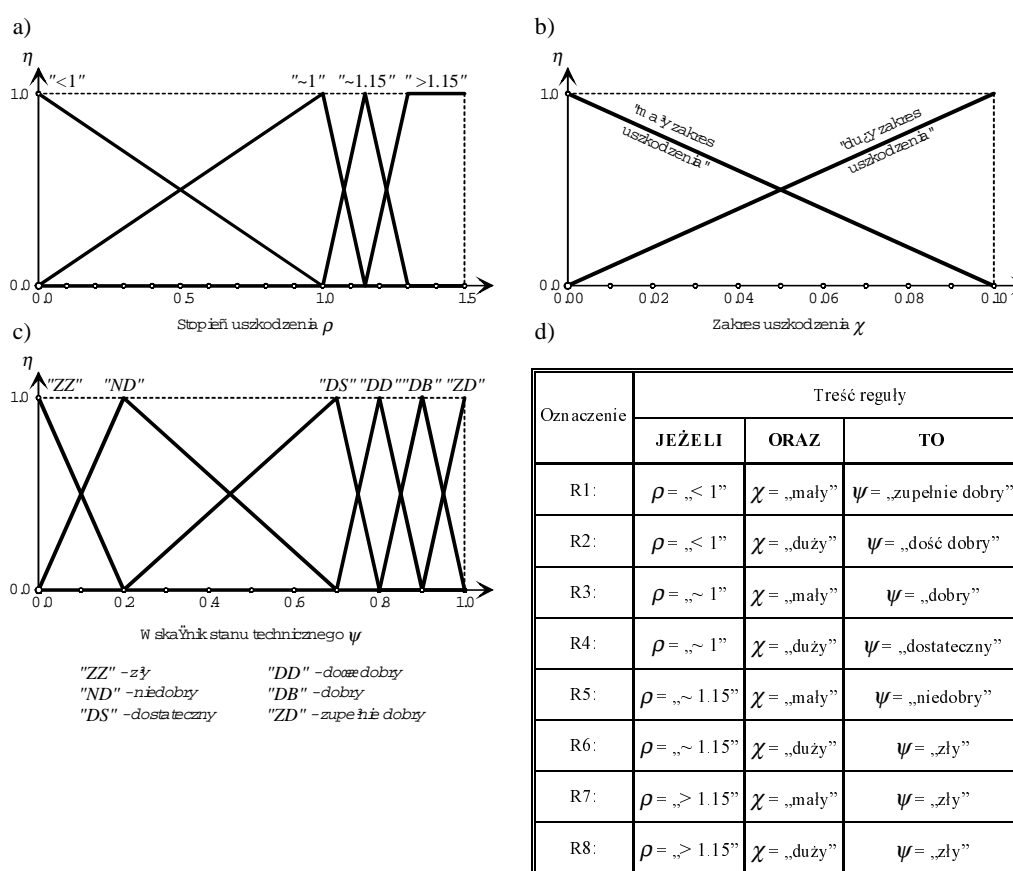
Funkcje przynależności przesłanek reguł wnioskowania, przyjęte w prezentowanym przykładzie dla stali St3M, przedstawiono na rys. 6.42a (dla stopnia uszkodzenia ρ) oraz na rys. 6.42b (dla zakresu uszkodzenia χ). Funkcje przynależności konkluzji reguł wnioskowania (wskaźnik stanu technicznego ψ) prezentuje natomiast rys. 6.42c. Baza reguł wnioskowania przybliżonego zawiera osiem reguł, które zestawiono na rys. 6.42d.

Przykład przebiegu procesu przybliżonego wnioskowania z użyciem funkcji przynależności oraz reguł przedstawionych na rys. 6.42 prezentuje rys. 6.43. Zastosowano tu metodę *MIN-MAX* z wykorzystaniem operatora implikacji Mamdaniego (patrz rozdział 4.), a do agregacji przesłanek w regułach – operator *MIN*. W procesie ostrzenia (defuzyfikacji) zastosowano rozszerzoną metodę środka ciężkości. W prezentowanym przykładzie dla stopnia uszkodzenia $\rho=1,075$ oraz zakresu uszkodzenia $\chi=0,02$ uzyskano ocenę stanu technicznego wynoszącą $\psi=0,41$ w znormalizowanej skali od 0 do 1.

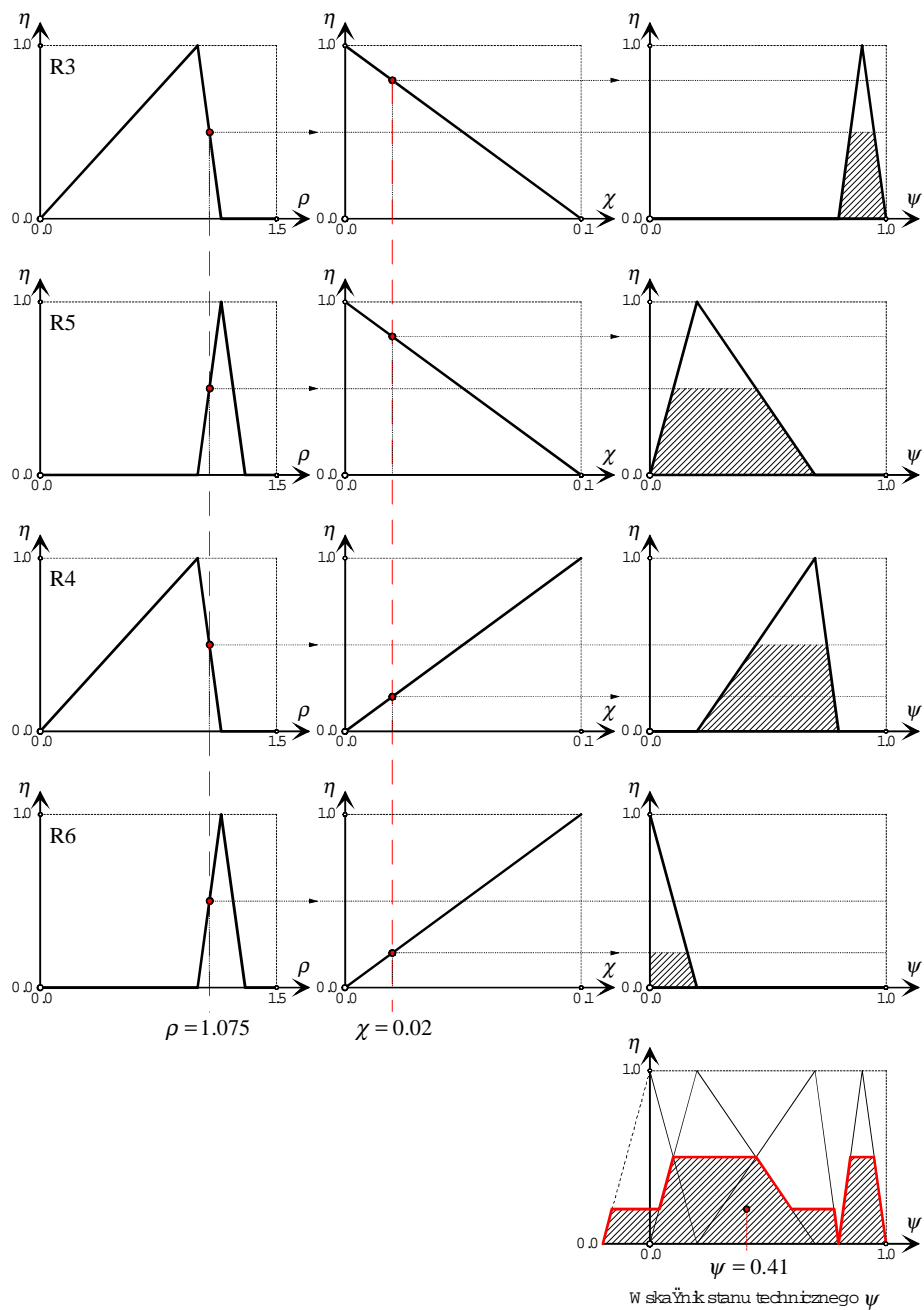
Sposób definiowania właściwości rozmytego komponentu realizującego opisany wyżej proces oceny stanu technicznego dźwigarów blachownicowych przedstawiono

na kolejnych rysunkach ilustrujących podstawowe fazy przygotowania komponentu przy użyciu systemu NEURITIS. Można wyróżnić następujące etapy:

- opis oraz definiowanie charakterystyk wszystkich wejść oraz wyjść komponentu (rys. 6.44);
- definiowanie funkcji przynależności poszczególnych wejść i wyjść komponentu (rys. 6.45);
- określenie reguł przybliżonego wnioskowania (rys. 6.46a);
- wybór operatorów wykorzystywanych w procesie wnioskowania (rys. 6.46b).

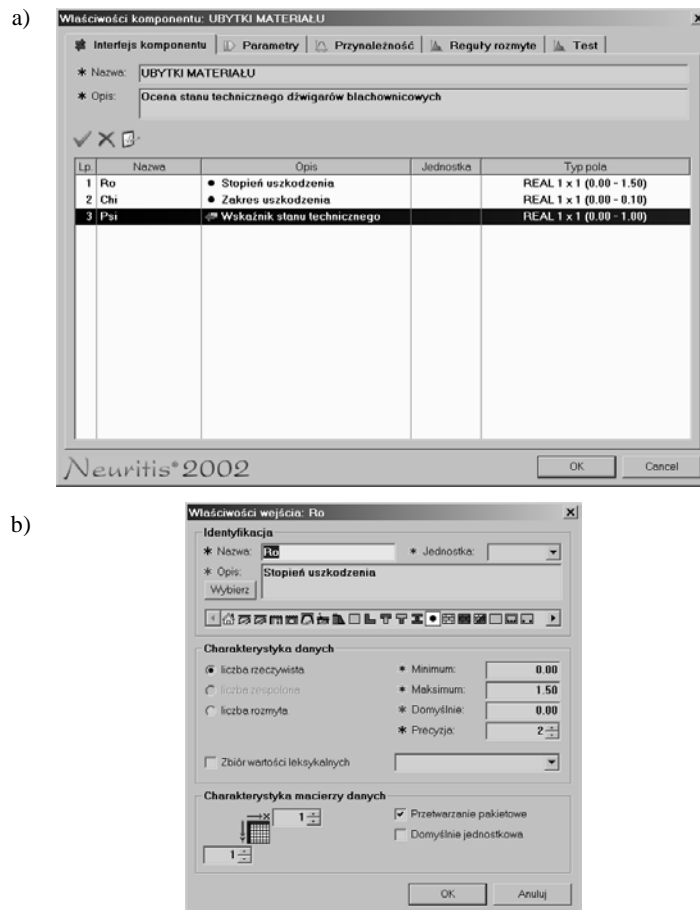


Rys. 6.42. Funkcje przynależności przesłanek i konkluzji reguł przybliżonego wnioskowania w komponentie rozmytym „UBYTKI MATERIAŁU” sieci hybrydowej BBS1:
 a) przesłanka „stopień uszkodzenia ρ ”, b) przesłanka „zakres uszkodzenia χ ”,
 c) konkluzja „wskaznik stanu technicznego ψ ”, d) baza reguł wnioskowania

Rys. 6.43. Przykład przybliżonego wnioskowania metodą *MAX-MIN*

Przedstawiony wyżej komponent rozmyty „UBYTKI MATERIAŁU” zastosowano do oceny stanu technicznego dźwigarów głównych, których funkcję wrażliwości $\omega^{\sigma, \tau}(\xi)$ prezentuje rys. 6.37. Wyniki oceny w postaci wartości wskaźnika stanu technicznego ψ dla różnych wariantów równoczesnego występowania uszkodzeń zestawiono w tab. 6.4.

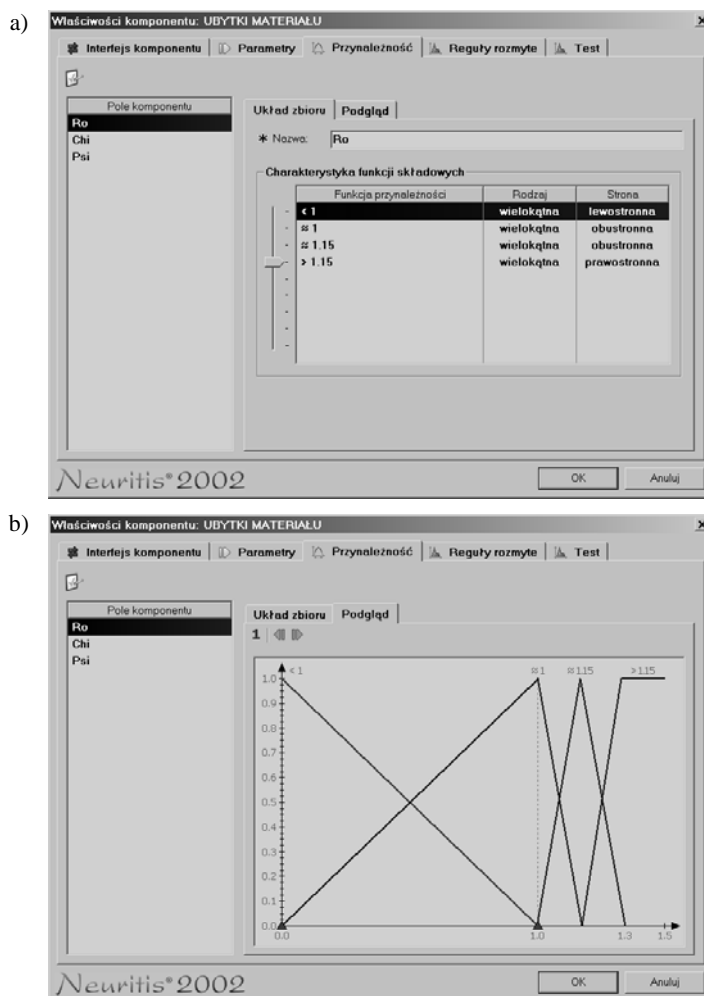
Sposób oceny stanu technicznego części składowych obiektów mostowych na podstawie stopnia uszkodzenia ρ oraz zakresu uszkodzenia χ ma charakter ogólny i może być stosowany przy dowolnych modelach geometrii rozpatrywanej konstrukcji. Pozwala on także na uwzględnianie w ocenie stanu technicznego innych rezultatów analiz statyczno-wytrzymałościowych niż siły wewnętrzne – na przykład ugięć.



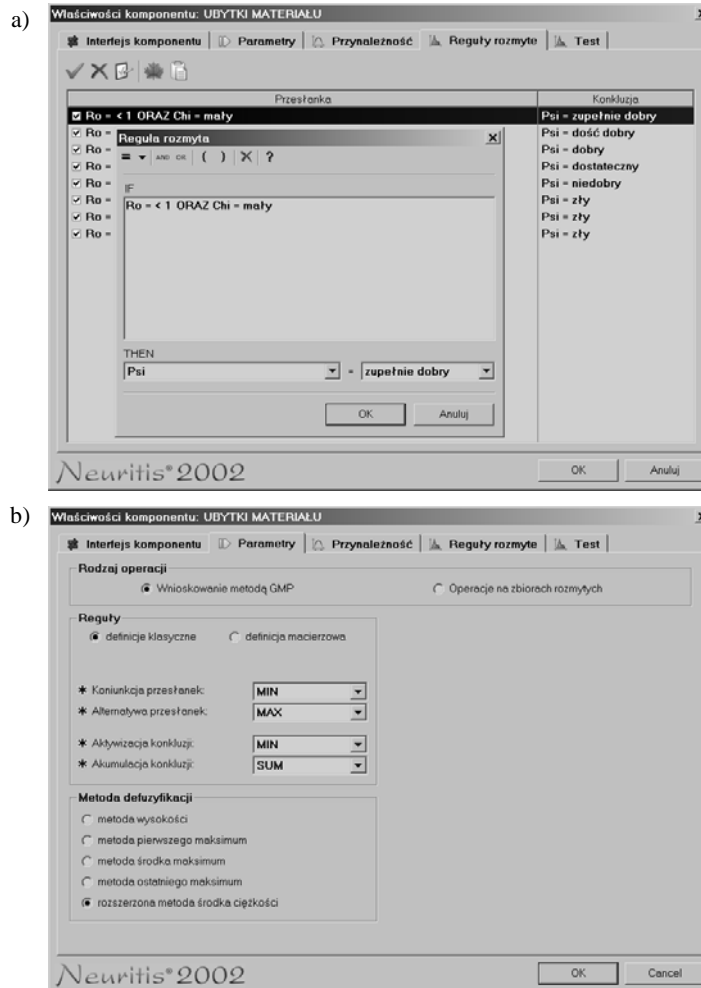
Rys. 6.44. Rozmyty komponent „UBYTKI MATERIAŁU”:

a) opis wejść i wyjść komponentu, b) definiowanie parametrów wejścia „Ro”

Możliwości te omówiono na przykładzie przęsła z rys. 6.21 modelowanego jako ruszt płaski przedstawiony na rys. 6.47a. Analizę stanu technicznego dźwigarów głównych przeprowadzono przyjmując, że dźwigar A doznał uszkodzenia polegającego na ubytku materiału dolnej półki. Uszkodzenie to o intensywności $I^u = \Delta F_p / F_p = 0,4$ występuje na odcinku długości 2,00 m zlokalizowanym w sposób pokazany na rys. 6.47a. W analizie uwzględniono wpływ rozpatrywanego uszkodzenia na naprężenia normalne σ oraz na pionowe ugięcia Δz .



Rys. 6.45. Rozmyty komponent „UBYTKI MATERIAŁU”: a) definiowanie zbiorów rozmytych wejścia „Ro”, b) wykresy funkcji przynależności zdefiniowanych zbiorów



Rys. 6.46. Rozmyty komponent „UBYTKI MATERIAŁU”: a) definiowanie reguł przybliżonego wnioskowania, b) definiowanie parametrów (operatorów) wnioskowania

Uzyskane wyniki przedstawiono: dla uszkodzonego dźwigara A – na rys. 6.47b oraz dla nieuszkodzonego dźwigara B – na rys. 6.47c. Dla każdego z dźwigarów pokazano:

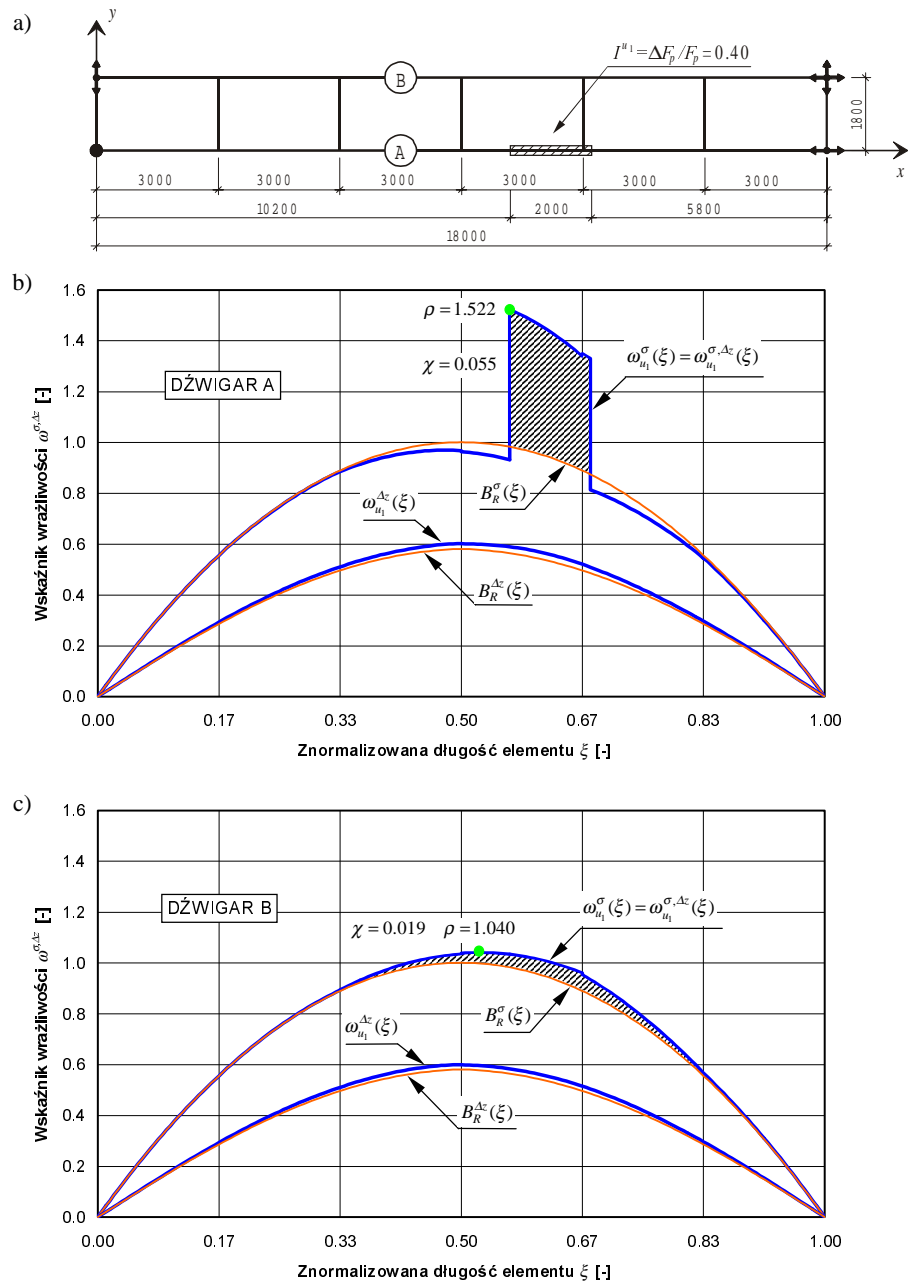
- obwiednię wykorzystania dopuszczalnych ugięć Δz w konstrukcji nieuszkodzonej $B_R^{\Delta z}(\xi)$; wartości rzędnych tej obwiedni wyznaczono jako iloraz wartości obwiedni ugięć konstrukcji nieuszkodzonej i wartości ugięcia dopuszczalnego $R^{\Delta z}$, które dla rozpatrywanego przęsła wynosi $R^{\Delta z} = L/600$;

- funkcję wrażliwości dźwigara na rozpatrywane uszkodzenie określoną z uwagi na ugięcie Δz i oznaczoną jako $\omega_{u_1}^{\Delta z}(\xi)$;
- obwiednię wykorzystania wytrzymałości materiału z uwagi na naprężenia normalne σ , oznaczoną jako $B_R^\sigma(\xi)$;
- funkcję wrażliwości dźwigara na rozpatrywane uszkodzenie określoną z uwagi na naprężenia σ i oznaczoną jako $\omega_{u_1}^\sigma(\xi)$.

Tab. 6.4. Ocena stanu technicznego dźwigarów głównych na podstawie funkcji wrażliwości $\omega^{\sigma,\tau}(\xi)$
z rys. 6.37

Uszkodzenia	Stopień uszkodzenia ρ	Zakres uszkodzenia χ	Znormalizowany wskaźnik stanu technicznego ψ
A	0,844	0,017	0,882
B	1,195	0,032	0,132
C	0,906	0,020	0,845
A+B	1,195	0,049	0,099
A+C	0,906	0,037	0,835
B+C	1,195	0,052	0,092
A+B+C	1,195	0,069	0,058

W prezentowanym przykładzie globalna obwiednia wrażliwości, uwzględniająca naprężenia σ oraz ugięcia Δz , jest identyczna z funkcją wrażliwości z uwagi na naprężenia σ , gdyż $\omega_{u_1}^{\sigma,\Delta z}(\xi) = \text{MAX}[\omega_{u_1}^\sigma(\xi), \omega_{u_1}^{\Delta z}(\xi)] = \omega_{u_1}^\sigma(\xi)$. Na podstawie wartości parametrów ρ oraz χ (rys. 6.47) można, przy użyciu przedstawionej wyżej procedury przybliżonego wnioskowania realizowanego przez komponent rozmyty, określić wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego ψ . Dla rozpatrywanych dźwigarów wskaźniki te przyjmują wartości: $\psi_A = 0,00$ oraz $\psi_B = 0,64$.



Rys. 6.47. Wyznaczanie parametrów stanu technicznego dźwigarów głównych przęsła z rys. 6.21 przy wykorzystaniu modelu geometrii klasy (e^1, p^2) : a) model geometrii przęsła, b) funkcja wrażliwości dźwigara A, c) funkcja wrażliwości dźwigara B

6.2.3. Ocena stanu technicznego obiektów na podstawie ocen stanu ich części składowych

Przedstawiona w niniejszej monografii metodyka określania stanu technicznego umożliwia, przy wykorzystaniu wspomagających narzędzi ekspertowych, ujednoliconą ocenę podstawowych części składowych obiektów mostowych. W systemach wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej niezbędne jest także zdefiniowanie sposobu oceny stanu technicznego całego obiektu. Oceny takie to z reguły miary liczbowe określone w przyjętej skali ocen stanu technicznego. Miary te są wykorzystywane przede wszystkim do porównywania stanu technicznego obiektów objętych działaniem systemu, a w konsekwencji do planowania działań utrzymaniowych i dystrybucji związanych z tym funduszy.

W niektórych z użytkowanych obecnie na świecie systemów taka globalna ocena stanu obiektu jest formułowana na specjalnie określonych zasadach, bez formalnego powiązania z ocenami poszczególnych elementów obiektu. W wielu innych systemach ocena stanu technicznego obiektu jest określana na podstawie ocen stanu części składowych, przy wykorzystaniu algorytmu obowiązującego w całym systemie. Regułą przyjętą praktycznie we wszystkich systemach jest określanie stanu technicznego obiektu w formie pojedynczej oceny liczbowej. Ocena taka z konieczności jest pewną uśrednioną miarą stanu obiektu i najczęściej nie odwzorowuje w dostatecznym stopniu rzeczywistej sytuacji.

Dla zapewnienia pełniejszego obrazu stanu każdego obiektu mostowego proponuje się wykorzystywanie w komputerowych systemach wspomagających dwóch innych sposobów reprezentacji stanu technicznego, a mianowicie:

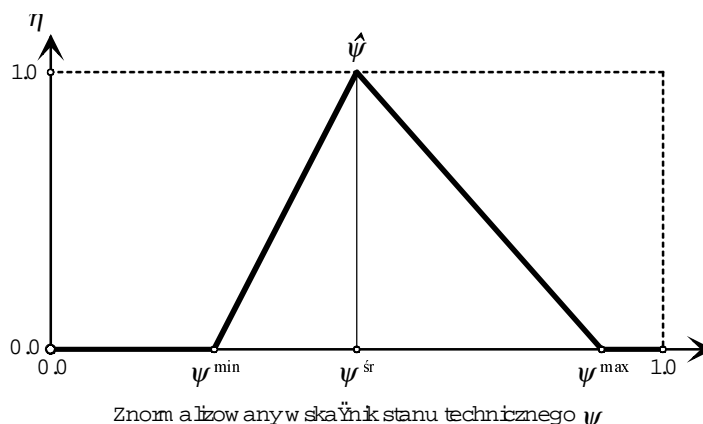
- wektorów stanu technicznego $\{\psi\}$;
- rozmytej miary stanu technicznego $\hat{\psi}$.

Przy użyciu koncepcji *wektorów stanu technicznego* ocenę całego obiektu tworzą oceny wszystkich jego części składowych uporządkowane w formie wektora:

$$\{\psi\} = [\{\psi_p\}, \{\psi_d\}, \{\psi_t\}, \{\psi_b\}, \{\psi_o\}, \{\psi_w\}, \{\psi_k\}, \{\psi_r\}]^T \quad (6.11)$$

gdzie:

- $\{\psi_p\} = [\psi_{p_1}, \dots, \psi_{p_n}]^T$ – wektor stanu technicznego podpór zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego poszczególnych podpór,
- $\{\psi_d\} = [\psi_{d_1}, \dots, \psi_{d_m}]^T$ – wektor stanu technicznego dźwigarów głównych zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego dźwigarów głównych poszczególnych przęseł,
- $\{\psi_t\} = [\psi_{t_1}, \dots, \psi_{t_m}]^T$ – wektor stanu technicznego pomostów zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego pomostów poszczególnych przęseł,



Rys. 6.48. Trójkątna liczba rozmyta reprezentująca stan techniczny obiektu mostowego

$\{\psi_b\} = [\psi_{b_1}, \dots, \psi_{b_m}]^T$ – wektor stanu technicznego łożysk zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego łożysk poszczególnych przęseł,

$\{\psi_o\} = [\psi_{o_1}, \dots, \psi_{o_i}]^T$ – wektor stanu technicznego odwodnienia zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego poszczególnych elementów systemu odwodnienia,

$\{\psi_w\} = [\psi_{w_1}, \dots, \psi_{w_i}]^T$ – wektor stanu technicznego wyposażenia zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego poszczególnych elementów wyposażenia,

$\{\psi_k\} = [\psi_{k_1}, \dots, \psi_{k_i}]^T$ – wektor stanu technicznego urządzeń obcych zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego poszczególnych urządzeń obcych,

$\{\psi_r\} = [\psi_{r_1}, \dots, \psi_{r_i}]^T$ – wektor stanu technicznego przeszkody zawierający wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego pokonywanych przeszkód.

Szczegółowy układ i zawartość wektora stanu technicznego zależą od rodzaju oraz liczby części składowych obiektu mostowego podlegających ocenie w systemie wspomagającym eksploatację. Przedstawiona wyżej struktura tego wektora ma charakter przykładowy i prezentuje rozwiązanie zaproponowane przez autora na potrzeby systemu SMOK [35].

Drugim proponowanym sposobem reprezentacji stanu technicznego obiektu jest *rozmyta miara stanu technicznego* $\hat{\psi}$. Odzworowanie stanu technicznego stanowi tu trójkątna liczba rozmyta, zdefiniowana jako:

$$\hat{\psi} = (\psi^{\min}, \psi^{\text{sr}}, \psi^{\max}) \quad (6.12)$$

gdzie:

ψ^{\min} – wartość znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego najniższej ocenionej części składowej obiektu,

ψ^{sr} – średnia arytmetyczna wartości znormalizowanych wskaźników stanu technicznego wszystkich rozpatrywanych części składowych obiektu,

ψ^{\max} – wartość znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego najwyższej ocenionej części składowej obiektu.

Graficzną ilustrację rozmytej miary stanu technicznego w postaci trójkątnej liczby rozmytej pokazano na rys. 6.48.

6.3. Ocena przydatności użytkowej obiektów mostowych przy wykorzystaniu narzędzi ekspertowych

6.3.1. Rozmyty model przydatności użytkowej

Ocena *przydatności użytkowej* obiektów mostowych jest jedną z podstawowych miar wykorzystywanych w systemowym wspomaganie eksploatacji infrastruktury komunikacyjnej. Zagadnienia związane z ujednoczeniem kryteriów i metod oceny przydatności użytkowej mostów stanowią przedmiot wielu badań, w tym także licznych prac prowadzonych w naszym kraju (np. [42], [46], [122], [215], [216], [217], [218], [297], [300], [301], [332], [333], [359], [362]). Formulowane kryteria oceny *przydatności użytkowej* obiektów mostowych są z reguły formulowane w kategoriach logiki dwuwartościowej. Umożliwia to kwalifikowanie każdego obiektu jako niespełniającego lub spełniającego rozpatrywane wymagania użytkowe. Podejście takie obowiązuje także w naszym kraju, a kryteria oceny przydatności użytkowej są określane odrębnymi przepisami w odniesieniu do obiektów drogowych (np. [166], [294]) oraz kolejowych (np. [292], [352]). Z punktu widzenia potrzeb systemowego wspomaganie eksploatacji infrastruktury mostowej taki dwuwartościowy podział nie wydaje się wystarczająco precyzyjny. Główną jego wadą jest to, że nie umożliwia on określania *stopnia* ewentualnego niespełnienia przez obiekt mostowy stawianych wymagań użytkowych. W rezultacie zarówno obiekt, który nie spełnia kryteriów tylko w minimalnym zakresie, jak i obiekt o parametrach użytkowych drastycznie różniących się od wymaganych są kwalifikowane do tej samej grupy obiektów „nienormatywnych”. Stwarza to niewielkie możliwości różnicowania ocen przydatności obiektów, a w konsekwencji ogranicza efektywność podejmowanych decyzji.

W niniejszej monografii proponuje się usunięcie tej niedogodności przez wprowadzenie *rozmytego modelu przydatności użytkowej* obiektów mostowych.

Prezentowany sposób oceny przydatności użytkowej opracowano, przyjmując następujące podstawowe założenia:

- miarą spełnienia wymagań dotyczących każdego parametru użytkowego jest wartość *znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej* $\bar{\psi}$;
- znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej $\bar{\psi}$ może przyjmować wartości z przedziału od 0,0 (całkowita nieprzydatność użytkowa) do 1,0 (pełna przydatność użytkowa);
- niezależnej ocenie podlega każdy z następujących *parametrów użytkowych*:
 - *nośność* – rozumiana jako najniższa klasa obciążenia ruchomego, dla której obiekt spełnia wymagania obowiązującego układu norm projektowania [262], [263], [264], [265]; miarą przydatności użytkowej z uwagi na nośność jest wartość wskaźnika przydatności użytkowej $\bar{\psi}_n$;
 - *prędkość ruchu pojazdów* – rozumiana jako maksymalna dopuszczalna prędkość ruchu taboru (samochodowego lub kolejowego) na obiekcie; miarą przydatności użytkowej jest wartość wskaźnika przydatności użytkowej $\bar{\psi}_v$;
 - *wymiary skrajni budowli na obiekcie* – których ocenami są wartości wskaźników przydatności użytkowej z uwagi na poszczególne rodzaje skrajni ruchu wymagane na obiekcie: $\bar{\psi}_k, \bar{\psi}_t, \bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r, \bar{\psi}_p$;
 - *wymiary skrajni budowli pod obiektem* – których ocenami są wartości wskaźników przydatności użytkowej z uwagi na poszczególne rodzaje skrajni ruchu wymagane pod obiektem: $\bar{\psi}_k, \bar{\psi}_t, \bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r, \bar{\psi}_p, \bar{\psi}_z$,

gdzie:

$\bar{\psi}_k$ – znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej ze względu na skrajnię kolejową,

$\bar{\psi}_t$ – znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej ze względu na skrajnię tramwajową,

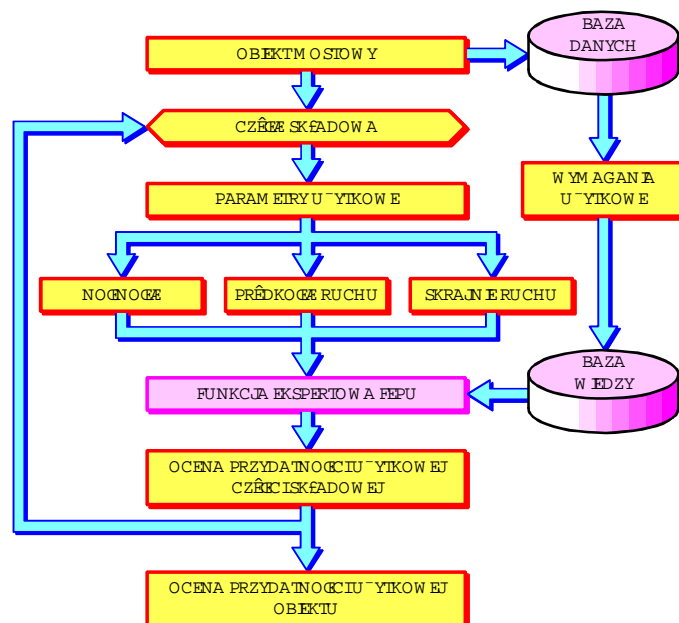
$\bar{\psi}_s$ – znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej ze względu na skrajnię drogową,

$\bar{\psi}_r$ – znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej ze względu na skrajnię ruchu rowerowego,

$\bar{\psi}_p$ – znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej ze względu na skrajnię ruchu pieszego,

$\bar{\psi}_z$ – znormalizowany wskaźnik przydatności użytkowej ze względu na skrajnię żeglugową;

- oceny przydatności użytkowej są formułowane odrębnie dla każdego przesła obiektu mostowego;



Rys. 6.49. Ogólny schemat procesu oceny przydatności użytkowej obiektu mostowego z użyciem funkcji ekspertowej

- proces oceny przydatności użytkowej jest wspomagany systemowymi narzędziami ekspertowymi wykorzystującymi zasoby bazy danych i bazy wiedzy systemu.

Ogólny schemat procesu oceny obiektu mostowego pod kątem jego przydatności użytkowej zaprezentowano na rys. 6.49. Dla każdego z przęseł obiektu określone są aktualne wartości parametrów użytkowych, a następnie – za pomocą *Funkcji Ekspertowej Przydatności Użytkowej* (FEPU) – ocenia się, w jakim stopniu spełnione są wymagania użytkowe zdefiniowane w bazie danych systemu. W prezentowanym rozwiązaniu ocena przydatności jest wyznaczana na podstawie trzech danych:

- *aktualnej* wartości rozpatrywanego parametru użytkowego określonej z uwzględnieniem stanu technicznego obiektu;
- *wymaganej* wartości tego parametru wynikającej z potrzeb układu komunikacyjnego;
- *minimalnej* wartości analizowanego parametru umożliwiającej jeszcze eksploatację obiektu.

Wymagane oraz *minimalne* wartości parametrów użytkowych są określone indywidualnie dla każdego obiektu mostowego przez jego właściciela lub zarządcę na podstawie analizy wymagań układu komunikacyjnego. Zgodnie z koncepcją przedstawioną w niniejszej monografii informacje te – zdefiniowane dla każdego

prześla obiektu – stanowią jeden z podstawowych elementów *ewidencyjnego modelu* obiektu mostowego (patrz rozdział 2.).

6.3.2. Funkcja ekspertowa wspomagająca ocenę przydatności użytkowej

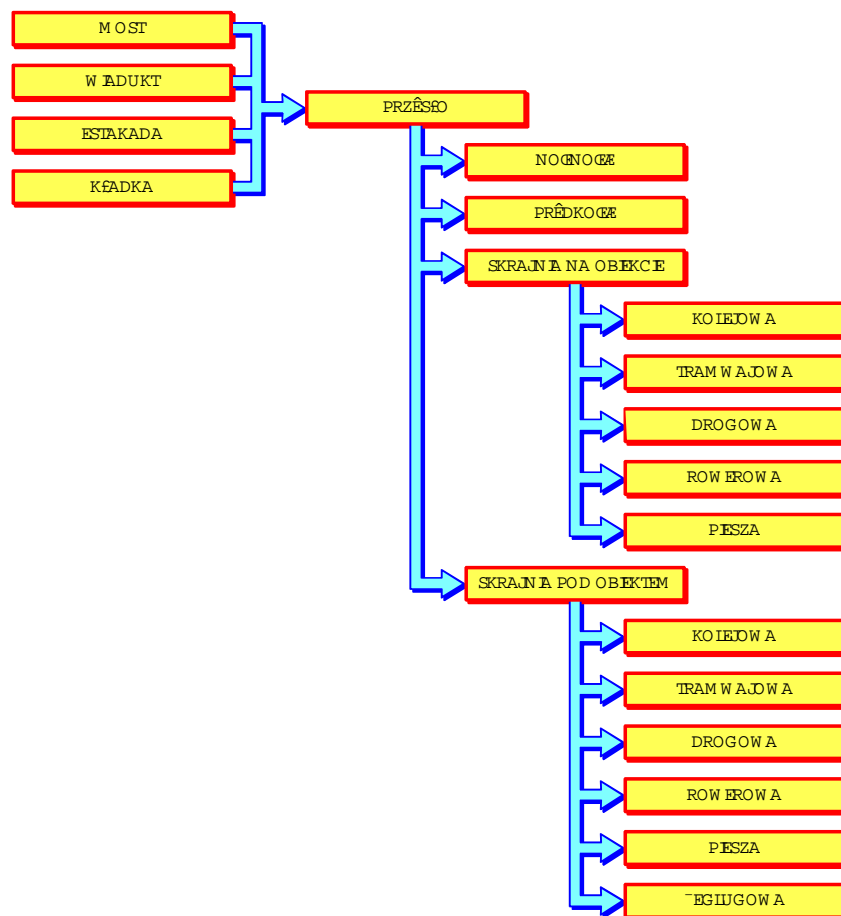
6.3.2.1. Architektura funkcji ekspertowej

Systemowe stosowanie *rozmytego modelu przydatności użytkowej* wymaga posługiwania się narzędziami ekspertowymi umożliwiającymi wykorzystywanie nieprecyzyjnych, rozmytych danych oraz pozwalających na realizację procesu przybliżonego wnioskowania na podstawie rozmytych reguł. Warunki te spełnia przedstawiona niżej *Funkcja Ekspertowa Przydatności Użytkowej* (FEPU) wykorzystująca technologię sieci hybrydowych zaproponowaną w rozdziale 4. Do projektowania i realizacji tej funkcji ekspertowej użyto autorskiego systemu NEURITIS przedstawionego w rozdziale 4.

Strukturę funkcji FEPU zaprojektowano w formie hierarchicznego *Drzewa Zagadnienia* przedstawionego na rys. 6.50. Wszystkim gałęziom tego drzewa, odpowiadającym poszczególnym parametrom użytkowym, są przyporządkowane indywidualnie zdefiniowane sieci hybrydowe, wykorzystujące głównie komponenty rozmyte.

Prezentowana funkcja ekspertowa wspomaga ocenę wszystkich parametrów użytkowych obiektów mostowych. Zestaw takich parametrów użytkowych dotyczących każdego analizowanego przęsła jest selekcyonowany na podstawie danych ewidencyjnych. Danymi wejściowymi funkcji ekspertowej są aktualne i wymagane wartości parametrów użytkowych, a informacją wyjściową jest proponowana wartość znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej $\bar{\psi}_i$ z uwagi na analizowaną cechę użytkową i .

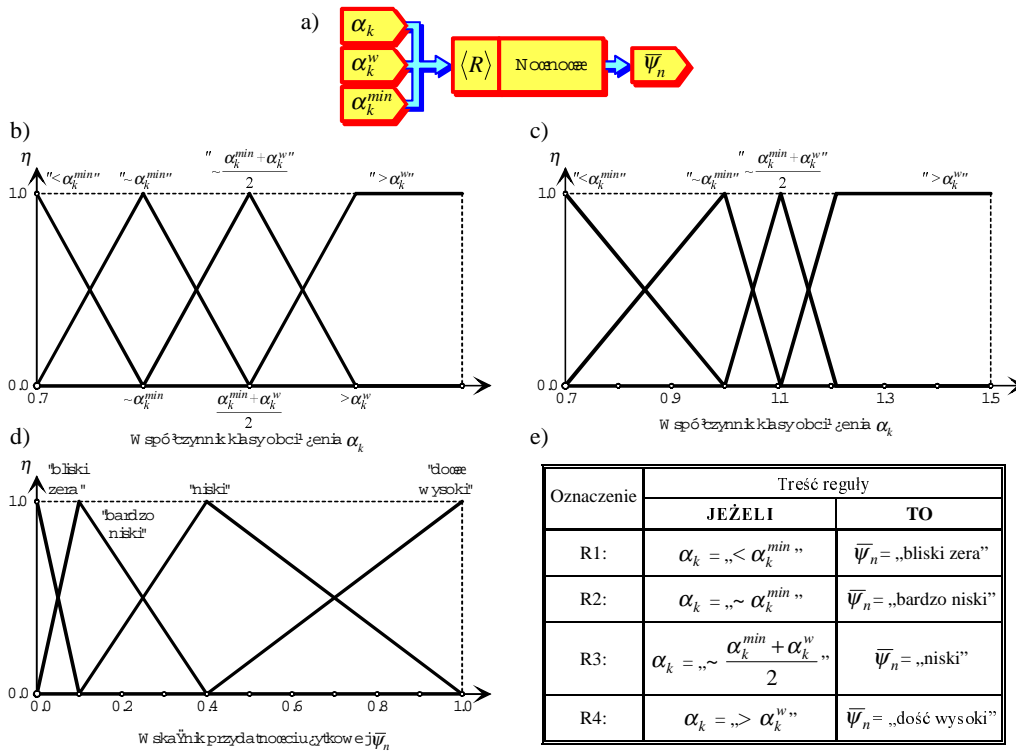
Wymagania użytkowe dotyczące poszczególnych obiektów mostowych są bardzo silnie zróżnicowane i praktycznie muszą być definiowane jako indywidualne cechy każdego obiektu, a nawet każdego przęsła. Wiąże się to z potrzebą opracowania metod, które z jednej strony gwarantowałyby stosowanie w całym systemie jednolitych zasad oceny, a z drugiej strony umożliwiałyby uwzględnianie zindywidualizowanych wymagań. Poniżej przedstawiono koncepcje takich rozwiązań w odniesieniu do podstawowych parametrów użytkowych obiektów mostowych. Prezentowaną metodykę zastosowano w testowej wersji funkcji FEPU wspomagającej ocenę przydatności użytkowej przęseł mostów kolejowych. W aplikacji tej, opracowanej na potrzeby badawczo-rozwojowego systemu SEZAM, do oceny poszczególnych parametrów zastosowano indywidualnie zdefiniowane komponenty rozmyte.



Rys. 6.50. Drzewo Zagadnienia funkcji ekspertowej FEPU

6.3.2.2. Ocena przydatności użytkowej ze względu na nośność

Jako miarę nośności wykorzystywaną w ocenie przydatności użytkowej przęseł kolejowych przyjęto klasę normowych obciążeń ruchomych określaną współczynnikiem klasy obciążenia α_k według [263]. W prezentowanym rozmytym modelu przydatności użytkowej założono, że współczynniki α_k wyznaczone dla eksploatowanych konstrukcji mogą przyjmować nie tylko wartości odpowiadające normowym klasom obciążeń, ale także wartości pośrednie. Jest to konsekwencją przyjętego założenia o możliwości częściowego spełniania przez konstrukcję wymagań określonych przepisami, stanowiącego podstawę proponowanego rozmytego modelu przydatności użytkowej.



Rys. 6.51 Zasoby komponentu rozmytego wspomagającego ocenę przydatności użytkowej przęsła kolejowego z uwagi na nośność: a) schemat funkcjonalny komponentu, b) predefiniowane funkcje przynależności przesłanek, c) zmodyfikowane funkcje przynależności przesłanek dla $\alpha_k^w = 1,21$ oraz $\alpha_k^{min} = 1,00$, d) funkcje przynależności konkluzji, e) reguły wnioskowania

Danymi wejściowymi komponentu są:

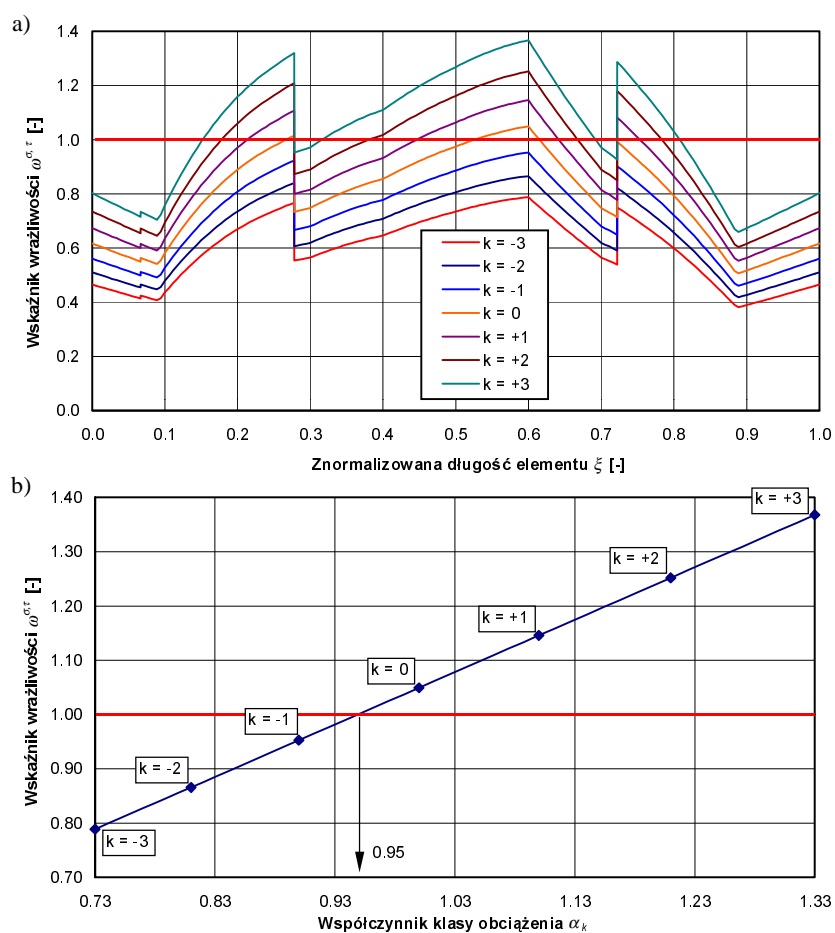
α_k – aktualna wartość współczynnika klasy obciążenia odpowiadająca maksymalnemu obciążeniu ruchomemu, przy którym rozpatrywane przęsło spełnia wymagania normowe w zakresie stanów granicznych nośności i użytkowania;

α_k^w – wymagana wartość współczynnika klasy obciążenia wynikająca z potrzeb trasy komunikacyjnej usytuowanej na analizowanym przęsle;

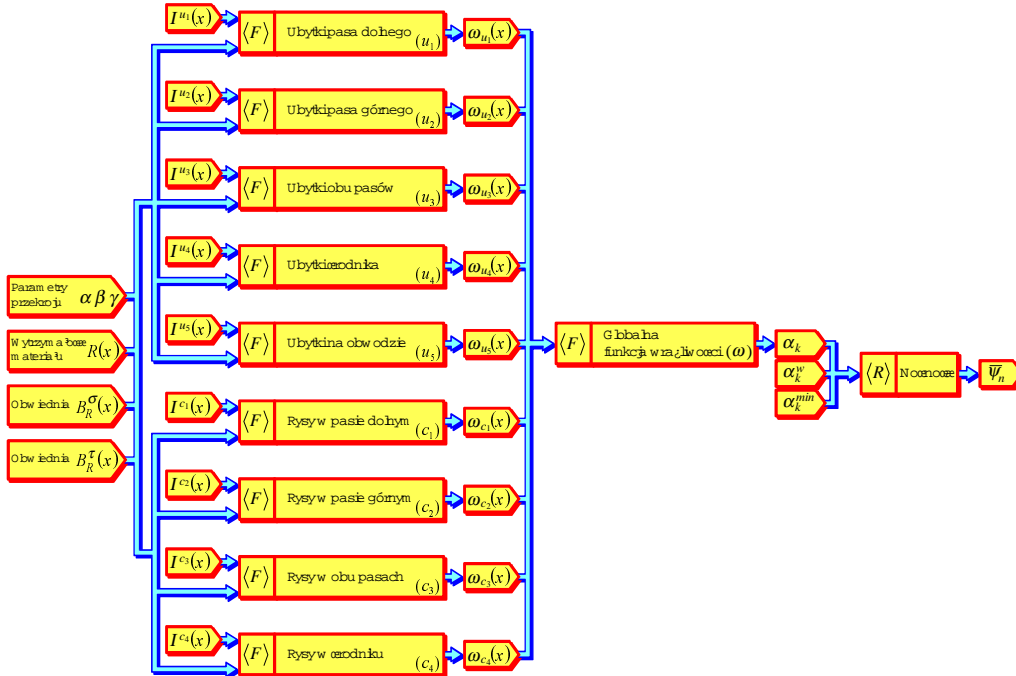
α_k^{min} – minimalna wartość współczynnika klasy obciążenia, przy którym rozpatrywane przęsło zachowuje jeszcze przydatność użytkową.

Wynikiem przetwarzania danych wejściowych przez komponent rozmyty jest wartość znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej $\bar{\psi}_n$. Schemat funkcjonalny komponentu służącego do oceny przydatności użytkowej z uwagi na nośność, przy reprezentacji geometrii obiektu typu E⁰, przedstawiono na rys. 6.51.

W prezentowanym komponencie zastosowano dynamiczny sposób definiowania funkcji przynależności polegający na tym, że w zasobach komponentu predefiniowana jest ogólna postać zestawu funkcji przynależności – modyfikowanych następnie na podstawie danych wejściowych. Dynamiczny sposób definiowania funkcji przynależności zilustrowano na rys. 6.51, który prezentuje zestaw predefiniowanych funkcji przynależności (rys. 6.51b) oraz kształt tych funkcji po modyfikacji na podstawie danych wejściowych (rys. 6.51c). Na rysunku 6.51d pokazano przykład funkcji przynależności konkluzji, a na rys. 6.51e bazę reguł wnioskowania wykorzystywanych do oceny przydatności użytkowej przęśła z uwagi na nośność.



Rys. 6.52. Oszacowanie dopuszczalnych obciążeń taborem kolejowym uszkodzonych blachownicowych dźwigarów głównych: a) funkcje wrażliwości $\omega^{\sigma, \tau}(\xi)$ na uszkodzenia według rys. 6.22 dla różnych klas obciążeń, b) wartości wskaźnika wrażliwości w przekroju krytycznym ($\xi = 0,60$)



Rys. 6.53. Architektura sieci hybrydowej wspomagającej ocenę przydatności użytkowej blachownicowych dźwigarów głównych z uwzględnieniem uszkodzeń (funkcja ekspertowa FEPU/E¹, system SEZAM)

Spośród danych wejściowych komponentu wartości α_k^w oraz α_k^{\min} służą do modyfikacji funkcji przynależności, wartość α_k natomiast jest używana do wyznaczenia wskaźnika przydatności użytkowej $\bar{\psi}_n$ na podstawie zmodyfikowanych zasobów komponentu. Zaproponowana tu metoda dynamicznego definiowania zasobów komponentu w zakresie funkcji przynależności w wielu zastosowaniach znacznie upraszcza proces tworzenia bazy reguł wnioskowania, które mogą w takiej sytuacji być określane na wyższym poziomie ogólności.

W przypadku stosowania modeli geometrii typu E¹ aktualną wartość współczynnika klasy obciążenia α_k można określać przy użyciu *funkcji wrażliwości* konstrukcji na uszkodzenia. Jako przykład przedstawiono na rys. 6.52a funkcje wrażliwości $\omega^{\sigma,\tau}(\xi)$ dźwigarów głównych analizowanego wcześniej przęsła (rys. 6.40). Prezentowane funkcje wrażliwości wyznaczono dla poszczególnych klas normowych obciążeń ruchomych, stosując analogiczną procedurę postępowania jak w przypadku przedstawionej na rys. 6.40 funkcji wrażliwości $\omega^{\sigma,\tau}(\xi)$ skonstruowanej dla obciążeń klasy $k=0$. Na rysunku 6.52b zaprezentowano wartości wskaźnika

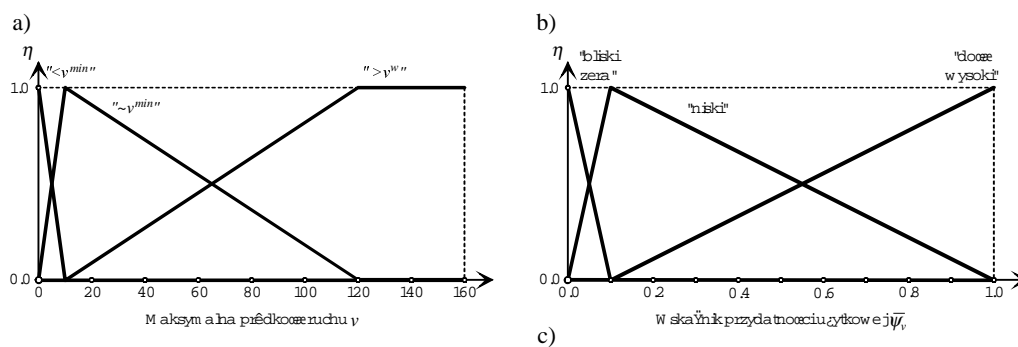
wrażliwości $\omega^{\sigma,\tau}$ dla rozpatrywanych klas obciążeń w krytycznym przekroju ($\xi = 0,60$). Na podstawie tych informacji można określić maksymalne obciążenie ruchome, przy którym rozpatrywane dźwigary spełniają wymagania normowe w zakresie analizowanych naprężeń σ oraz τ . Inaczej definiując można powiedzieć, iż jest to obciążenie, przy którym wartość wskaźnika wrażliwości w żadnym przekroju konstrukcji nie przekracza 1,0. W przykładzie pokazanym na rys. 6.52 warunek ten spełnia obciążenie odpowiadające współczynnikowi klasy obciążenia $\alpha_k = 0,95$.

Do wspomaganie procesu oceny przydatności użytkowej z uwagi na nośność opracowano *Funkcję Ekspertową Przydatności Użytkowej* (FEPU/E¹), a architekturę sieci hybrydowej przeznaczonej do oceny blachownicowych dźwigarów głównych zaprezentowano na rys. 6.53. Do wyznaczania funkcji wrażliwości konstrukcji na ubytki materiału i na uszkodzenia powodujące utratę ciągłości materiału (rysy) zastosowano komponenty wykorzystywane też w funkcji ekspertowej FEST/E¹ (patrz rys. 6.17). Możliwość używania tych samych komponentów w różnych funkcjach ekspertowych to jedna z ważnych zalet technologii sieci hybrydowych.

6.3.2.3. Ocena przydatności użytkowej ze względu na prędkość ruchu

Do oceny przydatności użytkowej z uwagi na dopuszczalną prędkość ruchu zastosowano podobną procedurę jak opisana powyżej w odniesieniu do nośności. Schemat funkcjonalny komponentu rozmytego generującego ocenę przydatności użytkowej $\bar{\psi}_v$ jest analogiczny do pokazanego na rys. 6.51a, a danymi wejściowymi są tu:

v – aktualna dopuszczalna prędkość ruchu pojazdów na obiekcie;



Rys. 6.54. Zasoby komponentu rozmytego wspomagającego ocenę przydatności użytkowej przęsła z uwagi na dopuszczalną prędkość ruchu pojazdów: a) funkcje przynależności przesłanek, b) funkcje przynależności konkluzji, c) reguły wnioskowania

Oznaczenie	Treść reguły	
	JEŻELI	TO
R1:	$v = „< v^{min}”$	$\bar{\psi}_v = „bliski zera”$
R2:	$v = „\sim v^{min}”$	$\bar{\psi}_v = „niski”$
R3:	$v = „> v^{w}”$	$\bar{\psi}_v = „dość wysoki”$

v^w – wymagana prędkość ruchu wynikająca z potrzeb układu komunikacyjnego;

v^{\min} – minimalna prędkość ruchu umożliwiająca eksploatację obiektu (najczęściej przyjmuje się $v^{\min} = 10$ km/godz).

W prezentowanym komponencie zastosowano, przedstawiony wcześniej, dynamiczny sposób definiowania funkcji przynależności. Przykład zdefiniowania funkcji przynależności przesłanek i konkluzji oraz reguł wnioskowania dla prostego modelu rozmytego o trzech ziarnach informacji przedstawiono na rys. 6.54.

W przykładzie tym przyjęto: $v^w = 120$ km/godz oraz $v^{\min} = 10$ km/godz.

6.3.2.4. Ocena przydatności użytkowej ze względu na skrajnie

W prezentowanym rozwiązaniu niezależnej ocenie z punktu widzenia przydatności użytkowej podlegają wszystkie rodzaje skrajni ruchu usytuowane na obiekcie mostowym i pod nim. Z uwagi na metodykę oceny przydatności użytkowej można wyróżnić dwa rodzaje skrajni:

- skrajnie związane z ruchem taboru szynowego (kolejowego i tramwajowego) charakteryzujące się skomplikowanym, a jednocześnie precyzyjnie zdefiniowanym kształtem skrajni budowli oraz skrajni taboru;
- pozostałe rodzaje skrajni (drogowa, rowerowa, piesza, żegluga) o zarysie prostokątnym lub zbliżonym do prostokątnego, dla których nie definiuje się skrajni taboru.

W przypadku skrajni ruchu taboru szynowego jako miarę wykorzystywaną w ocenie przydatności użytkowej proponuje się wartość ewentualnego zmniejszenia wymaganej przepisami odległości δ^w pomiędzy skrajnią taboru a skrajnią budowli (rys. 6.55c). Ponieważ decydujące znaczenie dla przydatności użytkowej ma w tym przypadku najdalej idące odstępstwo od wymagań, miarodajny dla oceny będzie punkt, w którym stosunek rzeczywistej odległości δ między skrajnią taboru a skrajnią budowli do wymaganej odległości δ^w będzie najmniejszy. Zasoby komponentu rozmytego wykorzystywanego do oceny przydatności użytkowej skrajni ruchu szynowego przedstawiono na rys. 6.55, na którym pokazano przykładowe funkcje przynależności przesłanek i konkluzji, jak również reguły przybliżonego wnioskowania.

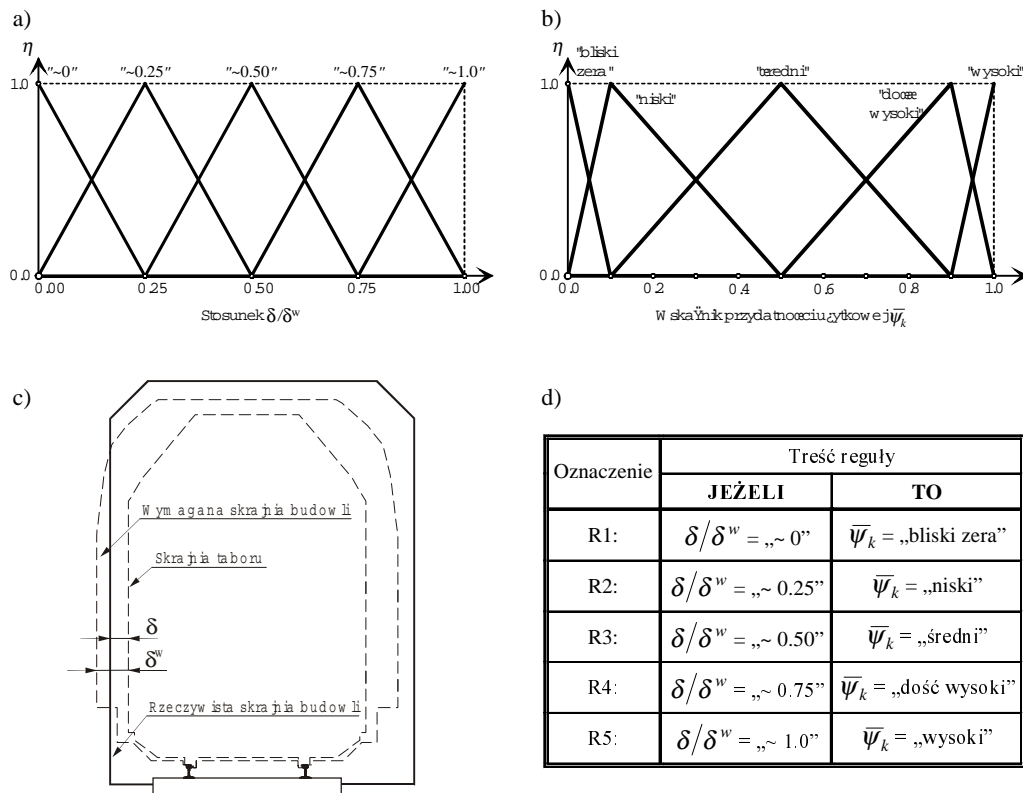
Inną metodykę oceny przydatności użytkowej proponuje się w odniesieniu do skrajni o zarysie prostokątnym. Jako miary wykorzystywane w procesie oceny przyjęto tu wysokość h oraz szerokość b skrajni (rys. 6.56a), a danymi wejściowymi są:

h – aktualna wysokość skrajni;

h^w – wymagana wysokość skrajni;

h^{\min} – minimalna wysokość skrajni, przy której jest możliwe jej użytkowanie;

b – aktualna szerokość skrajni;

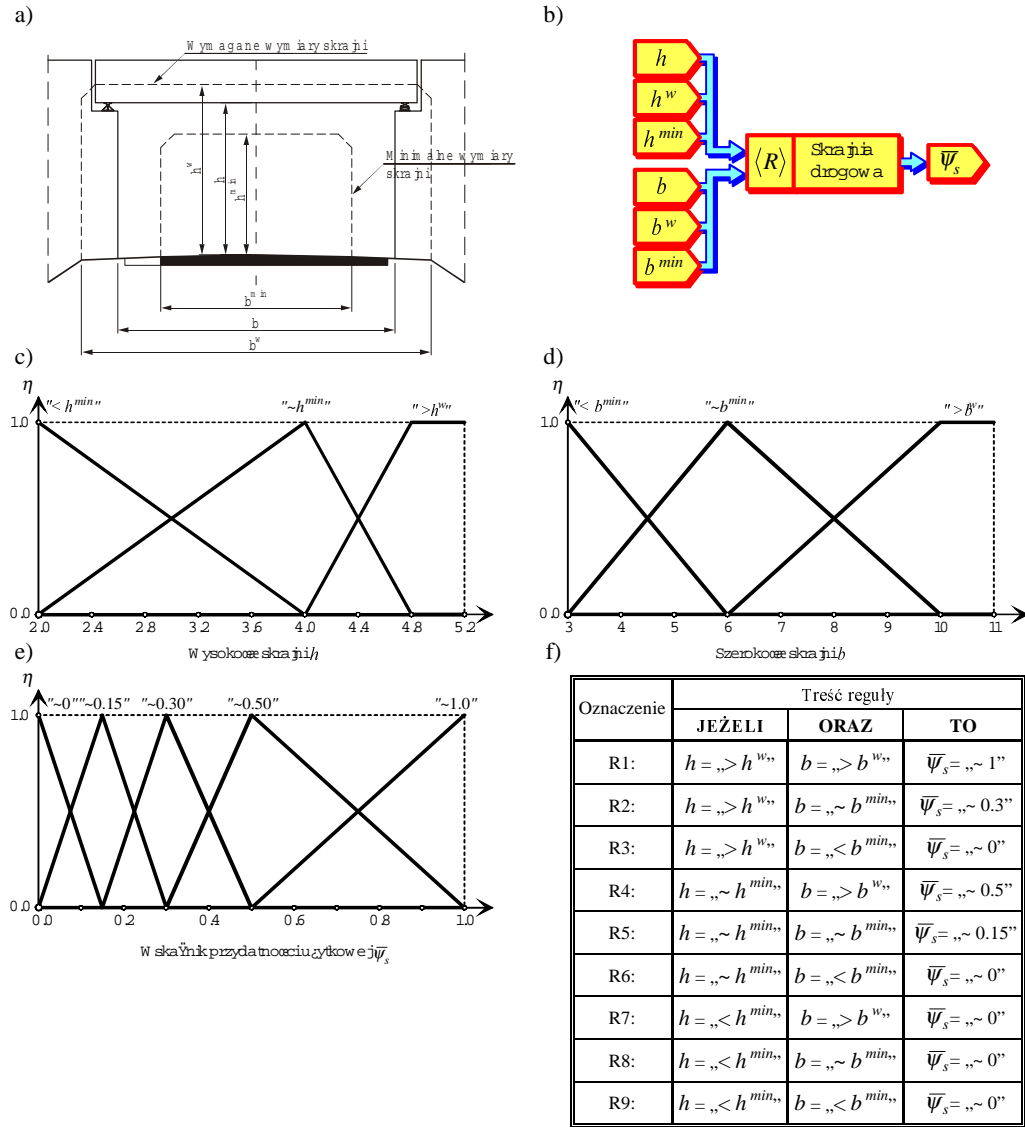


Rys. 6.55. Komponent rozmyty wspomagający ocenę przydatności użytkowej z uwagi na skrajnie ruchu pojazdów szynowych: a) funkcje przynależności przesłanek, b) funkcje przynależności konkluzji, c) przyjęte oznaczenia, d) reguły wnioskowania

b^w – wymagana szerokość skrajni;

b^{\min} – minimalna szerokość skrajni, przy której jest możliwe jej użytkowanie.

Schemat funkcjonalny rozmytego komponentu stosowanego do oceny przydatności użytkowej ze względu na skrajnie o zarysie prostokątnym pokazano na rys. 6.56b. Funkcje przynależności przesłanek w wersji zmodyfikowanej dla następujących wartości danych wejściowych: $h^w = 4,80$ m, $h^{\min} = 4,00$ m, $b^w = 10,00$ m oraz $b^{\min} = 6,00$ m przedstawiono na rys. 6.56c oraz 6.56d. Proponowane funkcje przynależności konkluzji zaprezentowano na rys. 6.56e, natomiast reguły wnioskowania na rys. 6.56f.



Rys. 6.56. Komponent rozmyty wspomagający ocenę przydatności użytkowej z uwagi na skrajnie o zarysie prostokątnym: a) przyjęte oznaczenia, b) schemat funkcjonalny komponentu wspomagającego ocenę, c) funkcje przynależności przesłanki „wysokość skrajni”, d) funkcje przynależności przesłanki „szerokość skrajni”, e) funkcje przynależności konkluzji, f) reguły wnioskowania

6.3.3. Ocena przydatności użytkowej obiektów na podstawie ocen parametrów użytkowych

Przedstawiona wyżej metoda rozmytego modelowania zagadnień związanych z oceną przydatności użytkowej umożliwia stosowanie jednolitych systemowych narzędzi oceny obiektów w odniesieniu do poszczególnych parametrów użytkowych. Proponowane rozwiązanie pozwala na swobodny wybór stopnia złożoności stosowanego modelu rozmytego poprzez dobór liczby zbiorów rozmytych modelujących wejścia i wyjścia, a także liczby reguł wnioskowania. Ze wzrostem złożoności modelu zwiększa się potencjalna dokładność odwzorowania modelowanego zagadnienia, ale jednocześnie bardzo znacznie wzrasta liczba informacji niezbędnych do zdefiniowania parametrów modelu. Praktyczne zastosowania są z reguły kompromisem gwarantującym rozsądny poziom złożoności i uwzględniającym rzeczywisty zasób wiedzy, która może być wykorzystana do kształtowania modelu rozmytego.

Przedstawione w poprzednim podrozdziale proste modele rozmyte ilustrują przede wszystkim proponowaną technologię modelowania zagadnień związanych z oceną przydatności użytkowej, ale w trakcie testowania okazały się także efektywnymi narzędziami o walorach praktycznych.

Do reprezentacji przydatności użytkowej obiektów mostowych w komputerowych systemach wspomagających zarządzanie eksploatacją infrastruktury mostowej proponuje się stosowanie, podobnie jak w przypadku oceny stanu technicznego obiektów, dwóch sposobów:

- wektorów przydatności użytkowej $\{\bar{\psi}\}$;
- rozmytej miary przydatności użytkowej $\hat{\psi}$.

Wektor przydatności użytkowej obiektu mostowego $\{\bar{\psi}\}$, zawierający parametry przydatności użytkowej wszystkich m przęseł rozpatrywanego obiektu, może być przedstawiony w postaci:

$$\{\bar{\psi}\} = [\{\bar{\psi}_n\}, \{\bar{\psi}_v\}, \{\bar{\psi}_g\}, \{\bar{\psi}_d\}]^T \quad (6.13)$$

gdzie:

$\{\bar{\psi}_n\} = [\bar{\psi}_{n_1}, \dots, \bar{\psi}_{n_m}]^T$ – wektor przydatności użytkowej ze względu na nośność, zawierający oceny wszystkich m przęseł;

$\{\bar{\psi}_v\} = [\bar{\psi}_{v_1}, \dots, \bar{\psi}_{v_m}]^T$ – wektor przydatności użytkowej ze względu na dopuszczalną prędkość ruchu pojazdów, zawierający oceny wszystkich m przęseł;

$\{\bar{\psi}_g\} = [\{\bar{\psi}_{g_k}\}, \{\bar{\psi}_{g_r}\}, \{\bar{\psi}_{g_s}\}, \{\bar{\psi}_{g_r}\}, \{\bar{\psi}_{g_p}\}]^T$ – wektor przydatności użytkowej ze względu na skrajnie ruchu usytuowane na obiekcie;

$\{\bar{\psi}_d\} = \left[\{\bar{\psi}_{d_k}\} \{\bar{\psi}_{d_l}\} \{\bar{\psi}_{d_s}\} \{\bar{\psi}_{d_r}\} \{\bar{\psi}_{d_p}\} \{\bar{\psi}_{d_z}\} \right]^T$ – wektor przydatności użytkowej ze względu na skrajnie ruchu usytuowane pod obiektem.

Wektory $\{\bar{\psi}_{g_i}\}$ oraz $\{\bar{\psi}_{d_i}\}$ zawierają oceny przydatności użytkowej z uwagi na skrajnie poszczególnych rodzajów ruchu na obiekcie i pod nim, wyznaczone dla wszystkich m przęseł obiektu:

$$\{\bar{\psi}_{g_i}\} = [\bar{\psi}_{g_{i1}}, \dots, \bar{\psi}_{g_{im}}]^T \quad (6.14a)$$

$$\{\bar{\psi}_{d_i}\} = [\bar{\psi}_{d_{i1}}, \dots, \bar{\psi}_{d_{im}}]^T \quad (6.14b)$$

Drugim proponowanym narzędziem, które może być wykorzystywane do przedstawienia przydatności użytkowej obiektu mostowego, jest *rozmyta miara przydatności użytkowej* $\hat{\psi}$. W rozwiązaniu tym przydatność użytkowa każdego obiektu, podobnie jak stan techniczny obiektu, jest reprezentowana za pomocą trójkątnej liczby rozmytej:

$$\hat{\psi} = (\bar{\psi}^{\min}, \bar{\psi}^{\text{śr}}, \bar{\psi}^{\max}) \quad (6.15)$$

gdzie:

- $\bar{\psi}^{\min}$ – wartość znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej najniższej ocenionego parametru użytkowego obiektu,
- $\bar{\psi}^{\text{śr}}$ – średnia arytmetyczna wartości znormalizowanych wskaźników przydatności użytkowej wszystkich rozpatrywanych parametrów użytkowych obiektu,
- $\bar{\psi}^{\max}$ – wartość znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej najwyższej ocenionego parametru użytkowego obiektu.

6.4. Ocena kondycji obiektów mostowych

6.4.1. Miary kondycji obiektów

Kondycja obiektu mostowego jest, zgodnie z terminologią przyjętą w niniejszej monografii, *ogólnym określeniem obejmującym stan techniczny i przydatność użytkową obiektu*. Miary, jakie mogą być stosowane do jej oceny, wynikają konsekwentnie z miar używanych wcześniej do określania stanu technicznego oraz przydatności użytkowej. Można wyróżnić tu dwa podstawowe rozwiązania, polegające na stosowaniu:

- wektora kondycji obiektu $\{\Psi\}$;
- rozmytej miary kondycji obiektu $\hat{\Psi}$.

Wektor kondycji obiektu $\{\Psi\}$ ma postać:

$$\{\Psi\} = [\{\psi\}, \{\bar{\psi}\}]^T \quad (6.16)$$

gdzie:

$\{\psi\}$ – wektor stanu technicznego obiektu zdefiniowany zgodnie ze wzorem (6.11),

$\{\bar{\psi}\}$ – wektor przydatności użytkowej obiektu określony wzorem (6.13).

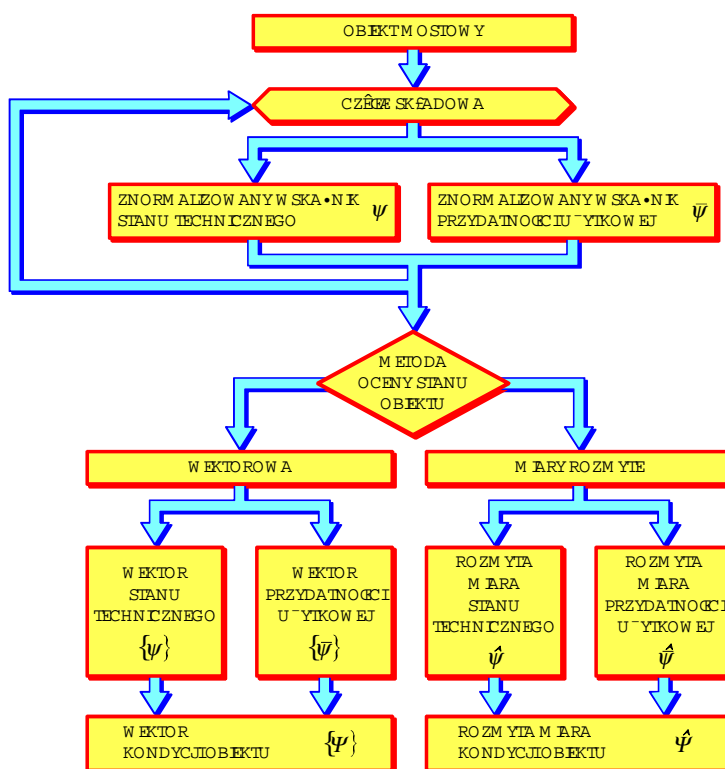
Proponowana w niniejszej pracy *rozmyta miara kondycji obiektu* $\hat{\Psi}$ jest trójkątną liczbą rozmytą zdefiniowaną jako:

$$\hat{\Psi} = (\Psi^{\min}, \Psi^{\text{sr}}, \Psi^{\max}) \quad (6.17)$$

gdzie:

$$\Psi^{\min} = \text{MIN}(\psi^{\min}, \bar{\psi}^{\min}) \quad (6.18)$$

$$\Psi^{\text{sr}} = \frac{\psi^{\text{sr}} + \bar{\psi}^{\text{sr}}}{2} \quad (6.19)$$



Rys. 6.57. Schemat procesu oceny kondycji obiektu mostowego

$$\Psi^{\max} = \text{MAX}(\psi^{\max}, \bar{\psi}^{\max}) \quad (6.20)$$

Występujące powyżej wartości znormalizowanych wskaźników stanu technicznego ψ oraz przydatności użytkowej $\bar{\psi}$ są zdefiniowane analogicznie jak we wzorach (6.11) oraz (6.13). Stosowanie rozmytej miary kondycji obiektu określanej na podstawie ocen stanu technicznego i przydatności użytkowej jest możliwe dzięki zastosowaniu, zarówno do oceny stanu technicznego, jak i przydatności użytkowej, znormalizowanych wskaźników ψ oraz $\bar{\psi}$ przyjmujących wartości z przedziału $[0,1]$.

Ogólny schemat całego procesu oceny kondycji obiektu mostowego według zasad proponowanych w niniejszej monografii przedstawiono na rys. 6.57. Prezentowana procedura może być stosowana w odniesieniu do wszystkich typów obiektów mostowych, zapewniając jednolitość kryteriów ocen używanych w skali całego systemu wspomagającego eksploatację infrastruktury mostowej.

6.4.2. Klasyfikacja obiektów na podstawie ocen ich kondycji

Oceny stanu technicznego, przydatności użytkowej czy też globalne oceny kondycji obiektu, określane według jednolitych zasad proponowanych w niniejszej monografii, mogą być przydatne do wspomagania większości procesów decyzyjnych w zarządzaniu eksploatacją mostów. Dotyczy to szczególnie porównywania kondycji różnych obiektów i klasyfikowania ich według zasad definiowanych przez użytkowników systemu w zależności od rodzaju dokonywanej analizy. Sposoby porównywania kondycji obiektów mostowych zależą od tego, czy wykorzystywane oceny kondycji są prezentowane w postaci wektora kondycji $\{\psi\}$, czy w postaci liczby rozmytej $\hat{\Psi}$.

W przypadku wykorzystywania *wektorów kondycji* $\{\psi\}_i$ proponuje się stosowanie macierzy klasyfikacyjnej $[K]$, której wierszami są zmodyfikowane wektory kondycji $\{\psi^*\}_i$ wszystkich n klasyfikowanych obiektów:

$$[K] = \begin{bmatrix} \{\psi^*\}_1 \\ \vdots \\ \{\psi^*\}_n \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

Wektory kondycji $\{\psi\}_i$ odpowiadające poszczególnym obiektom mają z reguły różne wymiary, wynikające z różnej liczby części składowych obiektów, różnej liczby skrajni ruchu itp. Użycie wektorów $\{\psi\}_i$ jako wierszy macierzy $[K]$ wymaga ich modyfikacji.

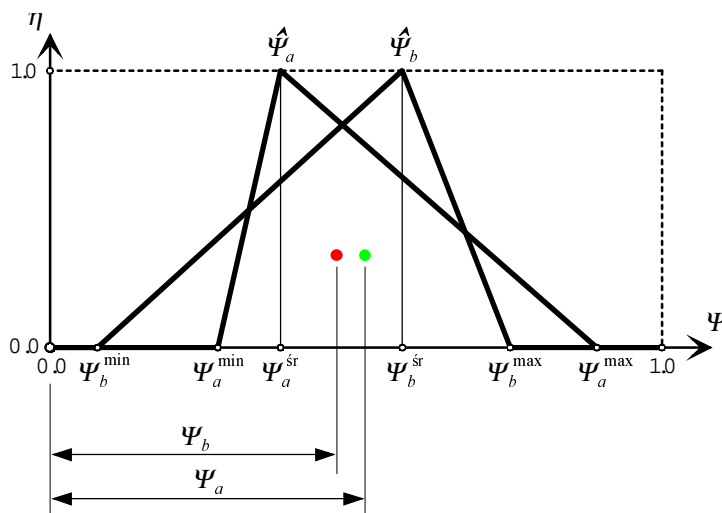
Przekształcenie wektora kondycji $\{\Psi\}_f$ w zmodyfikowany wektor kondycji $\{\Psi^*\}_f$ polega na:

- uzupełnieniu wszystkich wektorów $\{\Psi\}_f$ dodatkowymi elementami (ocenami o wartości równej 1,0) do wymiaru w największego wektora $\{\Psi\}_f$ występującego w całej analizowanej populacji n obiektów;
- uporządkowaniu elementów każdego uzupełnionego wektora $\{\Psi\}_f$ w kolejności niemalejącej pod względem wartości, czyli w kolejności od najniższych do najwyższych ocen będących elementami wektora.

Zmodyfikowane wektory $\{\Psi^*\}_f$, każdy zawierający w elementów, mogą być porównywane i użyte do tworzenia macierzy klasyfikacyjnej $[K]$. Kolejność wektorów $\{\Psi^*\}_f$, stanowiących po transformacji wiersze macierzy $[K]$, jest przyjmowana w taki sposób, aby dla każdego $i=1, \dots, n$ oraz $j=1, \dots, w$ był spełniony warunek:

$$k_{ij} \leq k_{i+1, j} \quad (6.22)$$

gdzie k_{ij} oznacza element macierzy $[K]$.



Rys. 6.58. Porównanie kondycji obiektów a oraz b reprezentowanych za pomocą trójkątnych liczb rozmytych $\hat{\Psi}_a$ oraz $\hat{\Psi}_b$

Tak zdefiniowana macierz $[K]$ zawiera w poszczególnych wierszach transformowane wektory $\{\Psi^*\}_f$ wszystkich n analizowanych obiektów, a numer

wiersza, w którym znajduje się wektor kondycji obiektu i określa jego miejsce na liście klasyfikującej obiekty na podstawie ocen kondycji. Zgodnie ze wzorem (6.22) obiekty w macierzy $[K]$ są uporządkowane w kolejności od najgorszej do najlepszej kondycji.

Gdy oceny kondycji obiektów są zdefiniowane w postaci liczb rozmytych $\hat{\Psi}_i$, proponuje się klasyfikowanie ich za pomocą metody porównywania położenia środków ciężkości poszczególnych liczb rozmytych. Graficzną ilustrację tej procedury przedstawiono na rys. 6.58, na przykładzie dwóch liczb rozmytych $\hat{\Psi}_a$ oraz $\hat{\Psi}_b$ reprezentujących kondycję obiektu a oraz obiektu b . Mniejsza współrzędna położenia środka ciężkości (Ψ_b na rys. 6.58) decyduje o wyższej lokacie obiektu b na liście klasyfikującej w kolejności od najgorszej do najlepszej kondycji.

W przypadku identycznych położenia środków ciężkości liczb rozmytych $\hat{\Psi}_i$ reprezentujących różne obiekty, w procesie klasyfikacji obiektów uwzględniane są dodatkowe kryteria rozpatrywane w następującej kolejności:

- porównanie minimalnych ocen kondycji Ψ_i^{\min} ;
- porównanie średnich ocen kondycji Ψ_i^{sr} ;
- porównanie maksymalnych ocen kondycji Ψ_i^{\max} .

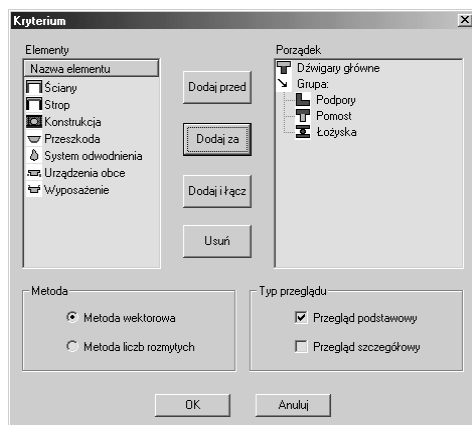
W obu przedstawionych procedurach klasyfikacji obiektów mostowych można korzystać z pełnych zestawów ocen stanu technicznego i przydatności użytkowej każdego obiektu lub też dokonywać klasyfikacji na podstawie wyselekcjonowanych grup danych. Rozwiązanie takie stwarza zarządzającym eksploatacją infrastruktury mostowej szerokie możliwości definiowania kryteriów klasyfikacji. Oznacza to, że obiekty objęte systemem można klasyfikować na przykład na podstawie tylko ocen stanu technicznego podpór lub biorąc pod uwagę stan techniczny dźwigarów głównych i łożysk oraz równocześnie przydatność użytkową z uwagi na nośność i prędkość ruchu. Możliwości definiowania indywidualnych kryteriów klasyfikacji są ograniczone jedynie zasobem danych gromadzonych w systemie komputerowym.

Przykładem praktycznego zastosowania przedstawionych wyżej rozwiązań są narzędzia klasyfikacji obiektów na podstawie ich stanu technicznego, opracowane przez autora na potrzeby systemowego zarządzania mostami kolejowymi. Przyjęta procedura definiowania kryterium klasyfikacji obiektów obejmuje następujące etapy (rys. 6.59):

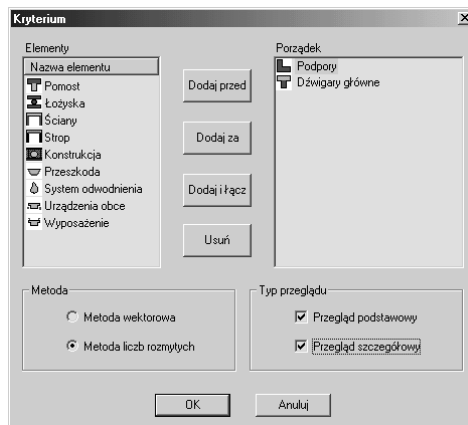
- określenie części składowych (elementów) obiektów, których oceny mają być uwzględniane w procesie klasyfikacji;
- określenie porządku (kolejności) uwzględniania ocen poszczególnych elementów w procesie klasyfikacji;
- zdefiniowanie metody oceny stanu technicznego klasyfikowanych obiektów (wektory stanu technicznego $\{\psi\}$ lub rozmyte miary stanu technicznego $\bar{\psi}$);

- określenie typu przeglądów, których wyniki (oceny stanu technicznego ψ_j elementów obiektu) mają być brane pod uwagę w klasyfikacji.

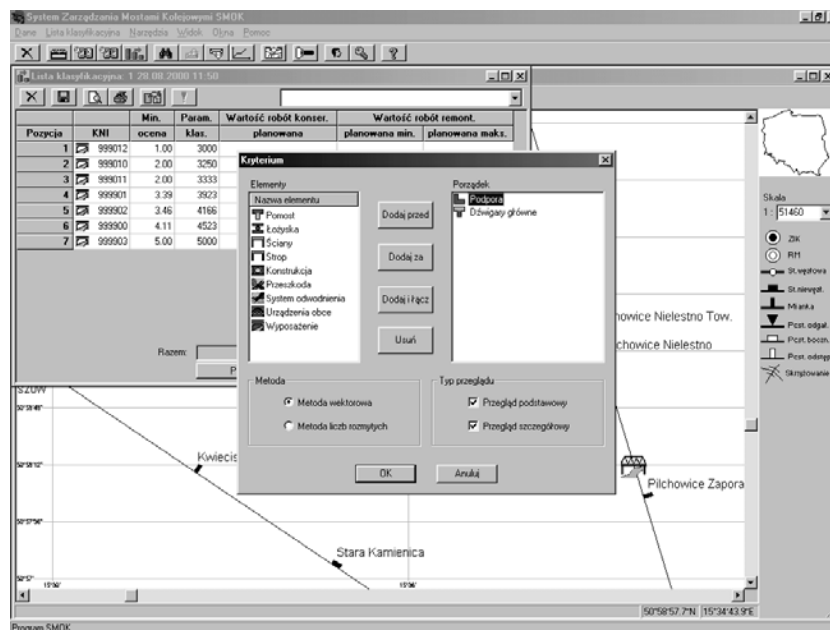
a)



b)



Rys. 6.59. Definiowanie kryterium klasyfikacji obiektów mostowych: a) (dźwigary główne), (podpory + pomost + łożyska), b) (podpory + dźwigary główne)



Rys. 6.60. Przykład kryterium klasyfikacji i wygenerowanej na jego podstawie listy klasyfikacyjnej obiektów

Porządek uwzględniania ocen zdefiniowany w górnej prawej części ekranu oznacza, że w układzie pokazanym na rys. 6.59a w pierwszej kolejności będą uwzględniane oceny stanu dźwigarów głównych, a w przypadku identycznych ocen decydować będzie stan podpór, pomostu i łożysk. Podstawą klasyfikacji będą oceny w postaci wektorów stanu technicznego określonych w trakcie przeglądów podstawowych.

Na rysunku 6.59b przedstawiono przykład zdefiniowania zasad klasyfikacji dokonywanej na podstawie łącznego zbioru ocen stanu technicznego podpór i dźwigarów głównych, przy wykorzystaniu metody liczb rozmytych, z uwzględnieniem wyników przeglądów podstawowych i szczegółowych.

Przykład listy klasyfikacyjnej obiektów mostowych ze względu na ich stan techniczny, określonej zgodnie z przedstawioną wyżej procedurą, przedstawiono na rys. 6.60.

7. UWAGI KOŃCOWE

7.1. Podsumowanie

Niniejsza monografia dotyczy zagadnień modelowania obiektów mostowych na potrzeby systemów komputerowych wspomagających eksploatację infrastruktury komunikacyjnej. Główną uwagę zwrócono na modelowanie technicznych i użytkowych cech obiektów, mające na celu zobiektywizowaną ocenę kondycji infrastruktury mostowej. Ocena ta, obejmująca zarówno ocenę stanu technicznego, jak i ocenę przydatności użytkowej, ma fundamentalne znaczenie w procesie podejmowania decyzji eksploatacyjnych, które w efekcie decydują o sprawności układu komunikacyjnego oraz o szeroko rozumianym bezpieczeństwie konstrukcji i użytkowników. W pracy można wyróżnić dwa powiązane ze sobą obszary obejmujące:

- zagadnienia numerycznego modelowania technicznych i użytkowych cech obiektów mostowych z uwzględnieniem uszkodzeń występujących w trakcie eksploatacji oraz problematykę wykorzystywania tych modeli do oceny kondycji obiektów;
- zagadnienia pozyskiwania, komputerowej reprezentacji oraz wykorzystywania wiedzy w postaci narzędzi ekspertowych wspomagających procesy oceny kondycji obiektów.

Stosunkowo krótka historia, a także interdyscyplinarny charakter inżynierii komputerowych systemów wspomagających eksploatację obiektów mostowych powodują, że wiele – często podstawowych – pojęć z tego obszaru nie doczekało się jeszcze jednoznacznych, powszechnie akceptowanych definicji. W podjętej w niniejszej pracy próbie kompleksowego przedstawienia zagadnień związanych z modelowaniem obiektów mostowych na potrzeby zarządzania ich eksploatacją zaproponowano spójny system definicji i określeń. Propozycje dotyczące definicji podstawowych pojęć przedstawiono w początkowej części pracy, w powiązaniu z analizą kierunków ewolucji prezentowanych systemów oraz strategii ich tworzenia. W wielu przypadkach przytoczono różne spotykane w literaturze sposoby interpretacji poszczególnych określeń, podając proponowany sposób ich ujednolicenia, stosowany następnie w całej monografii.

Zaproponowane w pracy metody numerycznego modelowania cech obiektów zróżnicowano w zależności od stosowanego modelu geometrii konstrukcji. Zaproponowano dwuparametrową klasyfikację modeli geometrii, uwzględniającą rodzaj elementów wykorzystywanych do tworzenia modelu geometrii oraz wymiar przestrzeni, w której model jest konstruowany. W zależności od rodzaju używanych elementów wyróżniono cztery podstawowe typy modeli geometrii: tworzone z elementów bezwymiarowych (E^0), z elementów jedno- (E^1), dwu- (E^2) lub trójwymiarowych (E^3).

Dla poszczególnych typów modeli geometrii zaproponowano sposoby tworzenia ewidencyjnych modeli obiektów, zawierających niezbędne dane techniczne i użytkowe wykorzystywane w procesie gospodarowania infrastrukturą mostową. Możliwości komputerowej implementacji przedstawionych rozwiązań zilustrowano przykładami zastosowań pilotażowych.

Modele ewidencyjne zawierają zaprojektowane wartości parametrów obiektów mostowych, które w trakcie eksploatacji ulegają zmianom w wyniku uszkodzeń stanowiących efekt procesów degradacyjnych. Aby umożliwić uwzględnianie tych zjawisk w numerycznych modelach obiektów, przedstawiono koncepcję jednolitej, hierarchicznej systematyki uszkodzeń oraz sposobów ich numerycznego opisu w systemie komputerowym. Do opisu każdego uszkodzenia zaproponowano stosowanie trzech parametrów charakteryzujących jego: intensywność, rozległość i lokalizację. Przedstawiono szczegółowe zasady modelowania wszystkich typów uszkodzeń w zależności od przyjętego modelu geometrii obiektu. Wykazano, że w przypadku stosowania modeli typu E^1 , E^2 oraz E^3 cechy każdego uszkodzenia można opisać przy użyciu jednej funkcji, nazwanej tu funkcją intensywności uszkodzenia. Przedstawiono przykłady komputerowej realizacji proponowanych sposobów numerycznego modelowania uszkodzeń.

Modele ewidencyjne oraz modele uszkodzeń, zdefiniowane zgodnie z zaprezentowaną jednolitą metodyką, mogą stanowić podstawę zobiektywizowanej oceny kondycji obiektów mostowych. W tym celu podjęto próbę opracowania narzędzi ekspertowych wspomagających procesy oceny stanu technicznego i przydatności użytkowej, składających się na ogólną ocenę kondycji obiektów. Narzędzia te zaproponowano w formie funkcji ekspertowych, należących do funkcji użytkowych kompleksowego systemu wspomagającego eksploatację infrastruktury mostowej. Funkcje ekspertowe określają oceny stanu obiektów na podstawie danych i wiedzy zgromadzonej w systemie komputerowym. Zasoby informacji, a w szczególności wiedzy, wykorzystywane w zarządzaniu eksploatacją obiektów mostowych są bardzo zróżnicowane pod względem źródeł i sposobów pozyskiwania, formy przedstawienia, precyzji itp. W związku z tym zaproponowano hybrydową reprezentację wiedzy łączącą metody symboliczne i niesymboliczne. Jako narzędzia reprezentacji wiedzy zastosowano wielopoziomowe sieci hybrydowe, które mogą być konstruowane z trzech rodzajów komponentów: funkcyjnych, neuronowych

i rozmytych, łączonych we wspólne struktury. Komponenty funkcyjne służą do symbolicznej reprezentacji wiedzy przy użyciu narzędzi klasycznej matematyki, komponenty neuronowe natomiast – do niesymbolicznej reprezentacji wiedzy za pomocą sieci neuronowych. Oba te rodzaje komponentów przetwarzają dane przedstawione w postaci liczb rzeczywistych. Komponenty rozmyte umożliwiają reprezentację wiedzy przy użyciu rozwiązań teorii zbiorów rozmytych, a przetwarzane dane mogą być prezentowane w postaci liczb rzeczywistych, wartości lingwistycznych lub liczb rozmytych.

Specyfika zagadnień związanych z eksploatacją infrastruktury mostowej powoduje, że wiedza na potrzeby funkcji ekspertowych musi być pozyskiwana z wielu źródeł. W pracy przedstawiono wybrane sposoby akwizycji wiedzy z zasobów baz danych systemów wspomagających gospodarowanie mostami, z dokumentacji, a także od ekspertów. Źródłem wiedzy były również wyniki symulacyjnych analiz statyczno-wytrzymałościowych obiektów mostowych wykorzystywane przy użyciu zaproponowanych w pracy funkcji wrażliwości konstrukcji na uszkodzenia.

Do realizacji proponowanej technologii wielopoziomowych sieci hybrydowych opracowano własne oprogramowanie o nazwie NEURITIS, kompleksowo wspomagające proces tworzenia funkcji ekspertowych. Wspomaganie to dotyczy projektowania architektury funkcji ekspertowych, definiowania właściwości poszczególnych komponentów wraz z implementacją w nich pozyskanej wiedzy, a także łączenia komponentów w struktury sieciowe. Oprogramowanie to tworzy także finalne aplikacje użytkowe funkcji ekspertowych.

Technologię sieci hybrydowych zastosowano w funkcjach ekspertowych wspomagających ocenę stanu technicznego obiektów mostowych reprezentowanych przy wykorzystaniu modeli geometrii typu E^0 oraz E^1 . Obie funkcje służą do oceny stanu technicznego poszczególnych części składowych obiektu na podstawie modelu ewidencyjnego oraz modelu uszkodzeń. W przypadku modeli geometrii typu E^0 do opisu intensywności i rozległości uszkodzeń zaproponowano metodę segmentową, a sieci hybrydowe wykorzystywane w funkcji ekspertowej zbudowano przy użyciu komponentów neuronowych i rozmytych.

Jako podstawę ocen stanu technicznego przy wykorzystywaniu modeli typu E^1 zaproponowano przyjmowanie wartości parametrów stanu technicznego w postaci stopnia uszkodzenia i zakresu uszkodzenia, wyznaczanych na podstawie funkcji wrażliwości obiektu na uszkodzenia. Przedstawiono pośrednie i bezpośrednie sposoby wyznaczania funkcji wrażliwości oraz parametrów stanu technicznego, przyjmowane w zależności od typu rozpatrywanych uszkodzeń oraz rodzaju rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ocenianego obiektu. Do wyznaczania ocen w postaci wartości znormalizowanego wskaźnika stanu technicznego zastosowano metody przybliżonego (rozmytego) wnioskowania.

Technologię sieci hybrydowych użyto także do realizacji funkcji ekspertowej wspomagającej ocenę przydatności użytkowej obiektów mostowych. Zaproponowano

tu rozmyty model przydatności użytkowej, umożliwiającą tworzenie ocen przydatności z uwagi na poszczególne parametry użytkowe. Jako miarę przydatności przyjęto wartość znormalizowanego wskaźnika przydatności użytkowej.

Zaproponowano dwa sposoby oceny stanu technicznego oraz przydatności użytkowej całego obiektu na podstawie ocen jego części składowych: metodę wektorów oraz metodę liczb rozmytych. Przedstawiono koncepcję sposobu łącznej oceny kondycji obiektu na podstawie ocen stanu technicznego i przydatności użytkowej. Zaprezentowano także metody klasyfikacji obiektów na podstawie ocen ich stanu. Zastosowane w tym celu narzędzia informatyczne umożliwiają definiowanie kryteriów klasyfikacji obiektów mostowych przez użytkowników systemu wspomagającego zarządzanie ich eksploatacją.

Przedstawione przykłady komputerowych implementacji rozwiązań proponowanych w niniejszej pracy zostały oprogramowane w języku C++. Aplikacje te są przystosowane do eksploatacji w środowisku Microsoft® Windows™ NT/98/2000/Millennium/XP na komputerach klasy PC. Niektóre z prezentowanych koncepcji doczekały się już pilotażowych wdrożeń w systemach wspomagających eksploatację obiektów mostowych, np. [24], [41], [44]. Pozostałe istnieją w wersji testowej lub modelowej, stanowiąc przedmiot dalszych prac.

Należy podkreślić, że wiele z prezentowanych tu rozwiązań można stosować także poza systemami wspomagającymi gospodarowanie infrastrukturą mostową. Metodyka numerycznego modelowania uszkodzeń czy też procedury oceny stanu technicznego mogą być z powodzeniem używane w odniesieniu do praktycznie wszystkich rodzajów konstrukcji budowlanych. W pełni uniwersalny charakter ma technologia wielopoziomowych sieci hybrydowych, która może być przydatna w konstruowaniu narzędzi ekspertowych z dowolnej dziedziny.

7.2. Kierunki dalszych badań

Zaproponowana w pracy metodyka numerycznego modelowania obiektów mostowych oraz przedstawione rozwiązania mogą stanowić podstawę dalszych badań w dziedzinie komputerowych systemów wspomagających eksploatację infrastruktury komunikacyjnej. Do problemów wymagających najpilniejszego rozwiązania należy zaliczyć:

- modelowanie procesów degradacji i prognozowanie zmian kondycji obiektów mostowych z uwzględnieniem historii zmian stanu obiektu oraz przewidywanych warunków pracy obiektu w okresie objętym prognozą;
- modelowanie wpływu działań rehabilitacyjnych na kondycję obiektów z uwzględnieniem stosowanych technologii i materiałów;
- optymalizację planowania działań utrzymaniowych w zakresie technicznym (np. dobór technologii robót utrzymaniowych) oraz finansowym (alokacja środków finansowych).

W zakresie rozwoju narzędzi ekspertowych wspomagających procesy decyzyjne w gospodarowaniu obiektami mostowymi za najważniejsze zadania należy uznać:

- doskonalenie metod pozyskiwania i reprezentacji wiedzy w systemach komputerowych;
- rozwój technologii sieci hybrydowych przez rozbudowę bazy komponentów oraz wzbogacenie możliwości wykorzystywania aktualnie stosowanych komponentów;
- rozszerzanie zastosowań narzędzi ekspertowych na wszystkie zagadnienia wymagające wsparcia w procesie podejmowania decyzji związanych z eksploatacją obiektów mostowych, jak np.:
 - optymalizacja częstości i zakresu przeglądów obiektów mostowych,
 - diagnozowanie przyczyn uszkodzeń,
 - wspomaganie interpretacji wyników badań.

Należy podkreślić, że rozwój inżynierii komputerowych systemów wspomagających eksploatację infrastruktury mostowej jest bardzo ściśle powiązany z rozwojem technik komputerowych, zarówno w zakresie sprzętu, jak i oprogramowania. Na podstawie dostępnej dzisiaj wiedzy można przewidywać, że strategicznymi kierunkami rozwoju będą w najbliższych latach:

- szerokie zastosowania metod sztucznej inteligencji, w tym systemów uczących się;
- wykorzystywanie narzędzi rzeczywistości wirtualnej we wspomagających systemach komputerowych;
- zastosowania systemów monitorujących stan obiektów w sposób ciągły;
- wprowadzanie systemów sterujących parametrami konstrukcji w zależności od potrzeb użytkowych (np. poprzez zmianę poziomu sprężenia).

Można przewidywać, że bardzo ważnym kierunkiem rozwoju systemów wspomagających eksploatację obiektów mostowych, a także związanych z tym badań, będzie integracja wszystkich systemów wspomagających zarządzanie infrastrukturą komunikacyjną. Należy spodziewać się, że proces ten będzie przebiegać w dwóch obszarach:

- integracji systemów mostowych z systemami wspomagającymi eksploatację dróg i linii kolejowych na poziomie krajowego układu komunikacyjnego;
- integracji na poziomie ponadpaństwowym, związanej z międzynarodowym znaczeniem systemu transportowego.

PRACE CYTOWANE

- [1] *A Guide to Bridge Inspection and Data Systems for District Engineers*, Overseas Road Note 7, Vol. 1, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1988.
- [2] Abkowitz M., Walsh S., Hauser E., *Adaptation of Geographic Information Systems to Highway Management*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 116, No. 3, 1990, s. 310–327.
- [3] *Advanced Bridge Inspection Methods: Applications and Guidelines*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-ME-90-8, 1990.
- [4] Aksel T., Lee K.-L., Aktan E.A., *Condition Assessment of Highway Bridges*, Proceedings of the Structures Congress XII, ASCE, New York, 1994, s. 1124–1130.
- [5] Al-Subhi K.M., Johnston D.W., Farid F., *OPBRIDGE: An Integrated Bridge Budget Forecasting and Allocation Module of the State Level*, Transportation Research Record No. 1268, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 95–109.
- [6] Andersen N.H., *Danbro - a Bridge Management System for Many Levels*, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Baltimore, Maryland, USA, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1990, s. 11–21.
- [7] Arockiasamy M., Sawka M., Sinha V., Shahawy M.A., *Bridge Management*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 293–300.
- [8] *ASTM E 632-81, Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials*, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1982.
- [9] Avent R.R., Whitmer M.D., *Underwater Inspection of Bridges – Overview of a Statewide Program*, Transportation Research Record No. 1268, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 118–129.
- [10] Bakht B., Pinjarkar S.G., *Dynamic Testing of Highway Bridges – a Review*, Transportation Research Record No. 1223, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 93–100.
- [11] Barai S.V., Pandey P.C., *Neural Networks for Damage Detection in Steel Railway Bridges*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 297–300.
- [12] Barker M.G., *Guide Specification Strength Capacity Rating of Existing Girder Bridges*, Transportation Research Record No. 1476, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1995, s. 98–105.
- [13] Bazewicz M., *Wstęp do systemów informatycznych i reprezentacji wiedzy*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1993.
- [14] Bazewicz M., *Metody i techniki reprezentacji wiedzy w projektowaniu systemów*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1994.
- [15] Beynon-Davies P., *Systemy baz danych*, WNT, Warszawa, 1998.
- [16] Beynon-Davies P., *Inżynieria systemów informacyjnych*, WNT, Warszawa, 1999.
- [17] Bień J., *Metodyka numerycznego opisu obiektów mostowych. Cz. II. Ocena przydatności użytkowej i numeryczny opis konstrukcji*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 14, Wrocław, 1989.

- [18] Bień J., *Metody numerycznego opisu kolejowych obiektów mostowych*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie mostów kolejowych”, Jadwisin, 1990, s. 6–17.
- [19] Bień J., *Metodyka numerycznego opisu obiektów mostowych, Cz. III*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 10, Wrocław, 1990.
- [20] Bień J., *Naukowe i techniczne podstawy Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi „SMOK”. Cz. I. 7. Zasady numerycznej oceny stanu kolejowych obiektów inżynieryjnych*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 57, Wrocław, 1993.
- [21] Bień J., *Knowledge-Based Expert Functions in Bridge Management Systems*, NATO Science for Stability Programme, TU-Bridges Project – Outreach Component Report No. 3, Istanbul Technical University, 1998.
- [22] Bień J., *Komputerowe modele degradacji obiektów mostowych. Kreator funkcji ekspertowych*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 85, Wrocław, 1998.
- [23] Bień J., *ECOBRIIDGE – Integrated Railway Bridge Management System for the Future*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structures for the Future – The Search for Quality”, Rio de Janeiro, Brazil, IABSE, Zurich, Switzerland, 1999, s. 1016–1023.
- [24] Bień J., *Naukowe i techniczne podstawy Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi „SMOK”. Cz. V. 17. Komputerowe wspomaganie oceny stanu technicznego obiektów inżynieryjnych. Katalog uszkodzeń*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 119, Wrocław, 1999.
- [25] Bień J., *Naukowe i techniczne podstawy Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi „SMOK”. Cz. V. 18. Album uszkodzeń kolejowych obiektów inżynieryjnych. Klasyfikacja i identyfikacja uszkodzeń*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 120, Wrocław, 1999.
- [26] Bień J., *Expert Functions in Bridge Management Systems*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. H-3/1–15.
- [27] Bień J., *Neural Networks in Bridge Management Systems*, Structures Congress of the American Society of Civil Engineers „Advanced Technology in Structural Engineering”, Philadelphia, USA, 2000, s. 1–8.
- [28] Bień J., *Multi-Level Hybrid Networks in Bridge Management Systems*, World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA, 2001, Vol. II, Information Systems, s. 316–321.
- [29] Bień J., *Hybrid Networks in Bridge Condition Evaluation and Prediction*, 1st International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, Barcelona, Spain, 2002, s. 451–452 + CD.
- [30] Bień J., Bień B., Kmita J., Rawa P., *Monitorowanie mostu autostradowego przez Wisłę koło Torunia w trakcie eksploatacji. Cz. 2. Projekt koncepcyjny systemu wspomagającego utrzymanie i eksploatację mostu wraz z oprogramowaniem modelowym*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 87, Wrocław, 1999.
- [31] Bień J., Bień B., Rawa P., *Monitorowanie mostu autostradowego przez Wisłę koło Torunia w trakcie eksploatacji. Cz. 4. System komputerowy RUBIKON 2000 – wersja testowa*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 123, Wrocław, 2000.
- [32] Bień J., Cichoń J., Łęgosz A., Rawa P., Rewiński S., Wierzejewski J., *Przewodnik po programie EGM, KPOM, Wykaz, KPP i AKPP wraz z instrukcją obsługi użytkownika. Wersja instalacyjna 2.0*, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Wydawnictwo POLIGRAF, Wrocław, 1994.
- [33] Bień J., Kapolka M., Maszczyk I., Rawa P., Rewiński S., *Drogowa Trasa Średnicowa Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*, XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2000, T. 4, s. 151–164.
- [34] Bień J., Kapolka M., Maszczyk I., Rawa P., Rewiński S., *Upper Silesian Urban Motorway*, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structural

- Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 442–443.
- [35] Bień J., Kmita J., Król D., Kwaśniak J., Rawa P., Sopol A., Zwolski J., *Naukowe i techniczne podstawy Systemu Zarządzania Mostami Kolejowymi „SMOK”*. Cz. V. 16. *Komputerowe wspomaganie oceny stanu technicznego obiektów inżynierskich. Podręcznik użytkownika oprogramowania Systemu SMOK w wersji 2.1*, Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 118, Wrocław, 1999.
- [36] Bień J., Kmita J., Rewiński S., *Techniki systemowe w eksploatacji i utrzymaniu autostrad*, XLI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Kraków-Krynica, Politechnika Krakowska, Kraków, 1995, T. 2, s. 143–154.
- [37] Bień J., Kmita J., Rewiński S., *Gospodarowanie obiektami mostowymi na autostradach płatnych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 1996, s. 176–180.
- [38] Bień J., Kmita J., Rewiński S., *Management Systems of Transportation Infrastructure – Needs and Possibilities*, International Scientific Conference „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, Wrocław, 1996, s. 119–128.
- [39] Bień J., Król D., Rawa P., *Komputerowy system ewidencji kolejowych obiektów inżynierskich*, III Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy projektowania, budowy i utrzymania mostów małych”, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 1994, s. 11–18.
- [40] Bień J., Król D., Rawa P., *Numeryczna mapa sieci kolejowej PKP*, Technika Transportu Szynowego, nr 10, 1997, s. 16–19.
- [41] Bień J., Król D., Rawa P., Rewiński S., *Komputerowa ewidencja obiektów inżynierskich*, Seria wydawnicza: System Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK, Dyrekcja Generalna PKP, Warszawa, 1997.
- [42] Bień J., Rawa P., *Durability and Serviceability of Bridges as Criteria in Maintenance Planning*, II International Scientific Conference „Durability and Service Life of Bridge Structures”, Institute of Civil Engineering, Technical University of Poznań, Poznań, 1994, s. 23–28.
- [43] Bień J., Rawa P., *Kompleksowe wspomaganie zarządzania infrastrukturą komunikacyjną*, IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy projektowania, budowy i utrzymania mostów małych”, Wrocław, 1999, s. 29–36.
- [44] Bień J., Rawa P., Bień B., *Komputerowe wspomaganie zarządzania autostradowymi obiektami mostowymi*, Inżynieria i Budownictwo, nr 11, 2001, s. 669–672.
- [45] Bień J., Rewiński S., *Funkcja badań doświadczalnych w komputerowym systemie gospodarki mostowej*, Konferencja „Badania Doświadczalne Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich”, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 55, Konferencje nr 18, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1989, s. 11–16.
- [46] Bień J., Rewiński S., *Metodyka oceny przydatności użytkowej obiektów mostowych*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Trwałość i Przydatność Użytkowa Konstrukcji Mostowych”, Politechnika Poznańska, Poznań, 1989, s. 26–34.
- [47] Bień J., Rewiński S., *Artificial Intelligence in Bridge Management System*, Second Workshop on Bridge Engineering Research in Progress, Reno, Nevada, USA, 1990, s. 159–162.
- [48] Bień J., Rewiński S., *System gospodarki mostowej jako narzędzie w utrzymaniu mostów*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy projektowania, budowy i utrzymania mostów małych”, Wrocław, 1990, s. 53–58.
- [49] Bień J., Rewiński S., *Bazy wiedzy w systemach zarządzania infrastrukturą kolejową*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy informatyczne w pionie utrzymania kolei”, Jelenia Góra, 1995, s. 43–49.
- [50] Bień J., Rewiński S., *SMOK – kompleksowy system zarządzania mostami kolejowymi*, Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 1996, s. 180–184.
- [51] Bień J., Rewiński S., *Virtual Models of Structures in Transportation Management Systems in Poland*, NATO Advanced Research Workshop „Region Challenges to Improved a Deteriorated

- Transportation Infrastructure Within Poland and Its Neighboring Countries”, Wrocław, 1994, Wyd.: Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1996, NATO ASI Series 2, Environment Vol. 5, s. 101–107.
- [52] Bień J., Rewiński S., *Nowa generacja systemów zarządzania mostami*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 19–30.
- [53] Bień J., Rewiński S., Sawicki M., *General Outline of Railway Bridge Management System SMOK*, International Bridge Conference Warsaw'94, Vol. 1. Analytical Evaluation of Bridges, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 185–193.
- [54] Bień J., Rewiński S., Sawicki M., *System-Based Strategy of Railway Bridge Maintenance in Poland*, Colloque international „Gestion des ouvrages d'art. Quelle strategie pour maintenir et adapter le patrimoine?”, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1994, s. 373–382.
- [55] Bień J., Sawicki M., *Monitoring of Railway Bridges in Poland*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Extending the Lifespan of Structures”, San Francisco, California, USA, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 73/2, s. 1515–1520.
- [56] Bień J., Sawicki M., *Railway Bridges in Poland – Maintenance Strategy*, ERRI Conference „Maintenance of Railway Bridges and Civil Engineering Structures”, Technical Document DT 331, Utrecht, The Netherlands, 1995, s. 3–11.
- [57] Bijen J.M.J., *Maintenance and Repair of Concrete Structures*, Heron, Vol. 34, No. 2, 1989, s. 3–82.
- [58] Biliszczuk J., *Najdłuższe obiekty mostowe w Polsce*, Inżynieria i Budownictwo, nr 1, 1999, s. 13–14.
- [59] Biliszczuk J., Bień J., Maliszewicz P., Mistewicz M., Onysyk J., Rabięga J., *Podręcznik inspektora mostowego. Cz. 1 i 2*, Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Lądowej, Wrocław, 1995.
- [60] Biliszczuk J., Machelski Cz., Maliszewicz P., Mistewicz M., *Typowe uszkodzenia drogowych betonowych mostów prefabrykowanych*, Drogownictwo, nr 8, 1994, s. 186–194.
- [61] Biliszczuk J., Machelski Cz., Onysyk J., Węgrzyniak M., *Stan dużych mostów z betonu sprężonego wybudowanych w latach 1953–1975*, Inżynieria i Budownictwo, nr 9, 1996, s. 516–519.
- [62] Biliszczuk J., Onysyk J., Węgrzyniak M., *Typowe uszkodzenia masywnych podpór obiektów mostowych*, Ochrona przed korozją, nr 1, 1997, s. 6–9.
- [63] Blakelock R., Day W., Chadwick R., *Bridge Condition Index*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 130–138.
- [64] *BMS/PONTIS Bridge Inspection Manual*, Colorado Department of Transportation, 1992.
- [65] Brancaloni F., Spina D., Valente C., *Structural Damage State Assessment via Neural Networks*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 341–350.
- [66] *Bridge Inspection Guide*, Finnish Road Administration, 1986.
- [67] *Bridge Inspection Guide*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1983.
- [68] *Bridge Inspection Manual*, Swedish National Road Administration, Publication No. 1996:036(E), 1996.
- [69] *Bridge Inspection Manual. The Directives for Bridge Inspection Procedures*, Finnish Road Administration, 1989.
- [70] *Bridge Inspection*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Road Research Group, Paris, France, 1976.
- [71] *Bridge Inspector's Handbook*, Overseas Road Note 7, Vol. 2, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1990.
- [72] *Bridge Inspector's Training Manual*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-PD-91-015, 1991.
- [73] *Bridge Maintenance*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Road Research Group, Paris, France, 1981.

- [74] *Bridge Management System. Bridge Register. Directives for Inventory-Taking. Data Item Description, List of Parameters and List of Data Items*, Finnish Road Administration, 1990.
- [75] *Bridge Management System. Coding Manual*, Pennsylvania Department of Transportation, Publication No. 100A, Harrisburg, 1993.
- [76] *Bridge Management Systems*, Road Directorate, Ministry of Transport – Denmark, Copenhagen, 1991.
- [77] *Bridge Measurement and Condition Assessment*, Swedish National Road Administration, Publication No. 1996:038(E), 1993.
- [78] *Bridge Safety Inspection: Quality Assurance Manual*, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg, 1989.
- [79] Brito de J., Branco F., *A Decision System for Bridge Management*, 14th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Civilization through Civil Engineering”, New Delhi, India, IABSE, Zurich, Switzerland, 1992, s. 597–602.
- [80] Brito de J., Branco F., *Concrete Bridges Management Using Knowledge-Based Systems*, Proceedings of the Conference on Maintenance of Bridges and Civil Structures, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1994, s. 383–392.
- [81] Bubnicki Z., *Podstawy informatycznych systemów zarządzania*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1993.
- [82] Cafnik F., *Influence of the Proper Classification of RC Structure Damages on the Optimal Repair Execution*, International Conference „Diagnosis of Concrete Structures”, Bratislava, 1991, s. 444–447.
- [83] Chase S.B., Nutakor C., Small E.P., *An In-Depth Analysis of the National Bridge Inventory Database Utilizing Data Mining, GIS and Advanced Statistical Methods*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. C-6/1–17.
- [84] Chwiąłkowska E., *Sztuczna inteligencja w systemach eksperckich*, Zakład Nauczania Informatyki MIKOM, Warszawa, 1991.
- [85] Cichoń J., Wierzejewski J., *Data Bases and Algorithms in the Polish Bridge Management System*, Proceedings of the Conference on Maintenance of Bridges and Civil Structures, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1994, s. 11–18.
- [86] Ciesielski R., Kawecki J., *Właściwości dynamiczne mostów drogowych wykorzystywane w ocenie przydatności eksploatacyjnej*, Drogownictwo, nr 7, 1995, s. 190–194.
- [87] Clausen P., *Introduction to Bridge Management System*, 14th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Civilization through Civil Engineering”, New Delhi, India, IABSE, Zurich, Switzerland, 1992, s. 229–236.
- [88] Codd E.F., *A Relational Model for Large Shared Data Banks*, Communications of ACM, Vol. 13, No. 6, 1970, s. 377–387.
- [89] Codd E.F., *Extending the Relational Database Model to Capture More Meaning*, ACM Transactions on Database Systems, Vol. 4, No. 4, 1979, s. 397–434.
- [90] *Condition Surveys of Concrete Bridge Components – User's Manual*, TRB, National Research Council, NCHRP Report 312, Washington, D.C., USA, 1988.
- [91] *Cotation des Ouvrages d'Art. Catalogue des Avaries*, SNCF, Direction de l'Équipement, Département des Ouvrages d'Art, Paris, France, 1995.
- [92] Crnkovic J., Holstein W.K., *From Simulation Model to DSS: A Transportation Industry Example*, Proceedings of the 1994 Summer Computer Simulation Conference, San Diego, 1994, s. 883–888.
- [93] *Culvert Inspection Manual*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-IP-86-2, 1986.
- [94] Cywiński Z., *Ogólnopolski komputerowy system klasyfikacji mostów*, Drogownictwo, nr 1, 1987.
- [95] Das P.C., *New Developments in Bridge Management Methodology*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 4, 1998, s. 299–302.

- [96] Das P.C., *Development of a Comprehensive Structures Management Methodology for the Highways Agency*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 49–60.
- [97] Das P.C., *Maintenance Planning for the Trunk Road Structures in England*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. H-2/1–13.
- [98] *DataSculptor. Data Transformation and Analysis Tool for Windows*, NeuralWare, Inc., Pittsburgh, USA, 1995.
- [99] De Brito J., Branco F., *Decision Strategies for Bridge Management*, International Conference „Diagnosis of Concrete Structures”, Bratislava, 1991, s. 200–203.
- [100] De Buck J., *Bridge Maintenance in Belgium*, Proceedings of the 1st US-European Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Remy-Les-Chevreuse, France, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 1987, s. 62–98.
- [101] Delorme F., *Monitoring, Maintenance and Replacement Policies for Stock of 100 000 Structures*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Extending the Lifespan of Structures”, San Francisco, California, USA, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 73/2, s. 1417–1421.
- [102] *Departmental Standard BD 22/84. Inspections and Records of Highway Structures*, Department of Transport, London, 1984.
- [103] DeWolf J.F., Descoteaux T., Kon J., Lauzon R., Mazurek D., Paproski R., *Expert Systems for Bridge Monitoring*, Proceedings of the Sixth Conference on Computing in Civil Engineering, Atlanta, 1989, s. 203–210.
- [104] Donzel M., Hajdin R., *Road Structures Management System Development in Switzerland*, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 404–405.
- [105] Enright M.P., Frangopol D.M., *Survey and Evaluation of Damaged Concrete Bridges*, Journal of Bridge Engineering, Vol. 5, No.1, 2000, s. 31–38.
- [106] *Examination of Structures*, British Railways Board, Handbook No. 6, 1984.
- [107] Fagerlund G., *Trwłość konstrukcji betonowych*, Arkady, Warszawa, 1997.
- [108] Farhey D.N., Naghavi R., Levi A., Thakur A.M., Pickett M.A., Nims D.K., Aktan A.E., *Deterioration Assessment and Rehabilitation Design of Existing Steel Bridge*, Journal of Bridge Engineering, Vol. 5, No.1, 2000, s. 39–48.
- [109] Feigenbaum E.A., *The Art of Artificial Intelligence – Themes and Case Studies of Knowledge Engineering*, Proceedings of the 5th International Conference on AI, 1977.
- [110] Figura D., *Obiektowe bazy danych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1996.
- [111] Finkelstein R., Scholz H., *Expert System for the Appraisal of Structures*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 321–330.
- [112] Flaga K., *Wpływ czasu na mosty żelbetowe i z betonu sprężonego*, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 1997, s. 381–382.
- [113] Flood I., Kartam N., *Neural Networks in Civil Engineering. I: Principles and Understanding*, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, V. 8, No. 2, 1994, s. 131–148.
- [114] Flood I., Kartam N., *Neural Networks in Civil Engineering. II: Systems and Application*, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, V. 8, No. 2, 1994, s. 149–162.
- [115] Foyen A., *Operation and Maintenance System for Railway Bridges*, Origins of the ERRI Conference on Maintenance of Railway Bridges and Civil Engineering Structures, Utrecht, The Netherlands, Technical Document DT 331, 1995.
- [116] Frangopol D.M., Enright M.P., Estes A.C., Lin K.Y., *Integration of NDT in Life-Cycle Cost of Highway Bridges*, ASCE Structures Congress, New Orleans, LA, USA, 1999, s. 825–828.
- [117] Frangopol D.M., Estes A.C., *Lifetime Bridge Maintenance Strategies Based on System Reliability*, Structural Engineering International, Vol. 7, No. 3, 1997, s. 193–198.

- [118] Frangopol D.M., Estes A.C., *Optimum Lifetime Planning of Bridge Inspection and Repair Programs*, Structural Engineering International, Vol. 9, No. 3, 1999, s. 219–223.
- [119] Friedland I.M., *The Practice of Bridge Management in the United States*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw '94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 215–223.
- [120] Fugler M.D., Ament R.R., Alawady M., *Systematic Evaluation of Structural Deterioration in Underwater Bridge Substructures*, Transportation Research Record No. 1476, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1995, s. 139–146.
- [121] Furtak K., *Nośność eksploatacyjna przęseł mostów betonowych*, Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, nr 3, 1994.
- [122] Furtak K., *Eksploatacja mostów*, Konferencja naukowo-techniczna „Mosty w drodze do XXI wieku”, Gdańsk-Jurata, 1997, Księga: Laudacje, Referaty problemowe, Referaty generalne, s. 131–151.
- [123] Furuta H., Frangopol D.M., Saito M., *Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Bridges Using Genetic Algorithm*, ASCE Structures Congress, New Orleans, LA, USA, 1999, s. 243–246.
- [124] Furuta H., He J., Watanabe E., Umamo M., *A Fuzzy Neural System for Repairing Bridge Decks*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 283–292.
- [125] Gagarine N., Albrecht P., *Advances in Weigh-in-Motion Using Pattern Recognition and Prediction of Fatigue Life of Highway Bridges*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-92-046, 1992.
- [126] Gagarine N., Flood I., *The Application of Artificial Neural Networks to Bridge Engineering*, Proceedings of the 3rd National Science Foundation Workshop on Bridge Engineering Research in Progress, LaJolla, California, USA, University of California, San Diego, California, USA, 1992, s. 97–100.
- [127] Garret J.H., *An Overview of Current Tools for Developing Knowledge-Based Expert Systems*, 14th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Civilization through Civil Engineering”, New Delhi, India, IABSE, Zurich, Switzerland, 1992, s. 349–354.
- [128] Garrett J.H. et. al., *Design of Computer Support for Field Operations*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structures for the Future – The Search for Quality”, Rio de Janeiro, Brazil, IABSE, Zurich, Switzerland, 1999, s. 1000–1007.
- [129] Gaspar L., Lubloy L., *Adaptation of Pontis Prediction Model to Hungarian Conditions*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. C-3/1–14.
- [130] *GC/EH0006. Examination of Structures*, British Railways Board, Group Standards, Macmillan House, Paddington, 1993.
- [131] Gładysz M., *Wybrane zagadnienia mechaniki obiektów inżynierskich, Cz. 1: Podstawy statyki budowli*, Seria wydawnicza: System Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK, BOGART, Wrocław, 1999.
- [132] Gładysz M., *Wybrane zagadnienia mechaniki obiektów inżynierskich, Cz. 2: Podstawy wytrzymałości materiałów*, Seria wydawnicza: System Zarządzania Mostami Kolejowymi SMOK, BOGART, Wrocław, 2000.
- [133] Godek J., *Przeglądy szczegółowe obiektów mostowych – trzy lata doświadczeń*, Drogownictwo, nr 5, 1996, s. 144–149.
- [134] Golabi K., Thompson P.D., *A Network Optimization System for Maintenance and Improvement of California's Bridges*, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Baltimore, Maryland, USA, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1990, s. 23–31.
- [135] Green Hall N., *A Cognitively Based Taxonomy of Fuzzy Decision Support Systems*, Proceedings of the First International Joint Conference of the North American Fuzzy Inform. Proc. Society Bia, 1994, s. 157–158.

- [136] Grivas D.A., Schultz B.C., Elwell D.J., Dalto A.E., *Span-Based Network Characterization for Bridge Management*, Transportation Research Record No. 1442, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1994, s. 123–127.
- [137] Grob J., *Data Base System for the Maintenance of Highway Structures*, Proceedings of the 4th International Conference on Safety of Bridge Structures, Wrocław, 1992, s. 293–300.
- [138] Gruter R., *The „Bridges” Maintenance Concept and the „Bridge Control” Program of Deutsche Bahn AG*, Origins of the ERRI Conference on Maintenance of Railway Bridges and Civil Engineering Structures, Utrecht, The Netherlands, Technical Document DT 331, 1995.
- [139] *Guide Rail Condition Survey. Field Manual*, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg, 1994.
- [140] Hachem Y., Zografos K., Soltami M., *Bridge Inspection Strategies*, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 5, No. 1, 1991, s. 37–56.
- [141] Hajdin R., *Information Technology in Practice – Exploiting Potentials*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structures for the Future – The Search for Quality”, Rio de Janeiro, Brazil, IABSE, Zurich, Switzerland, 1999, s. 88–99.
- [142] Hammad A., Shintoku Y., Itoh Y., *New Approach toward Bridge Management Database Systems*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 197–206.
- [143] Harper W.V., Al-Salloum A., Al-Sayyari S., Al-Theneyan S., Lam J., Helm C., *Selection of Ideal Maintenance Strategies in a Network-Level Bridge Management System*, Transportation Research Record No. 1268, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 59–67.
- [144] Hartoft L.Q., *Bridge Management*, Proceedings of the 4th International Conference on Safety of Bridge Structures, Wrocław, 1992, s. 29–34.
- [145] Hartoft L.Q., *Bridge Management and Maintenance Operation*, Proceedings of the 4th International Conference on Safety of Bridge Structures, Wrocław, 1992, s. 301–306.
- [146] Hawk H., *Development of Life-Cycle Activity Profiles in BRIDGIT Bridge Management System*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 209–219.
- [147] Hawk H., *BRIDGIT: User-Friendly Approach to Bridge Management*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. E-7/1–15.
- [148] Hawk H., Small E.P., *The BRIDGIT Bridge Management System*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 4, 1998, s. 309–314.
- [149] Hearn G., *Condition Data and Bridge Management Systems*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 3, 1998, s. 221–225.
- [150] Hearn G., *NDE in Bridge Management Systems*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. C-1/1–13.
- [151] Hearn G., Frangopol D.M., Chakravorty M., *Calibration and Application of Deterioration Models for Highway Bridges*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 220–230.
- [152] Heinrich P., Wrotek E., *Bank Danych Drogowych w Polsce*, Drogownictwo, nr 12, 1994, s. 279–282.
- [153] Hertz J., Krogh A., Palmer R.G., *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*, WNT, Warszawa, 1995.
- [154] Hohle H.W., *Expert System for Integrated Cable Inspection*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 361–369.
- [155] Hsu D.S., Yeh I.C., *Damage Detection Using Artificial Neural System*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 263–272.

- [156] Hutnik A., Bednarczyk M., Trochymiak W., *Modernizacja Systemu Gospodarki Mostowej*, Drogownictwo, nr 2, 2001, s. 54–57.
- [157] Hutnik A., Ławniczak M., Misiewicz E., Wysokowski A., *Problems of Long and Short Planning in Polish BMS*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw '94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 235–244.
- [158] Hutnik A., Łęgosz A., Wysokowski A., *BMS in Poland – Computer Supported Maintenance*, Proceedings of the Conference on Maintenance of Bridges and Civil Structures, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1994, s. 449–454.
- [159] Hutnik A., Łęgosz A., Wysokowski A., *Bridge Management System for Polish Road Administration*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw '94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 225–234.
- [160] *Inspection of Fracture Critical Bridge Members*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IP-86-26, 1986.
- [161] *Instrukcja branżowa o remontach planowo-zapobiegawczych mostów, wiaduktów, przepustów i tuneli kolejowych*, Nr D-78, Ministerstwo Komunikacji, Warszawa, 1958.
- [162] *Instrukcja o dokonywaniu przeglądów bieżących obiektów mostowych na zamiejskich drogach publicznych*, Nr DP.-T.16M, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa, 1990.
- [163] *Instrukcja o dokonywaniu przeglądów podstawowych obiektów mostowych na zamiejskich drogach publicznych*, Nr DP.-T.17M, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa, 1990.
- [164] *Instrukcja o dokonywaniu przeglądów szczegółowych obiektów mostowych na zamiejskich drogach publicznych*, Nr DP.-T.18M, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa, 1990.
- [165] *Instrukcja o utrzymaniu kolejowych obiektów inżynierskich D83*, Biuletyn Polskich Kolei Państwowych, 1996.
- [166] *Instrukcja planowania robót mostowych realizowanych na zamiejskich drogach krajowych i wojewódzkich*, Nr DP.-T.15M, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa 1990.
- [167] Jarominiak A., *Przeglądy obiektów mostowych*, WKŁ, Warszawa, 1991.
- [168] Jarominiak A., *O podstawowych problemach technicznych utrzymania mostów*, Inżynieria i Budownictwo, nr 4–5, 1993, s. 179–181.
- [169] Jaskiewicz A., *Inżynieria oprogramowania*, Helion, Gliwice, 1997.
- [170] Jenkins L., *Prototyping Expert Systems is Different from Prototyping Information Systems*, Proceedings of the Third Annual Symposium of the International Association of Knowledge, New Generation Knowledge Eng., IAKE 92, 1992, s. 45–454.
- [171] Jiang Y., Sinha K.C., *Bridge Service Life Prediction Model Using the Markov Chain*, Transportation Research Record No. 1223, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 1989, s. 24–30.
- [172] Jingwei H., Zhongtuo W., *A Fuzzy Neural Network Synthesizing Fuzzy Knowledge Representation and Feedback Learning*, Chinese Journal of Automation, Vol. 6, No. 2, 1994, s. 99–107.
- [173] Johnstone R., Brodie A., *The Scottish Office Bridge Management Procedures*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 24–29.
- [174] Kacprzak T., Ślot K., *Sieci neuronowe komórkowe*, PWN, Warszawa, 1995.
- [175] Kacprzyk J., *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*, PWN, Warszawa, 1986.
- [176] Kaliszuk J., Urbańska A., Waszczyszyn Z., Furtak K., *Neuronowa analiza trwałości zmęczeniowej betonu na podstawie badań doświadczalnych*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 4, s. 27–34.
- [177] Kapliński O., *Decision Techniques in Construction Management. State of the Art and Computerisation Problems*, Metody Komputerowe w Inżynierii Lądowej, tom 4, nr 2, 1994, s. 37–56.

- [178] Kasperkiewicz J., *Artificial Neural Networks in Engineering Materials Design*, Proceedings of the International Conference „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, Wrocław, 1997, Vol. I, s. 103–126.
- [179] Keller T., *Maintenance of Structures along National Highway N2 in Switzerland*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Extending the Lifespan of Structures”, San Francisco, California, USA, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 73/1, s. 419–424.
- [180] Kivisto P., Flemming D.J., *Managing Minnesota's Bridges*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 3–15.
- [181] Kmita J., Bień J., Machelski Cz., *Komputerowe wspomaganie projektowania mostów*, WKŁ, Warszawa, 1989.
- [182] Kmita J., Radomski W., Bień J., Machelski C., Trochymiak W., *State of Computerization in Science and Technology in Bridge Engineering*, *Metody Komputerowe w Inżynierii Lądowej*, tom 3, nr 1, 1993, s. 65–87.
- [183] Kolozsi G., Gaspar L., Toth E., Csorba A., *Development of Hungarian Bridge Management System*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 25–31.
- [184] Kolozsi G., Toth E., Gaspar L., *Transition from the „Manual Control” to the Optimized Management (First Step in Compilation of Hungarian BMS)*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw'94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 255–264.
- [185] Konderla P., *Optymalne projektowanie kompozytów przy pomocy systemu EXPERT-COMPOSITE MATERIAL*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Materiały kompozytowe w budownictwie mostowym”, Łódź, 2000, s. 86–96.
- [186] Konderla P., Mokanek T., *Expert Programs Comparison for Design of Composite Materials*, Proceedings of the International Conference „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, Wrocław, 1997, Vol. III, s. 103–114.
- [187] Konderla P., Mokanek T., *Computer Package with Data Repository for Design Optimal Concrete Composition*, *Concrete Construction. Theory and Experimental Studies*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1999, s. 137–144.
- [188] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D., *Sztuczne sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1994.
- [189] Kriviak G., *Bridge Management System Development for Municipal Sized Inventories in Western Canada*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. E-3/1–14.
- [190] Król D., Bień J., *Koncepcja multimedialnego systemu zarządzania mostami*, I Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Multimedia w dydaktyce techniki. Podstawy zastosowań środków multimedialnych w wybranych dziedzinach techniki”, Szczecin, 1995, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego nr 9, Szczecin, 1995, s. 121–136.
- [191] Król D., Bień J., Rawa P., Rewiński S., *Systemowe wspomaganie decyzji w zarządzaniu kolejowymi obiektami inżynieryjnymi*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy informatyczne w pionie utrzymania kolei”, Jelenia Góra, 1995, s. 51–60.
- [192] Król D., Rozwadowski A., Bień J., Sawicki M., Rewiński S., Trawiński B., *Komputerowe wspomaganie zarządzania infrastrukturą komunikacyjną*, Conference „EuroInfo'95 Poland”, Business Foundation, Warszawa, 1995, s. 126–129.
- [193] Kruse R., Gebhard J., Klawonn F., *Foundations of Fuzzy Systems*, John Wiley and Sons, New York, 1994.
- [194] Kunecki B., Łęgosz A., Misiewicz E., Tlustochowski J., Rowińska W., *Przewodnik po programach EGM, KPOM i KPP wraz z instrukcją użytkownika*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Wrocław, 1998.

- [195] Kwaśnicka H., *Obliczenia ewolucyjne w sztucznej inteligencji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1999.
- [196] Lakshmana Rao K.M., *Artificial Intelligence and Remote Sensing Approach to Highway Planning*, Proceedings of the International Conference „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, Wrocław, 1997, Vol. III, s. 161–166.
- [197] Lakshmana Rao K.M., *Geographic Information Systems (GIS) Oriented Planning for Transportation Systems*, Proceedings of the International Conference „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, Wrocław, 1997, Vol. III, s. 167–178.
- [198] Lassen B., *Web-Based Management Systems*, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 402–403.
- [199] Lauer K.R., *Classification of Concrete Damage Caused by Chemical Attack*, International Conference „Diagnosis of Concrete Structures”, Bratislava, 1991, s. 473–479.
- [200] Lauer K.R., *State of the Art Report: The Use of Damage Classification Systems for Concrete Structures*, International Conference „Diagnosis of Concrete Structures”, Bratislava, 1991, s. 420–424.
- [201] Lauridsen J., Bjerrum J., Andersen N.H., Lassen B., *Creating a Bridge Management System*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 3, 1998, s. 216–220.
- [202] Lauridsen J., Knudsen A., *Economic Optimization in the Danish Bridge Management System*, Proceedings of the Conference on Maintenance of Bridges and Civil Structures, Paris, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1994, s. 537–544.
- [203] Lauridsen J., Lassen B., *The Danish Bridge Management system DANBRO*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 61–70.
- [204] Lawrence J., *Introduction to Neural Networks. Design, Theory and Applications*, California Scientific Software Press, Nevada City, 1994.
- [205] Lawrence J., Fredrickson J., *BrainMaker Professional. User’s Guide and Reference Manual*, California Scientific Software, 1993.
- [206] Lindblad L., *Bridge Management within the Swedish National Road Administration*, Swedish National Road Administration, Head Office, Borlänge, Sweden, 1990.
- [207] Lindblad L., *The Bridge Management System of the Swedish National Road Administration*, Swedish National Road Administration, Head Office, Borlänge, Sweden, 1991.
- [208] Litwin P., *Podstawy projektowania relacyjnych baz danych*, Software, nr 11, 1995, s. 82–90.
- [209] Liu X., *Development of Knowledge-Based Systems in China*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 13–24.
- [210] Ludescher H., Hajdin R., *Distinctive Features of the Swiss Road Structures Management System*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. F-1/1–17.
- [211] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001.
- [212] Łagoda G., Łagoda M., *Stan mostów murowanych w Polsce*, Drogownictwo, nr 5, 1993, s. 108–111.
- [213] Łęgosz A., Wysokowski A., *General Information on a Polish Bridge Management System*, Bridge Management, Thomas Telford, London, 1993, s. 870–879.
- [214] Łęgosz A., Wysokowski A., *Bridge Management Systems: Computer-Aided Planning Decision System for Polish Road Administration*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 16–24.
- [215] Machelski Cz., *Sposoby oceny nośności użytkowej starych mostów*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-

- badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 193–208.
- [216] Machelski Cz., *Reliability Assessment of Structural Elements of Old Bridges*, Archiwum Inżynierii Lądowej, Vol. XLVI, nr 3, 2000, s. 405–418.
- [217] Machelski Cz., *Zur Beurteilung der Tragfähigkeit von alten Eisenbahnbrücken*, Stahlbau, No. 1, 2000, s. 30–34.
- [218] Machelski Cz., Onysyk J., Biliszczuk J., *Obciążenia mostów drogowych pojazdami ciężkimi*, Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 1999, s. 163–167.
- [219] Madaj A., Wołowicki W., *Elementy diagnostyki i utrzymania mostów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1991.
- [220] Madaj A., Wołowicki W., *Budowa i utrzymanie mostów*, WKŁ, Warszawa, 1995.
- [221] *Maintenance Management System Study*, Iowa Department of Transportation & Wilbur Smith Associates, Falls Church, VA, 1993.
- [222] *Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating of Highway Bridges*, Pre-Final Draft Manual, A.G. Lichtenstein & Associates, Inc., Paramus, New Jersey, 1999.
- [223] *Manual for Maintenance Inspection of Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA, 1983.
- [224] Masters T., *Sieci neuronowe w praktyce*, WNT, Warszawa, 1996.
- [225] Medsker L., Turban E., *Integrating Expert Systems and Neural Computing for Decision Support*, Expert Systems with Applications, Vol. 7, No. 4, 1994, s. 553–562.
- [226] Mehta R., Garrabrant R., *Bridge Management System for the New York State Thruway Authority*, 14th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Civilization through Civil Engineering”, New Delhi, India, IABSE, Zurich, Switzerland, 1992, s. 607–612.
- [227] Melhem H.G., Aturaliya S., *Bridge Condition Rating Using Fuzzy Sets and an Eigenvector of Priority Settings*, Computing in Civil Engineering, No 2, ASCE, 1994, s. 1908–1915.
- [228] Melhem H.G., Klippstein K.H., *An Expert System/Training Aid for Fatigue of Steel Bridges*, J. Construct. Steel Research, No. 28, 1994, s. 23–49.
- [229] Mentzas G., *A Functional Taxonomy of Computer-Based Information Systems*, International Journal of Information Management, Vol. 14, No. 6, 1994, s. 397–410.
- [230] Michalewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, WNT, Warszawa, 1999.
- [231] Minsky M., *Step Toward Artificial Intelligence*, Computers and Thought, McGraw-Hill, New York, 1963.
- [232] Minsky M.L., Papert S.A., *Perceptrons*, MIT Press, Cambridge, 1969.
- [233] Mistewicz M., *Slużby mostowe w organizacji drogownictwa zamiejskiego*, Drogownictwo, nr 9, 1991, s. 150–156.
- [234] Mistewicz M., *Development of Bridge Inspection System in Poland*, Proceedings of the 4th International Conference on Safety of Bridge Structures, Wrocław, 1992, s. 313–318.
- [235] Mistewicz M., *Opis stanu mostów według nowego katalogu uszkodzeń*, Drogownictwo, nr 2, 1993, s. 25–31.
- [236] Mistewicz M., *Optymalizacja podziału budżetu robót mostowych*, Drogownictwo, nr 7, 1993, s. 148–154.
- [237] Mistewicz M., *Wybrane problemy budowy i utrzymania mostów w latach 1945–1993*, Drogownictwo, nr 9, 1993, s. 216–222 oraz nr 10, 1993, s. 247–252.
- [238] Mistewicz M., *Maintenance Planning According to Polish Bridge Management System*, Proceedings of the Conference on Maintenance of Bridges and Civil Structures, Paris, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1994, s. 481–488.
- [239] Mistewicz M., *Management of Bridges on Public Roads in Poland*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw `94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 283–291.
- [240] Mistewicz M., *Monitoring i utrzymanie mostów autostradowych w Polsce na tle rozwiązań zagranicznych*, XLI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN

- i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Kraków-Krynica, Politechnika Krakowska, Kraków, 1995, T. 1, s. 123–134.
- [241] Mistewicz M., Bień J., *Planowanie utrzymania mostów w Polsce*, Drogownictwo, nr 11/12, 1991, s. 194–200.
- [242] Mistewicz M., Zabawa E., *Zarządzania drogowymi obiektami mostowymi w Polsce*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 241–245.
- [243] Miyamoto A., Kushida M., Kinoshita K., *Concrete Bridge Rating Expert System with Machine Learning*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 301–306.
- [244] Mohammadi J., Guralnick S.A., Polepeddi R., *Application of Field Data to Serviceability and Life Prediction of Highway Bridges*, Proceedings of the Materials Engineering Conference, New Materials and Methods of Repair, ASCE, New York, 1994, s. 1089–1096.
- [245] Molnar I., Bako A., *Development and Implementation of Pontis-Based Hungarian Bridge Management System*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. F-7/1–13.
- [246] Moore C.J., *Computational Decision Support for Preliminary Bridge Costing*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 3–12.
- [247] Mulawka J.J., *Systemy ekspertowe*, WNT, Warszawa, 1996.
- [248] Muller K.F., *Principles of a Standard Survey and Damage Classification System for Concrete Structures*, International Conference „Diagnosis of Concrete Structures”, Bratislava, 1991, s. 414–419.
- [249] Murphy L.D., *Geographic Information Systems: Are They Decision Support Systems?*, Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Vol. 4, 1995, s. 131–140.
- [250] Myrda G., *GIS czyli mapa w komputerze*, Helion, Gliwice, 1997.
- [251] Nagaraja S., Melhem H.G., *A Rebar Corrosion Decision System Using Machine Learning*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 293–296.
- [252] Narasimhan S., Wallbank J., *Inspection Manual for Bridges and Associated Structures*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 121–129.
- [253] Neuman von J., *The Computer and the Brain*, Yale University Press, New Haven, 1958.
- [254] *NeuralWorks Professional II/Plus and NeuralWorks Explorer Reference Guide*, NeuralWare, Inc., Pittsburgh, USA, 1995.
- [255] Niederliński A., *Regulowe systemy ekspertowe*, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2000.
- [256] *Nowy leksykon PWN*, PWN, Warszawa, 1998.
- [257] Osowski S., *Sieci neuronowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1994.
- [258] Osowski S., *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*, WNT, Warszawa, 1996.
- [259] Paszke A., Jerczyński M., Koziarski S.M., *150 lat Drogi Żelaznej Warszawsko-Wiedeńskiej*, Centralna Dyrekcja Okręgowa Kolei Państwowych, Warszawa, 1995.
- [260] Patten W.N., *Prototype Testing of an Intelligent Highway Bridge at the I-35 Walnut Creek Bridge*, TRB 77th Annual Meeting, Committee on Dynamics and Field Testing of Bridges, Washington, D.C., USA, 1997.
- [261] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 1999.
- [262] *PN-82/S-10052. Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie.*

- [263] PN-85/S-10030. *Obiekty mostowe. Obciążenia.*
- [264] PN-91/S-10042. *Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie.*
- [265] PN-92/S-10082. *Obiekty mostowe. Konstrukcje drewniane. Projektowanie.*
- [266] *Pomiary odkształceń i przemieszczeń obiektów mostowych metodami geodezyjnymi, Ogólne Specyfikacje Techniczne, GG-00.13.01, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa, 1998.*
- [267] *PONTIS – A Network Optimization System for Bridge Improvements and Maintenance. User's Manual*, U.S. Department of Transportation, Publication No. FHWA-SA-93-083, Washington, D.C., USA, 1993.
- [268] *Pontis Release 3.2 User's Manual*, Cambridge Systematics, Inc., Cambridge, 1997.
- [269] Powell G.H., *Expert Systems – Experts Systems and Integrated Software Systems*, Proceedings of a Workshop on Research Needs for Short- and Medium-span Bridges, Washington, D.C., USA, Computech Engineering Services Report No. 5518.2, 1986, s. 153–157.
- [270] Pratt D., Sansalone M., *Impact-Echo Signal Interpretation Using Artificial Intelligence*, ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 2, 1992, s. 178–186.
- [271] *Presentation of the Bridge Management Program Developed and Implemented by TIFSA for the Bridges Department of RENTE's Infrastructure Maintenance Business Unit*, TIFSA, Madrid, 1998.
- [272] *Przepisy o utrzymaniu mostów, wiaduktów, przepustów i tuneli kolejowych, D2*, Dziennik Urzędowy Ministerstwa Komunikacji, Nr 21, Warszawa, 1961.
- [273] Puckett J., *Survey of U.S. Bridge Load Rating Software – Problems and Possible Solutions*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw'94, Vol. 2, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 77–85.
- [274] Radło L., Radomski W., Zobel H., *Informatyczna baza danych o mostach kolejowych*, Konferencja naukowo-techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie mostów kolejowych”, Jadwisin, 1990, s. 164–175.
- [275] Radomski W., *Ocena stanu technicznego i utrzymanie mostów*, III Ogólnopolska Konferencja Mostowców „Konstrukcja i wyposażenie mostów”, Wisła, 1997, Referat generalny, księga: Laudacje, Referaty generalne, s. 41–59.
- [276] Radomski W., Trochymiak W., *Zastosowanie komputerów w mostownictwie*, Metody Komputerowe w Inżynierii Lądowej, tom 2, nr 1–2, Warszawa, 1992, s. 43–64.
- [277] Radomski W., Trochymiak W., *Rola i znaczenie Internetu w mostownictwie*, III Ogólnopolska Konferencja Mostowców „Konstrukcja i wyposażenie mostów”, Wisła, 1997, Referaty, s. 333–341.
- [278] Raghunathan S., *An Application of Qualitative Reasoning to Derive Behavior from Structure of Quantitative Models*, Journal of Management Information Systems, Vol. 11, No. 1, 1994, s. 73–100.
- [279] *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-ED-89-044, 1989.
- [280] Reich Y., Fenves S.J., Subrahmanian E., *Flexible Extraction of Practical Knowledge from Bridge Databases*, Computing in Civil Engineering, No. 1, ASCE, 1994, s. 1014–1021.
- [281] Rewiński S., *W sprawie Systemu Gospodarki Mostowej*, Drogownictwo, nr 7, 1985.
- [282] Rewiński S., *Wpływ systemów informacyjnych z zakresu utrzymania mostów na sprawność budowli*, III Konferencja „Bezpieczeństwo Budowli Mostowych”, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej nr 37, Konferencje nr 13, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1987, s. 299–305.
- [283] Rewiński S., *The Neural Sensor in Bridge Management Process*, Proceedings of the 4th International Conference on Safety of Bridge Structures, Wrocław, 1992, s. 331–338.
- [284] Rewiński S., *Potentiality of Expert System Technical Application in Road and Bridge Management Systems*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw'94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 293–299.

- [285] Rewiński S., Bień J., *Expert Systems in Bridge Safety Management*, 4th International Conference „Safety of Bridge Structures”, Wrocław Technical University, Wrocław, 1992, s. 325–330.
- [286] Rewiński S., Bień J., *Polish Bridge Management System: Marking, Planning, Budgeting*, 14th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Civilization through Civil Engineering”, New Delhi, India, IABSE, Zurich, Switzerland, 1992, s. 628–629.
- [287] Rewiński S., Ciesielski M., Nicpoń R., Salmonowicz J., *System Gospodarki Mostowej, Karta Programowa Tematu*, Centralny Ośrodek Informatyki Drogownictwa, 1987.
- [288] Robichon Y., Binet C., Godart B., *Evaluation of Bridge Condition for Improved Maintenance Policy*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Extending the Lifespan of Structures”, San Francisco, California, USA, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 73/1, s. 407–412.
- [289] Rolf F.H., *Controlling Life-Cycle Costs in Bridges*, Origins of the ERRI Conference on Maintenance of Railway Bridges and Civil Engineering Structures, Utrecht, The Netherlands, Technical Document DT 331, 1995.
- [290] Rosenblatt F., *Principles of Neurodynamics*, Spartan, New York, 1962.
- [291] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 28 lutego 1998 r. w sprawie numeracji i ewidencji dróg oraz obiektów mostowych*, DzU Nr 32, poz. 393.
- [292] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie*, DzU Nr 151, poz. 987.
- [293] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 28 lutego 2000 r. w sprawie trybu sporządzania informacji, gromadzenia i udostępniania danych o sieci dróg publicznych*, DzU Nr 17, poz. 225.
- [294] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie*, DzU Nr 63, poz. 735.
- [295] Rutkowska D., *Inteligentne systemy obliczeniowe. Algorytmy genetyczne i sieci neuronowe w systemach rozmytych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1997.
- [296] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, PWN, Warszawa, 1999.
- [297] Rybak M., *Obciążalność przęseł mostowych projektowanych w różnych okresach*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 303–311.
- [298] Ryżyński A., *Badania konstrukcji mostowych*, WKŁ, Warszawa, 1983.
- [299] Ryżyński A., *Damage Evaluation in Concrete Bridges*, 4th International Conference „Safety of Bridge Structures”, Wrocław, 1992, s. 117–122.
- [300] Ryżyński A., *Influences Limiting the Service Life of Concrete Bridges*, II International Scientific Conference „Durability and Service Life of Bridge Structures”, Poznań, 1994, s. 295–300.
- [301] Ryżyński A., *Serviceability Problems of Locally Damaged Concrete Bridges*, Archiwum Inżynierii Lądowej, nr 3–4, 1994, s. 437–452.
- [302] Saito M., Sinha K.C., *Review of Current Practices of Bridge Management at the State Level*, Transportation Research Record No. 1113, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, s. 1–8.
- [303] Salvaneschi P., Lazzari M., Lancini S., Masera A., Menga R., Mazza G., *Diagnostic Reasoning in Monitoring of Civil Engineering Structures*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 187–196.
- [304] Sarasua W.A., *A GIS-Based Traffic Signal Coordination and Information Management System*, Microcomputers in Civil Engineering, Vol. 9, No. 4, 1994, s. 235–250.

- [305] Sawicki M., *Założenia użytkowe i rola oprogramowania komputerowego w Systemie Zarządzania Mostami Kolejowymi „SMOK”*, Konferencja Naukowo-Techniczna: „Systemy Informatyczne w Pionie Utrzymania Kolei”, Jelenia Góra, 1995, s. 183–192.
- [306] Sawicki M., *Systemowe wspomaganie zarządzania kolejowymi obiektami inżynieryjnymi PKP*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 335–350.
- [307] Sawicki M., Bień J., *Condition Rating and Maintenance System for Railway Bridges in Poland*, 4th International Bridge Engineering Conference, Conference Proceedings 7, San Francisco, California, USA, 1995, Vol. 1, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 32–37.
- [308] Scherer W.T., Glagola D.M., *Markovian Models for Bridge Maintenance Management*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 1, 1994, s. 37–51.
- [309] Schoitsch G., *Strategy and Organization of Efficient Bridge Maintenance on ÖBB*, Origins of the ERRI Conference on Maintenance of Railway Bridges and Civil Engineering Structures, Utrecht, The Netherlands, Technical Document DT 331, 1995.
- [310] Sebastian H.-J., Funke B., Müller K., Thaeringen M., *Innovative Design by Integration of Expert System Technology with Multi-Criteria Decision Making and Fuzzy Systems*, Proceedings of the Conference on Moving Towards Expert Systems Globally in the 21st Century, 1994, s. 263–272.
- [311] Shestrikov V.I., Johnson B., *Bridge Management Methods of the Russian Federal Highway Administration*, 8th International Bridge Management Conference, Transportation Research Board, Denver, USA, 1999.
- [312] Shetty N.K., Chubb M.S., Manzoichi G.M.E., *Advanced Methods of Assessment for Bridges*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 139–149.
- [313] Shirole A.M., *Development and Implementation of New York State’s Comprehensive Bridge Safety Assurance Program*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 187–196.
- [314] Sinha K.C., Bowman M.D., Jiang Y., Murthy S., Saito M., Tee A.-B., *Emerging Methodologies for Bridge Management Systems*, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Baltimore, Maryland, USA, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1990, s. 23–31.
- [315] Skarżewski J.M., Apanas L., *Charakterystyka użytkowa kolejowych mostów z dźwigarów stalowych i obetonowanych w świetle badań doświadczalnych i kodeksów UIC*, III Ogólnopolska Konferencja Mostowców, „Konstrukcja i wyposażenie mostów”, Wisła, 1997, Referaty, s. 393–403.
- [316] Small E.P., *Zarządzanie mostami w Stanach Zjednoczonych Ameryki*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 361–378.
- [317] Small E.P., Fraher M., Philbin T., Romack G.P., *The Current Status of Bridge Management Systems Implementation in the United States*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. A-1/1–16.
- [318] Smith I., Boulanger S., *Representing Incomplete Knowledge with Assumptions*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 55–64.
- [319] Soderqvist M.-K., *The Finnish Practice and Experience Regarding Bridge Inspection and Management*, Management of Highway Structures, Thomas Telford, London, 1999, s. 71–80.
- [320] Soderqvist M.-K., *Analysis of BMS Reference Bridges in Finland*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. C-4/1–9.

- [321] Soderqvist M.K., Veijola M., *The Finnish Bridge Management System*, Proceedings of the International Bridge Conference, Warsaw`94, Vol. 1, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1994, s. 317–325.
- [322] Soderqvist M.K., Veijola M., *The Finnish Bridge Management System*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 4, 1998, s. 315–319.
- [323] Stankiewicz B., *Wpływ warunków środowiska zewnętrznego na stan betonu w konstrukcjach mostowych*, Konferencja naukowo-techniczna „Mosty w drodze do XXI wieku”, Gdańsk-Jurata, 1997, tom II, s. 753–761.
- [324] Stukhart G., *A Bridge Management System for Texas*, AACE Transactions, No. 3, 1991, s. 1–7.
- [325] Subieta K., *Słownik terminów z zakresu obiektowości*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1999.
- [326] Sugidate M., Ichikawa A., Koshiba A., Horiguchi T., *Development of a Bridge Maintenance Consulting System*, Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Extending the Lifespan of Structures”, San Francisco, California, USA, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 73/1, s. 413–418.
- [327] Suwara T., Kozicki J., Kaszyński A., *Mosty w Polsce na tle reformy drogownictwa*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 379–394.
- [328] Szelka J., *Generowanie wiedzy w systemach eksperckich wspomagających projektowanie mostów wojskowych*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 6, s. 395–402.
- [329] Szelka J., *Obiektowy zapis wiedzy w systemach eksperckich wspomagających budowę mostów wojskowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1999.
- [330] Sznurowski M., *Utrzymanie mostów kolejowych, przepustów i tuneli*, WKŁ, Warszawa, 1979.
- [331] Ścisławski Z., *Ochrona konstrukcji żelbetowych*, Arkady, Warszawa, 1999.
- [332] Śniady P., Biernat S., Sieniawska R., Żukowski S., *Problemy i metody probabilistycznej analizy i oceny niezawodności mostów*, XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Wrocław-Krynica, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, T. 4, s. 401–418.
- [333] Śniady P., Sieniawska R., Żukowski S., *Wpływ chlorkowej korozji zbrojenia na niezawodność mostowej belki żelbetowej*, Inżynieria i Budownictwo, nr 3–4, 2002, s. 198–200.
- [334] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa, 1993.
- [335] Tadeusiewicz R., *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998.
- [336] Tanaka S., Mikami I., *A Diagnostic System with Analogical Inference and Machine Learning*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 157–166.
- [337] Taylor W.K., *Computers and the Nervous System. Models and Analogues in Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1960.
- [338] *The Bridges Act*, Henry VIII, 1530.
- [339] Thompson P.D., *Pontis Version 3: Reaching out to the Bridge Management Community*, Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference, Vol. 1, San Francisco, California, USA, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1995, s. 197–202.
- [340] Thompson P.D., Chetham A., Merlo T., Ellis R., Kerr B., *The New Ontario Bridge Management System*, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, USA, 1999, Transportation Research Circular, No. 498, 2000, s. F-6/1–15.
- [341] Thompson P.D., Harrison F.D., *Pontis Version 2.0 User's Manual, A Network Optimization System for Bridge Improvements and Maintenance*, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-93-083, Washington, D.C., USA, 1993.

- [342] Thompson P.D., Small E.P., Johnson M., Marshall A.R., *The Pontis Bridge Management System*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 4, 1998, s. 303–308.
- [343] Toorn A., *The Maintenance of Civil Engineering Structures*, Heron, Vol. 39, No. 2, 1994, s. 3–34.
- [344] *Trunk Road Management and Maintenance (TRMM). Trunk Road and Motorway Structures – Records and Inspection*, Department of Transport, London, 1987.
- [345] Tsitchizris D.C., Lochovsky F.H., *Data Models*, Prentice-Hall, 1982.
- [346] Turban E., *Decision Support and Expert Systems: Management Support Systems*, Macmillan, New York, 1993.
- [347] *Tymczasowa instrukcja o bieżącym utrzymaniu mostów kolejowych, Nr D63*, Biuletyn Ministerstwa Komunikacji, Nr 7, Warszawa, 1955.
- [348] *Underwater Inspection of Bridges*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-DP-89-1, 1989.
- [349] *Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r.: Prawo budowlane*, DzU Nr 89, poz. 414.
- [350] Vann A., Davis J., *Monitoring Instrumentation Fault Diagnosis and Data Interpretation*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge Support Systems in Civil Engineering”, Bergamo, Italy, IABSE, Zurich, Switzerland, 1995, Vol. 72, s. 147–156.
- [351] Wang L., Xu Y., *Automatic Knowledge Acquisition and Economic Evaluation*, Colloquium of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Knowledge-Based Systems in Civil Engineering”, Beijing, China, IABSE, Zurich, Switzerland, 1993, Vol. 68, s. 45–53.
- [352] *Warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynierskich PKP – D2*, Biuletyn Polskich Kolei Państwowych, 2001.
- [353] Waszczyszyn Z., *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii lądowej*, XLI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Kraków-Krynica, Politechnika Krakowska, Kraków, 1995, T. 9, s. 251–288.
- [354] Waszczyszyn Z., *Standard Versus Refined Neural Networks Applications in Civil Engineering Problems: An Overview*, II Konferencja Sieci Neuronowych, Szczyrk, 1996, Politechnika Częstochowska.
- [355] Waterman D.A., *A Guide to Expert Systems*, Addison-Wesley, Reading, 1986.
- [356] White K.R., et. al., *Bridge Maintenance Inspection and Evaluation*, Marcel Decker, New York, 1981.
- [357] *Wielka Encyklopedia Powszechna PWN*, PWN, Warszawa, 1966.
- [358] Winston P.H., *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, 1984.
- [359] Wołowicki W., Ratajczak G., *Trwałość i przydatność użytkowa konstrukcji mostowych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 4–5, 1990, s. 167–169.
- [360] Wong S.T.C., *An Open System Knowledge Framework and its Bridge Evaluation Application*, IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, Vol. 24, No. 6, 1994, s. 901–917.
- [361] Wrotek E., *System referencyjny na drogach krajowych w Polsce*, Drogownictwo, nr 6, 1994, s. 125–128.
- [362] Wysokowski A., *Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Studia i Materiały, zeszyt 53, Warszawa, 2001.
- [363] Wysokowski A., Łęgosz A., Hutnik A., *System gospodarki mostowej. Komputerowe wspomaganie zarządzania mostami w drogownictwie (stan obecny)*, Drogownictwo, nr 11, 1996, s. 334–342.
- [364] Wysokowski A., Łęgosz A., Oszytko J., *Doświadczenia z pierwszego etapu wdrożeń Systemu Gospodarki Mostowej*, Drogownictwo, nr 3, 1995, s. 59–65.
- [365] Yager R.R., Filev D.P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa, 1995.
- [366] Yamamoto K., Nakamura H., Matsui S., *An Internet-Based Diagnostic System for Hydropower Steel Structures*, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural

- Engineering „Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 406–407.
- [367] Yanev B.S., *Emergency Repair Needs Assessment for the New York City Bridges*, Proceedings of the Conference on Maintenance of Bridges and Civil Structures, Paris, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, France, 1994, s. 501–513.
- [368] Yanev B.S., *Bridge Management for New York City*, Structural Engineering International, Vol. 8, No. 3, 1998, s. 211–215.
- [369] Yanev B., *Maturing Management for Aging Bridges*, New York City, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 388–389.
- [370] Yang H.-L., *Information/Knowledge Acquisition Methods for Decision Support Systems and Expert Systems*, Information Processing and Management, Vol. 31, No. 1, 1995, s. 47–58.
- [371] Yekimov V.K., Fedoseev V.N., Shilin A.A., *Maintenance of Bridge Structures under Operation in Moscow*, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 390–391.
- [372] Yen B.T., et. al., *Manual for Inspecting Bridges for Fatigue Damage Conditions*, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg, 1990.
- [373] Zadeh L.A., *Fuzzy Sets*, Information and Control, 1965, Vol. 8, s. 338–353.
- [374] Zadeh L.A., *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, Vol. 3, s. 28–44.
- [375] Zadeh L.A., *Fuzzy Sets and Information Granularity*, Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1979, s. 3–18.
- [376] Zadeh L.A., *Making Computers Think Like People*, IEEE Spectrum, August 1984, s. 26–32.
- [377] *Zalecenia dotyczące oceny jakości betonu „in-situ” w istniejących konstrukcjach obiektów mostowych*, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Wrocław, 1998.
- [378] Znidaric J., Perus I., *Condition Rating Method for Concrete Structures*, 16th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering „Structural Engineering for Meeting Urban Transportation Challenges”, Lucerne, Switzerland, IABSE, Zurich, Switzerland, 2000, s. 270–271.
- [379] Żurada J., Barski M., Jędruch W., *Sztuczne sieci neuronowe*, PWN, Warszawa, 1996.