

Komputerowy system diagnostyczny oceny stanu zapór ziemnych z centralnym rdzeniem

Abstract

Computer diagnostic system for safety evaluation of embankment dam with core. In the paper, the control system prepared for Czorsztyn and Klimkówka Dam has been presented. The system based on expert system's technology assists in interpretation of results obtained from different measurements and observations of the dam. Its structure and the main principles of operation have been demonstrated.

Key words: dam safety, expert system, computer aided control system

Wprowadzenie

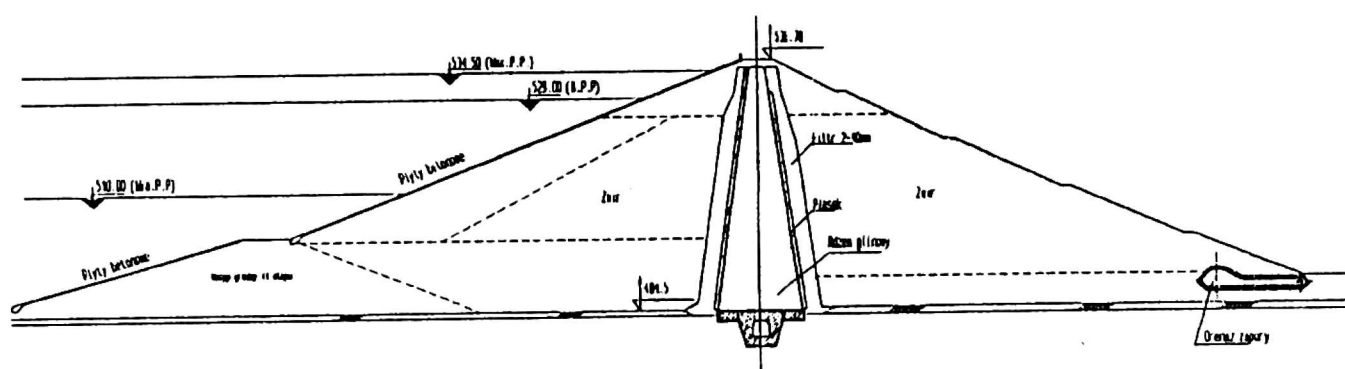
Ze względów ekonomiczno-technicznych w ostatnich latach w polskim budownictwie wodnym wznoszone są zapory ziemne uszczelnione rdzeniem gruntowym. Wzorcem dla nowo powstających budowli jest zaporą Tresna, która jest bezawaryjnie eksploatowana od ponad 25 lat. Ostatnio zakończona została budowa zapory w Klimkówce na rzece Ropie, a obecnie dobiega końca budowa zapory w Czorsztynie na Dunajcu. Ponadto w fazę realizacji wkroczyły zapory w Świnnej Porębie na Skawie oraz w Wiórach na

rzece Świślinie. Są to budowle jak na warunki krajowe o znacznym piętrzeniu wody (20 i więcej metrów). Wszystkie wymienione obiekty charakteryzują się podobnym przekrojem poprzecznym, tzn. centralnym pionowym uszczelnieniem – rdzeniem z gruntów spoistych (rys. 1).

Chociaż zapory z rdzeniem gruntowym są na świecie konstrukcją wielokrotnie sprawdzoną, tym niemniej należą do jednych z najtrudniejszych do realizacji. Wbudowywanie w przekrój poprzeczny gruntów różniących się znacznie pomiędzy sobą właściwościami fizycznymi i mechanicznymi sprawia, że bezpieczeństwo zapór z rdzeniem gruntowym, jak w żadnych innych budowlach zależy od wielu czynników, m.in. od rozwiązań konstrukcyjnych, jakości wbudowanych gruntów, warunków zagęszczenia, monitoringu. Opracowanie systemu oceny bezpiecznej eksploatacji zapory musi być zawsze poprzedzone gruntowną analizą potencjalnych zagrożeń, jakie mogą wystąpić w warunkach konkretnej zapory. Praca taka musi, oprócz analizy warunków geologicznych, projektu i technolo-

* Katedra Geotechniki SGGW, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.

** GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne, ul. Brata Alberta 14, 05-075 Wesola k. Warszawy.



Rys. 1. Typowy przekrój zapory w Czorsztynie

gii budowy czy przeglądu awarii zapór o zbliżonej konstrukcji, zawierać również głęboką analizę warunków pracy zapory nasypowej z wąskim rdzeniem gruntowym.

Awarie i uszkodzenia zapór nasypowych wynikające z błędów konstrukcyjnych (projektowych, wykonawczych) są dowodem na to, że stan wiedzy, na którym opierają się projektanci, nie jest dostateczny. Katastrofy i awarie zapór zdarzają się wprawdzie coraz rzadziej, lecz nieprawidłowości w pracy tych budowli są nadal częstym tematem publikacji. Na ostatnim Kongresie Wielkich Zapór w Durbanie (1994 r.) poświęcono jedną z czterech sesji problemom zwiększenia stopnia bezpieczeństwa eksploatacji zapór. Międzynarodowa Komisja Wielkich Zapór wydała w 1994 r. specjalny biuletyn (nr 99) poświęcony analizie zniszczonych zapór [ICOLD 1994]. Wnioski wynikające z awarii mają istotne znaczenie dla ulepszenia stanu wiedzy warunkującego realizację bezpiecznych obiektów. Zniszczenie zapory jest na ogół wynikiem działania kilku przyczyn, często większość z nich nie zostaje ujawniona i wyjaśniona. Nie zawsze bowiem badania i obserwacje są w stanie jednoznacznie stwierdzić, co było przyczyną katastrofy lub awarii zapory. Dlatego też opracowa-

nie jednoznacznej statystyki przyczyn powodujących awarie zapór jest prawie niemożliwe. Z analizy pracy zapór nasypowych wynika, że awarie powstają najczęściej w fazie budowy oraz początkowego (ok. pięcioletniego) okresu eksploatacji. Z istniejących klasyfikacji traktowanych jako orientacyjne wynika również, że najczęstszymi przyczynami katastrof są przelanie się wody przez budowlę oraz przebicie (lub pęknięcie) hydrauliczne. Jeśli projektowe obliczenia hydrologiczne są w miarę poprawne, a gospodarka na zbiorniku jest prowadzona w sposób prawidłowy opierający się na prognozach meteorologicznych i hydrologicznych, to przelanie się wody przez zapórę nie powinno stanowić zagrożenia. Główną, a jednocześnie trudną do przewidzenia przyczyną awarii może być powstanie niekorzystnych odkształceń miejscowych zapory, które – chociaż mają z reguły zasięg lokalny – mogą doprowadzić do awarii lub katastrofy zapory.

Rozpoczęcie piętrzenia nowo zbudowanej zapory powoduje, że występują w niej dwa zjawiska – niedokończony proces konsolidacji oraz obciążenia eksploatacyjne. Nakładające się na siebie zjawiska w czasie powodują, że okres pierwszego napełnienia i początkowej eksploatacji (pierwsze kilka lat) nie został

dotychczas dostatecznie rozpoznany. Brak jest w literaturze i praktyce jednoznacznego opisu fizycznego i matematycznego zachodzących zjawisk, a zatem poprawnych metod obliczeniowych. Ocena stanu i bezpieczeństwa tego typu zapór jest zatem bardzo trudna, wymaga bowiem dobrej znajomości warunków pracy budowli przy zmieniających się obciążeniach oraz kojarzeniu ze sobą faktów pojawiających się podczas eksploatacji i informacjami z okresu budowy i wcześniejszej eksploatacji.

Metody oceny bezpieczeństwa

Do oceny funkcjonowania budowli stosuje się szczególnie w ostatnich latach teorie bezpieczeństwa i niezawodności. Łatwiej jest analizować powstałe w budowli stany zagrożenia i wydawać opinie co do dalszej eksploatacji budowli, natomiast znacznie trudniej jest prognozować zachowanie się zapory w szczególności uszczelnionej rdzeniem gruntowym. W związku z zastosowanymi do budowy różnymi gruntami oraz różniącą się w każdym przypadku geometrią zapory są indywidualnymi rozwiązaniami. Dlatego też nie jest możliwe eksploatowanie danych z jednego obiektu na inny. W związku z tym możliwości, które dają nam teorie bezpieczeństwa i niezawodności, nie zawsze mogą być wykorzystane w ocenie zapór ziemnych. Najczęściej w praktyce stosowane są modele deterministyczne oceny bezpieczeństwa, gdzie analizowana jest jedynie konkretna zapora. Metody oparte na statystyce, a tym bardziej na probabilistyce mają małe znaczenie przy ocenie bezpieczeństwa zapór z rdzeniami gruntowymi. Do oceny stanu bezpieczeństwa zapór powinna być stosowana jed-

nolita procedura z uwzględnieniem odrębności podejścia wynikającego ze specyfiki położenia oraz charakterystyki obiektu. Niezawodność zapory osiąga się bowiem nie tylko dzięki trafnemu jej zaprojektowaniu, lecz także dzięki kontroli jakości gruntów, nadzorowi w czasie budowy, monitoringowi oraz użytkowaniu obiektu zgodnie z ustalonymi w projekcie warunkami eksploatacji (z uwzględnieniem zmieniających się w czasie warunków pracy konkretnego obiektu).

O prawidłowym zaprojektowaniu zapory ziemnej z rdzeniem gruntowym i bezpiecznej jej eksploatacji decyduje w głównej mierze sprawdzenie kryteriów statycznych. Im lepiej bowiem rozumiemy statykę zaporu i znamy słabe miejsca budowli, tym bezpiecznej możemy ją zaprojektować i eksploatować. Biorąc pod uwagę zapory nasypowe z rdzeniem gruntowym, można wyróżnić w ich "życiu" kilka okresów, w których występuje przede wszystkim zmiana obciążeń. Okresami tymi są czas budowy, pierwsze napełnienie zbiornika, normalna eksploatacja, nagłe opróżnienie zbiornika. Dla każdego z tych okresów należy:

- sprawdzić stateczność zapory (statyka ogólna budowli),
- ocenić stan naprężenia i odkształcenia (zlokalizowanie niebezpiecznych odkształceń miejscowych).

Sprawdzenie stateczności nie ma większego znaczenia w zaporach z wąskim rdzeniem (takich jak zapory Czorsztyn i Klimkówka), ale przy szerokich rdzeniach lub rdzeniach z wydłużonym poziomem uszczelnieniem problem stateczności jest bardzo istotny.

Dla zapór z rdzeniem gruntowym najbardziej istotnym kryterium oceny bez-

piecznej pracy budowli jest określenie stanu naprężenia i odkształcenia pod kątem oceny możliwości wystąpienia niekorzystnych dla budowli odkształceń miejscowych, tzn. zlokalizowanie potencjalnych niebezpiecznych dla zapory stref uplastycznienia i rozciągania gruntu. W strefach tych mogą powstać ewentualne pęknięcia spowodowane nadmiernym osiadaniem rdzenia od ciężaru własnego lub w wyniku działania obciążeń hydrostatycznych albo hydrodynamicznych. Powstanie szczelin może spowodować awarię zapory lub uniemożliwić dalszą jej eksploatację. Istotną zatem sprawą jest bardzo dobre rozpoznanie mechanizmu pracy budowli. W USA w Bureau of Reclamation [Statler, Luebke 1995] ocenę bezpieczeństwa zapory przeprowadza się po rozpoznaniu i zdefiniowaniu warunków funkcjonowania zapory. Oceniając zatem stan i bezpieczeństwo zapór Czorsztyn i Klimkówka w okresie eksploatacji, należy przeprowadzić analizę warunków pracy zapór w okresie budowy i pierwszego napełnienia zbiornika.

Z analizy warunków funkcjonowania zapory w etapie budowy i pierwszego napełniania wynika, że głównie w rdzeniu zapory mogą zachodzić pewne procesy, mogące w określonych sytuacjach przebiegać szybko. W związku z tym podczas eksploatacji zapory wymagany jest stały nadzór, mający na celu jak najwcześniejsze wykrycie wszelkich objawów nieprawidłowego działania. Nadzór ten powinien być prowadzony przez personel bezpośrednio zatrudniony przy eksploatacji obiektu. Dlatego też podjęto prace nad opracowaniem systemu komputerowego, którego zadaniem będzie wspomaganie prowadzenia codziennej kontroli zapory [Proj. bad. KBN 1993].

Budowa programu komputerowego ZAPORA

Wprowadzenie

Do oceny bezpieczeństwa eksploatacji zapory ziemnej z rdzeniem zaproponowano podejście deterministyczne, polegające na analizie informacji zbieranych podczas pracy obiektu i interpretacji faktów na podstawie dostępnej wiedzy o tym typie zapór. Oznacza to, że praca całego systemu jest sterowana zdarzeniami. Jako zdarzenie traktuje się w tym przypadku każde odstępstwo od przyjętego wzorca. Wzorce opracowano na podstawie dostępnych informacji o konkretnej zaporze, modelowania numerycznego oraz analizy dostępnej literatury. Ponieważ sam wzorzec może w pewnych przypadkach ulegać zmianom, zakłada się udostępnienie narzędzi numerycznych (MES) przygotowanych specjalnie do konkretnego obiektu.

Cele, jakie postawiono przed systemem diagnostycznym, były następujące:

- zapewnienie prawie ciągłej kontroli zachowania się obiektu,
- wspomaganie interpretacji wskazań aparatury kontrolno-pomiarowej,
- przyspieszenie reakcji na sytuacje mogące stanowić zagrożenie obiektu,
- pomoc obsłudze technicznej zapory w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych, związanych z bezpieczeństwem obiektu,
- rejestracja niektórych czynności personelu dotyczących bezpieczeństwa zapory,
- uruchomienie systemu na komputerze klasy PC-i486.

Podstawowym źródłem informacji o stanie, w jakim znajduje się zaporą, jest sze-

roko rozumiany monitoring [ICOLD Bull. No 68]. Monitoring można podzielić na:

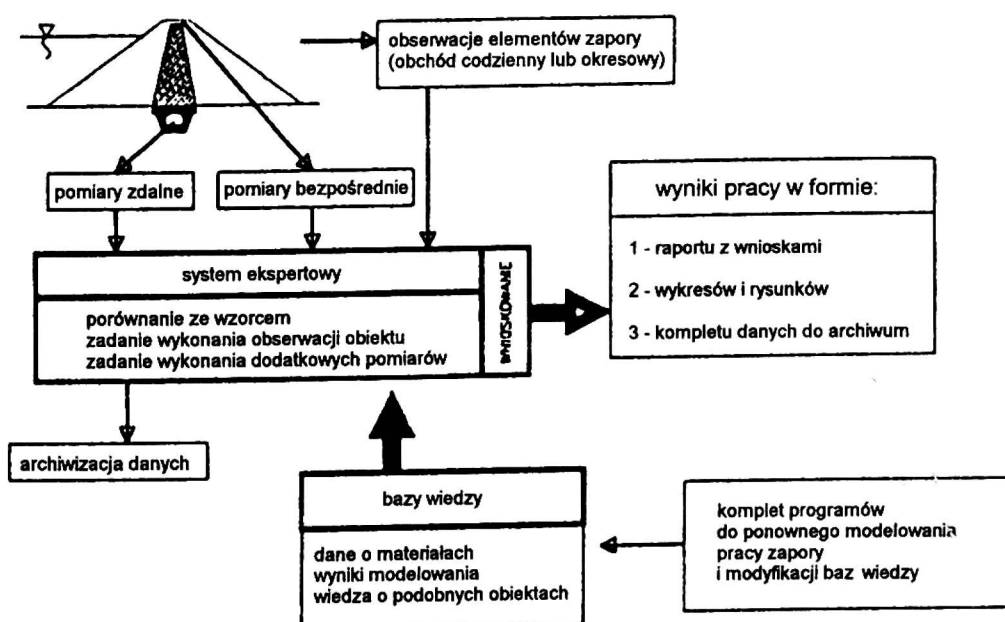
- obserwacje zewnętrzne;
- pomiary ręczne wybranych parametrów pracy;
- pomiary automatyczne wybranych parametrów pracy (wprowadzane ostatnio na większych zaporach);

Przez monitoring ziemnych budowli piętrzących powszechnie rozumie się wykonywanie automatycznych pomiarów wybranych wielkości fizycznych charakteryzujących pracę obiektów. Jednak ten element zbierania danych o zachowaniu się budowli, jakkolwiek bardzo ważny, nie jest jedynym niezbędnym. Trzeba pamiętać, że pomiary np. ciśnień porowych czy parcia gruntu wykonywane są punktowo i nierzadko trudno jest interpretować ich wskazania bez uwzględnienia całości zachowania się budowli. Dlatego tak ważne jest wykonywanie codziennych obchodów i jednoczesna analiza zebranych w ten sposób informacji z pomiarami automatycznymi, czemu między innymi

ma służyć opracowywany system oceny stanu zapory.

W pracach Gajla (1991) i Kleibera (1991) przedstawiono wiele rodzajów systemów ekspertowych oraz ich zastosowania w technice. Jednymi z nich są tzw. systemy interpretacyjne i diagnostyczne, których zadaniem jest analiza posiadanych danych w celu określenia ich znaczenia oraz poszukiwaniu błędu w analizowanym obiekcie. Do analizy stanu zapory wybrano system ekspertowy o architekturze tablicowej [Radomski 1993]. Schemat budowy systemu przedstawiono na rysunku 2.

System automatycznej oceny stanu zapory ziemnej jest komputerowym systemem diagnostycznym, wspierającym ocenę stanu obiektu podczas normalnej eksploatacji (po ustabilizowaniu się parametrów mechanicznych). Konstrukcja systemu, oparta na technologii tzw. systemów ekspertowych, rozróżnia deklaratywne i proceduralne reprezentacje wiedzy dziedzinowo zależnej (tj. wiedzy o stanie zapory i reguł diagnozowania) od członów wiedzy dziedzinowo niezależ-



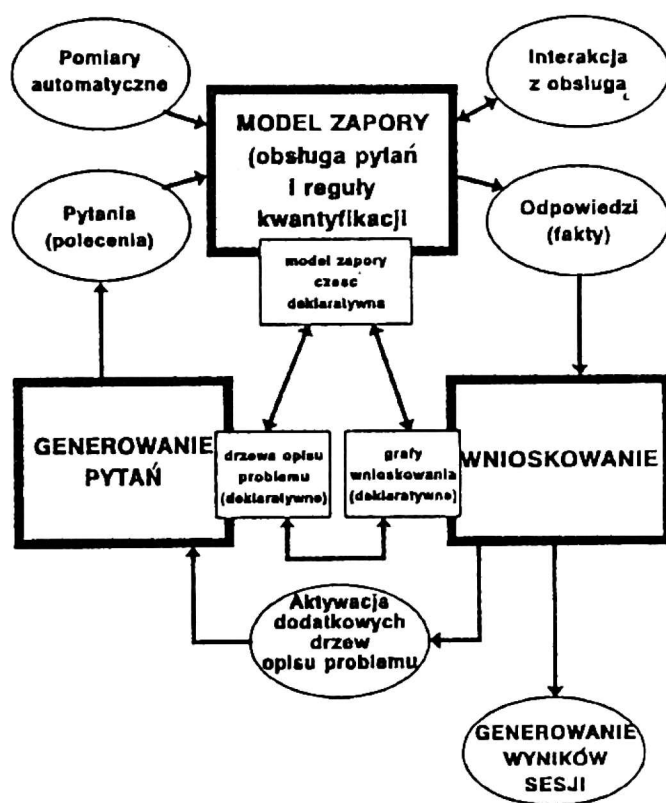
Rys. 2. Schemat budowy systemu oceny bezpieczeństwa zapory

nej, co – w zamierzeniu – ułatwia nie tylko procesy akwizycji wiedzy od ekspertów, lecz prowadzi również do możliwości adaptacji systemu do oceny stanu innych budowli lub zapór ziemnych, podobnie oprzyrządowanych w aparaturę kontrolno-pomiarową, dzięki zabiegowi wymiany bazy wiedzy dziedzinowo zależnej.

Przy ocenie stanu obiektu system opiera się na dwóch rodzajach danych oraz na zadanych deklaratywnie regułach wnioskowania. Pierwsza grupa danych zbierana jest automatycznie z zainstalowanej w obiekcie aparatury kontrolno-pomiarowej przetwarzana jest wstępnie w zabiegach kwantyfikacji, prowadząc do odpowiednio szczegółowych ocen jakościowych. Druga grupa danych zbierana jest przez obsługę w trakcie rutynowego obchodu obiektu lub na żądanie systemu, to z natury dane o charakterze jakościowym. Reguły wnioskowania prowadzą od zaobserwowanych faktów "elementarnych", przez ich alternatywy i koniunkcje, do ocen, które można traktować jako mniej lub bardziej lokalne diagnozy stanu. Lokalność ta może być rozpatrywana "topograficznie" – wówczas rozumowanie prowadzi od oceny składowych do oceny całości, albo też wzdłuż osi "wzrastającej pewności" – wówczas rozumowanie prowadzi od wykrycia nie-normalnych wartości mierzonych parametrów (lub obserwacji) do wykrycia potwierdzonego zagrożenia.

System stawia diagnozę na podstawie bazy wiedzy, reprezentowanej głównie przez zadane deklaratywnie reguły wnioskowania, opracowane na podstawie analizy przyczyn awarii i katastrof zapór i budowli ziemnych. Istotną rolę pełni część proceduralna wiedzy, ukryta w pro-

gramach obsługi jednostkowych wartości pomiarów i obserwacji, która odpowiedzialna jest za przełożenie wielkości specyficznych dla obiektu na terminy stosowane w regułach wnioskowania (kwantyfikacja). Schemat budowy programu ZAPORA przedstawiono na rysunku 3. Poszczególne elementy składowe systemu opisane zostały w kolejnych rozdziałach.



Rys. 3. Schemat budowy programu ZAPORA

Działanie systemu jest sterowane zdarzeniami. Zdarzeniem jest w rozumieniu systemu tablicowego każda zmiana stanu pamięci, reprezentowanej jako zbiór obiektów strukturalnych, w których przechowywane będą dane zbierane z pomiarów i obserwacji lub dane generowane w wyniku działania samego systemu. Zatem za sterowanie przebiegiem procesu wnioskowania odpowiedzialne są dane, pojawiające się (lub zmieniające) we współ-

nym, globalnym obszarze pamięci, tzw. tablicy. Zawartość tablicy decyduje o tym, które i w jakiej kolejności moduły wiedzy zostaną uruchomione. Można zatem powiedzieć, że tablica jest miejscem, za pośrednictwem którego proceduralne moduły systemu przekazują sobie informacje sterujące przebiegiem pracy systemu.

Zasadniczą zaletą architektury tablicowej jest możliwość oddzielenia od siebie proceduralnych składowych systemu. Każdy moduł wiedzy specjalizowany jest w wąskim zakresie działania i jego zadaniem jest konkretna reakcja na zdarzenie odpowiedzialne za jego aktywację. Ponieważ działanie danego modułu wiąże się z działaniem innych modułów systemu jedynie za pośrednictwem obiektów tablicy, można łatwo wymienić proceduralną treść danego modułu na inną.

Obiekty strukturalne

Informacje będą reprezentowane w systemie jako obiekty strukturalne. Obiekt strukturalny to posiadający nazwę zbiór par: atrybut–wartość. Jest to uogólnienie znanego z klasycznych języków programowania pojęcia rekordu (np. w PASCAL-u). Intencją tego mechanizmu jest możliwość skupienia w jednym miejscu (identyfikowanym przez nazwę obiektu) opisu obiektu w postaci cech: atrybut odpowiada nazwie cechy, a wartość wskazuje konkretyzację cechy. Oczywiście z tak rozumianym pojęciem cechy wiąże się zbiór możliwych konkretyzacji, czyli wartości. Na przykład cechy pojedynczego piezometru elektrycznego możemy w systemie reprezentować jako poniżej przedstawiony obiekt strukturalny, nazywany **Piezometr111**:

object Piezometr111

{opis: "piezometr 1-1-1"

poziom: Poziom11

numer: 1

*minRealny: "minimum zakresu
realnych odczytów"*

*minNorma: "minimum zakresu
odczytów w normie"*

*maxNorma: "maximum zakresu
odczytów w normie"*

*maxRealny: "maximum zakresu
realnych odczytów"*

wartość: "wartość ostatniego odczytu"

*wartość1: "wartość przedostatniego
odczytu"*

*progTempa: "wartość graniczna
prędkości zmian"*

stan: "jedna z wartości:

WolnyWzrost

WolnySpadek

SzybkiWzrost

SzybkiSpadek

Stabilny Nierealny"}"

Z wyjątkiem pierwszej wartości (w atrybucie 'opis'), pozostałe napisy w cudzysłowach są słownym opisem znaczenia wartości pola – w rzeczywistej reprezentacji zastąpione są wartościami liczbowymi. Wartością pola w obiekcie strukturalnym może być także wskazanie innego obiektu strukturalnego. Mechanizm obiektów strukturalnych zdolny jest zatem do wyrażania związków o charakterze drzewa grafu (np. sieć wnioskowania). W powyższym przykładzie w obiekcie **Piezometr111** zapisano odniesienie do obiektu **Poziom11**, którego jednym z pól będzie: *piezometry: (Piezometr111 Piezometr112 Piezometr113)*

Lista w nawiasach jest w tym przypadku zapisem zbioru wartości.

Model zapory

Wszystkie informacje o stanie wskaźników automatycznej i obsługiwanej ręcznie aparatury kontrolno-pomiarowej oraz informacje uzyskane podczas okresowego obchodu system przechowuje w strukturze zwanej modelem zapory. Jest to struktura skonstruowana hierarchicznie za pomocą obiektów strukturalnych, opisująca interesujące z punktu widzenia systemu elementy zapory. Podstawą tego drzewa jest obiekt **ModelZapory**, zaś odgałęzieniami – obiekty odpowiadające pojedynczym czujnikom (jak wymieniony wyżej przykładowo **Piezometr111**). Wyspecjalizowane moduły wiedzy będą w takim wypadku odpowiedzialne za wypełnienie modelu zapory konkretnymi wartościami. Pochodzą one z automatycznej aparatury kontrolno-pomiarowej oraz pomiarów i obserwacji dokonywanych przez obsługę. W tym pierwszym przypadku system automatycznego zbierania danych z czujników zapisuje informacje w pliku i stamtąd są one pobierane – bez wiedzy użytkownika – do systemu diagnostycznego. Reszta informacji natomiast jest uzyskiwana od personelu obsługi zapory podczas interakcyjnej sesji. Moduły te stanowią część tzw. proceduralnego modelu zapory, tj. warstwy programowej, która (jako jedyny składnik całego systemu) ma dostęp do hierarchii osadzonej w obiekcie *ModelZapory*. W modułach tych zawarta jest wiedza o tym, jakie przedziały wartości określonych czujników należy uznawać za normalne, a jakie za sygnalizujące potencjalne zagrożenia. W ten sposób różnorodne skale liczbowe związane z różnymi typami czujników zastąpione zostaną jednoli-

tym systemem danych symbolicznych, postaci np. *WNormie* czy też *Szybki-Wzrost*. Reguły wnioskowania operują takimi właśnie pojęciami, korzystne jest zatem odseparowanie poziomu konkretnych wartości liczbowych od poziomu wnioskowania symbolicznego.

Drzewa opisu problemu

Drzewa opisu problemu to struktury danych skonstruowane w celu deklaratywnego zadania kolejności działań podejmowanych przez system. Ogólny problem, jaki ma być rozwiązany przez system, a więc pytanie: "Jaki jest stan zapory"?, rozkłada się na podproblemy, np. "Jaki jest stan rdzenia"?. Sposób dekompozycji problemu na podproblemy może zostać zapisany deklaratywnie, w postaci powiązanych ze sobą obiektów strukturalnych. Możliwe jest wówczas użycie niezależnego dziedzinowo mechanizmu, który – przetwarzając taką strukturę danych – wyznacza cele działania pozostałych części systemu. Przez "dziedzinowo niezależny mechanizm" rozumiemy tutaj taki mechanizm, który działa identycznie dla dowolnego (i dotyczącego dowolnej wiedzy) drzewa opisu problemu. Łatwe jest również wyspecyfikowanie takiej akcji systemu, która polega na żądaniu od obsługi dokonania dodatkowych pomiarów i obserwacji, wówczas gdy z danych zebranych z rutynowego codziennego obchodu wynika, że możliwe jest jakieś zakłócenie normalnego funkcjonowania zapory i zachodzi konieczność natychmiastowego zebrania danych uzupełniających.

Ponieważ drzewa opisu problemu zadawane są statycznie i deklaratywnie,

ewentualna ich zmiana w ogóle nie jest zauważana przez system. Dzięki temu – bez najmniejszej zmiany w systemie – możliwe jest łatwe modyfikowanie sposobu działania systemu.

Sieci wnioskowania

Reguły wnioskowania są reprezentowane w systemie w postaci tzw. sieci wnioskowania utworzonych z powiązanych ze sobą obiektów strukturalnych. Węzeł sieci reprezentuje fakt albo koniunkcję faktów. Połączenia między węzłami określają kierunek wnioskowania. Jeśli od węzła A prowadzi krawędź do węzła B, traktujemy to jako formę implikacji:

jeśli A to B

Do danego węzła może prowadzić wiele krawędzi od różnych węzłów. Traktujemy taki fragment grafu jako alternatywę. Zatem jeśli do węzła B prowadzi wiele krawędzi od węzłów $A_1, A_2 \dots A_n$, równoważne jest to zapisowi:

jeśli A_1 lub A_2 lub ... A_n to B

Odmienne jest znaczenie wielu krawędzi prowadzących do jednego z węzłów reprezentujących spójnik logiczny "i". Jeśli do węzła AND_k (gdzie wskaźnik "k" symbolizuje fakt istnienia wielu takich

węzłów w systemie) prowadzą krawędzie od węzłów $A_1, A_2 \dots A_n$, traktujemy to jako koniunkcję w postaci:

jeśli A_1 i A_2 i ... A_n to AND_k

Krawędź wychodząca z węzła AND_k prowadzi do faktu (w przykładzie – wniosku) będącego właściwym następnikiem implikacji.

Na przykład przedstawiony na rysunku 4 fragment sieci wnioskowania odpowiada następującym regułom:

jeżeli

piezometry_zamknięte_szybki_wzrost

to

możliwość_intensywnej_filtracji_z_pomiarów

jeżeli

zawilgocenia_galerii

lub

galeria_zawilgocona_w_przeszłości

to

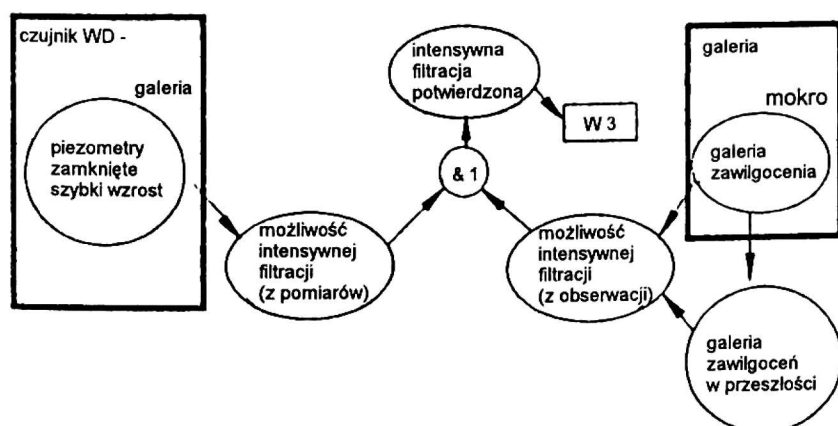
możliwość_intensywnej_filtracji_z_observacji

jeżeli

możliwość_intensywnej_filtracji_z_observacji

i(&1)

możliwość_intensywnej_filtracji_z_pomiarów



Rys. 4. Fragment grafu wnioskowania

to

intensywna filtracja pod zaporą potwierdzona

jeżeli

intensywna filtracja pod zaporą potwierdzona

to

WNIOSEK_W3

W systemie nie ma pełnego rachunku logicznego, co pozwoliło przenieść logiczne "nie" do wnętrza symbolu opisującego fakt. Oznacza to, że zamiast wyrażenia:

nie Wystąpiły Duże Opady

w systemie istnieje równoważny fakt:

Nie Wystąpiły Duże Opady

Tak zdefiniowana sieć wnioskowania jest – analogicznie jak drzewa opisu problemu i deklaratywna część modelu zapory – deklaratywnie zadaną strukturą danych, reprezentująca schematy wnioskowania stanowiące treść możliwych procesów diagnostycznych.

W systemie za wynik wnioskowania uznano zbiór maksymalnych węzłów potwierdzonych. Jest to podzbiór wszystkich węzłów sieci wnioskowania, które uzyskały potwierdzenie, przy czym za kryterium selekcji uznaje się niewystępowanie – dla danego węzła – żadnych potwierdzonych następników. Mówiąc obrazowo, są to węzły potwierdzone, do których "najdalej" doszedł proces wnioskowania. Końcowy raport z działania systemu w danej sesji zawiera listę wyżej określonych węzłów. Pozostałe potwierdzone węzły mogą posłużyć jako uzasadnienie otrzymanego wyniku. Jeśli zatem, mając fragment sieci wnioskowania odpowiadający implikacji:

jeśli A to B

uzyskujemy potwierdzenie obu faktów A i B, to wynikiem będzie B, uzasadnieniem dla B zaś będzie A.

Najczęstszym wynikiem działania sesji będzie zapewne pusty zbiór węzłów, odpowiadający – o czym już wspomniano powyżej – stanowi normalnemu, tj. sytuacji, w której system nie stwierdził żadnych odstępstw od zbioru norm, jakie powinny spełniać wskazania aparatury kontrolno-pomiarowej i obserwacje prowadzone przez obsługę.

Najważniejszy aspekt działania systemu stanowi jego funkcja diagnostyczna. Niezależnie od tego system zdolny jest zapamiętywać wartości parametrów uzyskane w ramach danej sesji oraz przedstawiać je w postaci szczegółowego raportu. Może zatem pełnić rolę systemu ciągłego monitoringu obiektu rzeczywistego, jakim jest zapora.

W konstrukcji grafu wydzielone jest wnioskowanie "bieżące" oraz "historyczne". Jako elementy wchodzące w skład wnioskowania historycznego uznano:

- 1 – zmianę wzorca
(wartości początkowej)
[wartość początkowa, data, wartość zmiany],
- 2 – uszkodzenia i wyłączenia czujników [nr czujnika, data, czas od-do],
- 3 – zawilgocenia skarpy
(hipotezy wzmożonej filtracji)
[lokalizacja, czas od-do],
- 4 – wycieki na skarpie [lokalizacja, czas od-do, wielkość],
- 5 – awarie lokalne zauważone podczas obchodu [lokalizacja, czas, zasięg],

- 6 – wystąpienia stanów awaryjnych [data, hipotezy, fakty],
- 7 – stany powodziowe – stany max poziomu piętrzenia [data od-do].

W nawiasach kwadratowych podano informacje, jakie system ma w danym przypadku zapamiętać (atrybuty faktu historycznego).

Połączenia logiczne pomiędzy poszczególnymi przekrojami pomiarowymi z reguły nie występują z uwagi na duże odległości pomiędzy nimi. Dla tak opracowanych grafów sporządzono pełną część deklaratywną opisującą geometrię zapory oraz wszystkie jej części składowe biorące udział we wnioskowaniu. Na tak przygotowanych danych wykonano testy działania systemu, symulując powstanie różnego typu awarii, posługując się podanymi niżej kryteriami:

- poprawna eksploatacja:
 - czujniki automatyczne w normie lub wolne w dopuszczalnych granicach,
 - pomiary ręczne w normie,
 - obserwacje w normie;
- stany wskazujące na możliwość awarii:
 - możliwość wzmożonej filtracji przez rdzeń,
 - możliwość wzmożonej filtracji pod zaporą,
 - możliwość zawieszenia rdzenia,
 - możliwość wynoszenia gruntu z rdzenia;
- stan awaryjny:
 - potwierdzona wzmożona filtracja przez rdzeń,
 - potwierdzona wzmożona filtracja pod zaporą,

- zawieszenie rdzenia,
- wynoszenie gruntu z rdzenia,
- pęknięcie rdzenia,
- powstanie osuwiska na skarpie;

- stan katastrofalny:
 - przekroczenie poziomu piętrzenia 535,00 (zapora Czorsztyn),
 - wycieki na skarpie odpowietrznej,
 - przebicie rdzenia.

Podsumowanie

Opracowany system stanowi w miarę kompleksowe podejście do oceny bezpieczeństwa zapór nasypowych z rdzeniem i, o ile nam wiadomo, jest pierwszym systemem wykorzystującym elementy technologii systemów ekspertowych w procesie wnioskowania. Jednakże należy podkreślić, że złożoność problematyki związanej z pracą zapory powoduje wyraźne ograniczenia proponowanego systemu. Opracowane do tej pory podstawy teoretyczne, jak i praktyczna implementacja komputerowa powinny zatem być traktowane jako pierwsza próba rozwiązania problemu oceny bezpieczeństwa zapory. Należy przewidywać, że w trakcie wdrażania systemu konieczne będzie wprowadzenie korekt i uzupełnień. Warto dodać, że nadal prowadzone są prace, których zadaniem jest rozbudowa systemu o nowe elementy, na przykład włączenie modelowania numerycznego bezpośrednio do procesu wnioskowania przy wykorzystaniu tzw. komputerów równoległych. Problematykę komputerowego wspomaganie oceny bezpieczeństwa eksploatacji zapór nasypowych opracowano w ramach Projektu Badaw-

czego KBN nr 7 1279 91 01 oraz zleconych przez ODGW w Krakowie, dotyczących zagadnień bezpieczeństwa zapór Czorsztyn i Klimkówka.

Literatura

- GAJLA O. (red.) 1991: *Systemy ekspertowe możliwości zastosowań w technice*. Fundacja rozwoju technik komputerowych, Warszawa.
- KLEIBER M. (Editor) 1991: *Artificial intelligence in computational engineering*. Ellis Horwood, London.
- Projekt Badawczy KBN nr 7 1279 91 01. 1993: *System Oceny Bezpieczeństwa i Niezawodności Ziemnych Budowli Piętrzących*. Katedra Geotechniki SGGW, Warszawa.
- STATLER J., LUEBKE T. 1995: *Performance parameters – evolving tool for dam safety*. US-COLD 1995. Dam failures statistical analysis. Bulletin 99 CIGB – ICOLD.
- ICOLD, Bulletin No 68. *Monitoring of dams and their foundations*. State of the art.
- RADOMSKI A. 1993: *Opracowanie komputerowej implementacji systemu ekspertowego oceny stanu zapory ziemnej*. BUK-BT, Warszawa.