

- Herbich P i in., 1994 - Dokumentacja hydrogeologiczna dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych z utworów czwartorzędowych zlewni Wkry. Mskr dla Urz Woj w Ciechanowie
- Hydroprojekt Warszawa, sp z o.o., 1992 - Metodyka jednolitych bilansów wodno-gospodarczych, MOŚZNiL, Warszawa
- Sawicki J., 1978 - Krzywe zasilania podziemnego rzek i krzywe stanów retencji - konstrukcja i zastosowanie, Acta Univ Wrat. No 313, Wrocław, s 106-118

IMGW WARSZAWA, 1987

VII Ogólnopolska Szkoła Naukowa Gospodarki Wodnej
**ASPEKTY EKOLOGICZNE W KSZTAŁTOWANIU
I WYKORZYSTANIU ZASOBÓW WODNYCH**

Osieczany k. Myślenic 6-8 listopada 1996

Antoni Kozłowski, Jarosław J. Napiórkowski
Tomasz Tertlikowski
Instytut Geofizyki PAN

53

**WYKORZYSTANIE WSKAŹNIKÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH
W SYNTEZIE STRUKTURY STEROWANIA**

Streszczenie

Prezentowano przypadek rzeczywistego systemu wielozbiornikowego, ocenianego wielokryterialnie. Omówiono zasadnicze elementy zastosowanej metody sterowania, opartej na optymalizacji dwupoziomowej. Pokazana została istotna poprawa efektów sterowania, uzyskana przy zastosowaniu tej metody, w porównaniu ze standardową regułą decyzyjną. Ocena ta została oparta na wielokryterialnej symulacji działania systemu, dla 90-letniego ciągu dopływów.

1. Wprowadzenie

Rozważana tu metodologia określania zrzutów i przerzutów wody w systemie wielozbiornikowym, zastosowana została do konkretnego systemu, zaopatrującego region dorzecza Górnej Wisły i Soły. Głównym celem sterowania jest dostarczanie wody dla użytkowników przemysłowych i komunalnych (miast), a wśród nich dla hut i innych zakładów przemysłowych, stawów rybnych itd. Jednocześnie, dąży się do utrzymania stężeń zanieczyszczeń w rzekach na dostatecznie niskim poziomie, dopuszczalnym ze względu na wymagania czystości wody. Przedstawione podejście, pozwalające na uwzględnienie szerokiego zakresu dopuszczalnych rozwiązań, umożliwia wprowadzenie czynnika preferencji operatora systemu, jego doświadczenia i intuicji. Może być ono podzielone pojęciowo na dwie części: optymalizacja uproszczonego modelu systemu, oraz wielokryterialne porównanie wyników symulacji sterowania.

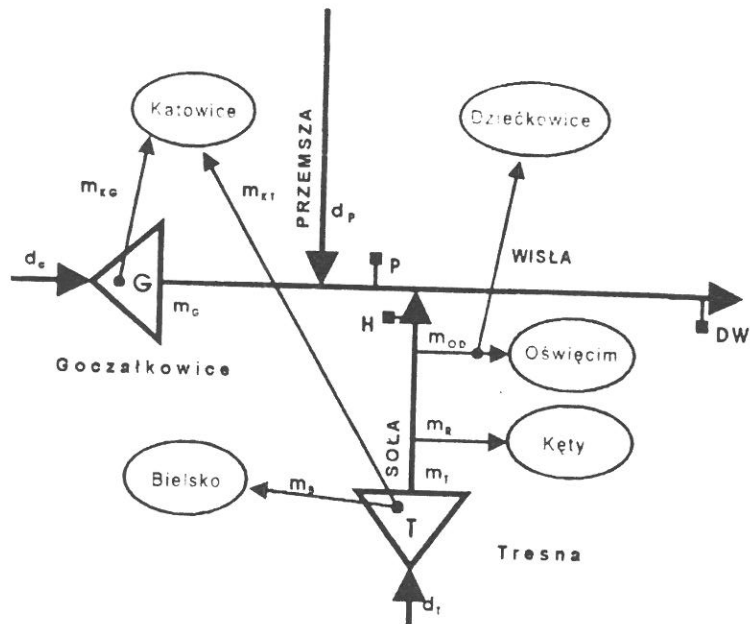
Pierwsza część polega na konstruowaniu dość szerokiej klasy układów sterowania, z wykorzystaniem dwupoziomowej optymalizacji. Druga część oparta jest na symulacji, przeprowadzonej dla danych historycznych na 90-letnim ciągu dopływów. Stanowi ona istotną część syntezy układu sterowania - poprzez obliczanie wartości kilku różnych kryteriów i stosowną adaptację parametrów układu.

Zbadanych zostało kilka metod (schematów) sterowania. Zostały one porównane z punktu widzenia wielu kryteriów jakości działania dla 90-letniego ciągu danych. Jest zrozumiałe, że w każdej z zastosowanych metod zagregowanej oceny różnych układów sterowania, musi w tej sytuacji tkwić pewien element arbitralności.

Zaproponowane ostatecznie metody sterowania zostały porównane z tzw. Standardową Regułą Decyzyjną. Dodatkowo, zbadane zostały czysto teoretyczne warianty sterowania, wykorzystujące dokładną znajomość przyszłych dopływów. Pozwala to na pełniejszą ocenę potencjalnych możliwości zaproponowanych metod sterowania.

2. Opis modelu systemu

Przedstawiony na rys. 1 rozpatrywany system zasobów wodnych - System Soły i Górnej Wisły - składa się z dwóch zbiorników retencyjnych na dwu rzekach, tj. ze zbiornika Goczałkowice na Wiśle i zagregowanej w jeden zbiornik kaskady zbiorników Tresna, Porąbka i Czaniec na Sole, oraz z pięciu użytkowników systemu



Rys. 1. System zbiorników Górnej Wisły i Soły

Głównym zadaniem tego systemu jest zaopatrywanie w wodę przemysłowych i komunalnych użytkowników, konkretnie Katowic i Bielska, zasilanie wodą poprzez zbiornik Dzieńkowice huty Katowice, dostarczanie wody do zakładów chemicznych w Oświęcimiu oraz stawów rybnych koło miasta Kęty. Jednocześnie stężenie zanieczyszczeń, zrzucanych głównie poniżej Przemszy, powinno być utrzymywane na poziomie zgodnym z wymogami jakościowymi wody. Podstawowe charakterystyki hydrologiczne oraz dane dotyczące zbiorników zawiera poniższa tabela 1.

Zbiornik retencyjny	kaskada Soły	Goczałkowice
przepływy historyczne		
minimalny	1 18 m ³ /s	0 36 m ³ /s
maksymalny	1469 m ³ /s	581 m ³ /s
średni	19 5 m ³ /s	7 75 m ³ /s
powierzchnia zlewni	1095 km ²	522 km ²
pojemność całkowita	139 7 mln m ³	202 8 mln m ³
pojemność martwa	13 6 mln m ³	20 0 mln m ³
pojemność (rezerwa) powodziowa	27 0 mln m ³	30 4 mln m ³
maksymalny zrzut	1730 m ³ /s	935 m ³ /s
przepływ biologiczny	0 93 m ³ /s	0 45 m ³ /s

Tabela 1. Charakterystyki zbiorników

Celem modelu jest określenie związków między wielkościami przepływu w rzekach i wydatkami rurociągów dostarczających wodę użytkownikom w ciągu dłuższego horyzontu czasu (jeden rok), z jego dekadową dyskretyzacją. Wzięto pod uwagę jedynie dynamikę retencji zbiornikowej. Natomiast pominięto zmienność przepływu w korytach rzecznych.

W rozważaniach użyto następujących oznaczeń:

- j - numer (indeks) dekady
- V^j - stan napełnienia zbiornika w j -tej chwili
- d^j - obserwowany dopływ do zbiornika lub do rzeki w j -tej chwili
- u^j - przepływ w zadanym przekroju w j -tej chwili
- z^j - potrzeby wodne w j -tej chwili
- m^j - odpływ ze zbiornika lub dopływ do użytkownika - zmienna sterująca w j -tej chwili
- S^j - ładunek zanieczyszczeń zrzucanych w j -tej chwili
- C^j - dopuszczalne stężenie zanieczyszczeń w j -tej chwili
- T, G - oznaczenie zbiorników kaskady Soły i zbiornika Goczałkowice
- H - przekrój kontrolny na Sole
- P - przekrój kontrolny na Wiśle (poniżej dopływu Przemszy)
- DW - przekrój kontrolny na Wiśle (Dwory)

oraz indeksów:

- B - odnosi się do Bielska
- K - odnosi się do Katowic
- O - odnosi się do Oświęcimia
- R - odnosi się do stawów rybnych
- D - odnosi się do Dzieńkowic.

Zgodnie z wprowadzonymi oznaczeniami można sformułować równania stanów systemu zbiorników retencyjnych i równania ciągłości przepływu dla poszczególnych przekrojów kontrolnych (H, P, DW). Równania stanu to:

$$V^{j+1} = V^j - B * m^j + C * d^j \quad (1)$$

gdzie:

$$V = [V_T, V_G]; \quad m = [m_T, m_G, m_B, m_{KT}, m_{KG}]; \quad d = [d_T, d_G] \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Równania ciągłości przepływu dla rozpatrywanych przekrojów to

$$u_k^t = m_k^t - d_k^t \quad (4)$$

$$u_k^t = m_k^t - m_{k+1}^t - m_{dn}^t \quad (5)$$

$$u_k^t = u_k^t - u_k^t \quad (6)$$

2. Sformułowanie zadania optymalizacji

Funkcję celu zadania optymalizacji rozpatrywaną w dowolnej chwili czasu (dekadzie) i dla rocznego horyzontu czasu ($T = 36$) można zapisać w formie funkcji kary

$$Q(m, V) = \sum_{j=1}^{k-1} [a_k^j (m_k^j - z_k^j)^2 + a_b^j (m_k^j - z_k^j)^2 + a_{dp}^j (m_{dn}^j - z_{dn}^j)^2 + a_k^j (m_{kr}^j - m_{kr}^j - z_k^j)^2 + a_r^j (u_r^j - S_r - C_r)^2 + a_{du}^j (u_{du}^j - S_{du} - C_{du})^2 + a_u^j (u_u^j - z_u^j)^2 - b^j (V^j - V^j)^2 - b_c^j (V_c^j - V_c^j)^2] \quad (7a)$$

W powyższym równaniu symbole a i b z odpowiednimi indeksami oznaczają współczynniki wagowe, a symbole C_r i C_{du} oznaczają poziomy zanieczyszczenia wody, które nie powinny być przekroczone w przekrojach P i DW. Wprowadzając równania (4, 5, 6) do równania (7a), wskaźnik jakości Q uzależnia się w sposób oczywisty od sterowań m^j i trajektorii stanów V^j napełnień zbiorników. Inne wielkości, które występują w tych sformułowaniach traktowane są jako parametry. Zatem funkcja celu (7a) może być zapisana jako

$$Q(m, V) = \sum_{j=1}^{k-1} Q(m^j, V^j) \quad (7b)$$

Pożądana trajektoria retencji V^j

Przyjmuje się, że sterowanie systemem zbiorników jest prowadzone w rocznym trybie, w następujący sposób

- na koniec grudnia zbiorniki w normalnych warunkach sterowania osiągają dolny poziom napełnienia, przygotowując system do przyszłego sezonu powodziowego, zamykając tym samym roczny cykl zmienności retencji
- rezerwa powodziowa na 1 stycznia określana jest na zagospodarowanie fali powodziowej o maksymalnym prawdopodobieństwie. W ciągu okresu normalnego dopływu w miesiącach styczeń - kwiecień zbiorniki powinny być napełnione całkowicie
- w ciągu okresu maj - listopad woda jest gromadzona i zrzucana ze zbiorników dla celów komunalnych i przemysłowych oraz dla pokrycia potrzeb stawów rybnych.

Współczynniki wagowe a^j i b^j

Zgodnie z podstawowym celem zagadnienia sterowania, jakim jest zapobieganie deficytom wody i osiąganie na koniec kwietnia wymaganego stanu napełnienia zbiorników, w metodzie optymalizacji użyto współczynników wagowych o następujących wartościach: $a^j = 1$, gdy

potrzeby są większe od zasilania i $a^j = 0.01$ w przeciwnym wypadku, dla $j = [1, 36]$ Odnosnie drugiego współczynnika b^j , to jego wprowadzenie ma na celu uniknięcie sytuacji dobrej pracy systemu w jednym roku z następującym po nim roku bardzo złego działania systemu: $b^j = 0.001$ dla $j = [1, 30]$ (maj - luty), $b^j = 0.004$ dla $j = [31, 33]$ (marzec) i $b^j = 0.01$ w kwietniu, dla $j = [34, 36]$. Funkcja celu w zadanych profilach w każdej dekadzie podporządkowana jest ograniczeniom i uzależniona od sterowań i przepływów.

$$V_{min}^j \leq V^j \leq V_{max}^j ; m_{min}^j \leq m^j \leq m_{max}^j ; u_{min}^j \leq u^j \leq u_{max}^j \quad (8)$$

3. Metoda dwupoziomowej optymalizacji

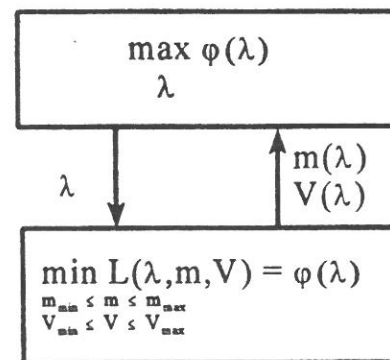
W celu rozwiązania wyżej wymienionego problemu sterowania, zastosowana została metoda mnożników Lagrange'a (cen) dla ograniczeń równościowych (1). Funkcja Lagrange'a ma postać

$$L(m, V, \lambda) = \sum_{j=1}^{k-1} [Q(m^j, V^j) + \lambda^j (V^{j+1} - V^j + B * m^j * C * d^j)] \quad (9)$$

Po uwzględnieniu zmiennych stanu i ograniczeń odpływu, powyższe zagadnienie jest rozwiązywane za pomocą metody dwupoziomowej optymalizacji - z dekompozycją globalnego wskaźnika jakości i koordynacją zadań lokalnych (Findeisen 1974). Wykorzystuje się przy tym addytywność funkcji Lagrange'a i możliwość separacji zmiennych decyzyjnych. Funkcja Lagrange'a posiada punkt siodłowy, który może być wyznaczony poprzez minimalizację $L(\lambda, V, m)$ względem V i m , a następnie maksymalizację względem λ . Ostateczne zadanie optymalizacji może być wyrażone w formie:

$$\max_{\lambda} / \min_{V, m} L(\lambda, V, m) \quad (10)$$

z nierównościami ograniczeniami na stan i sterowanie i bez ograniczeń na mnożniki Lagrange'a λ . Rys 2 obrazuje działanie metody optymalnego sterowania dwupoziomowego.



Rys 2. Dwupoziomowa metoda optymalizacji

Na dolnym poziomie dla zadanych wartości mnożników λ poszukiwane jest minimum funkcji Lagrange'a. Warunkiem wystarczającym minimum jest zerowa wartość gradientu liczonego względem m i l . Zadaniem górnego poziomu jest takie dobranie wielkości cen λ , że bezpośrednie sterowanie zbiornikiem wymuszone przez λ wywoleje pożądaną równowagę systemu (spełnienie równań zachowania masy (1)). Na górnym poziomie, do maksymalizacji wartości funkcji Lagrange'a, względem λ użyto standardowej metody gradientu sprzężonego.



Rys 3. Dwuwarstwowa technika sterowania

W zastosowanej metodzie dwuwarstwowej sterowania, rozwiązanie zadania dwupoziomowej optymalizacji (10) stanowi zasadniczą część warstwy wyższej - por rys 3. Zauważmy, że w tej warstwie - określającej „plan” na horyzont roku - proponuje się ciąg T wartości zmiennych sterujących $\{m^k, \dots, m^{k+1}\}$, $T = 36$. Z kolei w warstwie niższej te wartości sterowań są uwzględniane jedynie w jednej, bieżącej dekadzie - i ewentualnie modyfikowane, w zależności od rzeczywistych, obserwowanych warunków, poprzez pewne dodatkowe interwencje operatora

4. Symulacyjne porównanie metod sterowania

Kilka wybranych metod sterowania przetestowano na horyzoncie 90 lat, z uwzględnieniem rzeczywistych wartości dopływów w tym okresie. Rozważane metody sterowania zostały ogólnie scharakteryzowane w poprzednich rozdziałach. W tym miejscu wymienimy jeszcze raz te spośród nich, które po wstępnym etapie syntezy polegającym na dobraniu wartości różnych ich parametrów, zostały wszechstronnie porównane za pomocą symulacji systemu.

- 1 SDR - Naturalna, standardowa reguła decyzyjna, realizująca mniej więcej następującą zasadę „dostarczać tyle wody ile wynosi zapotrzebowanie, jeśli to możliwe”, w odniesieniu do każdego użytkownika wody.
- 2 TLM - Dwuwarstwowa metoda optymalizacyjna, złożona z:
 - 1) długoterminowego planowania decyzji, przez optymalizację kompromisowego wskaźnika jakości, uwzględniającego wszystkie cele cząstkowe (potrzeby) systemu
 - 2) realizacji planowanych decyzji (tj. rzutów i przerzutów wody) jedynie w najbliższej jednostce czasu (dekadzie); przy uwzględnieniu rzeczywistych warunków bieżących.
- 3 SS - Metoda TLM uzupełniona o elementy standardowych, prostych reguł decyzyjnych.

W tych ostatnich dwóch metodach (wymagających rozwiązania zadania optymalizacji (10)) przyjęty został, jako długoterminowa prognoza dopływu, ciąg wartości średnich (dla każdej dekady roku) rzeczywistych danych historycznych z okresu 1901-1990.

Ponadto, dla porównania i ukazania możliwości tkwiących w metodach optymalizacyjnych, zbadane zostały również warianty nazwane REAL, które tym tylko się różnią od innych metod z użyciem optymalizacji, że jako prognozy użyte w nich zostały rzeczywiste wartości przyszłych dopływów. Warto tu zauważyć, że wykorzystanie dokładniejszej znajomości przyszłych dopływów (na długi horyzont czasu) jest możliwe tylko w metodach zawierających długoterminowe planowanie.

Każda z metod jest oceniana za pomocą kilku wskaźników działania - opisujących stopień spełnienia różnych, często konfliktowych, celów. Wskaźniki te odzwierciedlają więc poszczególne, cząstkowe efekty działania systemu (Terlikowski, 1993). Każdy z nich jest w naszym modelu reprezentowany jako pewna funkcja czasu:

- w przypadku użytkowników B, R, OD, K oraz przekrojów kontrolnych H, P, DW funkcje te wyrażają przebieg wartości deficytu w kolejnych jednostkowych okresach czasu (dekadach),

- w przypadku zbiorników opisują one przebieg ich napełnienia w zależności od czasu

Z kolei, każdy wskaźnik działania jest oceniany za pośrednictwem wielu kryteriów skalarnych. Aby lepiej ukazać sens takiego podejścia, rozważmy deficyt w spełnieniu potrzeb pewnego, konkretnego użytkownika wody, np. R (stawy rybne w Kętach) w okresie jednego roku. Funkcja m_R^j , gdzie j oznacza numer dekady - wraz z z_k^j (określającą zapotrzebowanie R) - charakteryzuje w najpełniejszy sposób ten jeden, wybrany wskaźnik działania: deficyt użytkownika R. Jednakże, jeśli chcemy porównać, w sensie tego wskaźnika, dwie różne funkcje m_R^j (a tym bardziej, porównać „jakość” m_R^j z jakością innych sterowań - dla innych użytkowników), w jakiś przejrzysty, uporządkowany sposób, musimy wprowadzić tzw. kryteria skalarne, zależne od tych funkcji. Następujące kryteria zostały zaproponowane w przypadkach funkcji (wskaźników działania) wyrażających przebieg deficytu (i,j,k są tu zawarte w ustalonym okresie 1 roku, tj. 36 dekad):

- całkowity czas deficytu TD

$$TD = \text{Card}(\{i: m_R^i < z_k^i\}) \quad (11)$$

- maksymalny czas ciągłego deficytu TDc:

$$TDc = \max(\{k \leq l: k \leq l \wedge [\forall k \leq j \leq l: m_R^k < z_k^k]\}) \quad (12)$$

- wartość średnia deficytu względnego AvD:

$$AvD = \sum_{i=1}^{k+T} \frac{(z_k^i - m_R^i)_+}{z_k^i} \cdot \frac{100\%}{T} \quad (13)$$

- maksymalna wartość średnia ciągłego deficytu względnego AvDc:

$$AvDc = \max \left(\sum_{i=1}^l \frac{z_k^i - m_R^i}{z_k^i} \cdot \frac{100\%}{T}; \forall k \leq j \leq l: m_R^k < z_k^k \right) \quad (14)$$

- maksymalna wartość deficytu względnego MxD:

$$MxD = \max \left(\frac{(z_k^i - m_R^i)_+}{z_k^i} \cdot \frac{100\%}{T}; k \leq j \leq k+T \right) \quad (15)$$

W ten sposób, każda funkcja określająca zaopatrzenie w wodę poszczególnych użytkowników (m_R, m_{ND}, m_B, m_K), jak też przepływy w przekrojach kontrolnych (H, P, DW) - scharakteryzowana zostaje dla danego roku przez tych 5 wymienionych wyżej kryteriów skalarnych

Równocześnie, każda z trajektorii V_G^I, V_G^{II} jest opisana przez dwa kryteria. Na przykład, dla zbiornika Goczałkowice mamy:

$$V_G^I = V_G^{II} \quad (16a)$$

$$V_G^{IV} = \sum_{r=1}^n \frac{V_G^I}{12} \quad (16b)$$

gdzie, jak widać, to drugie kryterium określa średnie napełnienie zbiornika w okresie letnim. W rezultacie otrzymujemy dla każdego użytkownika (celu) ciąg pięciu (lub dwóch) liczb, charakteryzujących w sposób syntetyczny każdy ze wskaźników działania systemu.

Byłoby to już wystarczające dla oceny i porównania różnych funkcji reprezentujących jeden ustalony wskaźnik działania. Można by to zrobić, posługując się np. jedną z metod optymalizacji wielokryterialnej (Paschel i Riedel, 1979), (Roy, 1990). W istocie jednak, nasze zadanie syntezy jest bardziej skomplikowane, ponieważ musimy porównywać efekty sterowania ze względu na dziewięciu różnych użytkowników - i nie dla jednego, wybranego roku, lecz dla 90 lat, których dotyczy nasz ciąg danych historycznych.

Aby rozwiązać takie zadanie, posłużymy się pewnym arbitralnym i intuicyjnym do pewnego stopnia podejściem. Mianowicie, naszą ostateczną formą wyników służącą do analizy porównawczej będą wykresy tzw. *częstościowych kryteriów niezawodnościowych* (Napiórkowski i Terlikowski, 1996).

Są one obliczone na podstawie wyników symulacji dla każdego z dziewięciu „użytkowników” i dla każdego z pięciu lub dwóch kryteriów skalarnych (11)-(16), odniesionych do okresu jednego roku (36 dekad, tj. $T = 36$).

Owe *kryteria częstościowe* są funkcjami określonymi na zbiorach wartości odpowiednich kryteriów skalarnych TD, ..., MxD, ... itd. Natomiast wartością takiej funkcji jest liczba lat, w których odpowiednie kryterium skalarnie przyjmuje wartość z danego zakresu, odpowiadającego danej wartości argumentu (czyli wartości któregoś kryterium skalarnego). Formalnie, np. dla MxD mamy:

$$f_{MxD}(x) = \text{Card}(\{I: x - \Delta \leq MxD^I \leq x\}) \quad (17)$$

$$F_{MxD}(x) = \text{Card}(\{I: MxD^I \leq x\}) \quad (18)$$

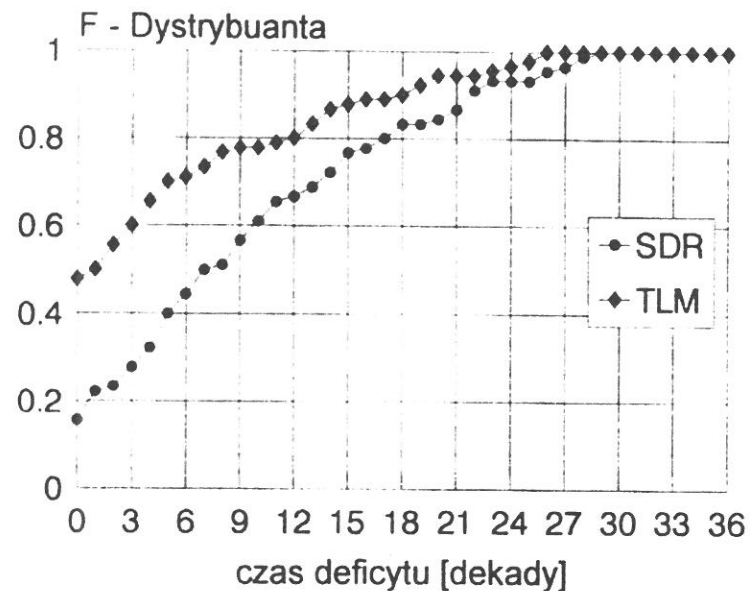
gdzie MxD^I oznacza wartość kryterium MxD w roku I - tym, a Δ jest krokiem dyskretyzacji wartości MxD (np. 2%).

Jak widać, f odpowiada funkcji gęstości, zaś F - dystrybuanci „zmiennej losowej” MxD^I , przy czym I (numer roku) jest traktowane jako reprezentacja zdarzeń elementarnych.

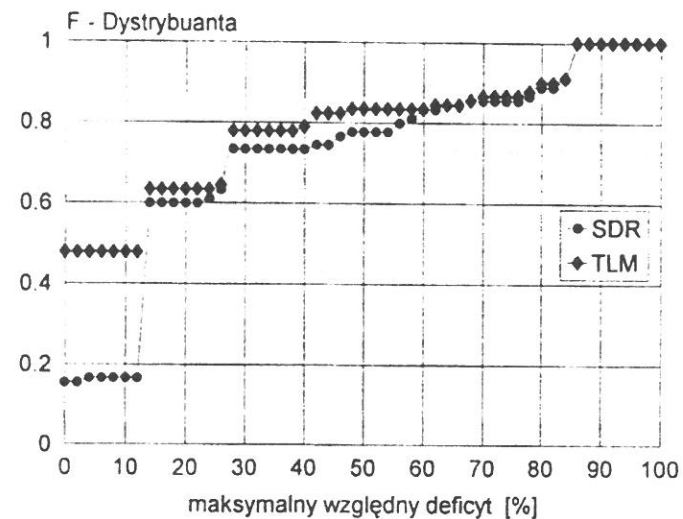
5. Wyniki i wnioski

Przedstawimy tu - w formie wykresów kryterium niezawodnościowego F - pewną ilość wyników symulacji sterowania, według rozważanych metod: SDR, TLM, SS i REAL.

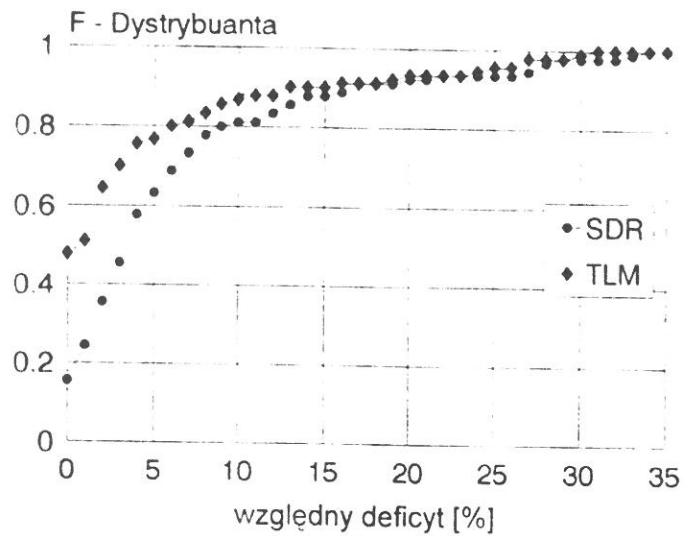
Rysunki 4-6 przedstawiają wykresy „dystrybuanty” F , odpowiadającej kryteriom TD, MxD i AvD dla deficytu w Katowicach. Porównane są tam dwie metody sterowania: prosta reguła decyzyjna (SDR) i dwuwarstwowa metoda optymalizacyjna (TLM). W przypadku Katowic, przewaga metody TLM jest widoczna w sensie wszystkich rozpatrywanych kryteriów. Wynika to z charakteru tego użytkownika - który pobiera wodę z obu części



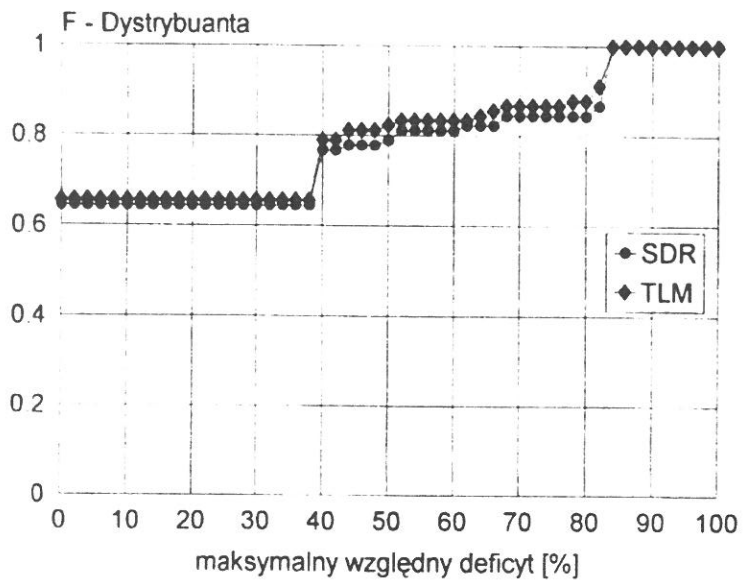
Rys 4. Kryterium niezawodnościowe TD dla Katowic



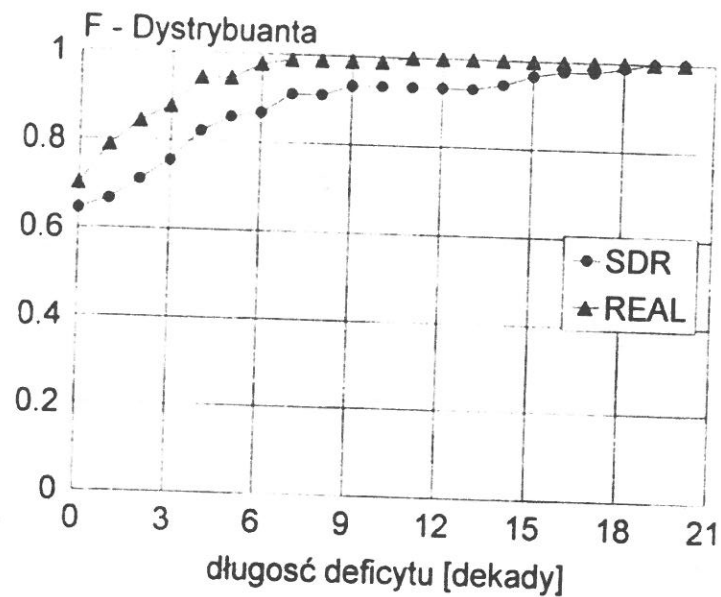
Rys 5. Kryterium niezawodnościowe MxD dla Katowic



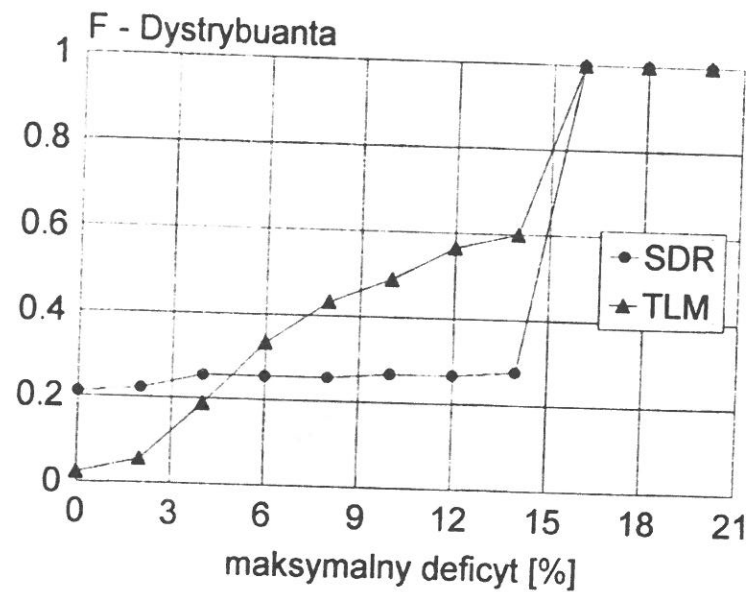
Rys. 6. Kryterium niezawodnościowe AvD dla Katowic



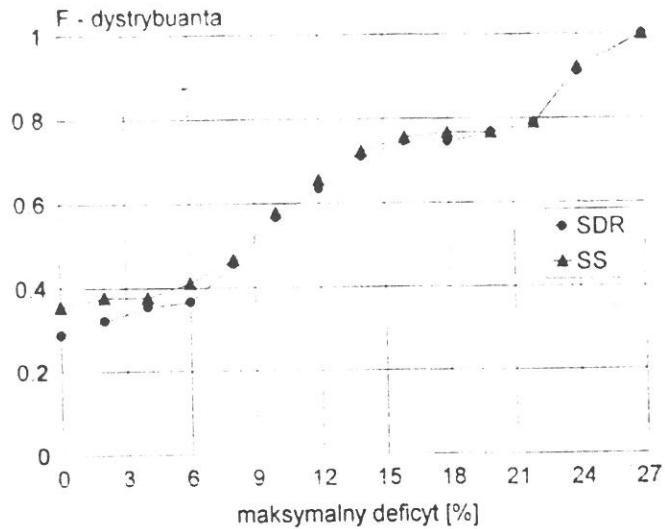
Rys. 7. Kryterium niezawodnościowe MxD dla Bielska



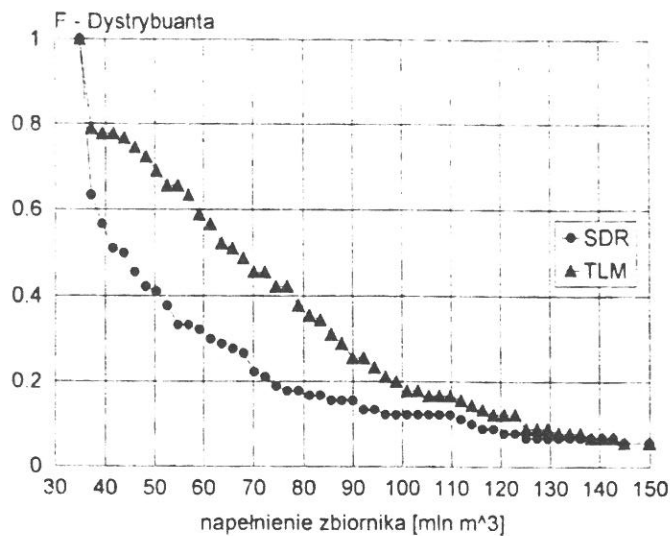
Rys. 8. Kryterium niezawodnościowe TD dla przekroju H na Sole



Rys. 9. Kryterium niezawodnościowe MxD dla przekroju P na Wiśle



Rys 10 Kryterium niezawodnościowe MxD dla przekroju DW na Wiśle



Rys 11 Kryterium niezawodnościowe średniego napełnienia zbiornika Goczałkowice w okresie letnim

systemu ze zbiornika Tresna i ze zbiornika Goczałkowice. Metoda TLM daje w tej sytuacji wyraźnie lepsze rezultaty, ponieważ pozwala na uwzględnienie możliwości współpracy systemu jako całości i wprowadza elementy koordynacji poszczególnych decyzji cząstkowych. Okazuje się, że również dla użytkowników pobierających wodę bezpośrednio z Soły (R, OD) - jak też dla Bielska - metoda optymalizacyjna daje lepsze wyniki niż SDR. Różnica ta jest jednak w tych przypadkach mniejsza (por. rys 7). Ogólnie, uzyskane wyniki pokazują, że zastosowanie metody TLM poprawia jakość sterowania w porównaniu do SDR dla wszystkich „prawdziwych” użytkowników wody (B, R, OD, K) - zwłaszcza w sensie kryterium MxD maksymalnego deficytu.

W przypadku wymagań jakości, w wyróżnionych przekrojach kontrolnych H, P i DW , porównanie metody SDR z metodami TLM i SS nie prowadzi do tak jednoznacznych wniosków. Na przykład, dla przekroju H na Sole, metoda SDR daje - w większości przypadków - lepsze rezultaty, niż TLM lub SS. Wynika to zapewne z „lokalnego” charakteru tego „użytkownika”. Jednakże, jeśli zastosujemy metodę TLM wzbogaconą o dokładną znajomość przyszłych dopływów - tak, jak w metodzie REAL- otrzymamy wyraźną poprawę we wszystkich wskaźnikach. Pokazuje to rys 8, na którym przedstawione są wykresy kryterium niezawodnościowego F_{TT} .

Dla przekroju P na Wiśle, metoda TLM okazuje się być lepsza od SDR nawet w realnych warunkach (niepewności przyszłych dopływów) - ale nie przy wszystkich kryteriach skalarnych. Według kryterium F_{TT} metoda SDR daje przeważnie gorsze wyniki niż TLM - ale np. według F_{MxD} (kryterium wartości deficytu maksymalnego) SDR jest często korzystniejsza, co widać z rys 9.

Dla przekroju DW (por. rys.10) z kolei, metoda TLM okazuje się być lepsza od SDR, ze względu na każde kryterium. Wniosek ten odzwierciedla raz jeszcze fakt, że metody optymalizacyjne są niejako strukturalnie nastawione na możliwość poprawy tych cząstkowych efektów sterowania, które są związane z systemem jako całością i, wobec tego, silniej zależą od właściwej koordynacji całego systemu.

Na koniec, rys 11 przedstawia przykładowe wykresy kryteriów niezawodnościowych dla zbiorników. Idea tych kryteriów jest w pewnym sensie odwrotna do (18), ponieważ preferujemy możliwie duże wartości napełnień zbiorników. Mianowicie, np. dla kryterium skalarnego $V_{GA\bar{v}}$ (por. (16b)) mamy:

$$F_{V_{GA\bar{v}}}(x) = \text{Card}(\{I: V_{GA\bar{v}}^I \geq x\}) \quad (19)$$

Jak widać z rys 11, metoda TLM częściej pozwala utrzymywać zadane wartości napełnienia (odpowiadający jej wykres leży powyżej wykresu otrzymanego dla SDR) - i to nawet dla dość wysokich wartości (90 - 120 mln m³).

6. Literatura

- Findeisen W., 1974 Wielopoziomowe układy sterowania, PWN Warszawa
- Napiórkowski J.J., Terlikowski T.S., 1996, Operational control for multireservoir system - multiobjective approach, Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies VI, Computational Mechanics Publications, 553-562.
- Peschel M., Riedel C., 1979, Polioptymalizacja. Metody podejmowania decyzji kompromisowych w zagadnieniach inżynierijno-technicznych, WNT Warszawa.
- Roy B., 1990, Wielokryterialne wspomaganie decyzji, WNT Warszawa.
- Terlikowski T., 1993, Comparison of two methods of water reservoir control - the case of the Goczałkowice Reservoir, Archives of Hydroengineering, 1-2, 115-134.