

Henryk SŁOTA

INSTYTUT METEOROLOGII
I GOSPODARKI WODNEJ
KRAKÓW

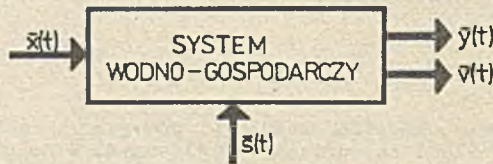
DŁUGOTERMINOWE I KRÓTKOTERMINOWE MODELE STEROWANIA
SYSTEMAMI WODNO-GOSPODARCZYMI

Streszczenie: Omówiono różnice i powiązania zachodzące między modelami sterowania formułowanymi w celu zoptymalizowania osiągnięć systemu /długoterminowe modele sterowania/ a modelami sterowania stosowanymi w bieżącej eksploatacji /krótkoterminowe modele sterowania/. Zwrócono uwagę na dwa istotne problemy pojawiające się w modelu sterowania krótkoterminowego, mianowicie: długość horyzontu sterowania i związane z tym ograniczenia końcowych stanów systemu.

Sterowanie systemami wodno-gospodarczymi jest procesem bardzo złożonym, gdyż mamy w nim do czynienia z systemami wieloobiekto- wymi, spełniającymi z reguły kilka zadań, poddanych ponadto losowemu oddziaływaniu otoczenia. Z tych też przyczyn sterowanie procesami ilościowymi i jakościowymi zachodzącymi w tych systemach należy traktować jako wielocelowe działanie w warunkach niepewności, o ograniczonych możliwościach przewidywania przyszłości. Dla tak złożonych problemów trudno ustalić jedno- znaczną metodykę postępowania - akceptowaną przez wszystkich specjalis- tów z zakresu teorii sterowania i gwarantującą zarazem prawidłowość uzyskanych wyników. W tej sytuacji szczególne znaczenie /pomijając me- tody analizy matematycznej oraz techniki obliczeniowe/ mają racjonalne założenia konceptualne, rzutujące w sposób istotny na ostateczny efekt sterowania. Przejęcie. "założenia konceptualne" rozumie się w tym przypadku przyjęcie odpowiednich modeli zarówno systemu, jak i jego wejść, następnie horyzontu i algorytmu sterowania, aż wreszcie ograniczeń

i kryteriów oceny sterowań.

Oczywista jest, że im bliżej jesteśmy /w pojęciu czasowym/ praktycznej realizacji oddziaływań sterujących, tym założenia koncepcyjne powinny być "bliższe" rzeczywistości. To z pozoru trywialne stwierdzenie zainspirowało do napisania niniejszego artykułu, którego celem jest zwrócenie uwagi na różnice w sposobach podejścia do sterowania w problemach projektowania i bieżącej eksploatacji systemów wodno-gospodarczych.



Rysunek 1. Schemat systemu wodno-gospodarczego.

Sprowadzając system wodno-gospodarczy do schematu przedstawionego na rys. 1 można problem sterowania sformułować jako poszukiwanie trajektorii $\bar{s}(t)_{[t_0, t_h]}$ maksymalizującej funkcję:

$$K = K[\bar{y}(t)_{[t_0, t_h]}, \bar{v}(t)_{[t_0, t_h]}] \quad (1)$$

i spełniającą warunki:

$$\bar{y}(t) \leq \bar{y}_p(t) \quad \text{dla } t \in [t_0, t_h] \quad (2)$$

$$\bar{v}_{\min}(t) \leq \bar{v}(t) \leq \bar{v}_{\max}(t) \quad \text{dla } t \in [t_0, t_h] \quad (3)$$

przy zadanym stanie początkowym

$$\bar{v}(t_0) = \bar{v}_0 \quad (4)$$

gdzie: \bar{x} - wejścia do systemu, czyli wektorowe funkcje czasu charakteryzujące pod względem ilościowym i jakościowym dopływy wody do systemu,

\bar{y} - wyjęcia z systemu, czyli charakterystyki ilościowe i jakościowe odpływów z systemu oraz przepływów w wybranych przekrojach kontrolnych,

\bar{v} - stany systemu, czyli zmienne charakteryzujące wielkości
zapasów wody w zbiornikach,

\bar{s} - oddziaływania sterujące, czyli odpływy wody ze zbiorników
oraz wielkości determinujące rozdział wody w węzłach
kontrolnych,

\bar{J}_p - ograniczenia na wielkości wyjściowe,

\bar{v}_{\min} , \bar{v}_{\max} - odpowiednio dolne i górne ograniczenia na stany
systemu,

t_0, t_h - początek i koniec branego pod uwagę przedziału czasu.

Warunki (2)-(4) muszą być jeszcze uzupełnione równaniami opisującymi
zależności między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi /tzw. operator
systemu/ oraz ograniczeniami wynikającymi z technicznych charaktery-
styk obiektów i struktury systemu, jak i z warunków jego zasilania.

Sformułowany powyżej model sterowania optymalnego ma zastosowanie
nie tylko w bieżącej eksploatacji ale również w poprzedzających ją ana-
lizach symulacyjno-optymalizacyjnych, mających na celu ustalenie spodzie-
wanych osiągnięć systemu, czyli efektów jego działania. Nie można bowiem
określić osiągnięć systemu bez założenia przyszłościowej procedury eksplo-
atacyjnej. Znajomość osiągnięć systemu względnie ich pochodnych ekono-
micznych jest następnie wykorzystywana w procesie optymalizacji para-
metrów obiektów systemu.

Z uwagi na duże różnice w szczegółach modeli stosowanych w anali-
zach osiągnięć systemu oraz w bieżącej eksploatacji wyróżnia się w teorii
sterowania dwa rodzaje modeli [1][2]:

- modele sterowania długoterminowego /long-term control strategy/,
stosowane w optymalizacji osiągnięć systemów,

- modele sterowania krótkoterminowego /short-term control strategy/,
stosowane w bieżącej eksploatacji systemów.

Nasuwają się więc dwa pytania: 1 - czym różnią się wyodrębnione powyżej
rodzaje modeli; 2 - jaki powinien być związek między tymi modelami.

Odpowiadając na pytanie pierwsze można przyjąć, że wspomniane mo-
dele różnią się następującymi elementami:

1. Celami, dla których są formułowane. Modele sterowania długoterminowego
formułowane są celem zoptymalizowania /maksymalizacji/ efektów dzia-

lania systemu w wieloletnim okresie czasu - np. gwarantowanych od-
pływów zaregulowanych, gwarantowanej produkcji energii elektrycznej,
stanu czystości wód, itp. Natomiast modele sterowania krótkotermi-
nowego formułowane są celem zoptymalizowania efektów działania
systemu w najbliższej perspektywie czasu.

2. Modelami matematycznymi systemu. W sterowaniu długoterminowym sto-
suje się modele przybliżone, znacznie upraszczające zarówno strukturę
systemu, jak i przebieg procesów w nim zachodzących. W przeciwieństwie
do tego w sterowaniu krótkoterminowym wykorzystuje się modele bar-
dziej adekwatne do rzeczywistości.
3. Horyzontem sterowania. Ocena sterowania w modelu długoterminowym od-
noszona jest do bardzo długiego horyzontu czasu - teoretycznie zmie-
rzającego do nieskończoności. Natomiast w modelu krótkoterminowym
sterowanie jest optymalizowane dla krótszych horyzontów czasu - rok,
miesiąc, doba.
4. Kryteriami optymalizacji. W modelu długoterminowym sterowanie jest
oceniane za pomocą charakterystyk probabilistycznych osiągnięć sys-
temu, jak np. wartości średnie i ekstremalne, kwantyle, prawdopodo-
bieństwa wybranych wartości itp. Kryteriami oceny sterowań w modelu
krótkoterminowym są natomiast dodatkowe efekty pracy systemu, czyli
uzyskiwane niezależnie od efektów określonych w analizie osiągnięć
systemu, np. dodatkowa energia elektryczna, zwiększenie pewności
spełnienia zadań systemu, zmniejszenie kosztów eksploatacji, itp.
5. Modelami hydrologicznymi. W modelu sterowania długoterminowego sto-
suje się modele hydrologiczne, charakteryzujące wieloletnią zmienność
dopływów wody do systemu, jak np. wieloletnie ciągi przepływów histo-
rycznych lub wygenerowanych, względnie funkcje rozkładu prawdopodo-
bieństwa, których parametry estymowane były na podstawie wielolet-
nich danych historycznych. Można również ograniczyć się do charakte-
rystycznego okresu czasu, np. okresu krytycznego, roku suchego, roku
mokrego. Natomiast w modelu sterowania krótkoterminowego wykorzysta-
je się dostępne informacje o aktualnych i prognozowanych dopływach
wody do systemu, względnie inne modele predykcji dopływów wody dla
najbliższej perspektywy czasu.

6. Dyskretyzacją procesu w czasie. W modelach sterowania długoterminowego przebieg procesów w czasie obserwowany jest w stosunkowo długich krokach czasowych - np. rok, sezon, miesiąc, dekada. Natomiast w modelach sterowania krótkoterminowego dyskretyzacja po czasie jest dokładniejsza i dochodzi do dobowego, a nawet godzinowego kroku czasowego.

Omówione różnice w modelach sterowania przedstawiono w sposób syntetyczny na rys.2, na którym rozszerzono przyjętą klasyfikację modeli o model sterowania ciągłego, używany w teorii automatycznej regulacji pracy urządzeń.

Jak wynika z powyższych różnic, granica między sterowaniem długoterminowym a krótkoterminowym nie jest ściśle sprecyzowana. Okazuje się bowiem, że im dokładniejszy jest model sterowania zastosowany w analizie osiągow systemu, tym bliższy jest on modelowi sterowania operacyjnego. Teoretycznie można dopuścić sytuację, w której model sterowania długoterminowego jest zarazem modelem sterowania krótkoterminowego. Wydaje się jednak, że z punktu widzenia celów, dla których formułuje się modele sterowania długoterminowego, nie ma potrzeby komplikować icho dodatkowe problemy wynikające z działania "dzień po dniu".

Odpowiedź na drugie pytanie wynika bezpośrednio z różnicy w celach i kryteriach sterowania długoterminowego i krótkoterminowego. Przyjmuje się bowiem, że zadaniem sterowania krótkoterminowego, czyli realizowanego w czasie rzeczywistym, jest taka eksploatacja systemu, która oprócz efektów gwarantowanych przez model sterowania długoterminowego, zapewnia uzyskanie efektów dodatkowych. Mówiąc inaczej można stwierdzić, że model krótkoterminowy, zapewniając osiągi systemu, jakie gwarantuje model długoterminowy, udoskonala sterowania na bieżąco, dostosowując je do aktualnej i przewidywanej na najbliższą przyszłość sytuacji, zwiększając w ten sposób efektywność działania systemu. Przez pojęcie zwiększenia efektywności działania systemu należy rozumieć zarówno wymierne efekty dodatkowe /ponadpodstawowe zadania systemu/, jak i efekty niewymierne, wyrażające się zwiększeniem pewności /prawopodobieństwa/ spełnienia zadań podstawowych. Zadania podstawowe utożsamiane są w tym przypadku z osiąganymi systemu określonymi za pomocą modelu sterowania długoterminowego.

Typy modeli i ich powiązania pionowe	Cele /kryteria opt./	Modele systemu	Horyzont sterowania, dy. skretyzacja procesu w czasie	Modele hydrologiczne	Czynności
<p>Plany rozwoju gosp.-społecznego Polityka ekonomiki gosp.wodnej Wymagania użyt./potrzeby i ich rozkład w czasie, pewność zaspokojenia /</p> <p>MODEL STEROWANIA DŁUGOTERMINOWEGO</p>	<p>Optymalizacja zadań systemu i parametrów obiektów</p>	<p>Model przybliżony z uproszczoną strukturą systemu włącznie /model statyczny/</p>	<p>Wielolecie, w przedziałach rocznych, miesięcznych, dekadowych</p>	<p>Wieloletnie ciągi przepływów historycznych lub wygenerowanych /w niektórych przypadkach dane dotyczące okresów charakterystycznych-rok suchy, okres krytyczny/</p>	<p>Symulacja sterowania</p>
<p>Struktura systemu i parametry obiektów Zadania systemu i warunki ich spełnienia Wymagane stany systemu</p> <p>MODEL STEROWANIA KROTKÓTERMINOWEGO</p>	<p>Realizacja zadań systemu i maksymalizacja efektów dodatkowych</p>	<p>Model dokładniejszy, mogący jednak agregować kilka obiektów w jeden</p>	<p>Rok, miesiąc, dekada, tydzień, doba</p>	<p>Długoterminowe prognozy względnie dowolny model predykcji dopływów</p>	<p>Określenie sterowań w trybie operacyjnym</p>
<p>Wartości średnie oddziaływań sterujących lub zadania na najbliższy okres czasu, lub wielkości zapasów wody w zbiornikach na koniec najbliższego okresu czasu</p> <p>MODEL STEROWANIA CIĄGŁEGO [aut. regul. pracy urzędz.]</p> <p>Nieżące sterowanie pracą obiektów systemu</p>	<p>Realizacja zadań i efektów dodatkowych przy minimalnych kosztach wzgl. innych wskaźnikach eksploatacyjnych</p>	<p>Model bardzo dokładny szczególnie dla obiektów sterowalnych /model dynamiczny/</p>	<p>Doba, godzina, minuta, sterowanie ciągłe</p>	<p>Prognozy krótkoterminowe</p>	<p>Realizacja sterowań</p>

Rys. 2 Charakterystyki poszczególnych modeli sterowania

Takie postawienie problemu sterowania krótkoterminowego pociąga za sobą konieczność wprowadzenia do jego modelu dodatkowych warunków ograniczających o postaci:

$$\bar{y}(t) \in MY(t) \quad \text{dla } t \in [t_0, t_h] \quad (5)$$

$$\bar{v}(t) \in MV(t) \quad \text{dla } t \in [t_0, t_h] \quad (6)$$

$$\bar{v}(t_h) \geq v_{t_h}^* \quad (7)$$

Warunki (5) i (6) ograniczają wyjścia i stany systemu do obszaru wartości MY , MV , spełniających podstawowe zadania systemu w przedziale czasu $[t_0, t_h]$. Natomiast warunek (7) dotyczy zapasów wody w zbiornikach na końcu horyzontu sterowania, i ma na celu zapewnienie spełnienia podstawowych zadań systemu w okresie późniejszym, czyli w czasie $t > t_h$.

Warunek (7) wprowadzamy do modelu krótkoterminowego jedynie w przypadku, gdy maksymalizujemy efekty dodatkowe. Wówczas kryterium (1) jest miarą oceny tych efektów dodatkowych. W sytuacji gdy maksymalizuje się pewność spełnienia zadań podstawowych, warunek ten nie występuje, natomiast kryterium wyboru sterowań optymalnych ma postać:

$$K = f \left| \bar{v}(t_h) - v_{t_h}^* \right| \quad (8)$$

Funkcja f wyraża przyjętą miarę odchylenia rzeczywistych stanów końcowych od stanów wymaganych dla spełnienia zadań podstawowych.

W modelu sterowania krótkoterminowego zakłada się, że wielkości wejściowe $\bar{x}(t)$ są znane dla całego horyzontu czasowego optymalizacji. Mogą to być wielkości prognozowane lub też określone na podstawie dowolnego modelu predykcji przepływów. Zjawiska hydrologiczne można teoretycznie prognozować w nieskończoność, wiadomo jest jednak, że sprawdzalność prognoz maleje w miarę wydłużania perspektywy prognozowania. Z drugiej strony, im dalsza perspektywa sterowania, tym mniejszy wpływ na sterowania początkowe warunków ograniczających końcowe stany zbiorników, a tym samym większa "elastyczność" sterowania. Przy dostatecznie długiej perspektywie sterowania wpływ ten może zaniknąć całkowicie. Sytuacja odwrotna, tzn. przybliżanie horyzontu sterowania, polepsza wprawdzie trafność prognozy ale zarazem "usztynia" sterowanie krótkoterminowe poprzez silniejsze oddziaływanie na sterowania początkowe warunków ograniczających stany końcowe zbiorników. W granicy może nawet nastąpić zbieżność sterowania krótkoterminowego ze sterowaniem długo-

terminowym.

Trudno więc określić jednoznaczne zasady przyjmowania długości horyzontu sterowania krótkoterminowego. W każdej sytuacji wymaga to bowiem przeprowadzenia dokładnych ocen zysków wynikających z elastyczności sterowania i konsekwencji popełnianych błędów w sterowaniu, na skutek korzystania z mniej trafnych prognoz.

Pozostaje jeszcze problem identyfikacji ograniczeń na końcowe stany zbiorników. Upraszczając znacznie zagadnienie można ograniczenia te utożsamiać z minimalnymi zapasami wody w zbiornikach, pozwalającymi na spełnienie podstawowych zadań systemu, przy procedurze sterowania przyjętej względnie zoptymalizowanej w modelu długoterminowym.

Z uwagi na cykliczność procesów hydrologicznych należałoby określić przebieg funkcji $\bar{v}^*(t)$ dla $t \in [0, tr]$ /gdzie tr - długość cyklu hydrologicznego/. W praktyce wystarcza znajomość warunków \bar{v}^* dla dyskretnych wartości czasu, odpowiadających przyjętej dyskretyzacji po czasie procesu sterowania.

Zasady wyznaczania niezbędnych zapasów wody najprościej wyjaśnić na przykładzie pojedynczego zbiornika, wyrównującego przepływy dla celów zaopatrzenia w wodę. Pytamy - jaki powinien być zapas wody w zbiorniku na początku np. listopada, aby określone potrzeby użytkowników zaspokojone były w następnych miesiącach z pewnością równą np. 1,0? Na pytanie to można odpowiedzieć po określeniu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa odpływów ze zbiornika dla różnych poziomów jego napełnienia w dniu 1 listopada oraz dla zadanego algorytmu sterowania długoterminowego.

Stosując podejście stochastyczne implícite sprowadzamy powyższe zadanie do wielokrotnej symulacji pracy zbiornika dla zbioru wygenerowanych ciągów dopływów wody. Otrzymane rezultaty poddajemy następnie analizie statystycznej, utożsamiając procent wygenerowanych ciągów, dla których spełniono zadany odpływ zaregulowany z prawdopodobieństwem zaspokojenia potrzeb użytkowników. Dokonując tego rodzaju obliczeń dla różnych pojemności początkowych zbiornika, możemy dla danego momentu czasu t określić zależność między zapasem wody w zbiorniku a prawdopodobieństwem zaspokojenia potrzeb użytkowników.

Powtarzając podobne analizy dla różnych momentów czasu oraz dla różnych wartości potrzeb, można określić dla danego zbiornika związki wiążące ze sobą wszystkie analizowane wielkości. Związki te można przedstawić za pomocą funkcji uwikłanej, o postaci:

$$q(v^*, t, p, w) = 0, \quad (8)$$

która pozwala określić potrzebny w chwili "t" zapas wody "v*" w zbiorniku dla zaspokojenia z prawdopodobieństwem "p" potrzeb użytkowników w wysokości "w".

Określenie funkcji (8) jest o wiele trudniejsze w przypadkach systemów wielozbiornikowych, w których struktura przerzutów wody umożliwia zaspokajanie potrzeb jednego użytkownika z kilku źródeł wody. Problematyka ta została szerzej omówiona w pracy [3] i poparta konkretnym przykładem identyfikacji funkcji dla systemu dwuzbiornikowego.

Poruszone tutaj zagadnienia nie wyczerpują w pełni wszystkich problemów teorii sterowania systemami wodno-gospodarczymi. Omówiono jedynie te elementy, które jak dotychczas nie były rozpatrywane szczególnie. Pominięto natomiast problemy struktur decyzyjnych i hierarchii sterowania oraz metod analiz optymalizacyjnych, uważając iż zostały one wystarczająco wyjaśnione w pracach Instytutu Automatyki Politechniki Warszawskiej.

LITERATURA

- [1] Becker L., Yeh W., Fults D., Sparks D.: Operations Models for Central Valley Project. Journal of the Water Resources Planning and Management Division WR 1, 1976.
- [2] Becker A., Krippendorf H., Thiele W.: Einsatz von Modellen für eine effektivere Bewirtschaftung der Oberflächengewässer. Die Technik Heft 8, 1978.
- [3] Słota H.: Model adaptacyjnego sterowania rozrzędem wody w systemach wielozbiornikowych. IMGW, Kraków, 1979 /maszynopis/

ДОЛГОСРОЧНЫЕ И КРАТКОСРОЧНЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ
ВОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Р е з ю м е

Обсуждены различия и сходства между моделями управления формулированными с целью оптимизации достижений системы /долгосрочные модели управления/ а моделями управления применяемыми в текущей эксплуатации /краткосрочные модели управления/. Обращено внимание на две существенные проблемы возникающие в модели краткосрочного управления, а именно: длина горизонта управления и связанные с этим ограничения конечных состояний системы.

LONG AND SHORT - TERM MODELS OF WATER -
ECONOMY SYSTEM CONTROL

S u m m a r y

The paper presents differences and relations between control models aiming to optimize the system performance index (long-term control models) and those utilized in current optimization (short-term control models). Attention has been drawn to the two significant problems emerging within the short-term control method, namely the length of control horizon and the related restrictions imposed upon the final states of the system. The paper also analyzes the studies carried out by the Institute of Meteorology and Water Economy regarding the above mentioned problems.