

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI
KATEDRA ELEKTROTECHNIKI, SYSTEMÓW
STEROWANIA I INFORMATYKI



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

*Optymalizujące, krzepko dopuszczalne sterowanie systemami
sieciowymi z zastosowaniem do systemów wodociągowych*

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor:
mgr inż. Arkadiusz Cimiński

Promotor:
dr hab. inż. Kazimierz Duzinkiewicz

Gdańsk, 2019 r.

Spis treści

1. Ogólna charakterystyka rozprawy.....	4
2. Motywacja, cel i teza rozprawy.....	5
2.1 Uzasadnienie wyboru tematu	5
2.2 Cel i teza rozprawy	6
2.3 Struktura rozprawy.....	6
3. Sformułowanie i implementacja problemu algorytmu optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania predykcyjnego hydrauliką SW	8
3.1 Cele sterowania SW.....	8
3.2 Sformułowanie optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW.....	9
3.3 Model SW dla potrzeb sterowania.....	11
3.4 Przedziałowa predykcja wyjść SW.....	13
3.4.1 Przedziałowy model SW.....	13
3.4.2 Sformułowanie zadania krzepkiej predykcji wyjść SW.....	14
3.4.3 Propozycja rozwiązania zadania przedziałowej predykcji wyjść SW.	15
3.4.4 Wyniki symulacji przedziałowej predykcji wyjść SW.....	15
3.5 Optymalizujące sterowanie predykcyjne hydrauliką SW.....	16
3.5.1 Charakterystyka zadania.....	16
3.5.2 Algorytm wyznaczania krzepko dopuszczalnego sterowania z wykorzystaniem stref bezpieczeństwa (Algorytm I)	17
3.5.3 Bezpośredni algorytm wyznaczania optymalnego krzepko dopuszczalnego sterowania (Algorytm II)	23
3.5.4 Wnioski ogólne.....	25
3.6 Zakończenie.....	26
3.7 Bibliografia.....	27
4. Wykaz publikacji autora rozprawy.....	28

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa prezentuje syntezę algorytmów oraz badania symulacyjne dotyczące optymalizującego, krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką systemu wodociągowego (SW). W rozprawie ze względu na złożoność systemu wodociągowego (SW) oraz konieczność uwzględnienia ograniczeń systemu zastosowano technikę sterowania predykcyjnego (MPC).

Podstawa zastosowania techniki sterowania MPC jest wykorzystanie modelu sterowanego systemu. W rozprawie, do wykazania efektywności działania proponowanych algorytmów sterowania, wykorzystano model rzeczywistego SW miasta Chojnice. Model ten został zbudowany, uproszczony i zaimplementowany w symulatorze SW Epanet (Rossman, 2000), co znacznie przyspieszyło dalsze obliczenia. Uproszczenia modelu wykonano wykorzystując poprzednie prace badawcze autora rozprawy.

Stworzony w ten sposób model wykorzystano do wygenerowania optymalizującego sterowania hydrauliką SW. Wygenerowane sterowanie uwzględnia zakładane ograniczenia modelowe oraz graniczenia wyjścia oraz wejścia SW. Ponieważ model SW jest modelem nieliniowym oraz może być ze zmiennymi mieszanymi (dyskretne i ciągłe), do rozwiązania zadania optymalizacji wyznaczania sterowania, zastosowano algorytm genetyczny (AG). W celu zwiększenia efektywności działania tego algorytmu, zaproponowano dekompozycje zadania pomiędzy AG oraz symulator Epanet, a także nowe operatory genetyczne. Operatory te opierają swoje działanie na zdarzeniach występujących w SW oraz reakcjach operatora SW na nie. Wyniki przeprowadzonych prac symulacyjnych wykazały wysoką efektywności działania AG poprzez zmniejszenie wskaźnika jakości sterowania (koszty sterowania pompami SW) oraz skrócenie czasu obliczeń.

Wygenerowane w powyższy sposób sterowanie może nie być krzepko dopuszczalne przy implementacji w obiekcie sterowania. Wynika to z faktu, że model obiektu jak i dane pomiarowe, obciążone są niepewnościami i błędami modelowania jak i pomiarowymi. Stąd, tak wygenerowane sterowanie, na podstawie takiego modelu i pomiarów, może spowodować nierealizowalność wyznaczonego sterowania. Oznacza to, że zastosowane w obiekcie sterownie może przekraczać przyjęte ograniczenia wyjścia. W rozprawie, dla uproszczenia opisu i dalszych obliczeń, przyjęto przedziałowy model niepewności. Taki model pozwolił, w rozprawie, na zbudowanie efektywnego narzędzia określonego jako krzepka predykcja wyjść SW. Narzędzie to pozwala na wyznaczenie tzw. trajektorii granicznych wyjść SW, pomiędzy którymi, na pewno będzie znajdować się wyjście systemu, na zakładanym horyzoncie czasu. W rozprawie zaproponowano efektywny algorytm krzepkiej predykcji wyjść SW, który bazuje na zlinearyzowanym modelu SW wokoło trajektorii nominalnej systemu. Trajektorja nominalna systemu jest realizacją sterowania SW dla jednego wybranego scenariusza niepewności. Badania symulacyjne potwierdziły efektywność działania zaproponowanego algorytmu.

Mając narzędzie pozwalające na sprawdzenie wpływu niepewności na wyjścia systemu, w rozprawie zaproponowano dwa podejścia do wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW. W pierwszym podejściu zaproponowano zmodyfikowany algorytm wykorzystujący strefy bezpieczeństwa. Idea tego algorytmu polega na zawężaniu oryginalnych ograniczeń wyjść systemu poprzez strefy bezpieczeństwa. W rozprawie, do ich wyznaczenia, proponuje się wykorzystanie zmodyfikowanego algorytmu złotego podziału. Drugie podejście wykorzystuje dekompozycje zadania optymalizacji pomiędzy AG oraz algorytm krzepkiej predykcji wyjść SW. Pozwoliło to na znaczne uproszczenie struktury optymalizatora jednakże obniżyło efektywność działania tego algorytmu.

Przeprowadzone w rozprawie, badania symulacyjne, wykazały iż, przedstawione w rozprawie algorytmy wyznaczania krzepko dopuszczalnego sterowania mogą być zaimplementowane do sterowania rzeczywistym systemem wodociągowym, np. miasta Chojnice.

2. Motywacja, cel i teza rozprawy

2.1 Uzasadnienie wyboru tematu

Dostęp do wody pitnej jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o zasiedleniu danego obszaru. Wraz z rozwojem cywilizacji na znaczeniu przybierał nie sam fakt posiadania wody, ale także zapewnienie jej odpowiedniej ilości (hydrauliki) wraz z właściwymi cechami jakościowymi. Cechy te określone są przede wszystkim wskaźnikami ilościowymi tj.: ciśnienie oraz wydajność wodociągu (ilość dostarczanej wody) oraz jakościowymi, do których należą: kolor, smak, liczba bakterii, zawartość poszczególnych pierwiastków chemicznych itd. W rozprawie rozpatrywane są zagadnienia związane z hydrauliką systemu wodociągowego.

Rzeczywisty rozwój cywilizacji oprócz samego określenia ww. wskaźników ilościowych i jakościowych wody narzucił konieczność utrzymania wartości tych wskaźników w zakładanych granicach (przestrzegania określonych norm), w każdym punkcie poboru wody SW. W celu spełnienia tych norm, wykorzystywane są przede wszystkim metody oparte na wiedzy operatora systemu (metody regułowe) oraz bazujące na modelu SW. Pierwsza z wymienionych metod wykorzystuje wiedzę operatora systemu o sposobie jego działania, interakcjach pomiędzy jego poszczególnymi elementami oraz ograniczeniach wynikających z norm oraz praw fizyki. Jednakże metody te mają poważne ograniczenia związane z możliwościami poznawczymi i percepcyjnymi operatora systemu. Dla dużych i złożonych systemów sterowania, ilość danych i informacji konieczna do uwzględnienia w procesie generowania sterowania (przekształcenie wiedzy do postaci algorytmu) jest na tyle duża, że człowiek nie jest w stanie efektywnie ich przetworzyć. Druga grupa, w procesie generowania sterowania wykorzystuje modele matematyczne danego systemu, np. sterowanie predykcyjne.

W rozprawie, ze względu na złożoność SW oraz konieczność uwzględnienia ograniczeń systemu wybrano do dalszych rozważań technikę sterowania predykcyjnego. Technika ta zakłada, że na podstawie znajomości modelu systemu, ograniczeń wyjść i wejść systemu oraz funkcji kryterialnej (najczęściej natury ekonomicznej), możliwe jest wyznaczenie najlepszego sterowania, z punktu widzenia postawionego kryterium przy spełnieniu zakładanych ograniczeń. W rozprawie, rozpatruje się sterowanie predykcyjne pompami SW, w górnej warstwie hierarchicznej struktury sterowania SW (Brdys i inni, 2000; Brdys i inni, 2001b; Duzinkiewicz, 2005).

Podstawą działania techniki predykcyjnej jest rozwiązanie zadania optymalizacji minimalizującego określony wskaźnik jakości sterowania przy ograniczeniach modelowych systemu oraz na wejścia i wyjścia systemu. Jednym ze wskaźników efektywnego działania techniki MPC jest szybkość rozwiązywania tego zadania. Stąd w rozprawie jednym z ważnych aspektów było stworzenie algorytmu rozwiązania zadania optymalizacji, którego czas pracy wynosił by mniej niż 60 minut. Wynika to z przyjętego kroku dyskretyzacji modelu SW. Struktura algorytmu optymalizacji, przedstawiona w rozprawie, bazuje na algorytmie genetycznym (AG) (Arabas, 2004) jako optymalizatorze (proponuje sterowanie) oraz symulatorze Epanet jako elemencie wyznaczającym odpowiedź SW na propozycje sterowania (Trawicki, 2004).

W celu zwiększenia efektywności działania powyższego algorytmu, w rozprawie zaproponowano nowe operatory genetyczne, które bazują na reakcjach operatora SW (OSW) na zdarzenia występujące w SW.

Ważnym aspektem generowania sterowania jest uwzględnienie wpływu niepewności na sterowany system. Ze względu na prostotę opisu oraz łatwość określenia parametrów, w rozprawie przyjęto przedziałowy model niepewności (Milanesse i inni, 1996). W SW, ten model niepewności wykorzystano m.in. do generowania krzepkiego sterowania stężeniem chloru SW (Brdys i Chang, 2002; Chang i inni 2003; Duzinkiewicz, 2005) oraz estymacji zmiennych modelu hydraulicznego SW (Chen, 1997). W rozprawie wykorzystuje się model niepewności do zbudowania narzędzia nazwanego krępką predykcją wyjść SW, która przy pomocy przedziałowego modelu SW i generuje trajektorie graniczne SW.

Mając powyższe narzędzia, czyli: efektywny algorytm wyznaczający sterowanie SW oraz krzepką predykcję wyjść można wyznaczyć krzepko dopuszczalne sterowanie hydrauliką SW. W źródłach literaturowych można spotkać algorytmy wyznaczające optymalizujące, krzepko dopuszczalne sterowanie stężeniem chloru w SW (Chang, 2003; Duzinkiewicz, 2005). Algorytmy te opierają swoje działanie na strefach bezpieczeństwa, które zawężają oryginalne ograniczenia wyjść systemu oraz relaksacyjnej metodzie generacji tych stref. Jednakże ze względu na złożoność metody generacji tych stref w rozprawie, proponuje się zastosowanie prostszej zmodyfikowanej metody złotego podziału. Ponieważ powyższy algorytm jest dość złożony, w rozprawie, proponuje się bezpośredni algorytm wyznaczania krzepko dopuszczalnego sterowania. Struktura tego algorytmu jest analogiczna jak poprzednia tylko zamiast symulatora SW jest algorytm krzepkiej predykcji wyjść SW.

Istotnym aspektem rozprawy jest realizowalność proponowanych algorytmów w rzeczywistym SW, stąd proponowane algorytmy sterowania i predykcji zostały przetestowane na modelu rzeczywistego modelu SW miasta Chojnice.

2.2 Cel i teza rozprawy

Celem pracy jest opracowanie i zweryfikowanie algorytmu generującego optymalizujące, krzepko dopuszczalne sterowanie hydrauliką SW.

W rozprawie stawia się następującą tezę:

Możliwe jest opracowanie metody sterowania on-line hydrauliką systemu wodociągowego optymalizującego koszty i krzepko dopuszczalnego ze względu na ograniczenia wyjść.

Wkład rozprawy do dziedziny Automatyka i robotyka:

1. Zastosowanie sterowania predykcyjnego z użyciem przedziałowego modelu niepewności ograniczeń modelowych i pomiarów.
2. Opracowanie efektywnej metody optymalizującej koszty sterowania hydrauliką systemu wodociągowego dla nominalnego scenariusza niepewności.
3. Opracowanie nowych operatorów genetycznych zwiększających efektywność działania algorytmu wyznaczania sterowania SW.
4. Opracowanie efektywnej metody generującej trajektorie graniczne stanu i wyjść systemu wodociągowego dla dowolnego scenariusza niepewności.
5. Opracowanie metody optymalizującej koszty sterowania hydrauliką systemu wodociągowego gwarantującej spełnienie ograniczeń modelowych i technologicznych dla dowolnych realizacji scenariuszy niepewności.

2.3 Struktura rozprawy

Rozdział pierwszy zawiera opis przedmiotu niniejszej rozprawy, aktualność podjętej tematyki badań, celu badań oraz motywacji do ich podjęcia. Postawiona została w nim również teza rozprawy, a zakończono przedstawieniem struktury rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono cele sterowania SW z naciskiem na sterowanie hydrauliką SW. Określono w nim przede wszystkim, wymagania jakie stawia się sterowaniu hydrauliką SW, zdefiniowano zagadnienie krzepkości sterowania oraz sformułowano zagadnienie wyznaczenia optymalizującego, krzepko i niekrzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW.

Kolejny rozdział przedstawia zarówno szczegółowo modele elementów wpływających na hydraulikę SW jaki i model całego SW. Szczegółowo przedstawiono jedną z metod rozwiązywania modelu SW, która będzie wykorzystywana w także w dalszej części rozprawy

oraz krótko przedstawiono charakterystykę dwóch przykładowych SW Mała i Chojnice.

Rozdział czwarty w całości poświęcony został zagadnieniu wyznaczania optymalizującego sterowania wykorzystującego jako optymalizator AG. Opisano metodę powiązania AGi symulatora Epanet oraz procedurę dostosowania oryginalnego sformułowania zadania wyznaczania sterowania na potrzeby AG. Bazując na powiązaniu tych dwóch narzędzi (AG i Epanetu) zaproponowano 8 nowych operatorów genetycznych. Szczegółowo zaprezentowano sposób implementacji przedstawionych operatorów dla przykładowych SW oraz ich wpływ na działanie AG. Dla SW Chojnice porównano wyniki działania sterowania zastosowanego w rzeczywistym SW z działaniem sterowania wyznaczonego przy pomocy zaproponowanych operatorów genetycznych. Wszystkie poruszane w tym rozdziale zagadnienia mają na celu dobór parametrów AG, aby osiągnąć najlepsze wyniki sterowania (minimum kosztów energii elektrycznej). Ponadto, zakłada się, że wyznaczone parametry dla modelu nominalnego będą miały zastosowanie także dla algorytmu z modelem przedziałowym przedstawionym w rozdziale 6.

Rozdział piąty poświęcony jest zagadnieniu przedziałowej predykcji wyjść i stanu hydrauliki SW. Zdefiniowano w nim pojęcie estymacji oraz określono źródła niepewności SW, przedstawiono przedziałowy model niepewności i na tej podstawie zbudowano przedziałowy model SW. Sformułowano zagadnienie wyznaczania krzepkiej predykcji wyjść SW oraz schemat wyznaczania predykcji wyjść na założony horyzont predykcji. Zaproponowano algorytm rozwiązujący zadania wyznaczania przedziałowych wyjść SW oraz porównano jego efektywność z innymi algorytmami.

W rozdziale szóstym poświęcony jest zagadnieniu wyznaczania krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW. Zaproponowano w nim dwa algorytmy wyznaczające krzepko dopuszczalne sterowanie hydrauliką SW. Pierwszy bazuje na modyfikacji oryginalnych ograniczeń poprzez tzw. strefy bezpieczeństwa, w którym zaproponowano nowe podejście do generacji stref bezpieczeństwa. Drugi natomiast, w trakcie wyznaczania sterowania bezpośrednio modyfikuje sterowanie z wykorzystaniem AG oraz algorytmu krzepkiej predykcji wyjść SW.

Na końcu pracy przedstawiono podsumowanie, kierunki dalszych prac badawczych, bibliografie oraz załączniki, w których przedstawiono szczegółowo modele PSSW Mała oraz PSSW Chojnice.

3. Sformułowanie i implementacja optymalizującego algorytmu krzepko dopuszczalnego sterowania predykcijnego hydrauliką SW

3.1 Cele sterowania SW

Rozważanie problemu sterowania SW powinno precyzować cele sterowania, wraz z kryteriami oceny sposobu ich osiągnięcia. Określenie tego celu należy, w głównej mierze, do przedsiębiorstwa wodno-kanalizacyjnego zarządzającego tym systemem. Naturalnym celem sterowania, tego typu systemami jest cel ekonomiczny. Skierowany jest on na osiągnięcie zysku z pracy systemu (Findeisen 1997; Tatjewski, 2002). Typowo, wartość zysku jest określona poprzez różnicę pomiędzy kosztami uzyskania przychodów z działalności (np. sprzedaż wody) i kosztów prowadzenia tej działalności (np. koszty energii elektrycznej). Inne cele, równie ważne to (Duzinkiewicz, 2005):

- 1) zapewnienie bezpieczeństwa życia i zdrowia użytkowników wody – bezpieczeństwo bakteriologiczne i toksykologiczne;
- 2) zapewnienie jakości dostarczanej wody – odpowiednie właściwości organoleptyczne (barwa, smak, zapach);
- 3) zapewnienie ilości dostaw wody odpowiedniego ciśnienia wody oraz jej odpowiedniej ilości;
- 4) zapewnienie efektywności ekonomicznej.

Realizacja powyższych celów obejmuje zarówno sterowanie ilością jak i jakością wody w sposób jak najbardziej efektywny ekonomicznie. Zasadniczym celem sterowania, z punktu widzenia hydrauliki, jest zapewnienie pożądanej przed odbiorców ilości wody.

Osiągnięcie poszczególnych celów można zrealizować w różny sposób, np. poprzez zapewnienie odpowiedniej ilości wody przy pożądanym naporze w węźle poboru wody, realizuje się poprzez odpowiednie sterowanie pompami oraz zaworami. Możliwe jest także (jednakże w ograniczonym stopniu) zapewnienie odpowiednich właściwości jakościowych poprzez sterowanie rozpyłkami w sieci.

W rozprawie skupiono uwagę na sterowaniu ilością (hydrauliką) SW (pomijając sterowanie jakością), stąd cel ogólny można zdefiniować jako wyznaczenie optymalnej trajektorii sterowań pompami i zaworami na przyjęty horyzont sterowania ($N_p = 24$ godz.). Trajektoria ta musi spełniać następujące wymagania:

- W2.1 minimalizować koszty sterowania – spełnienie pierwotnego celu dla przedsiębiorstwa, czyli uzyskanie korzyści ekonomicznych;
- W2.2 uwzględniać wszystkie relacje pomiędzy wielkościami wejściowymi (sterowanie i zakłócenie) i wyjściowymi (napory hydrauliczne w węzłach, natężenia przepływu w elementach połączeniowych) występującymi w SW, które mają wpływ na działanie systemu;
- W2.3 spełniać ograniczenia technologiczne wejść sterujących – np. nie można przekroczyć wartości prędkości pomp oraz kątów ustawień zaworów;
- W2.4 spełniać ograniczenia projektowe wyjść SW – nie można doprowadzić m.in. do przekroczeń: maksymalnego projektowego poziomu lustra wody w zbiornikach, maksymalnej, projektowej wartości naporu hydraulicznego w węzłach sieci, itp.;
- W2.5 spełniać ograniczenia operacyjne wyjść SW, tzn., zapewniać:
 - W2.5a) minimalną wartości naporu w węzłach monitorowania - zapewnienie dostarczenia pożądanej przez odbiorców ilości wody;
 - W2.5b) właściwą szybkość zmian naporu hydraulicznego w węzłach systemu - dbałość o odpowiednią niezawodność elementów systemu (rurociągi i połączenia rurociągów);
 - W2.5c) minimalną ilości wody w zbiornikach – przepisy przeciwpożarowe;

-
- W2.5d) nieprzekraczanie ograniczeń wartości wyjść systemu poniżej wartości operacyjnych - napory hydrauliczne w kluczowych węzłach i natężenia przepływu w elementach połączeniowych co zapewni odpowiednią niezawodność elementów systemu;
- W2.6 uwzględniać zakłócenia wpływające na SW – zakłócenia te to m.in.: pobór wody zmieniający się w trakcie doby, tygodnia, miesiąca i roku; awarie rurociągów, pomp, itp.
- W2.7 uwzględniać wpływ niepewności modelu i pomiarów na realizowalność wyznaczonego sterowania w rzeczywistym SW, tzn. zapewnienie, że wyznaczone sterowanie jest optymalne i krzepko dopuszczalne.

3.2 Sformułowanie optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW

W celu zrealizowania powyższych celów sterowania hydrauliką SW konieczne jest zdefiniowanie pojęcia krzepkiej dopuszczalności sterowania.

Założmy, że mamy do dyspozycji algorytm sterowania, bazujący na nominalnym modelu systemu (modelu, w którym przyjęto jeden scenariusz niepewności), generujący wektor sterowań na zadany horyzont czasowy. Niewątpliwą zaletą (z punktu widzenia implementacji) takiego podejścia jest wysoka, numeryczna efektywność rozwiązywania zadania optymalizacji. Wadą powyższego podejścia jest uwzględnienie w generowanym sterowaniu tylko jednego scenariusza niepewności co może doprowadzić do przekroczenia ograniczeń przez wyjścia systemu. Jeżeli, przyjęty w modelu systemu, scenariusz niepewności jest ten sam co w rzeczywistym systemie, to trajektoria wyjścia systemu będzie dokładnie taka sama jak trajektoria wyjścia modelu (y^I na rysunku 3.1). Ograniczenia na wyjścia i sterowanie w systemie będą więc spełnione, ponieważ są one spełnione dla modelu. Dla innego scenariusza niepewności trajektoria wyjścia systemu może się różnić od trajektorii wyjścia modelu systemu. Dla "korzystnego" scenariusza niepewności, wyjście systemu będzie zawierać się w ograniczeniach systemu (y^{II} na rysunku 3.1). Natomiast dla "niekorzystnego" scenariusza niepewności, wyjście systemu może przekroczyć zakładane ograniczenia systemu (y^{III} na rysunku 3.1). Mając powyższe fakt na uwadze można stwierdzić, że modelowa dopuszczalność wyznaczonego sterowania nie jest wystarczająca – potrzebna jest krzepka dopuszczalność sterowania.

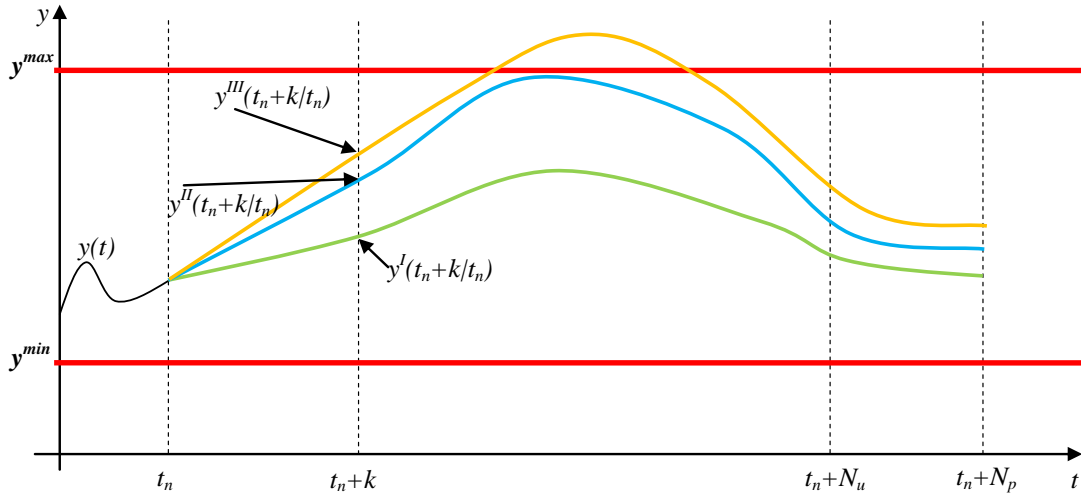
Definicja 3.1. Krzepka dopuszczalność sterowania (Duzinkiewicz, 2005)

Niech ustalone będą: chwila czasu t_n , stan sterowanego systemu w chwili t_n oraz trajektoria sterowania na horyzoncie sterowania Ξ_u . Powiemy, że dane sterowanie jest *krzepko dopuszczalne*, jeśli istnieje gwarancja, że po jego zastosowaniu do rzeczywistego systemu otrzymana trajektoria wyjścia będzie spełniać ograniczenia nałożone na wyjście na całym horyzoncie predykcji Ξ_p .

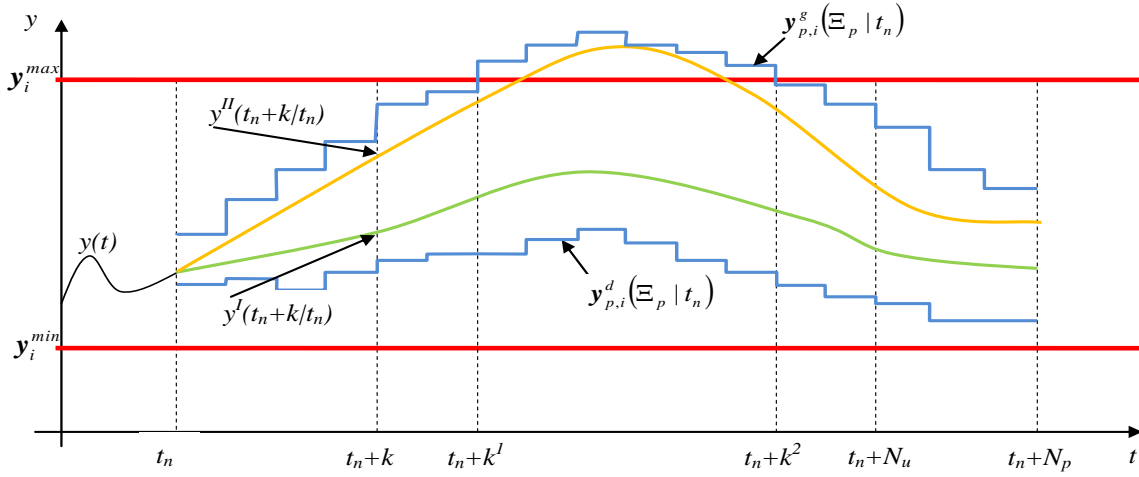
Powstaje pytanie: *Jak konstruktywnie sprawdzać, czy sterowanie jest krzepko dopuszczalne?*

Narzędziem pozwalającym odpowiedzieć na powyższe pytanie jest *krzepka predykcja wyjść SW* wykorzystująca model systemu z przedziałowym modelem niepewności modelu, predykcji zakłóceń oraz pomiarów. Krzepka predykcja wyjścia określa trajektorie „najgorszych przypadków” (*ang.* worst – case) wyjścia systemu na horyzoncie predykcji wynikające z występujących w modelu niepewności. Pomędzy tymi trajektoriami granicznymi $y_{p,i}^d, y_{p,i}^g$ (rysunek 3.2) zawierają się wszystkie możliwe trajektorie wyjścia systemu wynikające z aktualnie realizowanego w systemie scenariusza niepewności. Wyznaczone trajektorie graniczne $y_{p,i}^d, y_{p,i}^g$, dla i -tego wyjścia systemu, są wektorami,

wyznaczonymi w chwili czasu t_n na horyzont predykcji Ξ_p , o liczbie składowych odpowiadających długości horyzontu predykcji N_p .



Rysunek 3.1 Wpływ scenariusza niepewności na wyjście rzeczywistego systemu.



Rysunek 3.2 Przykład przekroczenia oryginalnych ograniczeń wyjścia systemu przez górną trajektorię graniczną.

Do generowania przedziałowych trajektorii wyjść, w krzepkiej predykcji wyjść SW, wykorzystuje się przedziałowy model systemu w postaci: $\bar{F}_d(\mathbf{u}(\Xi_u/t_n), \bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p/t_n)) = 0$.

Mając to na uwadze, zadanie optymalizacji wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania, można sformułować w następujący sposób:

$$\mathbf{u}^*(\Xi_u/t_n) = \underset{\mathbf{u}(\Xi_u/t_n)}{\operatorname{arg\,min}} J(\mathbf{u}(\Xi_u/t_n), \bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p/t_n))$$

przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned} \bar{F}_d(\mathbf{u}(\Xi_u/t_n), \bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p/t_n)) &= 0 \\ \bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p/t_n) &\in \bar{\mathbf{y}} \\ \mathbf{u}(\Xi_u/t_n) &\in \bar{\mathbf{u}} \end{aligned} \tag{3.1}$$

gdzie $\bar{\mathbf{y}}$ - wektor ograniczający trajektorie wyjścia systemu; $\bar{\mathbf{u}}$ - wektor ograniczający sterowania systemu; $\bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p | t_n)$ - przedziałowy wektor predykowanych wyjść systemu wyznaczony w chwili czasu t_n zdefiniowany na Ξ_p jako $\bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p | t_n) = [y_p^{\min}(t_n | t_n), \dots, y_p^{\min}(t_n + N_p | t_n), y_p^{\max}(t_n | t_n), \dots, y_p^{\max}(t_n + N_p | t_n)]^T$; $\mathbf{u}^*(\Xi_u | t_n)$ - wektor optymalnych sterowań wyznaczonych, w chwili czasu t_n , zdefiniowany na Ξ_u .

Rozwiązanie powyższego zadania optymalizacji uwzględnia wszystkie cele sterowania oraz wymagania przedstawione w 3.1.

Ze względu na przedziałowy charakter modelu systemu, zadanie (3.1) nie można rozwiązać przy pomocy konwencjonalnych algorytmów optymalizacji. W celu rozwiązania tego zadania, w rozprawie proponuje się dwa narzędzia. Pierwsze narzędzie to efektywny optymalizator, który pozwoli na szybkie rozwiązanie zadania, w którym możliwe będzie uwzględnienie ograniczeń modelowych oraz na wyjścia i wejścia systemu. Drugie narzędzie to efektywny algorytm krzepkiej predykcji wyjść SW, pozwalający na generowanie trajektorii granicznych wyjść SW. Poszczególne narzędzia zostaną przedstawione poniżej. Oczywiście jest także, że podstawą do budowy tych narzędzi jest model systemu, który zostanie przedstawiony najpierw.

3.3 Model SW dla potrzeb sterowania

W rozprawie wykorzystuje się model uproszczony quasi-ustalonych przepływów (Boulos i inni, 2006; Walskie i inni, 2009), który opisuje się przy pomocy układu równań różnicowo-algebraicznych, z krokiem dyskretyzacji równym krokowi hydrauliki $T_h = 1$ godz. Ponieważ trajektorie poboru wody w kolejnych dobach są do siebie bardzo podobne (z rozróżnieniem dni tygodnia), stąd przyjmuje się długość horyzontu predykcji i sterowania równy 24 godzin (Boulos i inni, 2006; Walski i inni, 2009). System wodociągowy składa się z powiązanych między sobą elementów statycznych i dynamicznych. Zakłada się, że ze względu na nieściśliwość cieczy oraz natychmiastowość hydrauliki, zmiany przepływów w rurociągach i zmiany naporów hydraulicznych w węzłach w takim systemie są procesami statycznymi. Natomiast procesy dynamiczne związane są z gromadzeniem i przechowywaniem wody w zbiornikach.

Uwzględniając tylko hydraulikę SW jako obiekt sterowania, można wyróżnić następujące wielkości:

- wejściowe:
 - wektor sterowań \mathbf{u} , którym w rozprawie, jest wektorem sterowań pompami \mathbf{u}_p ,
 - wektor zakłóceń \mathbf{z} , którym jest wektor wszystkich poborów wody w SW \mathbf{d}_{POB} ,
- wyjściowe:
 - wektor zmiennych algebraicznych \mathbf{y} , w którego skład wchodzi:
 - wektor naporów hydraulicznych w węzłach \mathbf{h} ,
 - wektor natężeń przepływu w elementach połączeniowych \mathbf{q} ,
 - wektor zmiennych stanu \mathbf{x} , którym jest wektor naporu hydraulicznego wody w zbiornikach systemu \mathbf{h}_z .

Powyższe wielkości tworzą wektor charakteryzujący dany SW, który można zapisać w postaci:

$$\mathbf{s} = [\mathbf{u}^T, \mathbf{z}^T, \mathbf{y}^T, \mathbf{x}^T]^T = [\mathbf{u}_p^T, \mathbf{d}_{POB}^T, \mathbf{h}^T, \mathbf{q}^T, \mathbf{h}_z^T]^T \quad (3.2)$$

Do rozwiązania tego układu równań konieczne jest wykonanie jego dyskretyzacji czasem dyskretyzacji równym T_h . Po dyskretyzacji model SW jest w postaci:

$$F_d(s(k)) = \begin{cases} A_L \cdot s(k) = 0 \\ f_{NL}(s(k)) = 0 \\ \mathbf{h}_z(k+1) = \mathbf{h}_z(k) + \mathbf{\Omega}_d \cdot (\mathbf{q}_{z,wej}(k) - \mathbf{q}_{z,wyj}(k)) \end{cases}; \mathbf{h}_z(0) = \mathbf{h}_{z,0}; k = 0,1,2,\dots \quad (3.3)$$

gdzie A_L - macierz koincydencji, której wiersze przyporządkowane są węzłom systemu natomiast kolumny elementom połączeniowym, f_{NL} - nieliniowa funkcja opisująca prawo zachowania energii dla elementów połączeniowych, $\mathbf{\Omega}$ - macierz diagonalna, której elementami są odwrotności pól powierzchni zbiorników, $\mathbf{q}_{z,wej}(t)$, $\mathbf{q}_{z,wyj}(t)$ - odpowiednio, wektor natężeń przepływu wpływających do zbiornika i wypływających ze zbiornika, $\mathbf{h}_{z,0}$ - wektor stanów lustra wody w zbiornikach dla początkowej chwili czasu t_n , k - dyskretna chwila czasu.

Algorytmy zaprezentowane w rozprawie zostały symulacyjnie zbadane wykorzystując dwa modele przykładowych symulacyjnych systemów wodociągowych (PSSW).

Charakterystyka PSSW Mała

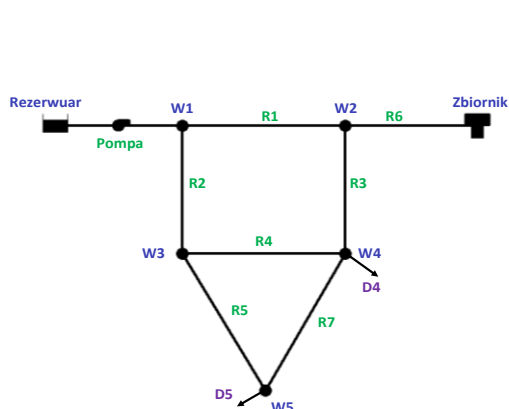
Pierwszy SW jest PSSW Mała (rysunek 3.3a) zawierającym jedno źródło wody, jeden węzeł gromadzący wodę, 3 węzły połączeniowe, 2 węzły z odbiorcą, którym przypisane jest jeden WPW i dwa BWPW, jedną pompę zmiennoprędkościową, 7 rurociągów.

Charakterystyka PSSW Chojnice

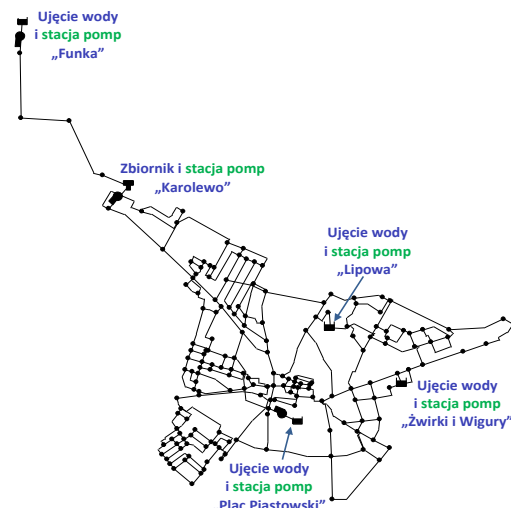
Struktura PSSW Chojnice przedstawiona została na rysunku 3.3b. Woda do systemu dostarczana jest z dwóch czynnych ujęć – „Funka” i „Plac Piastowski”. Najwięcej wody pobierane jest z ujęcia „Funka”, z którego woda transportowana jest do zbiornika „Karolewo”, położonego na obrzeżach miasta. Drugie ujęcie, zaopatrujące miasto w wodę, jest to ujęcie „Plac Piastowski”, znajdujące się w centrum miasta i pełniące rolę uzupełniającą.

W każdym działającym ujęciu wody („Funka” i „Plac Piastowski”) istnieje układ pompowy składający się z pierwszego i drugiego stopnia pompowania. Zadaniem pomp pierwszego stopnia (od 4 do 6 pomp) jest wydobywanie wody ze studni głębinowych i jej dostarczenie do układu uzdatniania wody. Zadaniem pomp drugiego stopnia (od 4 do 6) jest wtłoczenie wody do systemu o odpowiednich parametrach hydraulicznych (przepływ, napór).

W niniejszym opracowaniu wyniki działania poszczególnych algorytmów zostały przedstawione tylko dla PSSW Chojnice.



Rysunek 3.3a Struktura PSSW Mała.



Rysunek 3.3b Struktura PSSW Chojnice.

3.4 Przedziałowa predykcja wyjść SW

3.4.1 Przedziałowy model SW

Nieodłącznym elementem procesu predykcji jest niepewność. Ogólnie niepewność związana jest z wykorzystaniem pomiarów, modeli oraz technik komputerowych i może wynikać z (Duzinkiewicz, 2005):

- a) niepewnego ujęcia mechanizmów przetwarzania zmiennych wejściowych w zmienne wyjściowe/ stanu – *niepewności struktury modelu*;
- b) niepewnego określenia parametrów modelu – *niepewność estymacji (parametrów modelu)*;
- c) niepewnych wartości wielkości wejściowych i wyjściowych/stanu – *niepewność pomiarów lub predykcji*.
- d) zastosowania techniki komputerowej i metod numerycznych – *niepewność obliczeń*.

W rozprawie, rozważa się optymalizujące, krzepko dopuszczalne sterowanie hydrauliką SW w oparciu o model SW zbudowany z wykorzystaniem praw zachowania masy i energii. Model SW można przedstawić w postaci układu równań różnicowo-algebraicznych w postaci (3.3). Operator F_d nie jest dokładnie znany, ale jest znane jego przybliżenie F_m :

$$F_d(s(k)) = F_m(s(k)) + \overset{=}{e}^M(k) \quad (3.4)$$

gdzie $\overset{=}{e}^M(k)$ - przedziałowy wektor błędów modelowania oszacowywany w chwili czasu t .

Zakładając znajomość dolnej $e^{M,d}(k)$ i górnej $e^{M,g}(k)$ granicy błędu modelowania $\overset{=}{e}^M(t) = [e^{M,d}(k)^T, e^{M,g}(k)^T]^T$, można napisać:

$$e^{M,d}(k) \leq \overset{=}{e}^M(k) \leq e^{M,g}(k) \quad (3.5)$$

Przyjmując $F_d(s(k)) = 0$, to przedziałowy model hydrauliki SW można zapisać jako:

$$-e^{M,g}(k) \leq F_m(s(k)) \leq -e^{M,d}(k) \quad (3.6)$$

Natomiast przedziałowy model pomiarów danych na horyzoncie $\Xi_{POM} = \overline{k - N_{POM}, k}$ jest w postaci:

$$z^P(\Xi_{POM}) - e^{P,g}(\Xi_{POM}) \leq z(\Xi_{POM}) \leq z^P(\Xi_{POM}) - e^{P,d}(\Xi_{POM}) \quad (3.7)$$

gdzie $e^{P,d}(\Xi_{POM})^T, e^{P,g}(\Xi_{POM})^T$ - odpowiednio górne i dolne ograniczenie błędu pomiaru.

Reasumując powyższe, przedziałowy model SW można przedstawić w postaci:

$$\overset{=}{F}_m(k) = \begin{cases} -e^{M,g}(k) \leq F_d(s(k)) \leq -e^{M,d}(k) \\ z^P(\Xi_{POM}) - e^{P,g}(\Xi_{POM}) \leq z(\Xi_{POM}) \leq z^P(\Xi_{POM}) - e^{P,d}(\Xi_{POM}) \end{cases} \quad (3.8)$$

Należy zwrócić uwagę, że model zawiera oprócz pomiarów, predykcję zakłóceń $\bar{\mathbf{d}}_{POB}$ oraz wektor sterowań \mathbf{u} , które muszą być określone na całym horyzoncie predykcji Ξ_p .

3.4.2 Sformułowanie zadania krzepkiej predykcji wyjść SW

Niech $\bar{\mathbf{w}}(\Xi_p / t_n)$ oznacza zbiór trajektorii granicznych predykowanych zmiennych systemu, określony w chwili czasu t_n , na chwilę czasu $t_n + k$ ($k \in \Xi_p$) i jest w postaci:

$$\bar{\mathbf{w}}(\Xi_p / t_n) = [\mathbf{w}^d(\Xi_p / t_n)^T, \mathbf{w}^g(\Xi_p / t_n)^T]^T \quad (3.9)$$

gdzie, $\mathbf{w}^d, \mathbf{w}^g$ - odpowiednio, dolny i górny zbiór trajektorii granicznych predykowanych zmiennych, określony w następujący sposób:

Przyjmując powyższą definicję wektora, zadanie przedziałowej predykcji wyjść SW definiuje się w następujący sposób:

$$\forall_{i \in 1, N_w} \forall_{k \in \Xi_p} w_i^d(t_n + k | t_n) = \min \{w_i(t_n + k | t_n)\} \quad (3.10)$$

$$w_i(t_n + k | t_n) \in \bar{F}_m(t_n + k | t_n)$$

oraz

$$\forall_{i \in 1, N_w} \forall_{k \in \Xi_p} w_i^g(t_n + k | t_n) = \max \{w_i(t_n + k | t_n)\} \quad (3.11)$$

$$w_i(t_n + k | t_n) \in \bar{F}_m(t_n + k | t_n)$$

Zadania te należy rozwiązać dla zmiennych systemu, które konieczne są do prowadzenia działań operacyjnych SW. Mając na uwadze stawiane ograniczenia na wyjścia SW, wektor ten jest w postaci:

$$\mathbf{w}(\Xi_p / t_n) = [\mathbf{h}_{MO}(\Xi_p / t_n)^T, \mathbf{h}_z(\Xi_p / t_n)^T, \mathbf{q}_p(\Xi_p / t_n)^T]^T \quad (3.12)$$

3.4.3 Propozycja rozwiązania zadania przedziałowej predykcji wyjść SW

Zadania optymalizacji (3.10-3.11) ze względu na nieliniowe ograniczenia, wynikające z modelu SW, zalicza się do zadań nieliniowych ze zmiennymi ciągłymi. W rozprawie, w celu rozwiązania tego zadania, zaproponowano algorytm wykorzystujący linearyzację jednoducinkową wokół trajektorii nominalnej pracy SW. Efektywność tego algorytmu porównano z dwoma algorytmami wykorzystującymi model nieliniowy oraz model zlinearyzowany wieloducinkowo.

Propozycja algorytmu rozwiązywania zadania predykcji wyjść SW - linearyzacja jednoducinkowa w okolo punktu pracy systemu

W rozprawie proponuje się algorytm rozwiązywania zadania (3.10–3.11) jako liniowego, w którym linearyzuje się model SW wokół punktu trajektorii nominalnej (funkcja celu pozostaje w niezmiennionej postaci). Punkty pracy systemu generowane są wykorzystując nominalny model systemu (3.3).

W rozprawie, aby zmniejszyć błąd linearyzacji charakterystyki rurociągu, podzielono przedział zmienności natężenia przepływu na dwa podprzedziały. Wartością graniczną, dzielącą na te dwa obszary, jest umownie przyjęta wartość $q_{i,0}$ (dla i -tego rurociągu). Powyższe rozróżnienie wynika ze wzrostu wartości błędów linearyzacji dla punktów pracy

bliskich zerowemu przepływowi wody. W rozprawie przyjęto, dwa modele zlinearyzowanego modelu charakterystyki rurociągu, w zależności od położenia punktu pracy:

3.4.4 Wyniki symulacji przedziałowej predykcji wyjść SW

W celu przedstawienia efektywności i jakości metody wyznaczania trajektorii granicznych wyjść SW, wykonano eksperyment, w którym porównano ją z dwoma pozostałymi algorytmami przedstawionymi w rozprawie. Porównano przebiegi wyznaczonych trajektorii granicznych oraz czas obliczeń.

Dla PSSW Chojnice zadanie przedziałowej predykcji wyjść SW sformułowane z wykorzystaniem linearyzacji wieloodcinkowej nie mogło być rozwiązane na dostępnym sprzęcie komputerowym i dostępnym oprogramowaniu. Fakt ten wynika z ograniczeń pamięci operacyjnej komputera oraz ograniczeń 32 bitowego systemu operacyjnego. Ilość wykorzystywanej pamięci operacyjnej przez solver pakietu Tomlab wynika z wykorzystania algorytmu podziału i ograniczeń (Sysło i inni, 1999), który dla dużej liczby zmiennych dyskretnych wykorzystuje znaczną ilość pamięci operacyjnej. Zważając na powyższe wyniki symulacji dla PSSW Chojnice nie będą przedstawione.

Porównanie wartości średnich oraz minimalnych i maksymalnych czasów rozwiązywania zadania predykcji wyjść SW dla rozważanych PSSW, przedstawiono w tabeli 3.1 i 3.2. Dla tych algorytmów, wektor startowy optymalizacji był równy elementowi trajektorii nominalnej systemu $s^{pp}(t_n + k/t_n)$ w k -tym kroku predykcji.

Tabela. 3.1 Średni, minimalny i maksymalny czas rozwiązania jednego zadania optymalizacji przedziałowej predykcji wyjść i stanu SW dla PSSW Mała.

Sformułowanie zadania przedziałowej predykcji wyjść i stanu SW	Nieliniowe [ms]	Linearyzacja wieloodcinkowa [ms]	Linearyzacja jednodcinkowa wokół trajektorii nominalnej[ms]
Średnia	152,22	939,52	3,46
Min	43,91	410,37	3,29
Max	470,94	3210,33	6,12

Tabela. 3.2 Średni, minimalny i maksymalny czas rozwiązania jednego zadania optymalizacji przedziałowej predykcji wyjść i stanu SW dla PSSW Chojnice.

Sformułowanie zadania przedziałowej predykcji wyjść i stanu SW	Nieliniowe [ms]	Linearyzacja wieloodcinkowa [s]	Linearyzacja jednodcinkowa w wokół trajektorii nominalnej [ms]
Średnia	7590,34	-	26,76
Min	1930,52	-	20,63
Max	37310,44	-	36,72

Wnioski

Z wyników przedstawionych w tabelach 3.1-3.2 wypływa wniosek, że czas rozwiązania zadania (3.10 – 3.11) sformułowanego jako linearyzacja jednodcinkowa wokół punktu trajektorii nominalnej jest najkrótszy - zarazem wartość średnia jak i wartości minimalna i maksymalna. Wynika to, z faktu, iż liniowe zadania optymalizacji stosunkowo łatwo rozwiązać wykorzystując np. metodę Simplex.

Przebiegi trajektorii granicznych dla rozwiązania zadania krzepkiej predykcji wyjść wykorzystując metodę linearyzacji wokół punktu trajektorii nominalnej, w większości przypadków pokrywają z trajektoriami granicznymi rozwiązania nieliniowego. Natomiast trajektorie graniczne, wyznaczone wykorzystując metodę linearyzacji wieloodcinkowej,

w większości przypadków, odbiegają od trajektorii granicznych rozwiązania nieliniowego. Z powyższego wypływa wniosek, że trajektorie graniczne uzyskane przy pomocy linearyzacji wokół punktu trajektorii nominalnej, lepiej odzwierciedla nieliniowe rozwiązanie zadań predykcji w porównaniu z trajektoriami uzyskanymi ze sformułowania wieloodcinkowego.

Reasumując powyższe, do wyznaczania krzepkiego sterowania zastosowano algorytm wyznaczania krzepkiej predykcji wyjść SW z wykorzystaniem zlinearyzowanego wokół punktu pracy systemu. Powyższy wybór podyktowany był dwiema przesłankami:

1. z przedstawionych algorytmów uzyskuje najkrótszy średni czas obliczeń na jedno zadanie optymalizacji,
2. dla wybranego algorytmu trajektorie graniczne wyjść SW nie różnią się znacząco od trajektorii granicznych uzyskiwanych z nieliniowego sformułowania.

3.5 Implementacja optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania predykcyjnego hydrauliką SW

3.5.1 Charakterystyka zadania

Zadanie optymalizacji sterowania hydrauliką SW (3.1) ma następujące cechy:

- nieliniową funkcję celu;
- silnie nieliniowy model systemu opisany układem równań różnicowo – algebraicznych (3.3);
- zmienne mieszane: dyskretne (sterowanie pompami i zaworami) oraz ciągłe (napory hydrauliczne, natężenia przepływu, sterowanie pompami i zaworami);
- ograniczenia na wartość sygnałów sterujących (prędkość pomp oraz stopień otwarcia zaworu) i wyjścia (napory hydrauliczne oraz natężenia przepływu).

Zatem, powyższe zadanie należy do klasy zadań optymalizacji nieliniowej, niewypukłej ze zmiennymi mieszanymi. Do rozwiązania tego typu zadań nie istnieją uniwersalne procedury optymalizacyjne zapewniające znalezienie optymalnego rozwiązania umożliwiające wykorzystanie rozwiązania (sterowania) w procedurze MPC. Stąd, w rozprawie, proponuje się algorytm optymalizacji bazujący na modelu nominalnym SW (3.3) oraz algorytmie genetycznym jako optymalizatorze.

W rozprawie do rozwiązania tego zadania, zaproponowano dwa algorytmy optymalizacyjne. Pierwszy algorytm przedstawiony w literaturze (Brdyś, Chang 2002; Duzinkiewicz, 2005) opiera swoje działanie o tzw. strefy bezpieczeństwa (Algorytm I) a drugi algorytm bazuje na bezpośrednim wykorzystaniu krzepkiej predykcji wyjść do generacji sterowania (Algorytm II).

3.5.2 Algorytm wyznaczania krzepko dopuszczalnego sterowania z wykorzystaniem stref bezpieczeństwa (Algorytm I)

Ideą stref bezpieczeństwa jest takie zmodyfikowanie oryginalnych ograniczeń wyjść systemu, aby sterowanie wyznaczone przy pomocy nominalnego modelu systemu, było krzepko dopuszczalne. Ze względu na trudność określenia *a priori* wartości tych stref bezpieczeństwa konieczne jest iteracyjnie wyznaczenie ich wartości. Algorytm, w pierwszym kroku, rozpoczyna poszukiwanie sterowania optymalnego \underline{u}^* przyjmując zerowe wartości stref bezpieczeństwa $\underline{\Sigma}$. Sterowanie wyznaczone jest poprzez rozwiązanie zadania optymalizacji w postaci:

$$\mathbf{u}^*(\Xi_u | t_n) = \arg \min_{\mathbf{u}(\Xi_u | t_n)} J(\mathbf{u}(\Xi_u | t_n), \mathbf{y}_p(\Xi_p | t_n))$$

przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned} F_d(\mathbf{u}(\Xi_u | t_n), \mathbf{y}_p(\Xi_p | t_n)) &= 0 \\ \mathbf{y}_p(\Xi_p | t_n) &\in \bar{\mathbf{y}} \\ \mathbf{u}(\Xi_u | t_n) &\in \bar{\mathbf{u}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Wyznaczone sterowanie \mathbf{u}^* sprawdzane jest ze względu na jego krzepkość, stąd dla tego sterowania wyznacza się trajektorie graniczne wyjść systemu $\bar{\mathbf{y}}_p$. Na podstawie tych trajektorii określa się czy sterowanie jest krzepko dopuszczalne poprzez sprawdzenie zawierania się trajektorii granicznych wyjść systemu $\bar{\mathbf{y}}_p$, w oryginalnych ograniczeniach systemu $\bar{\mathbf{y}}$ na horyzoncie Ξ_p . Jeżeli stwierdzone zostanie przekroczenie, to zakłada się przeprowadzenie modyfikacji oryginalnych ograniczeń wyjścia $\bar{\mathbf{y}}$ za pomocą wektora stref bezpieczeństwa $\bar{\Sigma}$. Modyfikacja oryginalnego ograniczenia wyjścia $\bar{\mathbf{y}}$ (dolnego lub górnego), przy pomocy wektora stref bezpieczeństwa odbywa się w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{\Sigma,i}^{\min}(\Xi_p | t_n) &= \mathbf{y}_i^{\min}(\Xi_p | t_n) + \Sigma_i^d(\Xi_p | t_n) \\ \mathbf{y}_{\Sigma,i}^{\max}(\Xi_p | t_n) &= \mathbf{y}_i^{\max}(\Xi_p | t_n) - \Sigma_i^g(\Xi_p | t_n) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\bar{\mathbf{y}}_{\Sigma}(\Xi_p | t_n) = [\mathbf{y}_{\Sigma,1}^{\min}(\Xi_p | t_n), \dots, \mathbf{y}_{\Sigma,m}^{\min}(\Xi_p | t_n), \mathbf{y}_{\Sigma,1}^{\max}(\Xi_p | t_n), \dots, \mathbf{y}_{\Sigma,l}^{\max}(\Xi_p | t_n)]^T$$

gdzie Σ_i^d, Σ_i^g - dolny i górny wektor stref bezpieczeństwa.

Modyfikacja ograniczeń wyjść systemu pociąga za sobą konieczność ponownego rozwiązania zadania wyznaczania sterowania (3.13) uwzględniającego zmodyfikowane ograniczenia (3.14). Zadanie (3.13) ze zmodyfikowanymi ograniczeniami wyjścia (3.14) przyjmuje postać:

$$\mathbf{u}^*(\Xi_u | t_n) = \arg \min_{\mathbf{u}(\Xi_u | t_n)} J(\mathbf{u}(\Xi_u | t_n), \mathbf{y}_p(\Xi_p | t_n))$$

przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned} F_M(\mathbf{u}(\Xi_u | t_n), \mathbf{y}_p(\Xi_p | t_n)) &= 0 \\ \mathbf{y}_p(\Xi_p | t_n) &\in \bar{\mathbf{y}}_{\Sigma} \\ \mathbf{u}(\Xi_u | t_n) &\in \bar{\mathbf{u}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Algorytm kończy swoje działanie w kroku, w którym stwierdzone będzie, że wyznaczone sterowanie jest krzepko dopuszczalne.

Wybór stref bezpieczeństwa spełniających warunki niepustości zbioru sterowań i kompensacji wpływu niepewności na wyjście systemu nie jest zadaniem trywialnym. O użyteczności zastosowania metody stref bezpieczeństwa stanowi możliwość syntezy algorytmu konstruktywnego wyznaczania odpowiednich, niekonserwatywnych stref bezpieczeństwa gwarantujących krzepką dopuszczalność sterowań. W dalszej części rozdziału zawarta została propozycja dochodzenia do wartości niekonserwatywnych stref bezpieczeństwa bazująca na metodzie optymalizacji jednowymiarowej.

Wyznaczanie wartości stref bezpieczeństwa

W rozprawie, do wyznaczania stref bezpieczeństwa, proponuje się wykorzystać iteracyjne ich zawężanie stosując zmodyfikowaną metodę złotego podziału (Findeisen, i inni, 1977). To podejście zastosowane zostało dla każdej chwili czasu z horyzontu predykcji, w którym naruszone zostały oryginalne lub zmodyfikowane ograniczenia wyjścia.

Zastosowanie podejścia metody złotego podziału wymaga określenia początkowej wartości krańców przedziału poszukiwań. Początkowe wektory dolnych $\overline{\Sigma}^{\min 0}(\Xi_p / t_n)$ i górnych $\overline{\Sigma}^{\max 0}(\Xi_p / t_n)$ ograniczeń przedziału stref bezpieczeństwa są trudne do określenia *a priori*. Przyjęcie niewłaściwych wartości tych ograniczeń może spowodować niekorzystne działanie algorytmu lub brak dopuszczalnych rozwiązań.

W związku z powyższym, w rozprawie przyjęto dwa założenia: (1) założenie, że w pierwszym kroku działania algorytmu dolne ograniczenie na wartości stref bezpieczeństwa jest równe 0; (2) maksymalna szerokość strefy bezpieczeństwa równą 0,6 odległości pomiędzy górną i dolną trajektoria graniczną.

Algorytm rozwiązujący zadanie (3.15) (Optymalizujące sterowanie hydrauliką systemu wodociągowego OSHSW)

a) Modyfikacja zadania optymalizacji (3.17)

W rozprawie do rozwiązania zadania optymalizacji (3.15) wykorzystano AG. Ponieważ w AG nie można bezpośrednio wykorzystać ograniczeń zadania optymalizacji, stąd oryginalne zadanie (3.15) należy przekształcić do postaci:

$$\mathbf{u}^*(\Xi_u / t_n) = \arg \min_{\mathbf{u}(\Xi_u / t_n)} [J_u(\mathbf{u}(\Xi_u / t_n)) + J_k(\mathbf{u}(\Xi_u / t_n), \mathbf{y}(\Xi_p / t_n))] \quad (3.16)$$

W rozprawie proponuje się następującą postać funkcji kary:

$$J_k = w_1 \cdot J_{model} + w_2 \cdot J_h + w_3 \cdot J_{\Delta h} + w_4 \cdot J_z + w_5 \cdot J_{\Delta z} + w_6 \cdot J_q \quad (3.17)$$

gdzie J_{model} - kara za naruszenie ograniczeń równań modelu SW (3.3), J_h - kara za naruszenie ograniczeń na napór hydrauliczny w węzłach monitorowania, $J_{\Delta h}$ - kara za naruszenie ograniczenia na szybkość zmiany naporu hydraulicznego w węzłach monitorowania, J_z - kara za naruszenie ograniczenia na napór hydrauliczny w zbiornikach, $J_{\Delta z}$ - kara za naruszenie ograniczenia na stan końcowy w zbiornikach, J_q - kara za naruszenie ograniczenia na maksymalną ilość wody pobraną ze źródła w ciągu jednej godziny; $w_i, \forall i \in \overline{1,6}$ - wagi, których wartość została dobrana eksperymentalnie w trakcie symulacji algorytmu genetycznego.

Dodatkowo w celu zmniejszenia liczby zamiennych wyznaczanych przez AG dokonano dekompozycji zadania optymalizacji. Algorytm genetyczny proponuje wektor sterowań, który jest przesyłany do symulatora Epanet. Symulator Na podstawie tego sterowania oraz predykcji poborów, wyznacza trajektorie wyjść systemu oraz wektory błędów symulacji i przesyła je do AG. Informacje te wykorzystywane są do określenia wartości funkcji przystosowania danego osobnika.

b) Struktura i metoda kodowania chromosomu AG

Struktura chromosomu \mathbf{o}_n^r reprezentowana jest przez P podwektorów (genów) sterowań pompami. Każdy gen zawiera N_u alleli, który reprezentuje sterowanie p -etą pompą dla chwili czasu $t_n + i, \forall_{i \in \Xi_u}$. Liczba alleli w osobniku uzależniona jest od: liczby pomp w modelu

systemu P , długości horyzontu sterowania N_u oraz długości kroku hydrauliki T_h i wynosi $\dim(o) = P \cdot N_u / T_h$.

c) Nowe operatory genetyczne

W celu zwiększenia efektywności działania AG w rozprawie zaproponowano 8 nowych operatorów genetycznych zakwalifikowanych jako operatory mutacji. Działanie zaproponowanych operatorów bazuje na wykorzystywanych przez operatora SW metodach postępowania w trakcie sterowania SW. Metody te wypracowane są na podstawie 8 zdarzeń (ostrzeżenia symulatora, wartości naporów w węzłach monitorowania, rozłożenia w czasie taryfy energetycznej, itd.), które mogą być brane pod uwagę w trakcie „ręcznego” generowania sterowania, przez OSW, z wykorzystaniem symulatora Epanet. Przyjęto, że OSW na podstawie wyróżnionych zdarzeń przedstawił propozycje reakcji na nie. Propozycje te opierają swoje działanie na następujących założeniach:

- a) sieć wodociągową można podzielić na obszary związane z osiedlami, większymi poborcami wody, itp. (OM - obszary monitorowania);
- b) w każdym OM można wyróżnić jeden węzeł, w którym napór hydrauliczny (ciśnienie hydrauliczne) jest odzwierciedleniem naporu (ciśnienia) hydraulicznego w danym obszarze – węzeł monitorowania obszaru WMO;
- c) z każdym WMO związany jest pomiar ciśnienia;
- d) można określić wpływ poszczególnych elementów sterujących (pompa, zawór) na ciśnienie w WMO;
- e) można przypisać danemu WMO pompę, która ma wpływ na ciśnienie w tym węźle.

Wybrane zdarzenia wyróżnione przez OSW można przedstawić w następujący sposób:

1. **Przekroczenie ograniczeń na napór hydrauliczny w WMO** – przekroczone dolną lub górną wartość ograniczenia na napór w danym WMO.
2. **Przekroczenie ograniczeń na napór hydrauliczny w zbiorniku** – przekroczone dolną lub górną wartość ograniczenia na stan lustra wody w zbiorniku.
3. **Minimalizacja kosztów sterowania** – obniżanie kosztów energii elektrycznej.

Natomiast reakcje OSW na dane zdarzenie są następujące:

1. **Przekroczenie ograniczeń na napór hydrauliczny w WMO** – jeżeli przekroczone dolną/górną wartość ograniczenia, to należy podwyższyć/obniżyć prędkość obrotową pompy związanej z WMO, w którym nastąpiło przekroczenie ograniczenia.
2. **Przekroczenie ograniczeń na napór hydrauliczny w zbiorniku** – jeżeli przekroczone dolną/górną wartość ograniczenia, to należy podwyższyć/obniżyć prędkość obrotową pompy związanej ze zbiornikiem, w którym nastąpiło przekroczenie ograniczenia.
3. **Minimalizacja kosztów sterowania** – w chwilach czasu, gdy koszt sterowania jest niski/wysoki zwiększyć/zmniejszyć prędkość obrotową pomp.

Bazując na powyższych założeniach, wyróżnionych zdarzeniach oraz reakcjach OSW w rozprawie przedstawiono dwa zbiory operatorów: specjalizowane operatory genetyczne (SOG) i dedykowane operatory genetyczne dla SW Chojnice (DOGChojnice). Specjalizowane operatory genetyczne bazują na ogólnych założeniach i zdarzeniach przedstawionych przez OSW, które mogą być zastosowane również do innych SW. Natomiast DOGChojnice wykorzystują specyficzne cechy PSSW Chojnice i stanowią dostosowanie SOG do specyfiki PSSW Chojnice. Dostosowanie polega na uszczegółowieniu i precyzyjnym powiązaniu wyróżnionych w systemie elementów ze sobą oraz uwzględnieniu powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami sterującymi (pompy).

d) Badania testowe algorytmu rozwiązywania zadania wyznaczania optymalizującego sterowania hydrauliką SW dla przykładowych SW

W celu wykazania efektywności działania SOG i DOG Chojnice oraz efektywności zaproponowanego optymalizatora przeprowadzono dwa eksperymenty:

- 1) *Eksperyment 1* - miał na celu wyznaczenie najlepszych kombinacji operatorów genetycznych i polegał na porównaniu średnich wartości funkcji przystosowania AG dla różnych kombinacji operatorów genetycznych (mutacji i krzyżowania);
- 2) *Eksperyment 2* - miał na celu wyznaczenie wielkości populacji AG (liczby osobników) biorąc pod uwagę sumaryczne koszty sterowania (suma z całego horyzontu sterowania) oraz średni czas obliczeń.

Wyniki *Eksperymentu 1*- efektywność działania SOG i DOGChojnice

Na rysunku 3.4 przedstawiono średnią wartość funkcji przystosowania dla najlepszych osobników z danych populacji dla poszczególnych kombinacji operatorów genetycznych dla PSSW Chojnice.

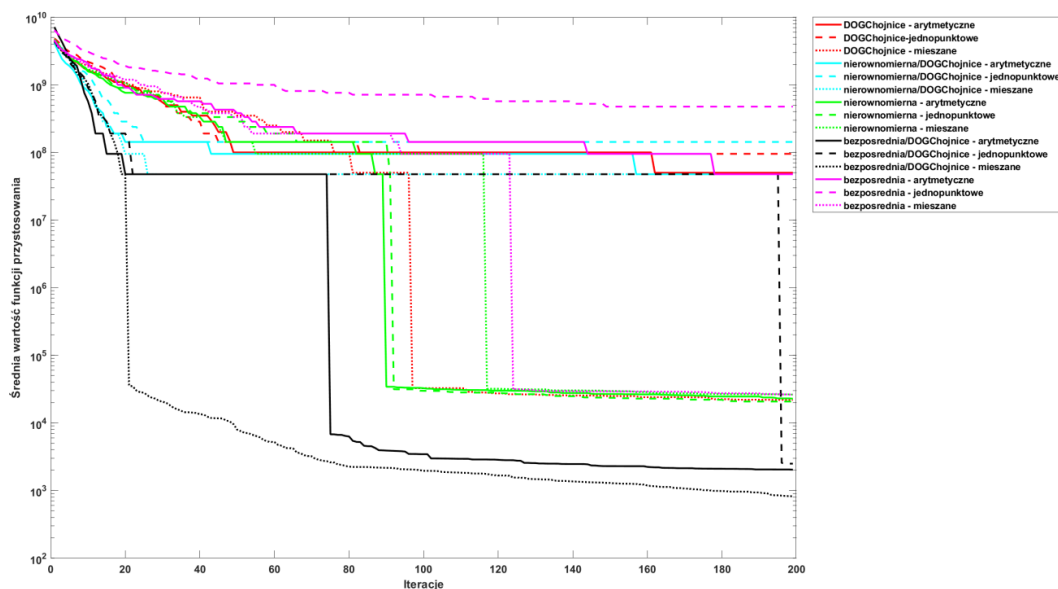
Wyniki symulacji (rysunek 3.4) wskazują na znaczne poprawienie średniej wartości funkcji przystosowania osobników dla przypadków, gdy zastosowano DOGChojnice.

Dla PSSW Chojnice najlepsze wyniki uzyskuje się dla operatorów (w nawiasie wartość średnia funkcji przystosowania w 200-tnej iteracji):

- mutacja bezpośrednia, DOGChojnice i krzyżowania „mieszane” (821);
- mutacja bezpośrednia, DOGChojnice i krzyżowania arytmetyczne (2032);
- mutacja bezpośrednia, DOGChojnice i krzyżowania jednopunktowe (2491).

Podsumowując:

- zastosowanie SOG/DOGChojnice w AG znacznie zwiększa efektywność działania AG;
- wybór najlepszej kombinacji operatorów krzyżowania i mutacji zależy od SW;
- najlepsza kombinacja dla rozważanych PSSW, to zastosowanie operatorów mutacji bezpośredniej i SOG/DOGChojnice oraz operatora krzyżowania „mieszane”.



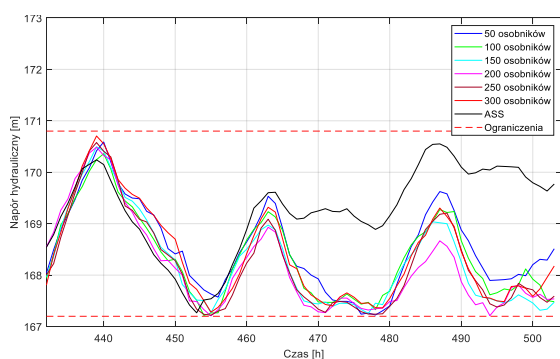
Rysunek 3.4 Średnia wartość funkcji przystosowania dla różnych kombinacji operatorów mutacji i krzyżowania na przykładzie PSSW Chojnice.

Wyniki Eksperymentu2 dla PSSW Chojnice

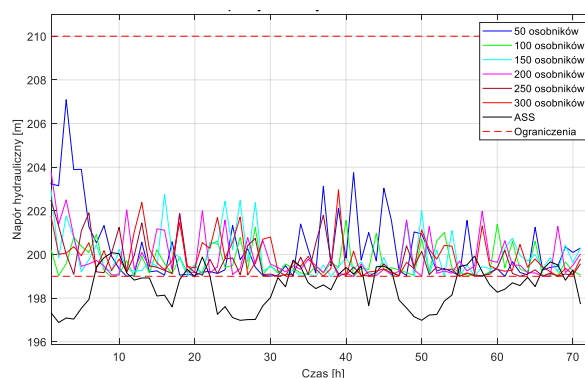
W tabeli 3.3 przedstawiono porównanie średnich czasów obliczeń przypadających na jeden krok symulacji oraz kosztów sterowania pompami dla różnej liczby osobników wraz z oszacowaniem aktualnego sposobu sterowania (ASS) SW Chojnice.

Tabela 3.3 Porównanie kosztów sterowania oraz średniego czasu obliczeń dla różnej liczby osobników dla PSSW Chojnice oraz rzeczywistego kosztu sterowania SW Chojnice ($H_s = 720$ godz.).

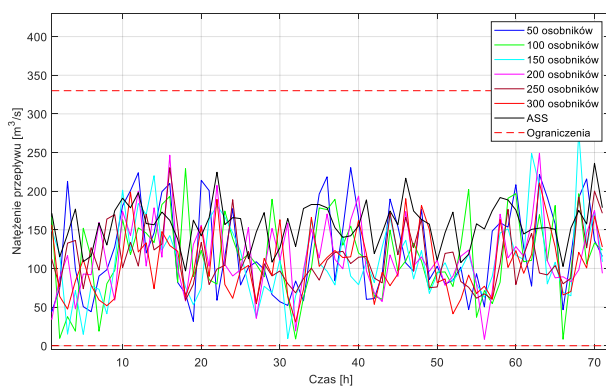
Liczba osobników w populacji	Średni czas obliczeń przypadający na jeden krok symulacji	Koszty sterowania [zł]
50	2 min 42 s	14409
100	5 min 45 s	13760
150	7 min 32 s	13644
200	11 min 56 s	13760
250	12 min 12 s	13800
300	14 min 51 s	13800
ASS	-	14794



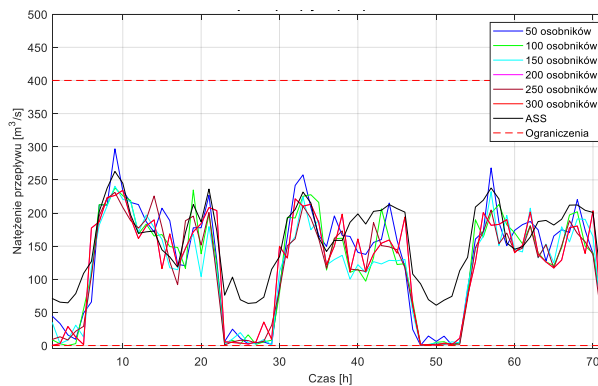
Rysunek 3.5a Porównanie naporu hydraulicznego w zbiorniku „Karolewo” dla różnej liczby osobników oraz ASS dla PSSW Chojnice na horyzoncie czasu od 432 do 504 godz..



Rysunek 3.5b Porównanie naporu hydraulicznego w WMO „Niebieski” dla różnej liczby osobników oraz ASS dla PSSW Chojnice na horyzoncie czasu od 1 do 72 godz..



Rysunek 3.5c Porównanie natężenia przepływu dla różnej liczby osobników oraz ASS dla PSSW Chojnice na horyzoncie czasu od 1 do 72 godz., dla pompy „Funka”.



Rysunek 3.5.d Porównanie natężenia przepływu dla różnej liczby osobników oraz ASS dla PSSW Chojnice na horyzoncie czasu od 1 do 72 godz., dla pompy „Karolewo”.

Wnioski - efektywność działania algorytmu OSPHSW dla różnej liczby osobników populacji – przypadek PSSW Chojnice

1. W wyniku zastosowania przedstawionego w rozprawie algorytmu, można w skali 720 godzin (30 dni) symulacji zmniejszyć sumaryczne koszty sterowania pompami od 432 zł (7,8%) do 696 zł (11,5%) w stosunku do ASS SW Chojnice.
2. W rozprawie do dalszych badań wybrano AG z liczbą osobników 50. Przy jego wyborze głównie zwrócono uwagę na czas obliczeń. Wynika to z faktu, iż algorytmem jest podstawą do budowy algorytmu krzepko dopuszczalnego sterowania. Będzie on musiał być rozbudowany o kolejne elementy (krzepką predykcję) co spowoduje zwiększenie czasu obliczeń. Na tym etapie nie jest możliwe przewidzenie jaki będzie czas obliczeń dla rozbudowanego algorytmu i czy będzie on przekraczał granice 1 godziny – kroku hydrauliki. Czas obliczeń ma znaczenie w kontekście, użycie tego algorytmu w schemacie działania MPC. Czas obliczeń musi być mniejszy niż krok hydrauliki, gdyż konieczne jest wygenerowanie sterowania na kolejny krok.
3. W rozprawie wykazano, że można uzyskać lepsze sterowanie SW od rzeczywistego przy jednostce obliczeniowej średniej klasy i stosunkowo niewielkim nakładzie obliczeniowym (w porównaniu z AG z liczbą osobników 100, 150, 200, 250 i 300).
4. Wykorzystując, przedstawiony w tym rozdziale, algorytm spełnione są wszystkie ograniczenia wyjść i sterowań PSSW Chojnice co dla rzeczywistego sterowania nie jest zawsze spełnione.

3.5.3 Bezpośredni algorytm wyznaczania optymalnego krzepko dopuszczalnego sterowania (Algorytm II)

Istotnym problemem algorytmu przedstawionego w poprzednim rozdziale jest złożoność metody generacji stref bezpieczeństwa. Stąd w niniejszym rozdziale proponuje się algorytm rozwiązujący zadanie (3.1) bezpośrednio wykorzystując informację o przekroczeniu oryginalnych ograniczeń przez trajektorie graniczne wyjścia w trakcie wyznaczania sterowania.

a) Propozycja bezpośredniego algorytmu wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydraulika SW

W rozprawie, do rozwiązania zadania optymalizacji (3.1) proponuje się dwuetapowy algorytm. W pierwszym etapie wyznacza się optymalne sterowanie \mathbf{u}^* , wykorzystując nominalny model systemu – rozwiązanie zadania optymalizacji (3.15). W drugim etapie bazując na wyznaczonym w pierwszym etapie rozwiązaniu \mathbf{u}^* , wyznacza się optymalizujące krzepko dopuszczalne sterowanie \mathbf{u}^{**} .

W drugim Etapie wykorzystuje się analogiczną strukturę jak w Etapie I ale wymiana informacji następuje pomiędzy AG a algorytmem krzepkiej predykcji wyjść SW. Aby można było wykorzystać, prezentowany AG do „współpracy” z algorytmem krzepkiej predykcji konieczne jest m.in. zmodyfikowanie funkcji przystosowania osobnika w AG do postaci:

$$J_k(\mathbf{u}(\Xi_u/t_n), \bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p/t_n)) + J_k^{przedzial}(\mathbf{u}(\Xi_u/t_n), \bar{\mathbf{y}}_p(\Xi_p/t_n)) \quad (3.18)$$

gdzie $J_k^{przedzial}$ - funkcja kary za naruszenie zmodyfikowanych ograniczeń wyjść systemu zadania (4.13), a funkcja kary jest ważona sumą sześciu składników w postaci:

$$J_k^{przedzial} = w_1 \cdot J_{model} + w_2 \cdot J_h^{przedzial} + w_3 \cdot J_{\Delta h}^{przedzial} + w_4 \cdot J_z^{przedzial} + w_5 \cdot J_{\Delta z}^{przedzial} + w_6 \cdot J_q^{przedzial} \quad (3.19)$$

Poszczególne składniki funkcji (3.19) mają analogiczną postać jak dla funkcji (3.16) z tym, że odnoszą się do trajektorii granicznych a nie trajektorii nominalnej wyjść SW.

b) Wyniki działania algorytmów wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW

W celu przedstawienia efektywności działania przedstawionych w tym rozdziale dwóch algorytmów wyznaczania krzepko dopuszczalnego sterowania porównano: średni czas wyznaczania sterowania dla jednego kroku symulacji oraz sumaryczny koszt sterowania dla różnych wielkości populacji AG. Dodatkowo sprawdzono liczbę czasów wyznaczania sterowania większych niż 60 minut dla PSSW Chojnice. Porównania zostały wykonane wykorzystując symulacje przedstawionych algorytmów z wykorzystaniem PSSW Mała i PSSW Chojnice.

W tabelach od 3.4 do 3.6 przedstawiono porównanie średniego czasu obliczeń oraz kosztów sterowania algorytmu wykorzystującego model punktowy SW oraz algorytmów wyznaczających optymalizujące krzepko dopuszczalne sterowanie (Algorytm I i Algorytm II) dla PSSW Mała i PSSW Chojnice.

Tabela 3.4 Porównanie średniego czasu obliczeń przypadającego na jeden krok symulacji dla proponowanych algorytmów sterowania dla PSSW Chojnice ($H=720$ godz.).

Algorytm	Średni czas obliczeń przypadający na jeden krok symulacji					
	Liczba osobników					
	50	100	150	200	250	300
OSHSW*	2 min 42 s	2 min 45 s	7 min 32 s	11 min 56 s	12 min 12 s	14 min 51 s
Algorytm I	8 min 46 s	10 min 35 s	12 min 54 s	16 min 1 s	20 min 14 s	23 min 56 s
Algorytm II	10 min 46 s	13 min 16 s	16 min 18 s	21 min 1 s	26 min 14 s	30 min 20 s

Tabela 3.5 Porównanie kosztów sterowania na cały horyzont symulacji dla proponowanych algorytmów sterowania dla PSSW Chojnice ($H=720$ godz.).

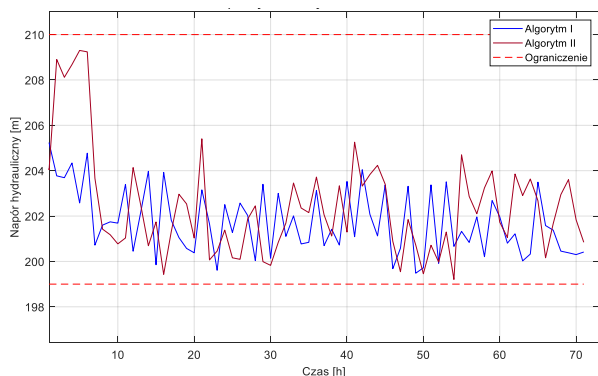
Algorytm	Koszty sterowania w zł					
	Liczba osobników					
	50	100	150	200	250	300
OSHSW	14 409	13 760	13 644	13 760	13 800	13 800
Algorytm I	16 123	14 671	14 793	14 033	14 037	14 423
Algorytm II	17 126	16 852	16 742	16 938	16 863	17 003
ASS	14 794					

Dla PSSW Chojnice istotnym aspektem algorytmu wyznaczania sterowania jest czas obliczeń (poniżej 60 min), stąd w tabeli 3.7 przedstawiono czasy obliczeń dla poszczególnych kroków symulacji dla prezentowanych algorytmów.

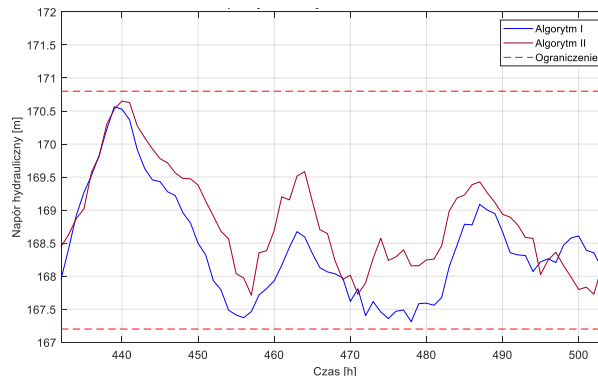
Tabela 3.6 Porównanie liczby przekroczeń czasu obliczeń granicy 60 min.

Algorytm	Liczba przekroczeń czasu obliczeń (>60 min)					
	Liczba osobników					
	50	100	150	200	250	300
OSHSW	0	0	0	0	0	0
Algorytm I	4	4	6	10	20	23
Algorytm II	2	8	12	35	32	54

Na rysunkach 3.6a-b porównano przebiegi trajektorii: poziomów lustra wody w zbiorniku oraz naporów w WMO „Niebieski” dla PSSW Chojnice.



Rysunek 3.6a Porównanie trajektorii naporu hydraulicznego w WMO „Niebieski” wyznaczone przez Algoritm I i II dla PSSW Chojnice, na horyzoncie od godziny 0 do 72 dla wielkości populacji 50 osobników.



Rysunek 3.6b Porównanie trajektorii naporu hydraulicznego w zbiorniku „Karolewo” wyznaczone przez Algoritm I i II dla PSSW Chojnice, na horyzoncie od godziny 432 do 504 dla wielkości populacji 50 osobników.

Wnioski

Porównując czas obliczeń (tabela 3.4) dla zaproponowanych algorytmów wyznaczających krzepkie sterowanie z algorytmem OSHSW należy stwierdzić, że nastąpił wzrost czasu obliczeń. Dla Algorytmu I wynika, to z konieczności kilkukrotnego wyznaczenia sterowania dla różnych propozycji stref bezpieczeństwa. Natomiast dla Algorytmu II związane jest to z koniecznością wyznaczania trajektorii granicznych wyjść systemu dla poszczególnych osobników w momencie gdy algorytm przejdzie do drugiego etapu obliczeń.

Podobnie jak dla czasów obliczeń, koszt sterowania także wzrósł (tabela 3.5). Wynika, to głównie z konieczności podniesienia ciśnienia w WMO w celu zniwelowania wpływu niepewności na sterowanie. Podniesienie to wymuszone jest m. in. przez strefy bezpieczeństwa (Algorytm I) albo trajektorie graniczne (Algorytm II).

Duża średnia wartość czasu obliczeń Algorytmu II (tabela 3.4), wynika z istoty działania tego algorytmu. Przejściem algorytmu do Etapu 2 powoduje znaczny wzrost czasu obliczeń wynikający z czasu wyznaczania funkcji przystosowania pojedynczego osobnika.

Porównując czasy obliczeń oraz koszty wyznaczonego sterowania (tabele 3.5 - 3.6) wynika, że Algorytm I w krótszym czasie i z mniejszym kosztem sterowania, wyznacza krzepko dopuszczalne sterowanie w porównaniu z Algorytmem II. Liczba przekroczeń czasu obliczeń dla Algorytmu I jest także mniejsza.

3.5.4 Wnioski ogólne

1. Sterowanie optymalizujące krzepko dopuszczalne jest sterowaniem kosztowniejszym w porównaniu ze sterowaniem optymalizującym. Wynika, to z:
 - a) zwiększenia naporu w WMO oraz pośrednio w pozostałych węzłach systemu,
 - b) zmniejszenia i zwiększenia (zawężenia ograniczeń) naporu w zbiornikach i braku możliwości wykorzystania zbiornika w pełnym zakresie działania.
2. Przedstawione dwa algorytmy wyznaczające krzepko dopuszczalne sterowanie są algorytmami stabilnymi. Stabilność algorytmu wykorzystującego strefy bezpieczeństwa wynika ze stabilności algorytmu złotego podziału. Natomiast stabilność algorytmu wykorzystującego bezpośrednio krzepką predykcję wynika ze stabilności algorytmu genetycznego.
3. Algorytm II jest prostszy w implementacji oraz łatwiejszy w zrozumieniu jego działania.
4. Efektywność przedstawionych algorytmów zależy od efektywności optymalizatora.
5. Dwa przedstawione algorytmy wyznaczające krzepko dopuszczalne sterowanie mogą być implementowane do sterowania rzeczywistym obiektem sterowania.

-
6. Przedstawione w rozprawie algorytmy optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW wykazują porównywalne lub większe koszty sterowania SW. Jednakże, wyznaczone w ten sposób sterowanie gwarantuje, że go zastosowanie w rzeczywistym systemie nie spowoduje przekroczeń zakładanych ograniczeń wyjść systemu.
 7. Wybór najlepszego z prezentowanych, algorytmów nie jest sprawą prostą. Na ten wybór mają głównie wpływ trzy czynniki: czas obliczeń, koszty wygenerowanego sterowania oraz liczba przekroczeń maksymalnego czasu obliczeń (60 min.). Analizując tabele 3.4-3.6 najlepszym algorytmem jest Algorytm I z populacją o wielkości 200 osobników. Wybór ten wynika z następujących faktów:
 - a) w przeprowadzonych badaniach, dla badanych PSSW, algorytm ten uzyskał najniższe koszty sterowania,
 - b) czas obliczeń, dla tego algorytmu jest znacznie poniżej zakładanej granicy,
 - c) przekroczenie czasu obliczeń jest równe 10 co stanowi zaledwie 1,4%.

3.6 Zakończenie

System wodociągowy należy do systemów rozległych o skomplikowanej strukturze. Sterowanie takim systemem jest zagadnieniem złożonym zarówno pod względem logistycznym (powiązania pomiędzy poszczególnymi elementami systemu) jak i technicznym (różnego rodzaju informacje podawane w różnej formie). Sposoby sterowania takim systemem, najczęściej opierają swoje działanie na wiedzy operatora o tym systemie. Taki sposób podejścia do sterowania systemem wodociągowym jest prosty, jednakże najczęściej nie uwzględnia aspektów ekonomicznych sterowania w skali całego systemu mimo spełnienia ograniczeń systemu.

Przedstawione w rozprawie rozważania poparte badaniami oraz analizą uzyskanych wyników symulacyjnych, dostarczają szeregu argumentów na słuszność postawionej w rozprawie tezy. Zdaniem autora postawiona w niniejszej rozprawie teza, przedstawiona w rozdziale 1, została udowodniona.

Oryginalny wkład autora do dziedziny Automatyka i robotyka stanowi:

- ✓ sformułowanie zadania wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW;
- ✓ opracowanie specjalizowanych i specyfikowanych operatorów genetycznych;
- ✓ opracowanie i implementacja algorytmu krzepkiej predykcji wyjść hydrauliką SW;
- ✓ opracowanie i implementacja dwóch algorytmów wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania hydrauliką SW.

Kierunek dalszych badań

W wyniku prowadzonych w rozprawie rozważań oraz licznych badań przeprowadzonych przez autora można wskazać możliwe kierunki dalszych prac, stanowiących naturalne rozwinięcie zawartych w niej zagadnień. Najważniejsze z nich to:

- Dalsze badania zwiększające efektywność algorytmu wyznaczania optymalizującego sterowania, a w szczególności parametrów algorytmu genetycznego.
- Wykorzystanie nowych technologii do przyspieszenia działania AG, a w szczególności wielowątkowości procesorów komputerowych.
- Budowa nowych operatorów genetycznych wiążących nie tylko pompy i napór w WMO, ale inne specyficzne parametry i elementy SW.
- Implementacja specjalizowanych operatorów genetycznych do innych (niż opisane w rozprawie) SW.
- Wykorzystanie sieci neuronowych do generowania krzepkich trajektorii granicznych.

-
- Zastosowanie arytmetyki przedziałowej do generowania krzepkich trajektorii wyjść oraz optymalizacji przedziałowej do wyznaczania optymalizującego krzepko dopuszczalnego sterowania.

3.7 Bibliografia

1. Arabas J. (2004) *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa.
2. Boulos P., Lansey K., Karney B. (2006) *Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners*, MWH Soft.
3. Brdys M. A., Chen K. (1994) *Joint state and parameter estimation of dynamic water supply system under bounded uncertainty using geometric programming*, *SYSID 94 10th IFAC Symposium on System Identification*, 3, 331 - 336 (Publication No. 000601)
4. Brdys M.A., Chang T., Duzinkiewicz K. and Chotkowski W. (2000) *Hierarchical control of integrated quality and quantity in water distribution systems*, Proc. of the A.S.C.E. 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis, Minnesota, July 30-August 2.
5. Brdys M.A., Chang T. (2002) *Robust model predictive control under output constraints*, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain.
6. Brdys M. A., Duzinkiewicz K., Grochowski M., Rutkowski T. (2001a) *Robust estimation of variables and parameters in dynamic water distribution systems*, Proc. of the 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory & Applications, Bucharest, July 18-20, 2001.
7. Brdys M.A., Duzinkiewicz K., Tarnawski J., Trawicki D. (2001b) *Two-layer control of integrated quality and quantity in dynamic water distribution systems*, Proc. of the 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale Systems: Theory & Applications, Bucharest, July 18-20, 2001.
8. Chang T., Brdys M.A., Duzinkiewicz K. (2003) *Quantifying uncertainties for chlorine Residual Control in drinking water distribution systems*, Proc. of the 6th ASCE Annual Water Distribution Systems Analysis, 2003 World Water and Environmental Resources Congress, Philadelphia, Pennsylvania, June 23-26, 2003.
9. Chen, K. (1997) *Set Membership Estimation of State and Parameters and Operational Control of Integrated Quantity and Quality Models of Water Supply and Distribution Systems*, PhD Thesis, University of Birmingham.
10. Duzinkiewicz K. (2005) *Zintegrowane sterowanie systemami zaopatrzenia w wodę pitną*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo – Dydaktyczne, Rozprawy, Monografie, Kraków 2005 (ISSN 0867-6631).
11. Duzinkiewicz, K., Brdys, M. A., Chang, T. (2005). *Hierarchical model predictive control of integrated quality and quantity in drinking water distribution systems*. *Urban Water Journal*, 2(2), 125-137.
12. Findeisen W. (1997) *Struktury sterowania dla złożonych procesów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
13. Rossman L.A. (2000) *EPANET 2 Users manual*, United States Environment Protection Agency, Cincinnati.
14. Sysło M.M., Deo N., Kowalik J.S. (1999) *Algorytmy optymalizacji dyskretnej z programami w języku Pascal*. PWN, Warszawa 1999.
15. Tatjewski P. (2002). *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
16. Trawicki D. (2004) *Struktury i algorytmy wspomaganie decyzji i sterowania w systemach produkcji i dystrybucji wody*, Politechnika Gdańska Rozprawa doktorska.
17. Walski T. M., Chase D. V., Savic D. A., Grayman W., Beckwith S., Koelle, E. (2009) *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Haestad Methods, Inc.

4. Wykaz publikacji autora rozprawy

1. Brdyś M. A., Cimiński A., Drewa M., Kurek W. (2008) *Sterowanie predykcyjne hydrauliką i jakością wody w SW*, Wodociągi - Kanalizacja: teoria, praktyka, zarządzanie. - 2008, nr 11 = 57.
2. Cimiński A., Duzinkiewicz K. (2009) *Specialized genetic operators in drinking water distribution systems control*. Evolutionary computation and global optimization 2009 : June 1st - 3rd, 2009 Zawoja, Poland, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009. – Prace Naukowe, Politechnika Warszawska.
3. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2010a) *Optimized robust model predictive control - application to drinking water distribution systems hydraulics*. Large Scale Complex Systems Theory and Applications. Vol.9, part. 1 / ed. P. Borne, G Florin. – Wielka Brytania : IFAC Publisher, 2010. - S. 1-6 [pdf]. 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications 2010, France, 12.07.2010-14.07.2010. - ISBN 978-3-902661-91-3.
4. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2010b) *Optimized robust model predictive control - application to drinking water distribution systems hydraulics*. 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Villeneuve d'Ascq, France, 12.07.2010 - 14.07.2010 [dokument elektroniczny, dane tekstowe], - Villeneuve d'Ascq : Elsevier, 2010. - [płyta CD]. - S. 1-6 [pdf] - ISBN 978-2-915913-26-2.
5. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2011a) *Optymalizujące krzepkie sterowanie hydrauliką systemu wodociągowego*. XVII Krajowa Konferencja Automatyki: streszczenia referatów, Kielce–Cedzyna, 19–22.06.2011 / pod red. R. Dindorfa; Politechnika Świętokrzyska = Kielce University of Technology. - Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, 2011. - S. 5-6. - ISBN 978-83-88906-78-7.
6. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2011b) *Optymalizujące krzepkie sterowanie hydrauliką systemu wodociągowego*. Postępy automatyki i robotyki - Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2011. - S. 184-197: 4 Rysunek - Bibliogr. 9 poz. - ISBN 978-83-88906-49-7.
7. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2011c) *Optymalizujące krzepkie sterowanie hydrauliką systemu wodociągowego*, XVII Krajowa Konferencja Automatyki – KKA'2011, Kielce – Cedzyna 19-22.06.2011 r. / ed. R. Dindorfa - Kielce : Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2011. - S. 762-773.
8. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2015) *Robust output prediction of differential – algebraic systems – application to drinking water distribution system*, 21th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. Międzyzdroje, 2015, str. 124, ISBN 978-83-7518-756-4.
9. Cimiński A. i Duzinkiewicz K. (2017) *Direct algorithm for optimizing robust MPC of drinking water distribution systems hydraulics*, 23th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. Międzyzdroje, 2017, IEEE, 10.1109/MMAR.2017.8046790
10. Drewa M., Brdys M. A., Cimiński A. (2007) *Model Predictive Control of integrated quantity and quality in drinking water distribution systems*, DYCOPS 2007 [Dokument elektroniczny]: 8th International IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, June 04-06, 2007 Cankùn, Mexico : preprints. Vol. 3.
11. Duzinkiewicz K. i Cimiński A. (2005) *Modelowanie sieci wodociągowych – podejście do problemu szkieletyzacji*, XV Krajowa Konferencja Automatyki KKA 2005, Warszawa, 27-30 czerwca 2005. Tom 3.
12. Duzinkiewicz K. i Cimiński A. (2006) *Drinking water distribution system modelling - an approach to skeletonization ALSIS'06* [Dokument elektroniczny]: Proceedings of the 1st

IFAC Workshop on Applications of Large Scale Industrial Systems, August 30-31, 2006, Finland.

13. Duzinkiewicz K. i Cimiński A. (2008a) *Krzepko dopuszczalne sterowanie systemami wodociągowymi*, Sterowanie i automatyzacja: aktualne problemy i ich rozwiązania Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2008. - (Problemy Współczesnej Nauki. Sterowanie i Automatyzacja).
14. Duzinkiewicz K. i Cimiński A. (2008b) *Sekwencyjna estymacja zmiennych w systemach sieciowych z wykorzystaniem do systemów wodociągowych*. (Problemy Współczesnej Nauki. Sterowanie i Automatyzacja), Sterowanie i automatyzacja: aktualne problemy i ich rozwiązania. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT.
15. Głowacki J., Duzinkiewicz K., Cimiński A. (2008) *Łączna kalibracja profili poborów wody i parametrów modelu systemu wodociągowego*, Sterowanie i automatyzacja: aktualne problemy i ich rozwiązania (Problemy Współczesnej Nauki. Sterowanie i Automatyzacja),. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2008.
16. Głowacki J., Duzinkiewicz K., Cimiński A. (2007) *Kalibracja profili poborów wody w węzłach SW*, Wodociągi - Kanalizacja: teoria, praktyka, zarządzanie. - 2007, nr 12=46.