



**Agnieszka GENEROWICZ<sup>1</sup>**  
**Izabela ZIMOCH<sup>2</sup>**  
**Krzysztof GASKA<sup>3</sup>**  
**Józef CIUŁA<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Politechnika Krakowska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska  
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

<sup>2</sup>Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków  
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18

<sup>3</sup>Politechnika Śląska, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów  
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18

<sup>4</sup>Sądeckie Wodociągi Sp. z o.o.  
33-300 Nowy Sącz, ul. Wincentego Pola 22

## **ZINTEGROWANY SYSTEM WIELOWĄTKOWEGO, HIERARCHICZNEGO STEROWANIA PREDYKCYJNEGO SIECIAMI WODOCIĄGOWYMI Z WYKORZYSTANIEM RÓWNOLEGŁEJ ARCHITEKTURY OBLICZENIOWEJ**

### **A HIGH PERFORMANCE COMPUTING (HPC) BASED INTEGRATED MULTITHREADED MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) FOR WATER SUPPLY NETWORKS**

#### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono koncepcję inteligentnego systemu wielowątkowego, hierarchicznego sterowania predykcyjnego sieciami wodociągowymi z wykorzystaniem równoległej architektury obliczeniowej. Proponowane rozwiązanie pozwala na usprawnienie pracy operatorów eksploatujących sieć, projektantów sieci i kadry zarządzającej oraz usprawnienie i poprawę niezawodności funkcjonowania sieci.*

*Słowa kluczowe: modele predykcyjne (MPC), równoległa architektura obliczeniowa (HPC)*

#### *Summary*

*The paper presents the concept of intelligent multi-threaded system, hierarchical predictive control of water and sewage networks using parallel computing architecture. The MPC system aims to streamline and facilitate the work of network operator and water utility managers.*

*Keywords: model predictive control (MPC), high performance computing (HPC)*

## 1. Diagnoza rynku - identyfikacja potrzeb przedsiębiorstw sieciowych w zakresie zarządzania systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi

Poszukiwanie optymalnych rozwiązań technologicznych zarówno hard i soft (systemy informatyczne) w gospodarce wodno ściekowej wymaga specjalistycznej, dziedzinowej wiedzy, która przy wykorzystaniu zaawansowanych rozwiązań może stanowić kluczowy element w inteligentnych systemach ICT czasu rzeczywistego. Modelowanie numeryczne pozwala budować systemy oparte na wiedzy o skomplikowanych systemach, procesach i urządzeniach w stosunkowo krótkim czasie. Jest ono szczególnie istotne w kontekście optymalizacji procesów, wymagających złożonych obliczeń dla jednego przypadku (budowanie rzeczywistych modeli dla każdego z wariantów rozwiązania jest niemożliwe z przyczyn technicznych). Modele tego typu są wykorzystywane w każdej z inżynierii środowiska, począwszy od symulacji pojedynczych urządzeń do modeli technicznych i społecznych całych systemów dla regionu czy kraju.

Modele procesów czy systemów są zwykle opisywane przez równania różniczkowe cząstkowe opisujące zachowanie danego systemu. Złożoność obliczeniowa takich modeli algorytmicznych jest zwykle tak duża, że wymagane do ich rozwiązywania systemy informatyczne zmuszają inżynierów oprogramowania do sięgania po równoległą architekturę obliczeniową (parallel computing). Czasem nie jest znana dokładna natura problemu, o którym wiedzę czerpiemy jedynie z obserwacji, bądź wykorzystywane oprogramowanie narzuca określony sposób modelowania, który nie pozwala na wierne odtworzenie wszystkich niuansów rozważanego systemu [1, 14].

Alternatywnym rozwiązaniem, które może zostać zastosowane w takiej sytuacji, jest wykorzystanie zaawansowanych rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji (sztuczne sieci neuronowe, zbiory rozmyte, algorytmy genetyczne etc). W obszarze automatyki przemysłowej dostępnych jest wiele rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji, m.in. systemy inferencyjne, predykcyjne, adaptacyjne, które stanowią kluczowy element w zagadnieniach optymalnego sterowania procesami technologicznymi [6, 9, 10, 11].

W kompleksowej optymalizacji parametrów pracy procesów przemysłowych korzysta się obecnie z zaawansowanych algorytmów sterowania, w połączeniu z modelami predykcyjnymi czy adaptacyjnymi. Podstawowym celem w sterowaniu nowoczesnych urządzeń dla przemysłu, jest stabilizacja parametrów procesu technologicznego i utrzymanie równowagi w systemie zarządzania tym procesem, co sprzyja ograniczeniu występowania nagłych i znaczących zmian parametrów pracy.

Podczas projektowania nowego procesu technologicznego ważne jest sporządzenie listy uwarunkowań wyznaczających granice obszarom decyzji o sposobie prowadzenia tego procesu. Jednym z tych obszarów jest rozważenie wyboru zaawansowanej techniki regulacji. Wybór algorytmu PID, przewidującego regulatora z modelem lub innej metody, nie może być przesądzony, dopóki nie zostanie ocenione samo zadanie i nie zostaną ustalone uzasadnione cele, jakie ma osiągnąć nowo wdrażany system automatyki. Zlekceważenie tej podstawowej zasady narazi firmę na stratę sporych kwot oraz czasu.

Przy wyborze jednej z zaawansowanych metod regulacji najważniejsze są trzy zagadnienia: charakterystyki zmiennych procesu, operacyjne cele prowadzenia procesu, bezpieczeństwo systemu i jego użytkowania.

Jedną z podstaw prawidłowego zarządzania nowoczesnym przedsiębiorstwem wodociągowym jest posiadanie możliwie pełnej informacji o stanie technicznym sieci wodno-kanalizacyjnej. Podejmowanie prawidłowych decyzji wymaga uwzględnienia wielu czynników

występujących zarówno w danej chwili jak i okresach przyszłych. Naturalnym sposobem wspomagania tego typu działań jest stosowanie odpowiednich narzędzi informatycznych [2].

Rosnące wymagania odbiorców wody dotyczące zaopatrzenia w wodę o odpowiedniej jakości, ilości oraz pod odpowiednim ciśnieniem powodują konieczność ograniczenia bieżących kosztów i strat. Cztery podstawowe działania zmierzające w tym kierunku to:

- aktywna kontrola wycieków (ang. Active Leakage Control),
- zarządzanie ciśnieniem w sieciach wodociągowych (ang. Pressure Management),
- szybkość i jakość napraw (ang. Speed and Quality of Repairs),
- odnowa oraz wymiana rur i armatury (ang. Pipe Materials Management),
- optymalizacja gospodarki energetycznej w przedsiębiorstwie.

System wodociągowy oraz system odprowadzania i oczyszczania ścieków składa się z wielu obiektów wzajemnie od siebie zależnych m.in. ujęcia, stacje uzdatniania wody, pompownie wody, hydrofornie i sieci wodociągowe, oczyszczalnie ścieków, przepompownie ścieków i kolektory ściekowe. Sprawność i koszty działania tych systemów zależą od właściwego współdziałania wszystkich ich elementów oraz sterowania pracą urządzeń. Wprowadzenie w tych systemach modelu sterowania predykcyjnego pozwoli na uzyskanie wyższej efektywności procesów technologicznych oraz zmniejszenie kosztów działania systemów zarówno w obszarze finansowym jak i środowiskowym [12, 13, 15]. Proponowany system sterowania umożliwi integrację wszystkich dotychczas stosowanych narzędzi zarządzania. W przypadku systemu wodociągowego będą to następujące elementy:

- sterowanie procesem technologicznym uzdatniania wody poprzez optymalne wykorzystanie urządzeń SUW dostosowane do zmiennych rozbiorów wody, zapewniające minimalizację kosztów eksploatacji SUW przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności działania,
- sterowanie siecią wodociągową z wykorzystaniem istniejących (lub budową nowych) modeli hydraulicznych np. EPAnet zapewniające dostawę wody w odpowiedniej ilości z uwzględnieniem jakości wody pochodzącej z różnych źródeł w kontekście preferencji odbiorców,
- identyfikacja zarówno istniejących problemów technicznych na sieci wodociągowej jak i przewidywanie wystąpienia tych problemów w przyszłości, co pozwoli na optymalne prowadzenie prac remontowych i modernizacyjnych,
- identyfikacja miejsc powstawania strat wody zarówno z przyczyn technicznych jak i na skutek nielegalnych poborów wody,
- wizualizacja całego systemu wodociągowego w oprogramowaniu GIS z jednoczesną możliwością modyfikacji systemu w związku z wprowadzanymi zmianami oraz analizą przyszłych scenariuszy rozwoju systemu.

W przypadku systemu odbioru i oczyszczania ścieków zbiór elementów, których integracja nastąpi poprzez wprowadzenie systemu sterowania predykcyjnego są podobne:

- sterowanie procesem oczyszczania ścieków pozwalające na minimalizację kosztów oczyszczania, uwzględniające zmienność w czasie składu i ilości dopływających ścieków,
- uwzględnienie w procesie oczyszczania ścieków zmiennych warunków atmosferycznych i dostosowanie procesu oczyszczania do przewidywanej ilości i jakości ścieków,
- sterowanie siecią kanalizacyjną i jej urządzeniami w oparciu o model hydrauliczny, prowadzące do minimalizacji kosztów zużycia energii i optymalizacji pracy urządzeń sieciowych,

- identyfikacja odcinków sieci kanalizacyjnej, na których występuje wysoka infiltracja, co powoli na właściwe planowanie inwestycji odtworzeniowych na sieci,
- inwentaryzacja i wizualizacja sieci i urządzeń w systemie GIS, pozwalającym na planowanie rozbudowy sieci kanalizacyjnej z uwzględnieniem terenów, na których funkcjonowanie zbiorcze systemu kanalizacyjnego ma uzasadnienie ekonomiczne (realizacja scenariusza co jeśli?).

## 2. Koncepcja zintegrowanego systemu wielowątkowego, hierarchicznego sterowania predykcyjnego

Proponowany system oparty jest na predefiniowanym środowisku komponentowym ProWater Objects .NET będącego jedną z kategorii środowiska ProWaterEnterpriseSolutionFramework .NET (rozwiązanie autorskie). System klasy HPC (nVidia CUDA) działający w czasie rzeczywistym, to środowisko zorientowane komponentowo, z dziedziczną (dedykowaną) bazą wiedzy reprezentującą elementy składowe procesów technologicznych w obszarze zarządzania systemem wodociągowym i kanalizacyjnym, taktowanymi jako obiekty sterowania. Wszystkie zmienne związane z obsługiwanymi urządzeniami są bieżąco aktualizowane poprzez serwery OPC UA systemu monitoringu i sterowania. System ten tworzy platformę do działania zaawansowanych algorytmów, stanowiąc rodzaj interfejsu pomiędzy systemem sterowania i monitoringu a sterownikami PLC. Konfiguracja systemu zapewni stały monitoring połączeń komunikacyjnych oraz automatyczną reakcję systemu w przypadku wystąpienia awarii, nagłych zmian parametrów itp. W systemie mogą być ponadto uwzględnione kluczowe wskaźniki wydajności, a wszystkie obliczenia niezbędne do optymalnej pracy systemu prowadzone są w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu równoległej architektury obliczeniowej. Przedmiotowy system zaawansowanego sterowania wieloparametrowego składa się z głównego sterownika typu MPC oraz indywidualnych sterowników MPC dla każdego z urządzeń składowych [7,8].

System EnviroLab Enterprise Solution..ProWater implementuje się na wyższym poziomie nadzoru w celu manipulowania nastawami wielu pętli sterujących, w celu optymalizacji systemów kontroli i śledzenia zmian wartości zmiennych procesowych i jest oparty na modelowaniu przestrzeni stanu procesów. Model przestrzeni stanów służy do prognozowania wpływu w czasie niezależnych zmiennych wejściowych procesu – zarówno manipulowanych, jak antycypacyjnych – na zależne zmienne wyjściowe procesu – tak regulowane, jak i inne nieregulowane zmienne prognozowane. Model umożliwia uwzględnienie dynamiki procesu między zmianą zmiennych niezależnych a oczekiwanymi zmianami zmiennych zależnych. Algorytm optymalizacji prognozuje przyszły przebieg procesu i porównuje go z celami roboczymi procesu. Wewnętrznie algorytm oblicza też strategię przyszłych decyzji, zapisując w nastawach regulatorów niższego poziomu tylko bieżące zmiany. Ten wieloetapowy proces obliczeniowy, powtarzany przy każdym wykonaniu, umożliwia sterownikowi planowanie z wyprzedzeniem w celu zapewnienia optymalnej dynamicznej kontroli regulowanych zmiennych procesowych. EnviroLab.ProWater zapewnia elastyczność podejścia do kombinacji celów kontrolowania nastaw i kontrolowania ograniczeń zmienności dla wielu zmiennych. Każda regulowana zmienna procesowa może zawierać wartość docelową nastawy i/lub wartości ograniczające (granice można definiować jako absolutne wartości minimalne/maksymalne lub minimalne/maksymalne odchylenia od nastawy wartości zadanej).

Jednym z głównych zadań, będzie opracowanie zaawansowanych algorytmów sterowania predykcyjnego (MPC – Model Predictive Control), adaptacyjnego (APC) i inferencyjnego, które będą zapewniały:

- znaczną redukcję kosztów eksploatacji oraz uzyskanie wyższej stabilności parametrów pracy, niż przy zastosowaniu klasycznych regulatorów PID,
- skrócenie czasu na diagnozę i analizę procesów i tym samym szybką reakcję na zakłócenia i niepożądane stany pracy – poprzez analizę przestrzeni stanów,
- szybką reakcję na nieznanne zdarzenia (sygnały zakłócające) destabilizujące przebieg procesu technologicznego dzięki wykorzystaniu środowiska EnviroLab Enterprise Solution, z dedykowanymi rozwiązaniami klasy HPC (High Performance Computing), tj. zaawansowanymi modelami sterowania predykcyjnego MPC oraz adaptacyjnego i inferencyjnego i tym samym zapewnienie stabilizacji i optymalnych parametrów pracy urządzeń,
- znaczne skrócenie procesu projektowania czy modyfikacje systemów wizualizacji i sterowania procesami przez zastosowanie środowiska komponentowego RAD.NEnviroT
- znaczną redukcję błędów modelowania procesów, dzięki autorskim innowacyjnym rozwiązaniom (predefiniowana biblioteka .NEnviroT inteligentnych komponentów czasu rzeczywistego – modeli procesów, obiektów, zdarzeń), oznaczającą, że wszystkie jednostki procesowe mogą być dokładnie modelowane i zoptymalizowane, wspierając planowanie i maksymalizację zysków,
- szybkie dostosowanie strategii działania sterowników do celów ekonomicznych i ekologicznych, przez zastosowanie innowacyjnej technologii w oprogramowaniu ProWater Enterprise Solution pozwala użytkownikom szybko dostosować się do zmieniających się scenariuszy ekonomicznych, ułatwiając projektowanie i utrzymanie sterownika,
- znaczny wzrost wydajności systemu dzięki wykorzystaniu architektury 64 bitowej,
- optymalizacja bazy wiedzy w czasie rzeczywistym na podstawie danych procesowych, obliczeniowych oraz laboratoryjnych,
- API do C++, Javy oraz .NET do indywidualnych adapterów i bezpośredniej integracji,
- wykorzystanie technologii Complex Event Processing (kompleksowe przetwarzanie zdarzeń,)

### 3. Architektura - topologia systemu

Sterowanie w strukturze hierarchicznej stanowi efektywny sposób sterowania złożonymi systemami sterowania.

W systemie hierarchicznym następuje dekompozycja systemu na oddzielne podsystemy lub ogniwa, z autonomicznymi zasadami przetwarzania informacji i podejmowania decyzji.

Do głównych powodów stosowania tych struktur sterowania zalicza się:

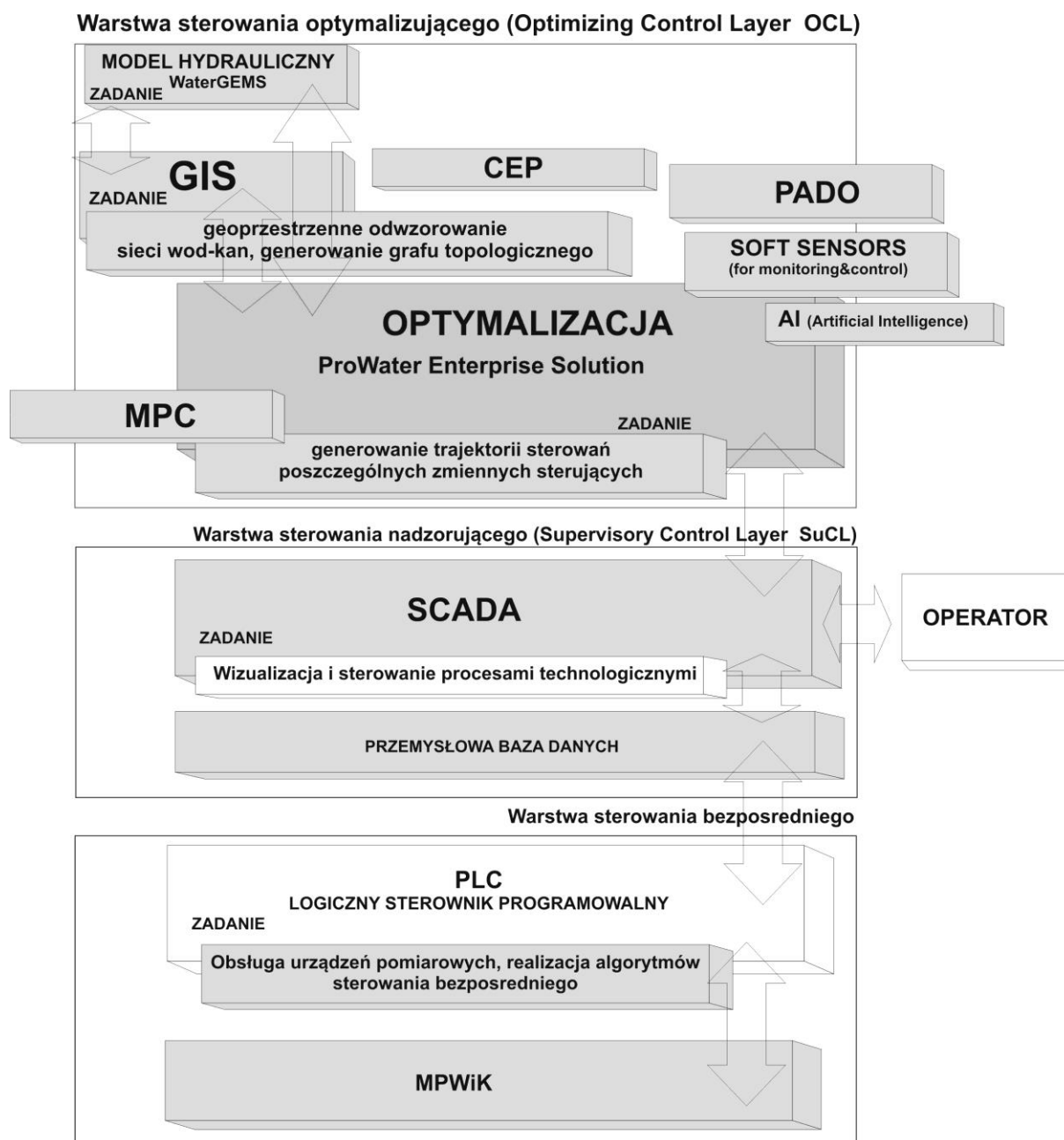
- możliwość dekompozycji złożonego problemu decyzyjnego, o dużej liczbie współrzędnych, najczęściej trudnego rozwiązania, na kilka mniejszych, prostszych problemów decyzyjnych, o mniejszej liczbie współrzędnych stanu (mniejsza przestrzeń stanów), rozwiązywanych sekwencyjnie lub równolegle,
- wzrost elastyczności i przejrzystości z modułami łatwiejszymi do modyfikacji i wykrywania ewentualnych błędów,

- krócenie czasu obliczeń (mniejsza złożoność czasowa algorytmów), dzięki zastosowaniu równoległej architektury obliczeniowej (paralell computing),
- wzrost pewności i niezawodności działania systemu sterowania.

Struktura hierarchicznego systemu (rys. 1.) sterowania składa się z warstw głównych (Nadzorująca, Optymalizująca, i Nadążająca) i podwarstw (wolna, średnia i szybka). Warstwa wyższa generuje sterowania i decyzje pomagające warstwie niższej w realizacji jej zadań. Podział na warstwy wynika z dekompozycji funkcjonalnej systemu sterowania, zaś podział na podwarstwy jest rezultatem dekompozycji dynamiki systemu w skali czasu. Ponadto wykorzystuje się w niej dostępne informacje o systemie o jego dynamice i wzajemnych relacjach pomiędzy jego poszczególnymi elementami (baza wiedzy o obiektach sterowania).

*Rys. 1. Topologia Systemu*

*Fig 1. System topology*



Warstwa sterowania nadzorującego (Supervisory Control Layer – SuCL) ma zadanie koordynację poszczególnych elementów struktury sterowania systemem wod-kan, ocenę stanu operacyjnego tego systemu oraz wybór najlepszej trajektorii sterowania. Obserwacja bieżących wyników sterowania i porównanie ich z prognozą umożliwia podjęcie decyzji o ewentualnej zmianie strategii sterowania. Stąd też jednym z ważnych zadań tej warstwy jest przełączanie między strategiami sterowania.

Warstwa sterowania optymalizującego (Optimizing Control Layer – OCL) odpowiada za generowanie trajektorii sterowań poszczególnych zmiennych sterujących. Wykorzystywana jest tutaj technologia MPC – Model Sterowania Predykcyjnego. Warstwa ta wyznacza trajektorie wartości zadanych dla warstwy najniższej.

Warstwa sterowania nadążającego (Follow Up Control Layer – FCL) jest warstwą najniższą i odpowiada za bezpieczne prowadzenie procesów na obiekcie, zgodnie z wyznaczonymi w warstwie wyższej trajektoriami sterowania. Ma ona bezpośredni dostęp do obiektu

sterowanego i może realizować, opracowane w wyższych warstwach strategii sterowania. Zadania te realizują algorytmy bezpośredniej regulacji w postaci klasycznych algorytmów PID lub algorytmy zapisane w pamięci logicznych sterowników programowalnych typu PLC).

OCL dzieli się na trzy podwarstwy (wolna, średnia i szybka) odpowiadające różnej dynamice procesów technologicznych w systemie wodociągowym i dynamice wejść zakłócających. Podstawowe zadania wolnej podwarstwy sterowania polegają na wyznaczeniu trajektorii ciśnień, przepływów.

Średnia podwarstwa sterowania generuje trajektorie zmiennych wyjściowych sterujących procesem sterowania, przy wykorzystaniu modelu MPC w pełnym zakresie pracy systemu wodociągowego (kanalizacyjnego).

Zadaniem szybkiej podwarstwy sterowania jest wymuszenie na obiekcie trajektorii sterowań, wyznaczonych przez średnią podwarstwę sterowania. Podwarstwa ta odpowiada za spełnianie wymagań związanych z wartościami wejść sterujących systemem przy równoczesnej minimalizacji zużycia energii elektrycznej.

Działanie algorytmów predykcyjnych MPC opiera się na wykorzystaniu wiedzy o przyszłym zachowaniu się wielkości regulowanej w celu wyznaczenia wartości zmiennych sterujących. Przewidując przyszłe wartości parametrów regulowanych korzysta się z modelu matematycznego obiektu sterowania (model obiektu sterowania), wcześniejszych wartości sygnału sterującego oraz wartości sygnałów zakłócających (przeszłych, teraźniejszych i ewentualnie przyszłych). Podstawowe zalety sterowania predykcyjnego:

- możliwość stosowania zarówno dla obiektów /procesów liniowych i nieliniowych,
- budowa układów sterowania typu SISO (Single Input Single Output) i MIMO (Multiple Input Multiple Output),
- uwzględnienie ograniczeń zmiennych procesowych,
- uwzględnienie wewnętrznych interakcji w obiekcie sterowania dzięki wykorzystaniu modelu obiektu (regulator poprzez model obiektu sterowania ma wiedzę o obiekcie),
- uwzględnienie zmiennych opóźnień czasowych obiektów sterowania,
- optymalizacja wskaźników ekonomicznych związanych ze sterowaniem [10].

Algorytm MPC uwzględnia bezpośrednio różnego typu ograniczenia:

- ograniczenia wartości zmiennych sterujących,
- ograniczenia przyrostów wartości zmiennych sterujących,
- ograniczenia zmiennych wyjściowych,
- ograniczenia zmiennych technologicznych, które są formułowane analogicznie do ograniczeń na zmienne wyjściowe.

Implementacja zaawansowanych metod hierarchicznego sterowania predykcyjnego w systemie rzeczywistym wymaga w niektórych rozwiązaniach, przeprowadzenia zmian istniejącego układu pomiarowego i/lub sprzętowo-programowego oraz dopasowania infrastruktury ICT.

Implementacja nowego sposobu sterowania wymaga odpowiedniej konfiguracji systemu automatyki. Zakłada się wprowadzenie systemu hierarchicznego o strukturze trójwarstwowej. Warstwa sterowania bezpośredniego będzie służyła do sterowania urządzeniami wykonawczymi w systemie wodociągowym, warstwa sterowania nadzorującego, będzie odpowiadała za nadzór i akwizycję danych a trzecia z warstw – warstwa sterowania optymalizującego, będzie składała się z dodatkowej jednostki komputerowej, realizującej złożone algorytmy sterowania predykcyjnego w równoległej architekturze obliczeniowej (nVidia CUDA) z wykorzystaniem specjalistycznych aplikacji naukowych (Matlab/Simulink, PADO, CEP, Neurosolution), w tym zaawansowanych rozwiązań autorskich.



Proponowana architektura ICT obejmuje kilka jednostek PC, w tym jednostki o zwiększonej mocy obliczeniowej, wykorzystywanej do akceleracji obliczeń hydraulicznych diagnostyki i analizy przestrzeni stanów i zdarzeń w systemie wodociągowym/kanalizacyjnym [3].

Podstawowa jednostka robocza wyposażona jest w system SCADA złożony z oprogramowania wizualizacyjnego i przemysłowej bazy danych. Serwer komunikacyjny służy do gromadzenia danych procesowych ze sterowników, skąd przekazywane są do środowiska ProWater Enterprise Solution (rozwiązanie autorskie) lub MatLab.

Zaawansowana jednostka obliczeniowa służy do zaawansowanych obliczeń hydraulicznych, analizy danych (Big Data Analytics Research), analizy przestrzeni stanów i zdarzeń, symulacji i wieloparametrowej optymalizacji pracy systemu wod/kan. Zainstalowane środowisko ProWater Enterprise Solution .NEnviroT obejmuje dwa obszary – ProWater.Engine (przestrzeń do wykonywania złożonych obliczeń i sterowania aplikacją) i ProWater.WorkSpace (przestrzeń danych).

Systemem nadzorującym jest SCADA, który wysyła przez NetDDE polecenia do ProWater.Engine a system ProWater pobiera do ProWater.WorkSpace dane procesowe przez serwer OPC UA lub ODBC. Następnie wykonywane są obliczenia, których wyniki przesyłane są przez OPC UA do systemu SCADA.

#### **4. Budowa zwirtualizowanej przestrzeni bazy wiedzy o obiektach i procesach sterowania (MPC)**

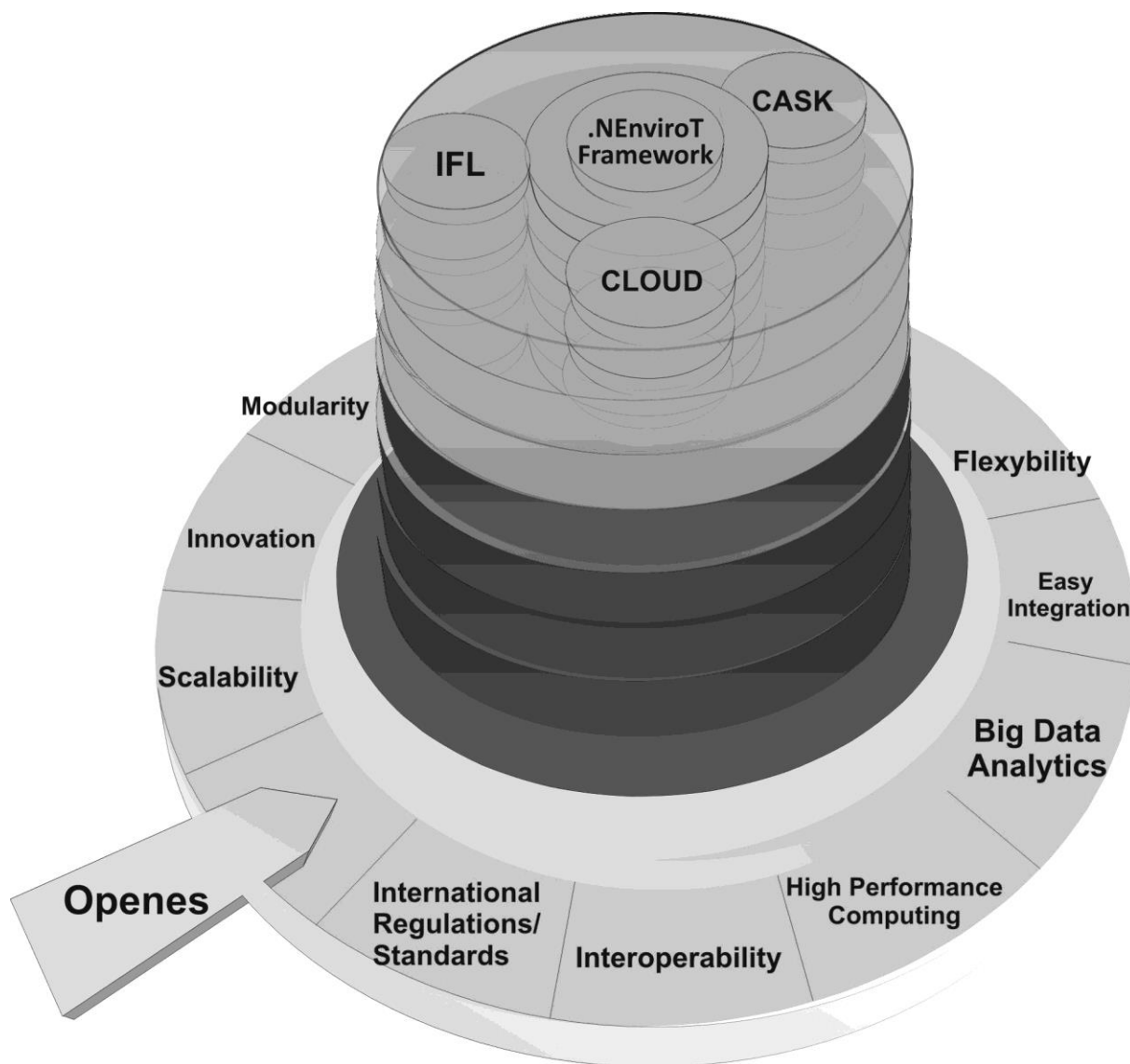
System ekspertowy wspomagający monitorowanie, sterowanie i zarządzanie procesami technologicznymi w systemach gospodarki wodno-ściekowej oparty jest na środowisku komponentowym EnviroLab Enterprise Solution Platform .NEnviroT Framework będąca zaawansowaną technologicznie platformą zintegrowanego oprogramowania przemysłowego (z dedykowanymi modułami wbudowanymi. System jest skalowalny w zwirtualizowanej strukturze modularnej (IFL+CASK+CLOUD)). Wyznacza nowe kierunki i standardy w symulacji procesów, badaniach procesowych i algorytmicznym sterowaniu procesów technologicznych, wykorzystując najnowsze rozwiązania ICT i zaawansowane modele sterowania predykcyjnego i adaptacyjnego, w tym również badań laboratoryjnych (instrumentalnych przy wsparciu oprogramowania ACD/Labs, LIMS). Autorskie rozwiązanie – platforma .NEnviroT, obok znanych rozwiązań, wykorzystuje m.in. bazę wiedzy czasu rzeczywistego uaktualnianej z różnych, często rozproszonych źródeł (dane procesowe z systemów SCADA, homo i heterogeniczne, strukturalne i niestrukturalne etc). Wykorzystuje szereg innowacyjnych narzędzi przetwarzania danych, w tym walidacji i analiz statystycznych. Jednym z kluczowych elementów wykorzystywanych w proponowanym rozwiązaniu środowiska EnviroLab\_Enterprise\_Solution jest zastosowanie sensorów wirtualnych w sterownikach PLC podwyższające niezawodność układów automatyki dzięki zapewnieniu szybkiej reakcji na uszkodzenia. Sensory wirtualne są szczególnie przydatne w sytuacjach, gdy pomiar wartości zmiennych procesowych nie jest możliwy (realizacja pomiaru jest zbyt kosztowna, brak możliwości zamontowania sensora w instalacji technologicznej lub brak odpowiedniej metody pomiaru).

Główne innowacje tkwią w budowie modeli algorytmów sterujących, ich złożoności czasowej i szybkości stabilizacji procesu technologicznego (następnie optymalizacji). Kluczowe znaczenie ma specjalistyczna wiedza dziedzinowa, dedykowana i struktura bazy wiedzy

systemu ekspertowego, podzielonego logicznie i fizycznie na trzy niezależne, o zróżnicowanej funkcjonalności moduły (rys.2, 3):

Rys. 2. Struktura logiczna środowiska EnviroLab Enterprise Solution

Fig. 2. Logic block architecture on EnviroLab Enterprise Solution



**CASK - Cyberinfrastructure, Analytics, Simulation and Knowledge Discovery** (System ekspertowy w warstwie

CASK obejmuje następujące, funkcjonalne specjalistyczne moduły:

- **EnviroLab.AdvancedProcessControl** (zintegrowany pakiet narzędzi diagnostycznych i optymalizacyjnych oraz zaawansowanego sterowania procesami APC, predykcyjnego sterowania procesami MPC)
- **EnviroLab.EnvironmentalMonitoring** (zaawansowane rozwiązanie klasy HPC, pozwalające na symulację propagacji zanieczyszczeń oraz optymalizację parametrów procesu technologicznego w celu ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko)

- **EnviroLab.EnterpriseSolutions** (otwarta i skalowalna platforma oparta na technologii .NET, wykorzystująca najnowsze technologie informatyczne i modułowe rozwiązania typu „plug in”) standard dedykowany . EnviroLab.NEnviroT – dostarcza SDK, API i wielu innych narzędzi dedykowanych/dziedzicznych – dzięki temu istnieje możliwość modyfikacji czy rozszerzenia aplikacji, modeli standardowych przez edycję kodu źródłowego modelu klasy reprezentującej dany obiekt, proces etc

### Cloud-GRID - technology

Wysocze skomunikowane przedsiębiorstwa nieustannie poszukują sposobów na szybsze i bardziej wydajne pobieranie danych z instalacji przemysłowych. Jednym z nich jest zastosowanie rozwiązań opartych na obsłudze danych w tzw. chmurze obliczeniowej (Cloud computing), z wykorzystaniem zdalnej komunikacji interfejsów operatorskich HMI. W koncepcji nowoczesnych sieci przemysłowych Przemysł 4.0 pracownicy i kadry zarządzające dysponują swobodnym i zdalnym dostępem do danych systemowych poziomu obiektowego. Pozwala to na sprawniejsze zarządzanie zasobami, monitorowanie i sterowanie maszynami.

Środowisko **EnviroLab.NEnviroT** zostało zbudowane na podstawie bibliotek .NET, które wykorzystują procesory o 64-bitowej architekturze. Środowisko umożliwia wykorzystanie technologii „plug in” w celu zagwarantowania pełnego dostosowania aplikacji do potrzeb klienta i integracji komponentów zewnętrznych, uzupełniających bogaty zestaw modułów funkcjonalnych dostępnych standardowo.

**EnviroLab.NEnviroT** bazuje na architekturze klient/serwer wykorzystującej technologię OPC UA. Środowisko oferuje także zintegrowane sterowniki komunikacyjne, przeznaczone do wymiany danych z urządzeniami zewnętrznymi (PLC, Fieldbus, distributed IO).

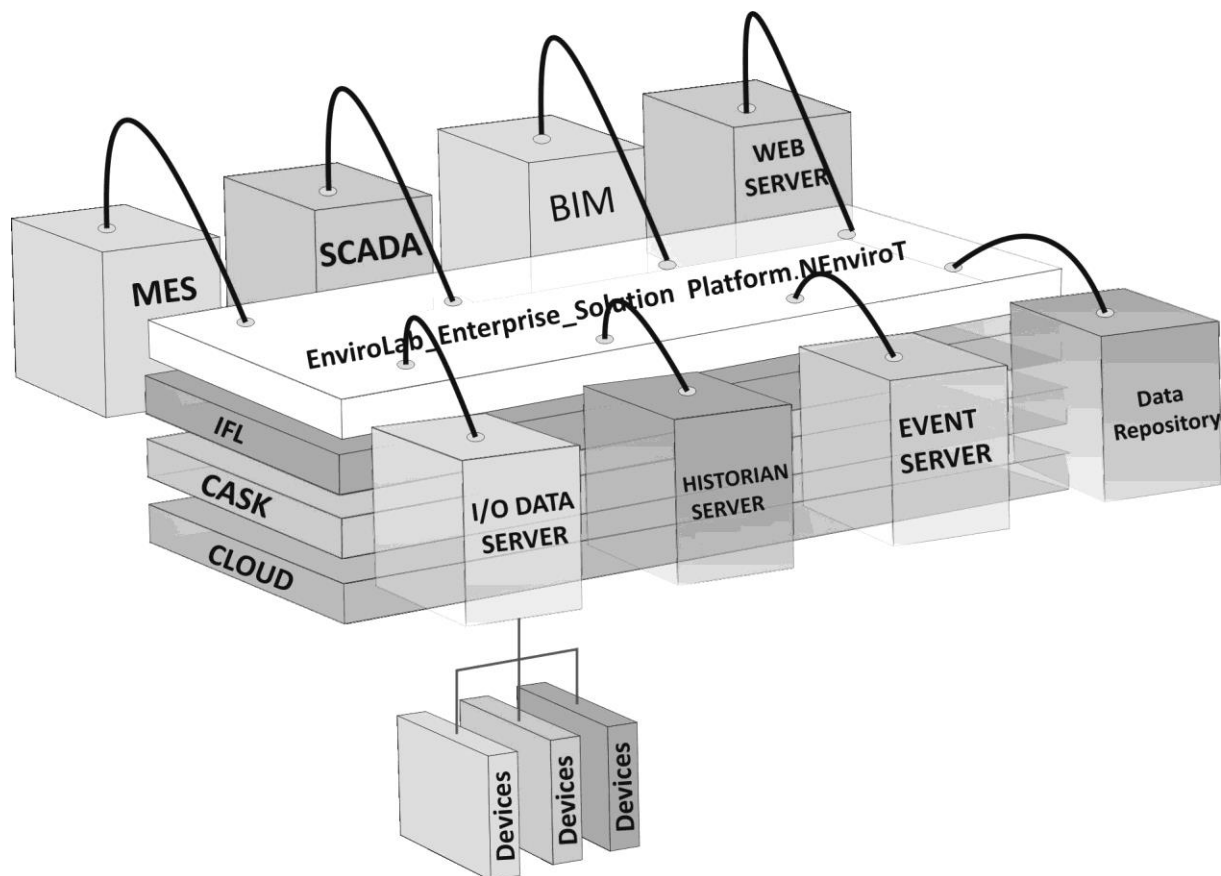
Platforma .NEnviroT oparta jest na środowisku inteligentnych komponentów modeli procesów, zdarzeń (Complex Event Processing), obiektów, modeli badań. Kluczowe znaczenie dla precyzji odwzorowania rzeczywistych procesów, obiektów i zdarzeń ma baza wiedzy, uaktualniana, analizowana i walidowana w czasie rzeczywistym na podstawie danych z różnych źródeł (homo/heterogenicznych, str/niestrukturalnych etc) obliczeniowych (np. modelowanie CFD).

System ekspertowy oparty jest na precyzyjnie zdefiniowanych modelach obiektów sterowania, gdzie baza wiedzy o procesach, przestrzeniach stanów, charakterystykach pracy urządzeń budowana jest na podstawie wiedzy eksperckiej oraz zaawansowanych technologicznie systemach ICT. W odróżnieniu od innych rozwiązań stanowi kompletne, zintegrowane środowisko łączące elementy zaawansowanych badań (IFL), modelowania i symulacji (CASK) przenosząc część rozwiązań do chmury obliczeniowej (CLOUD Computing - moduł CLOUD).

Przyjęta technologia budowy systemu zapewnia maksymalną elastyczność (możliwość rozbudowy systemu o nowe moduły i tematyczne bazy danych) i skalowalność (zdolność projektowanego systemu do sprawnego działania w warunkach rosnącej liczby użytkowników oraz zwiększającej się objętości przetwarzanych danych).

*Rys. 3. Platforma ProWater Enterprise Solution Framework - EnviroLab.NEnviroT*

*Fig. 3. ProWater Enterprise Solution Framework - EnviroLab.NEnviroT*



## 5. Wnioski

Dynamiczny rozwój technologii informatycznych i teleinformatycznych determinuje rozwój gospodarczy w różnych sektorach gospodarki narodowej, w tym również gospodarce wodno-ściekowej.

Najistotniejszym elementem proponowanego przez autorów rozwiązania jest dodanie do istniejących systemów ICT (integrujących GIS, SCADA i modele hydrauliczne) warstwy sterowania optymalizującego (w tym model sterowania predykcyjnego MPC). W istniejących systemach, najwyższy poziom w strukturze hierarchicznego sterowania sieciami wodociągowymi stanowi warstwa sterowania nadzorującego. Wyższość proponowanego rozwiązania, w stosunku do istniejących wynika z zastosowania m.in. modelu sterowania predykcyjnego MPC, stanowiącego integrację bazy wiedzy o obiektach sterowania i procesach technologicznych, modeli przestrzeni stanów i zdarzeń [4,5]. Przez wykorzystanie strategii ewolucyjnych algorytm sterujący MPC jest mniej wrażliwy na błędy sygnałów a przez wykorzystanie soft sensorów i technologii PADO (Performance Analysis Diagnostics & Optimization) oraz CEP (Complex Event Processing) pozwala wygenerować optymalne trajektorie sterowania dla warstwy sterowania nadzorującego. Co więcej, wykorzystywana jest równoległa architektura obliczeniowa (tutaj technologia NVidia CUDA), pozwalająca na akcelerację obliczeń numerycznych i zmniejszenie złożoności czasowej algorytmów. Baza wiedzy o obiektach sterowania aktualizowana jest w czasie rzeczywistym z systemów nadzorujących SCADA. System wielowątkowego, hierarchicznego sterowania procesem dystrybucji wody będzie działał w tle – równolegle do systemu rzeczywistego,

przeprowadzając ogromną liczbą symulacji w przestrzeni stanów i zdarzeń – ucząc się (z bazy wiedzy czasu rzeczywistego uaktualnianej z systemów SCADA, GIS – GeoEvent Service, modeli hydraulicznych, modeli obiektów sterowania, modeli przestrzeni stanów i zdarzeń czasu rzeczywistego, poprawiając stale jakość sterowania. Modele przestrzeni stanów i zdarzeń – są częścią bazy wiedzy o obiektach sterowania.

Zdecydowaną przewagą proponowanego systemu sterowania nad innymi dotychczas funkcjonującymi, jest element przewidywania przyszłych zdarzeń (model MPC). Cecha ta w połączeniu z samouczącym się inteligentnym systemem sterowania pozwala nie tylko reagować bieżąco na zmiany stanu sensorów, ale również przewidywać te zmiany i z odpowiednim wyprzedzeniem korygować działanie systemu przygotowując go na przewidywany rozwój sytuacji, co ma szczególnie istotne znaczenie w systemach o dużej bezwładności jak rozległe sieci wodociągowe i kanalizacyjne.

Narzędzia wbudowane w system zintegrowany, obejmują wsparcie w zakresie modelowania hydraulicznego i kalibracji (rekalibracji), projektowania sieci wod-kan, optymalizacji zużycia energii, detekcji uszkodzeń i wycieków w sieci, diagnostyki sieci.

System wielowątkowego, hierarchicznego sterowania procesem dystrybucji wody (dzięki wykorzystaniu zaawansowanych technologicznie rozwiązań) działa w tle – równolegle do systemu rzeczywistego, przeprowadzając ogromną liczbę symulacji w przestrzeni stanów i zdarzeń – ucząc się (z bazy wiedzy czasu rzeczywistego uaktualnianej z systemów SCADA, GIS – GeoEvent Service, modeli hydraulicznych, modeli obiektów sterowania, modeli przestrzeni stanów i zdarzeń czasu rzeczywistego, poprawiając stale jakość sterowania. Modele przestrzeni stanów i zdarzeń – są częścią bazy wiedzy o obiektach sterowania. Akceleracja obliczeń hydraulicznych i wieloparametrowa symulacja pracy sieci wodociągowej jest realizowana z wykorzystaniem technologii nVidia CUDA.

Przedstawiona koncepcja inteligentnego systemu monitorowania i zarządzania rozproszonymi obiektami systemów WOD-KAN w metropoliach jest odpowiedzią na współczesne wyzwania w kontekście dynamicznego rozwoju miast inteligentnych (SMART Cities) w zakresie zrównoważonego zarządzania infrastrukturą komunalną w metropoliach, w tym zrównoważonego gospodarowania zasobami, w kontekście zwiększania efektywności wykorzystania zasobów.

## Bibliografia

- [1] Vairavamoorthy K., Gorantiwar S. D., Pathirana A. “Managing urban water supplies in developing countries – Climate change and water scarcity scenarios,” *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 33, no. 5, pp. 330–339, 2008.
- [2] Walski T. M., Chase D. V., Savic D. A., Grayman W., Beckwith S., and Koelle E., *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Waterbury, Connecticut: Haestad Press, 2003.
- [3] Mays L. W. *Hydraulic Design Handbook*. New York, New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 1999.
- [4] Maciejowski J. M. *Predictive Control with Constraints*. Harlow, UK: Prentice-Hall, 2002.
- [5] Akouz K., Benhammou A., Malaterre P. O., Dahbou B., Roux, Predictive control applied to ASCE canal 2,” in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, California, Oct. 1998, pp. 3920–3924.
- [6] Wahlin B. T., Clemmens A. J. “Automatic downstream water-level feedback control of branching canal networks: Simulation results,” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 132, no. 3, pp.208–219, May 2006.

- [7] Begovich O., Ruiz V. M., Besançon G., Aldana C. I., Georges D. “Predictive control with constraints of a multi-pool irrigation canal prototype,” *Latin American Applied Research*, vol. 37, no. 3, pp. 177–185, Aug. 2007.
- [8] Barjas Blanco A., Willems P., De Moor B., Berlamont J. “Flood prevention of the Demer using model predictive control,” in *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, July 2008, pp.3629–3634.
- [9] Georges D. “Decentralized adaptive control for a water distribution system,” in *Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, 1994, pp. 1411–1416.
- [10] El Fawal H., Georges D., Bornard G., “Optimal control of complex irrigation systems via decomposition-coordination and the use of augmented Lagrangian,” in *Proceedings of the 1998 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, California, 1998, pp. 3874–3879.
- [11] Sawadogo S. Faye R. M., Malaterre P. O., Mora-Camino F., “Decentralized predictive controller for delivery canals,” in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, California, 1998, pp. 3380-3884.
- [12] Negenborn R. R., van Overloop P. J., Keviczky T., De Schutter B., “Distributed model predictive control for irrigation canals,” *Network and Heterogeneous Media*, vol. 4, no. 2, pp. 359–380, June 2009.
- [13] Eker I. Kara T., “Operation and control of a water supply system,” *ISA Transactions*, vol. 42, no. 3, pp. 461–473, July 2003.
- [14] Walski T. M., Chase D. V., Savic D. A., Grayman W., Beckwith S., Koelle E., *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Waterbury, Connecticut: Haestad Methods, 2003.
- [15] Negenborn R. R., De Schutter B., and Hellendoorn J., “Multi-agent model predictive control for transportation networks: Serial versus parallel schemes,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, no. 3, pp. 353–366, Apr. 2008.