



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО

КАТЕДРА „АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОИЗВОДСТВОТО”

инж. Здравко Владимиров Георгиев

**ОПТИМАЛНО ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ И
БЕНЧМАРКИНГ ПРИ УПРАВЛЕНИЕ НА СЛОЖНИ
ТЕХНОЛОГИЧНИ ОБЕКТИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
по научна специалност 5.2. Електротехника, електроника и автоматика
(Автоматизация на производството)

Научни ръководители: Член-кор.проф.дтн Минчо Банков Хаджийски
Доц.д-р инж. Коста Петров Бошнаков

Научно жури:

1. Проф. дтн Стоян Стоянов – председател, рецензент
2. Проф. дтн Никола Маджаров - рецензент
3. Член-кор. проф. дтн Минчо Банков Хаджийски
4. Доц. д-р инж. Диана Ташева
5. Доц. д-р инж. Теофана Пулева

София, 2013

Дисертационният труд е написан на 242 страници, съдържа 121 фигури и 23 таблици. Цитирани са 190 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Автоматизация на производството”, състояло се на 26.06.2013.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 23 септември 2013 година от 14 часа в зала 424, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересувалите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

УВОД

Дисертационният труд представя работата на автора в областта на бързо развиващия се в последното десетилетие бенчмаркинг и вземане на решения на негова база и съпътстващия го инструментариум за оценка на работата на системи за управление на сложни технологични обекти. В дисертацията са получени резултати от прилагане на методи за целите на бенчмаркинга, основани на показатели за качеството на работа на системи за управление, подхода за взимане на решение на базата на прецеденти, анализ чрез обвиване на данни и многоагентни системи за управление. Обърнато е внимание на значителните възможности, които съвременните достижения дават за разширяване на традиционно използваните техники на бенчмаркинг управление и оценяване на ниво предприятие, група от предприятия от даден сектор и създаване на виртуални консултантски центрове за обхващане на инсталации и предприятия независимо от вида на дейността, която извършват. Изследванията в дисертацията са насочени към конкретни обекти като пилотната флотационна клетка в Лабораторията по управление на процеси и автоматизация на Хелзинкския технологичен университет - Еспоо, системи за отопление, вентилация и климатизация и системи за пречистване на отпадъчни води в български пречиствателни станции. Ориентацията на приложената част от изследванията е към същите класове обекти, които се характеризират със сложността на процесите и системите за управление и на които се прилага първо и второ ниво на управление. Идеите на дисертацията намериха практическо приложение при изпълнението на проекти в Софийска енергийна агенция СОФЕНА и по-специално при бенчмаркинга на системи за сградна автоматизация и за управление на процесите в пречиствателни станции за отпадъчни води. Участието в тематични конференции и семинари в тези области потвърдиха важността на насоките на работа.

Голяма част от разработките в дисертацията намериха практическо приложение при изпълнение на договор за „Обследване за енергийна ефективност на промишлената система на СПСОВ – Кубратово“ с Анекс „Анализ на работата на биобасейните и въздуходувките в СПСОВ - Кубратово по новата технологична схема за пречистване на азот и фосфор“ (договор 4890 от 19.08.2010). Научните разработки в областта на пречиствателни станции за отпадъчни води са осъществени в рамките на българо-китайския проект „Интелигентно супервайзорно управление и оптимизация на процеси при пречистване на отпадъчни води“ с ръководител доц.д-р инж. Коста Бошнаков по договор ДО02-9/23.09.2008 на Фонд „Научни изследвания“.

Глава 1. Бенчмаркинг на системи за управление

Бенчмаркингът е процес на събиране, анализ и съпоставяне на данни за характеристиките на сравними дейности в/и между отделни обекти, процеси, системи или организации с цел оценка и сравнение на тези характеристики и подобряване на работата на конкретния процес, предприятие или организация. Най-близкият превод на термина benchmarking на български език е сравнителен анализ, но не следва да се ограничава само със сравнение, тъй като при бенчмаркингът може да има и процес на подобряване на характеристиките на организацията като цяло. По своя обхват бенчмаркингът варира от вътрешен бенчмаркинг в рамките на една организация, включително производствена единица, до установяване на най-добрите характеристики в даден сектор и външен бенчмаркинг, който се използва преди всичко за създаване на специфични индикатори в рамките на определен сектор. Възможностите за подобрене на характеристиките на дадени единици се определят в резултат на оценката на отделните единици и сравнението им с еталонни или стандартни стойности за самите тях.

Традиционният подход за бенчмаркинг на системи за управление включва използване на показатели за качеството на системи за управление. Анализирани са детерминистични и статистически показатели за оценка на системи за управление. От статистическите специално внимание е отделено на показателя на Харис. Разгледани са и показателят на Гримбъл, авто- и взаимнокорелационните функции.

За определяне на най-добрия случай или „бенчмарк“ за система за управление е приложима теорията на подхода на вземане на решения въз основа на прецеденти. Прецедентите от своя страна могат да се оценят чрез метода за анализ чрез обвиване на данни (DEA). Методът е непараметричен и се основава на линейното програмиране. Чрез DEA анализ могат да се правят заключения за ефективността на процесите за отделен случай (прецедент).

Многоагентните системи (Multy Agent System – MAS) са алтернативен подход при развитието на приложния софтуер за сложни системи с възможности за автономно действие в отворена, динамично изменяща се среда. Възможностите на агентите да определят сами своите цели, да се координират, да работят съвместно за решаване на

общата цел, прави подходяща употребата им при решаване на комбинаторни оптимизационни проблеми и в задачи за управление.

Биологичното пречистване на отпадъчни води е разгледано като сложен процес за целите на управление и бенчмаркинг. Най-разпространените подходи за математичното описание на биологичното пречистване се основават на математичните модели на активната утайка (Activated Sludge Models - ASMs), а именно ASM1, ASM2, ASM2d и ASM3, които разглеждат в различна степен на детайлизация протичащите биологични процеси. Броят на променливите на състоянията в модела ASM1, на който съответства и размерността на описващата система диференциални уравнения е 13. Моделите, означени с ASM2 описват изменението на 19 променливи на състоянието, а ASM3 оперира с 13 променливи на състоянието. В случай на зонирание всяка една от последователно свързаните зони се решава с ASM1. За целите на управлението по разтворен кислород за аеробните зони ASM1 се разширява с уравнение, описващо материалния баланс по кислород.

Основен проблем при управлението на процесите при пречистване на отпадъчни води е компенсирането на смущенията в резултат на променливост на разхода и състава на отпадъчните води на вход на инсталациите. За прилагане на съвременни подходи за управление на системите за пречистване, като моделно предсказващо управление, е необходимо предсказване на смущаващите въздействия за хоризонта на предсказване.

В световен мащаб са реализирани редица софтуерни платформи за математическо моделиране и симулация на PCOB. По-известните продукти са: BioWin, EFOR, GPS-X, JASS, STOAT, SIMBA, WEST, които са реализирани в среди Matlab/Simulink и Modelica.

Голям брой производители предлагат програми за наблюдение и оценка на качеството на системи за управление. Сред тях са: ABB, Aspentech, ControlArts, Entech/Emerson, Honeywell, Invensys/Foxboro, Invensys/Walsh Automation, Matricon. Някои от тях са описани накратко в тази точка. Направено е и сравнение на продуктите и техните предимства.

1.10. Общи изводи

1. Бенчмаркингът на системите за управление на сложни технологични обекти е актуален въпрос, който става все по-важен във връзка със съвременните изисквания за

качество при спазване на екологични критерии и минимални разходи на енергия и ресурси.

2.Класическите методи за бенчмаркинг на системи за управление чрез детерминистични показатели продължават да намират своето приложение предимно на етап проектиране.

3.Стохастичните показатели (показателят на Харис) намират много добро приложение при съвременните системи за мониторинг, тъй като се основават на минимални данни от системата за управление.

4.Необходим е допълнителен анализ на стохастичните показатели и разработване на рекурсивни алгоритми за непрекъснатото им оценяване.

5.Полезно е класическите показатели, както и показателите за ресурсна ефективност да бъдат обработвани и обобщавани с помощта на съвременни подходи, като анализ чрез обвиване на данни, както и да се използва подходът на прецедентите.

6.Прилагането на бенчмаркинг на системи за управление в многоагентните системи би могло значително да подобри работата на системите за управление, които се базират на този подход.

7.Съществуващите софтуерни продукти за мониторинг на контури за управление са доказателство за интереса от подобни приложения. Съвременното развитие на информационните и комуникационни технологии позволява създаването на виртуални консултантски центрове, които да извършват бенчмаркинг на голям брой контури и процеси, като част от обща концепция за бенчмаркинг на определен клас обекти.

1.11. Формулиране на целите и задачите на дисертацията

Цел на дисертационния труд е да се изследват методите за мониторинг и анализ на качеството на работа на системи за управление и да се приложи подхода на бенчмаркинг и нови методи и алгоритми за отделните нива на управление.

За постигане на целта са използвани резултати от управлението на избрани сложни технологични обекти и са създадени симулационни модели за тестване на системи за управление.

Задачите на дисертация са:

1.Да се проучат подходите на бенчмаркинг на системи за управление.

2.Да се приложат подходи за бенчмаркинг и да се оцени поведението на системите за управление на първо и второ йерархично ниво.

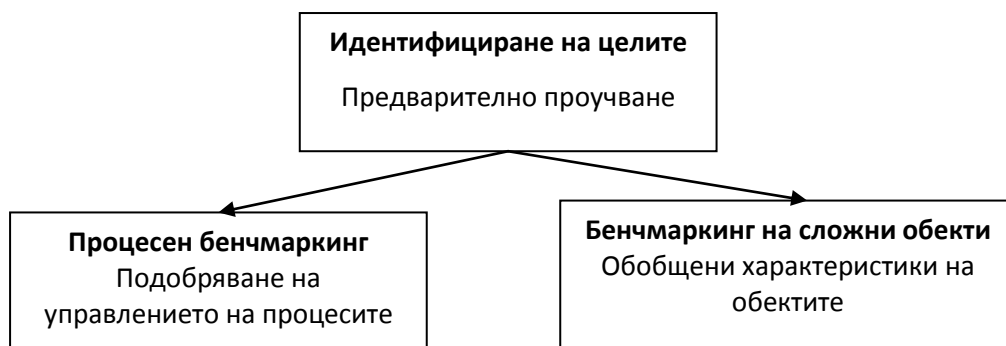
3. Да се разработи обобщен симулационен модел за процеса на пречистване на отпадъчни води с биологично и химично отстраняване на фосфора, който да се използва за оптимизиране на процесите и бенчмаркинг на стратегии за управление.

4. Да се разработят алгоритми за интелигентни системи за управление въз основа на бенчмаркинг.

5. Да се приложат методите на бенчмаркинг за оценка на инсталации и пречиствателни станции за отпадъчни води.

Глава 2. Разработване и прилагане на подходи за бенчмаркинг

Бенчмаркингът за сложни технологични обекти включва следната схема:



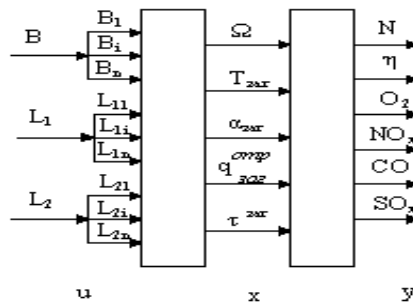
Фиг.2.1 Принципна схема на бенчмаркинг подхода

2.2. Използване на многоагентни системи за бенчмаркинг

За демонстриране на приложението на MAS за бенчмаркинг е използван модел на система за управление на горивния процес на парогенератор. Управлението на горивния процес се усложнява от липсата на достатъчно управляващи въздействия. Независимо от функционалните връзки между изходните величини:

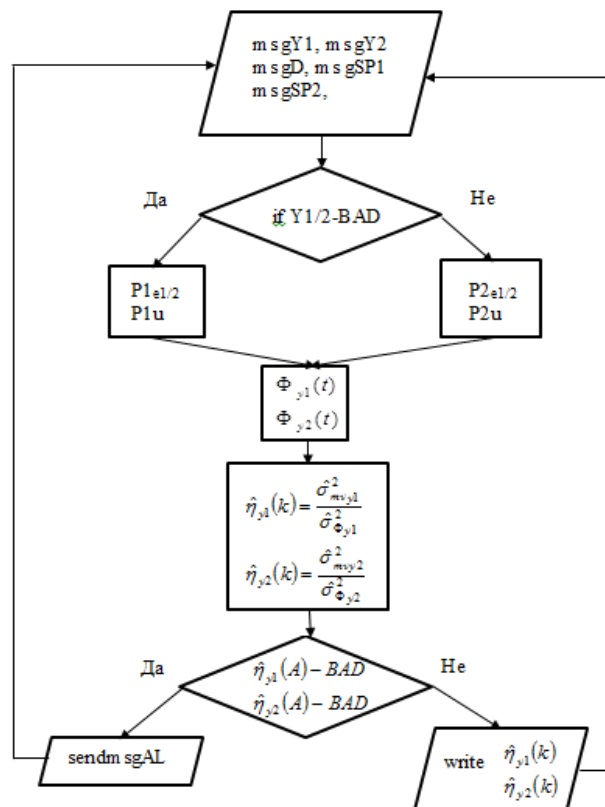
$$F(N, \eta, O_2, NO_x, CO, SO_2) = 0 \quad (2.1)$$

степените на свобода не достигат. Управлението на мощността N е доминиращо и се осъществява с количеството гориво B (Фиг. 2.3).



Фиг.2.3 SITO модел на горивен процес

Агентът за оценяване на качеството на процеса (Оценяващ агент), показан на Фиг. 2.4, получава данни за стойностите на управлението и грешката в системата. Агентът определя въз основа на информацията, получена от изходните агенти стойностите на тегловните коефициенти P_e и P_u , при определянето на обобщения изход $\phi(t)$ и използва метода на Десбороу и Харис за бенчмаркинг на процеса. Алгоритмът се извършва през определен брой наблюдения с изместващ се хоризонт. При формиране на обобщения изход на показателя на Харис автономният агент решава дали грешката в определена ситуация е по – важна от цената на управлението и обратното и в каква степен.

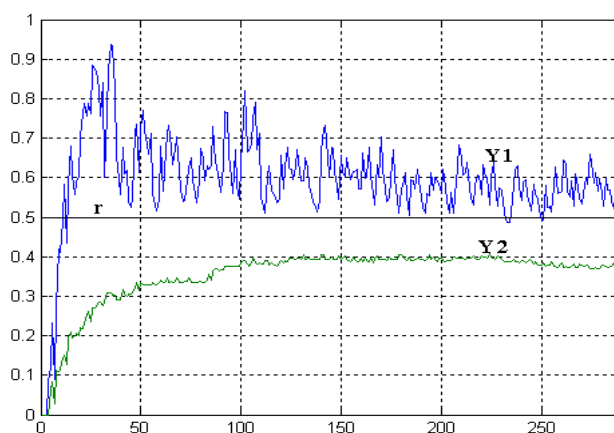


Фиг. 2.4. Алгоритъм на агента за оценяване

Приложен е рекурсивен алгоритъм за оценяване на показателя на Харис. Агентът за оценяване прави проверка за сингулярност на матрицата и по двата канала. Ако някоя от матриците се окаже близка до сингулярна, наборът от данни се изхвърля и наблюденията се заменят с нови.

Трябва да се отбележи, че при подхода на Харис се отчита само дисперсията на обобщения изход, а при SITO обекти, управлявани с MAS, се получава статична грешка и по двата канала (фиг.2.5). За по-пълно оценяване на качеството на управление трябва да се отчете и статичната грешка.

Агентът за оценяване на качеството на процеса използва информация за изходите на системата и в зависимост от нейното състояние задава различни тегла P_e и P_u , което прави оценката по-точна. При малка стойност на показателя на Харис (под 0.2) агентът решава дали да алармира агентната система за наличие на лошо качество на управление.



Фиг.2.5 Нормиран изход на системата по двата канала на управление

2.3. Бенчмаркинг на базата на прецеденти и анализ чрез обвиване на данни

Въз основа на теорията на вземане на решения на базата на прецеденти е разработен обобщен алгоритъм за бенчмаркинг и параметрична оптимизация на системи за автоматично управление. Подходът е приложен при биологично пречистване на отпадъчни води и по-конкретно – системи за управление на разтворен кислород (DO) и амониев азот ($NH_4 - N$) на изход от биобасейните.

За представяне на прецедентите (c_i) за конкретно разглежданите системи за управление при WWTP е формирана структурата „проблем-решение-ефективност”:

$$c_i = (p_i, s_i, RE_i) \quad (2.16)$$

Проблемът p_i се организира като „атрибут-стойност”, използвайки векторите на атрибутите a_i и стойностите v_i .

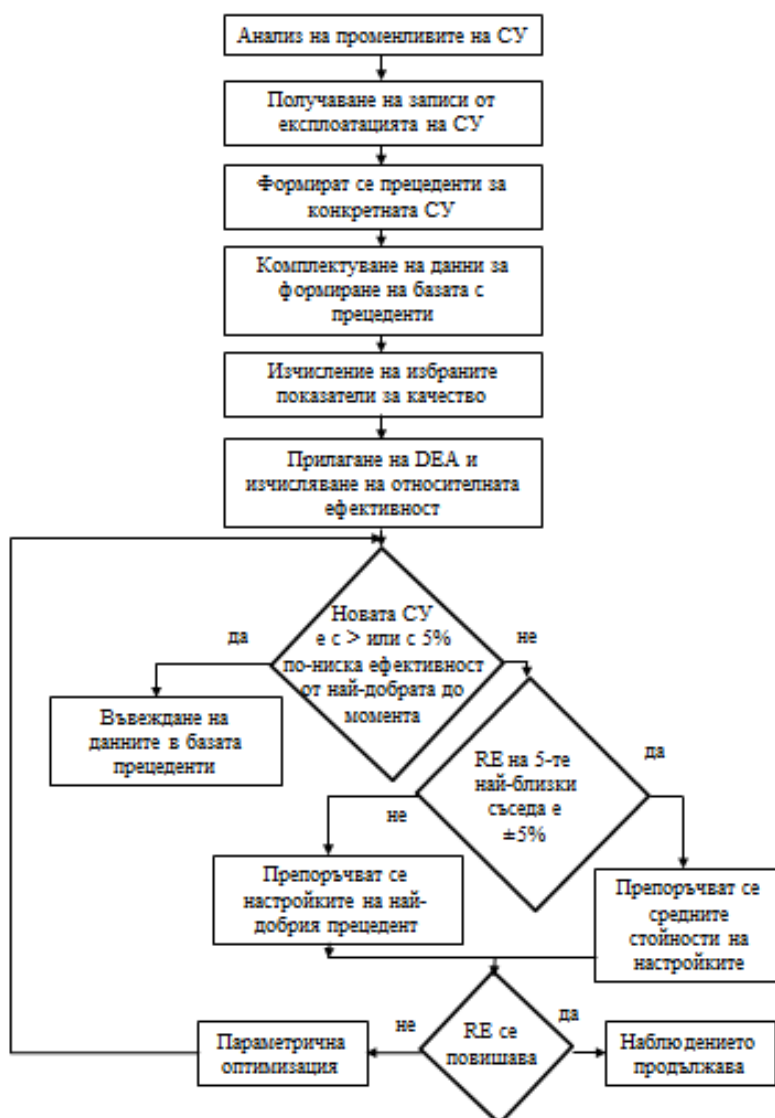
$$p_i = (a_i, v_i), a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}), v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (2.17)$$

Решението s_i е вектор, който за задачата за параметрична оптимизация на системи за автоматично регулиране включва параметрите на регулаторите и ограниченията върху управляващите въздействия:

$$s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iq}) \quad (2.18)$$

RE_i е относителната ефективност на i -тия прецедент.

Подходът за бенчмаркинг на базата на прецеденти и анализ чрез обвиване на данни е обобщен в алгоритъма на Фиг. 2.11.



Фиг.2.11 Схема на алгоритъм за бенчмаркинг на базата на прецеденти и обвиване на данни

2.4. Изводи към Глава 2

1.Разработен е автономен агент за оценяване на качеството на управление на горивен процес използващ показателя на Харис за бенчмаркинг.

2.Изследвани са стойностите на показателя на Харис за качеството на управление при различни претеглени стойности на управлението и грешката.

3.Разработен е алгоритъм за бенчмаркинг и параметрична оптимизация на конкретни системи за управление като се използват подходите на взимане на решение по метода на прецедентите (CBR) и анализ чрез обвиване на данни (DEA)

4.Комбинираните са експертни знания и подходи за оптимална настройка на системи за управление.

5.Разгледани са две конкретни системи за автоматично регулиране на отделни променливи при биологично пречистване на отпадъчни води. Въз основа на анализ на процесите е дефинирана структура на прецедентите.

6.Използвайки DEA анализа са определени относителните ефективности на десет системи за автоматично регулиране на разтворен кислород.

7.Използваните в настоящата работа подходи на CBR и DEA са приложими за целите на виртуални консултациялни центрове.

Глава 3. Анализ на приложимостта на бенчмаркинга на отделните етапи от проектиране, настройка и работа на системите за управление

Традиционната практика на двуетапно проектиране на технологичната част и системи за автоматично управление (CAУ) не позволява да се реализират напълно потенциалните възможности за висока управляемост и енергийна ефективност. Последователното проектиране на технологичната част (строителна, машинна и електро) и системите за автоматично управление е ефективно единствено за по-малки обекти. За сложните технологични обекти този начин на проектиране не гарантира достигане на оптималност по отношение на многокритериална целева функция отчитаща разходи за инвестиции, качество при всички възможни условия, експлоатационни разходи и надеждност

Постановка на проблема

Проектирането на всяка съвременна сложна система следва да бъде подчинено на обобщен критерий за ефективност, включващ няколко частни критерии:

1. Инвестиционни разходи J1

2. Експлоатационни разходи J_2
3. Качество J_3
4. Надеждност J_4

Тъй като тези частни критерии са противоречиви, необходимо е оптимизационната задача да се решава като многокритериална при това в целия жизнен цикъл на функциониране на обекта. Общият критерий за ефективност е технико-икономически и в много случаи може да бъде представен под формата на обединена целева функция:

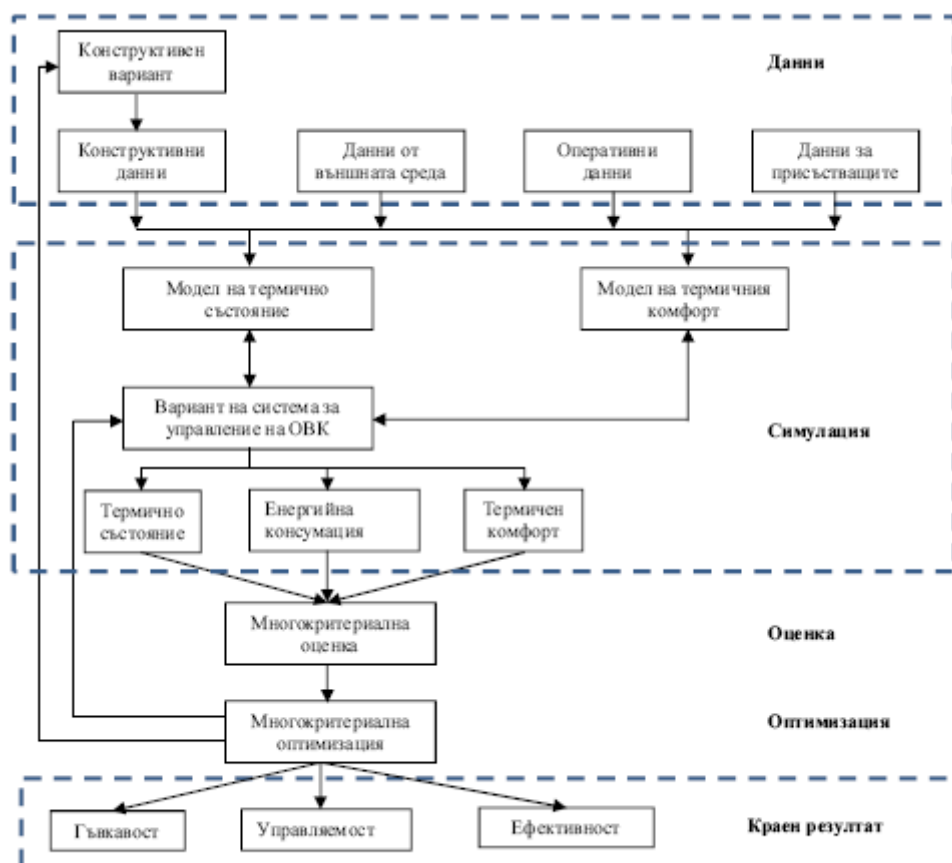
$$J = f(J_1, J_2, J_3, J_4) \rightarrow \text{extr} \quad (3.1)$$

Често, поради противоречивостта на частните критерии J_i , формирането на общ критерий чрез претегляне на отделните съставлящи:

$$J_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i J_i \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (3.2)$$

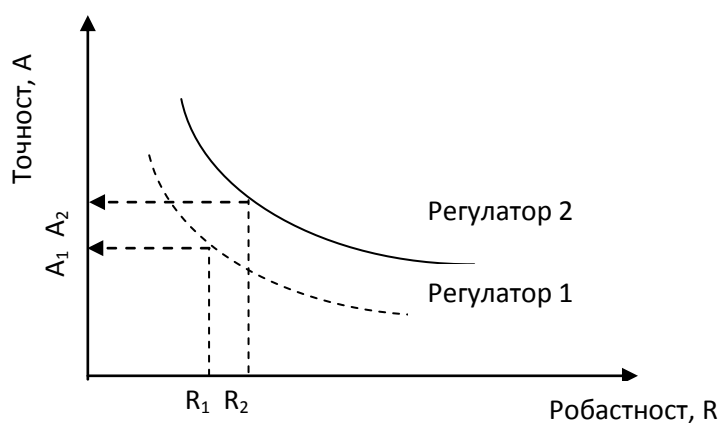
(2)

е невъзможно и се налага да се прилага някой от методите за многокритериална оптимизация, например намирането на Парето оптимум, при които се търси такава компромисна равновесна точка, при отклонение от която се влошава някой от частните критерии J_i . Обобщена концептуална схема за съвместно проектиране на системи за отопление, вентилация и климатизация и техните системи за управление е представена на Фиг. 3.1.



Фиг.3.1 Обобщена концептуална схема за съвместно проектиране за ОВК система

Следва да се отбележи, че системите за автоматично управление се проектират компромисно, т.е. с определено ниво на робастност и съответно точност. Кривата на Laszlo Keviczki (Фиг.3.4) изобразява зависимостта на точността и робастността при настройка на регулаторите:



Фиг.3.4 Зависимост на точността и робастността при настройка на регулаторите

Положението на кривата зависи от два основни фактора:

- Тип на регулатора
- Структура на системата (например включване на измерими смущения)

Точността на системата за управление може да се подобри от една страна като се подобрят настройките на регулатора. В този случай се движим по кривата на регулатора към по-голяма точност, но и по-малка робастност (например устойчивост при изменения на модела на обекта).

При промяна на структурата на системата в случай на добавяне на косвени показатели, измерими смущения или друга информация се повишава едновременно точността и робастността на системата. В случая на Фиг. 3.4 при преминаване от Регулатор 1 към Регулатор 2 робастността се увеличава от R_1 на R_2 , а точността от A_1 до A_2 .

Бенчмаркингът зависи от самата система на управление, т.е. показателите за качество на преходния процес ще зависят от самия регулатор, структурата на системата и колко информация за обекта и смущенията се използва за неговото управление.

Бенчмаркингът може да се приложи на етапи:

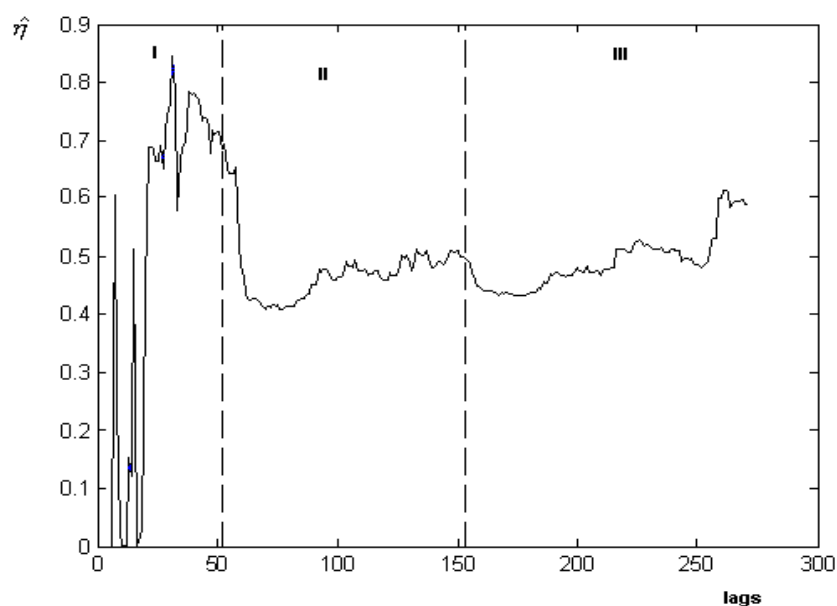
- Проектиране
- Настройка и оптимизация на контури (системи) за управление
- Сравнение на стратегии за управление – засягат се възможни структури на системи за управление

Следва да се отбележи, че бенчмаркингът е относителен по време и зависи от технологичния напредък. Това се отнася за всички етапи, но засяга особено стратегиите за управление, тъй като при реинженеринг в резултат на цялостна модернизация може да се приложи бенчмаркинг на стратегията за управление (пример е промяна на ограниченията, като въвеждане на по-строги показатели за пречистване на води).

3.3. Анализ на приложимостта на показателя на Харис

С цел анализ на приложимостта на показателя на Харис за бенчмаркинг на контури за управление са използвани три съвкупности от данни от пилотна флотационна клетка. Те представят поведението на системата в случаите на установено състояние (без промяна на заданието или поява на основно смущение по натоварване) с различни настройки на регулатора. Резултатите за оценката на показателя на Харис получени чрез он-лайн FCOR алгоритъма са представени на Фиг.3.5. В първия случай PI регулатора за изходния кран е настроен по метода на Циглер-Николс. Оптималните параметри получени по този начин са: коефициент на усилване $K=3$ и времеконстанта на интегриране $T_i=15$ sec (част I във Фиг.3.5). Стойностите на показателя за бързо управление (пререгулиран PI регулатор) са получени с параметри на регулатора $K=4.5$

и $T_i=10$ sec (секция II на Фиг. 3.5), и бавно управление – параметри $K=1$ и $T_i=40$ sec (секция III на Фиг.3.5).



Фиг.3.5 Он-лайн оценка на показателя на Харис

Ясно се вижда, че през първия период на нормални условия на работа и оптимално настроен регулатор, показателят има най-висока стойност. По време на първите няколко итерации стойността на показателя не трябва да се отчита, тъй-като рекурсивният алгоритъм се нуждае от време за установяване. Може също така да се направи изводът, че през периодите на бързо и бавно управление стойността на показателя е подобна. Т.е. не е възможно да се даде съвет за посоката на промяна на параметрите на регулатора. Единствено може да се констатира, че качеството на процеса не е задоволително и регулаторът трябва да се пренастрои.

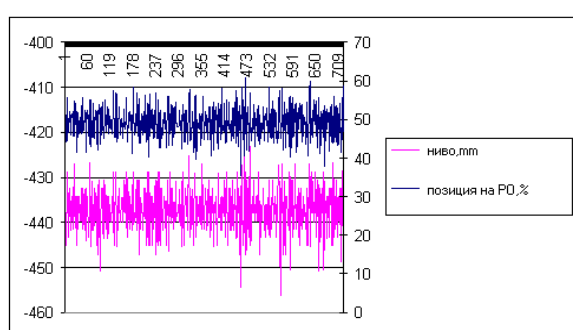
3.4. Изводи към Глава 3

- 1.Анализирано е приложението на бенчмаркинга на етапи проектиране, настройка и работа на системите за управление.
- 2.Представен е обобщен критерий при проектиране на съвременните сложни системи.
- 3.Изследвана е връзката между задачите за управление и бенчмаркинг.
- 4.Направен е анализ на приложимостта на показателя на Харис.

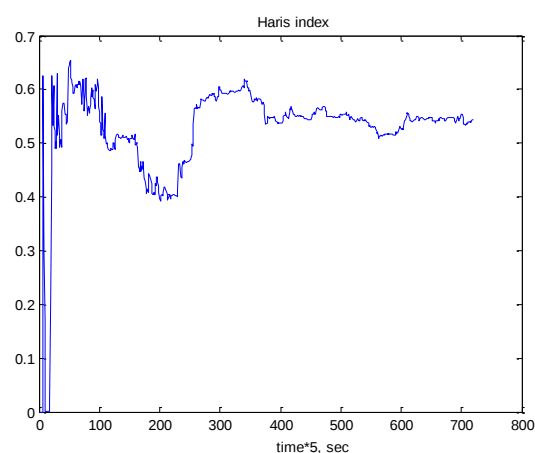
Глава 4. Оценка на поведението на системи за управление на първо и второ йерархично ниво

Оценена е работата на 9 контура за управление въз основа на данни от флотационна инсталация на компанията Отокумпу в Пюхасалми (Финландия), които съдържат информация за девет контура за управление – управление на потока въздух и управление на нивото на флотационните клетки.

Данните за Контур 11 са посочени на Фиг. 4.11, а на Фиг. 4.12 са представени резултатите за показателя на Харис.



Фиг.4.11 Едночасова последователност от данни с бавен ПИ-регулатор параметри $K=-1$, $T=40$).



Фиг.4.12 On-line оценяване на показателя на Харис - бавно управление

Резултатите са обобщени в Таблица 4.2

Таблица 4.2 Обобщени резултати за контурите

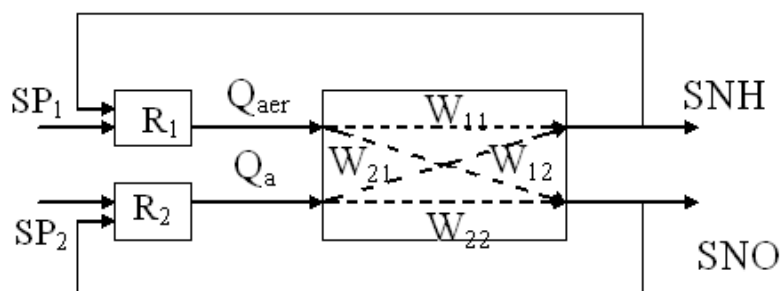
Контур №	Показател на Харис	Осцилации	Статично триене	Нелинейности	Заклучение
1	0.0623	Не	Не	Не	Мн.лошо
2	0.4557	Не	Не	Не	Добро
3	0.1088	Не	Не	Не	Мн.лошо
4	0.1074	Не	Не	Не	Мн.лошо
7	0.2823	Не	Не	Не	Добро
9	0.0767	Не	Не	Не	Мн.лошо
11	0.2810	Не	Не	Не	Добро
15	0.0561	Да	Не	Да	Мн.лошо
16	0.0446	Да	Не	Да	Мн.лошо

Като цяло може да се обобщи, че управлението на системите за регулиране е далеч от желаното, което се изразява в ниска стойност на показателя на Харис, т.е. голяма дисперсия на изходния сигнал и два осцилиращи контура. Ако трябва да се подредят контурите по степен на важност и причиняване на най-големи загуби в системите, то задължително на първо място трябва да се обърне внимание на осцилиращите контури 15 и 16 и на контурите за стабилизиране на ниво, охарактеризирани като много лоши: 4 и 9. В по-дългосрочен план могат да се проектират и тестват съвременни регулатори и техники за управление, базирани на размита логика и невронни системи.

Разработените и тествани методи за on-line наблюдение и оценяване на контури за управление дават ясни и лесни за тълкуване резултати. Те са използвани за разработване на система за мониторинг на контурите във флотационните инсталации на Отокумпу.

4.1.2. Приложение на многоагентна система за управление и бенчмаркинг за процес на биологично пречистване на отпадъчни води

За целите на дисертацията е разгледан биореактор за пречистване на отпадъчни води (Фиг.4.43). Управлението по каналите на амониев ($NH_4 - N$) и нитратен азот ($NH_3 - N$) се осъществява чрез въздух за аериране Q_{aer} и рециркулация на активна утайка Q_a . На базата на симулационни изследвания с бенчмаркинг симулационния модел BSM1 са получени предавателните функции по каналите на управление (4.1) – (4.4).



Фиг. 4.43. Схема на система за управление на биореактор

$$W_{11}(p) = \frac{SNH(p)}{Q_{aer}(p)} = \frac{-4.074 \cdot 10^{-3}}{5.87p + 1} e^{-0.5p} \quad (4.1)$$

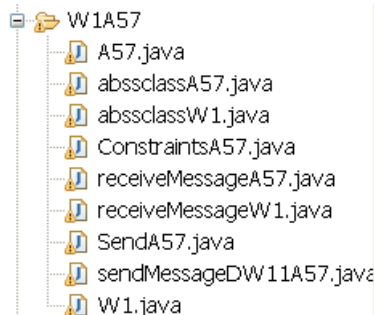
$$W_{21}(p) = \frac{SNO(p)}{Qaer(p)} = \frac{0.00124}{8.33p+1} e^{-0.5p} \quad (4.2)$$

$$W_{12}(p) = \frac{SNH(p)}{Qa(p)} = \frac{1.88 \cdot 10^{-4}}{6p+1} e^{-p} \quad (4.3)$$

$$W_{22}(p) = \frac{SNO(p)}{Qa(p)} = \frac{3.265 \cdot 10^{-4}}{6p+1} e^{-p} \quad (4.4)$$

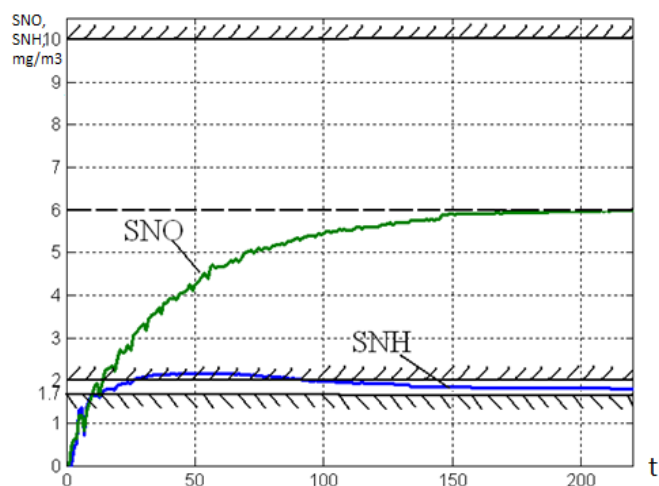
Общите характеристики на агента за оценка на качеството на системата за управление са представени в Таблица 4.3.

Таблица 4.3. Основни характеристики на агента за оценка на качеството на системата за управление

Означение на агента	Предназначение	Обем на софтуерната реализация в брой редове	Фрагменти от софтуера
A_{57}	Агент за оценка на качеството на управление	660	

Агентът е реализиран аналогично на оценяващия агент в точка 2.2 и използва рекурсивния алгоритъм за оценка на показателя на Харис.

Реализирано е управление на биореактора с MAS. Концентрациите на амониев и нитратен азот SNH и SHO попадат в зададените им граници (Фиг.4.44). Ограниченията за концентрациите са $SNO < 10\text{mg/l}$ и $1.7 < SNH < 2 \text{ mg/l}$. От Фиг. 4.44 се вижда, че концентрацията на амониев азот SNH е трудна за управление, тъй като са поставени по-строги ограничения. Прилагането на оценката за качеството на управление чрез сравняване с MVC (показател на Харис) води до намаляване на дисперсията на изходната величина и намаляване на времето за нарушаване на границите.



Фиг. 4.44. Управление на биореактор с MAS

Внедряването на агент за оценка на качеството на управление в MAS за отпадъчни води намалява значително риска от нарушаване на ограниченията и заплащане на глоби от операторите на пречиствателни станции.

4.2. Изводи към Глава 4

1. Показателят на Харис за бенчмаркинг на системи за управление е приложен за пилотна флотационна клетка и за контури за управление на промишлена система за флотация във Финландия. Показателят е удобен за използване, тъй като се изискват данни само за изхода на обекта и дава надеждна оценка за качеството на работа на отделните системи за управление.
2. Подходът за бенчмаркинг е приложен за управление на биореактор в пречиствателна станция за отпадъчни води. Внедряването на агент за оценка на качеството на системите за управление в многоагентната система значително подобрява нейната работа и позволява поддържане на изхода на процеса в тесни ограничения и/или близо до допустимите граници по отношение на изискванията за замърсяване на околната среда.
3. Подходът за бенчмаркинг на системи за управление на първо и второ йерархично ниво дава добри възможности за оптимизиране на процесите и по този начин подобряване на енергийната и ресурсна ефективност на предприятията като цяло.

Глава 5. Математическо моделиране на ПСОВ

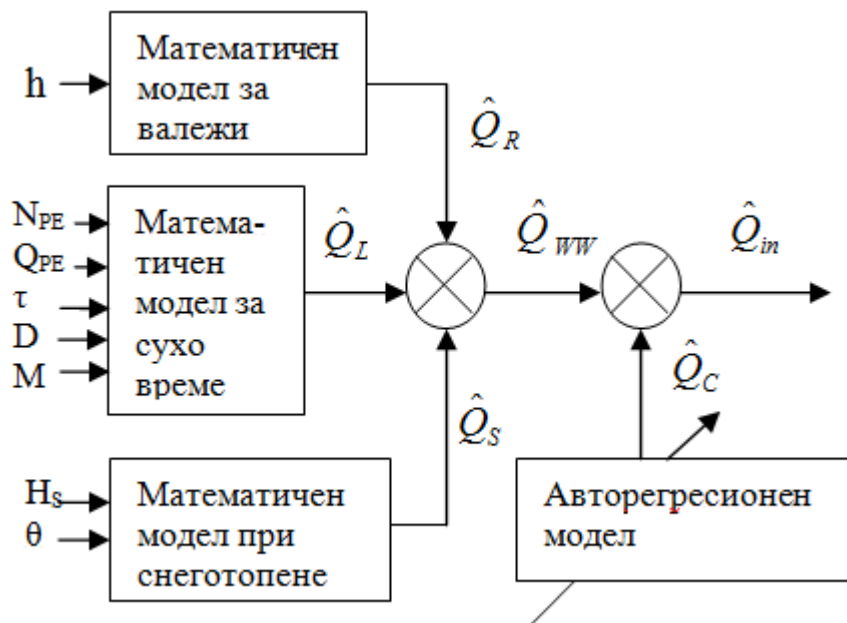
Най-често използваната технологична схема за пречиствателни станции за отпадъчни води (ПСОВ) в Република България е тази за пречистване с активна утайка (Фиг. 5.1). Тя включва механично и биологично пречистване, което в последните години се комбинира с химично утаяване на фосфора и като трети етап на пречистване - обеззаразяване от патогенни микроорганизми.



Фиг.5.1 Технологична схема на пречиствателна станция

5.2. Обобщен математичен модел за предсказване на разхода на отпадъчните води

За отчитане на възможно най-голям брой фактори влияещи върху разхода на отпадъчни води на вход на конкретна пречиствателна система е разработен представения на Фиг.5.3 обобщен математичен модел. Протичащите процеси при генериране на отпадъчни води се описват с математичен модел за сухо време, математичен модел за валежи от дъжд, математичен модел при снеготопене и авторегресионен модел за компенсиране на неточностите при предсказването.



Фиг.5.3 Блокова схема на обобщения предсказващ математичен модел

Основното количество отпадъчни води се генерират в резултат на ежедневните дейности свързани с бита и работата на жителите живеещи във водосборния район на конкретна пречиствателна система. За тяхното описание е разработен математичния модел за сухо време.

$$\hat{Q}_D(t) = f(N_{PE}, Q_{PE}, \tau, D, M, t) \quad (5.1)$$

Той описва генерирания разход на отпадъчни води Q_D като функция на броя еквивалентни жители (N_{PE}) за периода на прогнозата, разхода на отпадъчна вода генерирана от един еквивалентен жител за едно денонощие (Q_{PE}), часовото време (τ), деня от седмицата (D) и месеца от годината (M). Текущото време свързано с прогнозата е отбелязано с t .

Математичният модел отчита влиянието на валежите от дъжд върху инициирания разход отпадъчни води (Q_R) в резултат на това метеорологично явление има вида:

$$\hat{Q}_R(t) = f(h, t) \quad (5.2)$$

С h е означено предсказаното условно ниво на валежите върху водосборната повърхност.

Математичният модел описващ влиянието на снеготопенето върху инициирания разход отпадъчни води (Q_S) се представя с израза:

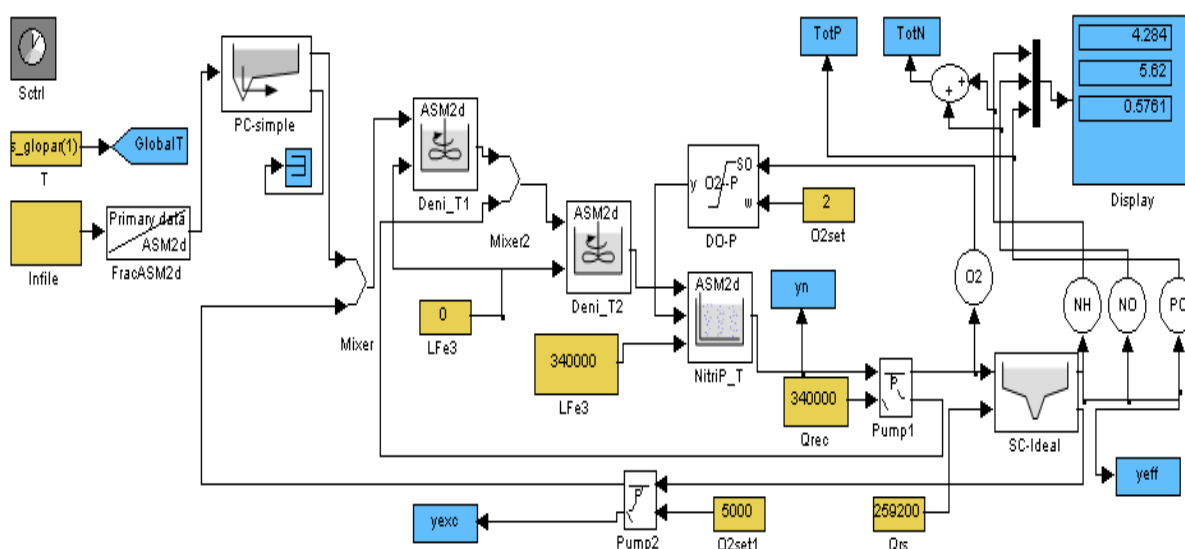
$$\hat{Q}_S(t) = f(H_S, \theta, t) \quad (5.3)$$

H_s е нивото на снежната покривка в региона, а θ е температурата на въздуха.

Авторегресионният модел е адаптивен и е предназначен за компенсиране на неточностите при предсказването.

В настоящата работа е разработен прогнозиращ модел за разхода на отпадъчни води в сухо време, като е използвана идеята за наличие на цикличност в генерирането на отпадъчни води, но математичният модел се адаптира за особеностите на населените места, за които се пречистват отпадъчните води. Мотивацията за този подход е, че в големите градове в съботни и неделни дни се наблюдава намаляване на разхода на генерираните отпадъчни води за сметка на увеличаването им в по-малките селища. Характерно за крайморските селища е неколкостратното увеличаване на генерираните отпадъчни води през ваканционните месеци.

В средата на SIMBA 6.0/MATLAB е реализирана обобщена схема на пречиствателните станции в България (Фиг.5.9)



Фиг.5.9 Обобщена симулационна схема на ПСОВ в България

Извършен е анализ на чувствителността на модела към отделни параметри и е извършена настройка за условията на България на тези параметри, които имат най-голямо влияние.

5.4 Изводи към Глава 5

1. За предсказване на разхода на отпадъчни води постъпващи на вход на системите за пречистване е разработен обобщен математичен модел. Основни негови компоненти са математичният модел за сухо време, математичният модел за валежи, математичен модел при снеготопене и настройваем авторегресионен модел за корекция на неточностите при предсказване на разхода на отпадъчни води. Представени са алгоритми за създаване на математичните модели. Приложени са резултати в процес на създаване на обобщения модел.

2. В настоящата работа е представена най-важната част от технологичната схема на инсталация за пречистване на битови отпадъчни води от най-нов тип. Чрез редуциране на настоящата схема могат да бъдат описани основните типове пречиствателни станции за битови отпадъчни води функциониращи в Република България.

3. Разработена е симулационна схема в среда SIMBA6.0/MATLAB на пречиствателна станция за отпадъчни води от вида A^2/O (anaerobic/anoxic/oxic), (анаеробно, анокси и аеробно пречистване) на базата на аналитичен модел ASM2d, който описва процесите за биологично отстраняване на въглерод, азот и фосфор в съвременните пречиствателни станции.

4. Формулирана е задачата за моделиране на ПСОВ и настройка на математичните модели и е представен алгоритъм за създаване на динамичен математичен модел на биологичното пречистване в ПСОВ.

5. Въз основа на данни за конкретна ПСОВ е изследвана чувствителността на математичния модел по отношение на неговите параметри и е извършена настройка на стойностите на параметрите на модела описващ процесите в инсталацията

6. На базата на разработената симулационна схема са изследвани енергийните разходи за конкретната пречиствателна станция за 20 дневен период.

7. Предложената симулационна схема и процедурите за моделиране и настройка на параметрите на модела на биопроцесите е основа за разработване на математични модели на съвременни ПСОВ за целите на оптимизацията им и избор на стратегии за управление в съвременните ПСОВ.

8. Симулационната схема може да се използва за изследване и анализ на очакваните резултати на етап проектиране, за бенчмаркинг на стратегии за управление и за оптимизация на енергийните разходи.

Глава 6. Управление и бенчмаркинг на ПСОВ

Въз основа на критерии за комплексна оценка на изпълнение на поставените цели може да бъде формиран следният обобщен критерий за оптималност J като претеглена сума от нормираните в интервала $[0,1]$ стойности на индивидуалните критерии $\tilde{J}_i$:

$$J = \varphi_1(\gamma_1 \tilde{J}_1 + \gamma_2 \tilde{J}_2 + \gamma_3 \tilde{J}_3) + \varphi_2 \tilde{J}_4 + \varphi_3 \left(\sum_{i=1}^s \gamma_{5i} \tilde{J}_{5i} + \gamma_6 \tilde{J}_6 + \sum_{i=1}^3 \gamma_{6i} \tilde{J}_{6i} \right) + \varphi_4 \left(\sum_{i=1}^p \gamma_{7i} \tilde{J}_{7i} \right) \quad (6.6)$$

Тегловните коефициенти на целите φ_i , $i=1,4$ се определят експертно и в зависимост от конкретната ситуация, чрез тях могат да се задават приоритетни цели. Тегловните коефициенти γ_i балансират влиянието на отделните критерии в рамките на отделната цел. Те могат да приемат и стойност 0, което значи, че съответния критерий не се използва за оценка на постигане на целта.

6.3. Оптимизация на процеса аериране при стационарни условия

Направен е предварителен анализ на системата. Основните смущаващи въздействия са: разход на отпадъчни води на вход на инсталацията (Q_{in}), концентрация на бързо биоразградим субстрат S_{Sin} и концентрация на амониев азот S_{NHin} . За провеждане на изследванията свързани с аерирането при биологичното пречистване са използвани исторически данни за смущаващите въздействия и комплектуваните наблюдения са групирани в седем клъстера.

Направени са две опростяващи допускания при решаване на оптимизационната задача. Първото опростяващо допускане е направено на базата на проведени симулационни изследвания за стационарни режими, които показват, че от енергийна гледна точка минимум разходи за аерация се постигат при условие, че се зададе едно и също задание на регулаторите за разтворен кислород по зони. На второ място се вижда, че консумираната енергия за аериране е функционално свързана с разхода на въздух $Q_{aer}(i)$ по зони. В качеството на показател за енергийните разходи е избрана

приведената стойност на $Q_{aer}(i)$ към максимално възможния разход на компресорната инсталация (Q_{max}) и е изразена в % съгласно следния израз:

$$Q_{aer}(i) = \frac{Q_{aer}^*(i)}{Q_{max}} 100, \% \quad (6.7)$$

където $Q_{aer}^*(i)$ и $Q_{aer}(i)$ са съответно текущата стойност на разхода с дименсии m^3 / h и приведената в %.

Изследвани са две хипотези, свързани с управлението.

Хипотеза 1: При решаване на оптимизационната задача за стационарни условия минимални разходи за аериране се постигат при едни и същи задания на регулаторите за разтворен кислород в отделните зони в аеробната част.

В Таблица 6.3 са представени част от проведените симулационни експерименти за номинален режим за изследване на влиянието на профил по разтворен кислород, различен от равенството между зададените концентрации за стационарни условия върху Q_{aer} .

Таблица 6.3 Симулационни експерименти за номинален режим

	1	2	3	4
$S_{O_2}(6)$, mg/l	0.95	1.18	0.85	0.85
$S_{O_2}(7)$, mg/l	0.95	1.08	0.85	0.85
$S_{O_2}(8)$, mg/l	0.95	0.98	0.95	0.85
$S_{O_2}(9)$, mg/l	0.95	0.88	1.05	1.11
$S_{O_2}(10)$, mg/l	0.95	0.78	1.1	1.15
SNH_e , mg/l	2.0	1.93	1.99	2.0
SNO_e , mg/l	9.57	9.59	9.67	69.67
Q_{aer} , %	67.3	67.8	67.6	67.7

Хипотеза 2: По-високата степен на пречистване на водите по отношение на концентрацията на амониев азот S_{NH_e} в сравнение с нормативните изисквания е свързана със завишаване на разхода на енергия.

По-високата концентрация на разтворения кислород води до по-ниска стойност за S_{NH_e} от граничната ($S_{NH_e} = 1.36 \text{ mg / l}$), но това е свързано с увеличаване на разхода на въздух за аериране с 3.4% , което от своя страна води до увеличаване на консумираната електрическа енергия.

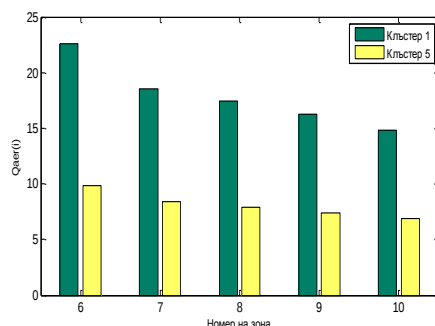
По-горе формулираната оптимизационната задача се решава за стационарни условия на биореактора за центровете на клъстерите. Независими променливи са заданията на регулаторите за разтворен кислород $S_O^0(i)$ по зони, които по време на оптимизацията се поддържат равни. Резултати от оптимизацията в стационарни условия за номиналния режим и за центровете на седемте клъстери са поместени в Таблица 6.5.

Поместените в Таблица 6.5 резултати от оптимизацията в стационарен режим позволяват реализиране на супервайзорно управление на заданията на регулаторите за концентрация на разтворен кислород (S_O^0). В случаи, когато няма системи за регулиране на разтворен кислород, изчисленият профил на аериране $Q_{aer}(6), Q_{aer}(7), \dots, Q_{aer}(10)$, може директно да бъде зададен към изпълнителните механизми за съответните зони.

Оптималното разпределение на разхода на въздух за аериране по зони за клъстери 1 и 5 са показани на Фиг.6.1. По абсцисата са нанесени номерата на аерираните зони в реактора (i), а по ординатите - разходите на въздух за аериране по зони $Q_{aer}(i), i = 6, 7, \dots, 10$. Резултатите, поместени в Таблица 6.5 и представените на Фиг.6.1 показват силната зависимост на резултатите от оптимизацията за установен режим от основните смущаващи въздействия.

Таблица 6.5 Входни и изходни данни

No	Q_{in}	S_{Sin}	S_{NHin}	S_O^0	$Q_{aer}(6)$	$Q_{aer}(7)$	$Q_{aer}(8)$	$Q_{aer}(9)$	$Q_{aer}(10)$	Q_{aer}	SNH_e	SNO_e
	m^3/h	mg/l	mg/l	mg/l	%	%	%	%	%	%	mg/l	mg/l
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	768.6	69.5	31.56	0.95	16.0	14.1	13.4	12.5	11.3	67.3	2.0	9,57
1	1075.5	41.2	20.8	1.93	22.6	18.5	17.4	16.3	14.8	89.6	2.0	7,72
2	500.5	41.4	21.1	0.69	8.8	7.5	7.1	6.7	6.2	36.3	2.0	4,19
3	801.4	67.3	30.7	1.02	16.7	14.6	13.9	12.9	11.7	69.8	2.0	9,51
4	686.7	84.2	35.5	1.02	15.0	13.3	12.6	11.7	10.6	63.2	2.0	9,84
5	560.6	40.4	20.5	0.76	9.8	8.4	7.9	7.4	6.9	40.4	2.0	4,38
6	496.1	69.8	36.9	0.58	10.6	9.6	9.0	8.3	7.3	44.8	2.0	10
7	622.2	65.2	32.5	0.76	12.9	11.4	10.8	10.1	9.1	54.3	2.0	9,57



Фиг.6.1 Оптимално разпределение на разхода на въздух

Вижда се, че сумарният разход на въздух Q_{aer} , който е показател за разходваната енергия за аериране при различните клъстери съществено се различава. Основен проблем от гледна точка на автоматичното управление на системите за пречистване на отпадъчни води е, че те много рядко работят в стационарни условия, на първо място поради наличие на денонощна цикличност и на следващо място поради наличието и на други смущения.

Въз основа на анализа на получените резултати може да се заключи, че разработването на супервайзорно управление на заданията на регулаторите за разтворен кислород, отчитайки изменението на смущаващите въздействия, ще доведе до икономия на енергия и по-добро управление като цяло на системата за пречистване.

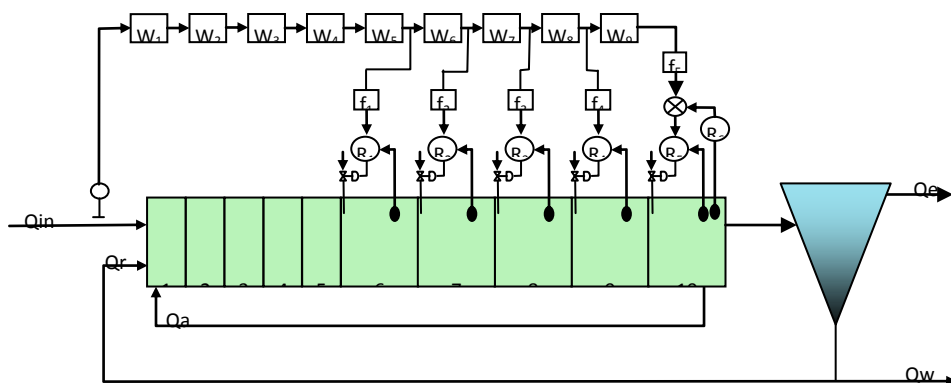
Разработена е също така супервайзорна система за управление с най-малко проблематични, както по цена, така и по надеждност сензори, която да реагира на най-важните смущаващи въздействия, така че да се минимизира разходът на енергия за аериране и да удовлетворява нормативните изисквания за пречистената вода.

Въз основа на резултатите от оптимизацията в стационарен режим (Таблица 6.5) е изведена зависимостта между заданията на регулаторите за разтворен кислород ($S_{O_2}^0$) и разхода на отпадъчна вода (Q_{in}). Най-добра апроксимация се получава със следния израз:

$$\hat{S}_{O_2}^0 = 1.1 - 2.27 \cdot 10^{-3} Q_{in} + 3 \cdot 10^{-6} Q_{in}^2 \quad (6.8)$$

Коефициентът на множествена корелация е $R = 94.6\%$.

На Фиг.6.2 е показана схемата на система за супервайзорно управление на инсталация за пречистване на отпадъчна вода с биореактор с идеално изтласкване.



Фиг.6.2 Схема на система за супервайзорно управление на биобасейн с идеално изтласкване

6.4.Супервайзорно управление на базата на бенчмаркинг на прецеденти

За решаване задачата за оптимално управление на ПСОВ на супервайзорно ниво в настоящата работа е предложен подход основаващ се на прецеденти (Case-Based Reasoning (CBR)), като е комбиниран класическият R^4 цикъл на извод по метода на прецедентите с бенчмаркинг на прецеденти, при което се използва Анализ чрез обвиване на данни (Data Envelopment Analysis (DEA)).

Структура на прецеденти за целите на супервайзорното управление

За решаване на задачата на супервайзорно управление на биологичното пречистване на отпадъчни води по метода на прецедентите традиционната структура на прецедентите е разширена с вектор на стойностите на ключовите компоненти получени при реализацията на конкретния прецедент $\mathbf{k}c_i$

$$\mathbf{k}c_i = (\mathbf{k}c_{i1}, \mathbf{k}c_{i2}, \dots, \mathbf{k}c_{im}) \quad (6.11)$$

и променлива θ_i характеризираща ефективността от приложението на конкретния прецедент и която се изчислява по метода на DEA. Променливата θ_i променя стойността си при въвеждане на нови прецеденти в базата и следващ DEA.

Структурата на прецедента придобива следния вид:

$$\mathbf{c}_i = (\mathbf{p}_i, \mathbf{s}_i, \mathbf{k}c_i, \theta_i) \quad (6.12)$$

Където:

$$\mathbf{p}_i = (Q_{in}^i, COD_{in}^i, SNH_{in}^i, SNO_D^i, SNH_D^i, MLSS^i) \quad (6.13)$$

$$\mathbf{s}_i = (Q_{aer}^i, Q_a^i, Q_r^i, Q_w^i, Q_C^i) \quad (6.14)$$

$$\mathbf{kc}_i = (COD_e^i, BOD_e^i, SNO_e^i, SNH_e^i) \quad (6.15)$$

Крайният вид на прецедента е следният:

$$\mathbf{c}_i = (Q_{in}^i, COD_{in}^i, SNH_{in}^i, SNO_D^i, SNH_D^i, MLSS^i, Q_{aer}^i, Q_a^i, Q_r^i, Q_w^i, Q_C^i, COD_e^i, BOD_e^i, SNO_e^i, SNH_e^i, \theta_i) \quad (6.16)$$

За реализиране на бенчмаркинг на прецедентите на базата на DEA в настоящата работа всеки един прецедент се комплектува с допълнителен вектор $\mathbf{add}_i$, включващ показатели, необходими за изчисляване на ефективността θ_i :

$$\mathbf{add}_i = (X_{1i}, X_{2i}, Y_{1i}, Y_{2i}) \quad (6.17)$$

Модификации в етапите на R^4 цикъла за извод

Разработеният алгоритъм за изводи на базата на прецеденти, основаващ се на бенчмаркинг на прецеденти внася следните модификации в класическия цикъл за извод.

1. На етапа Retrieve прецедентите включени в базата прецеденти се класифицират в N клъстера.

За целите на супервайзорното управление на биологично третиране на отпадъчните води клъстеризацията се извършва по отношение на стойностите на главните смущаващи въздействия Q_{in} , COD_{in} и SNH_{in} .

За всеки един от формираните клъстери се извършва бенчмаркинг на прецедентите по метода на (DEA) за ориентиран към входовете CCR модел, като се използват допълнителните вектори към всеки прецедент $\mathbf{add}_i$ (6.17). По този начин на всеки един от прецедентите във всеки клъстер съответства оценка за ефективността му θ_{ij} , $i=1,2,\dots,n$, $j=1,2,\dots,N$

При възникване на нов проблем $\mathbf{p}_{new}$ той се отнася към един от вече формираните клъстери. За новия проблем в конкретния клъстер се извлича един най-близък съсед или група от прецеденти – k -най-близки съседи, имащи най-голямо

сходство с формулирания целеви проблем. Всеки един от въпросните прецеденти е с оценена ефективност θ_{ij} по DEA.

2.На етапа Reuse за случаите, когато е избран само един близък съсед се подхожда съгласно класическия метод като за решение на новия проблем s_{new} се присвоява решението на най-близкия съсед s_{NN} .

За случаите с k - най-близки съседи решението се изчислява въз основа на адаптиране на решенията на най-близките съседи с отчитане на ефективността на всеки един от избраните прецеденти. За целта тегловните коефициенти $\varphi_i, i=1,2,...,k$, участващи при формиране на новото решение (9) се изчисляват по изрази:

$$\varphi_i = \theta_i / \sum_{i=1}^k \theta_i, i=1,2,...,k \quad (6.18)$$

Определени по този начин, тегловните коефициенти φ_i изпълняват условието сумата от стойностите на тегловните коефициенти за k -най-близките съседи да е равна на единица ($\sum_{i=1}^k \varphi_i = 1$).

3.На етапа Revise се прогнозира очакваните стойности на ключовите компоненти при евентуалната реализация на конкретния прецедент $k\hat{c}_{new}$.

$$k\hat{c}_{newj} = \sum_{i=1}^k \varphi_i k c_{ij}, j=1,2,...,m \quad (6.19)$$

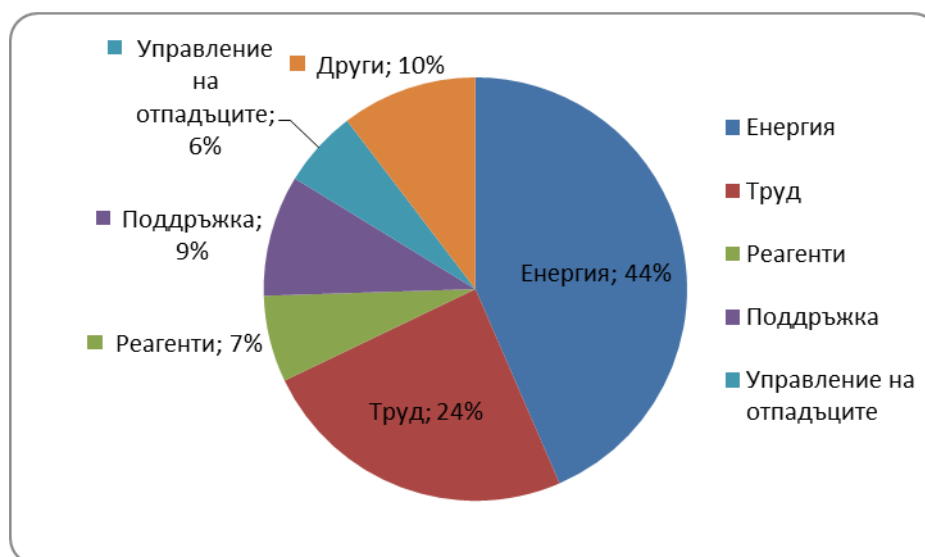
При условия, че очакванията удовлетворяват заложените изисквания, получените задания за регулаторите $sp_{newj} = s_{newj}, j=1,2,...,q$ постъпват към регулаторите на първо йерархично ниво.

4.На етапа Reatain се взема решение дали ново реализирано управление да бъде включено в базата прецеденти.

Прецедентът описващ новореализираното управление се отнася към един от предварително формираните клъстери. За този клъстер по метода DEA прецедентите се ранжират по ефективност. Ако новият клъстер е с ефективност по-висока или равна поне на един от другите включени към съответния клъстер, то той се включва в базата прецеденти. В противен случай отпада от следваща употреба.

6.5. Бенчмаркинг на ПСОВ чрез DEA

Направен е анализ на разходите в пречиствателна станция за над 100000 еквивалент-жители. Разпределението на разходите е представено на Фиг. 6.6.



Фиг.6.6 Оперативни разходи на ПСОВ за над 100000 еквивалент-жители, %

Разходите за енергия и реагенти подлежат на оптимизиране, както на етап проектиране, така и на етап експлоатация на пречиствателната станция. Няма връзка между качеството на пречистване и оперативните разходи, дори обратно – най-качественото пречистване обикновено е свързано с ниски разходи, което е показател, че квалификацията на персонала също е от съществено значение за работата на ПСОВ.

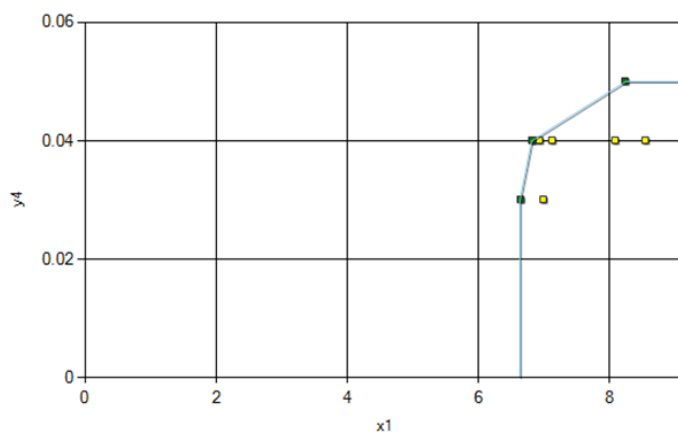
За да се извърши коректно сравнение по натоварване на ПСОВ, показателите за оперативните разходи и за резултатите са отнесени към общото количество пречистена вода в хил.м³ за година.

Тъй като разходите за пречистване зависят от големината на ПСОВ, прилаганата технология, средногодишната замърсеност на водите, климата и други фактори, сравнението следва да се извърши за пречиствателни станции със сходни условия.

Въз основа на реални данни от ПСОВ са генерирани данни за десет виртуални ПСОВ със сходни показатели и работещи при сходни условия по отношение на външните фактори (Таблица 6.9).

Извършен е анализ чрез обвиване на данните с помощта на Интернет базиран софтуер: Data Envelopment Analysis Online Software. Анализът е направен по отношение на показателите за енергия и реагенти и за пречистване на азот и фосфор.

Обвиващата данните крива за показателите x_1, y_4 е показана на Фиг.6.8, а ефективността на изследваните станции на Фиг. 6.9.



Фиг.6.8 Обвиваща крива за данните по координати x_1, y_4

Таблица 6.9 Оперативни разходи и резултатите от работата на 10 виртуални ПСОВ

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	y1	y2	y3	y4
ПСОВ 1	6.83	3.86	1.13	1.90	1.32	1.65	0.68	2.05	0.21	0.04
ПСОВ 2	8.07	3.8	1.1	2.02	1.24	1.93	0.57	1.81	0.28	0.04
ПСОВ 3	6.99	5.39	1.36	1.68	1.30	2.27	0.76	2.58	0.22	0.03
ПСОВ 4	8.24	4.34	1.01	1.74	0.98	1.76	0.73	2.65	0.28	0.05
ПСОВ 5	9.12	4.66	1.35	1.56	1.25	1.73	0.60	2.10	0.23	0.03
ПСОВ 6	6.63	4.41	1.1	1.63	1.26	1.91	0.61	1.96	0.21	0.03
ПСОВ 7	6.81	5.24	1.05	1.92	1.19	1.74	0.70	2.09	0.24	0.04
ПСОВ 8	7.12	4.27	1.38	1.53	1.26	2.26	0.76	2.02	0.25	0.04
ПСОВ 9	6.92	4.34	1.42	1.77	1.30	2.22	0.69	2.50	0.28	0.04
ПСОВ 10	8.54	4.48	1.06	1.59	1.21	1.96	0.74	2.58	0.28	0.04

	Efficiency	Graph
ПСОВ 1	96.5 %	97%
ПСОВ 2	99 %	99%
ПСОВ 3	79.4 %	79%
ПСОВ 4	100 %	100%
ПСОВ 5	70.1 %	70%
ПСОВ 6	84.7 %	85%
ПСОВ 7	98.2 %	98%
ПСОВ 8	94.7 %	95%
ПСОВ 9	100 %	100%
ПСОВ 10	96.1 %	96%

Фиг.6.9 Ефективност на изследваните пречиствателни станции

Резултатите за ефективността и възможностите за повишаване на ефективността за всяка една от пречиствателните станции са представени в Таблица 6.10. Посоката на стрелките показва на колко могат да бъдат намалени разходите за изследваните показатели за всяка от станциите.

Таблица 6.10 Възможности за повишаване на ефективността на ПСОВ

	х1	х3	Ефективност
ПСОВ 1	6.83 → 6.59	1.13 → 0.808	0.97
ПСОВ 2	8.07 → 7.99	1.1 → 1.09	0.99
ПСОВ 3	6.99 → 5.55	1.36 → 1.08	0.79
ПСОВ 4	8.24	1.01	1.00
ПСОВ 5	9.12 → 6.39	1.35 → 0.95	0.70
ПСОВ 6	6.63 → 5.62	1.1 → 0.93	0.85
ПСОВ 7	6.81 → 6.69	1.05 → 0.98	0.98
ПСОВ 8	7.12 → 6.74	1.38 → 1.09	0.95
ПСОВ 9	6.92	1.42	1.00
ПСОВ 10	8.54 → 8.21	1.06 → 1.02	0.96

6.6 Управление на биологичното пречистване на отпадъчни води по метода на прецедентите

В настоящата дисертация е приложен бенчмаркинг подходът за системите за управление на ПСОВ. В обобщения критерий за оптималност (6.6), освен критерия за качество на процесите (наречен максимизиране на сигурността) се включват още критерии за минимизиране на влиянието върху околната среда, операционните разходи и изпълнението на европейските изисквания.

В България критерият се опростява, тъй като компонентите $J_1 - J_3$ не се отчитат от органите по контрол. Оперативният критерий J_4 отчита разходите за енергия и реагент, а критерият J_{5i} - качеството на управление, изразено чрез дисперсията на изхода.

6.6.1.Формиране на критерий за оптималност

Ако приемем, че рискът от възникване на проблеми с утаяването на суспендираните частици J_6 в България е минимален, критерият (6.6) придобива вида:

$$J = \varphi_2 \tilde{J}_4 + \varphi_3 \sum_{i=1}^s \gamma_{5i} \tilde{J}_{5i} + \varphi_4 \left(\sum_{i=1}^p \gamma_{7i} \tilde{J}_{7i} \right) \quad (6.20)$$

Прецедентът (2.16), който в т. 2.3 съдържахме само относителната ефективност, изразена чрез разходите за енергия и качеството на системите за управление, ще включва обобщения критерий с глобите (6.20):

$$c_i = (p_i, s_i, J) \quad (6.21)$$

При оптимално управление на ПСОВ на национално ниво е достатъчно да се прилага критерият (6.20), докато при развитие на такава схема в европейски или световен мащаб е необходимо да се използва по-общият критерий (6.6).

При изпълнение на определени условия критерият (6.20) може да бъде опростен. При условие, че предмет на разглеждане е само консумираната енергия и не се отчитат разходите за химикали, които са с много по-малък принос към операционните разходи, компонентът $\varphi_2 \tilde{J}_4$ може да бъде представен като cP , където c е цената на електроенергията, lv/kWh . Консумираната електрическа енергия P се изчислява по следния израз:

$$P = P_{aer} + P_a + P_r, kWh/d \quad (6.22)$$

В (6.22) е включена консумираната електрическа енергия за аериране на аеробната част на биобасейна P_{aer} и енергията консумирана от помпите за вътрешен и външен рецикл, съответно P_a и P_r .

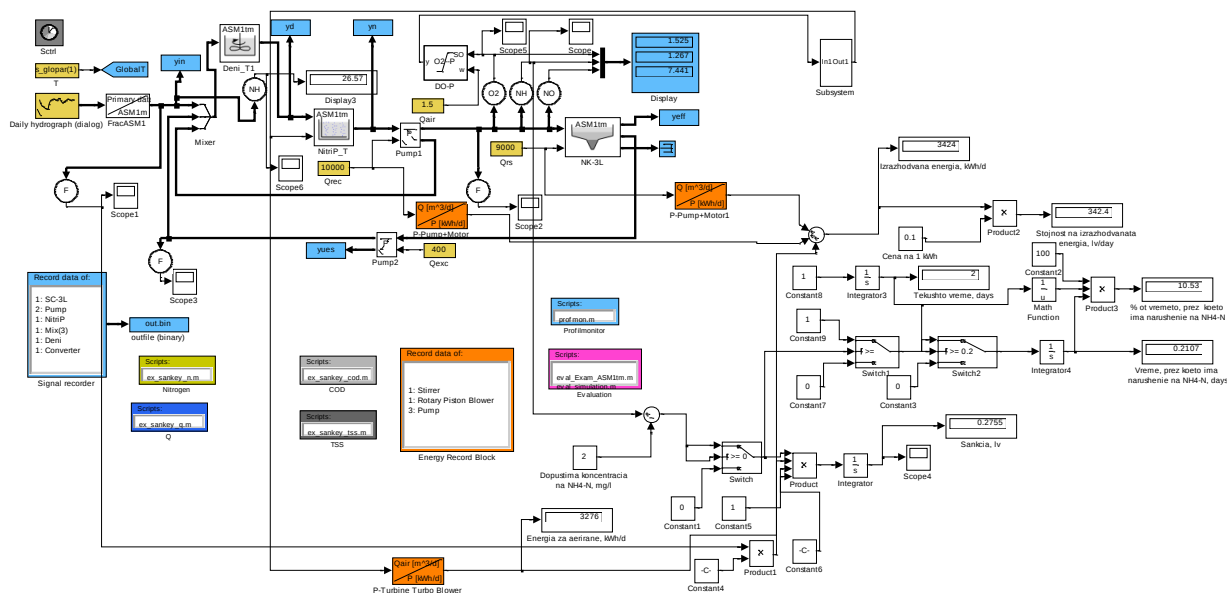
Влиянието на компонента $\varphi_3 \sum_{i=1}^s \gamma_{5i} \tilde{J}_{5i}$ в критерия (6.20) за настоящото изследване може да бъде пренебрегнато, понеже се разглежда само една система за автоматично регулиране, а именно за стабилизация на концентрацията на разтворен кислород, т.е. $s = 1$. На второ място, особеностите на системата за автоматично регулиране на разтворен кислород DO позволяват тя да бъде настроена за реализиране на апериодичен преходен процес.

Изследванията се провеждат по два отделни критерия. Единият е консумираната енергия P или съответстващите парични разходи $MC, lv/d$. Вторият критерий отразява допустимия брой нарушения съгласно българското законодателство.

6.6.2.Разработване на симулационна схема за провеждане на изследванията и генериране на оптимални прецеденти

За изследване на процеса и генериране на начална база (Case-Base) с оптимални прецеденти е разработена симулационна схема на биологичното пречистване на отпадъчни води, която включва биобасейн с аноксик и аеробна част на биобасейна и вторичен утаител (Фиг.6.12). Целта на изследването е генериране на оптимални прецеденти по отношение на поддържаната концентрация на разтворен кислород в аеробната част на биобасейна DO при различни условия, определяни от състава на

входящата отпадъчна вода и от температурата на околната среда върху разходите за енергия за биологичното пречистване от една страна, а от друга върху нарушаване на допустимото замърсяване пречистените води с амониев азот $NH_4 - N$.



Фиг. 6.12. Симулационна схема на инсталация за биологично пречистване на отпадъчни води в среда Matlab/SIMBA

Симулационната схема включва биобасейн с аноксик и аеробна част и вторичен утайтел. За оценка на ефективността на различните режими на работа е включен оценяващ блок за изчисление на интегралния критерий.

6.6.3. Предварителни симулационни изследвания

При определени входни условия се изследват следните зависимости:

$$P = f(DO) \quad (6.25)$$

$$MC = f(DO) \quad (6.26)$$

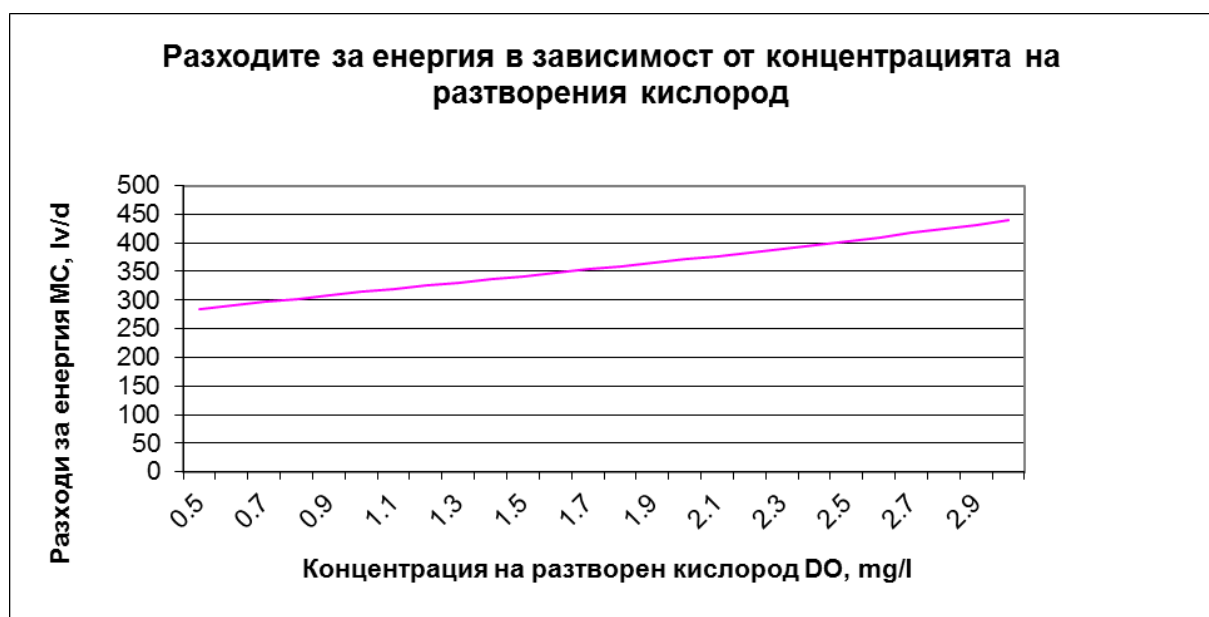
$$\tilde{\tau} = f(DO) \quad (6.27)$$

Това изследване позволява определяне на диапазона на ефективна работа на инсталацията по отношение на супервайзорно управление на заданието за разтворен кислород (DO).

В Таблица 6.11 са представени симулационните изследвания за диапазона на ефективна работа. Графично зависимостта е представена на Фиг.6.16.

Таблица 6.11 Симулационни изследвания за диапазона на ефективна работа

No	DO	P	MC	$\tilde{\tau}$
	mg/l	kWh/d	lv/d	%
1	0,5	2833	283,3	58,36
2	0,6	2906	290,6	47,31
3	0,7	2968	296,8	40,78
4	0,8	3025	302,5	32,98
5	0,9	3084	308,4	27,75
6	1	3143	314,3	23,89
7	1,1	3200	320	20,75
8	1,2	3256	325,6	18,04
9	1,3	3311	331,1	15,55
10	1,4	3371	337,1	13,18
11	1,5	3424	342,1	10,53
12	1,6	3478	347,8	7,341
13	1,7	3536	353,6	6,409
14	1,8	3592	359,2	5,584
15	1,9	3647	364,7	4,81
16	2	3711	371,1	3,92
17	2,1	3768	376,8	3,054
18	2,2	3836	383,6	2,045
19	2,3	3898	389,8	0
20	2,4	3964	396,4	0
21	2,5	4029	402,9	0
22	2,6	4101	410,1	0
23	2,7	4172	417,2	0
24	2,8	4241	424,1	0
25	2,9	4318	431,8	0
26	3	4396	439,6	0



Фиг.6.16 Разходите на енергия като функция на концентрацията на разтворен кислород



Фиг. 6.17 Времето през, което са нарушени ограниченията като функция на концентрацията на разтворен кислород

Резултатите показват, че с увеличаване на концентрацията на разтворения кислород DO разходите нарастват линейно, като за сметка на това по нелинейна зависимост намалява времето, през което се нарушава ограничението за амониев азот (Фиг.6.17). От Таблица 6.11 се вижда, че точното спазване на ограничението по отношение на $\tilde{\tau}$ се реализира при концентрация на разтворения кислород $DO = 2.3 \text{ mg/l}$. В този случай паричните разходи са $MC = 389.8 \text{ lv/d}$. При водене на процеса при нарушение на допустимите ограничения за амониев азот ($NH_4 - N$) в продължение на $\tilde{\tau} = 12.5\%$, на границата на допустимите нарушения, $DO = 1.47 \text{ mg/l}$ и паричните разходи намаляват значително $MC = 338.36 \text{ lv/d}$.

6.6.4 Генериране на прецеденти за управление на концентрацията на разтворен кислород

За разработване на начална база знания (Case-Base) с оптимални прецеденти е избран подходът симулационните експерименти да се проведат в точките на D-оптимален план, като е избран несиметричен квази D-оптимален план. За всяка точка на плана се провеждат динамични симулации при смущения около означените в плана стойности за дебита на постъпващата вода за пречистване Q_{in} , химичната потребност на кислород COD_{in} и общия кислород по Келдал TKN_{in} .

Оптимизираните прецеденти са представени в Таблица 6.13. За всеки прецедент са изчислени разходите на електроенергия за пречистването P и съответните парични разходи MC .

Таблица 6.13 Резултати от оптимизацията на размера на аеробния обем и концентрацията на разтворен кислород DO

No	Начална база оптимални прецеденти							
	Атрибути, описващи проблема				Решение за $\tilde{\tau} = 0\%$		Разходи	
	T	Q_{in}	COD_{in}	TKN_{in}	Препоръки за аеробния обем	DO	P	MC
	$^{\circ}C$	m^3 / d	mg / l	mg / l		mg / l	kWh / d	lv / d
1	12,5	9500	500	45	Аеробен обем+2470m3	4,5	4632	463,2
2	20	7000	400	45	Аеробен обем	1	2632	263,2
3	20	9500	500	35	Аеробен обем	0,7	3061	306,1
4	20	7000	450	35	Аеробен обем	0,7	2439	243,9
5	20	9500	400	35	Аеробен обем	0,95	2864	286,4
6	12,5	7000	400	35	Аеробен обем+2470m3	0,7	1904	190,4
7	20	7000	500	45	Аеробен обем	0,8	2714	271,4
8	16,25	9500	400	45	Аеробен обем+2470m3	1,6	3296	329,6
9	12,5	8250	400	45	Аеробен обем+2470m3	3,5	3373	337,3
10	16,25	8250	450	40	Аеробен обем	2,3	2969	296,9
11	12,5	7000	500	35	Аеробен обем+2470m3	0,7	2077	207,7
12	20	9500	450	45	Аеробен обем	3,05	4524	452,4
13	12,5	7000	450	45	Аеробен обем+2470m3	1,1	2248	224,8
14	12,5	9500	400	40	Аеробен обем+2470m3	2,8	3170	317
15	12,5	9500	450	35	Аеробен обем+2470m3	0,75	2384	238,4
16	16,25	7000	400	35	Аеробен обем	0,75	1983	198,3
17	20	8250	400	35	Аеробен обем	0,7	2538	253,8
18	20	7000	400	40	Аеробен обем	0,7	2413	241,3
19	20	7000	500	35	Аеробен обем	0,7	2569	256,9
20	16,25	7000	500	45	Аеробен обем	1,7	2642	264,2
21	20	9500	500	40	Аеробен обем	1,15	3362	336,2
22	12,5	8250	500	35	Аеробен обем+2470m3	0,7	2290	229
23	20	8250	500	45	Аеробен обем	1,3	3236	323,6
24	16,25	9500	500	35	Аеробен обем	1,1	2775	277,5
25	12,5	7000	500	40	Аеробен обем+2470m3	0,7	2120	212

Таблица 6.13 е предназначена за начална база с прецеденти за процедурата за изводи основаващи се на прецеденти (Case-Based Reasoning (CBR)).

6.7.Изводи към глава 6

1.Направено е изследване на ефективността на пречиствателни станции за отпадъчни води за целите на техния бенчмаркинг.

2.Приведени са математични модели за материален баланс по кислород. Формулирана е задачата за оптимизация на процеса аериране при стационарни условия. Въз основа на история на процеса на пречистване са комплектувани данни за смущаващите въздействия, които са класифицирани в седем клъстера. В резултат на проведената оптимизация са намерени оптималните стойности на разтворен кислород по зони и профилът на въздух за аериране за центровете на клъстерите.

3.Разработена е система за супервайзорно управление на процеса аериране, като в качеството на водеща променлива се използва приведения към зоната разход на отпадъчни води.

4.Приложени са математичният апарат на DEA, CCR математичните модели ориентирани съответно към входовете и изходите, подходите на супер-ефективността и обвиващ анализ, основаващ се на резерви.

5.Извършен е предварителен анализ на оперативните разходи на ПСОВ и са избрани индикаторите за оценка на ефективността им.

6.В качеството на пример е извършен анализ по метода на обвиване на данни на ефективността на десет виртуални ПСОВ. Представени са възможностите за повишаване на ефективността на всяка една от тях.

7.Посочени са насоките на развитие на онлайн бенчмаркинг на ниво ПСОВ от определен тип с отчитане на параметрите, които влияят на разходите.

8.Разработена е симулационна схема за биологично пречистване на отпадъчни води, включваща модули за изчисляване на консумацията на енергия, паричните разходи и продължителността на нарушаване на ограниченията.

9.Създадена е база с прецеденти за управление на концентрацията на разтворен кислород и обема на аеробната част на биореактора за постигане на точно спазване на нормативните ограничения.

Приноси

В изпълнение на поставената цел за изследване на методите за мониторинг и анализ на качеството на работа на системи за управление и прилагане на подхода на бенчмаркинг и нови методи и алгоритми за отделните нива на управление, са получени следните по-важни резултати:

- Изследвани са класическите детерминистични и стохастически методи за оценка и подходът на бенчмаркинг, който е приложен при системи за управление на първо и второ йерархично ниво. Направен е анализ на приложимостта на

бенчмаркинг на отделните етапи от проектиране, настройка и работа на системите за управление.

- Разработен е и тестван рекурсивен алгоритъм за оценка на системи за управление чрез показателя на Харис и е направен анализ на приложимостта на показателя на Харис. Методите на бенчмаркинг са приложени в многоагентни системи, като разработеният агент за оценка на базата на показателя на Харис допълва функционалността на системите за управление.
- Разработени са обобщена симулационна схема на инсталация за биологично пречистване на отпадъчни води, процедура за настройка на модела за конкретна пречиствателна станция и модули за изчисляване на консумацията на енергия, паричните разходи и продължителността на нарушаване на ограниченията при различни управления.
- Проведената е оптимизация и са намерени оптималните стойности на разтворен кислород по зони и профилът на въздух за аериране за центровете на клъстерите и е разработена система за супервайзорно управление на процеса аериране, като в качеството на водеща променлива се използва приведеният към зоната разход на отпадъчни води.
- Разработена е модификация на метода за изводи на базата на прецеденти, който се основава на бенчмаркинг на прецеденти въз основа на обвиване на данни. Разработена е база с прецеденти за управление на концентрацията на разтворен кислород и обема на аеробната част на биореактора за постигане на точно спазване на нормативните ограничения.
- Разработен е алгоритъм за оценка на системи за управление, основаващ се на извод на базата на прецеденти, който е приложим за широк спектър системи за управление в пречиствателни станции за отпадъчни води
- Разработен е подход, който е приложим за ПСОВ и се основава на анализ по метода на обвиване на данни (DEA). Приложен е за оценка на ефективността на десет виртуални ПСОВ. Представени са възможностите за повишаване на ефективността на всяка една от тях.

Различните етапи в проектирането и изследването на предложените в дисертацията методи и алгоритми за бенчмаркинг са докладвани на национални и международни конференции и са публикувани в научни списания. Част от разработките са приложени при анализ на работата на биобасейните в Софийската пречиствателна станция – Кубратово.

Публикации по дисертационния труд

1. Jämsä-Jounela, S-L., R. Poikonen, Z. Georgiev, U. Zuehlke, K. Halmevaara, Evaluation of Control Performance: Methods and Applications *Proceedings of IEEE CCA/CACSD 2002*, Glasgow, Scotland, 18-20 September 2002, vol. 2, pp. 681-686
2. Hadjiski, M., Z.Georgiev (2005). Benchmarking of Process Control Performance, *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*, 55, pp. 103-110
3. Боишина, В., З. Георгиев , Агентно базиран бенчмаркинг за топлинни обекти, Международен симпозиум Управление на топлоенергийни обекти и системи,Бобов дол, България, 3-4 ноември 2005, стр. 65-68
4. Georgiev, Z.,Benchmarking of HVAC Control Systems, *Proceedings of IFAC WS ESC'06 Energy Saving Control in Plants and Buildings*, October 2-5, 2006 Bansko, Bulgaria, pp. 225-230
5. Хаджийски, М., З. Георгиев, Интегрирано проектиране на технологичната част на системите за отопление, вентилация и климатизация и системите им за автоматично управление, Сборник с доклади от международната научно-практическа конференция „Интегриране на енергоефективни решения и възобновяеми енергийни източници в нови и реновирани сгради, София, България, 26-27 юни 2008, стр. 135-141
6. Георгиев, З., С. Юруков, Прогнозиране на разхода на отпадъчни води, Международен симпозиум Управление на топлоенергийни обекти и системи, Паничище, България, 6-7 ноември 2009, стр. 33-36
7. Бошнаков, К., Ф. Липинг, З. Георгиев, В. Коцева, Управление на процеса на аериране в биобасейни с минимизиране на енергийните разходи, Материали от

Международен симпозиум “Управление на топлоенергийни обекти и системи”,
12-13.11.2010, Паничище, стр. 55-60

8. Бошнаков, К., Ф. Липинг, З. Георгиев, В. Коцева, Минимизиране на енергийните разходи чрез супервайзорно управление на аерирането в биобасейни, Автоматика и информатика, бр. 4, 2010, стр. 21-25
9. Георгиев, З., К. Бошнаков, Математично моделиране на процесите при пречистване на отпадъчни води с биологично и химично отстраняване на фосфора, Сборник с доклади от Международна конференция „Автоматика и информатика’12”, София, България, 3–5 октомври 2012, pp. 154-158
10. Бошнаков, К., М. Хаджийски, З. Георгиев, Бенчмаркинг на пречиствателни станции за отпадъчни води, Сборник доклади на Международния симпозиум "Управление на топлоенергийни обекти и системи", Баня, България, 8-9 ноември 2012, стр.13-17.
11. Boshnakov, K., Z. Georgiev, Intelligent System for Control of Biological Wastewater Treatment Based on Benchmarking of Cases, Information, Communication and Control Systems and Technologies, No 1, 2012, pp.41-46.
12. Hadjiiski M., K. Boshnakov, Z. Georgiev, Benchmarking of Industrial Control Systems via Case-Based Reasoning, Anniversary Scientific Conference with International Participation, 4-5 June 2013, University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria (In print)

Проекти по темата на дисертацията

- Design and Implementation of a Control Performance Monitoring Software (2002, Helsinki University of Technology)
- BESS - Бенчмаркинг и енергиен мениджмънт в малки и средни предприятия (2004-2007)
- Интелигентно супервайзорно управление и оптимизация на процеси при пречистване на отпадъчни води (България – Китай) (2009-2011)
- Обследване за енергийна ефективност на промишлената система и сгради от Софийска пречиствателна станция за отпадъчни води и Анализ на работата на биобасейните и въздуходувките в СПСОВ Кубратово по новата технологична схема за пречистване на азот и фосфор (2010-2011)