



Радой Стрезимиров Дуковски

**ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИЕ НА
ТЕХНОЛОГИЧНИ ОБЕКТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

научна област: 5. Технически науки

професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

докторантска програма: 02.21.07. Автоматизирани системи за обработка на
информация и управление

Научен ръководител: акад. Васил Стоянов Сгурев

София, 2025 г.

Увод

Актуалност на темата

Насоката на изследванията в настоящия дисертационен труд е процеса вземане на решения при управлението на технологични обекти, което да позволи постигане на синергичен ефект. Това съответства на духа на съвременните изследвания с тяхната многопосочност, широк обхват, гъвкавост и възможност за адекватна реакция в непредвидени екстремни ситуации. Проблемът за управлението на обекти с недостатъчен брой управляващи въздействия е поставян в последните 30 години.

В настоящия дисертационен труд са постигнати оригинални резултати, свързани с анализ на процесите на вземане на решения при управление на реално функциониращи технологични обекти от енергетиката и химическата промишленост, като са разработени аналитични и експериментални модели.

Цели и задачи на дисертацията

Настоящият дисертационен труд си поставя за цел да се разработят със средствата на съвременните системи за проектиране и автоматично управление, модели на реални технологични обекти за подпомагане на процеса на вземане на решения при управлението им.

За постигането на така поставената цел, са формулирани следните задачи:

1. Да се проведе задълбочен теоретичен анализ на системите за вземане на решения и на предизвикателствата, които възникват при приложението им, представени със средствата на съвременната теория.

2. Да се анализира действието на топлоенергиен технологичен обект за управление - парогенератор, като се разработят модели на системите за вземане на решения при управление на ниво на пароводна смес и на ниво в барабана.

3. Да се предложи система за вземане на решения за автоматично регулиране на нивото на пароводната смес в барабана при работа в реално време на индустриален парогенератор.

4. Да се проектира мембранен биореактор за добив на дрожди *Hansenula polymorpha*, като се определи необходимата скорост на аерация за постигане на минимална скорост на деформация на материала в граничния слой на мембранната от

0.8 [s⁻¹]. Също така да се определи необходимата скорост на разбъркване за постигане на желаната максимална скорост на деформация в камерата за клетъчен растеж от 15 [s⁻¹].

5. Да се анализира действието на химикотехнологичен обект за управление - крикет филтър, като се извърши симулационно моделиране на системите за вземане на решения при управлението му.

6. Да се предложи система за вземане на решения при работа в реално време на индустриален крикет филтър.

7. Да се анализира действието на химикотехнологичен обект за управление - двуслоен нагревател, като се извърши симулационно моделиране на системите за вземане на решения при управлението му.

8. Да се предложи система за вземане на решения при работа в реално време на индустриален двуслоен нагревател.

Структура на съдържанието

Дисертационният труд е структуриран в увод, четири глави, заключение – резюме на получените резултати, декларация за оригиналност и библиография.

В списъка на публикациите по дисертационния труд, са включени пет публикации, от които една статия в списание с JCR-IF (Web of Science) и SJR (Scopus) - *Bulgarian Chemical Communications Journal*, три статии в списание *Engineering Sciences* и един доклад включен в трудовете на международната конференция - *9th IEEE International Conference on Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering – BdKCSE'2025*, който е в базата данни на *IEEE Xplore Digital Library* и се реферира в Scopus. Всички публикации са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация, с което са спазени изискванията на закона за развитието на академичния състав в Република България.

ПЪРВА ГЛАВА

ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА ПРОЦЕСА ЗА ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ

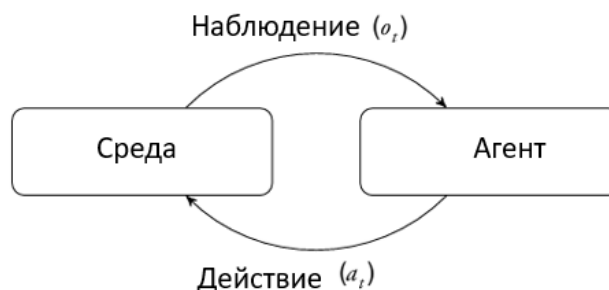
Вземането на решения в условия на неопределеност, включително избягване на сблъсъци със самолети, управление на горски пожари и реагиране при бедствия е процес с висока степен на важност. Когато се проектират автоматизирани системи за подпомагане на вземането на решения, е важно да се вземат предвид различните източници на неопределеност при вземането или препоръчването на решения. Отчитането на тези източници и внимателното балансиране на множеството цели на системата може да бъде много трудна задача.

Ще бъдат дискутирани тези предизвикателства от изчислителна гледна точка, като се представи теорията зад моделите и алгоритмите за вземане на решения, а след това се илюстрира теорията върху набор от реални проблеми.

1.1. Вземане на решения с помощта на интелигентни агенти.

Агентът е нещо, което действа въз основа на наблюдения върху средата си. Агентите могат да бъдат физически обекти, като хора или роботи, или могат да бъдат нефизически обекти, като например системи за подпомагане на вземането на решения, които са изцяло внедрени в софтуер.

Както е показано на Фигура 1.1, взаимодействието между агента и света следва цикъл „наблюдение-действие“ [1, 10].



Фигура 1.1 Взаимоотношения между средата и агента

Съществуват много различни методи за проектиране на агенти за вземане на решения. В зависимост от приложението, някои методи може да са по-подходящи от други. Най-прекият метод за проектиране на агент за вземане на решения е да се

предвидят всички различни сценарии, в които агентът може да се окаже, и след това изрично да се програмира агентът да прави това, което е желано. Подходът на изрично програмиране може да работи добре за прости проблеми, но той поставя голяма тежест върху проектанта да предостави пълна стратегия. Предложени са различни езици за програмиране на агенти и рамки, за да се улесни програмирането им [2, 7, 8].

1.2. Вземане на решения с помощта на вероятностни модели.

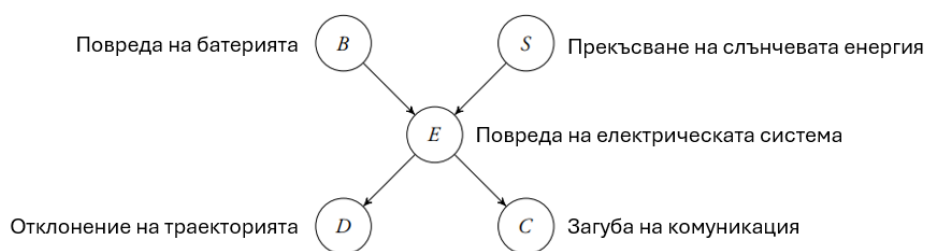
Рационалното вземане на решения изисква разсъждения относно собствената несигурност и целите. Решенията с вероятностни модели се основават върху представянето на неопределеността като вероятностно разпределение. Проблемите от реалния свят изискват разсъждения относно разпределенията по много различни променливи. В литературата са представени средства за конструиране на такива модели и как да се използват, за да се правят изводи [11, 16].

Неопределеността може да възникне и от практически и теоретични ограничения в способността ни да предвиждаме бъдещи събития. Например, предсказването на точно как човешки оператор ще реагира на съвети от система за подпомагане на вземането на решения би изисквало, наред с други неща, подробен модел на това как работи човешкият мозък. Дори пътищата на спътниците могат да бъдат трудни за предвиждане. Въпреки че, Нютоновата физика позволява високо прецизни прогнози за траекториите на спътниците, но спонтанните повреди в двигателите за регулиране на ориентацията могат да доведат до големи отклонения от номиналния път.

Ограничение при използването на Гаусово разпределение е, че то е унимодално, което означава, че има точка в разпределението, в която плътността се увеличава монотонно от едната страна и намалява монотонно от другата. Съществуват различни начини за представяне на непрекъснати разпределения, които са мултимодални. Един от начините е да се смеси колекция от унимодални разпределения [4, 11, 16].

1.3. Вземане на решения с помощта на Байесова мрежа.

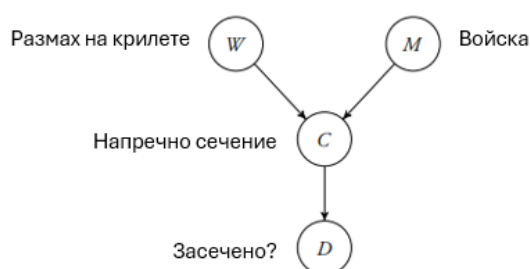
Байесовата мрежа е компактно представяне на съвместно разпределение. Структурата на мрежата е представена като граф, състоящ се от възли и насочени ребра. Всеки възел съответства на случайна променлива. Насочените ребра свързват двойки възли, като циклите в графа са забранени.



Фигура 1.2 Примерна структура на Байесова мрежа

Фигура 1.2 показва примерна Байесова мрежа за проблем със сателитно наблюдение, включващ пет двоични променливи. За щастие, повредата на батерията и повредите на слънчевия панел са редки, въпреки че повредите на слънчевия панел са малко по-вероятни от повредите на батерията [1, 4, 13, 16, 18].

Причината, поради която една Байесова мрежа може да представя съвместни разпределения с по-малко независими параметри се дължи на допусканията за *условна независимост*, кодирани в нейната графична структура. Ако допусканията за условна независимост, направени от Байесовата мрежа, са невалидни, тогава рискуваме да не моделираме правилно съвместното разпределение.



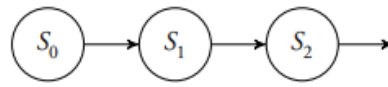
Фигура 1.4 Пример за хибридна Байесова мрежа

Примерите в тази глава досега включваха двоични променливи, но Байесовите мрежи могат да съдържат смес от дискретни и непрекъснати променливи. Байесовите мрежи с дискретни и непрекъснати променливи често се наричат хибридни Байесови мрежи. Фигура 1.4 показва примерна хибридна Байесова мрежа, представяща връзката между характеристиките на самолета, тяхното радарно напречно сечение и способността на радара да открие цел.

1.4. Вземане на решения с помощта на времеви модели.

Времевият модел представя как набор от променливи се развива във времето. Прост времеви модел е *верига на Марков*, където състоянието във времето t е обозначено

като S_t . Веригата на Марков може да представлява например позицията и скоростта на самолет във времето.



Фигура 1.6 Марковска верига

Фигура 1.6 показва структурата на Байесова мрежа, представляваща верига на Марков. На фигурата са показани само първите три състояния, но веригата на Марков може да продължи безкрайно. Първоначалното разпределение е дадено от $P(S_0)$. Условното разпределение $P(S_t | S_{t-1})$ често се нарича модел на преход на състояния. Ако разпределението на прехода на състояния не се променя с t , тогава моделът се нарича *стационарен* [22, 23].

Състоянието във верига на Марков не е задължително да е скаларно. Например, ако искаме да моделираме случайното поведение на самолет във времето, състоянието може да бъде вектор $s = (h, \dot{h})$, където h е височината на самолета, а $\dot{h}$ е линейната скорост. Първоначалното разпределение $P(S_0)$ може да бъде представено чрез *многомерно Гаусово разпределение*, параметризирано със средна стойност, вектор μ и ковариационна матрица Σ с плътност:

$$p(s) = N(s | \mu, \Sigma), \quad (1.17)$$

където $N(s | \mu, \Sigma)$ е k -мерно обобщение на Гаусово разпределение в уравнение (1.6):

$$N(s | \mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{k/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(s - \mu)^T \Sigma^{-1}(s - \mu)\right) \quad (1.18)$$

Прост вероятностен модел, често използван в задачи за класификация, е опростен модел на Байес, който има структурата, показана на Фигура 1.10. Еквивалентно, но по-компактно, представяне е показано на Фигура 1.11. Стойността $i = 1 : n$ в долната част на полето указва, че индексът i в долния индекс на променливата се повтаря от 1 до n [16, 17, 19, 22]. В този Байесов модел, класът C е променливата на заявката, а наблюдаваните характеристики $O_1, \dots, O_n$ са променливите на доказателствата. За компактност в тази книга ще използваме нотация с двоеточие понякога в индексите. Например, $O_{1:n}$ е компактен начин за записване на $O_1, \dots, O_n$. Байесовият модел се нарича опростен, защото приема условна независимост между променливите на доказателствата, за които е даден класът.

Филтрирането в линейни динамични системи, които приемат, че разпределенията на прехода на състоянията и наблюденията са линейни гаусови, всъщност може да се извърши точно. Ако b_{t-1} е представено като нормално разпределение, тогава може да се покаже, че интегрирането на ред 5 води до това, че апостериорното b_t е гаусово. Филтърът на Калман е добре познат филтър за линейни динамични системи, който просто актуализира средната стойност и ковариацията на b_t по подходящ начин.

Чрез дефиницията на условната вероятност, знаем, че

$$P(b^1|d^1, c^1) = \frac{P(b^1, d^1, c^1)}{P(d^1, c^1)} \quad (1.34)$$

1.5. Параметрично и непараметрично обучение.

Разпределението на Дирихле е обобщение на бета разпределението и може да се използва за оценка на параметрите на дискретно разпределение. Да предположим, че X е дискретна случайна променлива, която приема целочислени стойности от 1 до n . Дефинираме параметрите на разпределението като $\theta_{1:n}$, където $P(x^i) = \theta_i$. Разбира се, параметрите трябва да се сумират до 1 и затова само първите $n - 1$ параметъра са независими. Разпределението на Дирихле може да се използва за представяне, както на априорното, така и на апостериорното разпределение и е параметризирано чрез $\alpha_{1:n}$.

Плътноста е:

$$Dir(\theta_{1:n}|\alpha_{1:n}) = \frac{\Gamma(\alpha_0)}{\prod_{i=1}^n \Gamma(\alpha_i)} \prod_{i=1}^n \theta_i^{\alpha_i-1} \quad (1.72)$$

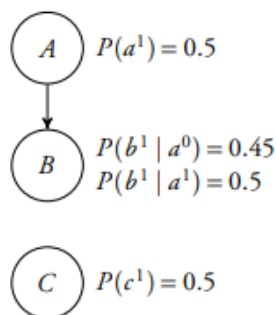
където α_0 се използва за обозначаване на сумирането на параметрите $\alpha_{1:n}$.

Ако $n = 2$, тогава е лесно да се види, че уравнение (1.72) е еквивалентно на бета разпределението. Обичайно е да се използва равномерно априорно разпределение, при което всички параметри на Дирихле $\alpha_{1:n}$ са зададени на 1. *Симетрично разпределение на Дирихле* е такова, при което всички параметри са идентични. Както при бета разпределението, параметрите в Дирихле често се наричат псевдоброяния.

1.6. Структурно обучение.

В предишните раздели се приемаше, че структурата на Байесовата мрежа е известна априори. Този раздел обсъжда методи за изучаване на структурата от данни. Подходът с максимална вероятност за структурата на Байесова мрежа включва намиране на графичната структура G , която максимизира $P(G|D)$, където D представлява

наличните данни. Първо се изчислява резултата на Байесова мрежа въз основа на $P(G|D)$, а след това се търси в пространството на мрежите мрежа с най-висок резултат. Подобно на извода в Байесовите мрежи, може да се покаже, че за общи графи и входни данни, изучаването на структурата на Байесова мрежа е *NP-трудно*.



Фигура 1.20 Примерна Байесова мрежа

За да илюстрираме как Байесовото оценяване балансира сложността на модела, разглеждаме простата Байесова мрежа на Фигура 1.20. Стойността на A слабо влияе върху стойността на B , а C е независима от другите променливи. Ние вземаме проби от този „истински“ модел, за да генерираме данни D и след това се опитваме да научим структурата на модела. Съществуват 25 възможни мрежови структури, включващи три модела:

- Истинският модел с $1 + 2 + 1 = 4$ независими параметъра,
- Напълно свързаният модел $A \rightarrow B, A \rightarrow C, B \rightarrow C$ с $1 + 2 + 4 = 7$ независими параметъра,
- Напълно несвързаният модел с $1 + 1 + 1 = 3$ независими параметъра.

Обичайно е K2 да налага горна граница на броя на родителите за всеки един възел, за да намали необходимите изчисления. Оригиналният алгоритъм K2 приема, че априорните параметри на Дирихле $\alpha_{ijk} = 1$ за всички i, j и k , но всеки априор може да се използва принципно [5, 16, 18, 21, 24, 25].

Байесовата мрежа кодира набор от условни предположения за независимост. Важно наблюдение, което трябва да се направи, когато се опитваме да научим структурата на Байесова мрежа е, че два различни графа могат да кодират едни и същи предположения за независимост. Като прост пример, разгледайте мрежата с две променливи $A \rightarrow B$.

Вместо да търсим в пространството на насочените ациклични графове, можем да търсим в пространството на класовете на еквивалентност на Марков, представени от частично насочени графове. Пространството на класовете на еквивалентност на Марков е по-малко от пространството на насочените ациклични графи и затова търсенето може да се извършва по-ефективно. Байесовият резултат е дефиниран за насочени ациклични графи. За да оценим частично насочен граф, трябва да генерираме член от неговия клас на еквивалентност на Марков и да изчислим неговия резултат.

1.7. Изводи по първа глава.

1. Проведен е обзор на теоретичните основи на процеса за вземане на решения, като са представени известни методи и алгоритми за вземане на решения с широко приложение в практиката.

2. Показано е, че особено предизвикателство в процеса на вземане на решения може да бъде неопределеността, която възниква от непълна информация или невъзможност за прогнозиране на бъдещи събития, поради наличие на практически или теоретични ограничения. Правилното отчитане на неопределеността е важно при изграждането на стабилни системи за вземане на решения.

3. Проведеният анализ показва, че при използване на мрежови модели, структурата на мрежата кодира допускания за условна независимост, както и че вероятностните изводи могат да бъдат ефективни, ако се използва структурата на мрежата.

4. Показано е, че Байесовите мрежи компактно представят разпределенията по променливи и са удачни при гъвкаво представяне за кодиране на голямо разнообразие от модели, както и че Байесовите методи и методите за максимално правдоподобие, могат да се използват за извеждане на параметрите и структурата на модела.

ВТОРА ГЛАВА

СИСТЕМИ ЗА ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ

Предидшната глава се фокусира върху неопределеността, включително как да се изграждат вероятностни модели с неопределеност и да се използват за правене на изводи. Тази глава се фокусира върху това как да се вземат рационални решения въз основа на вероятностен модел и функция на полезност. Ще се съсредоточим върху едностъпкови решения, като ще запазим обсъждането на последователни проблеми с вземането на решения за следващата глава. Тази глава започва с въвеждане на основите на теорията на полезността и показва как тя формира основата за рационално вземане на решения при неопределеност. След това ще покажем как понятията за теорията на полезността могат да бъдат включени във вероятностните графични модели, въведени в предишната глава, за да се формират така наречените мрежи за вземане на решения. Тъй като много важни проблеми свързани с процеса на вземане на решения включват взаимодействие с други агенти.

2.1. Теория на полезността.

В предишната глава се обсъждаше на необходимостта от сравняване на степента на убеждение по отношение на две различни твърдения. В този параграф се сравнява степента на желателност на два различни резултата. Ние заявяваме предпочитанията си, използвайки следните оператори:

- $A \succ B$, ако предпочитаме A пред B .
- $A \sim B$, ако сме безразлични между A и B .
- $A \succeq B$, ако предпочитаме A пред B или сме безразлични.

Точно, както убежденията могат да бъдат субективни, така могат да бъдат и предпочитанията. В допълнение към сравняването на събития, нашите оператори за предпочитания могат да се използват за сравняване на предпочитания спрямо несигурни резултати. Лотарията е набор от вероятности, свързани с набор от резултати. Например, ако $S_{1:n}$ е набор от резултати и $p_{1:n}$ са свързаните с тях вероятности, тогава лотарията, включваща тези резултати и вероятности, се записва:

$$[S_1: p_1; \dots; S_n: p_n] \quad (2.1)$$

Този раздел обсъжда как съществуването на реално оценена мярка за полезност произтича от набор от предположения за предпочитания. От тази функция на полезност е възможно да се дефинира, какво означава да се вземат рационални решения при несигурност [26, 27].

При изграждането на система за вземане на решения или за подпомагане на вземането на решения често е полезно да се изведе функцията на полезност от човек или група хора. Този подход се нарича извличане на полезност или извличане на предпочитания. Един от начините да се направи това е да се фиксира полезността на най-лошия резултат S_L на 0 и на най-добрия резултат S_T на 1. Докато полезностите на резултатите са ограничени, можем да преобразуваме и мащабираме полезностите, без да променяме предпочитанията си. Ако искаме да определим полезността на резултата S , тогава определяме вероятността p , такава че $S \sim [S_T: p; S_L: 1 - p]$. От това следва, че:

$$U(s) = p \quad (2.7)$$

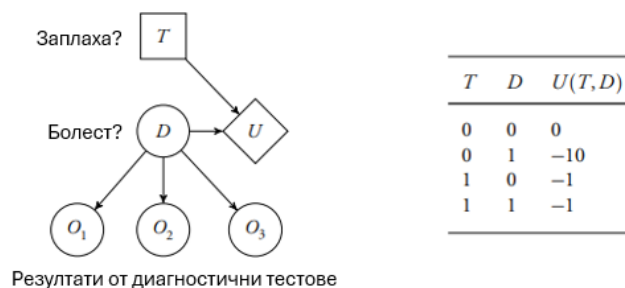
2.2. Мрежи за вземане на решения.

Можем да разширим понятието за Байесови мрежи, до мрежи за вземане на решения, които включват действия и полезности. Мрежите за вземане на решения са съставени от три типа възли:

- Случаен възел съответства на случайна променлива (обозначена с кръг);
- Случаен възел съответства на всяко решение, което трябва да се вземе (обозначен с квадрат);
- Полезен възел съответства на адитивен компонент на полезността (обозначен с ромб).

Има три вида насочени ръбове:

- Условен ръб завършва във случаен възел и показва, че несигурността в този случаен възел е обусловена от стойностите на всички негови родители;
- Информационен ръб завършва във възел за вземане на решения и показва, че решението, свързано с този възел, е взето със знанието на стойностите на неговите родители;
- Функционалният ръб завършва във възел за полезност и показва, че възелът за полезност е определен от резултатите на своите родители.



Фигура 2.3 Мрежа за вземане на решения за диагностичен тест и функция на полезност

Мрежите за решения понякога се наричат диаграми на влияние. Подобно на Байесовите мрежи, мрежите за решения не могат да имат цикли. Представянето на проблем с решенията като мрежа за решения ни позволява да се възползваме от структурата на проблема, когато изчисляваме оптималното решение по отношение на функцията на полезност.

Оптималното решение е това, което когато е инициализирано в мрежата за решения, осигурява най-високата очаквана полезност. През годините са разработени различни методи за по-ефективно оценяване на мрежите за решения. Един от методите включва премахване на възлите за действие и случайност от мрежите за решения, ако нямат наследници, както е дефинирано от условни, информационни или функционални ръбове.

Мрежите за вземане на решения са мощна рамка за изграждане на системи за подпомагане на вземането на решения. Дотук обсъдихме ключовите елементи при изграждането на мрежи за вземане на решения и как да ги използваме, за да вземаме оптимални еднократни решения. Ще обсъдим накратко процедурата за създаване на мрежа за вземане на решения. Първата стъпка е да се идентифицира пространството на възможните действия.

2.3. Теория на игрите.

Тази глава се фокусира върху вземането на рационални решения с предполагаем модел на средата. Методите, представени в тази глава досега, могат, разбира се, да бъдат приложени към среди, съдържащи други агенти, стига вероятностния модел да улавя ефектите от поведението на другите агенти. Има обаче много случаи, в които нямаме вероятностен модел на поведението на другите агенти, но имаме модел на техните полезности. Вземането на решения в такива ситуации е предмет на теорията на игрите, която ще бъде обсъдена накратко в този раздел.

Когато се изгражда система за вземане на решения, която трябва да взаимодейства с хората, информацията за равновесието на Наш не винаги е полезна. Хората често не играят стратегия на равновесие на Наш. Първо, може да не е ясно кое равновесие да се приеме, ако в играта има много различни равновесия. За игри само с едно равновесие, може да е трудно за човек да изчисли равновесието на Наш поради когнитивни ограничения. Дори, ако агентите могат да изчислят равновесието на Наш, те може да се съмняват, че опонентите им могат да извършат това изчисление.

Една област, известна като теория на поведенческите игри, има за цел да моделира агентите. Съществуват много различни поведенчески модели, но логитният модел ниво- k , понякога наричан квантов модел ниво- k , стана популярен напоследък и е склонен да работи добре на практика. Логитният модел ниво- k улавя предположението, че хората са:

- по-склонни да правят грешки, когато тези грешки са по-евтини, и
- ограничени в броя на стъпките на стратегическо предварително предвиждане (както в „Мисля, че ти мислиш, че аз мисля...“).

Моделът се дефинира от:

- *параметър на точност* $\lambda \geq 0$, който контролира чувствителността към разликите в полезността (0 е нечувствителна); и
- *параметър на дълбочина* $k > 0$, който контролира дълбочината на рационалността.

2.4. Основни понятия в теорията за вземане на решения.

Вземане на решения е процесът на избор на най-добрия курс на действие от набор от възможни алтернативи. Този процес може да бъде интуитивен, базиран на опит и знания, или структуриран, основан на анализ и данни. Примери за вземане на решения включват:

- Избор на маршрут за пътуване, за да се избегне трафик.
- Решение за инвестиране в определени акции.
- Планиране на производствен график, за да се максимизира продукцията.

Оптимизацията е научната дисциплина, която се занимава с намирането на **най-доброто** (оптимално) решение на даден проблем, като се вземат предвид определени ограничения. Тя се стреми да максимизира или минимизира дадена **целева функция** [31, 36, 46, 47, 48].

- **Целева функция:** Това е математическо изражение, което количествено измерва качеството на решението (например, печалба, разходи, време, разстояние).

- **Ограничения:** Това са условията или правилата, които трябва да бъдат спазени (например, наличен бюджет, ресурси, времеви рамки).

Оптимизацията е **инструмент**, който се използва за вземане на **рационални решения**, особено в сложни ситуации, където интуицията не е достатъчна. Всяко решение, което се опитва да бъде „най-доброто“ по някакъв критерий, всъщност е опит за оптимизация.

Представете си, че сте мениджър на логистична компания. Трябва да вземете решение за маршрутите на вашите камиони.

- **Проблем:** Как да доставите стоки до всички клиенти с минимални разходи?

- **Цел:** Минимизиране на разходите за гориво и време.

- **Ограничения:** Всеки камион има ограничен капацитет, работниците имат работно време, а доставките трябва да са навреме.

В този случай, **вземането на решение** е изборът на конкретните маршрути. **Оптимизацията** е процесът на намиране на **най-ефективните** маршрути, които спазват всички ограничения и минимизират разходите.

Следователно, **оптимизацията** предоставя методология и рамка за **систематично вземане на решения**, което гарантира, че избраният вариант е не просто добър, а най-добрият възможен при дадените условия. Тя превръща вземането на решения от въпрос на преценка в научен процес, подкрепен с данни [36, 41, 44, 47, 48].

Три от основните способности за обработка на информация са внимание, когнитивни способности и памет. Информацията се възприема от човека, а способността за внимание позволява част от тази възприета информация да бъде обработена. Частта от информацията, на която се обръща внимание, след това се когнитивно обработва от човека, използвайки паметта като помощно средство за осмисляне на информацията.

Друг начин, по който експертните потребители опростяват ситуацията, за да гарантират, че когнитивната обработка е управляема, е чрез използване на структурата на контекста, за да ограничат възможните резултати от ситуацията. Структурата се определя като споделено знание за функционирането на система, което по своята същност ограничава еволюцията на състоянието на системата [70, 71].

2.5. Доверие и прозрачност на логиката на решенията.

Първият проблем, който трябва да бъде преодолян при внедряването на система за подпомагане на вземането на решения е, че потребителите трябва да могат да се доверяват на информацията и препоръките, които системата предоставя [66, 72, 73]. Дефиницията за доверие е селективно адаптирана от Muir [65, 74]. Доверието е очакването на член на системата, че ще има надеждност и технически компетентно изпълнение от друг член на системата, което е свързано с, но не непременно изоморфно, с обективни мерки за тези качества. „Надеждност“ се отнася до последователно и предвидимо изпълнение. „Технически компетентен“ се отнася до способното изпълнение на функции, разпределени на този член, в рамките на определени граници и ограничения. Фактът, че доверието не е пряко представително за тези качества, показва, че има разлика, основана на човешкото възприятие за тези атрибути, което може да е предубедено.

„Злоупотребата“ със системата за подпомагане на вземането на решения може да приеме няколко форми. Често обсъжданата форма е, когато проектантите свръх автоматизират дадена функция, така че ролята на потребителя, е предимно надзорна, контролна или мониторингова роля. Макар и често иновативни и полезни, тези непредвидени употреби разширяват границите на техническата компетентност на системата, чието използване в тези области е било непредвидено от проектантите [76].

Когато системата за подпомагане на вземането на решения има ясен отговор, тя трябва да предостави:

1. *Информация или препоръка по отношение на решението.* При проектирането на алгоритъм за подпомагане на вземането на решения, проектантите често разглеждат информацията под формата на проблема, който трябва да бъде решен, не непременно в термините, които потребителят изисква, за да интерпретира тази информация. След като информацията и/или препоръката бъдат генерирани от системата за подпомагане на вземането на решения, проектантът трябва да се погрижи да я преведе в контекстуална терминология и форма.

2. *Навременна информация или препоръка.* По същия начин, когато системата предоставя информация или препоръка, тя трябва да бъде предоставена в подходящото време. Някои решения трябва да бъдат взети часове преди внедряването, докато други са

критични във времето и потребителят има само секунди, за да реагира по подходящ начин.

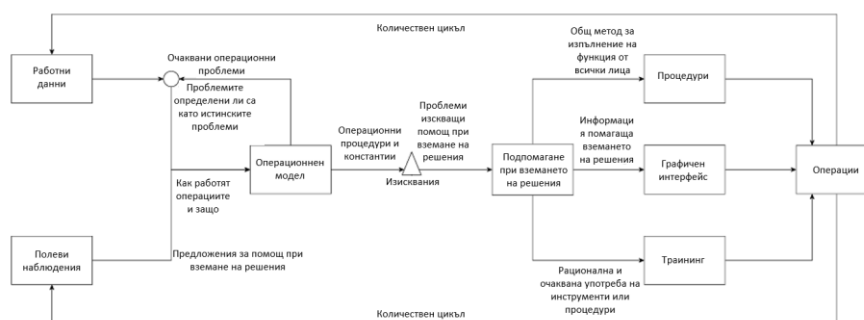
3. *Надеждна информация или препоръка.* Както беше обсъдено в раздела по-горе, надеждността на системата е от решаващо значение за способността на потребителя да развие доверие в системата. Надеждността при множество обстоятелства трябва да бъде оценена преди внедряването на системата.

4. *Възможност за преглед на информацията или надеждност на препоръката.* За да могат проектантите правилно да калибрират доверието в система за подпомагане на вземането на решения, информацията за надеждността на системата трябва редовно да се предоставя на потребителя.

5. *Обосновката на препоръката за подпомагане на вземането на решения.* Някои системи за подпомагане на вземането на решения помагат за вземането на решения в по-дълги срокове, като дават възможност да се предостави допълнителна информация или препоръка за подпомагане на вземането на решения.

Прогресивното вземане на решения се определя като периодично преразглеждане на информацията и адаптиране на стратегическите решения към актуализираната информация, когато тя стане достъпна. Този тип вземане на решения включва вземане на стабилни стратегически решения, които предвиждат необходимостта от последваща адаптация, като се гарантира, че множество тактически опции са налични по-късно в оперативния времеви хоризонт, и преразглеждане на решенията, взети като информационни актуализации.

2.6. Системен поглед върху внедряването.



Фигура 2.11 Процес на развитие на системите

Внедряването на ефективна система за подпомагане на вземането на решения е итеративен процес (Фигура 2.11).

В идеалния случай, проектирането на система за подпомагане на вземането на решения трябва да започне с полеви наблюдения и анализи на оперативни данни, за да се разбере операцията и ролята на потребителите.

Разбирането на проектанта за операцията, потребителите и ограниченията формира оперативния модел. От този оперативен модел може да възникне необходимостта от подпомагане на вземането на решения и се дефинират изискванията.

След това се извършва проектирането и разработването на система за подпомагане на вземането на решения, което води до процедура, интерфейс човек-машина/графичен интерфейс и обучение.

Внедряването на системата за подпомагане на вземането на решения влияе върху операциите и ефектът от нея може да бъде измерен чрез анализ на оперативни данни и полеви наблюдения.

Когато се проектира инструмент за подпомагане на вземането на решения, често има основна идея за системата, която е превърната поне във функционално изискване за подпомагане на вземането на решения.

В широк смисъл на система за подпомагане на вземането на решения, предоставената подкрепа за вземане на решения може да включва технически алгоритъм, поддържан от визуализация за потребителя, нова процедура, ново или модифицирано обучение или някаква комбинация от тези три елемента. Ефективното внедряване на средствата за подпомагане на вземането на решения (инструмент, процедура, обучение) води до измерима полза.

2.7. Изводи по втора глава.

1. Показано е, че процесът на рационалното вземане на решения съчетава в себе си теорията на вероятностите и теорията на полезността, като можем да изградим рационални системи за вземане на решения, базирани на функции на полезност, изведени от хората.

2. Съществуването на функция на полезността следва от ограниченията върху рационалните предпочитания. Рационалното решение е такова, което максимизира очакваната полезност. Хората не винаги са рационални.

3. Установено е, че при вземането на рационални решения с предполагаем модел на средата много полезна може да бъде Теорията на игрите, с включени множество

агенти. Това е удачно, когато няма вероятностен модел на поведението на агентите, но има модел на техните полезности.

4. Разгледана е концепцията за доверие, като ключов компонент, както за проектирането на алгоритми, така и за тяхната приемливост, като е представен системен подход като рамка за разработване на ефективен итеративен метод на проектиране, който включва обучение и системни измервания в допълнение към проектантската работа.

5. Необходимо е да се положат съгласувани усилия за истинско разбиране на проблема, контекста и участващите експерти, преди да се проектира система за подкрепа на процеса за вземане на решения. Това разбиране ще направи разликата между система, която предоставя истинска подкрепа на вземането на решения, и такава, която е или пречка за процеса, или изобщо не се използва.

ТРЕТА ГЛАВА

ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИЕ НА ТОПЛОЕНЕРГИЕН ТЕХНОЛОГИЧЕН ОБЕКТ

Съществена част от съвременните системи за автоматично управление осигуряват стабилна експлоатацията на технологични обекти в енергетиката. Такива обекти имат съществен дял в икономиката на всяка страна и са от стратегическо значение за националната сигурност на страната.

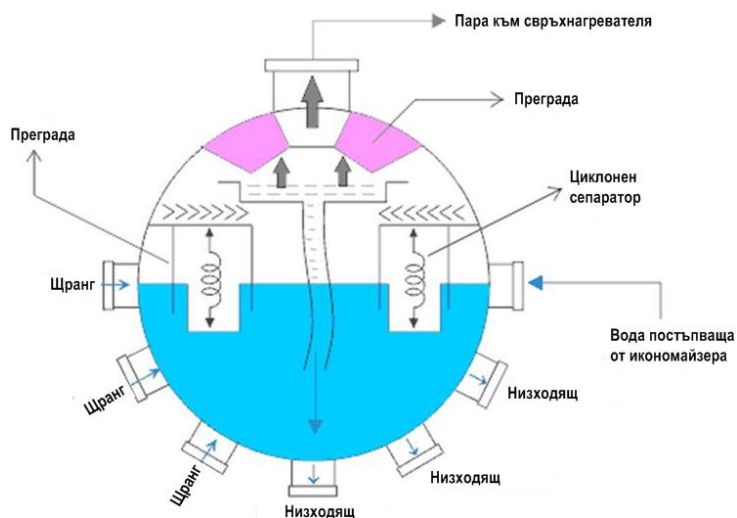
В тази глава се анализира работата на едно ключово съоръжение от системата за производство на електроенергия, а именно парогенераторът. Обект на изследването са процесите за генериране на пара и работата на използваното оборудване. Накратко се разглеждат принципите на работа и различните видове парни котли. Описани са процесът и етапите в производството на пара и са споменати компонентите в производствената система. Създаден е математичен модел на барабана и накратко са представени различни стратегии за управление, използвани в автоматизирането на процеса. Представени са схематично процесите на управление и етапите на вземане на решения свързани с работата на технологичния обект.

3.1. Принцип на работата на парогенератор.

Основният принцип на работата на парогенератора (котела) е много прост и лесен за разбиране. По същество котелът е затворен съд с вода. Горивото се изгаря в печната камера и се получават горещи газове. Тези горещи газове контактуват с така наречените водоспусни тръби, където топлината на горещите газове се предава на водата и вследствие на това в котела започва да се образува пара. След това парата се прегрява неколккратно до достигане на необходимите параметри и се подава към турбината или към събирателен колектор.

Когато налягането на парата се понижава, нивото на водата се повишава, защото мехурчетата на парата се разширяват (набухване). Обратно, когато налягането на парата се повишава, нивото на водата намалява поради компресията (свиването) на парните мехурчета [85]. Това прави обекта неминимално фазов (Фигура 3.2), което води до

проблеми в управлението при регулиране на нивото в барабана на парогенератора. „Преградите“ на Фигура 3.6 са сепаратори, които отделят сухата пара от пароводната смес и осигуряват направляван път за сухата пара.



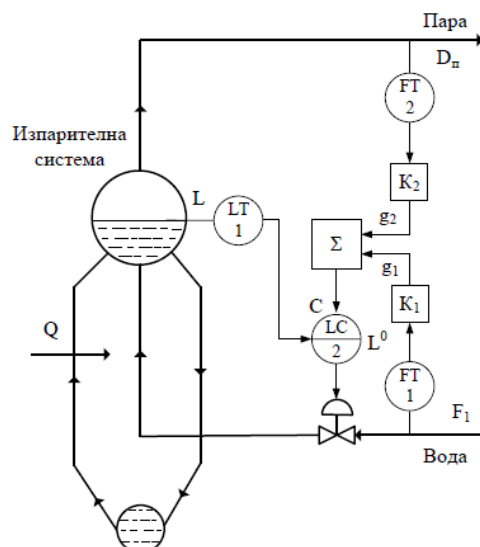
Фигура 3.6 Схема на парния барабан на водотръбен котел

3.2. Математично моделиране на парогенератор.

При процеса на моделиране на парен котел, целта е да се представи явлението свиване и набухване: увеличаването или намаляването на разхода на пара на котела, което води до промяна в нивото, точно противоположно на това, което интуитивно се очаква. Ако има внезапно нарастване на разхода на пара, нивото временно се увеличава поради моментния спад на налягането на парата, причинен от увеличаването на потреблението. Този първоначален спад на налягането води до по-голямо изпарение и увеличаване на размера на мехурчетата пара (феномен на набухването), което кара нивото в барабана да се повишава, докато топлинният поток се увеличи достатъчно, за да възстанови стойността на налягането.

3.3. Управление на ниво на пароводна смес в парогенератор.

В схемата на Фигура 3.18 нивото се стабилизира от едноконтурна система, изменяща количеството продухвач въздух F_B в зависимост от текущата стойност на разликата $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ между температурите в парното и течното пространство. Когато пяната достигне чувствителния елемент във върха на колоната, температурата θ_2 започва да спада и регулаторът намалява разхода на въздух F_B , като височината на пенния слой се намалява.



Фигура 3.18 Схема с комбинирано управление

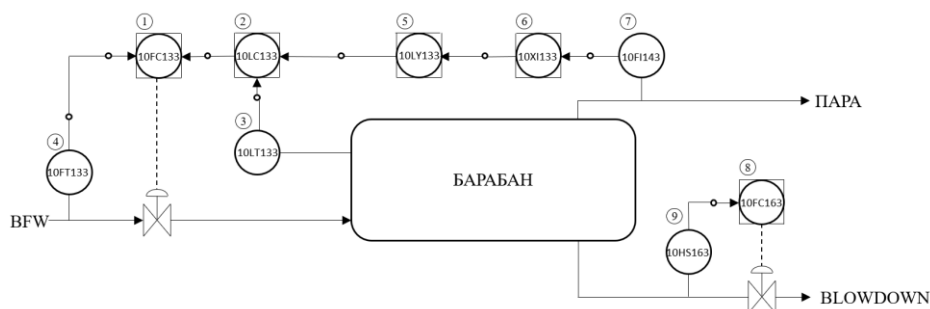
Регулирането на нивото в сепараторите на котли утилизатори (Фигура 3.14а) се извършва по схемата с комбинираното управление, показана на Фигура 3.18. Освен основния сигнал по обратна връзка по ниво L в регулатора на ниво $C(p)$ се подават и два компенсиращи сигнала g_1 и g_2 . Компенсаторът K_1 е изпълнен като безинерционно звено и отчита случайните изменения в разхода на вода F_1 , дължащи се на изменения на налягането в захранващата магистрала. Компенсаторът K_2 също е изпълнен като пропорционално звено и отчита измененията в разхода на пара D_n .

3.4. Управление на нивото в барабана на парогенератор.

Комбинирана система за регулиране на нивото в барабана (Фигура 3.21) е идеална за случаите, когато котелната инсталация се състои от множество котли и множество помпи за постъпваща вода или пада на налягане върху регулиращия клапан е променлив. Трябва да се измерват нивото в барабана, разхода на пара и разхода на питателна вода. За да бъде системата в равновесие (нивото да не се променя) разхода на пара трябва да е равен на разхода на питателната вода. Ако има разлика между двата разхода нивото или ще нараства постоянно или ще намалява постоянно (обекта има интегриращи свойства). Разликата между разхода на пара и разхода на вода се подава като коригираща стойност към заданието за ниво в барабана. По този начин всяко едно смущение в двата разхода бива отразявано в регулиращото въздействие преди нивото да се е променило. Ефективността на триимпулсната система за управление при преходни условия я прави много полезна за общи промишлени и битови приложения на парогенераторите. Тя се справя с натоварвания с широки и бързи темпове на промяна [101, 102].

3.5. Симуляционно моделиране на системите за управление на парогенератор.

За целите на изследването е избран газов котел (Фигура 3.25) F-1011 с четири горелки, с принудително и индуцирано изсмукване и рекуперация на димните газове и с производителност 70000 Lbs/Hr. Има економайзер на захранващата вода, който използва отработени димни газове [110].



Фигура 3.25 Проектна схема за управление на ниво в барабана в котел F - 1011

(1 - регулатор за управление на питателната вода; 2 - регулатор ниво в барабана; 3 - трансмитер за ниво; 4 - трансмитер за разход на вода; 5 - регулатор на съотношение; 6 - индикатор на режима на съответните регулатори; 7 - разход пара; 8 - разход вода непрекъснати продувки; 9 - ръчен ключ)

В програмната среда MATLAB, чрез използване на Simulink е изграден модел (Фигура 3.26) за контрол на нивото в котел F-1011, като данните за Level block 1, 2 и Level integrator са реални и са взети от рефинерия в Ел Пасо, САЩ.

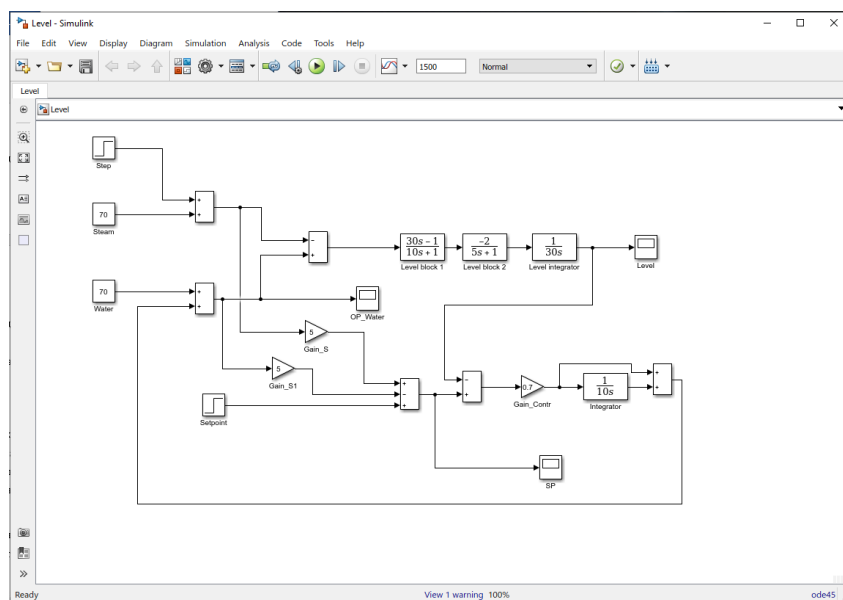
Имаме неминималнофазов обект със следната предавателна функция:

$$W(s) = \frac{30s-1}{10s+1} \frac{-2}{5s+1} \frac{1}{30s} \quad (3.39)$$

Вижда се, че имаме интегриращо звено с 15 секунди време на интегриране и неминималнофазова част, която може да се апроксимира с чисто закъснение 45 секунди. Това прави обекта за регулиране твърде сложен, необходима е компенсация на неминималнофазовостта, което в голяма степен може да бъде постигнато чрез използване на триелементната схема за регулиране обсъдена в направения литературен обзор. Равновесната точка на показната симулация, при която нивото е нула с 70% разход на пара и 70% разход на вода. На входа на обекта с показаната предавателна функция, като постъпва разликата между разхода на вода и разхода на пара. Поради интегриращите свойства на обекта, ако тази разлика е положителна нивото ще нараства постоянно, а ако е отрицателна, нивото ще намалява постоянно.

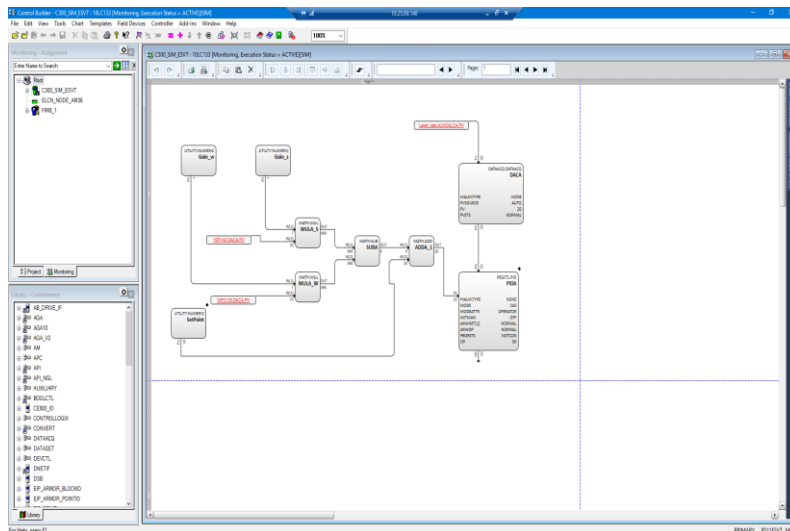
За компенсиране на набухването и свиването на нивото при промяна на разхода на пара или разхода на вода, към заданието се добавя разликата между разход пара и вода с тегловен коефициент, който е част от настройката на схемата за регулиране. Както беше разгледано в литературния обзор, при увеличаване на разхода на пара нивото се увеличава в първия момент и при дадения модел ще започне да пада след 45 секунди. Този факт е достатъчен за неадекватна реакция на регулатора в конвенционална схема за регулиране, без компенсация на неминималнофазовостта. В настоящата схема разликата между пара и вода претеглена през коефициентите Gain_S и Gain_S1, се подава към заданието (блок Setpoint). По този начин увеличението на разхода на пара моментално увеличава заданието, което води до увеличаване разхода на вода, независимо от това че нивото се увеличава, а не намалява.

С други думи се постига компенсиране на увеличаването на нивото в следствие спадането на налягането в барабана и разширяване на мехурчетата пара. В конвенционална схема това фиктивно по-високо ниво, води до спиране на подаването на питателна вода в момент, когато наистина се изисква повече вода. Използвания регулатор е ПИ. Не използваме ПИД, защото на изхода на регулатора има клапан, който не е в състояние да отработи изход съдържащ диференциална компонента и може да се повреди.



Фигура 3.26 Модел за регулиране на нивото в котел F-1011 (MATLAB Simulink)

На Фигура 3.29 е представен контролен модул 10LC133, за управление на нивото в барабана, където участват LEADLAG, DATAACQ, ADD, MUL, SUB, NUMERIC и PIDA функционални блокове.



Фигура 3.29 Контролен модул 10LC133

3.6. Експериментални резултати от анализа на парогенератор.

В системата за управление на завода (оригиналната конфигурация) котел F-1011, която е представена на Фигура 3.39, се използва ПИ регулатор с коефициент на усилване 0.85 и време на интегриране 7 минути. Причината за това е, че преди модернизацията, схемата за управление е била едноконтурна, разгледана в литературния обзор. Тя не позволява остри настройки на регулатора.

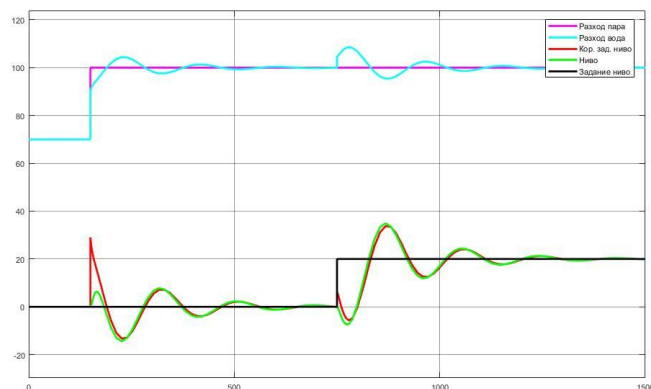
Tuning - general		Gain options	
Control equation:	EQB	Gain option:	LIN
Control action:	REVERSE	Overall gain:	0.85
Integral time T1 (minutes):	7.00	Low limit:	0.00
Low limit:	0.00	High limit:	240.00
Derivative time T2 (minutes):	0.00	Linear gain factor:	NaN
Low limit:	0.00	Gap gain factor:	NaN
Filter time (minutes):	0.00	Low limit:	NaN
		High limit:	NaN
		Non linearity form:	0
		Non linear gain factor:	NaN
		External gain factor:	NaN
		☐ Legacy gap	

Фигура 3.39 Оригинални настройки на контролен модул 10LC133

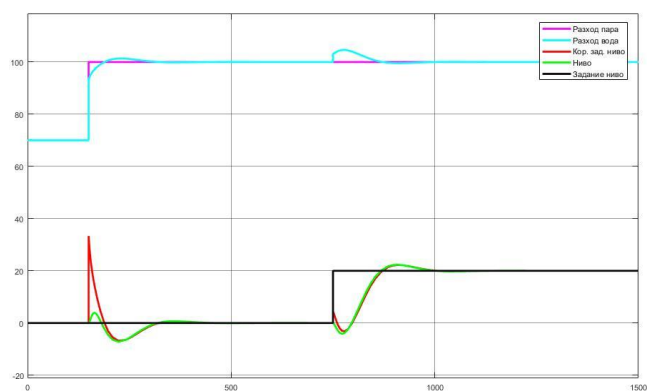
За целта на изследването е използвана три компонентната схема, както беше вече споменато с ПИ регулатор, поради наличието на бавен клапан и с теглови коефициенти за разликата между разход пара и вода, подавани към заданието.

Тегловните коефициенти за разликата между пара и вода са определени експериментално. В проведените симулации те варират от 1 до 7. Настройките на регулатора са коефициент на усилване: $k=0.7$ и време на интегриране $t=10$ секунди. Виждаме значителна разлика във времето на интегриране в сравнение с това на завода. На Фигура 3.40 са представени получените резултати.

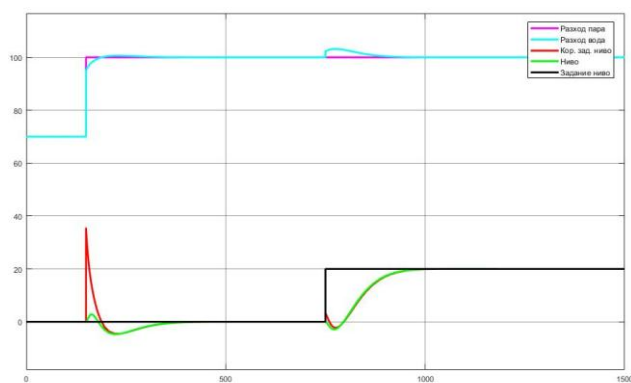
Най-добри резултати са получени при тегловни коефициенти $k=7$. Вижда се, че корекцията към заданието е най-остра, което води до по-силна корекция в разхода на вода, преди нивото да се е отклонило значително.



а)



б)



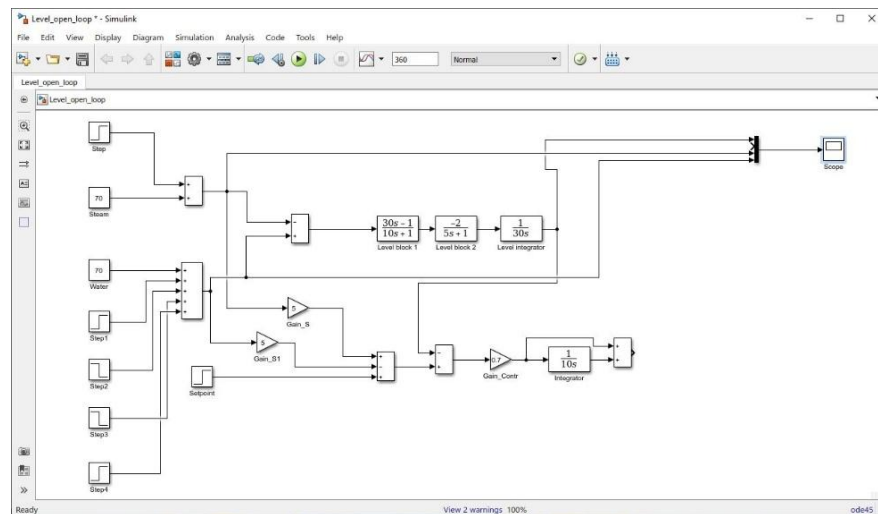
в)

Фигура 3.40 Регулиране на ниво при различни коефициенти на компенсиране

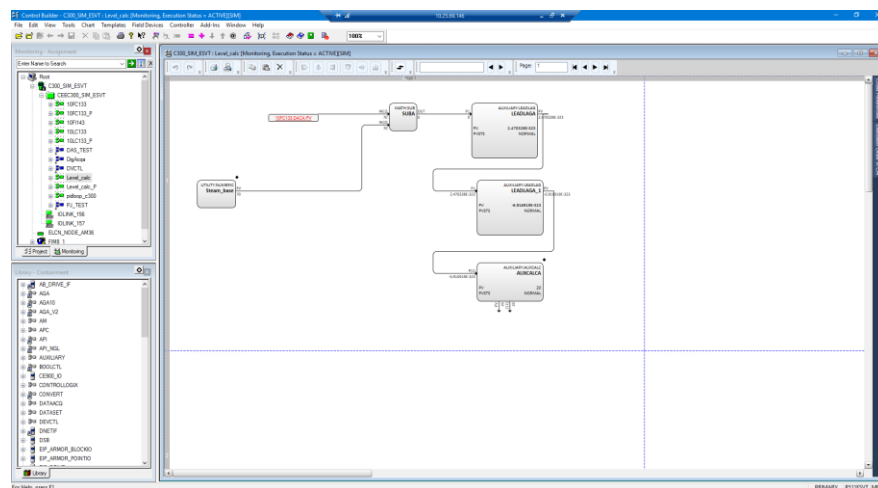
а) - при $k=3$; б) - при $k=5$; в) - при $k=7$

На Фигура 3.41 е показана схемата в отворен контур (изхода на регулатора не въздейства на разхода на питателна вода). Схемата е използвана за илюстриране на

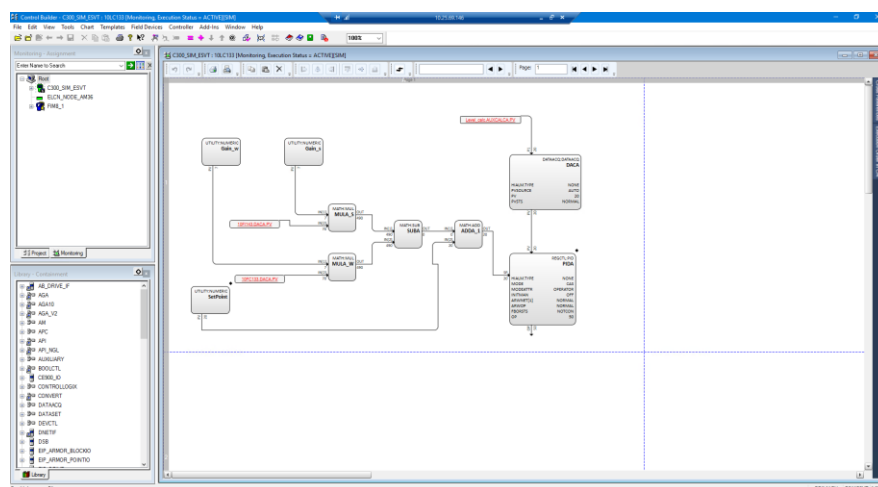
отворената систем при смущения по пара и вода. Резултатите са показани по-надолу в текста и са сравнени с тези получени в EPKS.



Фигура 3.41 Модел за регулиране на ниво при отворен контур



Фигура 3.45 Контролен модул Level_calc



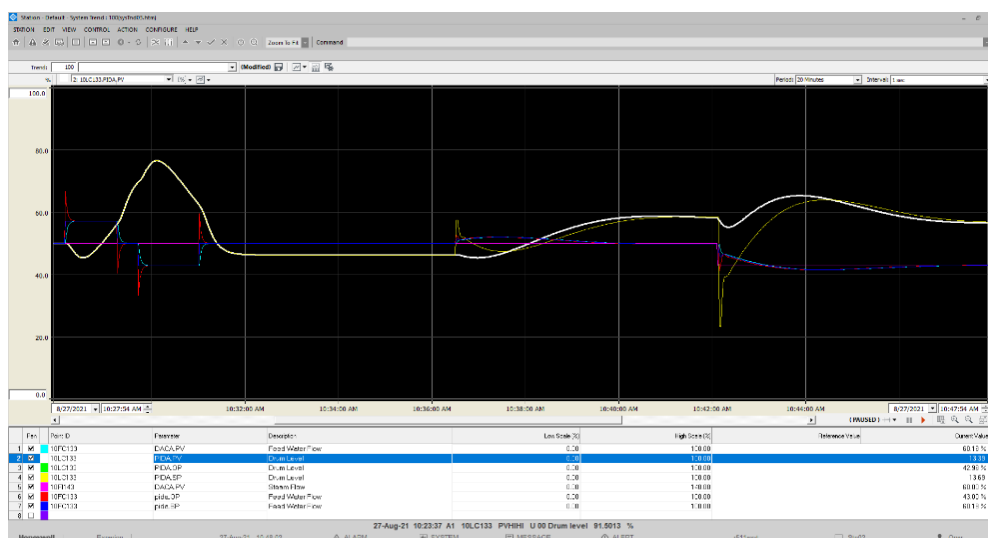
Фигура 3.46 Контролен модул 10LC133

В контролният модул 10LC133, който отговаря за регулирането на нивото в барабана, са конфигурирани тегловните коефициенти и настройките на регулатора получени в MATLAB. Режим MONITORING е показан на Фигури 3.45 и 3.46 за контролните модули Level_calc и 10LC133, в които се изчислява и регулира нивото в барабана.

На Фигура 3.51 е показано поведението на обекта за регулиране в отворен и затворен контур, реализиран в програмната среда Experion PKS на Honeywell. Фигурата е разделена на три части: в първата част е показано поведението в отворен контур при работещ регулатор за разход на вода и промяна на неговото задание. Показана е промяната на нивото в резултат на тези смущения. Ясно се вижда неминималнофазовия и интегриращ характер на обекта.

Във втората част е показано смущение по задание в затворен контур. Вижда се спадането на нивото при увеличаване разхода на питателна вода и достигането на новото задание, при което разхода на вода отново става равен на разхода на пара.

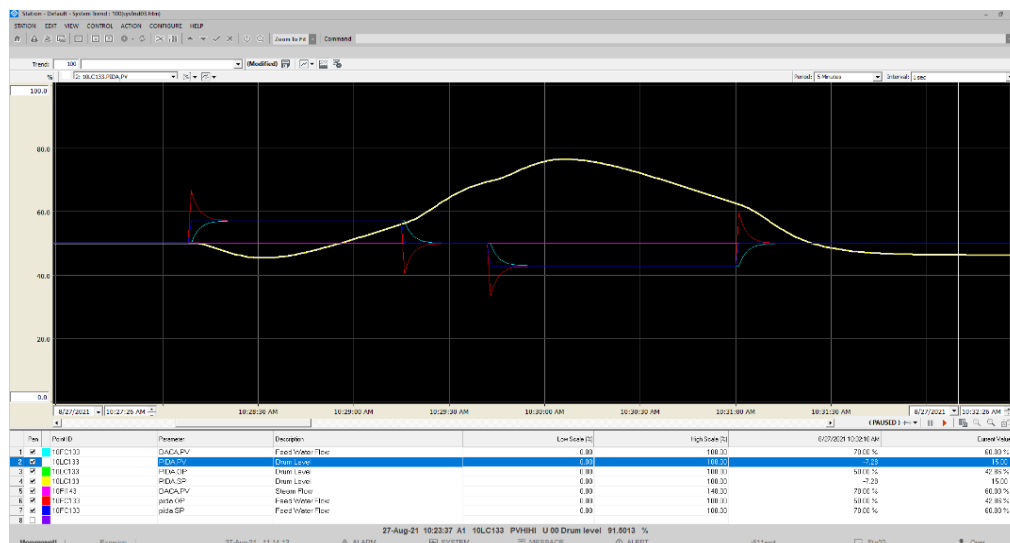
Третата част показва смущение по разход пара (разхода на пара намалява стъпално). Вижда се рязката корекция добавена към заданието за ниво, обуславяща незабавното намаляване на разхода на вода, чиято стойност се изравнява с разхода на пара, когато нивото се установява на предишната си стойност [120, 122].



Фигура 3.51 Поведение на обекта за регулиране в отворен и затворен контур, реализиран в програмната среда Experion Process Knowledge System

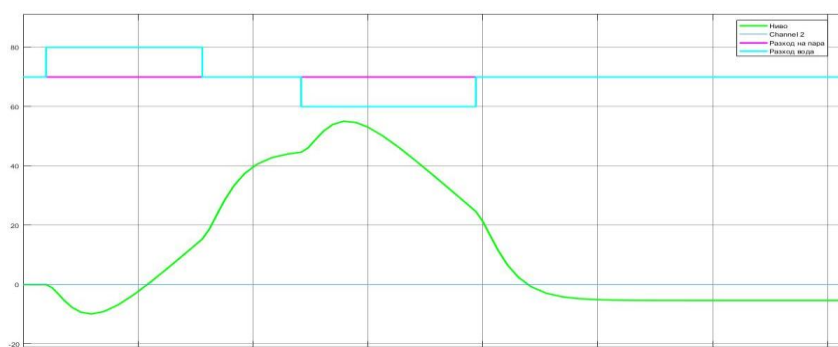
След създаване на модела за регулиране на нивото в програмната среда MATLAB и реализацията му в програмната среда Experion PKS, бяха проведени експерименти за

сравняване на поведението на използвания модел в двете системи. Графиките на Фигурите 5.52 и 5.53 показват изменението на нивото при отворен контур.



Фигура 3.52 Поведение на нивото в барабана в отворен контур при смущение по вода (Experion Process Knowledge System)

а) 10FC133 PV (захранваща вода) - тюркоазна линия; б) 10FI143 PV (количество пара) - лилава линия; в) 10LC133 SP (задание за ниво в барабана съвпадащо реалното ниво при работа в отворен контур) - жълта линия; г) 10LC133 PV (реално ниво в барабана) - бяла линия



Фигура 3.53 Поведение на нивото в барабана в отворен контур при смущение по вода (MATLAB)

а) 10FC133 PV (захранваща вода) - тюркоазна линия; б) 10FI143 PV (количество пара) - лилава линия; в) 10LC133 SP (задание за ниво в барабана съвпадащо реалното ниво при работа в отворен контур) - червена линия; г) 10LC133 PV (реално ниво в барабана) - зелена линия

От проведените симулации се вижда, че в MATLAB промяната на питателната вода е мигновен процес. В средата на Experion PKS количеството вода се променя малко по-бавно, тъй като е симулиран и клапан. В MATLAB не е симулиран клапан, тъй като симулацията там е проведена с цел проверка на идеята и работоспособността на предложената схема, която в Experion PKS е реализирана в пълен мащаб.

Получените резултати от проведения анализ доказват работоспособността на схемата за управление в реални условия при така зададения модел на обекта за управление.

3.7. Изводи по трета глава.

В настоящата глава са разгледани видовете парогенератори и принципа им на работа. Представени са математическото описание, предавателните функции и преходни характеристики на неминимално фазов обект, каквото е нивото в парогенератора. От проведените изследвания могат да се изведат следните изводи:

1. Направен е анализ на протичащите процеси на пароводна смес за целите на регулиране на нивото и са представени особеностите на пароводната смес като регулируема променлива. Представени са резултатите на изследваните системи за автоматично регулиране при различни коефициенти на усилване на статичен компенсатор на смущенията.

2. Представени са математически зависимости описващи динамичните характеристики на процесите протичащи в парогенератора и са разработени симулационни схеми за регулиране в реално време на ниво в средата на MATLAB Simulink и Experion Process Knowledge System за получаване на математически модел на реален парогенератор.

3. Предложената система за автоматично регулиране на нивото на пароводната смес в барабана със средствата на Honeywell Experion Process Knowledge System за вземане на решения, при експлоатацията на парогенератор в рафинерията Ел Пасо в САЩ, повишават производителността му.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ВЗЕМАНЕ НА РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИЕ НА ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧНИ ОБЕКТИ

В тази глава ще бъдат представени резултати от анализа на процеса на вземане на решения при управлението на различни химикотехнологични обекти.

4.1. Управление на мембранен биореактор.

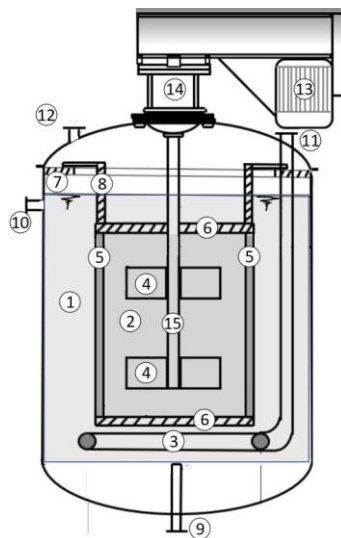
Мембранните технологии имат все по-широко приложение в биотехнологичните производства и позволяват разделяне на компонентите, съдържащи се в течната фаза на биореактора според размера им, който може да варира от няколко ангстрьома до няколко милиметра. Особен интерес представляват мембраните биореакторите с потопен мембранен модул, в които се създават условия за постигане на високо качество на продуктите при намалена консумация на енергия и намаляване на количествата на използваните разтворители. Тези предимства водят до по-ниски експлоатационни разходи. Оптималното действие на мембранный биореактор е свързано с: положението на мембранный модул в реактора; съотношението газ/течност; трансмембранното налягане; създаването на достатъчни срязващи напрежения, които да благоприятстват триенето на мембранната повърхност.

Мембранните реактори с потопена мембрана и аерация от типа барботажни или ерлифтни колони с вграден мембранен модул използват благоприятното влияние на двуфазния поток газ-течност върху срязващите напрежения около мембраната. Увеличаването на срязващите напрежения до мембраната се счита за един от най-ефикасните начини за контрол на запусването. Разбира се, следва да се внимава за възможна деактивация на компоненти чувствителни към срязващи напрежения. Важно е да се изследва полето на тангенциалните напрежения и неговата хомогенността в близост до мембранната повърхност, за което не достига систематичната информация.

4.2. Проектиране на мембранен биореактор.

За целта на изследването въз основа на направения литературен обзор е избран биореактор с аериране и разбъркване и потопен мембранен модул, показан на Фигура

4.15. Този биореактор е изграден от две камери (1-външна камера и 2-вътрешна камера), като в камера 1 през долния отвор (9) постъпва субстрата, необходим за клетъчния растеж, изход на разтвор (10). Субстратът преминава през мембранната повърхност (5) в камера 2, в която се извършва клетъчния растеж, дъно и капак на мембранный модул (6). В нея са монтирани бъркачки (4), които се задвижват от електромотор (13). В долната част на камера 1 е поставен барботьор с тороидална форма (3), чрез който се въвежда въздух за смесване на материалите и за почистване на мембранный модул. Въздухът необходим за аерирането се въвежда чрез захранващата тръба (11), освобождава се на свободната повърхност на разтвора в камера 1 и излиза през вентилационен отвор (12). Мембранный модул може да се демонтира като задвижващият електромотор (13) и редукторът (14) се демонтират предварително и закрепващите елементи на мембранный модул (8) се отделят от легло на мембранный блок (7), вал (15).



Фигура 4.15 Биореактор с потопен мембранен модул с аериране и разбъркване

Необходимите обем и височина на мембранный биореактор са определени чрез числен експеримент в програмната среда на MATLAB, така че да се достигне желаната производителност по клетки от 6 [g/h]. За определяне на височината е взето отношение $H/d=1,5$ от стандартната геометрия за лабораторен реактор, а диаметърът е изчислен спрямо получения от експеримента обем.

Клетъчния растеж в камера две, както и количеството на субстрата в двете камери е изчислен чрез функцията ode23 в програмната среда MATLAB, която позволява да се пресмятат до три на брой диференциални уравнения. Използваните уравнения са следните:

$$\text{-субстрат в 1-ва камера: } \frac{dS_1}{dt} V_1 = \dot{v}S_0 - \dot{v}S_1 - Per(S_1 - S_2) \quad (4.16)$$

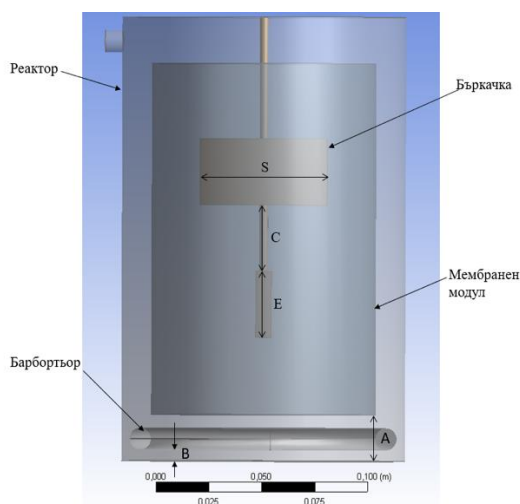
$$\text{-субстрат в 2-ра камера: } \frac{dS_2}{dt} V_{12} = Per(S_1 - S_2) - \frac{1}{Y_{x/s}} \mu X V_2 \quad (4.17)$$

$$\text{-клетки: } \frac{dX}{dt} V_2 = \mu X V_2 \quad (4.18)$$

За параметрите на този модел използваме експериментални данни от Фигура 4.15 и Фигура 4.16 (клетъчния растеж): кинетика на Моно с $\mu_{\max} = 0.5 \text{ [h}^{-1}\text{]}$; $K_s = 0.12 \text{ [g/l]}$; $Y_{x/s} = 0.52$; начална концентрация на субстрат $S_0 = 2 \text{ [g/l]}$; проточен дебит в 1-ва камера $\dot{v} = 2 \text{ [l/h]} = 0,00056 \text{ [kg/s]}$; данни за мембраната $Per = 0.52 \text{ [dm/h]}$ и $A = 5.29 \text{ [dm}^2\text{]}$.

От получените резултати е установено, че необходимата производителност 6 [g/h] се постига от обем на мембранный модул $1.4 \text{ [dm}^3\text{]}$ (Фигура 4.24). Минималната скорост на аериране е определена посредством числен експеримент (компютърна симулация), реализиран с ANSYS, версия 16.0. Настоящата експериментална работа е реализирана в Центъра по математично моделиране и компютърна симулация към ХТМУ с продукта ANSYS CFX, за който ХТМУ има постоянен лиценз.

Компютърната симулация е проведена върху работния обем на реактора, показан на Фигура 4.17.



Фигура 4.17 Схематично представяне на експерименталния барботажен реактор

4.3. Симулационен анализ на мембранен биореактор.

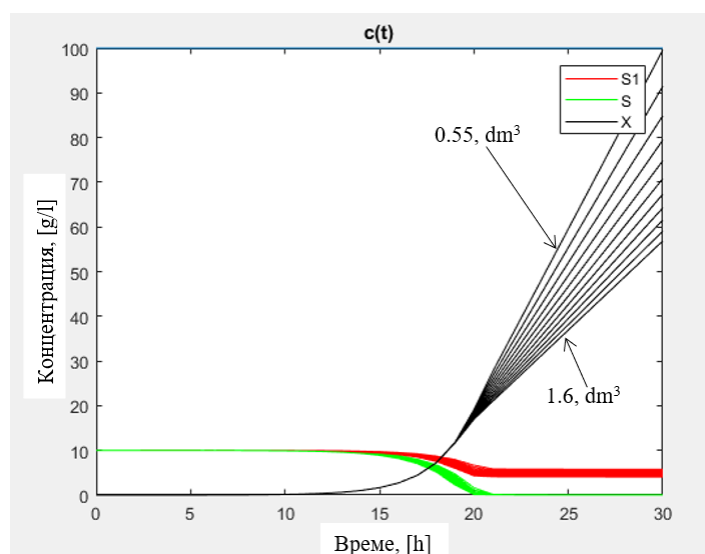
Начални условия на численото изследване:

- количество на въздуха подаван от барботьора равно на 0,05 обемни фракции, което при конкретните размери на барботьора отговаря на 100 отвора, създаващи мехурчета с диаметър 6 [mm] ;

- количество на сместа, която включва два разтвора - Mixture и Kletki, на вход е равна на 0,95 обемни фракции;
- за изход на газа се използва функцията Degassing, която е предоставена от софтуерния продукт ANSYS CFX;
- зададени са уравнения 4.15-4.17 за изчисляването на растежа на клетките в мембрания модул;
- концентрацията на вода се задава с Constant.

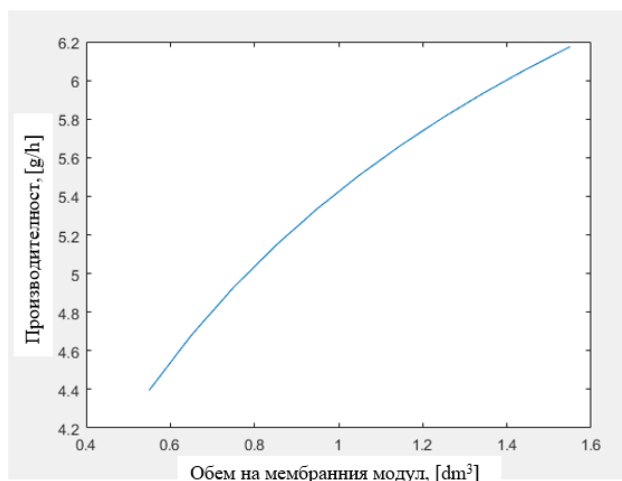
Експериментът е проведен при скорост на въздуха, варираща в границите от 0.1 [m/s] до 0.8 [m/s] през 0.1 [m/s]. След всеки опит с помощта на вградения в системата калкулатор е изчислена средната скорост на ъгловата деформация по повърхността на мембраната от страната на камера 1. За наблюдение на характеристиките на процеса, като скорост на потоците и налягане в реактора, са построени допълнителни секущи равнини.

Експеримента за определяне на максималната скорост на разбъркване е проведен при същите условия като експеримента за определяне на минималната скорост на аерация. Наблюденията са концентрирани във вътрешността на камера 2, където се извършва клетъчния растеж. Основен параметър при този експеримент е ъгловата скорост на бъркачките, която се променя в интервал от 5 [rev/min] до 35 [rev/min] през 5 [rev/min]. Обемът на мембрания модул се изменя от 0.55 [dm³] до 1.6 [dm³] със стъпка 0,1[dm³]. Проведена е компютърна симулация с различни обеми на реактора, за да се проследи клетъчния растеж и резултатите са представени на Фигура 4.21.



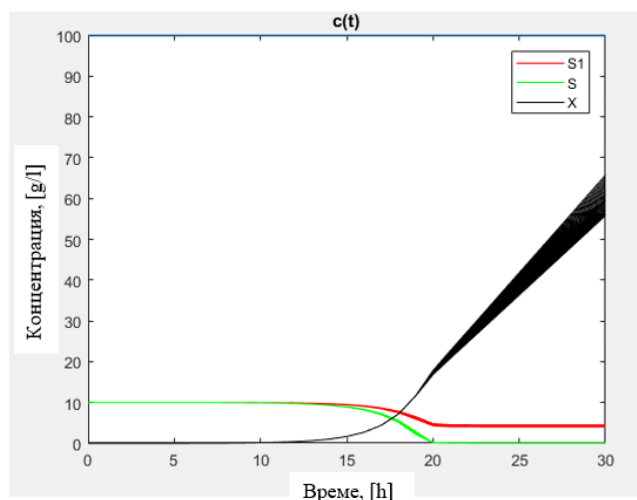
Фигура 4.21 Клетъчен растеж

От графиката се вижда, че с увеличаване на обема на реактора, скоростта на растежа на *Hansenula polymorpha* намалява (наклонът на линиите на графиката намалява). Най-високата концентрация на клетки е при обем на мембрания модул от $0.55 \text{ [dm}^3\text{]}$, за сметка на това производителността спрямо обема на реактора (Фигура 4.22) при този размер е твърде ниска, което се обяснява с по-малкия обем на мембрания модул.

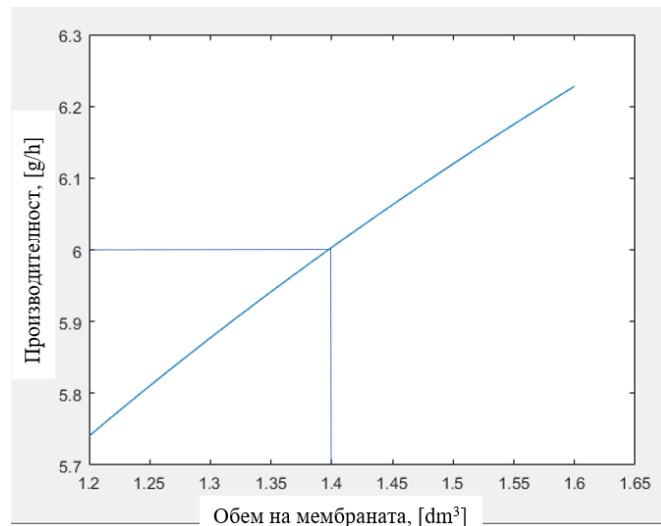


Фигура 4.22 Крива на производителността

Затова се прави ново приближение, като този път работният обем на мембраната започва от $1.2 \text{ [dm}^3\text{]}$ до $1.6 \text{ [dm}^3\text{]}$ със стъпка $0.02 \text{ [dm}^3\text{]}$. Получава се нов резултат (Фигура 4.23), при която концентрацията на клетките е по-ниска в сравнение с получените резултати от предходната Фигура 4.22, също така поради по-малката стъпка се увеличава броя на кривите, които показват клетъчния растеж, но за сметка на това производителността нараства, както се вижда от графиката на Фигура 4.24.

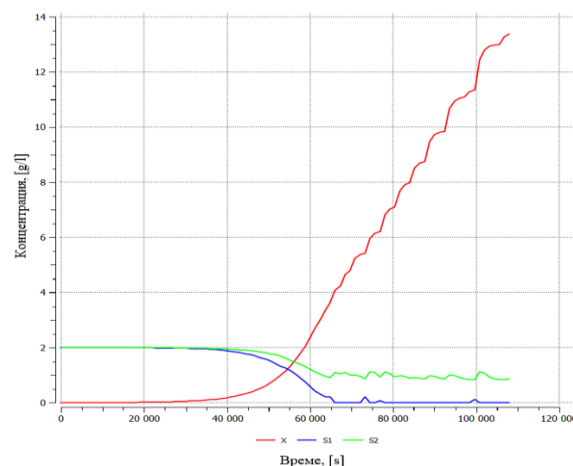


Фигура 4.23 Клетъчен растеж при начален размер на мембраната $1.2 \text{ [dm}^3\text{]}$



Фигура 4.24 Крива на производителността при размер на мембраната между 1.2 [dm³] и 1.6 [dm³]

От графиката показана на Фигура 4.24 се отчита, че зададената производителност от 6 [g/h] се постига при обем на мембранный модул 1.4 [dm³]. Двете камери на реактора са с еднакъв обем, следователно вътрешната и външната камера са по 1.4 [dm³] и за обема на целия реактор получаваме 2.8 [dm³] [146].

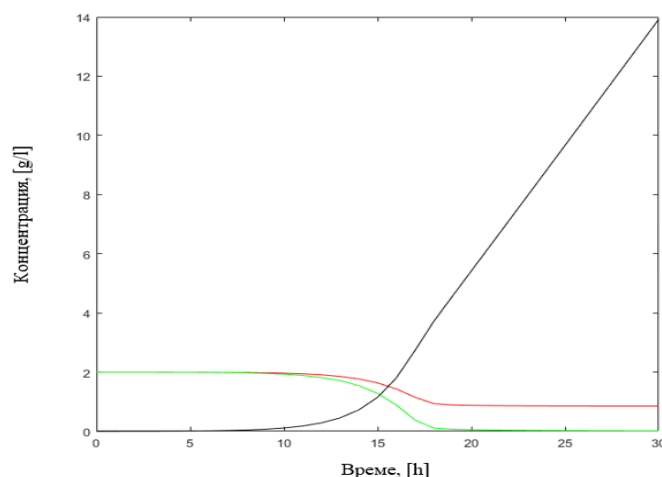


Фигура 4.25 Клетъчен растеж (получен с ANSYS CFX)

S2 (в зелено) - концентрация на субстрат на изход от реактора; S1 (в синьо) - концентрация на субстрат необходим за растеж на клетките; X (в черно) - концентрация на клетки

След определянето на размерите и работните параметри на реактора и на мембранный модул с MATLAB, са проведени компютърни симулации на клетъчния растеж в избрания реактор в програмната среда ANSYS. Графиките от Фигура 4.25 и Фигура 4.26 показват изменението на концентрацията на клетките във вътрешната камера на биореактора.

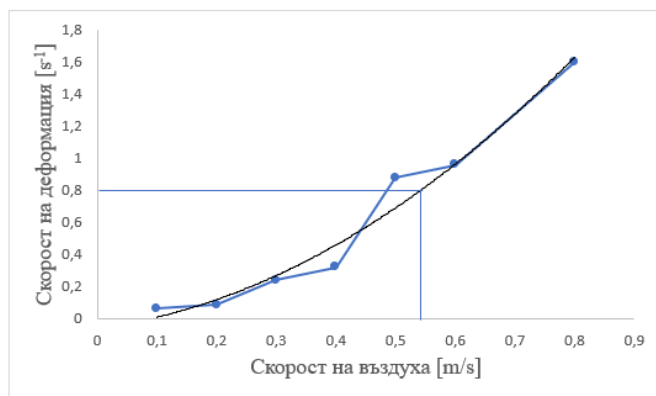
Получените резултати показани на горните фигури са при различна размерност на времевата ос, като в MATLAB времето е представено в часове, докато в ANSYS CFX е в секунди. Също така на графиката получена с ANSYS CFX се забелязва наличието на смущения. Тези смущения се появяват след 18-тия час (65000 секунда). Като цяло двете графики са идентични, което може да се приеме като верификация на използвания модел за компютърна симулация.



Фигура 4.26 Клетъчен растеж (получен с MATLAB)

S2 (в червено) - концентрация на субстрат на изход от реактора; S1 (в зелено) - концентрация на субстрат необходим за растеж на клетките; X (в черно) - концентрация на клетки

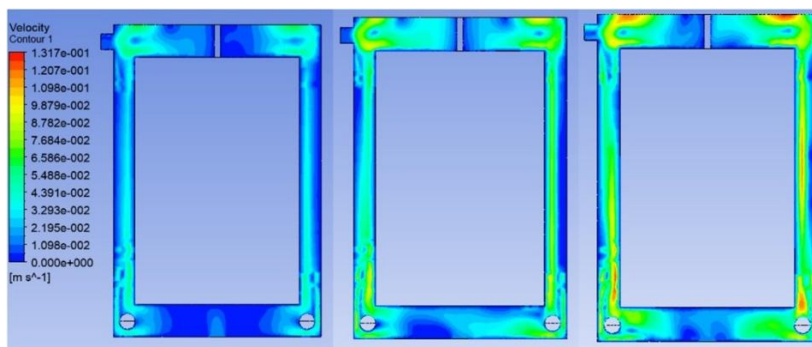
Аерацията оказва значително влияние върху скоростта на срязване, чрез увеличаване на степента на аериране се достига по-интензивна турбулентност вътре в барботажната колона. Освен това аерирането спомага за по-високата ефективност на мембранный модул като намалява образуването на утайка по мембранната повърхност.



Фигура 4.27 Скорост на деформация в граничния слой

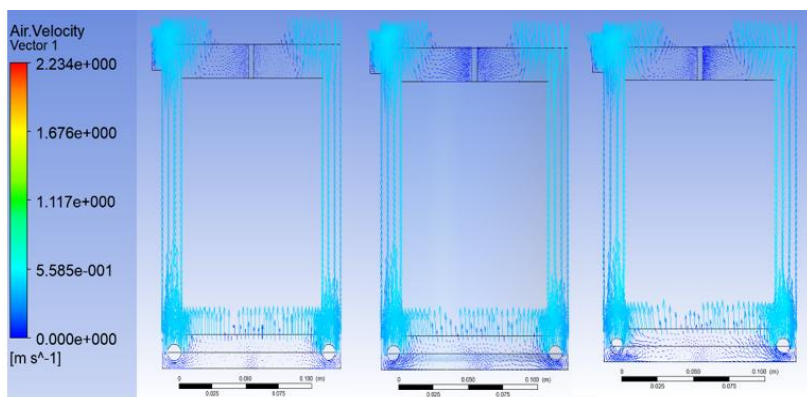
Представени резултатите на Фигура 4.27 показват зависимостта на скоростта на деформация при граничния слой от външната странна на мембраната. В програмната среда ANSYS CFX е изчислена скоростта на деформация в граничния слой при различна скорост на въвеждания въздуха от 0.1 [m/s] до 0.8 [m/s]. От графиката е видимо, че с увеличаване на скоростта на въздуха се увеличава и скоростта на деформация. От една страна тази тенденция предотвратява замърсяването на мембранный модул, но може да има неблагоприятно влияние върху клетките, които се развиват в реактора. За зададената минимална скорост на деформацията $0.8 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, от графиката се отчита минимална скорост на барботиращия въздух 0.55 [m/s].

Средата ANSYS CFX дава възможност получените числени резултатите за скоростта на деформация във външната камера на реактора да бъдат представени векторно и под формата на цветни контури, показани на Фигура 4.28 и Фигура 4.29.



Фигура 4.28 Скорост на срязване във външната камера

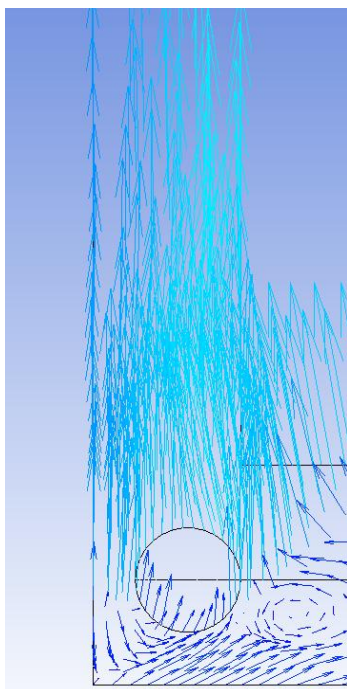
(a) - при скорост на аериране 0.2[m/s]; (b) - при скорост на аериране 0.4[m/s];
(c) - при скорост на аериране 0.6[m/s]



Фигура 4.29 Скорост на срязване във външната камера (векторно представяне)

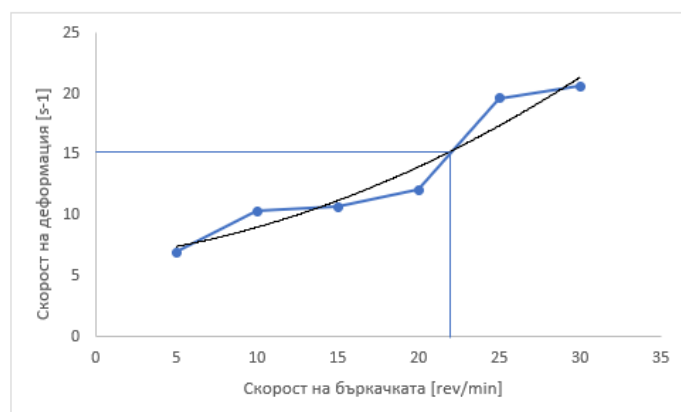
(a) - при скорост на аериране 0.2[m/s]; (b) - при скорост на аериране 0.4[m/s];
(c) - при скорост на аериране 0.6[m/s]

На следващата Фигура 4.30 в близък план е показано векторно посоката на движение на флуида.



Фигура 4.30 Посока на движение на флуидите във външната камера (векторно представяне)

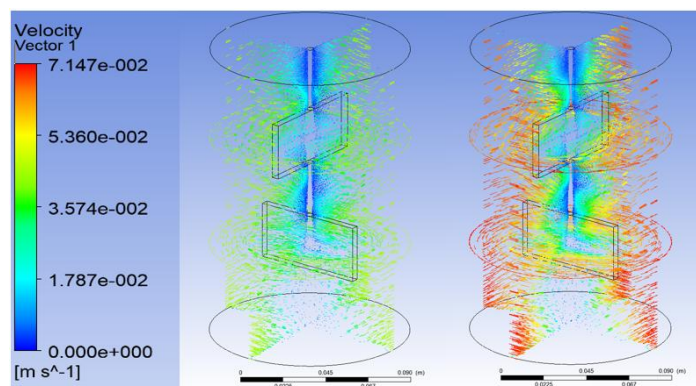
От горната фигура става ясно, че при по-високи скорости на аериране се достига по-голяма турбулентност около мембрания модул. На Фигура 4.31 са представени резултатите за разпределение на скоростта на срязване във вътрешната камера на реактора, предизвикани от бъркачката при различни скорости на въртене от 5 [rev/min] до 30 [rev/min].



Фигура 4.31 Скорост на деформацията предизвикана от бъркачката

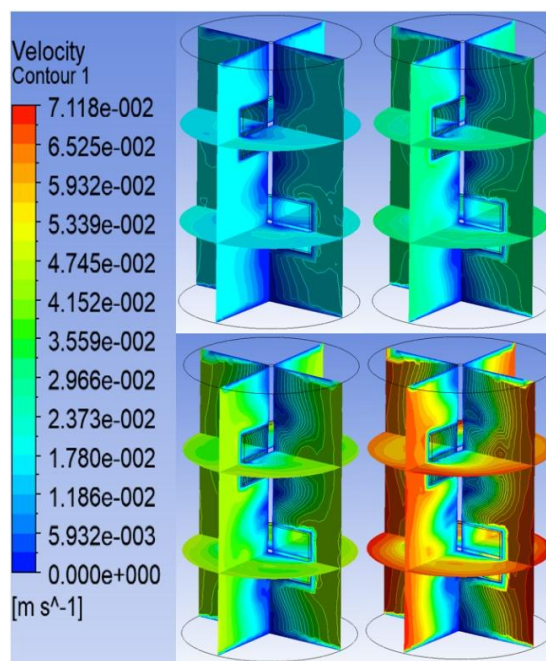
За достигане на зададената максимална скорост на деформацията $15 [s^{-1}]$, от графиката се определя, че максималната скорост на бъркачката трябва да бъде 22

[rev/min]. На следващите фигури, Фигура 4.32 и Фигура 4.33, скоростта на деформация при различни скорости на разбъркване във вътрешната камера на реактора е представена чрез цветни контури и векторно.



Фигура 4.32 Скорост на деформация във вътрешната камера

(c) - при скорост на разбъркване 20 [rev/min]; (d) - при скорост на разбъркване 25 [rev/min]

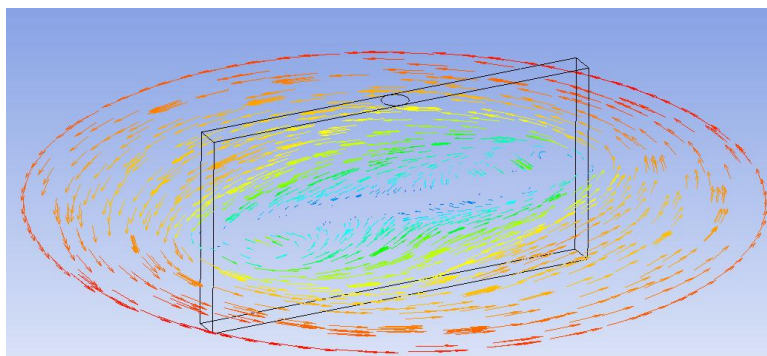


Фигура 4.33 Скорост на деформация във вътрешната камера

(a) - при скорост на разбъркване 10[rev/min]; (b) - при скорост на разбъркване 15[rev/min]; (c) - при скорост на разбъркване 20[rev/min]; (d) - при скорост на разбъркване 25[rev/min]

От Фигура 4.32 и Фигура 4.32 се вижда, че с увеличаване на оборотите на бъркачката се увеличава и скоростта на деформация, което води до по-добро разбъркване, но и може да доведе до унищожаване на живите клетки във вътрешната камера на реактора.

Скоростта на деформация представена на фигура (d) при оборотите на въртене на бъркачката 25 [rev/min] е най-ясно изразена, като най-високата достигната скорост на деформация е оцветена в червен цвят, а най-ниската в син [146]. На Фигура 4.34 векторно е представена посоката на въртене на бъркачките.



Фигура 4.34 Посока на разбъркване (векторно представяне)

4.4. Управление на крикет филтър.

Крикет филтърът, показан на Фигура 4.35 е създаден от amafilter® Filtration group®, и е пуснат на пазара през 1990 г., като оттогава е инсталиран в над 1000 промишлени приложения в световен мащаб. Той се превърна в утвърден филтър под налягане, разработен, за да комбинира предимствата на листовите филтри под налягане и картриджните/свещните филтри, като същевременно избягва техните недостатъци. Той е особено подходящ за отделяне на фини твърди частици от течности, широко използван в приложения като ядливо масло, желатин, какаово масло, захар, подсладители, олеохимикали, минно дело и почистване с амини.

4.5. Симулационен анализ на крикет филтър.

Споменатият по-горе крикет филтър е внедрен в рафинерията Karachaganak Petroleum Operating B.V. (КРО) в Казахстан. КРО. Стратегията за управление на крикет филтъра е разработена в Honeywell Experion Process Knowledge System (PKS).

Станцията позволява на оператора да вижда всички активни аларми, които могат да бъдат визуализирани в списъка с аларми. Фигура 4.41 показва стъпките при управление на крикет филтъра с текущият активен дисплей на място. Този дисплей позволява на оператора да види действителната стъпка, но не предоставя никаква друга технологична информация.

CI:\ProgramData\Honeywell\Experion PKS\Client\Abstract\KPO_CHI\AD1550_SEQ6.htm

Number	STEP	CL-02A	CL-02B
Step 1	STAND BY	☐ 0	☐ 0
Step 2	PRE START	☐ 0	☐ 0
Step 3	FILLING	☐ 0	☐ 0
Step 4	VENTING	☐ 0	☐ 0
Step 5	CLOTH WASHING	☐ 0	☐ 0
Step 6	REFILL	☐ 0	☐ 0
Step 7	VENTING 2	☐ 0	☐ 0
Step 8	CLARIFICATION 1	☐ 0	☐ 0
Step 9	CLARIFICATION 2	☐ 0	☐ 0
Step 10	FILTRATION	☐ 0	☐ 0
Step 11	CIRCULATION	☐ 0	☐ 0
Step 12	EMPTYING	☐ 0	☐ 0
Step 13	VENTING 3	☐ 0	☐ 0
Step 14	OPEN CAKEDOOR	☐ 0	☐ 0
Step 15	CAKE DISCHARGE	☐ 0	☐ 0
Step 16	PULSE	☐ 0	☐ 0
Step 17	VALVE CLOSE	☐ 0	☐ 0
Step 18	CAKE DISCHARGE READY	☐ 0	☐ 0
Step 19	CLOSE CAKEDOOR	☐ 0	☐ 0

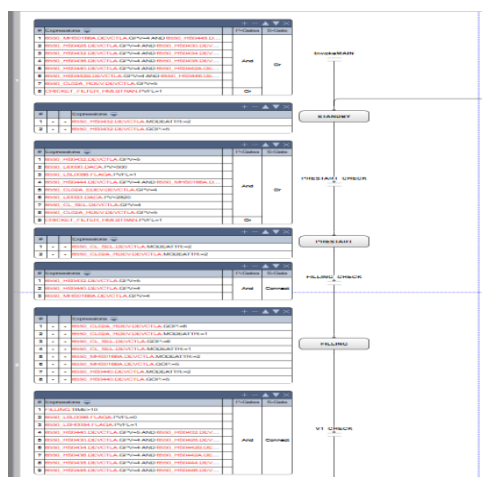
Фигура 4.41 Стъпки за изпълнение на крикет филтъра

4.6. Управление на двуслоен нагревател.

Двуслойните нагреватели, известни още като технологични нагреватели с двойно горене, са усъвършенствани термични агрегати, способни да работят с два източника на гориво, обикновено природен газ и мазут. Тази гъвкавост при работа с двойно гориво повишава енергийната сигурност, експлоатационната надеждност и рентабилността в различни индустрии като добив на нефт, нефтохимическа промишленост и производство на електроенергия. .

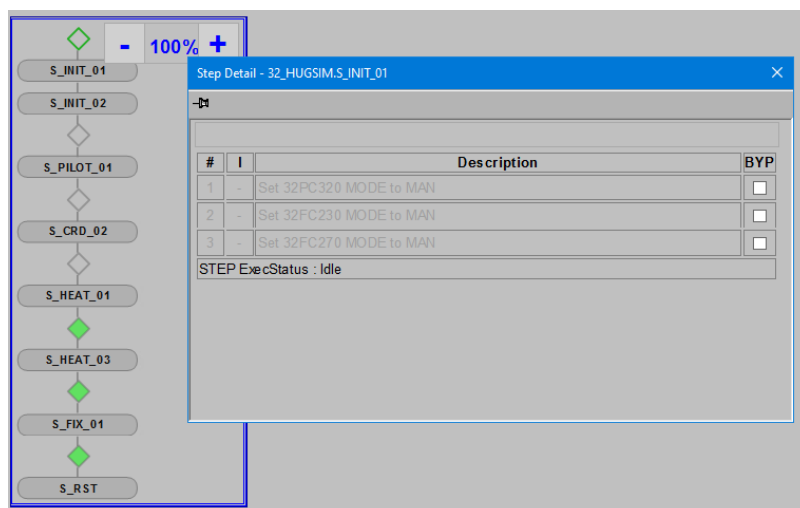
4.7. Симулационен анализ на двуслоен нагревател.

Стратегията за управление на двуслойния нагревател е разработена в Honeywell Experion Process Knowledge System (PKS).



Фигура 4.44 Sequence Control module

За системата с двоен пожарен отоплител, поради броя на стъпките, които трябваше да бъдат изпълнени, тя беше направена с модул за последователно управление (Фигура 4.44). НМІ библиотеката предоставя и форма за SCM (Фигура 4.50), където могат да се видят стъпките, както и командите, които се изпълняват по време на стъпката.



Фигура 4.50 Honeywell solution pack SCM шейп

Number	STEP	CL-02A		CL-02B	
Step 1	STAND BY	○	0	○	0
Step 2	PRE START	○	0	○	0
Step 3	FILLING	○	0	○	0
Step 4	VENTING	○	0	○	0
Step 5	CLOTH WASHING	○	0	○	0
Step 6	REFILL	○	0	○	0
Step 7	VENTING 2	○	0	○	0
Step 8	CLARIFICATION 1	○	0	○	0
Step 9	CLARIFICATION 2	○	0	○	0
Step 10	FILTRATION	○	0	○	0
Step 11	CIRCULATION	○	0	○	0
Step 12	EMPTYING	○	0	○	0
Step 13	VENTING 3	○	0	○	0
Step 14	OPEN CAKEDOOR	○	0	○	0
Step 15	CAKE DISCHARGE	○	0	○	0
Step 16	PULSE	○	0	○	0
Step 17	VALVE CLOSE	○	0	○	0
Step 18	CAKE DISCHARGE READY	○	0	○	0
Step 19	CLOSE CAKEDOOR	○	0	○	0

Фигура 4.51 Popur Display

Оттук операторът може лесно да разбере процеса и може да определи дали дадено условие не е изпълнено и оттук може да реши дали е необходимо да го отмени или не, без да е необходимо да отваря конфигурационното студио.

Karachaganak Petroleum Operating B.V. (KPO) преди това използваше изскачащ дисплей (вижте Фигура 4.51), преди да приеме формата на SCM. Въпреки че, дисплеят е все още активен на място и показва текущите стъпки, неговата полезност е минимална:

той показва само действителната стъпка и не предоставя на оператора допълнителни данни. Тази простота обаче предлага критично предимство: не влошава производителността на системата. За разлика от това, стандартната форма на SCM е силно взискателна по отношение на данни и може да доведе до забавяне или сринове на станцията Experion, особено когато на един дисплей присъстват множество SCM [117-120].

4.8. Изводи по четвърта глава.

От проведените изследвания и получените резултати от анализа в четвърта глава, могат да се направят следните изводи:

1. Работната среда на MATLAB позволява числено решаване на математичния модел от обикновени диференциалните уравнения описващи материалния баланс по клетки и субстрат. Резултатите получени с програмния код позволяват изчисляване и оразмеряване на биореактор при зададена производителност.

2. Програмната среда ANSYS CFX дава възможност за описание на хидродинамичната картина в биореактора и около мембранный модул. Създадения компютърен модел може да бъде верифициран чрез сравняване с резултати получени от изчисления с MATLAB.

3. При различна приведена скорост на газа (0.4 [m/s] и 0.6 [m/s]) и еднакви други условия (разположение на мембранный модул спрямо барботьора), скоростта на деформация нараства при по-висока приведена скорост на газа. Също така е установено, че за постигане на зададената минимална скорост на деформация $0.8 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, е необходимо минималната скорост на барботиращия въздух да е 0.55 [m/s] .

4. При промяна на скоростта на разбъркване, скоростта на деформация във вътрешната камера на биореактора нараства, което може да се отрази неблагоприятно на растежа на клетките. За достигане на зададената максимална скорост на деформацията $15 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, е необходимо максимална скорост на бъркачката да е 22 [rev/min] .

5. Показано е как се управлява крикет филтър със сух изход на утайка, произведен от Amafilter® Filtration group®, използвайки средата на Honeywell Experion Process Knowledge System. Чрез подобряване на Sequence Control и благодарение на HMI Display Builder е по-лесно за потребителите да разберат системата и по този начин да увеличат производителността ѝ. Sequence Control Module позволява на потребителите да виждат

в реално време какво се случва със системата и използвайки различните Handler, всеки възможен сценарий може да бъде контролиран.

6. Предложената система за управление на технологични обекти със средствата на Honeywell Experion Process Knowledge System за вземане на решения при експлоатацията на крикет филтър за рафинерията Karachaganak Petroleum Operating B.V. (КРО) в Казахстан, повишава производителността на системата.

7. Показано е управлението на двуслоен нагревател, използвайки средата Honeywell Experion Process Knowledge System. Чрез подобряване на управлението на последователността и благодарение на използването на HMI Display Builder и Electronic Work Instructions, като потребителите успяват по-лесно да разберат системата, както и да избегнат прекъсвания и да намалят грешките на оператора, като по този начин се увеличи производителността. Модулът за управление на последователността, позволява на потребителите да виждат в реално време какво се случва със системата, а с помощта на различните инструменти, предоставени от него, може да се контролира всеки възможен сценарий.

8. Предложената система за управление на технологични обекти със средствата на Honeywell Experion Process Knowledge System за вземане на решения при експлоатацията на технологични нагреватели с двойно горене за рафинерията Karachaganak Petroleum Operating B.V. (КРО) в Казахстан, повишава производителността на системата.

Заклучение - резюме на получените резултати

Списък на публикациите по дисертацията

1. Iliev, V., Moutafchieva, D., **Dukovski, R.**, Numerical Investigation of Hydrodynamics in Submerged Membrane Bioreactor with Aeration. Bulgarian Chemical Communications, Journal of the Chemicals Institutes of the Bulgarian Academy of Sciences and of the Union of Chemists in Bulgaria, 52, 4, Bulgarian Academy of Sciences, 2020, ISSN:0324-1130, DOI:1034049/bcc.52.4.MP10, 561-568. SJR (Scopus):0.17, JCR-IF (Web of Science):0.349

2. **Dukovski, R.**, Implementation and Process Control of a Cricket Filter. Engineering Sciences, LXI, 2, Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2024, ISSN:1312-5702, DOI:10.7546/EngSci.LXI.24.02.01, 3-14.

3. **Dukovski, R.**, Drum Level Control of a Boiler System. Engineering Sciences, LXII, 3, Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2025, ISSN:1312-5702, DOI:10.7546/EngSci.LXII.25.03.05, 46-67.

4. **Dukovski, R.**, Implementation and Control of Boiler System. Engineering Sciences, LXII, 2, Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2025, ISSN:1312-5702, DOI:10.7546/EngSci.LXII.25.02.03, 42-55.

5. **Dukovski, R.**, Implementation and Process Control of a Dual Fired Heater. Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering – BdKCSE'2025, 06-07 November 2025, Bankya, Bulgaria, IEEE Xplore, приета за печат: 2025.

Основни научни и научно-приложни приноси

Поставените цел и задачи на дисертационния труд са насочени към постигане на високоефективно управление на сложни технологични обекти, като се предлага възможността за използване на различни съвременни методи за проектиране и управление, за да се координират локалните системи за управление на отделните процеси и да се достигне до ефективно управление на технологичните обекти.

Получените резултати, описани в настоящия дисертационен труд, могат да се обобщят в следните научни и научно-приложни приноси:

1. Проведен е задълбочен теоретичен анализ на системите за вземане на решения и на предизвикателствата, които възникват при приложението им, представени със средствата на съвременната теория.

2. Анализирано е действието на топлоенергиен технологичен обект за управление - парогенератор, като са разработени модели за управление на ниво на пароводна смес и на ниво в барабана, при наличие на статичен компенсатор на смущенията.

3. Проведено е симулационно моделиране на системите за вземане на решения при управление на парогенератор, като са разработени симулационни модели в програмната средата MATLAB Simulink и Experion Process Knowledge System за математически модел на реален парогенератор.

4. Предложена е система за автоматично регулиране на нивото на пароводната смес в барабана със средствата на Honeywell Experion Process Knowledge System за вземане на решения, при експлоатация в реално време на парогенератор в рафинерията Ел Пасо в САЩ.

5. Проектиран е мембранен биореактор за добив на дрожди *Hansenula polymorpha*, с производителност 6 [g/h] при температура на култивиране 30 [°C] и хранителна среда – метанол. Определена е необходимата скорост на аерация, чрез компютърни симулации на хидродинамичното поведение около граничния слой на мембраната при минимална скорост на деформация 0.8 [s⁻¹]. Определена е необходимата скорост на разбъркване, чрез компютърни симулации на хидродинамичното поведение в камерата за клетъчен растеж при максимална скорост на деформация от 15 [s⁻¹].

6. Проведено е симулационно моделиране на химикотехнологичен обект за управление - крикет филтър и е предложена система за управление със средствата на Honeywell Experion Process Knowledge System за вземане на решения при експлоатацията в реално време на крикет филтър за рафинерията Karachaganak Petroleum Operating B.V. (KPO) в Казахстан.

7. Проведено е симулационно моделиране на химикотехнологичен обект за управление - двуслоен нагревател и е предложена система за управление със средствата на Honeywell Experion Process Knowledge System за вземане на решения при експлоатацията в реално време на технологични нагреватели с двойно горене за рафинерията Karachaganak Petroleum Operating B.V. (KPO) в Казахстан.

Декларация за оригиналност

Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания {с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител}. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:

Благодарности

Сърдечно благодаря на ръководителя ми – акад. Васил Сгурев, за оказаната методическа помощ, за съветите и разговорите на теми, които значително обогатиха моята представа за света на науката и различните ѝ проявления. Това за мен бе безценно време и ми позволи да разширя кръгозора си не само в инженерната област, но и разшири мирогледа ми като личност.

Бих искал да изразя своята признателност към семейството ми, което освен опора за мен беше и вдъхновение. То ме окуражи да разширя хоризонтите си и да развия потенциала си. Благодаря на семейството си за безрезервната им подкрепа и разбиране!

Благодаря!