



Радой Стрезимиров Дуковски

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

ДИСЕРТАЦИЯ

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.

СЪДЪРЖАНИЕ

Увод	3
Актуалност на темата	3
Цели и задачи на дисертацията	4
Структура на съдържанието	5
1. Глава „Теоретични основи на процеса за вземане на решения“	6
1.1. Вземане на решения с помощта на интелигентни агенти.	6
1.2. Вземане на решения с помощта на вероятностни модели.	8
1.3. Вземане на решения с помощта на Байесова мрежа.	14
1.4. Вземане на решения с помощта на времеви модели.	20
1.5. Параметрично и непараметрично обучение.	35
1.6. Структурно обучение.	41
1.7. Изводи по първа глава.	49
2. Глава „Системи за вземане на решения“	50
2.1. Теория на полезността.	50
2.2. Мрежи за вземане на решения.	56
2.3. Теория на игрите.	61
2.4. Основни понятия в теорията за вземане на решения.	66
2.5. Доверие и прозрачност на логиката на решенията.	69
2.6. Системен поглед върху внедряването.	76
2.7. Изводи по втора глава.	79
3. Глава „Вземане на решения при управление на топлоенергиен технологичен обект“	80
3.1. Принцип на работата на парогенератор.	80
3.2. Математично моделиране на парогенератор.	90
3.3. Управление на ниво на пароводна смес в парогенератор.	93
3.4. Управление на нивото в барабана на парогенератор.	101
3.5. Симуляционно моделиране на системите за управление на парогенератор.	108
3.6. Експериментални резултати от анализа на парогенератор.	119
3.7. Изводи по трета глава.	130
4. Глава „Вземане на решения при управление на химикотехнологични обекти“	131
4.1. Управление на мембранен биореактор.	131
4.2. Проектиране на мембранен биореактор.	146
4.3. Симуляционен анализ на мембранен биореактор.	152
4.4. Управление на крикет филтър.	160

4.5. Симуляционен анализ на крикет филтър.	165
4.6. Управление на двуслоен нагревател.	170
4.7. Симуляционен анализ на двуслоен нагревател.	172
4.8. Изводи по четвърта глава.	179
Заключение - резюме на получените резултати	181
Списък на публикациите по дисертацията	181
Основни научни и научно-приложни приноси	181
Декларация за оригиналност	183
Благодарности	183
Библиография	184

Увод

Актуалност на темата

Процесите на вземане на решения при управлението на технологични обекти е една актуална научна задача, със силно изразен индустриален характер. Оптималният режим на управление може да доведе до високи печалби от производството и да осигури комфортна среда за работа на персонала.

Съвременното икономическо и технологично развитие настоятелно поставят редица нови изисквания пред функционалните и експлоатационни качества на системите за управление на сложните технологични обекти – да бъдат съвместими с оперативното и бизнес управлението, да преодоляват особеностите на сложните обекти за управление – силни нелинейности, структурна динамика, неопределеност, променливост по време. Критериите за успешна работа на системите за управление освен традиционните ефективност, надеждност и точност се налага да отчитат емисиите на вредни газове (NO_x, SO_x, CO₂), инвестиционни и експлоатационни разходи на съоръженията, всережимност.

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.

В практиката, необходимостта от провеждането на изследвания, в повечето случаи са породени от трудностите в управлението на конкретни технологични обекти от енергетиката, химическата промишленост, металургията и други. Управлението на технологични обекти с повече управляеми от възможни управляващи въздействия е класически проблем, третиран вече няколко десетилетия. Конвенционалните системи с избирателно управление (selective control) и ограничено управление (override control) са илюстрация на евристичните инженерни достижения в областта на управлението на сложни технологични процеси. 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.

Цели и задачи на дисертацията

В настоящия дисертационен труд са постигнати оригинални резултати, свързани с изследвания на реални технологични обекти от енергетиката и химическата промишленост, като са разработени аналитични и експериментални модели.

Основен акцент в работа по дисертационния труд бе анализът на значителното многообразие на изследвания и съществуващи методи, които трябваше да определят целесъобразните подходи, методи и алгоритми, които да бъдат тествани върху определени класове обекти. Основните усилия за постигане на търсените резултати бяха насочени към различни елементи на цялостната процедура по вземане на решения при управление на технологични обекти – сравнителен анализ, избор и обосноваване на елементи от тях, оценка на техните силни страни и ограничения, перспективите за реализация в духа на световните тенденции.

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

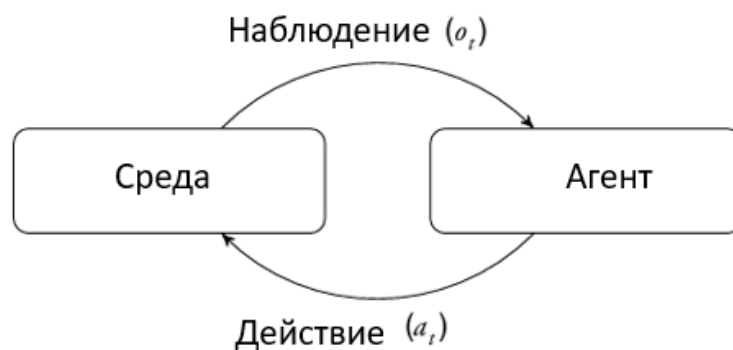
Вземането на решения в условия на неопределеност, включително избягване на сблъсъци със самолети, управление на горски пожари и реагиране при бедствия е процес с висока степен на важност. Когато се проектират автоматизирани системи за подпомагане на вземането на решения, е важно да се вземат предвид 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

В момент t агентът получава наблюдение на света, обозначено с o_t . Наблюденията могат да бъдат направени например чрез биологичен сензорен процес, както при хората, или чрез сензорна система, като радар в система за управление на въздушното движение. Наблюденията често са непълни или силно зашумени, например хората може да не видят приближаващ се самолет или радарната система може да пропусне засичане заради електромагнитни смущения. След това агентът избира действие a_t чрез някакъв процес на вземане на решения, който ще бъде обсъден по-късно. Това действие, като например подаване на предупреждение, може да има недетерминистичен ефект. Фокусът е върху интелигентни агенти, които взаимодействат интелигентно, за да постигнат целите си във времето. Като се има предвид миналата последователност от наблюдения $o_0, \dots, o_t$ и знанията за околната среда, агентът трябва да избере действие a_t , което най-добре постига неговите цели [1, 3, 5].

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].

При някои проблеми може да е по-лесно да се покаже на агента какво да прави, отколкото да се напише програма, която агентът да следва. Проектантът предоставя набор от примери за обучение и автоматизиран алгоритъм за обучение трябва да обобщи тези примери. Този подход е известен като контролирано обучение и е широко прилаган при проблеми с класификацията. Тази техника понякога се нарича поведенческо клониране, когато се прилага към картографиране на обучението от наблюдения към действия. Поведенческото клониране работи добре, когато експертът действително знае най-добрия курс на действие за представителна колекция от примерни ситуации. Въпреки че съществува голямо разнообразие от различни алгоритми за обучение, те обикновено не могат да се представят по-добре от инженера проектант в нови ситуации.

Друг подход е проектантът да определи пространството от възможни стратегии за вземане на решения и мярка за ефективност, която да бъде максимизирана. Оценяването на ефективността на дадена стратегия за вземане на решения обикновено включва провеждане на серия симулации със стратегията за вземане на решения. След

това алгоритъмът за оптимизация извършва търсене в това пространство за оптималната стратегия. Ако пространството от възможни стратегии е относително нискоразмерно и мярката за ефективност няма много локални оптимуми, тогава различни локални или глобални стратегии за търсене може да са подходящи. Въпреки че обикновено се предполага познаване на динамичен модел, за да се изпълнят симулациите, то не се използва за насочване на търсенето на оптималната стратегия, което може да бъде важно при сложни проблеми [1, 7, 8].

Планирането е форма на оптимизация, която използва модел на динамиката на проблема, за да помогне на търсенето. Съществува обширна литература относно проблемите на планирането, голяма част от която е фокусирана върху детерминистични проблеми. За някои проблеми може да е приемливо да се апроксимира динамиката с детерминистичен модел. Ако приемем, че детерминистичен модел позволява използването на методи, които по-лесно се мащабират до многомерни проблеми. За други проблеми, отчитането на бъдеща неопределеност е абсолютно критично [5].

Обучението с усиленото учене облекчава планирането, защото моделът е известен предварително. Вместо това, стратегията за вземане на решения се научава, докато агентът взаимодейства със света. Проектантът трябва само да предостави мярка за ефективност, която да зависи от обучаващия се алгоритъм да оптимизира поведението на агента. Една от интересните сложности, която възниква при това обучение е, че изборът на действие влияе не само върху непосредствения успех на агента в постигането на целите му, но и върху способността му да изучава средата и да идентифицира характеристиките на проблема, които може да използва [7, 8, 10].

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 от непълна информация за състоянието на процеса. Да предположим, например, че наблюдаваме спътник, който обикаля около Земята на хиляди километри разстояние. Спътникът изпраща надеждно данни за

мисията и телеметрията от месеци, но изведнъж се губи комуникационната линия. Много различни събития могат да доведат до загуба на комуникация, като например повреда в електрическата система или комуникационната система на борда на спътника, или това може да се дължи на повреда на система на земята, използвана за наблюдение на спътника. Предвид информацията, с която разполагаме, е невъзможно да се постави диагноза с пълна сигурност.

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.

Една надеждна система за вземане на решения трябва да отчита тези източници на неопределеност в текущото състояние на системата и бъдещите резултати от събитията [11, 12].

В системите с неопределеност е от съществено значение да можем да сравняваме правдоподобността на различни твърдения. Бихме искали да можем да представим например, че нашето убеждение, че „има електрическа аномалия на нашия спътник“, е по-силно от нашето убеждение, че „има аномалия на тласкащата система на нашия спътник“. Ако Е представлява твърдението „има електрическа аномалия на нашия спътник“, а Т представлява твърдението „има аномалия на системата тласкаща система на нашия спътник“, тогава бихме написали $E \supset T$. Ако приемаме Е и Т с еднаква степен на достоверност, тогава пишем $E \sim T$. Също така е полезно да можем да сравняваме нашите убеждения за твърдения, като имаме известна информация. Например, бихме искали да кажем, че „има електрическа аномалия при загуба на комуникация“ е по-вероятно от „има аномалия на тласкащата система при загуба на комуникация“. Ако С представлява загуба на комуникация, тогава бихме написали $(E \mid C) \supset (T \mid C)$. Искаме да направим определени предположения относно връзките, индуцирани от операторите $\supset$ и $\sim$. Предположението за универсална сравнимост изисква точно едно от следните: $(A \mid C) \supset (B \mid C)$, $(A \mid C) \sim (B \mid C)$ или $(A \mid C) \supset (B \mid C)$. Транзитивността изисква, ако $(A \mid D) \supset (B \mid D)$

$| D)$ и $(B | D) \geq (C | D)$, тогава $(A | D) \geq (C | D)$. Предположенията за универсална сравнимост и транзитивност водят до възможност за представяне на степени на доверие, чрез функция с реални стойности [1]. С други думи, можем да използваме функция P , която има следните две свойства:

$$P(A|C) > P(B|C) \text{ тогава и само тогава ако } (A | C) \succ (B | C)$$

$$P(A|C) = P(B|C) \text{ тогава и само тогава ако } (A | C) \sim (B | C).$$

Ако направим набор от допълнителни предположения за формата на P , тогава можем да покажем, че P трябва да удовлетворява основните аксиоми на вероятността. Следователно, $0 \leq P(A | B) \leq 1$. Ако сме сигурни в $(A | B)$, тогава $P(A | B) = 1$. Ако вярваме, че $(A | B)$ е невъзможно, тогава $P(A | B) = 0$. Неопределеността в истинността на $(A | B)$ е представена от стойности между двата екстремума. За целите на представянето ще преформулираме две важни свойства на вероятностите. Първото е дефиницията на условна вероятност, която гласи, че:

$$P(A | B) = \frac{P(A,B)}{P(B)} \quad (1.1)$$

където $P(A, B)$ представлява вероятността A и B да са верни. Второто важно свойство е законът за пълната вероятност, който изисква, ако B е набор от взаимно изключващи се и изчерпателни твърдения, тогава:

$$P(A | B) = \sum_{B \in B} P(A | B, C)P(B | C) \quad (1.2)$$

Лесно е да се покаже от дефиницията на условна вероятност, че е валидно следното:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \quad (1.3)$$

Това уравнение е известно като *правило на Байес* [11, 12, 13].

Да предположим, че имаме двоична случайна променлива A , която може да приеме една от две различни стойности: 0 или 1. Вероятностното разпределение, свързано с A , определя вероятностите на различните стойности, които могат да бъдат присвоени на A , по-специално $P(A = 0)$ и $P(A = 1)$. Ще използваме малки букви и горни индекси като съкращения, когато обсъждаме присвояването на стойности на случайни променливи. Например, $P(a^0)$ е съкращение за $P(A = 0)$. Разпределението $P(A)$ се определя от стойностите на $P(a^0)$ и $P(a^1)$, но разпределението може да бъде представено

само с един независим параметър, $P(a^0)$, защото $P(a^1) = 1 - P(a^0)$. Ако A е дискретна случайна променлива, която може да приеме една от n различни стойности, тогава $P(A)$ може да бъде дефинирана от $n - 1$ параметъра, а именно $P(a^1), \dots, P(a^{n-1})$, защото $P(a^n) = 1 - (P(a^1) + \dots + P(a^{n-1}))$.

Ако A е непрекъснатата случайна променлива, тогава представянето на разпределението върху A е малко по-трудно. Вероятността A да приеме някаква конкретна стойност е безкрайно малка. Да разгледаме *равномерното разпределение* $U(0, 10)$, което присвоява еднаква вероятност на всички стойности в диапазона $(0, 10)$. Вероятността случайна извадка от това разпределение да е равна на константата π е по същество нула. Въпреки това, можем да дефинираме ненулеви вероятности за извадки, намиращи се в някакъв интервал, например $(3, 4)$. Ако $P(A) = U(0, 10)$, тогава вероятността извадка да се намира между 3 и 4 е $1/10$.

Разпределенията върху непрекъснати променливи могат да бъдат представени с помощта на *кумулятивна функция на разпределение* или *функция на плътност на вероятността*. Кумулативната функция на разпределение определя масата на вероятността, свързана със стойности под някакъв праг [13, 12, 14].

Ако $p(a)$ е функция на плътността на вероятността върху A , тогава $p(a)da$ е вероятността A да попадне в интервала $(a, a + da)$ при $da \rightarrow 0$. Кумулативната функция на разпределение P може да бъде дефинирана чрез плътност на вероятността, както следва:

$$P(a) = \int_{-\infty}^a p(a) da \quad (1.4)$$

Да предположим, че искаме да представим разпределението по височина на самолета в района на терминала около летище, използвайки функция на плътност $p(a)$. Първо ще трябва да изберем форма на разпределението и след това да определим неговите параметри. Често срещано разпределение за непрекъснати променливи е *Гаусово разпределение* (наричано още нормално разпределение). Гаусовото разпределение е параметризирано със средната стойност μ и дисперсия σ^2 :

$$p(w) = N(w | \mu, \sigma^2) \quad (1.5)$$

Използваме $N(\mu, \sigma^2)$, за да представим Гаусово разпределение с параметри μ и σ^2 , и $N(w | \mu, \sigma^2)$, с плътност w , като:

$$N(w | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{w-\mu}{\sigma}\right) \quad (1.6)$$

Функцията ϕ е *стандартната нормална функция на плътността*:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2) \quad (1.7)$$

Въпреки че Гаусовото разпределение често е удобно, защото се дефинира само от два параметъра и улеснява изчисленията, то има някои ограничения, особено за представяне на разпределенията на височината. То присвоява ненулева вероятност на отрицателни височини, които разбира се, трябва да са положителни. То също така присвоява ненулеви вероятности на самолети, летящи на нереалистично големи височини. Тези проблеми могат да бъдат отстранени чрез ограничаване на опората, т.е. диапазона от стойности, на които са присвоени ненулеви вероятности, което води до *Гаусово разпределение с функция на плътност*:

$$N(w | \mu, \sigma^2, a, b) = \frac{\frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{w-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)} \quad (1.8)$$

когато w е в интервала $[a, b]$. Функцията Φ е *стандартната нормална кумулативна функция* на разпределение:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(x) dx \quad (1.9)$$

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].

Таблица 1.1 Примерно съвместно разпределение

A	B	C	$P(A,B,C)$
0	0	0	0.08
0	0	1	0.15
0	1	0	0.05
0	1	1	0.10
1	0	0	0.14
1	0	1	0.18
1	1	0	0.19
1	1	1	0.11

Моделът на Гаусовата смес е просто среднопретеглена стойност на различни Гаусови разпределения. Параметрите на Гаусов смесен модел включват параметрите на компонентите на Гаусовото разпределение $\mu_1, \sigma_1^2, \dots, \mu_n, \sigma_n^2$, както и техните тегла $\rho_1, \dots, \rho_n$.

Плътноста в този случай е:

$$p(x | \mu_1, \sigma_1^2, \dots, \mu_n, \sigma_n^2, \rho_1, \dots, \rho_n) = \sum_{i=1}^n \rho_i N(x | \mu_i, \sigma_i^2) \quad (1.10)$$

с ограничението, че теглата се сумират до 1.

Ако използваме Гаусов смесен модел, за да представим разпределението на надморската височина, тогава бихме могли да използваме Гаусови компоненти, центрирани във върховете, и да присвоим подходящи тегла.

Друг подход за представяне на мултимодални непрекъснати разпределения е чрез дискретизация. Например, бихме могли да създадем интервали за височина и да представим разпределението като *частично равномерна плътност*. Плътността е определена от ръбовете на интервала, а вероятностната маса е свързана с всеки интервал [12, 14, 23].

Едно от предизвикателствата при представянето на неопределеността е използването на съвместни разпределения върху много променливи. Засега нека предположим, че искаме да моделираме съвместното разпределение върху двоични променливи A, B и C.

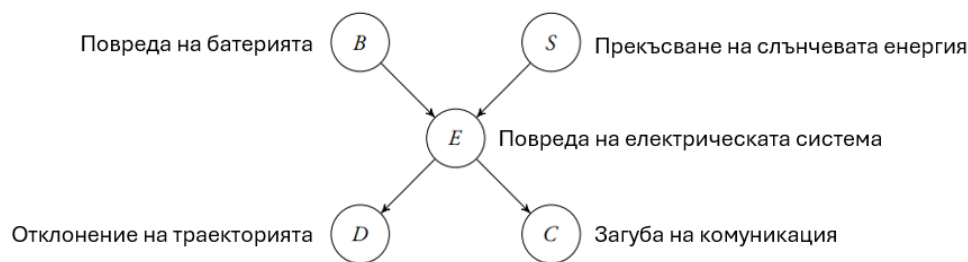
Разпределение е показано в Таблица 1.1 и съдържа $2^3 = 8$ записа, определящи вероятности за всяко възможно присвояване на стойности на трите променливи.

Тъй като изброихме всяко възможно присвояване, вероятностите в таблицата се сумират до 1. Въпреки че, в таблицата има осем записа, само седем от тях са *независими*. Ако θ_i представлява вероятността в i -тия ред в таблицата, тогава са ни необходими само параметрите $\theta_1, \dots, \theta_7$, за да представим разпределението, защото знаем, че $\theta_8 = 1 - (\theta_1 + \dots + \theta_7)$.

Ако имаме n двоични променливи, тогава са ни необходими до $2^n - 1$ независими параметъра, за да определим съвместното разпределение. Това експоненциално нарастване на броя на параметрите затруднява представянето на неопределеността и изучаването на вероятностни модели [18, 21, 24].

1.3. Вземане на решения с помощта на Байесова мрежа.

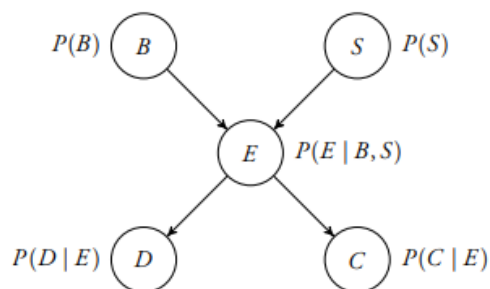
Байесовата мрежа е компактно представяне на съвместно разпределение. Структурата на мрежата е представена като граф, състоящ се от възли и насочени ребра. Всеки възел съответства на случайна променлива. Насочените ребра свързват двойки възли, като циклите в графа са забранени.



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].

Други аномалии, които не включват електрическата система, могат да доведат до отклонение от траекторията и загуба на комуникация. С всяка от петте променливи са свързани пет условни вероятностни разпределения, както е показано на Фигура 1.3. Тъй като B и S нямат променливи, трябва да определим само $P(B)$ и $P(S)$. Разпределението $P(B)$ може да бъде определено с помощта на едно независим параметър $P(b^0)$, а разпределението $P(S)$ може да бъде зададено с помощта на един-единствен независим параметър $P(s^0)$.



Фигура 1.3 Пример за условни вероятности на Байесова мрежа

Възелът, свързан с E , има два родителя, B и S . Таблица 1.2 представлява $P(E | B, S)$ и има 2^3 реда. Само половината от тези редове са необходими за определяне на разпределението поради ограничението, че $P(e^1 | b, s) = 1 - P(e^0 | b, s)$, където b и s представляват всяко присвояване на B и S .

Таблица 1.2 Примерно условно разпределение

E	B	S	$P(E B, S)$
0	0	0	0.90
0	0	1	0.05
0	1	0	0.03
0	1	1	0.01
1	0	0	0.10
1	0	1	0.95
1	1	0	0.97
1	1	1	0.99

Другите две колони за условни вероятности $P(D | E)$ и $P(C | E)$, които могат да бъдат представени с два независими параметъра. Когато променливите са двоични, $P(X | Pa_X)$ може да бъде представена с 2^n независими параметъра, където n е броят на родителите на X . Верижното правило за Байесови мрежи определя как да се конструира съвместно разпределение от локалните условни вероятностни разпределения. Да предположим, че имаме променливите $X_1, \dots, X_n$ и искаме да изчислим вероятността за конкретно присвояване на всички тези променливи на стойности $P(x_1, \dots, x_n)$. Нека Pa_{x_i} представлява конкретното присвояване на родителите на X_i към техните ценности. Верижното правило гласи:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | Pa_{x_i}) \quad (1.11)$$

Вероятността нищо да не се обърка, т.е. $P(b^0, s^0, e^0, d^0, c^0)$ е:

$$P(b^0, s^0, e^0, d^0, c^0) = P(b^0)P(s^0)P(e^0 | b^0, s^0)P(d^0 | e^0)P(c^0 | e^0) \quad (1.12)$$

За напълно съвместно разпределение по петте променливи B, S, E, D и C , имаме $2^5 - 1 = 31$ независими параметъра. Структурата, приета в Байесовата мрежа, позволява да се зададе съвместно разпределение, използвайки само $1 + 1 + 4 + 2 + 2 = 10$ независими параметъра. Разликата между 10 и 31 не представлява особено значителни икономии в броя на параметрите, но спестяванията могат да станат огромни в по-големите Байесови мрежи. Силата на Байесовите мрежи идва от способността им да намалят броя на

параметрите, необходими за задаване на съвместно вероятностно разпределение [12, 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.

Казваме, че променливите A и B са *независими* тогава и само тогава, когато $P(A, B) = P(A)P(B)$. Твърдението, че A и B са независими, се записва като $A \perp B$. От уравнение (1.1) виждаме, че $A \perp B$ тогава и само тогава, когато $P(A) = P(A | B)$. С други думи, информацията за B не ни дава никаква допълнителна информация за A и обратно. Например, нека приемем, че повреда на батерията на спътник (B) е независима от повреда на слънчев панел (S).

Следователно, знанието, че сме имали повреда на батерията, не увеличава или намалява нашето убеждение дали е имало повреда на слънчевия панел. Можем да определим съвместното разпределение $P(B, S)$, използвайки само два параметъра $P(b^0)$ и $P(s^0)$, както е показано в Таблица 1.3. Всъщност, ако имаме n независими двоични променливи, тогава можем да определим съвместното разпределение, използвайки само n независими параметъра, за разлика от $2^n - 1$ независими параметъра, ако не можем да направим предположението за независимост [5, 18, 19, 24].

Променливите A и B са *условно независими* при дадено C , ако и само ако $P(A, B | C) = P(A | C)P(B | C)$. Твърдението, че A и B са условно независими при дадено C , се записва като $(A \perp B | C)$. Възможно е да се покаже от това определение, че $(A \perp B | C)$ ако и само ако $P(A | C) = P(A | B, C)$. При дадено C , информацията за B не предоставя допълнителна информация.

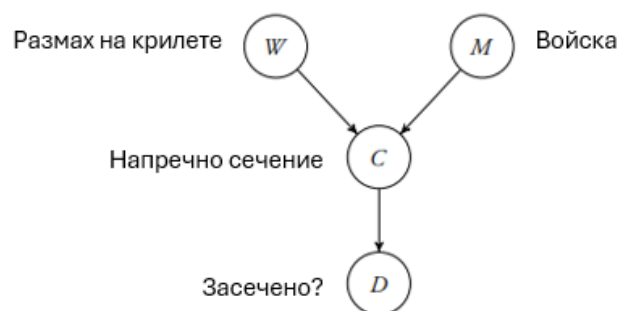
Таблица 1.3 Примерно съвместно разпределение върху независими променливи

B	S	$P(B, S)$
0	0	$P(b^0)P(s^0)$
0	1	$P(b^0)(1 - P(s^0))$
1	0	$(1 - P(b^0))P(s^0)$
1	1	$(1 - P(b^0))(1 - P(s^0))$

Например, нека приемем, че наличието на отклонение на траекторията на спътника (D) е условно независимо от това дали имаме загуба на комуникация (C), като се има предвид дали имаме повреда в електрическата система (E). Бихме написали това ($D \perp C \mid E$), ако знаем, че имаме повреда в електрическата система, тогава фактът, че наблюдаваме загуба на комуникация, няма влияние върху нашето убеждение, че има отклонение на траекторията. Може да имаме повишено очакване, че има отклонение на траекторията, но това е само защото знаем, че е възникнала повреда в електрическата система. Можем да използваме набор от правила, за да определим дали възлите A и B са условно независими, като се има предвид набор от възли $\mathcal{J}$. Ако ($A \perp B \mid \mathcal{J}$), тогава казваме, че $\mathcal{J}$ d -разделя A и B (където „ d “ означава посока). Казваме също, че път между A и B е d -разделен от $\mathcal{J}$, ако е вярно някое от следните условия:

1. Пътят съдържа верига от възли, $X \rightarrow Y \rightarrow Z$, такива че Y е в $\mathcal{J}$.
2. Пътят съдържа разклонение, $X \leftarrow Y \rightarrow Z$, такова че Y е в $\mathcal{J}$.
3. Пътят съдържа обърнато разклонение (наричано още v -структура), $X \rightarrow Y \leftarrow Z$, такова че Y не е в $\mathcal{J}$ и никой потомък на Y не е в $\mathcal{J}$. Ако всички пътища между A и B са d -разделени от $\mathcal{J}$, тогава ($A \perp B \mid \mathcal{J}$).

В мрежата на Фигура 1.2 има само една v -структура, $B \rightarrow E \leftarrow S$. При липса на информация за E , D или C , тогава B и S са независими. Като се имат предвид E , D или C , обаче, B и S вече не са независими, т.е. влиянието може да протича от B към S . Например, ако знаем, че сме имали повреда в електрическата система, тогава знанието, че сме имали повреда в батерията, намалява убеждението ни, че е имало повреда в слънчевия панел. Този вид влияние чрез V -образна структура понякога се нарича „обясняващо“, защото наличието на повреда в батерията обяснява причината за повредата в електрическата система [12, 18, 19, 23, 24].



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. Самолетите с по-голям размах на крилете са склонни да имат по-големи радарни напречни сечения, където напречното сечение се измерва с помощта на децибелна мярка спрямо един квадратен метър (dBsm). Военните самолети понякога са проектирани да имат по-ниски радарни напречни сечения (под 0 dBsm), за да избегнат откриването. Целите с по-големи напречни сечения е по-вероятно да бъдат открити, въпреки че други фактори могат да повлияят на откриването. На Фигура 1.4 променливите M и D са естествено двоични, а променливите W и C са естествено непрекъснати. Както при всяка Байесова мрежа, трябва да определим условните разпределения за всеки възел. Възелът W няма родителски елементи, така че просто трябва да определим разпределение върху W . Ще използваме Гаусово разпределение, дефинирано от параметрите μ и σ^2 , въпреки че то може да припише малки вероятности на отрицателен размах на крилата и нереалистично голям размах на крилата. Променливата M е двоична, така че можем да дефинираме това разпределение, използвайки един параметър, определящ $P(m^0)$. Напречното сечение C зависи както от непрекъснатата променлива W , така и от двоичната променлива M . Засега ще игнорираме зависимостта от M и ще дефинираме плътност $p(c | w)$. Често срещан подход за дефиниране на разпределение върху непрекъснатата променлива, като е дадена друга непрекъснатата променлива, е използването на линейно Гаусово разпределение.

$$p(c|w) = N(c|\theta_1 w + \theta_2, \theta_3) \quad (1.13)$$

Както може да се види, средната стойност е линейна функция на w , дефинирана от параметрите θ_1 и θ_2 . Дисперсията се определя от θ_3 . Тъй като искаме по-голям размах на крилата да доведат до по-големи напречни сечения, трябва да се уверим, че θ_1 е положително. Самолетите с безкрайно малки размаха на крилата също ще имат безкрайно малки напречни сечения и следователно θ_2 вероятно трябва да е 0. Параметърът θ_3 контролира количеството дисперсия в линейната зависимост между c и w [5, 19, 21, 24]. В действителност, C зависи както от W , така и от M . Можем просто да направим параметрите, използвани в линейното Гаусово разпределение, зависими от M :

$$P(c|w, m) = \begin{cases} N(c|\theta_1 w + \theta_2, \theta_3) & \text{ако } m^0 \\ N(c|\theta_4 w + \theta_5, \theta_6) & \text{ако } m^1 \end{cases} \quad (1.14)$$

Този вид разпределение е известно като условно линейно Гаусово. В този пример се нуждаем от шест параметъра, за да представим $p(c | w, m)$. Тъй като военните самолети е по-вероятно да бъдат проектирани да имат по-ниско радарно напречно сечение от невоенните самолети, бихме искали θ_4 да е по-малко от θ_1 .

Дефинираме условното разпределение, като $P(D | C)$. Разбира се, бихме могли просто да зададем праг θ и да кажем $P(d^1 | c) = 0$, ако $c < \theta$ и $P(d^1 | c) = 1$ в противен случай. Такъв модел обаче потенциално би присвоил нулева вероятност на засичания, които действително могат да се случат.

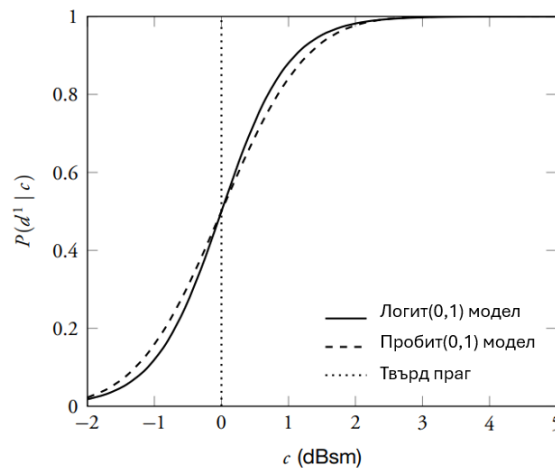
Вместо твърд праг за дефиниране на $P(D | C)$, бихме могли да използваме мек праг, който присвоява ниски вероятности, когато са под прага, и високи вероятности над прага. Един от начините за представяне на мек праг е да се използва логистичен модел, който създава сигмоидна крива с форма „S“:

$$P(d^1 | c) = \frac{1}{1 + \exp\left(-2\frac{c - \theta_1}{\theta_2}\right)}. \quad (1.15)$$

Параметърът θ_1 определя местоположението на прага, а θ_2 контролира „мекотата“ или разпространението на вероятностите. Фигура 1.5 показва $P(d^1 | c)$ с $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = 1$ като плътна линия.

$$P(d^1 | c) = \Phi(c - \theta_1) / \theta_2, \quad (1.16)$$

където Φ е стандартната нормална кумулативна функция на разпределение [5, 17, 19, 25].



Фигура 1.5 Постоянен и адаптивен праг

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:

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

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

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

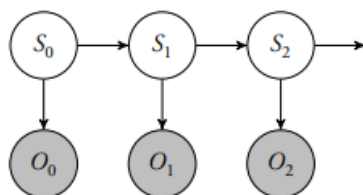
За разгледания модел на самолет, k е равно на две, μ е вектор с два елемента, а Σ е матрица два на две. Разпределението на прехода на състоянията за модела на самолет може да бъде представено като линейна Гаусова функция, както следва:

$$p(s_t | s_{t-1}) = N(s_t | Ms_t + b, \Sigma) \quad (1.19)$$

Средната стойност е линейна функция на предишното състояние. Ако самолетът продължава да се движи праволинейно, тогава разумен избор за средната стойност е:

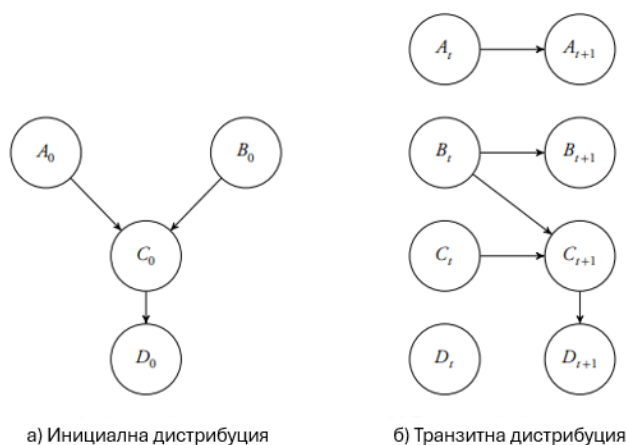
$$Ms_{t-1} + b = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} s_{t-1} \quad (1.20)$$

Ковариационната матрица Σ контролира количеството случайност, приложено към височината и линейната скорост на самолета.



Фигура 1.7 Скрит модел на Марков

Веригите на Марков могат да бъдат разширени чрез добавяне на възли за наблюдение, както е показано на Фигура 1.7. Наблюдението във време t е обозначено като O_t . Възлите за наблюдение са заштриховани, за да се покаже, че стойностите в тези възли са известни. Ако състоянията съответстват на позицията и скоростта на самолета, тогава наблюденията могат да бъдат зашумени радарни измервания на обхвата и азимута. Ако променливите на състоянието са дискретни, тогава моделът се нарича *скрит модел на Марков*. Ако променливите на състоянието са непрекъснати и условните разпределения са линейни Гаусови, тогава моделът се нарича *линейна динамична система*. Пример за линейна динамична система е разширение на модела на самолета, чието истинско състояние във време t е представено от вектора $(h_t, \dot{h}_t)$.



Фигура 1.8 Динамична Байесова мрежа

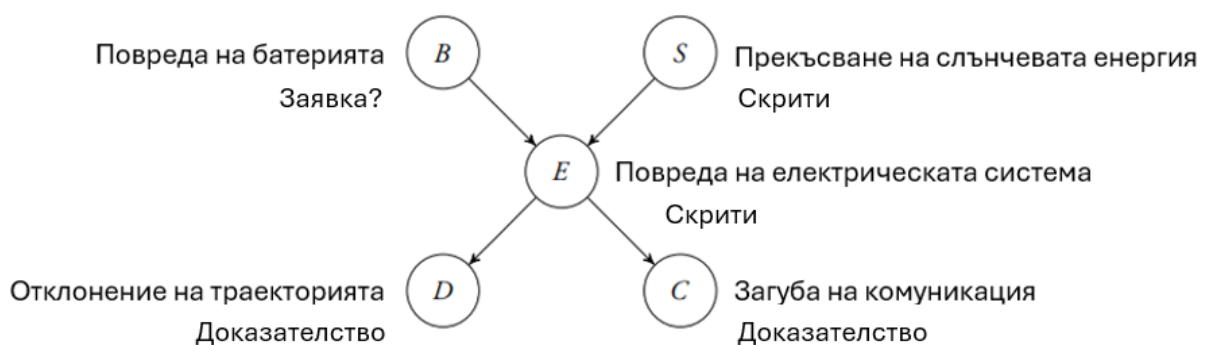
Наблюдението във време t се моделира като идващо от линейно Гаусово разпределение:

$$p(o_t | s_t) = N(o_t | [1 \ 0]s_t, \Sigma). \quad (1.21)$$

Ковариационната матрица Σ , в този случай едноелементна матрица, контролира шума от измерването.

Стационарните темпорални модели, включващи множество променливи на състоянието, могат да бъдат компактно представени с помощта на динамична Байесова мрежа. Динамичната Байесова мрежа е съставена от две Байесови мрежи, едната представлява началното разпределение, а другата - разпределението на прехода. Разпределението на прехода е представено от Байесова мрежа с два слоя. Първият слой представлява променливите във време t , а вторият слой представлява променливите във време $t + 1$. Фигура 1.8 показва пример на динамична Байесова мрежа с четири променливи на състоянието [17, 18, 23, 24].

Например, да предположим, че искаме да изведем разпределението $P(B | d^l, c^l)$, използвайки Байесова мрежа. В този случай B е променливата на заявката, D и C са променливите на доказателствата, а S и E са *скритите променливи*, Фигура 1.9. След обсъждане на няколко примера, в които изводът може да бъде полезен, този раздел обяснява как да се използва структурата, присъща на Байесовата мрежа, за да се правят ефективни изводи [13, 19, 20, 23].

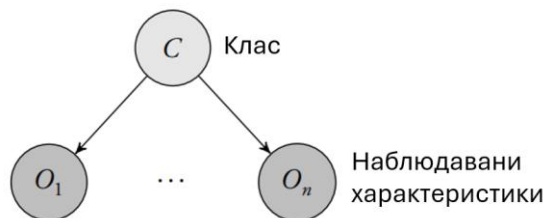


Фигура 1.9 Заявка, доказателства и скрити променливи в Байесова мрежа

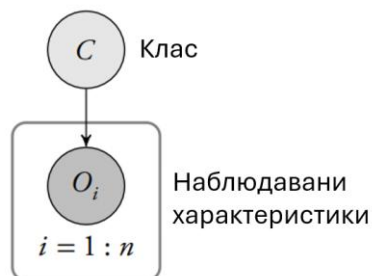
Прост вероятностен модел, често използван в задачи за класификация, е опростен модел на Байес, който има структурата, показана на Фигура 1.10. Еквивалентно, но по-компактно, представяне е показано на Фигура 1.11. Стойността $i = 1 : n$ в долната част на

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.

Използвайки нотацията, въведена в раздел 2.1.5, можем да кажем $(O_i \perp O_j | C)$ за всички $i \neq j$. Разбира се, ако тези предположения за условна независимост не са изпълнени, тогава можем да добавим необходимите насочени ръбове между наблюдаваните характеристики.



Фигура 1.10 Извод за класификация, използващ опростен Байесов модел



Фигура 1.11 Едномерно представяне на опростен Байесов модел

В опростения Байесов модел трябва да определим априорното $P(C)$ и условното разпределение $P(O_i|C)$. Фигура 1.12 показва примерни условни разпределения на скоростта, оценени от радарни данни. Можем да приложим верижното правило в уравнение (1.11), за да заключим съвместното разпределение в опростен Байесов модел:

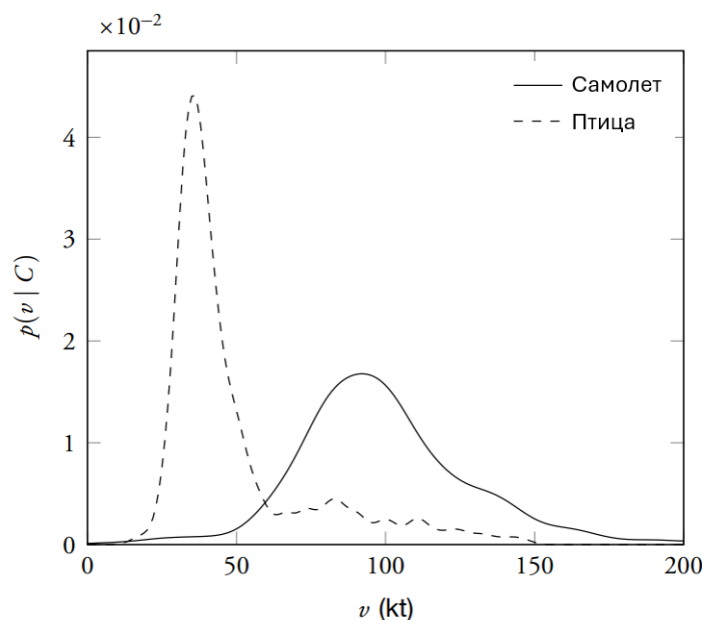
$$P(c, o_{1:n}) = P(c) \prod_{i=1}^n P(o_i | c) \quad (1.22)$$

За класификация е необходима условната вероятност $P(c | o_1, \dots, o_n)$. От дефиницията на условната вероятност в уравнение (1.1), имаме:

$$P(c, o_{1:n}) = \frac{P(c, o_{1:n})}{P(o_{1:n})} \quad (1.23)$$

Можем да изчислим знаменателя, използвайки съвместното разпределение и закона за тоталната вероятност в уравнение (1.2):

$$P(o_{1:n}) = \sum_c P(c, o_{1:n}) \quad (1.24)$$



Фигура 1.12 Плътност на вероятността за скорост, за даден клас на целта

Знаменателят в уравнение (1.23) не е функция на C и следователно може да се третира като константа. Следователно можем да запишем:

$$P(c | o_{1:n}) = xP(c, o_{1:n}) \quad (1.25)$$

Където x е нормализираща константа, така че $\sum_c P(c | o_{1:n}) = 1$. Често пропускаме x и просто се изписва:

$$P(c | o_{1:n}) \propto P(c, o_{1:n}) \quad (1.26)$$

където символът „ $\propto$ “ се използва, за да се представи, че лявата страна е „пропорционална“ на дясната страна.

Например, да предположим, че от правилото за веригата определяме:

$$P(\text{птица, бавно, малко колебание на курса}) = 0,03 \quad (1.27)$$

$$P(\text{самолет, бавно, малко колебание на курса}) = 0,01 \quad (1.28)$$

Разбира се, тези вероятности не се сумират до 1. Ако искаме да определим вероятността целта да е птица, като се имат предвид доказателствата, тогава ще направим следното изчисление:

$$P(\text{птица, бавно, малко колебание на курса}) = \frac{0.03}{0.03+0.01} = 0.75 \quad (1.29)$$

Използвайки модела и прилагайки законите на вероятността, определихме, че вероятността целта да е птица е 0,75, а вероятността да е самолет е 0,25, но за много приложения трябва да се ангажираме с определен клас. Често срещан начин за определяне на класификация е да се избере класът, който има най-висока апостериорна вероятност, т.е. този с най-висока вероятност след вземане на предвид на доказателствата. Изборът на клас обаче е проблем с вземането на решения, който често трябва да отчита последствията от погрешното класифициране. Например, ако се интересуваме от използването на класификатор за филтриране на цели, които не са самолети, с цел контрол на въздушното движение, тогава можем от време на време да пропускаме няколко птици и други смущаващи следи през филтър [4, 17, 19, 22, 24, 25].

Много важни приложения, като разпознаване на реч, проследяване на самолети и анализ на криптовалути, включват извършване на извод във времеви модели. Четири често срещани задачи за извод включват:

- Филтриране: $P(S_t | O_{0:t})$
- Прогнозиране: $P(S_{t'} | O_{0:t})$ където $t' > t$
- Изглаждане: $P(S_{t'} | O_{0:t})$ където $t' < t$
- *Най-вероятно обяснение*: $\operatorname{argmax}_{S_{0:t}} P(S_{0:t} | O_{0:t})$

Горните елементи използват скритата структура на Марков и нотацията, показани на Фигура 1.7. Променливата t представлява текущото време. За да илюстрираме извода във времеви модели, ще се съсредоточим върху филтрирането в скрит модел на Марков с дискретни променливи на състоянието и наблюдението [2, 5, 19, 21]. Чрез правилото на Байес:

$$P(s_t | o_{0:t}) \propto P(o_t | s_t, o_{0:t-1}) P(s_t | o_{0:t-1}) \quad (1.30)$$

Структурата на Байесовата мрежа, представляваща скрит Марковски модел, позволява да се направи предположението за условна независимост ($O_t \perp O_{0:t-1} | S_t$), което означава, че $P(s_t | o_{0:t-1})$ в горното уравнение е равно на $P(o_t | s_t)$. Пренаписвайки

уравнение (1.30) и прилагайки закона за пълната вероятност към втория член, получаваме:

$$P(s_t|o_{0:t}) \propto P(o_t|s_t) \sum_{s_{t-1}} P(s_t, s_{t-1}|o_{0:t-1}) \quad (1.31)$$

Прилагайки дефиницията на условна вероятност към $P(s_t, s_{t-1}|o_{0:t-1})$, получаваме:

$$P(s_t|o_{0:t}) \propto P(o_t|s_t) \sum_{s_{t-1}} P(s_t, s_{t-1}|o_{0:t-1}) P(s_{t-1}|o_{0:t-1}) \quad (1.32)$$

Структурата на модела е такава, че $(s_t \perp o_{0:t-1} \mid s_{t-1})$ и затова можем да опростим горното уравнение:

$$P(s_t|o_{0:t}) \propto P(o_t|s_t) \sum_{s_{t-1}} P(s_t, s_{t-1}) P(s_{t-1}|o_{0:t-1}) \quad (1.33)$$

Знаем $P(o_t|s_t)$ и $P(s_t, s_{t-1})$ директно от модела. Вероятността $P(s_{t-1}|o_{0:t-1})$ от дясната страна подсказва как би се извършило рекурсивно актуализиране на разпределението на състоянията с течение на времето и новите наблюдения. Алгоритъм 1.1 показва как се извършва този процес, наречен *рекурсивна Байесова оценка*. Последното разпределение на състоянията във време t е обозначено с b_t . За да се намали броят на индексите, Алгоритъм 1.1 приема, че разпределението на прехода на състоянията $P(S_t, S_{t-1})$ и разпределението на наблюденията $P(O_t|S_t)$ са стационарни; т.е. те не се променят с времето [17, 18, 22, 25].

Algorithm 2.1 Recursive Bayesian estimation

```

1: function RECURSIVEBAYESIANESTIMATION
2:    $b_0(s) \leftarrow P(o_0 | s)P(s_0)$  for all  $s$ 
3:   Normalize  $b_0$ 
4:   for  $t \leftarrow 1$  to  $\infty$ 
5:      $b_t(s) \leftarrow P(o_t | s) \sum_{s'} P(s | s') b_{t-1}(s')$  for all  $s$ 
6:     Normalize  $b_t$ 

```

Ако наблюденията са непрекъснати, вместо дискретни, тогава $P(o|s)$ ще бъде вероятностна плътност, вместо вероятностна маса. Ако състоянията са непрекъснати, вместо дискретни, тогава разпределението на прехода на състоянията и b стават функции на плътността и сумирането на ред 5 става интеграл, което като цяло може да бъде трудно за точно оценяване.

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

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

Да разгледаме числителя, защото процесът на изчисляване на числителя може да се приложи и към изчисляването на знаменателя. Съгласно закона за пълната вероятност:

$$P(b^1, d^1, c^1) = \sum_s \sum_e P(b^1, s, e, d^1, c^1) \quad (1.35)$$

Този процес на сумиране на скритите променливи се нарича *маргинализация*. Чрез правилото на веригата:

$$P(b^1, d^1, c^1) = \sum_s \sum_e P(b^1)P(s)P(e | b^1, s)P(d^1 | e)P(c^1 | e) \quad (1.36)$$

Проблемът с точния извод е, че трябва да се сумират скритите променливи. В уравнение (1.36) трябва да се сумират само две променливи, но за по-големи мрежи това сумиране може да е невъзможно. Броят на членовете, които трябва да се сумират, може да нараства експоненциално с броя на скритите променливи [5, 19, 24].

Като краен пример за това как дадено мрежово представяне може да доведе до ефикасен извод, да предположим, че имаме Байесова мрежа с двоични променливи $X_1, \dots, X_n$. Трябва да се изчисли:

$$P(x_1^0) = \sum_{x_2} \dots \sum_{x_n} P(x_1^0) P(x_2) \dots P(x_n) \quad (1.37)$$

Изразът има 2^{n-1} члена, като всеки член се състои от произведението на n фактора. Разбира се, няма причина да се полагат усилия за прилагане на верижното правило, за да се получи съвместното разпределение, а след това да се прилага законът за пълната вероятност, за да се сумират скритите променливи. Знаем вероятността $P(x_1^0)$ от таблицата, определяща $P(X_1)$. Различни методи могат да се използват за извършване на ефективен извод в по-сложни Байесови мрежи. Един метод е известен като *елиминирание на променливи*, който елиминира скритите променливи последователно. Ще илюстрираме алгоритъма за елиминирание на променливи, като изчислим разпределението $P(B | d^1, c^1)$ за Байесовата мрежа на Фигура 1.9. Условните

вероятностни разпределения, свързани с възлите в мрежата, могат да бъдат представени от следните таблици:

$$T_1(B), T_2(S), T_3(E, B, S), T_4(D, E)T_5(C, E) \quad (1.38)$$

Тъй като D и C са наблюдавани променливи, последните две таблици се заменят с $T_6(E)$ и $T_7(E)$, като се запазват само редовете, в които $D = 1$ и $C = 1$. След това се елиминират последователно скритите променливи. За да елиминираме E , събираме всички таблици, включващи E :

$$T_3(E, B, S), T_6(E)T_7(E) \quad (1.39)$$

След това сумираме E от произведението на тези таблици, за да получим нова таблица:

$$T_8(B, S) = \sum_e T_3(e, B, S)T_6(e)T_7(e) \quad (1.40)$$

След това можем да изключим T_3 , T_6 , T_7 , защото цялата информация, от която се нуждаем от тях, се съдържа в T_8 . Сега елиминираме S . Отново събираме всички останали таблици, които включват S и сумираме S от произведението на тези таблици:

$$T_9(B) = \sum_s T_2(s)T_8(B, s) \quad (1.41)$$

Изключваме T_2 и T_8 и остават $T_1(B)$ и $T_9(B)$. Трябва да нормализираме произведението на тези две таблици, за да получим $P(B \mid d^1, c^1)$.

Алгоритъм 1.2 очертава алгоритъма за елиминиране на променливи за Байесова мрежа B , набор от променливи на заявката $\mathcal{L}$ и наблюдавани стойности o . За много мрежи елиминирането на променливи позволява да се прави извод за време, което се мащабира линейно с размера на мрежата, но има експоненциална времева сложност в най-лошия случай. Това, което влияе върху количеството изчисления, е редът на елиминиране на променливите [2, 5, 19, 23].

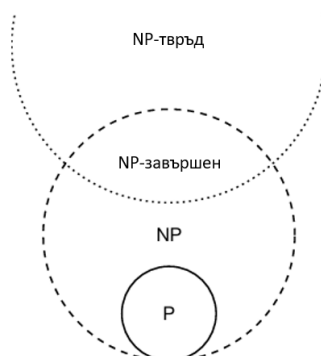
Изборът на оптимален ред на елиминиране е *NP-труден*, което означава, че не може да се направи за полиномиално време в най-лошия случай. Дори и да намерим оптималния ред на елиминиране, елиминирането на променливи все още може да изисква експоненциален брой изчисления. Евристиките за елиминиране на променливи обикновено се опитват да минимизират броя на променливите, участващи в междинните таблици, генерирани на ред 6 [17, 18, 22, 25].

Algorithm 2.2 Variable elimination in Bayesian networks

```
1: function VARIABLEELIMINATION( $B, \mathcal{Q}, \mathbf{o}$ )
2:    $\mathcal{T} \leftarrow$  set of conditional probability tables associated with nodes in  $B$ 
3:   Remove rows that are inconsistent with  $\mathbf{o}$  from all the tables in  $\mathcal{T}$ 
4:   for  $i \leftarrow 1$  to  $n$ 
5:      $\mathcal{T}' \leftarrow$  all the tables in  $\mathcal{T}$  that involve  $X_i$ 
6:      $T \leftarrow$  the product of the tables in  $\mathcal{T}'$  with  $X_i$  summed out
7:     Remove  $\mathcal{T}'$  from  $\mathcal{T}$  and add  $T$ 
8:    $T \leftarrow$  product of the tables remaining in  $\mathcal{T}$ 
9:    $P(\mathcal{Q} \mid \mathbf{o}) \leftarrow$  normalize  $T$ 
10:  return  $P(\mathcal{Q} \mid \mathbf{o})$ 
```

Подход към извода, известен като разпространение на убеждения, работи чрез разпространение на „съобщения“ през мрежата. Разпространението на убежденията изисква линейно време, но предоставя точен отговор само, ако мрежата няма неориентирани цикли.

Ако мрежата има неориентирани цикли, тогава тя може да бъде преобразувана в дърво чрез комбиниране на множество променливи в единични възли, използвайки така наречения алгоритъм на дървото на връзките. Ако броят на променливите, които трябва да бъдат комбинирани, в който и да е възел в получената мрежа, е малък, тогава изводът може да се направи ефективно [22, 24, 25].



Фигура 1.13 Класове на сложност

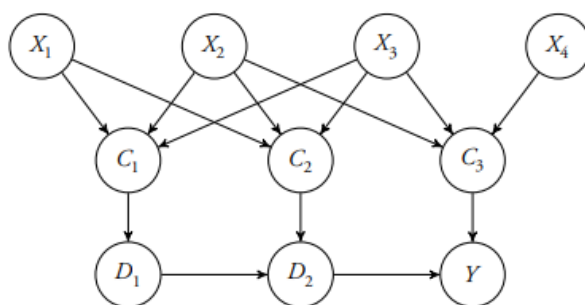
Трудността при решаването на определени проблеми може да бъде групирана в определени класове според сложността:

- P : проблеми, които могат да бъдат решени за полиномиално време;
- NP : проблеми, чиито решения могат да бъдат проверени за полиномиално време;
- NP -трудни: проблеми, които са поне толкова трудни, колкото най-трудните проблеми в NP ;
- NP -пълни: проблеми, които са едновременно NP -трудни и NP .

Общоприето е, че $P \neq NP$, но това не е доказано и остава един от най-важните отворени проблеми в математиката. Всъщност, съвременната криптография зависи от факта, че няма известни ефективни (т.е. полиномиално време) алгоритми за решаване на NP -трудни проблеми. Фигура 1.13 илюстрира връзката между класовете сложност при предположението, че $P \neq NP$ [22, 24, 25].

Често срещан подход за доказване дали дадена задача Q е NP -трудна е да се приложи полиномиална трансформация от известна NP -пълна задача Q' към екземпляр на Q . Можем да покажем, че изводът в Байесовите мрежи е NP -труден, като използваме NP -пълна задача, наречена 3SAT. 3SAT задачата е първата известна NP -пълна задача. Тя включва определяне дали булева формула е изпълнима. Булевата формула се състои от конюнкции ($\wedge$), дизюнкции ($\vee$) и отрицания ($\neg$), включващи n булеви променливи $x_1, \dots, x_n$. Литерала е променлива x_i или нейното отрицание $\neg x_i$. 3SAT клауза е дизюнкция на до три литерала; например, $x_3 \vee \neg x_5 \vee x_6$. 3SAT формулата е конюнкция на 3SAT клаузи като:

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = \begin{aligned} &(x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge \\ &(\neg x_1 \vee \neg x_2 \vee x_3) \wedge \\ &(x_2 \vee \neg x_3 \vee x_4) \end{aligned} \quad (1.42)$$



Фигура 1.14 Байесова мрежа, представляваща 3SAT проблем

Предизвикателството в 3SAT е да се определи дали съществува възможно присвояване на истинностни стойности на променливи, което прави формулата вярна. В уравнение (1.42),

$$F(\text{true}, \text{false}, \text{false}, \text{true}) = \text{true} \quad (1.43)$$

Следователно, формулата е изпълнима. Въпреки че, задоволително присвояване може лесно да се намери за някои 3SAT задачи, понякога само чрез бърза проверка, те са трудни за решаване като цяло. Един от начините да се определи дали може да се направи задоволително присвояване е да се изброят 2^n възможни стойности на истинност на всички променливи [21, 22, 23, 24, 25]. Въпреки че, определянето дали съществува

задоволително присвояване е трудно, проверката дали присвояването на истинност води до удовлетворяване може да се извърши за линейно време. Лесно е да се конструира Байесова мрежа от произволна 3SAT задача. Фигура 1.14 е Байесово мрежово представяне на уравнение (1.42). Променливите са представени с $X_{1:4}$, а клаузите са представени с $C_{1:3}$. Разпределенията по променливите са равномерни. Възлите, представляващи клаузите, имат за родители участващите променливи. Тъй като това е 3SAT задача, всеки възел на клаузата има точно три родителя. Всеки възел на клаузата присвоява вероятност 0 на присвоявания, които не удовлетворяват клаузата, и вероятност 1 на всички удовлетворяващи присвоявания. Останалите възли присвояват вероятност 1 на „true“, ако всичките им родители са „true“. Първоначалната 3SAT задача е изпълнима, ако и само ако $P(y^1) > 0$. Следователно, изводът в Байесовите мрежи е поне толкова труден, колкото 3SAT. Причината да се положат усилия да се покаже, че изводът в Байесовите мрежи е *NP-труден*, за да се избегне загубата на време в търсене на ефикасен, точен алгоритъм за извод, който работи във всички Байесови мрежи [5, 16, 19, 24]. Следователно, изследванията през последните няколко десетилетия са фокусирани върху приблизителните методи за извод.

Един от най-простите подходи за приблизителен извод включва първата стъпка за определяне на *топологичен вид на възлите* в Байесовата мрежа. Топологичен вид на възлите в насочен ацикличен граф е подреден списък, такъв че ако има ръб $A \rightarrow B$, тогава A е преди B в списъка. Например, топологичен вид за мрежата на Фигура 1.9 е B, S, E, D, C . Топологичен вид винаги съществува, но може да не е уникален. Друг топологичен вид за мрежата на Фигура 1.9 е S, B, E, C, D . Представеният Алгоритъм 1.3 предоставя алгоритъм за намиране на топологичен вид на граф G .

Algorithm 2.3 Topological sort

```

1: function TOPOLOGICALSORT( $G$ )
2:    $n \leftarrow$  number of nodes in  $G$ 
3:    $L \leftarrow$  empty list
4:   for  $i \leftarrow 1$  to  $n$ 
5:      $X \leftarrow$  any node not in  $L$  but all of whose parents are in  $L$ 
6:     Add  $X$  to end of  $L$ 
7:   return  $L$ 

```

Топологичното сортиране води до подреждането $X_{1:n}$. Алгоритъм 1.4 показва как да се взема проби от Байесова мрежа B . В ред 4 извличаме извадка от условното разпределение, свързано с X_i като са дадени стойностите на родителите, които вече са били присвоени. Тъй като $X_{1:n}$ е топологично сортиране, знаем, че всички родители на X_i

вече са били инстанцирани, което позволява да се направи това вземане на проби [4, 5, 23, 25].

Algorithm 2.4 Direct sampling from a Bayesian network

```

1: function DIRECTSAMPLE( $B$ )
2:    $X_{1:n} \leftarrow$  a topological sort of nodes in  $B$ 
3:   for  $i \leftarrow 1$  to  $n$ 
4:      $x_i \leftarrow$  a random sample from  $P(X_i \mid \text{pa}_{x_i})$ 
5:   return  $x_{1:n}$ 

```

Таблица 1.4 показва десет случайни извадки от мрежата на Фигура 1.9. Интерес представлява извеждането $P(b^I \mid d^I, c^I)$. Само две от десетте извадки (посочени в таблицата) са съвместими с наблюденията d^I и c^I . Едната извадка има $B = 1$, а другата извадка има $B = 0$. От тези извадки заключаваме, че $P(b^I \mid d^I, c^I) = 0.5$. Разбира се, бихме искали да използваме повече от две извадки, за да оценим точно $P(b^I \mid d^I, c^I)$.

Таблица 1.4 Директни проби от Байесова мрежа

B	S	E	D	C	
0	0	1	1	0	
0	0	0	0	0	
1	0	1	0	0	
1	0	1	1	1	←
0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	
0	0	0	0	1	
0	1	1	1	1	←
0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	

Проблемът с директното вземане на проби е, че можем да се загуби много време за генериране на проби, които са несъвместими с наблюденията, особено ако наблюденията са малко вероятни. Алтернативен подход се нарича претегляне на вероятността, който включва генериране на претеглени проби, които са съвместими с наблюденията.

Единствената разлика в претеглянето на вероятността е как се обработват наблюдаваните променливи. Вместо да се вземат проби от техните стойности от условно разпределение, ние присвояваме променливи на техните наблюдавани стойности и коригираме теглото на извадката по подходящ начин. Теглото на извадката е просто произведението на условните вероятности в наблюдаваните възли. Алгоритъм 1.5 обобщава този процес за Байесова мрежа B и наблюдения $o_{1:n}$. Ако o_i не се наблюдава, тогава $o_i \leftarrow NIL$ [2, 5, 19, 24].

Algorithm 2.5 Likelihood-weighted sampling from a Bayesian network

```

1: function LIKELIHOODWEIGHTEDSAMPLE( $B, o_{1:n}$ )
2:    $X_{1:n} \leftarrow$  a topological sort of nodes in  $B$ 
3:    $w \leftarrow 1$ 
4:   for  $i \leftarrow 1$  to  $n$ 
5:     if  $o_i = \text{NIL}$ 
6:        $x_i \leftarrow$  a random sample from  $P(X_i \mid \text{pa}_{x_i})$ 
7:     else
8:        $x_i \leftarrow o_i$ 
9:        $w \leftarrow w \times P(x_i \mid \text{pa}_{x_i})$ 
10:  return  $(x_{1:n}, w)$ 

```

Таблица 1.5 Извадки, претеглени по вероятност, от Байесова мрежа

B	S	E	D	C	Тегло
1	0	1	1	1	$P(d^1 \mid e^1)P(c^1 \mid e^1)$
0	1	1	1	1	$P(d^1 \mid e^1)P(c^1 \mid e^1)$
0	0	0	1	1	$P(d^1 \mid e^0)P(c^1 \mid e^0)$
0	0	0	1	1	$P(d^1 \mid e^0)P(c^1 \mid e^0)$
0	0	1	1	1	$P(d^1 \mid e^1)P(c^1 \mid e^1)$

Таблица 1.5 показва пет извадки с претеглена вероятност от мрежата на Фигура 1.9. Извадките се вземат от $P(B)$, $P(S)$ и $P(E \mid B, S)$, както бихме направили при директно вземане на извадки. Когато стигнем до D и C , присвояваме $D = 1$ и $C = 1$. Ако извадката има $E = 1$, тогава теглото е $P(d^1 \mid e^1)P(c^1 \mid e^1)$; в противен случай теглото е $P(d^1 \mid e^0)P(c^1 \mid e^0)$.

Ако приемем:

$$P(d^1 \mid e^1)P(c^1 \mid e^1) = 0.95 \quad (1.44)$$

$$P(d^1 \mid e^0)P(c^1 \mid e^0) = 0.01 \quad (1.45)$$

тогава можем да направим приблизителни оценки от примерите в Таблица 1.5.

$$P(b^1 \mid d^1, c^1) = 0.331 \quad (1.46)$$

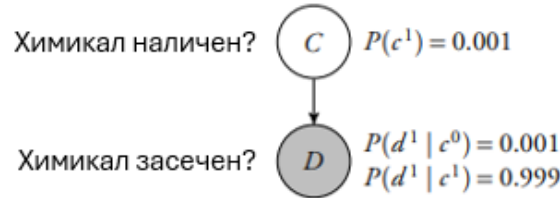
$$P(b^1 \mid d^1, c^1) \approx \frac{0.95}{0.95+0.95+0.01+0.01+0.95} \quad (1.47)$$

Въпреки че претеглянето на вероятността прави така, че всички проби да са в съответствие с наблюденията, то все пак може да бъде разточително. Разгледайте простата Байесова мрежа за химическо откриване, показана на Фигура 1.15, и приемете, че сме открили химикал, който ни интересува. Искаме да заключим $P(c^1 \mid d^1)$. Тъй като тази мрежа е малка, можем лесно да изчислим тази вероятност точно, като използваме правилото на Байес:

$$P(c^1 | d^1) = \frac{P(d^1 | c^1)P(c^1)}{P(d^1 | c^1)P(c^1) + P(d^1 | c^0)P(c^0)} \quad (1.48)$$

$$P(c^1 | d^1) = \frac{0.999 \times 0.001}{0.999 \times 0.001 + 0.001 \times 0.999} \quad (1.49)$$

$$P(c^1 | d^1) = 0.5 \quad (1.50)$$



Фигура 1.15 Байесова мрежа за химическо откриване

Ако използваме вероятностно претегляне, тогава 99,9% от пробите ще имат $C = 0$ с тегло 0,001. Докато не получим проба от $C = 1$, която има свързано тегло от 0,999, където оценка на $P(c^1 | d^1)$ ще бъде 0.

Алгоритъм 1.6 очертава как да се генерира нова проба $x'_{1:n}$ от съществуваща проба $x_{1:n}$, като е дадена Байесова мрежа B и наблюдения $o_{1:n}$ [4, 17, 19, 23].

За разлика от директното вземане на проби, можем да използваме произволно подреждане за възлите в мрежата, то подреждането не е необходимо да бъде топологично сортиране. Като се има предвид това подреждане, актуализираме извадката по една променлива, като са дадени стойностите на останалите променливи.

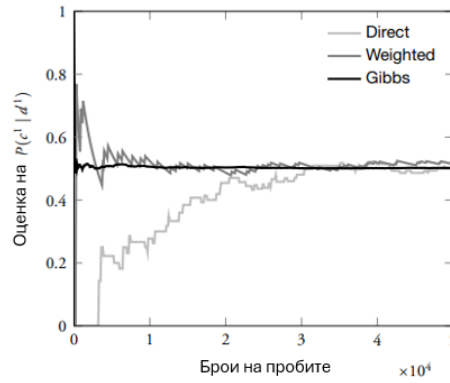
За да генерираме стойността за x'_i , вземаме извадка от $P(X_i | x'_{1:n \setminus i})$, където $x'_{1:n \setminus i}$ представлява стойностите на всички останали променливи с изключение на X_i . За да изчислим разпределението $P(X_i | x'_{1:n \setminus i})$ за Байесова мрежа B , можем да използваме Алгоритъм 1.7.

Algorithm 2.6 Gibbs sampling from a Bayesian network

```

1: function GIBBSAMPLE( $B, o_{1:n}, x_{1:n}$ )
2:    $X_{1:n} \leftarrow$  an ordering of nodes in  $B$ 
3:    $x'_{1:n} \leftarrow x_{1:n}$ 
4:   for  $i \leftarrow 1$  to  $n$ 
5:     if  $o_i = \text{NIL}$ 
6:        $x'_i \leftarrow$  a random sample from  $P(X_i | x'_{1:n \setminus i})$ 
7:     else
8:        $x'_i \leftarrow o_i$ 
9:   return  $x'_{1:n}$ 

```



Фигура 1.16 Методи за семплиране на Байесови мрежи

Algorithm 2.7 Distribution at a node given observations at all other nodes

```

1: function DISTRIBUTIONATNODE( $B, X_i, x_{1:n \setminus i}$ )
2:    $\mathcal{T} \leftarrow$  all conditional probability tables associated with  $B$  involving  $X_i$ 
3:   Remove rows that are inconsistent with  $x_{1:n \setminus i}$  from all the tables in  $\mathcal{T}$ 
4:    $T \leftarrow$  product of the tables remaining in  $\mathcal{T}$ 
5:    $P(X_i | x_{1:n \setminus i}) \leftarrow$  normalize  $T$ 
6:   return  $P(X_i | x_{1:n \setminus i})$ 

```

Фигура 1.16 сравнява сходимостта на оценката на $P(c^1 | d^1)$, използвайки директно, вероятностно претеглено и Гибсово семплиране. Директното семплиране отнема най-дълго време за сближаване. Кривата на директното семплиране има дълги периоди, през които оценката не се променя, защото пробите са несъвместими с наблюденията. Пиковите се появяват, когато се генерира проба с $C = 1$, и след това постепенно намаляват. Гибсовото семплиране в този пример бързо се сближава до истинската стойност от 0.5 [17, 18, 19, 24].

На практика трябва да се използва Гибсовия метод за известно време, наречен *период на изгаряне*, преди да се сближи до стационарно разпределение. Пробите, получени по време на изгарянето, обикновено се изхвърлят. Освен това, поради потенциална корелация между извадките, е обичайно да се разреждат извадките, като се запазва само всяка k -та извадка [21, 24, 25].

1.5. Параметрично и непараметрично обучение.

Дотук допускахме, че параметрите и структурата на вероятностните модели са известни. Този раздел разглежда проблема с изучаването на параметрите на модела.

Да предположим, че случайната променлива C представлява дали даден полет ще доведе до сблъсък във въздуха и се интересуваме от оценката на разпределението $P(C)$. Тъй като C е или 0, или 1, е достатъчно да оценим параметъра $\theta = P(c^1)$. Това, което

искаме да направим, е да заключим θ от данните D . Да кажем, че имаме историческа база данни, обхващаща едно десетилетие, и да кажем, че знаем, че е имало n полета и m сблъсъка във въздуха. Нашата интуиция, разбира се, ни казва, че добра оценка за θ при дадени данни D е m/n . Тази оценка съответства на оценката с *максимална вероятност*,

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax}_{\theta} P(D | \theta) \quad (1.51)$$

Вероятността за m сблъсъка във въздуха от n полета е дадена от *биномиалното разпределение*:

$$P(D | \theta) = \frac{n!}{m!(n-m)!} \theta^m (1 - \theta)^{n-m} \quad (1.52)$$

$$\propto \theta^m (1 - \theta)^{n-m} \quad (1.53)$$

Оценката за максимална вероятност $\hat{\theta}$ е стойността за θ , която максимизира уравнение (1.53). Максимизирането на уравнение (1.53) е еквивалентно на максимизиране на логаритъма на вероятността, често наричан логаритъм на вероятността и често обозначен като $\ell(\theta)$:

$$\ell(\theta) \propto \ln (\theta^m (1 - \theta)^{n-m}) \quad (1.54)$$

$$= m \ln \theta + (n - m) \ln (1 - \theta) \quad (1.55)$$

Можем да използваме стандартната техника за намиране на максимума на функция, като задаваме първата производна на ℓ на 0 и след това решаваме за θ .

Производната е:

$$\frac{\partial \ell}{\partial \theta} = \frac{m}{\theta} - \frac{n-m}{1-\theta} \quad (1.56)$$

Можем да решим $\hat{\theta}$, като присвоим производната на 0:

$$\frac{m}{\hat{\theta}} = \frac{n-m}{1-\hat{\theta}} = 0 \quad (1.57)$$

След няколко алгебрични стъпки виждаме, че наистина $\hat{\theta} = m/n$. Изчисляването на оценката за максимална правдоподобност за променлива X , която може да приеме k стойности, също е аналогично [2, 4, 19, 23, 25].

Ако $m_{1:k}$ са наблюдаваните стойности за k различни стойности, тогава оценката за максимална правдоподобност за $P(x^i | m_{1:k})$ е:

$$\hat{\theta}_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^k m_j} \quad (1.58)$$

Оценката с максимална вероятност може да се приложи и към непрекъснати разпределения. Да предположим, че имаме измервания на скоростта $v_{1:n}$ на n -те траектории на самолети, които са били използвани за генериране на условното разпределение на класа на Фигура 1.12. Въпреки че, плътността очевидно не е точно Гаусова, нека се опитаме да напаснем Гаусов модел към тези данни, като използваме оценка с максимална вероятност на параметрите. Логаритмичната вероятност на средната стойност μ и дисперсията σ^2 е:

$$\ell(\mu, \sigma^2) \propto -n \ln \sigma - \frac{\sum_i (v_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \quad (1.59)$$

Отново, можем да зададем производната на 0 спрямо параметрите и да решим за оценката за максимална вероятност:

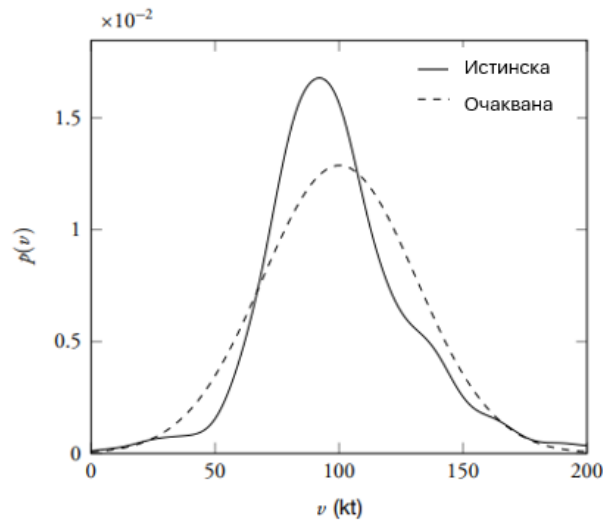
$$\frac{\partial \ell(\mu, \sigma^2)}{\partial \mu} = \frac{\sum_i (v_i - \hat{\mu})}{\hat{\sigma}^2} = 0 \quad (1.60)$$

$$\frac{\partial \ell(\mu, \sigma^2)}{\partial \sigma} = -\frac{n}{\hat{\sigma}} + \frac{\sum_i (v_i - \hat{\mu})^2}{\hat{\sigma}^3} = 0 \quad (1.61)$$

След някои алгебрични действия получаваме:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_i v_i}{n} \quad (1.62)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i (v_i - \hat{\mu})^2}{n} \quad (1.63)$$

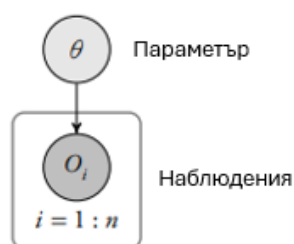


Фигура 1.17 Плътност на вероятността на скоростта

Фигура 1.17 показва Гаусова функция с оценки за максимална вероятност $\hat{\mu} = 100.2 \text{ kt}$ и $\hat{\sigma} = 31 \text{ kt}$. „Истинското“ разпределение от Фигура 1.12 е показано за сравнение. В този случай Гаусовата функция е сравнително разумно приближение на истинското разпределение [16, 18, 21, 24].

Въпреки че, оценката на максималната вероятност може да е адекватна за много приложения, тя има някои сериозни недостатъци, когато количеството данни е ограничено. Например, да предположим, че базата данни за авиационна безопасност е ограничена до събития от последната седмица и не са открити регистрирани сблъсъци във въздуха. Ако θ е вероятността полетът да доведе до сблъсък във въздуха, тогава оценката на максималната вероятност би била $\hat{\theta} = 0$.

Байесовият подход към параметричното обучение включва оценка на апостериорното по θ и може да се разглежда като извод в Байесова мрежа. Например, Фигура 1.18 представя проблема с оценката на вероятността за сблъсък, където наблюдаваната променлива O_i е 1, ако i -тият полет е довел до сблъсък, и 0 в противен случай. Предполагаме, че наблюдаваните променливи са условно независими една от друга. Трябва да определим $p(\theta)$ и $P(O_i | \theta)$. Ако искаме да използваме равномерно априорно деление, можем да зададем плътността $p(\theta) = 1$. Задаваме $P(O_i^1 | \theta) = \theta$ [17, 18, 20, 24, 25].



Фигура 1.18 Байесова мрежа, представляваща параметрично обучение

Можем да продължим със стандартния метод за извършване на извод в Байесова мрежа. Тук ще приемем равномерна априорна вероятност.

$$p(\theta | o_{1:n}) \propto p(\theta, o_{1:n}) \quad (1.64)$$

$$= p(\theta) \prod_{i=1}^n P(o_i | \theta) \quad (1.65)$$

$$= \prod_{i=1}^n P(o_i | \theta) \quad (1.66)$$

$$= \prod_{i=1}^n \theta^{o_i} (1 - \theta)^{1-o_i} \quad (1.67)$$

$$= \theta^m (1 - \theta)^{n-m} \quad (1.68)$$

Апостериорната функция е пропорционална на $\theta^m (1 - \theta)^{n-m}$, където m е броят на сблъсъците във въздуха в нашите данни. За да намерим константата за нормализиране, интегрираме:

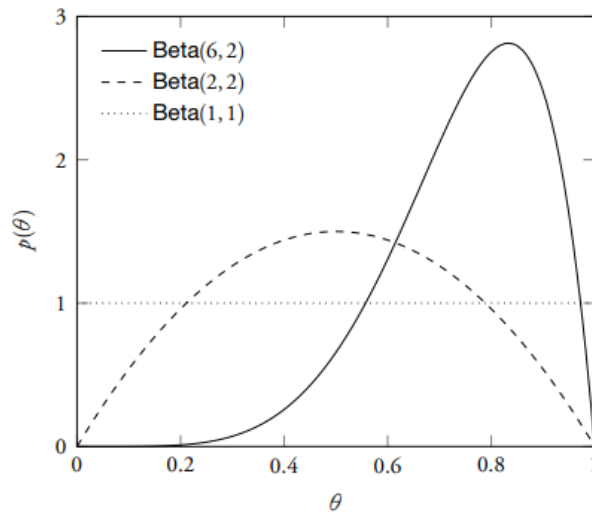
$$\int_0^1 \theta^m (1 - \theta)^{n-m} d\theta = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(n-m+1)}{\Gamma(n+2)} \quad (1.69)$$

където Γ е *гама-функцията*.

Гама-функцията е обобщение на факториела с реални стойности. Ако n е цяло число, тогава $\Gamma(n) = (n-1)!$. Като вземем предвид нормализацията, имаме:

$$p(\theta | o_{1:n}) = \frac{\Gamma(n+2)}{\Gamma(m+1)\Gamma(n-m+1)} \theta^m (1 - \theta)^{n-m} \quad (1.70)$$

$$Beta(\theta | m + 1, n - m + 1) \quad (1.71)$$



Фигура 1.19 Beta разпределение

Бета разпределението $Beta(\alpha, \beta)$ се определя от параметрите α и β , а кривите за това разпределение са показани на Фигура 1.19. Разпределението $Beta(1, 1)$ съответства на равномерното разпределение, обхващащо диапазона от 0 до 1. Удобно е, че ако бета разпределение се използва като априорно разпределение върху параметър на биномно разпределение, тогава апостериорното разпределение също е бета разпределение. В частност, ако априорното разпределение е дадено от $Beta(\alpha, \beta)$ и направим наблюдение o_i , тогава получаваме апостериорно разпределение на $Beta(\alpha + 1, \beta)$, ако $o_i = 1$, и $Beta(\alpha, \beta + 1)$, ако $o_i = 0$. Следователно, ако започнем с априорно разпределение, дадено от $Beta(\alpha, \beta)$

и нашите данни показват, че е имало m сблъсъка от n полета, тогава апостериорното разпределение би било дадено от $\text{Beta}(\alpha + m, \beta + n - m)$. Параметрите α и β в априорното разпределение понякога се наричат псевдоброячи, защото се третираат подобно на наблюдаваните бройки от двата класа резултати в апостериорното разпределение, въпреки че, псевдоброячите не е необходимо да са цели числа. Изборът на априорното разпределение по принцип трябва да се извършва без познаване на данните, използвани за изчисляване на апостериорното разпределение. Равномерните априорни разпределения често работят добре на практика, въпреки че ако има експертни познания, те могат да бъдат кодирани в априорното разпределение [21, 25].

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:

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

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.

Ако априорното разпределение върху $\theta_{1:n}$ е $\text{Dir}(\alpha_{1:n})$ и има m_i наблюдения на $X = i$, тогава апостериорното разпределение е:

$$p(\theta_{1:n} | \alpha_{1:n}, m_{1:n}) = \text{Dir}(\theta_{1:n} | \alpha_1 + m_1, \dots, \alpha_n + m_n) \quad (1.73)$$

Оценката на параметрите на Байес е лесна за използване, както за двоични, така и за дискретни случайни променливи, защото включва просто преброяване на различните резултати в данните. Правилото на Байес може да се използва за извеждане

на разпределението по параметрите за всяко параметрично разпределение. В зависимост от избора на априорно разпределение и формата на параметричното разпределение, изчисляването на апостериорното разпределение по пространството на параметрите може да се извърши и аналитично [5, 17, 19, 25].

Алтернативен подход на вероятностният модел се основава на *непараметрични методи*, при които броят на параметрите се мащабира с количеството данни. Един от най-разпространените непараметрични методи се нарича *ядрена оценка на плътността*.

При дадени наблюдения $o_{1:n}$, оценката на плътността на ядрото представлява плътността, както следва:

$$p(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(x - o_i) \quad (1.74)$$

където K е функция на ядрото, която интегрира до 1.

Функцията на ядрото се използва за присвояване на по-голяма плътност на стойности близо до наблюдаваните точки от данни. Функцията на ядрото обикновено е симетрична, което означава, че $K(x) = K(-x)$. Често използвано ядро е Гаусово разпределение с нулева средна стойност. Когато Гаусово разпределение се използва като ядро, стандартното отклонение често се нарича честотна лента. Байесовите методи могат да се приложат за избор на подходяща честотна лента въз основа на данните [18, 20, 25].

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*.

Ще приемем, че n променливите в Байесовата мрежа $X_{1:n}$ са дискретни, въпреки че това не е задължително да е така. Използваме r_i , за да представим броя на инстанциите на X_i и q_i , за да представим броя на инстанциите на родителите на X_i . Ако X_i няма родители, тогава $q_i = 1$. J -тата инстанция на родителите на X_i се обозначава π_{ij} . В

Байесовата мрежа има $\sum_{i=1}^n r_i q_i$ параметъра. Всеки параметър се записва като θ_{ijk} и определя:

$$P(X_i = k | \pi_{ij}) = \theta_{ijk} \quad (1.75)$$

Въпреки че има $\sum_{i=1}^n r_i q_i$ параметъра, само $\sum_{i=1}^n (r_i - 1) q_i$ са независими. Ние използваме θ , за да представим множеството от всички параметри. Използваме m_{ijk} , за да представим броя пъти, в които $X_i = k$ е дадено π_{ij} в набора от данни D .

Вероятността е:

$$P(D | \theta, G) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \prod_{k=1}^{r_i} \theta_{ijk}^{m_{ijk}} \quad (1.76)$$

Параметрите на априорната Байесова мрежа θ могат да бъдат факторизирани. Ако имаме, че $\theta_{ij} = (\theta_{ij1}, \dots, \theta_{ijr_i})$, тогава:

$$p(\theta | G) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} p(\theta_{ij}) \quad (1.77)$$

Предишното $p(\theta_{ij})$, при някои слаби предположения, може да бъде показано, че следва разпределението на Дирихле в уравнение (1.72). Разпределението върху X_i при дадена j -та родителска инстанция е дадено от $\text{Dir}(\alpha_{ij1}, \dots, \alpha_{ijr_i})$. Изчислява се $P(G | D)$, използвайки правилото на Байс и закона за общата вероятност:

$$P(G | D) \propto P(G) P(D | G) \quad (1.78)$$

$$= P(G) \int P(D | \theta, G) p(\theta, G) d\theta \quad (1.79)$$

Оказва се, че след интегриране на произведението на уравнения (1.76) и (1.77) по θ , получаваме:

$$P(G | D) = P(G) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\Gamma(\alpha_{ij0})}{\Gamma(\alpha_{ij0} + m_{ij0})} \prod_{k=1}^{r_i} \frac{\Gamma(\alpha_{ijk} + m_{ijk})}{\Gamma(\alpha_{ijk})} \quad (1.80)$$

В горното уравнение,

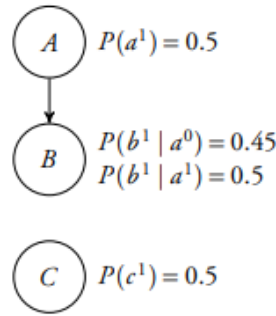
$$\alpha_{ij0} = \sum_{k=1}^{r_i} \alpha_{ijk} \quad (1.81)$$

$$m_{ij0} = \sum_{k=1}^{r_i} m_{ijk} \quad (1.82)$$

Намирането на G , което максимизира уравнение (1.79), е същото като намирането на G , което максимизира това, което се нарича *Байесов резултат*:

$$\ln P(G|D) = \ln P(G) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} \ln \left(\frac{\Gamma(\alpha_{ij0})}{\Gamma(\alpha_{ij0} + m_{ij0})} \right) + \sum_{k=1}^{r_i} \ln \left(\frac{\Gamma(\alpha_{ijk} + m_{ijk})}{\Gamma(\alpha_{ijk})} \right) \quad (1.83)$$

Байесовият резултат е по-удобен за числено изчисляване, защото е по-лесно да се сумират логаритмите на малки числа, отколкото да се умножават. Много софтуерни библиотеки могат да изчислят логаритъма на гама функцията директно с разумна точност [14, 18, 22].



Фигура 1.20 Примерна Байесова мрежа

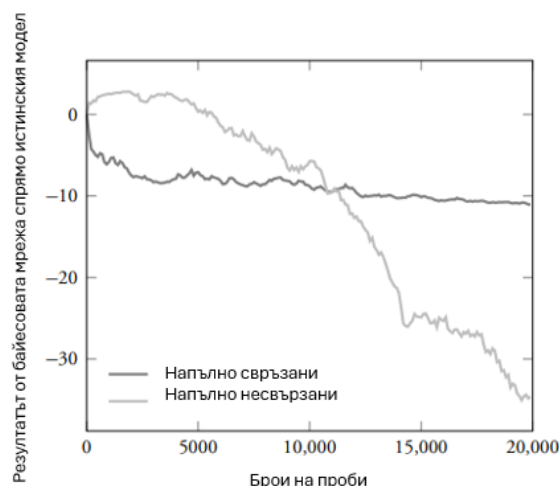
За да илюстрираме как Байесовото оценяване балансира сложността на модела, разглеждаме простата Байесова мрежа на Фигура 1.20. Стойността на A слабо влияе върху стойността на B , а C е независима от другите променливи. Ние вземаме проби от този „истински“ модел, за да генерираме данни D и след това се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

Фигура 1.21 показва как Байесовите резултати на напълно свързаните и несвързаните модели се сравняват с променливи, но ще се съсредоточим върху резултатите за следните модели: истинския модел и модел с увеличаване на количеството данни.

От графиката получаваме резултата на истинския модел, така че стойности над 0 показват, че моделът предоставя по-добро представяне от истинския модел, като се имат предвид наличните данни. Графиката показва, че несвързаният модел се справя по-добре

от истинския модел, когато има по-малко от 5000 извадки. Напълно свързаният модел никога не се справя по-добре от истинския модел, но започва да се справя по-добре от несвързания модел при около 10 000 семпла, защото има достатъчно данни за адекватна оценка на седемте му независими параметъра.



Фигура 1.21 Резултатът от Байесовата мрежа спрямо истинския модел

Пространството от възможни Байесови мрежови структури нараства супер експоненциално. С 10 възела има 4.2×10^{18} възможни насочени ациклични графи. С 20 възела има 2.4×10^{72} . С изключение на Байесовите мрежи с малко възли, не можем да изброим пространството от възможни структури, за да намерим мрежата с най-висок резултат. Следователно, трябва да разчитаме на стратегия за търсене. За щастие, търсенето е общ проблем и през годините са изследвани голямо разнообразие от различни генерични алгоритми за търсене. Една от най-често срещаните стратегии за търсене се нарича K2 (наречена така, защото е еволюция на система, наречена Kutató). Търсенето (Алгоритъм 1.8) се извършва за полиномиално време, но не гарантира намирането на глобално оптимална мрежова структура. Може да използва всяка функция за оценяване f , но често се използва с Байесовата оценка поради способността ѝ да балансира сложността на модела с количеството налични данни. K2 започва с граф без насочени ръбове и след това итериращо върху предполагаемо подреждане на променливи, като добавя родители към възлите по начин, който максимално увеличава резултата.

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].

Обща стратегия за търсене е локално търсене, което понякога се нарича изкачване на хълм или градиентно изкачване и е описано в Алгоритъм 1.9. Започваме с начален граф G_0 и след това преминаваме към съсед с най-висок резултат. Околността на графа се състои от графи, които са само на една основна графична операция разстояние, където основните графични операции включват:

- Ако не съществува ръб между A и B , въвежда се $A \rightarrow B$.
- Ако $A \rightarrow B$, премахва се ръбът от A към B .
- Ако $A \rightarrow B$, обръща се посоката на ръба, за да се получи $A \leftarrow B$.

Algorithm 2.8 K2 search of space of directed acyclic graphs

```

1: function K2SEARCH( $f$ )
2:    $X_{1:n} \leftarrow$  ordering of nodes
3:    $G' \leftarrow$  graph containing nodes  $X_{1:n}$  and no edges
4:   for  $i \leftarrow 1$  to  $n$ 
5:     repeat
6:        $G \leftarrow G'$ 
7:       Add a parent to node  $X_i$  in graph  $G'$  that maximizes  $f(G')$ 
8:     until  $f(G') \leq f(G)$ 
9:   return  $G$ 

```

Разбира се, не всички операции са възможни от даден граф, а операциите, които въвеждат цикли в графа, са невалидни. Търсенето продължава, докато текущият граф не получи резултат, не по-висок от всички свои съседи.

Algorithm 2.9 Local search of space of directed acyclic graphs

```

1: function LOCALDIRECTEDGRAPHSEARCH( $f, G_0$ )
2:    $G' \leftarrow G_0$ 
3:   repeat
4:      $G \leftarrow G'$ 
5:      $\mathcal{G} \leftarrow$  neighbors of  $G$ 
6:      $G' \leftarrow \arg \max_{G' \in \mathcal{G}} f(G')$ 
7:   until  $f(G') \leq f(G)$ 
8:   return  $G$ 

```

Локалното търсене може да се забие в локални оптимуми, което му пречи да намери глобално оптималната мрежова структура.

Предложени са различни стратегии за справяне с локалните оптимуми, включително следните:

- Случайно рестартиране. След като бъде намерен локален оптимум, просто рестартирайте търсенето в произволна точка в пространството за търсене.

- Симулирано огряване. Вместо винаги да се движи към съсед с най-голяма годност, търсенето може да посети съсед с по-ниска годност според някаква рандомизирана стратегия за изследване. С напредването на търсенето, случайността в изследването намалява според някакъв график. Този подход се нарича симулирано огряване заради вдъхновението си от огряването в металургията.

- Търсене с табу. Този подход включва поддържане на списък с табу, съдържащ наскоро посетени точки в пространството за търсене. Алгоритъмът за търсене избягва съседите в списъка с табу.

- Генетични алгоритми. Процедурата започва с начална случайна популация от точки в пространството за търсене, представени като двоични низове. При търсене в пространството на насочени графове, бит в низа показва наличието или отсъствието на стрелка между два възела. Индивидите в популацията се възпроизвеждат със скорост, пропорционална на техния резултат. Индивидите, избрани за възпроизвеждане, имат низовете си, рекомбинирани произволно чрез генетично кръстосване. Генетичното кръстосване включва избиране на точка на кръстосване на два произволно избрани индивида и след това размяна на низовете след тази точка. Мутации също се въвеждат произволно в популацията чрез произволно обръщане на битове в низовете. Процесът на еволюция продължава, докато се намери задоволителна точка в пространството за търсене.

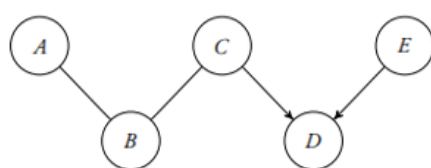
- Меметични алгоритми. Този подход понякога се нарича генетично локално търсене и е просто комбинация от генетични алгоритми с локално търсене. След генетична рекомбинация, локалното търсене се прилага към индивидите.

Някои стратегии за търсене може да работят по-добре от други върху определени набори от данни, но като цяло намирането на глобалните оптимуми остава *NP-трудно*. Много приложения обаче не изискват глобално оптималната мрежова структура. Локално оптималната структура често е приемлива [12, 18, 24, 25].

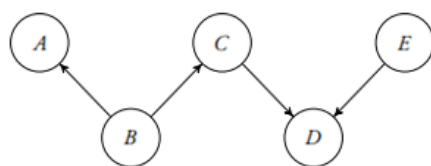
Байесовата мрежа кодира набор от условни предположения за независимост. Важно наблюдение, което трябва да се направи, когато се опитваме да научим структурата на Байесова мрежа е, че два различни графа могат да кодират едни и същи предположения за независимост. Като прост пример, разгледайте мрежата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

$A \leftarrow B$. Само въз основа на данните не може да се обоснове посоката на ръба между A и B.

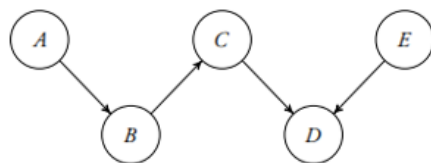
Два графа са *Марковски еквивалентни*, ако кодират един и същ набор от условни предположения за независимост. Може да се докаже, че два графа са Марковски еквивалентни, ако и само ако имат (1) едни и същи ръбове, независимо от посоката, и (2) едни и същи неморални v-структури. Неморална v-структура е v-структура $X \rightarrow Y \leftarrow Z$ с X и Z, които не са директно свързани. Класът на Марковска еквивалентност е множество, съдържащо всички насочени ациклични графи, които са *Марковски еквивалентни* един на друг.



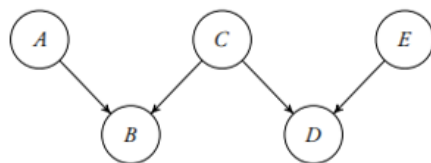
(a) Клас на еквивалентност на Марков



(b) Член



(c) Член



(b) Не член

Фигура 1.22 Пример за клас на еквивалентност на Марков

Като цяло, две структури, принадлежащи към един и същ клас на еквивалентност на Марков, могат да получат различни оценки. Ако обаче Байесовият резултат се използва с априорни вероятности на Дирихле, такива че $x = \sum_j \sum_k \alpha_{ijk}$ е константа за всички i , тогава на две еквивалентни на Марков структури се присвоява една и съща

оценка. Такива априорни вероятности се наричат BDe, а специален случай е BDeu априорната вероятност, която присвоява $\alpha_{ijk} = x/(q_i r_i)$. Въпреки че често използваната равномерна априорна вероятност $\alpha_{ijk} = 1$ не винаги води до присвояване на идентични оценки на структури в един и същи клас на еквивалентност, те често са доста близки. Функция за оценяване, която присвоява една и съща оценка на всички структури в един и същи клас, се нарича *еквивалентна оценка* [18, 19, 22, 25].

Класът на еквивалентност на Марков може да бъде представен като частично насочен граф, понякога наричан съществен граф или насочен ацикличен графов модел. Частично насочен граф може да съдържа както насочени, така и ненасочени ребра. Пример за частично насочен граф, който кодира клас на еквивалентност на Марков, е показан на Фигура 1.22a. Насочен ацикличен граф G е член на класа на еквивалентност на Марков, кодиран от частично насочен граф G' , ако и само ако G (1) има същите ребра като G' , без оглед на посоката и (2) има същите v -структури като G_0 . Фигури 1.22b и 2.22c са примери за членове на класа на еквивалентност от Фигура 1.22a. Фигура 1.22d не е член.

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.

Ако се използва форма на локално търсене, тогава трябва да дефинираме локалните графови операции, които определят околността на графа, например,

- Ако не съществува ръб между A и B , добавете или $A - B$, или $A \rightarrow B$.
- Ако $A - B$ или $A \rightarrow B$, тогава премахнете ръба между A и B .
- Ако $A \rightarrow B$, тогава обърнете посоката на ръба, за да получите $A \leftarrow B$.
- Ако $A - B - C$, тогава добавете $A \rightarrow B \leftarrow C$.

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. Генерирането на член от частично насочен граф

включва преобразуване на неориентираните ръбове в насочени ръбове по начин, който не въвежда нови v -структури [14, 19, 21, 24, 25].

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].

Точно както наложихме набор от ограничения върху убежденията, ще наложим и някои ограничения върху предпочитанията. Тези ограничения понякога се наричат аксиоми на фон Нойман-Моргенщерн, кръстени на Джон фон Нойман и Оскар Моргенщерн, които формулираха вариант на тези аксиоми през 40-те години на миналия век.

- *Пълнота.* Точно едно от следните е валидно: $A \succ B$, $B \succ A$ или $A \sim B$.
- *Транзитивност.* Ако $A \geq B$ и $B \geq C$, тогава $A \geq C$.
- *Непрекъснатост.* Ако $A \geq C \geq B$, тогава съществува вероятност p , такава че $[A: p; B: 1 - p] \sim C$.
- *Независимост.* Ако $A \succ B$, тогава за всяко C и вероятност p , $[A: p; C: 1 - p] \geq [B: p; C: 1 - p]$.

Това са ограничения върху *рационалните предпочитания*. Те не казват нищо за предпочитанията на действителните човешки същества, всъщност има сериозни доказателства, че хората не са много рационални. Целта е да разберем рационалното вземане на решения от изчислителна гледна точка, за да можем да изградим полезни системи. Възможното разширяване на тази теория до разбиране на човешкото вземане на решения е само от второстепенен интерес [27, 28].

Точно, както ограниченията върху сравнението на правдоподобността на различни твърдения водят до съществуването на мярка за вероятност с реална стойност, ограниченията върху рационалните предпочитания водят до съществуването на мярка за полезност с реална стойност. От нашите ограничения върху рационалните предпочитания следва, че съществува функция на полезност U с реална стойност, такава че:

$$U(A) > U(B) \text{ ако и само ако } A \succ B,$$

и

- $U(A) = U(B)$ ако и само ако $A \sim B$.

Функцията на полезността е уникална. С други думи, за всякакви константи $m > 0$ и b , $U'(S) = mU(S) + b$, ако и само ако предпочитанията, индуцирани от U' , са същите като U .

От ограниченията върху рационалните предпочитания следва, че полезността на лотарията е:

$$U([S_1:p_1; \dots; S_n:p_n]) = \sum_{i=1}^n p_i U(S_i) \quad (2.2)$$

Да предположим, че изграждаме система за избягване на сблъсък. Резултатът от среща със самолет се определя от това дали системата алармира (A) и дали ще се стигне до сблъсък (C). Тъй като A и C са двоични, т.е. има четири възможни резултата. Стига предпочитанията да са рационални, можем да запишем функцията на полезност върху пространството на възможните лотарии по отношение на четири параметъра: $U(a^0, c^0)$, $U(a^1, c^0)$, $U(a^0, c^1)$ и $U(a^1, c^1)$.

Например,

$$U([a^0, c^0: 0.5; a^1, c^0: 0.3; a^0, c^1: 0.1; a^1, c^1: 0.1]) \quad (2.3)$$

е равно на:

$$0.5U(a^0, c^0) + 0.3U(a^1, c^0) + 0.1U(a^0, c^1) + 0.1U(a^1, c^1) \quad (2.4)$$

Ако функцията на полезност е ограничена, тогава можем да дефинираме нормализирана функция на полезност, където на най-добрия възможен резултат се присвоява полезност 1, а на най-лошия възможен резултат се присвоява полезност 0. Полезността на всеки от останалите резултати се мащабира [26, 28, 31].

Интересуваме се от проблема за вземане на рационални решения с несъвършени познания за състоянието на света. Да предположим, че имаме вероятностен модел $P(s'|a, o)$, който представлява вероятността състоянието на света да стане s' , при условие че наблюдаваме o и предприемаме действие a . Имаме функция на полезност $U(s')$, която кодира нашите предпочитания в пространството на резултатите. Очакваната ни полезност от предприемане на действие при дадено наблюдение o е:

$$EU(a|o) = \sum_{s'} P(s'|a, o)U(s') \quad (2.5)$$

Принципът на максималната очаквана полезност гласи, че рационалният агент трябва да избере действието, което максимизира очакваната полезност.

$$a^* = \operatorname{argmax} EU(a|0) \quad (2.6)$$

Тъй като се интересуваме от изграждането на рационални агенти, уравнение (2.6) играе централна роля [26, 30, 31, 33].

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:

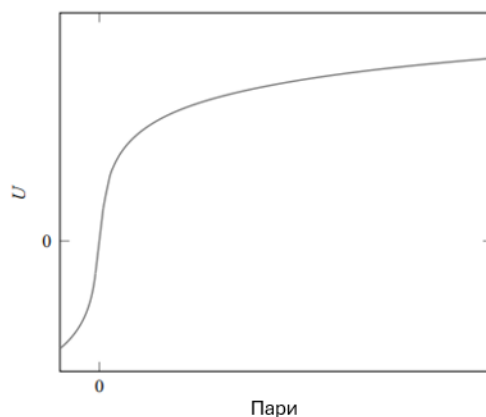
$$U(s) = p \quad (2.7)$$

В разгледания по-горе пример за избягване на сблъсък, най-доброто възможно събитие е да не се появи предупреждение и да не се получи сблъсък, затова задаваме $U(a^0, c^0) = 1$. Най-лошото възможно събитие е да се появи предупреждение и да се получи сблъсък, затова задаваме $U(a^1, c^1) = 0$. Дефинираме лотарията $L(p)$ като $[a^0, c^0: p; a^1, c^1: 1 - p]$. За да определим $U(a^1, c^0)$, трябва да намерим p , такава че $(a^1, c^0) \sim L(p)$. По подобен начин, за да определим $U(a^0, c^1)$, намираме p , такава че $(a^0, c^1) \sim L(p)$ [29, 30, 32].

Може да е изкушаващо да се използват парични стойности, за да се изведат функциите на полезността. Например, когато се изгражда система за подпомагане на вземането на решения за управление на горски пожари, би било естествено да се дефинира функция на полезността по отношение на паричните разходи, причинени от щети върху имущество и паричните разходи за разполагане на ресурси за потушаване на пожари. Въпреки това, добре известно е в икономиката, че полезността на парите като цяло не е линейна. Ако имаше линейна връзка между полезността и парите, тогава решенията трябва да се вземат по отношение на максимизиране на очакваната парична стойност. Някой, който се опитва да максимизира очакваната парична стойност, няма да

има нужда от застраховка, защото очакваните парични стойности на застрахователните полици обикновено са отрицателни.

Разбира се, различните хора имат различни функции на полезност, но функцията като цяло следва кривата, показана на Фигура 2.1. За малки суми пари кривата е приблизително линейна, а за по-големи суми пари, връзката често се третира като логаритмична [2, 35, 36, 39, 40].



Фигура 2.1 Полезност на парите

Когато се обсъждат функциите на паричната полезност, често се използват трите термина:

- *Неутрален по отношение на риска.* Функцията на полезността е линейна.
- *Търсене на риск.* Функцията на полезността е вдлъбната нагоре.
- *Избягване на риск.* Функцията на полезността е вдлъбната надолу.

В процеса на изграждане на системи за вземане на решения е полезно да се използва парична стойност, за да се информира за изграждането на функцията на полезността. Важно е обаче да се има предвид потенциално нелинейната връзка между парите и полезността [2, 33, 37, 39, 42].

Функцията на полезност за избягване на сблъсък зависи от две двоични променливи: дали е имало предупреждение и дали е имало сблъсък. Трябва да се дефинира полезността за всички възможни комбинации от присвоявания на тези две променливи. Ако имаме n двоични променливи, тогава ще трябва да посочим 2^n параметъра във функцията на полезност. Ако нормализираме функцията на полезност, тогава поне един от параметрите ще бъде 0 и поне един от параметрите ще бъде 1. Можем

да представим функциите на полезност компактно, като използваме различни форми на независимост между променливите, подобно на това, както Байесовите мрежи компактно представят съвместни вероятностни разпределения.

При определени предположения за структурата на предпочитанията, можем да представим функция на полезност с множество променливи, като използваме сума от функции на полезност с една променлива. Ако имаме n променливи $X_{1:n}$, тогава можем да запишем:

$$U(x_{1:n}) = \sum_{i=1}^n U(x_i) \quad (2.8)$$

За да представим функцията на полезност, приемайки, че всички променливи са двоични, са ни необходими само $2n$ параметъра:

$$U(x_1^0), U(x_1^1), \dots, U(x_n^0), U(x_n^1) \quad (2.9)$$

За да илюстрираме стойността на адитивното разлагане на функцията на полезност, ще добавим две допълнителни променливи към примера за избягване на сблъсък:

- *Усилване* (S), което показва дали системата за избягване на сблъсък е инструктирала пилотите да засилят (или увеличат) изкачването или спускането си.
- *Обръщане* (R), което показва дали системата за избягване на сблъсък е инструктирала пилотите да променят посоката си (т.е. отгоре надолу или отдолу нагоре).

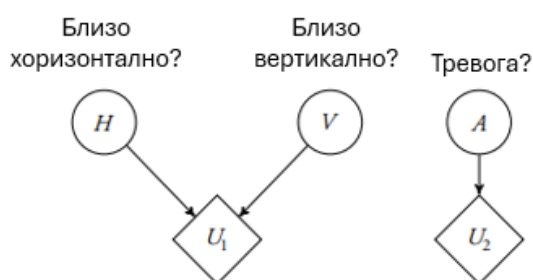
Ако не използваме структурата на предпочитанията върху A , C , S и R , тогава ще ни трябват $2^4 = 16$ параметъра. При адитивно разлагане са ни необходими само осем параметъра [2, 19, 32, 33, 34, 35].

Въпреки че, е обичайно полезностите да се нормализират между 0 и 1, може да е по-естествено да се използва различна схема за конструиране на функцията на полезност. В проблема за избягване на сблъсък е лесно да се формулира функцията на полезност по отношение на разходите, свързани с предупреждение, сблъсък, укрепване и обръщане. Ако няма предупреждение, сблъсък, укрепване или обръщане, тогава няма разходи – с други думи, $U(a^0)$, $U(c^0)$, $U(s^0)$ и $U(r^0)$ са равни на 0.

Резултатът с най-висока цена е сблъсък и затова задаваме $U(c^1) = -1$ и нормализираме останалите полезности спрямо този резултат. Като се имат предвид предположенията и като се поддържа $U(c^1)$ фиксирано на -1 , имаме само три свободни

параметъра, за да дефинираме нашата функция на полезност. Функцията на полезност за много проблеми не може да бъде адитивно разложена на функции на полезност по отделни променливи, както е в уравнение (2.8). Например, да предположим, че функцията на полезност за избягване на сблъсък е дефинирана спрямо три двоични променливи: дали нарушителят се приближава хоризонтално (H), дали нарушителят се приближава вертикално (V), и дали системата алармира (A). Можем да запишем:

$$U(h, v, a) = U(h, v) + U(a) \quad (2.10)$$



Фигура 2.2 Адитивно разлагане на функцията на полезност.

Можем да направим адитивното разлагане явно в диаграма, както е показано на Фигура 2.2. Възлите на полезност са обозначени с ромбове. Родителите на възел на полезност са възли на неопределеност, представляващи променливите, от които зависи възелът на полезност. Ако родителите на възел на полезност са дискретни, тогава функцията на полезност, свързана с този възел, може да бъде представена като таблица. Ако родителите на възел на полезност са непрекъснати, тогава всяка функция с реални стойности може да се използва за представяне на полезността. Ако диаграмата има множество възли на полезност, техните стойности се сумират, за да се получи обща стойност на полезността [2, 19, 32, 35, 38, 42].

2.2. Мрежи за вземане на решения.

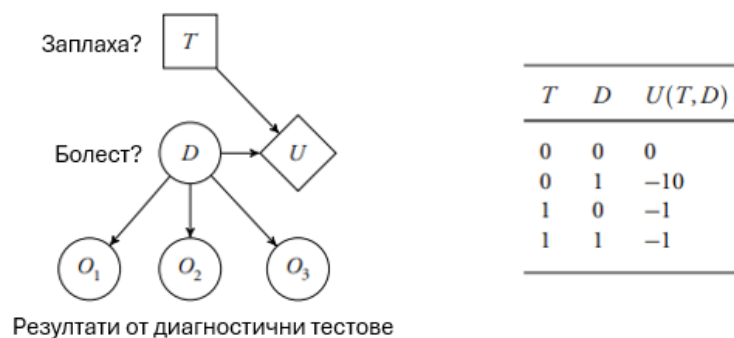
Можем да разширим понятието за Байесови мрежи, до мрежи за вземане на решения, които включват действия и полезности. Мрежите за вземане на решения са съставени от три типа възли:

- 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.

Фигура 2.3 показва примерна мрежа за решения. В тази мрежа имаме набор от резултати от диагностични тестове, които могат да показват наличието на определено заболяване. Трябва да решим дали да приложим лечение въз основа на това, което е известно от диагностичните тестове. Полезността е функция от това дали е приложено лечение и дали заболяването действително е налице. Тази мрежа ще се използва като пример в този параграф [34, 39, 40, 43, 46].

Очакваната полезност α на дадена o е:

$$E U(\alpha|o) = \sum_{s'} P(s'|a, o)U(s') \quad (2.11)$$

Можем да използваме уравнението, за да изчислим очакваната полезност от лечението на заболяване за мрежата за решения на Фигура 2.3. Засега ще приемем, че имаме резултата само от първия диагностичен тест и че той е положителен. Ако искаме да направим познанието за първия диагностичен тест изрично в диаграмата, тогава ще начертаем информационен ръб от O_I до T имаме:

$$E U(t^1|o_1^1) = \sum_{o_3} \sum_{o_2} \sum_d P(d, o_2, o_3|t^1, d, o_1^1)U(t^1, d, o_1^1, o_2, o_3) \quad (2.12)$$

Можем да използваме верижното правило за Байесови мрежи и дефиницията на условна вероятност, за да изчислим $P(d, o_2, o_3|t^1, d, o_1^1)$. Тъй като възелът за полезност зависи само от това дали заболяването е налице и дали го лекуваме, можем да опростим $U(t^1, d, o_1^1, o_2, o_3)$ до $U(t^1, d)$. Следователно,

$$E U(t^1|o_1^1) = \sum_d P(d|t^1, o_1^1)U(t^1, d) \quad (2.13)$$

Всеки от точните или приблизителните методи за извод, може да се използва за оценка на $P(d|t^1, o_1^1)$. За да решим дали да приложим дадено третиране, изчисляваме $E U(t^1|o_1^1)$ и $E U(t^0|o_1^1)$ и вземаме решението, което осигурява най-високата очаквана полезност. За да оценим общи мрежи за еднократни решения, започваме с инициализиране на възлите за действие и наблюдаваните случайни възли. След това прилагаме произволен алгоритъм за извод, за да изчислим апостериорното разпределение върху родителите на възлите за полезност. Вместо да сумираме върху инициализирането на всички променливи в уравнение (2.11), трябва само да сумираме върху инициализирането на родителите на възлите за 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.

Например, на Фигура 2.3 можем да премахнем O_2 и O_3 , защото нямат наследници. Не можем да премахнем O_I , защото го третирахме като наблюдаван, което показва, че има информационен ръб от O_I до T (въпреки че, не е нарисован изрично) [19, 42, 43, 45].

Досега приемахме, че в мрежата за решения на Фигура 2.3 сме наблюдавали само o_1^1 . Като се има предвид положителният резултат само от този диагностичен тест, тогава можем да решим да не се лекуваме. Въпреки това, може да е полезно да се приложат допълнителни диагностични тестове, за да се намали рискът от нелекуване на действително налично заболяване. Един от начините да се реши кой диагностичен тест да се приложи е да се изчисли стойността на информацията.

При изчисляване на стойността на информацията ще използваме $EU^*(o)$, за да обозначим очакваната полезност на оптимално действие при дадено наблюдение o . Стойността на информацията за променливата O' при дадено o е:

$$VOI(O'|o) = (\sum_{o'} P(o'|o) EU^*(o, o')) - EU^*(o) \quad (2.14)$$

С други думи, стойността на информацията за дадена променлива е увеличението на очакваната полезност при наблюдението на тази променлива. Очакваната полезност може да се увеличи само, ако наблюдението на променливата може да доведе до различно оптимално решение. Ако наблюдението на нова променлива O' не променя избора на действие, тогава $EU^*(o, o') = EU^*(o)$ за всички o' , като в този случай уравнение (2.14) се оценява на 0. Например, ако оптималното решение е да се лекува заболяването, независимо от резултата от диагностичния тест, тогава стойността на наблюдението на резултата от теста е 0.

Стойността на информацията обхваща само увеличението на очакваната полезност от извършването на наблюдение. Може да има разходи, свързани с извършването на конкретно наблюдение. Някои диагностични тестове може да са достатъчно скъпи, като например измерване на температурата, а други диагностични тестове са по-скъпи и инвазивни, като например лумбална пункция [37, 38, 43, 47].

Показателят за стойност на информацията е важен и често използван показател за избор на това какво да се наблюдава. Понякога показателят за стойност на информацията се използва за определяне на подходяща последователност от наблюдения. След всяко наблюдение стойността на информацията се определя за останалите ненаблюдавани променливи. След това ненаблюдаваната променлива с най-голяма стойност на информацията се избира за наблюдение. Ако има разходи, свързани с извършването на различни наблюдения, тогава тези разходи се изваждат от стойността на информацията при определяне коя променлива да се наблюдава. Процесът продължава, докато вече не е полезно да се наблюдават други променливи. След това се избира оптималното

действие. Този подбор на наблюдения е само евристичен и може да не представлява истински оптималната последователност от наблюдения. Оптималният подбор на наблюдения може да се определи чрез използване на техниките за последователно вземане на решения [37, 43, 44, 47].

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.

За система за избягване на сблъсък във въздуха, действията могат да бъдат изкачване, спускане или непредприемане на нищо. При някои проблеми, може да е желателно пространството на действията да се разложи на множество променливи за вземане на решения. В система за избягване на сблъсък, която може да препоръчва както хоризонтални, така и вертикални маневри, една променлива за вземане на решения може да определя дали ще се изкачваме или спускаме, а друга променлива може да определя дали ще завием наляво или надясно. Следващата стъпка е идентифициране на наблюдаваните и ненаблюдаваните променливи, свързани с проблема.

Ако имаме електрооптичен сензор на системата за избягване на сблъсък, може да сме в състояние да наблюдаваме относителния ъгъл спрямо друг самолет и по този начин това ъглово измерване би съответствало на един от наблюдаваните случайни възли. Истинската позиция на нахлуващ самолет е от значение за проблема, но не може да бъде наблюдавана директно и затова е представена от ненаблюдавана променлива в мрежата. След това идентифицираме връзките между различните възли за случайност и решение. Определянето на тези връзки може да се извърши чрез експертна преценка, обучение от данни или комбинация от двете. Често проектантите се опитват да изберат посоката на стрелките, за да отразят причинно-следствената връзка от един възел към друг.

След като връзките между възлите за случайност и решение са идентифицирани, се избират модели, които да представят условните вероятностни разпределения. За дискретни възли, очевидният модел е таблично представяне. За непрекъснати възли можем да изберем параметричен модел, като например линеен Гаусов модел.

Параметрите на тези модели след това могат да бъдат зададени от експерти или оценени от данните, като се използват техниките представени в [35, 37, 42, 45].

Въвеждаме възлите за полезност и добавяме функционални ръбове от съответните възли за случайност и решение. Параметрите на възлите за полезност могат да бъдат определени от предпочитания, извлечени от експерти. Параметрите могат също да бъдат настроени така, че оптималното решение според мрежата за решения да съответства на решенията на експертите. След това мрежата за решения трябва да бъде валидирана и усъвършенствана от експерти. При даден сценарий за решение, мрежата за решения може да се използва за определяне на оптималното действие. Това действие може да бъде сравнено с това, което би препоръчал експерт.

Обикновено е необходима инспекция на много сценарии за решения, преди да може да се установи доверие в мрежата за решения. Ако има несъгласие между мрежата за решения и експерта, тогава мрежата за решения може да бъде инспектирана, за да се определи защо това конкретно действие е било избрано като оптимално.

В някои случаи по-внимателната проверка на модела може да доведе до преразглеждане на условните вероятности, промяна на връзката между променливите, промяна на параметрите във възлите за полезност или въвеждане на нови променливи в модела. Понякога по-нататъшното проучване води до преразглеждане на избора на действие от експертите. Може да са необходими няколко итерации на разработка, преди да се намери подходяща мрежа за вземане на решения [38, 42, 47].

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.

Един от най-известните проблеми в теорията на игрите е дилемата на затворника. Имаме двама агенти, които са затворници и са разпитвани поотделно. На всеки е дадена възможност да свидетелства срещу другия. Ако единият свидетелства, а другият не,

тогава този, който свидетелства, бива освободен, а другият получава десет години затвор. Ако и двамата свидетелстват, тогава и двамата получават пет години. Ако и двамата откажат да свидетелстват, тогава и двамата получават по една година.

		Агент 2	
		Свидетелство	Отказ
Агент 1	Свидетелство	-5, -5	0, -10
	Отказ	-10, 0	-1, -1

Фигура 2.4 Дилемата на затворника.

Полезността на двамата агенти в дилемата на затворника е показана на Фигура 2.4. Първият компонент в матрицата на полезността е свързан с Агент 1, а вторият компонент е свързан с Агент 2. Предполага се, че матрицата на полезността е общоизвестна между двамата агенти. Двата агенти трябва да избират действията си едновременно, без да знаят за действието на другия агент.

В игри като дилемата на затворника, стратегията, избрана от агент в играта, може да бъде, както следва:

- *чиста стратегия*, при която действието се избира детерминистично, или
- *смесена стратегия*, при която действието се избира вероятно.

Разбира се, чистата стратегия е просто частен случай на смесена стратегия, при която вероятност 1 е присвоена на едно действие. Смесената стратегия, която присвоява вероятност 0,7 на свидетелстване в дилемата на затворника, може да бъде записана с помощта на нотация, подобна на използваната по-рано за лотарията:

[Свидетелстване: 0.7; Отказ: 0.3]

Полезността на смесена стратегия може да бъде записана като полезности, свързани с чисти стратегии:

$$U([a_1:p_1; \dots; a_n:p_n]) = \sum_{i=1}^n p_i U(a_i) \quad (2.15)$$

Стратегията на агент i се обозначава s_i . Стратегическият профил, $s_{1:n}$, е присвояване на стратегии на всички n агенти. Стратегическият профил на всички агенти с изключение на този на агент i се записва като s_{-i} . Полезността на агент i , зададен със стратегически профил $s_{1:n}$, се записва като $U_i(s_{1:n})$ или, алтернативно, $U_i(s_i, s_{-i})$.

Най-добрият отговор на агент i на стратегическия профил s_{-i} е стратегия s_i^* , такава че $U_i(s_i^*, s_{-i}) \geq U_i(s_i, s_{-i})$ за всички стратегии s_i . Като цяло може да има множество различни най-добри отговори, зададени на s_{-i} . В някои игри може да съществува s_i , който е най-добрият отговор на всички възможни s_{-i} , в който случай s_i се нарича доминираща стратегия. Например, в дилемата на затворника, Агент 1 е по-добър за свидетелстване, независимо дали Агент 2 свидетелства или отказва. Следователно, свидетелстването е доминиращата стратегия за Агент 1. Тъй като играта е симетрична, свидетелстването е и доминиращата стратегия за Агент 2. Когато всички агенти имат доминираща стратегия, тяхната комбинация се нарича *равновесие на доминиращата стратегия*.

Дилемата на затворника е предизвикала значителен интерес, защото показва как играта с най-добрите индивидуални отговори може да доведе до неоптимален резултат за всички агенти. Равновесието на доминиращата стратегия води до това, че и двамата агенти свидетелстват и получават пет години затвор. Ако обаче и двамата откажат да свидетелстват, тогава и двамата биха получили само една година затвор [43, 45, 46, 47, 48].

		Агент 2	
		Изкачване	Спускане
Агент 1	Изкачване	-5, -5	-1, 0
	Спускане	0, -1	-4, -4

Фигура 2.5 Игра за избягване на сблъсък

Да предположим, че имаме два самолета на сблъсъчен курс и пилотите на всеки самолет трябва да избират между изкачване или спускане, за да избегнат сблъсък. Ако и

двамата пилоти изберат една и съща маневра, тогава има катастрофа с полезност -4 и за двамата пилоти. Тъй като изкачването изисква повече гориво от спускането, има допълнително наказание от -1 за всеки пилот, който реши да се изкачи. Матрицата на полезността е показана на Фигура 2.5.

В играта за избягване на сблъсък не съществува доминиращо стратегическо равновесие. Най-добрият отговор на даден пилот зависи от решението на другия пилот. Съществува алтернативна концепция за равновесие, известна като равновесие на Наш. Стратегическият профил е равновесие на Наш, ако никой агент не може да се възползва от смяната на стратегията, при условие че другите агенти се придържат към профила. С други думи, $s_{1:n}$ е равновесие на Наш, ако s_i е най-добрият отговор на s_{-i} за всички агенти i . В играта за избягване на сблъсък има две чисти стратегически равновесия на Наш, а именно (Изкачване, Спускане) и (Спускане, Изкачване). Доказано е, че всяка игра има поне едно равновесие на Наш, което може или не може да включва чисти стратегии. Няма известни алгоритми за полиномиално време за намиране на равновесия на Наш за общи игри, въпреки че сложността на намиране на равновесия на Наш не е *NP-пълна*.

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.

В логитния модел ниво- k , агент ниво-0 избира действия равномерно. Агент ниво-1 предполага, че опонентите възприемат стратегии ниво-0 и избира действия според логитното разпределение.

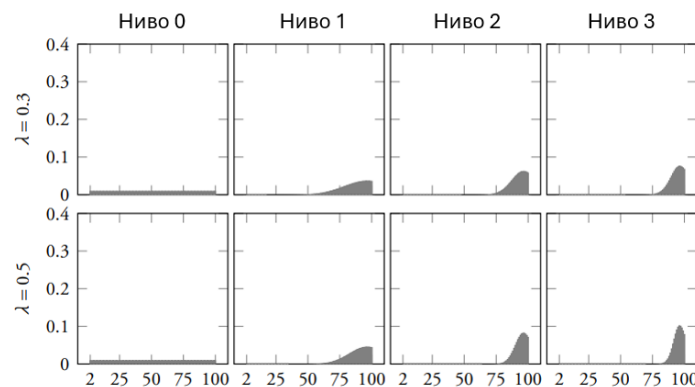
$$P(a_i) \propto e^{\lambda U_i(a_i, s_{-i})} \quad (2.16)$$

където s_{-i} представлява предполагаемия стратегически профил на другите агенти.

Агент от ниво k предполага, че другите агенти възприемат стратегии от ниво $k - 1$ и избират свои собствени действия съгласно уравнение (2.16). Параметрите k и λ могат да бъдат извлечени от данни чрез използване на техники, обсъдени в предишната глава [19, 41, 45, 47, 48].

За да илюстрираме логит модела от ниво k , ще използваме дилемата на пътника. В тази игра, авиокомпания губи два еднакви куфара от двама пътници. Авиокомпанията моли пътниците да запишат стойността на своите куфари, която може да бъде между 2 и 100 долара включително. Ако и двамата запишат една и съща стойност, тогава и двамата получават тази стойност. Пътникът с по-ниската стойност получава своята стойност плюс 2 долара. Пътникът с по-висока стойност получава по-ниската стойност минус 2 долара. С други думи, функцията на полезност е следната:

$$U_i(a_i, a_{-i}) = \begin{cases} a_i & \text{if } a_i = a_{-i} \\ a_i + 2 & \text{if } a_i < a_{-i} \\ a_{-i} - 2 & \text{иначе} \end{cases} \quad (2.17)$$



Фигура 2.6 Логит ниво k за дилемата на пътешественика.

Фигура 2.6 показва стратегиите на логистичния модел ниво k с различни стойности за λ и k . Агентът от ниво 0 избира действия равномерно. Агентът от ниво 1 е насочен към горния край на спектъра, като параметърът за прецизност контролира разпространението. С увеличаването на k разликата между стратегиите за $\lambda = 0,3$ и $\lambda = 0,5$ става по-малко очевидна. Човешкото поведение често може да бъде добре моделирано чрез логистично ниво 2, както се вижда, това осигурява по-добър модел на човешкото поведение от равновесието на Наш [35, 39, 42, 47, 48].

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].

Успешното приложение на методите за изграждане на системи за подпомагане на вземането на решения изисква специално внимание към хората, използващи системите. Тук ще бъдат разгледани предизвикателствата при интеграцията човек-система и ще бъдат представени стратегии за ефективно внедряване.

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.

Вниманието е способност, която позволява на човека да обработва само ограничен набор от информация едновременно [49, 50, 51]. Три метафори в психологическата литература са били използвани за описание на вниманието: филтър, прожектор и басейни. Върху каква информация е фокусирана може да се променя в зависимост от важността на информацията или от това как човекът активно насочва вниманието си [53]. Мигащата светлина на контролния панел привлича вниманието на оператора към информация с необичайни показания. Способността на човека да слуша тиха история, разказвана в претъпкана стая на парти, също илюстрира тази способност за филтриране.

В литературата е доказано също, че съществуват множество модалности, които имат определен капацитет за внимание [50, 55, 56, 57, 58]. Хората могат ефективно да разпределят вниманието между различни модалности (слухови и зрителни), кодове за обработка (пространствени и вербални) и етапи на обработка (възприятие, познание и реакция).

Паметта е друга основна способност, която има ограничения, но и изключителни способности, ако се използва по правилния начин. При обработката „отдолу-нагоре“, вниманието се насочва към отличителните характеристики на околната среда и се осъществява осмисляне на тези отличителни характеристики [59]. Обработката „отгоре-надолу“ позволява на човека да започне да търси информация, за да потвърди или опровергае хипотези за това какво се случва в околната среда [60, 61].

Удовлетворяването е често използван метод, при който хората не се опитват да си представят всички потенциални избори, а след това вземат решение за избор, който е „достатъчно добър“ [62, 63, 64].

Множество евристики са идентифицирани от Канеман, Слович и Тверски, които опростяват процеса на вземане на решения [65, 66]. Евристиката на „наличността“ предполага, че хората ще си спомнят най-често избора, който е бил разглеждан най-скоро или най-често. Евристиката на „представителността“ предполага, че хората ще очакват даден избор да е толкова вероятен, колкото и други избори, които имат подобни свойства. Евристиката на „закотвяне“ предполага, че първоначалната числена оценка ще осигури първоначалната „котва“ и ще отклони всички последващи оценки в посока на първоначалната оценка. Тези евристики намаляват натоварването на работната памет и когнитивната обработка както в ежедневни, така и в по-сложни ситуации. Тези евристики обаче имат недостатъка да произвеждат потенциално „неоптимални“, но ефективни и „достатъчно добри“ резултати за хората.

Вземането на решения, основано на разпознаване, се основава на менталните модели на експертите на системите, с които те имат богат опит. Менталните модели са представяния на действителна система, които позволяват на човека да получава информация от околната среда и да предсказва как ще се развие ситуацията в бъдеще [67, 68, 69]. 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. Предубеждението може да се дължи на вродените ограничения в когнитивната обработка, обсъдени в горния раздел, липсата на адекватна информация, която да представи точно техническата компетентност и надеждност, или „умишлено погрешно калибриране на доверието“. Умишлено погрешно калибриране на доверието може да възникне, когато човек или прекалено разчита на системата поради съзнателни опасения относно собствените си възможности, или недостатъчно разчита на системата поради общо недоверие в автоматизацията или страх от това да бъде заменен [74]. Двата аспекта, необходими за развиване на подходящо доверие в система за подпомагане на вземането на решения, са:

- разбиране на възможностите (и ограниченията на тези възможности) на системата;
- знание за надеждността на информацията и препоръките, предоставени от системата.

Някои системи за подпомагане на вземането на решения са прости, състоящи се от кратък алгоритъм. За тези системи надеждността на изхода е ясна и лесно се потвърждава, стига алгоритъмът да е реализиран правилно. Още по-важно е, че човекът може да анализира един много подробен ментален модел на системата. Ползата от простата логика на вземане на решения е, че потребителят е в състояние да анализира

логиката напълно, което води до точни прогнози и яснота относно ограниченията на възможностите на системата.

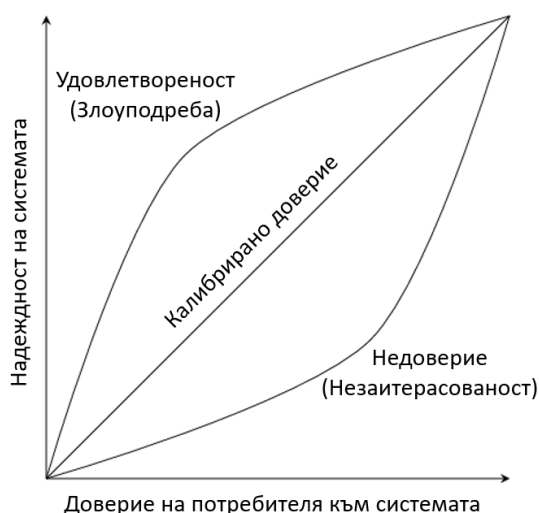


Фигура 2.7 Зелената дъга на Boeing показва хоризонталната позиция, при която се извършва достигане на височината, използвайки прост алгоритъм за линейна екстраполация

Например, на индикатора за хоризонтална ситуация на Boeing 767, „зелена дъга“ предоставя проста индикация за хоризонталната позиция, на която се очаква самолетът да достигне избрана височина, използвайки линейна екстраполация (Фигура 2.7). Логиката не взема предвид намерението на пилота, което може да бъде програмирано в системата за управление на полета и може да се отклонява от екстраполираната позиция.

В практиката, повечето системи за подпомагане на вземането на решения в динамични среди, изискващи значителен обем експертиза, са изключително сложни. Определянето на надеждността на тези системи само по себе си може да бъде трудно поради естеството на системата и потенциалните неочаквани възникващи поведения. За съжаление, поради човешките ограничения в паметта и когнитивната обработка, обсъдени в първия раздел, дори експертните потребители не могат да имат пълно разбиране за тънкостите на системата. В тези системи е необходим добър ментален модел, за да се осигурят функционални детайли на необходимото ниво [73, 74]. Нивото на детайлност, което този ментален модел изисква, често е итеративно упражнение сред потребителите, обучителите и проектантите на системата за подпомагане на вземането на решения. Твърде малкото обучение върху системата може да доведе до ниско детайлен ментален модел, който не позволява адекватно на потребителя да предвиди поведението

й, което води до недоверие в системата. Въпреки това, продължително и обширно обучение върху системата може да загуби вниманието на потребителя или да надхвърли способността му за разбиране по време на процеса на обучение, а основната функция на системата за подпомагане на вземането на решения може да се изгуби в море от помаловажни детайли.



Фигура 2.8 Грешки в калибрирането на доверието

Системата за подпомагане на вземането на решения може да демонстрира определена обективна надеждност и техническа компетентност. Съществува елемент на доверието, който може да доведе до възможност за неправилно калибриране на доверието в системата, което не отразява обективната реалност на атрибутите на системата. Тези неправилни калибрирания включват недоверие, самодоволство, злоупотреба и умишлено неправилно калибриране [72, 73, 74].

Грешки в калибрирането могат да възникнат, когато потребителят няма (или има малко) предварителни представи за системата за подпомагане на вземането на решения и достатъчно доверие в собствените си възможности като оператор. Нека разгледаме параметър „надеждност“ като комбинация от обективна техническа компетентност и надеждност на системата, както е показано на Фигура 2.8. Графика на доверието като функция на надеждността. Перфектно калибрирано доверие на потребителя в системата би било диагонална линия, която увеличава нивото на доверие с увеличаването на надеждността. Тъй като истинското доверие на потребителя се отклонява от тази диагонална линия, отклонението в която и да е посока показва определена форма на грешно калибриране.

Ако доверието на потребителя е под диагоналната линия, тогава има определено ниво на „недоверие“ (или „неизползване“) в системата. Недоверието се определя като „пренебрегване или недостатъчно използване на автоматизацията“ [73]. Предубеждението на потребителя към недостатъчно използване на системата за подпомагане на вземането на решения може да възникне, когато системата генерира твърде много фалшиви аларми.

Ако доверието на потребителя е над диагоналната линия, тогава има тенденция потребителят да стане „самодоволно“ (или да „злоупотребява“ с системата за подпомагане на вземането на решения). Самодоволството се определя като „прекомерно разчитане на автоматизацията, което може да доведе до неуспех на мониторинга или предубеждения при вземане на решения“ [73, 74].

„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. Когато автоматизацията е успешна, за потребителите остава скучна роля, която става жертва на стрес и умора, причинени от поддържането на високи нива на бдителност [75]. Друга форма на злоупотреба с автоматизацията възниква, когато потребителите започнат да използват системата за непредвидени цели. 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.

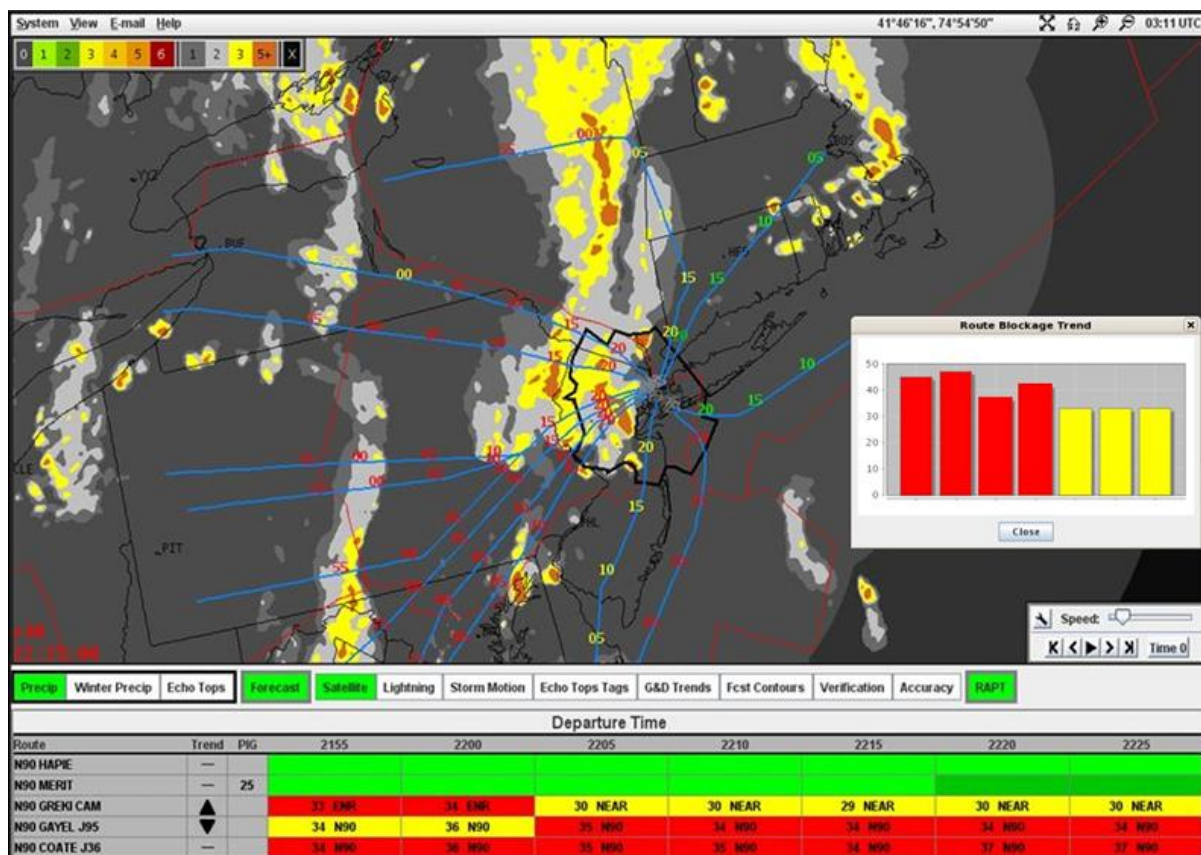
3. *Надеждна информация или препоръка.* Както беше обсъдено в раздела по-горе, надеждността на системата е от решаващо значение за способността на потребителя да развие доверие в системата. Надеждността при множество обстоятелства трябва да бъде оценена преди внедряването на системата.

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. Проектантите трябва да предоставят не само надеждността и техническата компетентност на информацията или препоръката при различни обстоятелства, но и обратна връзка за производителността на системата, след като препоръката е била или не е била внедрена.

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. Въпреки че съществува баланс между информационното претоварване и липсата на информация, някои проучвания показват, че предоставянето на информация за обосновката на препоръката за подпомагане на вземането на решения, позволява на потребителя по-добре да разбере системата за подпомагане на вземането на решения и подобрява доверието в системата.

Инструмента за планиране на наличността на маршрути, показан на Фигура 2.9, е инструмент, който помага на ръководителите на въздушното движение да определят дали маршрутите за заминаване от летищата са блокирани от времето. Системата също така им помага да идентифицират алтернативни маршрути за заминаване, които не са блокирани. Предоставя насоки за подпомагане на вземането на решения на ръководителите на въздушното движение, като присвоява цвят на състоянието – „червен“ (блокиран), „жълт“ (повлиян), „тъмнозелен“ (незначително време) или „зелен“ (чист) – на всеки маршрут за времената на заминаване в петминутни интервали до 30 минути. Източниците на несигурност в този инструмент произтичат не само от предвидимостта на времето, но и от способността да се определи дали пилотите ще летят през различните

видове метеорологични условия. Когато се обмисля нивото на блокиране от времето, което да се присвои на всяка цветова препоръка, възникват въпроси, свързани с доверието в алгоритмите [77].

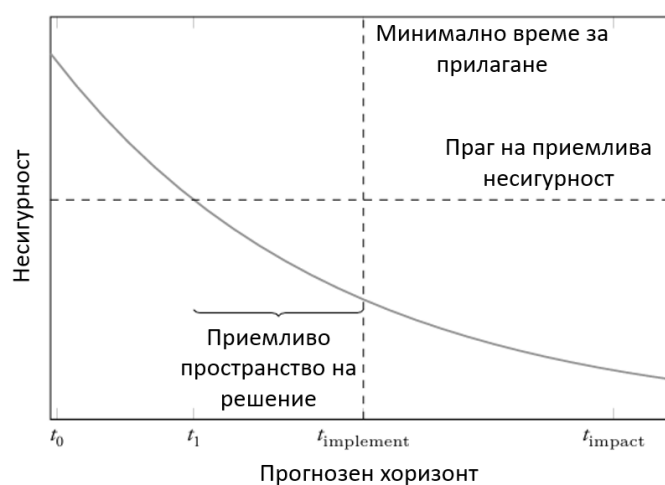


Фигура 2.9 Инструмент за планиране на наличността на маршрути, използван в управлението на въздушното движение

Проблеми могат да възникнат, когато системата за подпомагане на вземането на решения предоставя подвеждаща информация или лоши препоръки. Между интерпретирането на несигурната информация и неочакваните сложности на реалните ситуации, никоя система за подпомагане на вземането на решения не може да бъде правилна през цялото време. В този момент е изключително важно другият член на системния екип – човекът потребител – да поддържа функционирането на цялостната система. По време на целия процес на проектиране е наложително проектантите на системи за подпомагане на вземането на решения да вземат предвид ролята на човека в системата.

При някои решения, лицето вземащо решения разполага с часове или дори дни, за да събере информация и след това да действа. Несигурността на предоставената информация може да се промени драстично в рамките на времето за вземане на решения.

Изборът на променлива за прогнозиране е важен елемент от проблема. За да използва прогнозната информация ефективно, лицето вземащо решенията трябва да разбере поведението на прогнозата и нейното качество през прогнозния хоризонт. Фигура 2.10 показва условна крива на характеристиките на прогнозата и взаимодействието между несигурността на прогнозата, прогнозния хоризонт, приемливия риск и хоризонта на изпълнение за стратегия за справяне с прогнозните въздействия във времеви момент на въздействие. Времето, в което се прогнозира въздействието, е t_{impact} . Последният момент, в който действие или стратегия може да бъде изпълнено за постигане на ефект t_{impact} е $t_{implement}$.



Фигура 2.10 Промяна на условната несигурност през прогнозния хоризонт

Ако съществува значителен риск грешката в прогнозата да доведе до грешно решение (т.е. несигурността е по-голяма за едно решение в даден момент от прогнозния хоризонт), тогава е необходимо допълнително характеризиране на прогнозното поведение. Оценката на риска зависи от цената на възстановяването от лошо решение.

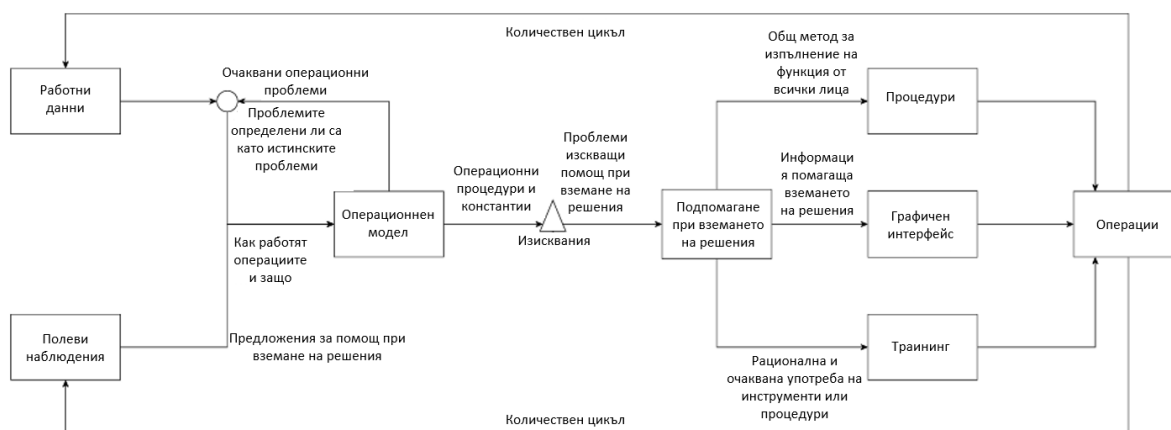
На Фигура 2.10, във времето t_0 , несигурността на прогнозата е твърде висока, за да предостави добра индикация за това кое решение да се вземе. Наклонът на кривата на несигурност обаче показва, че несигурността на прогнозата намалява бързо. Тъй като най-късният момент $t_{implement}$ е все още сравнително далеч, препоръчително е решението да се отложи. До момент t_1 несигурността е паднала до приемливо ниво и лицето вземащо решението, разполага с информацията за прогнозата и точността, необходими за вземане на решението. Лицето, вземащо решението, може да продължи да чака още малко, само за да бъде „изключително сигурно“, стига времето за изпълнение ($t_{implement}$) да не е достигнато.

Прагът на приемлива несигурност може да се промени в дадена операция в зависимост от контекста на ситуацията. За области от кривата, в които несигурността спада бързо, може да има голяма полза от изчакването, за да се гарантира, че решението е взето с прогноза с по-голям шанс да бъде правилна. Ако пространството за вземане на решения се намира върху област от кривата, в която наклонът е почти n_{lat} , тогава няма полза (и потенциално значителни разходи) от изчакването за вземане на това решение [78, 79].

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. Процедурите и подкрепата за вземане на решения за прогресивно вземане на решения трябва да отчитат бъдещите стратегически и тактически корекции (т.е. решенията, налични в различни точки през прогнозния хоризонт) и способността да се разпознават оперативно значими промени в прогнозите от времева стъпка до времева стъпка. Подобна концепция, наречена „интегрирано планиране“ във военната литература за вземане на решения, подчертава важността на преразглеждането на „концепция“ с „дизайн“, за да се смекчи потенциалната несигурност в ранните етапи на военното планиране [78, 79].

2.6. Системен поглед върху внедряването.

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



Фигура 2.11 Процес на развитие на системите

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.

Това изискване се основава на оперативен модел на цялата система, включително хората, операциите, процедурите и ограниченията. След като се определи нуждата от подпомагане на вземането на решения, изискването се превръща в проект на система 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.

Ключът към процеса на проектиране е да се гарантира, че системата за подпомагане на вземането на решения действително постига оперативни ползи и има въздействие.

Следователно, отговорност на проектанта е да се върне на терен и да оцени въздействието, което инструментът за подпомагане на вземането на решения има.

Този процес на измерване трябва да бъде както количествен, така и качествен по своята същност. От количествена страна, оперативните данни, които са резултат от подобреното вземане на решения, трябва да бъдат събрани.

В практиката, рядко първоначалното внедряване на системата за подпомагане на вземането на решения постига ползите, които е целяло да постигне. Една от причините системата за подпомагане на вземането на решения да не е била успешна е, че хипотезата на проектанта е била грешна и идентифицираният проблем не е бил действителният проблем. Събирането на оперативни данни може да помогне за коригирането на този проблем.

Значителна информация за полезността на системата за вземане на решения може също да бъде събрана от потребителите по време на използването. В оперативната среда потребителите могат директно да посочат защо подкрепата за вземане на решения помага или не.

Проблемите с разположението на подкрепата за вземане на решения, размера на шрифта и осветлението стават ясно изразени в оперативната среда. Ако тези основни нужди са удовлетворени, тогава потребителите могат да посочат по-фини проблеми, като например как предоставената информация не е точно това, от което се нуждаят, за да вземат решение, или че макар подкрепата за вземане на решения да е добра, този потребител изобщо не е лицето, вземащо решения.

Качествената обратна връзка може да се събере чрез анкети, официални интервюта или за предпочитане наблюдения на място на потребителите. Обратната връзка е полезна, когато потребителите предоставят индикации защо системата за подпомагане на вземането на решения не работи.

Качествената обратна връзка също така предоставя възможност на потребителите да предложат на проектантите свои собствени идеи за подпомагане на вземането на решения, което може да бъде изключително проникателно, когато произлиза от „суперпотребител“, който има широка перспектива за функционирането на системата.

Тъй като всяка оценка на системите за подпомагане на вземането на решения събира повече данни, както количествени, така и качествени, има възможност за по-добро разбиране на системата, в която системата за подпомагане на вземането на решения ще бъде внедрена.

Оперативният модел се актуализира с тази нова информация, което е от решаващо значение за подобряване на дизайна в бъдещи итерации [78, 79, 80].

Разглеждането на организационните въздействия върху потребителското поведение в дадена операция може да се превърне в силно развит оперативен модел за проектантите и това усилие може да доведе до по-добра подкрепа за вземане на решения [80, 81, 82, 83].

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

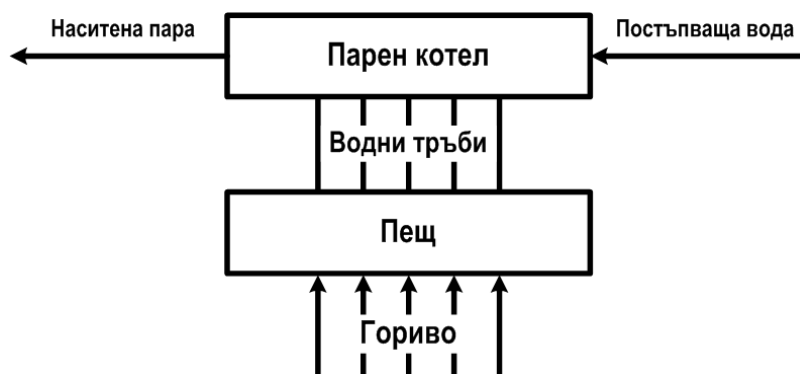
Съществена част от съвременните системи за автоматично управление осигуряват стабилна експлоатацията на технологични обекти в енергетиката. Такива обекти имат съществен дял в икономиката на всяка страна и са от стратегическо значение за националната сигурност на страната.

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.

Парогенераторът (парен котел) е съществена част от оборудването на една електроцентрала и основно представлява затворен съд, в който водата се загрява, докато се превърне в пара с необходимите параметри.

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 пещната 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. На Фигура 3.1. е представена схема на парогенератор.

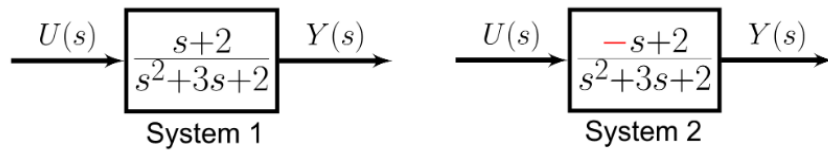


Фигура 3.1 Принципна схема на работата на парния котел

В работата на парогенератора се използва принципът на термосифона, при който разликата в плътностите между водата с по-ниска температура в дъното и тази с по-висока температура в горната част на котела обуславя циркулация. В тръбите водата преминава от еднофазно състояние към пароводна смес, която е свиваема. С увеличаване на подаваната топлина, съответно се увеличава и паропроизводството [84]. Като смущения в този процес (отразяващи се на нивото в барабана) могат да бъдат отчетени: налягането в барабана, зависещо от разхода на пара, разхода и температурата на питателната вода. При постоянно топлоподаване, налягането на парата се променя при промяна в натоварването на котела. Това води до промяна на нивото в барабана, поради разширяването или свиването на пароводната смес. 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.

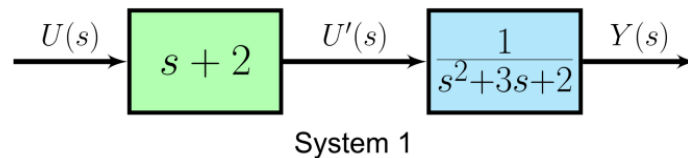
От теория на управлението е известно, че системите за управление с нули в дясната половина на комплексната равнина, принадлежат към клас системи, известни като неминимално фазови системи. Следователно, нулите също се наричат неминимално фазови нули. Изграждането на система за управление на такива неминимално фазови системи е предизвикателна задача поради допълнителното фазово забавяне, въведено от нулите. В същото време, управлението на такива неминимално фазови системи е важна задача, тъй като те намират приложение в множество реални технологични процеси [109].

Разглеждаме следния пример:



Фигура 3.2 Предавателни функции на минимално и неминимално фазов обект

Това са две системи за управление с еднакви полюси, но с различни нули. Система 1 има нула $s=-2$, а система 2 има нула $s=2$. Да разделим система 1 (Фигура 3.3) на две части – на част с нули и на част с полюси [109].



Фигура 3.3 Система 1

Нека наречем изхода на системата с нули $U'(s)$. Анализираме предавателната функция на системата с нули [109] и получаваме:

$$\frac{U'(s)}{U(s)} = s + 2 \quad (3.1)$$

$$\rightarrow U'(s) = (s + 2)U(s) \quad (3.2)$$

$$L^{-1}\{U'(s)\} = L^{-1}\{(s + 2)U(s)\} \quad (3.3)$$

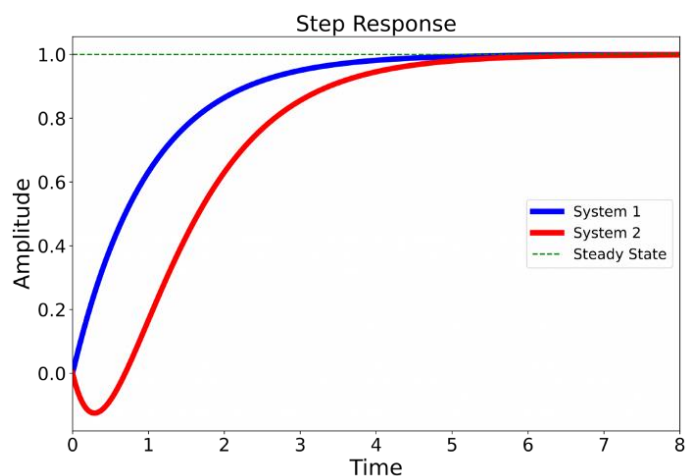
$$\rightarrow u'(t) = \frac{d}{dt}u(t) + 2u(t) \quad (3.4)$$

Прилагайки същата процедура за система 2 и получаваме:

$$u'_{\text{System 2}}(t) = -\frac{d}{dt}u(t) + 2u(t) \quad (3.5)$$

Единствената разлика е отрицателната производна в резултантния израз. Тази отрицателна производна е причина преходната характеристика на система 2 да има отрицателна част в началото, както е представено на Фигура 3.4 [109]. Това е проблем при регулирането, защото при промяна на заданието за ниво, което ще изиска промяна

на разхода на вода или при промяна на разхода на пара, нивото ще се промени в обратна на очакваната посока, което ще доведе до неадекватна реакция на регулатора [109].



Фигура 3.4 Преходни характеристика на Система 1 и Система 2

За да се добие представа за работата на реален технологичен обект, тук ще бъдат представени различните видове парогенератори. Основните видове котли са: водотръбни и газотръбни котли. В газотръбните котли има тръби, през които преминават горещи газове, а водата заобикаля тези тръби. Водотръбният котел е с обратна конструкция на газотръбния. В този случай водата преминава през тръбите, а горещите газове около тях. Това са основните два вида котли, но всеки от видовете може да бъде разделен на много подвидове.

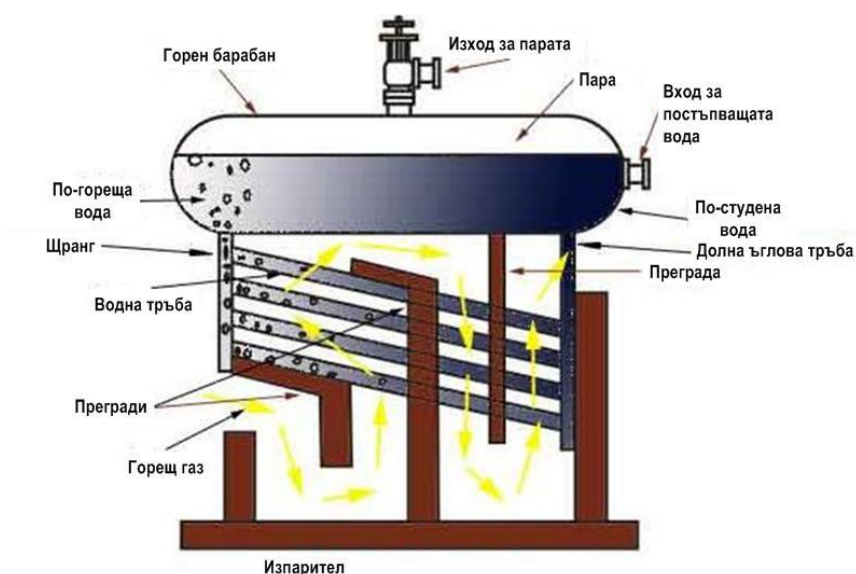
Както беше споменато, газотръбният котел се състои от множество тръби, през които преминават горещите газове. Тези тръби са потопени във вода, в затворен съд, загряват водата и я превръщат в пара, която остава в същия съд. Тъй като водата и парата са в един и същ съд, газотръбният котел не може да произвежда пара с много високо налягане [84, 86].

В газотръбните котли горивото се изгаря в пещна камера. След това горещите газове, преминават през топлообменни тръби. Тръбите са потопени във вода вътре в основния съд на котела. Тъй като горещите газове преминават през тези тръби, топлинната енергия на газовете се пренася във водата, която ги заобикаля. В резултат парата се разтваря във водата и излиза на повърхността в същия съд. След това тази пара се извежда от парния изход за последваща утилизация. Водата се подава в котела през входа за питателна вода. Тъй като парата и водата се съхраняват в един и същи съд, е

доста трудно да се получи пара с много високо налягане. Общият максимален капацитет на този тип котел е $17,5 \text{ kg/cm}^2$ и с капацитет от 9 метрични тона пара на час.

Предимствата на този тип котел са, че е достатъчно компактен като конструкция, бърз по задание за пара и достатъчно евтин. Недостатъците му са свързани с невъзможност за производство на пара с много високи параметри.

Водотръбният котел е такъв вид котел, при който водата се загрева вътре в тръбите и горещите газове ги заобикалят. Състои се от два барабана: горен барабан (парен барабан) и долен барабан. Тези два барабани са свързани с така наречените водоспусни тръби. Водата в долния барабан и в свързаните към него тръби се нагрява и в тях се образува пара, която естествено се издига към горния барабан. В горния барабан парата се отделя от водата и се съхранява над водната повърхност. По-студената вода се подава от входа за питателна вода в горния барабан и тъй като тази вода е по-тежка от водата в долния барабан и тази в тръбите, тя изтласква по-горещата вода нагоре. Така в котелната система има един конвективен поток (Фигура 3.5) [85].



Фигура 3.5 Схема на водотръбен котел

Произвежда се все повече и повече пара, налягането на затворената система се увеличава, което възпрепятства този конвективен поток от вода и следователно скоростта на производството на пара става пропорционално по-бавно. Отново, ако парата се отвежда през изхода за пара, налягането в системата пада и следователно конвекционният поток на водата става по-бърз, което води до по-голяма скорост на

производството на пара. По този начин водотръбният котел може да контролира собственото си налягане. Следователно този тип котел е самоконтролиращ се.

Водотръбният котел има много предимства, така че тези видове котли се използват по същество в големи ТЕЦ-ове. Те разполагат с по-голяма нагревателна повърхност, чрез използване на повече на брой водни тръби. Поради конвекционния поток движението на водата е много по-бързо от това на газотръбения котел, следователно скоростта на топлопреминаване е висока, което води до по-висока ефективност. Безпроблемно може да се получи много високо налягане от порядъка на 180 kg/cm^2 .

Основният недостатък на водотръбния котел е, че той не е компактен като конструкция и не е евтин като съоръжение.

Процентът на общата топлина, изнесена от изходящата пара в общата топлина, доставена от горивото (въглищата), се нарича ефективност на парния котел. Ефективността на използвания парен котел зависи от размера му. Типичната ефективност на парния котел е от 85% до 95%. Всъщност има някои загуби като непълно изгаряне, лъчиста загуба възникваща от заобикалящата стена на парния котел, дефектен горивен газ и други [86, 90].

Основните конструктивни части на водотръбния котел са паров барабан и водоспусни тръби. Функциите на паровия барабан в парния котел са:

- Да съхранява водата и парата достатъчно, за да отговори на различните изисквания на натоварването (акумулиращата способност, зависи от размера);
- Да осигури налягане и по този начин да подпомогне естествената циркулация на водата през водните тръби;
- Да подпомогне химическите обработки за отстраняване на разтворения O_2 , силикати и други, както и поддържане на необходимото рН;
- За отделяне на парата от пароводната смес.

Парата трябва да се отдели от сместа преди да напусне барабана, защото:

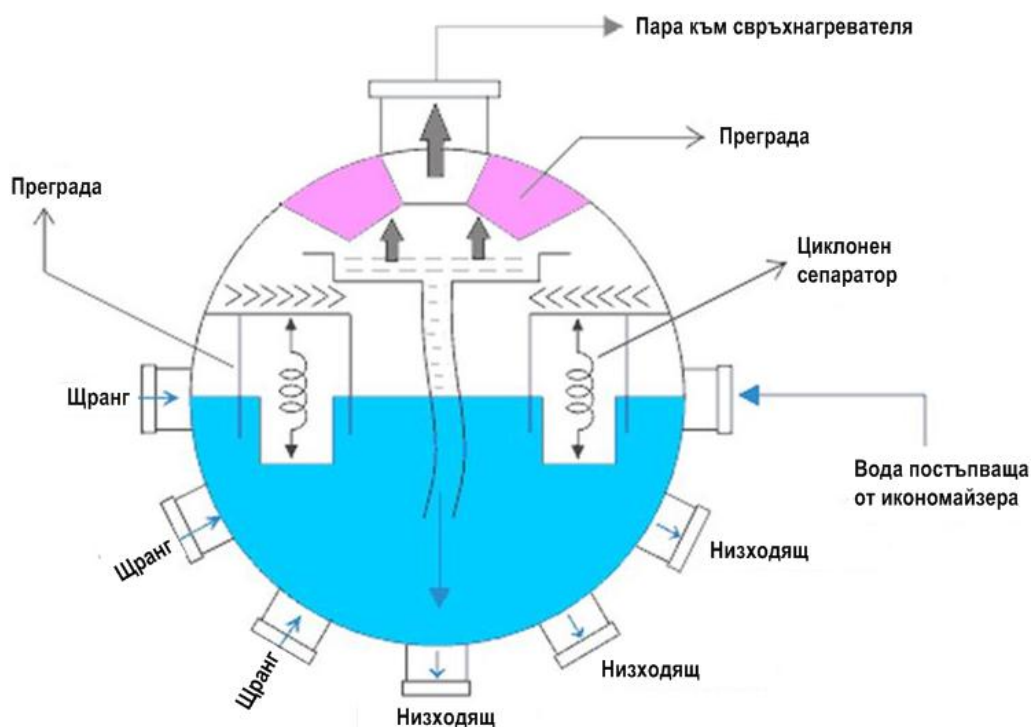
- Всяка влага, пренасяна с парата, съдържа разтворени соли. В паропрегревателите водата се изпарява и солите остават отложени върху вътрешната

повърхност на тръбите, образувайки котлен камък, което намалява живота на прегревателя;

- Някои от примесите във влагата (като изпарен силициев двуокис) могат да причинят отлагания по лопатките на турбината.

Една от важните функции на барабана за пара е да отделя парата от пароводната смес. При ниско налягане (под 20 бара) се използва просто гравитационно разделяне. При метода на гравитационното разделяне, водните частици се отделят от парата поради по-високата им плътност. С увеличаване на налягането в барабана на котела, парата се компресира и плътността на парата се увеличава. Следователно разликата между плътностите на парата и водата намалява, така че гравитационното разделяне е неуспешно. В парния барабан на котлите с високо налягане има някои механични устройства (известни като „вътрешни барабани“ или „противогрунтови устройства“) за отделяне на парата от водата. Следващата Фигура 3.6 илюстрира тези устройства, използвани в ТЕЦ [85].

„Преградите“ на Фигура 3.6 са сепаратори, които отделят сухата пара от пароводната смес и осигуряват направляван път за сухата пара. В „циклонния сепаратор“ двуфазната смес от пара и вода се оставя да се движи по винтова траектория и поради наличието на центробежните сили водните частици се отделят.



Фигура 3.6 Схема на парния барабан на водотръбен котел

Малките лопатки в циклонния сепаратор събират отложените частици вода. В „чистача“, двуфазната смес се оставя да се движи по зигзагообразна траектория и осигурява крайния етап на сушене на парата. След почистването ѝ, парата се оставя да се насочи към прегряване през перфориран екран.

Двойката низходящи и възходящи тръби е известна като изпарител. Фазовия преход от вода в пара се осъществява в изпарителя.

А. Низходящи водни тръби. Както подсказва името, тръбите за вода надолу са тези, през които водата се спуска от парния барабан към долния барабан. В тези тръби тече само вода, а не пароводна смес. В противен случай се намалява разлика в плътността, което води до забавяне на естествената циркулация.

Б. Възходящи водни тръби. Това са тръби, през които двуфазната смес от вода и водна пара с температура на насищане се издига от долния барабан към горния барабан. Тези тръби са монтирани в пещната камера, за разлика от низходящите тръби [85, 86, 91].

Нагревателите могат да използват всяко едно гориво или комбинация от горива, включително отпадъчни газове от рафиниране на петрол, природен газ, мазут и прахообразни въглища [86, 87].

Осигуряването на захранваща вода е важна част от производството на пара. За поддържане на постоянно ниво в парният барабан, разхода на питателна вода трябва да е равен на разхода на генерираната пара. Водата, използвана за генериране на пара, не трябва да съдържа замърсители, включително минерали и разтворени примеси, които могат да повредят системата или да повлияят на нейната работа. Суспензията от материали като наноси, нечистотии и масло, които образуват котлен камък и утайки, трябва да бъдат коагулирани или филтрирани извън водата.

Разтворените газове, особено въглеродният двуокис и кислородът, причиняват корозия на котела и се отстраняват. Разтворените минерали, включително метални соли, калций, карбонати и други, които причиняват котлен камък, корозия и отлагания върху турбинните лопатки, се обработват с вар или калцинирана сода, за да се утаят. Рециклираната охлаждаща вода също трябва да бъде обработена [92].

Потенциално най-опасната операция при генерирането на пара е стартирането на котела. Запалима смес от газ и въздух може да се натрупа в резултат на изключване на

горелки. Това изисква предварителна вентилация на котела за осигуряване на безопасно запалване.

Ако захранващата вода свърши и част от тръбите останат сухи, те ще прегреят и ще се повредят. И обратно, излишната вода ще бъде пренесена в системата за разпределение на парата и ще повреди турбините/инсталациите. Питателната вода не трябва да съдържа замърсители, които биха могли да повлияят на работата в системата. Котлите имат системи за непрекъснато или периодично продухване, които отстраняват замърсения слой вода в парните барабани и ограничават натрупването на котлен камък, предпазвайки лопатките на турбините и тръбите за прегревателите [84].

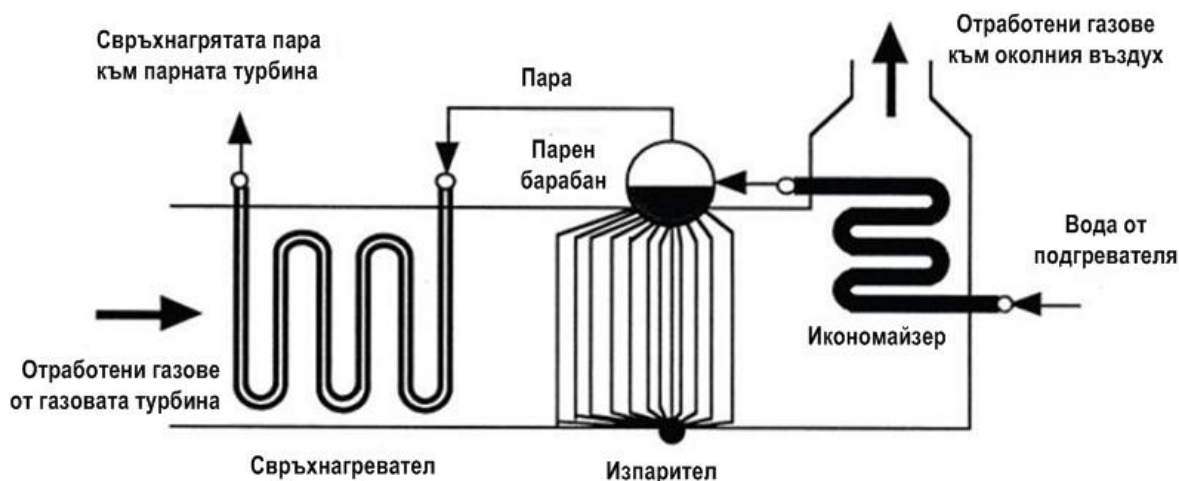
Трябва да се осигурят алтернативни източници на гориво в случай на загуба на основното поради спиране на подаването или авария [93].

В системата за питателна вода и парната верига на котела има различни компоненти. Някои от съществените компоненти на тези вериги са економайзер, барабани на котела, изпарител и паропрегревател.

Економайзерен етап: Водата от помпата към входа на барабана, се загрева предварително, за да се намали консумацията на енергия. Економайзерът е система, която се състои от водопроводни тръби, поставени на пътя на горивните газове след изпарителните тръби. Тръбите на економайзера са направени от стомана или чугун и са в състояние да издържат на висока температура и налягане. Економайзерът служи за подгряване на питателната вода, преди тя да влезе в барабана и изпарителя. Тъй като водата, подавана към изпарителя е с висока температура и температурната разлика не е висока, тръбите на изпарителя не се повреждат поради термичното равновесие.

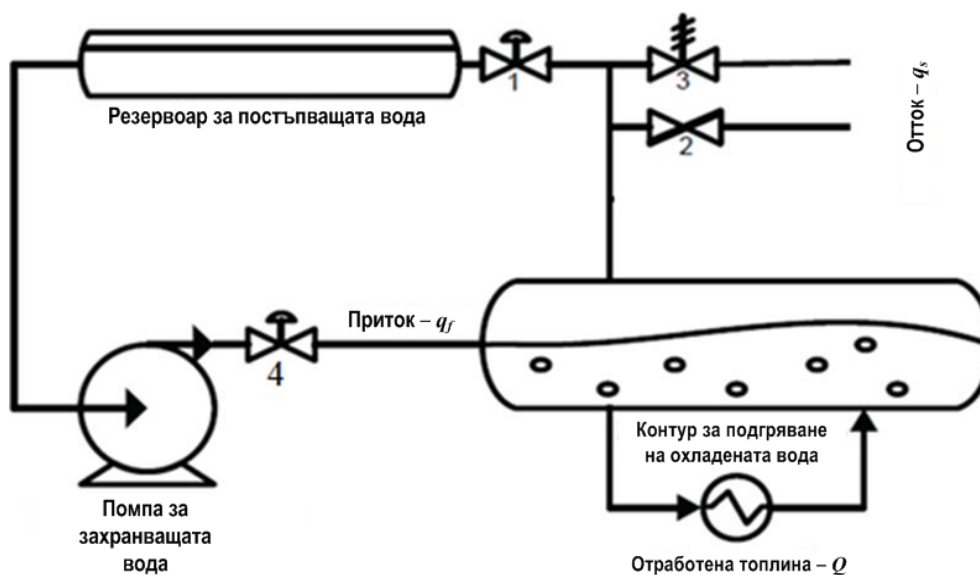
Изпарителен етап: Изпарителят е системата от водоспусни тръби свързващи долния и парния барабан, в които започва процеса на превръщане на водата в пара.

Прегревателен етап: След напускане на барабана, наситената пара се прегрява преди подаването ѝ към турбината. Теплообменниците, в които се осъществява този процес се наричат паропрегреватели и се намират в зоната с най-висока температура в котела. В паропрегревателите скоростта на поглъщане на топлината е по-голяма, затова в съвременните котли има няколко паропрегревателя. Тръбите на паропрегревателите са изложени на най-високото парно налягане и температура отвътре и максималната температура на газа отвън [84, 88, 89].



Фигура 3.7 Парогенератор за регенериране на топлината

Опростеният процес на паропроизводство в барабанен котел е илюстриран на Фигура 3.8. Разходът на питателна вода след помпата се регулира с помощта на един контролен клапан. Разходът на пара зависи от заданията за мощност на турбината или за налягане в колектора и по отношение на нивото в барабана е смущение.

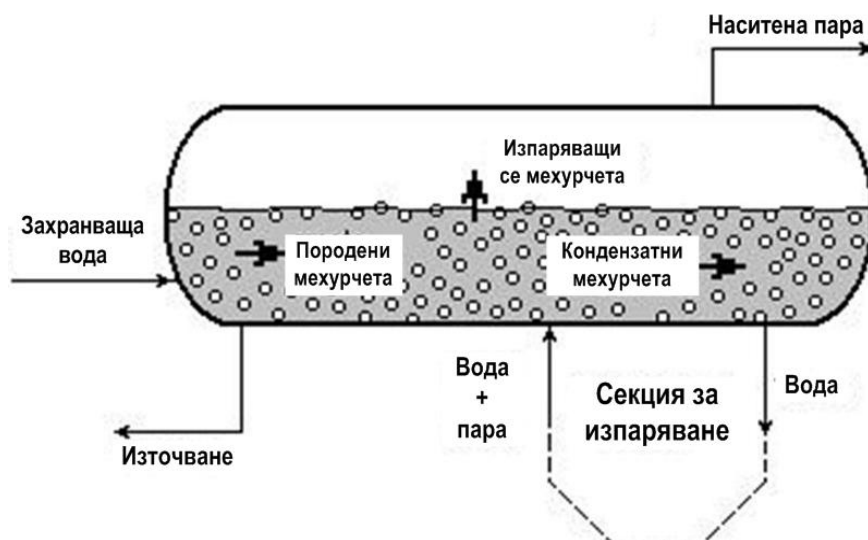


Фигура 3.8 Схема на процеса на генериране на пара

Регулиращият клапан на резервоара за вода регулира потока на водата от източника към резервоара за вода, както и потока на кондензна вода, отделена от барабана. Регулиращият клапан за пара контролира изходящия поток от наситена пара, генерирана в барабана към прегревателя. Клапанът 3 е поставен за защита от повреди (преливане на вода, свръхналягане). Клапанът 4 е контролен клапан за постъпващата вода, който контролира потока на водата към барабана.

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. От друга страна, ако има внезапно намаляване на разхода на пара, ще има временно понижаване на нивото в барабана (феномен на свиването). Подобно явление се случва и при промяна на разхода на питателната вода. За да се моделират тези явления, се приема, че във барабана непрекъснато съществуват три различни фази вода, пара и мехурчета, които трябва да се изучават поотделно (Фигура 3.9) [86].



Фигура 3.9 Схема на потоците в барабана

Фигура 3.10 илюстрира подробния процес на генериране на пара в барабана. Сложната му геометрия, броят на тръбите за изтичане и спускане и особено опитът за трифазно моделиране на потока, обикновено са доста сложни, изискващи използването на частни диференциални уравнения. В литературата се срещат редица изследователски резултати, които са посветени на разработването на относително прости физически модели [84, 85, 86, 87].



Фигура 3.10 Схема на циркуляционния цикъл

Тук се разглежда добре разработеният модел на Astrom-Bell [87]. Системата може да бъде описана, чрез нелинеен модел от 4-ти ред, при дефиниране на масовия поток и енергийния баланс с помощта на физически механизъм, въведен при следващите елементарни предположения.

Повечето части на системата ще бъдат в термично равновесие, поради техния пряк контакт с наситената смес от течност/пари. Съхранената в сместа енергия или се абсорбира, или се освобождава бързо, следвайки промените в налягането на барабана, което означава, че различните метални части на системата ще адаптират температурите си по същия начин [96, 97].

Уравнение (3.6) представя баланса на масата и енергията на барабана по отношение на дебита на захранващата вода q_f , дебита на парата q_s и дебита на топлината $\dot{Q}$ съответно. Той описва динамичното поведение на налягането в барабана, като изчислява свойствата на сместа течност/пара, използвайки таблици за парата. Кондензацията на парата в барабана определя връзката между налягането на барабана P и общия обем вода V_{wt} [98, 99].

$$d/dt(\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}) = q_f - q_s;$$

$$d/dt(\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - P V_{wt} + m_t c_p t_{sat}) = \dot{Q} + q_f h_{fw} - q_s h_s. \quad (3.6)$$

Съдържанието на пара в тръбите се определя с помощта на модел, който представлява енергийно масовия баланс, следствие от естествената циркулация в затворения контур в низходяща посока, както се вижда в уравнение (3.7). Масовата фракция на парата, за която се приема, че варира линейно от входа до изхода на тръбата, се характеризира от промените в скоростта на потока q_{dc} , тръбния поток q_r и скоростта на топлинния поток $\dot{Q}$ съответно [98].

$$\begin{aligned} d/dt [\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] &= q_{dc} - q_r; \\ d/dt [\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r - P V_r + m_r c_p t_{sat}] &= \dot{Q} + q_{dc} h_w - q_r (h_w + \alpha_r h_c). \end{aligned} \quad (3.7)$$

Емпиричното уравнение (3.8) определя баланса на масата на парните мехурчета под нивото на водата по отношение на кондензационния поток q_{cd} и потока на пара през повърхността на течността q_{sd} , задвижван от разликата в плътността на сместа и инерцията на потока q_r , влизащ през тръбите. Той може да улови по-голямата част от динамиката на процеса чрез правилно параметризиране на времето на престой на парата в барабана T_d , обема на парата на мехурчетата при хипотетична ситуация V_{sd}^0 и съответно емпиричния коефициент β [99, 100].

$$\begin{aligned} d/dt (\rho_s V_{sd}) &= \alpha_r q_r - q_{cd} - q_{sd}; \\ q_{sd} &= \rho_s T_d (V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \alpha_r \beta (q_{dc} - q_r). \end{aligned} \quad (3.8)$$

За да се получи модел на състоянието, избраните променливи на състоянието трябва да имат добра физическа интерпретация. Избира се налягането на барабана P , защото описва общата енергия на системата. Избира се натрупването на вода, свързано с общия обем вода V_{wt} в системата, защото представлява съхранението на масата. Избират се качеството на парата α_r в тръбите и обемът на парните мехурчета под нивото на течността V_{sd} , за да опишат разпределението на парата под водата, като по този начин се изчислява нивото. Полученият нелинеен модел на пространство на състоянията ще бъде система от 4-ти ред със следните състояния [100, 101]:

$$\begin{aligned} X = [& P - \text{налягането в барабана, } V_{wt} - \text{общият обем на водата,} \\ & \alpha_r - \text{качеството на парата, } V_{sd} - \text{обемът на мехурчетата пара}] \end{aligned}$$

Управляващите въздействия в модела са:

$$u = [q_f - \text{скоростта на потока напред, } q_s - \text{парният дебит}]$$

Параметрите q_f и q_s се манипулират, за да се контролира нивото и налягането на водата в барабана, съответно, докато скоростта на топлинния поток $\dot{Q}$ се разглежда по-скоро като смущение на входа на модела z поради факта, че неговото количество е свързано с отработената топлина на газовата турбина, която съответства на електрическата ѝ изходна мощност. Дебитът на топлинния поток се превръща в контролна променлива в ТЕЦ-овете, защото може да се регулира пряко чрез натоварването на котела [100, 101].

Решаването на диференциалните уравнения на масовия и енергийния баланс се извършва с цел, да се получат алгебричните уравнения на състоянието. Производните на функциите на сместа течност/пара по отношение на налягането в барабана се изчисляват, като се използват коефициентите e_{nm} [101].

$$dP/dt = e_{12}\dot{Q} + q_f(e_{12}h_{fw} - e_{22}) - q_s(e_{22} - e_{12}h_s)/e_{12}e_{21} - e_{11}e_{22}; \quad (3.9)$$

$$dV_{wt}/dt = 1/e_{12}[q_f - q_s - e_{11}^* dP/dt]; \quad (3.10)$$

$$d\alpha_r/dt = 1/e_{33}[\dot{Q} - \alpha_r h_c q_{dc} - e_{31}^* dP/dt]; \quad (3.11)$$

$$dV_{sd}/dt = 1/e_{44}[\rho_s T_d(V_{sd}^0 - V_{sd}) - qf^*(h_{fw} - h_w)/h_c - e_{41}^* dP/dt - e_{43}^* d\alpha_r/dt]. \quad (3.12)$$

Уравнения (3.9), (3.10) определят масата на сместа в барабана и енергийния баланс, уравнението (3.11) комбинира масата и енергийния баланс в затворения контур на низходящите тръби в едно уравнение, а уравнение (3.12) разглежда само масовия баланс на парните мехурчета под нивото на водата [101].

3.3. Управление на ниво на пароводна смес в парогенератор.

Автоматичното регулиране на ниво на течности обхваща разнообразни типове технологични апарати: резервоари и междинни съдове; топло и масообменни апарати, характеризиращи се със свободна повърхност между течната и газовата фаза: изпарителни, ректификационни, дестилационни, абсорбционни апарати; химични реактори и други. Със системите за автоматично регулиране на нивото се решават следните задачи:

1. Поддържа се материалният баланс в даден апарат. Всяко изменение на нивото е признак за материален дебаланс и ликвидирането му е основна задача на системите за регулиране на ниво. Тази функция е особено съществена за обекти, в които няма

достатъчно пълна система на измерване на параметрите на основните входни и изходни материални потоци и поради това нивото е един от основните косвени показатели за хода на технологичния процес.

2. В сложни технологични схеми, съставени от голям брой апарати с различно предназначение, се включват множество междинни резервоари. Управлението на производствения процес в такива системи е свързано с оптимизация и поддържане на нивото в тези междинни резервоари, представляващи буферни акумулатори на производствени запаси.

3. В редица случаи поддържането на постоянно ниво е определящо за хода на технологичния процес:

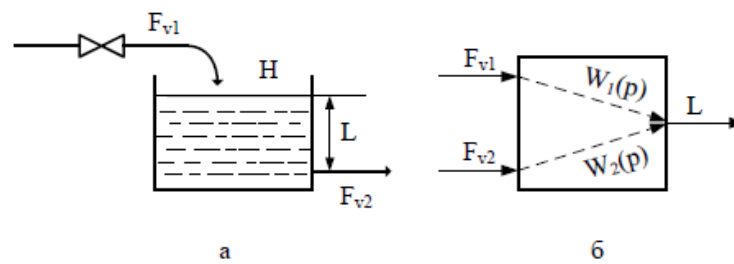
- в каскадно свързани химични реактори постоянството на нивото в началото на каскадата осигурява необходимото средно време на пребиваване и следователно качеството на получаваните реакционни продукти;
- поддържането на постоянно ниво на междуфазната граница в екстракционните колони е основно условие за достигане на желаната степен на разделяне на продуктите;
- нивото в стъкларските ванни пещи трябва да се поддържа постоянно, тъй като дори незначителни колебания на нивото водят до променлива дебелина на изделията, влошават се термичната и химичната еднородност на стъкломасата, което допълнително снижава качеството на изделията.

4. Системите за регулиране на ниво са основните, осигуряващи сигурност и безаварийност на съоръженията. Материалният баланс на резервоар с повърхност H и ниво L (Фигура 3.11) има вида [106, 107, 108]:

$$H \frac{dL}{dt} = F_{v1}(L, u_1) - F_{v2}(L, u_2) \quad (3.13)$$

където F_{v1} и F_{v2} са входният и изходният обемен разход. Регулиращите въздействия могат да бъдат, както по канала на входния (u_1), така и по изходния (u_2) поток.

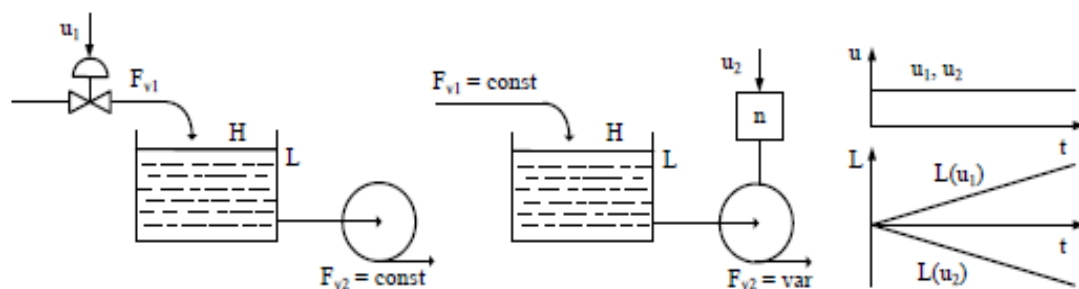
Входният F_{v1} и изходният F_{v2} разход могат да зависят или не от нивото L на течността в съда. От възможните четири комбинации са разгледани най-често срещаните се две, при които входният поток е независим от нивото L .



Фигура 3.11 Схема на резервоар

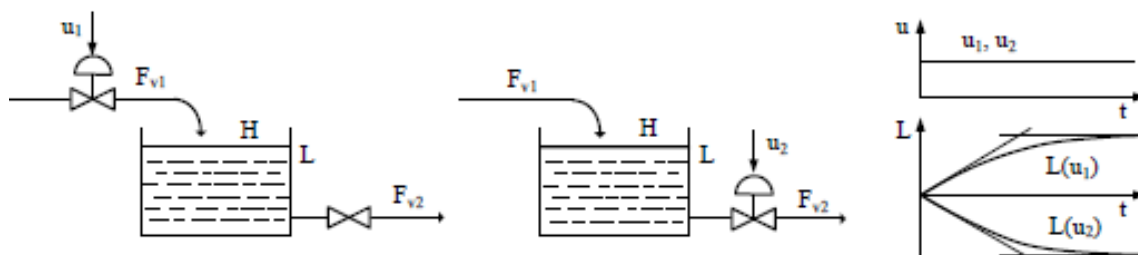
На Фигура 3.12 е показан случаят, в който резервоарът се изчерпва с помпа, дебитът на която не зависи от нивото L в резервоара. И при двете възможни регулиращи въздействия – u_1 е положение на входния регулиращ вентил и u_2 – обороти на помпата – резервоарът представлява интегриращо звено с предавателна функция [106, 107, 108]:

$$W_i(p) = \frac{1}{T_p}, \quad (i = 1, 2) \quad (3.14)$$



Фигура 3.12 Изчерпване на резервоар с помпа

На Фигура 3.13 е представен изходът на резервоара, като хидравлично съпротивление (регулирущ орган, тръбопровод, нерегулиращ вентил).

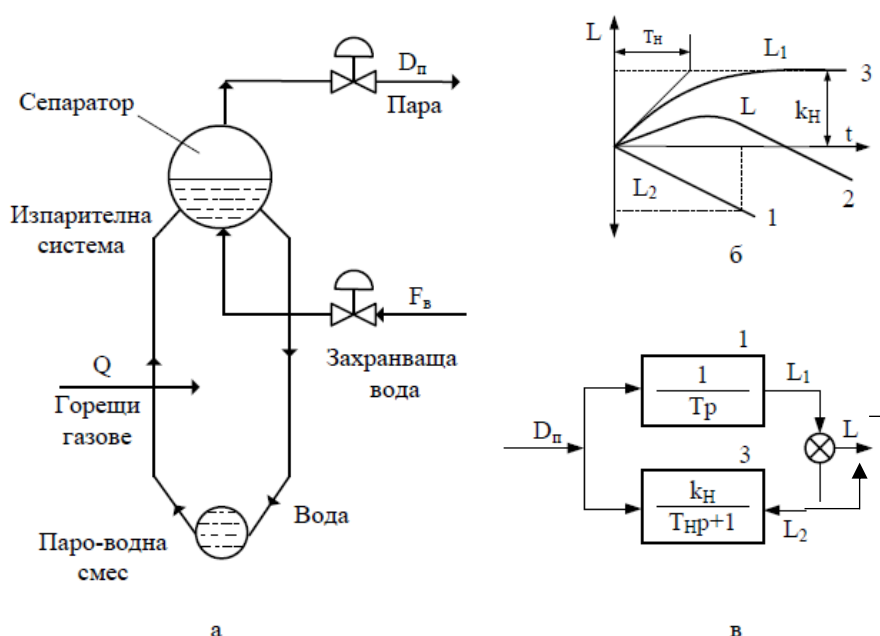


Фигура 3.13 Гравитационно източване на резервоар

Тук се отнася често срещаният се случай, в който резервоарът се източва гравитачно. Тогава разходът на изхода F_{v2} зависи от нивото и предавателната функция на резервоара и по двата канала има вид на апериодично звено [106, 107, 108]:

$$W_i(p) = \frac{k_i}{Tp+1} \quad (3.15)$$

Коефициентът на усилване k_i зависи от хидравличната характеристика на регулиращия орган. При двуфазни паротечностни системи поведението на нивото се усложнява. Така нивото в сепаратора на пара в котел утилизатор (Фигура 3.14) съществено се отличава от това при еднофазните системи (Фигура 3.12 и Фигура 3.13).



Фигура 3.14 Двуфазна система

На Фигура 3.14в е показано, че при смущение от увеличен разход на пара $D_p = D_p^0 + \Delta D_p$ и запазване на равновесния разход на захранваща вода $F_v = F_v^0 = D_p^0$ вместо нивото да се намалява по правата 1 на материалния дебаланс (аналогично на Фигура 3.13), то започва да се увеличава, достига максимум и едва тогава започва да следва кривата на дебаланса (крива 2).

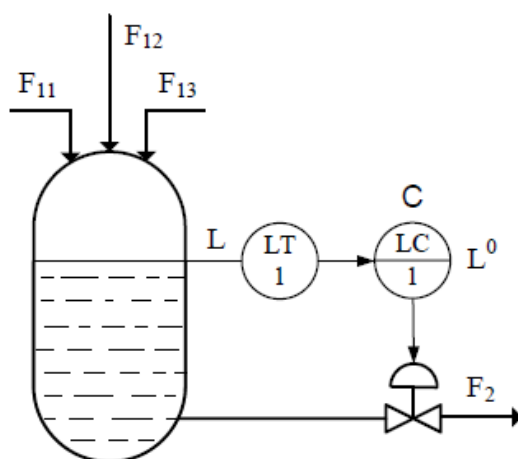
Увеличаването на нивото L се дължи на нарастването на обема на пароводната смес в изпарителната система и сепаратора, определящо се от вторичното парообразуване при намалено налягане, преди да се достигне ново фазово равновесие. Този процес приблизително се описва с модел на апериодично звено от първи ред с

параметри k_n и T_n (крива 3). Изменението на нивото поради материалния дебаланс е L_2 (крива 1) и се описва с интегриращо звено с времеконстанта T . Структурната схема на поведението на нивото е показана на Фигура 3.14в и съответства на неминималнофазово звено с предавателна функция:

$$W_i(p) = \frac{(k_n T - T) - 1}{T p (T_n p + 1)} \quad (3.16)$$

Специфични са динамичните характеристики на нивото при процесите на екстракция, където се формира фазова повърхност между течности с различно относително тегло. В случаите на течности, които при определени режими образуват устойчива емулсия (пяна), като в окислителни реактори, измерването на действителното ниво е сложен въпрос, което силно затруднява регулирането на нивото [106, 107, 108].

Задачата за регулиране на ниво се свежда до възстановяване на материалния дебаланс. Съгласно уравнение (3.13) тя може да се реши чрез изменение, както на входния, така и на изходния материален поток.



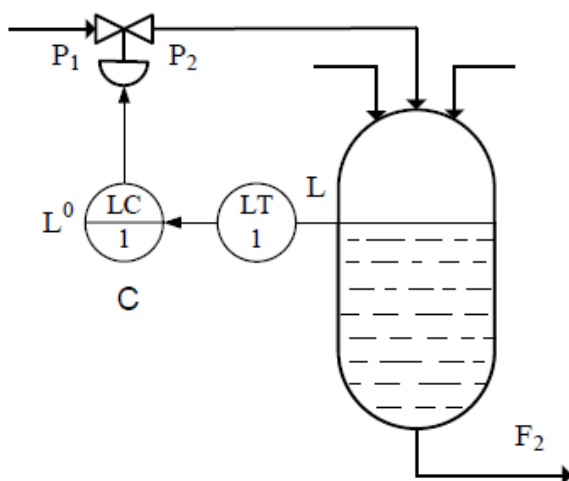
Фигура 3.15 Схема с регулиране на изходящия поток

Най-често се използва схема с регулиране на изходящия поток (Фигура 3.15). При тази схема колебанията на входните потоци F_{li} довеждат до изменение на F_2 . Тази схема се прилага, когато:

- допустимо е колебание на изходния поток, който попада в междинен съд или оказва слабо влияние върху режима на следващия технологичен апарат;
- нежелателно или невъзможно е да се изменя входният поток поради изискванията на режима на апарата, разположен преди разглеждания съд;

- при няколко входни потока със съизмерими разходи и твърде големи колебания на тези разходи.

В отделни случаи се използва схема с регулиращо въздействие – входният материален поток (Фигура 3.16). При тази схема разходът на изходния поток F_2 се стабилизира, но смущенията от регулиращото въздействие се прехвърлят в предхождащия апарат.

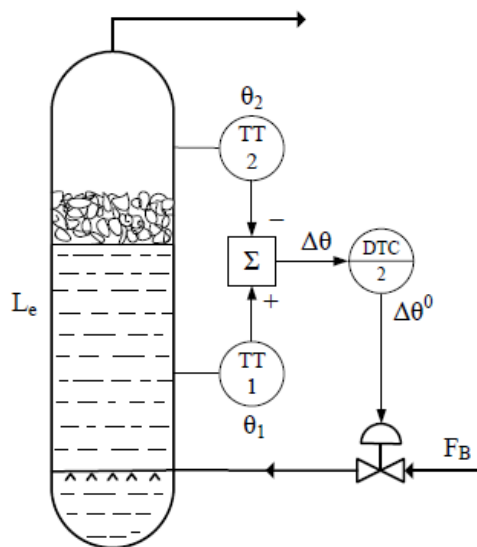


Фигура 3.16 Схема с регулиране на входния материален баланс

Схемата е целесъобразна при постоянно налягане P_1 на входния поток пред регулиращия клапан. При големи изменения на P_1 се налага стабилизиране на разхода по схема. В схемите от Фигура 3.15 и Фигура 3.16 се използват съвременни ПИД регулатори за ниво в разпределената система за управление. При невисоки изисквания за точност е възможно прилагане и на двупозиционни регулатори със зона на нечувствителност, равна на допустимия интервал на изменение на нивото.

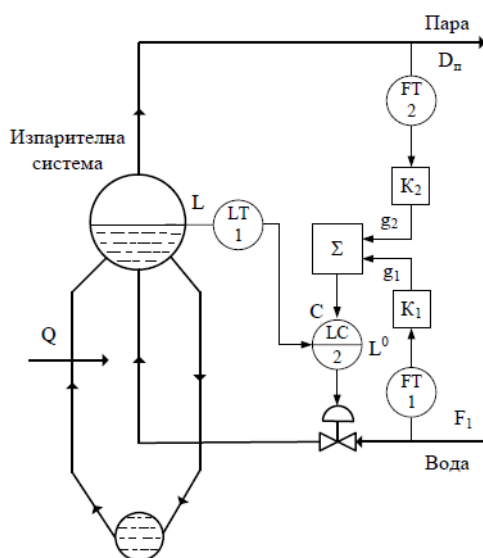
Схемата на Фигура 3.15 се прилага и в случаите, когато съдът изпълнява функциите на междинен буфериращ резервоар, който има за задача да изгладя колебанията в разходите на входа и изхода. В този случай обикновено разходът на изходния поток се стабилизира с регулатор на разход, който може да представлява от своя страна източник на смущения за нивото в съда. В този случай регулаторът на ниво се избира с малък коефициент на усилване и голямо време на интегриране. По този начин затворената система с цената на невисоко (и ненужно в случая) качество на регулиране на нивото става по-инерционна и придобива добри филтриращи свойства спрямо високочестотни смущения в разходите на материалните потоци.

Регулирането на нивото в обекти с по-сложни характеристики налага усложняване на основните схеми от Фигури 3.15 и 3.16.



Фигура 3.17 Схема за регулиране на ниво при наличие на пяна над течната повърхност

Регулирането на нивото при наличие на пяна над течната повърхност е свързано с големи затруднения. В схемата на Фигура 3.18 нивото се стабилизира от едноконтурна система, изменяща количеството продухващ 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 . По такъв начин информация за двете основни смущения постъпва в регулатора на ниво C , без закъснение и независимо от неблагоприятната „обратна“ реакция на нивото в сепаратора при изменение на консумацията на пара (Фигура 3.14б) системата на регулиране бързо възстановява материалния баланс при малки отклонения на нивото.

В повечето случаи нивото не създава сериозни проблеми за автоматичното му регулиране, но при определени обекти и условия на работа е целесъобразно да се отчита следното [106, 107, 108]:

- при интензивни смущения от материален дебаланс и турбулизация на течността в съда (кипене, барботаж) оптималните настройки на регулатора спрямо тестови стъпаловидни сигнали трябва да се изменят – коефициентът на усилване да се намали, а времето на интегриране да се увеличи;
- при опасност от кристализация на течността в регулиращия орган е целесъобразно да се увеличи колебателността на системата, като в отделни случаи може да се премине към двупозиционно регулиране за разрушаване на кристалите;
- при регулиране на ниво на течности с променлива плътност е необходимо да се внасят съответни корекции на заданието на регулатора, ако в схемата се прилага диференциален манометър;
- при твърде широк диапазон на измененията на разхода на флуида в апарата е целесъобразно да се използват два регулатора за ниво – един при малки разходи и друг при големи, като всеки регулатор въздейства върху отделен регулиращ орган, а координацията в работата им се осъществява от логическа схема;
- при особено интензивни смущения и високи изисквания за точност могат да се окажат ефективни нелинейни ПИД регулатори с променлив в зависимост от грешката на регулиране ε коефициент на усилване:

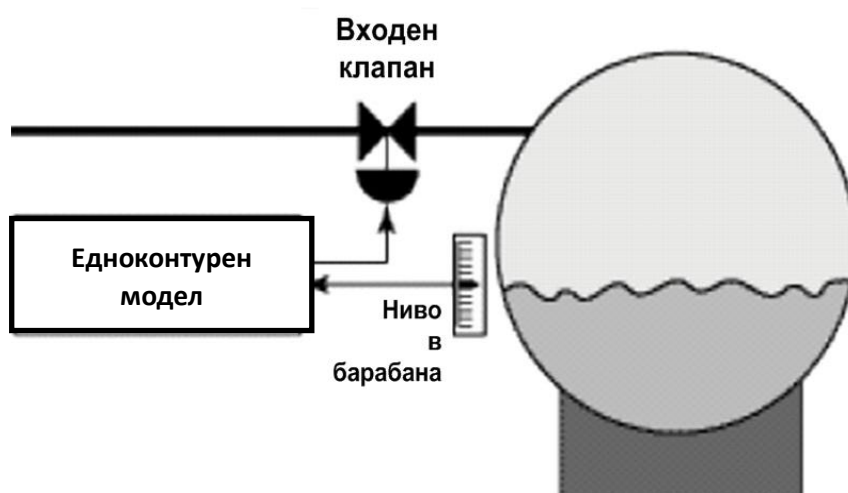
$$u(t) = k_{p0} [\beta + (1 - \beta)\varepsilon(t)] (-\varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \int \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt}) \quad (3.17)$$

където K_{p0} се определя от базовия режим, β е допълнителен параметър за настройка, $\beta \leq 1$, $\varepsilon = L^0 - L$ е грешка на регулиране на нивото L .

3.4. Управление на нивото в барабана на парогенератор.

В тази глава са описани три различни типа системи за управление на парогенератора, т.е. едноимпулсно, двуимпулсно и триимпулсно управление на нивото в барабана на котела. Обяснени са и различните ПИД (PID - Proportional, Integral, Derivative) и ПИД базирани регулатори, използвани за управлението. Представени са методите за настройка на ПИД регулатор, съответно на Zeigler Nichols и Tyreus Luyben, управление с вътрешен модел (IMC - Internal Model Control) и управление с размита логика (FLC - Fuzzy Logic Control) [87, 106].

Едноконтурното управление е най-простият метод за управление на нивото в барабана на котела. Този вид управление е най-неефективното. То изисква измерване на нивото на водата в барабана и управление на клапана за контрол на постъпващата вода. Препоръчва се главно за котли с най-прости изисквания, работещи при постоянен разход на пара. Измереното ниво се сравнява със зададена стойност и разликата се подава на регулатора, който изчислява управляващото въздействие. Това най-често е позицията или заданието за позиция на регулиращия питателен клапан. Фигура 3.19 показва схемата за едноконтурно управление на нивото на водата в барабана. В тази конфигурация се измерва само нивото на водата в барабана (оттук и терминът „едноимпулсно управление“).

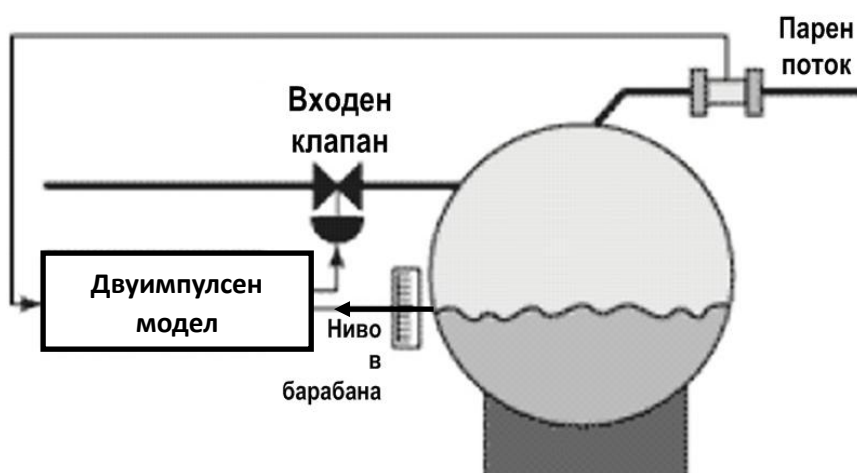


Фигура 3.19 Едноконтурно управление на нивото в барабана

Системата с компенсация на смущенията за управление на нивото в барабана е надстройка върху едноконтурната система за управление, когато постъпващата вода е с постоянно налягане. Тази схема включва измерване на нивото в барабана и разхода на пара.

Ниво: Измереното ниво се сравнява със зададена стойност и разликата се подава на регулатора, който изчислява управляващото въздействие. Това най-често е позицията или заданието за позиция на регулиращия питателен клапан.

Парен поток: Този сигнал за масовия поток се използва за коригиране на заданието за ниво, като по този начин незабавно променя разхода на питателната вода в зависимост от променения разход на пара, по този начин изпреварвайки промяната на нивото [102].

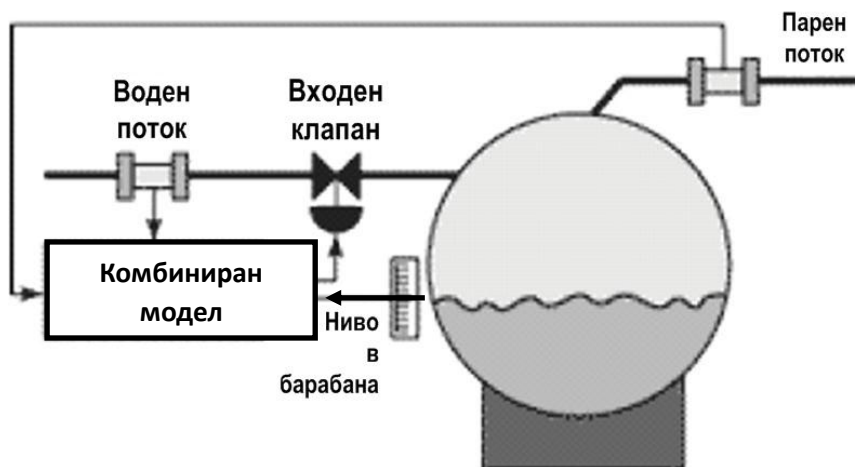


Фигура 3.20 Двуимпулсно управление на нивото в барабана

На Фигура 3.20 е представена схемата за двуимпулсното управление на нивото в барабана. Тази система е подходяща при промени в натоварването с умерена скорост. Може да се прилага за всякакъв размер на котлите.

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.



Фигура 3.21. Комбинирано управление на нивото в барабана

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].

Мнемониката ПИД се отнася за първите букви от имената на отделните компоненти, които съставят стандартния троен регулатор. Те са: П (P) – за пропорционалната съставяща, И (I) – за интегралната съставяща и Д (D) – за диференциалната съставяща на регулатора.

Конвенционалните ПИД регулатори са може би най-широко използваните в промишлеността. Дори сложните промишлени системи за управление могат да включват управляваща мрежа, чийто основен блок за управление е ПИД регулаторен модул. ПИД регулатора изчислява поотделно трите компоненти - пропорционалната, интегралната и диференциалната съставки [5]. Пропорционалната съставка определя реакцията на текущата грешка. Интегралната съставка е сумата от грешките във всеки изчислителен такт. Диференциалната съставка зависи от скоростта на изменение на грешката във всеки изчислителен такт.

Тук ще обсъдим различните методи за настройка на ПИД регулатор. Ziegler - Nichols и Tyreus - Luypen са два от основните методи за настройка на ПИД. Освен конвенционалния ПИД регулатор могат да бъдат използвани и схема за управление с вътрешен модел, еквивалентния на нея регулатор на Смит, размита логика и други [106, 107].

Метод на Ziegler - Nichols

Методът е въведен от John G. Ziegler и Nathaniel B. Nichols. При него коефициентите K_i и K_d първо се установяват на нула. Пропорционалният коефициент k_p се увеличава, докато достигне крайния коефициент на усилване k_u , при който изходът на контура започва да осцилира. Крайният коефициент на усилване k_u и осцилационният период T_u се използват за изчисляване на параметрите, както е показано в Таблица 3.1.

Таблица 3.1 Настройващи параметри за метода на Ziegler - Nichols

Регултор	k_p	K_i	K_d
P	$0.5k_u$	—	—
PI	$0.45k_u$	$1.2k_p/T_u$	—
PID	$0.6k_u$	$2k_p/T_u$	$k_pT_u/8$

Метод на Tyreus-Lubyen

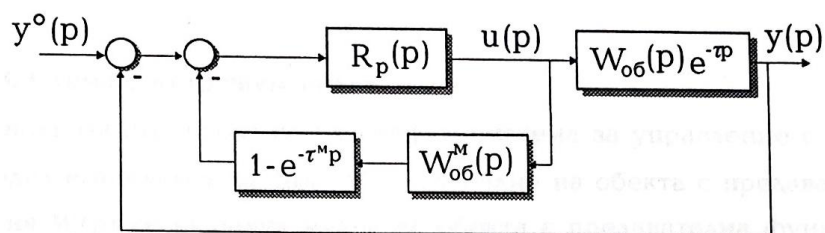
Методът е въведен от Tyreus-Lubyen. При този метод коефициентите K_i и K_d първо се приравняват на нула. Коефициентът на усилване k_p се увеличава, докато достигне крайния коефициент на усилване k_u , при който изходът на контура започва да осцилира. Крайният коефициент на усилване k_u и осцилационният период T_u се използват за изчисляване на параметрите, както е показано в Таблица 3.2 [88].

Таблица 3.2 Настройващи параметри за метода на Tyreus - Lubyen

Регултор	k_p	K_i	K_d
PI	$0.3125k_u$	$k_p/2.2T_u$	—
PID	$0.4545k_u$	$k_p/2.2T_u$	$k_pT_u/6.3$

Схема с регулатор на Смит

За обекти с относително голяма чисто закъснение $\tau/T = 0.5 - 0.7$ и режими на работа с честа промяна на заданието е подходящо използването на регулатора на Смит, чиято схема е показана на Фигура 3.22 [105, 107, 108].



Фигура 3.22 Схема на регулатор на Смит

Конвенционалният ПИ и ПИД регулатор се обхваща с обратна връзка, която включва модел на обекта без и с чисто закъснение:

$$W(p) = W_{об}^M(p) - W_{об}^M(p)e^{-p\tau_m} \quad (3.18)$$

Ако моделът е абсолютно точен, т. е. $W_{об}^M(p) = W_{об}(p)$ и $\tau_m = \tau$, предавателната функция на затворената система спрямо заданието има вида:

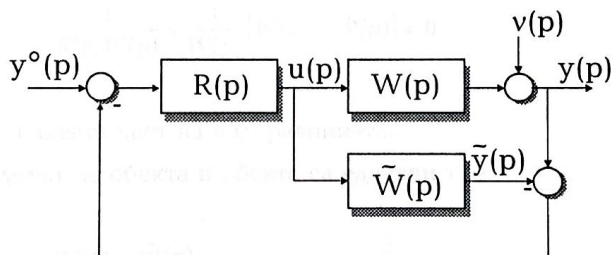
$$\Phi(p) = \frac{W_p(p)W_{об}(p)-1}{1+W_p(p)W_{об}(p)} e^{-p\tau} \quad (3.19)$$

По този начин чистото закъснение не участва в характеристичното уравнение на затворената система и устойчивостта и се определя само от свойствата на регулатора на обекта. Поради това типовият регулатор в схемата с екстраполатор на Смит може да има много голям коефициент на усилване. Ако в уравнение (3.19) се положи $W_p(p) \gg 1$, то предавателната функция на затворената система се превръща в звено с чисто закъснение [105, 107]:

$$\Phi(p) = e^{-p\tau} \quad (3.20)$$

Разбира се горната зависимост е свързана с генерирането на много мощни управляващи въздействия, което не винаги е физически реализуемо.

Схема с вътрешен модел



Фигура 3.23 Схема на едномерна система за управление с вътрешен модел

Основната структура на едномерна система за управление с вътрешен модел е показана на Фигура 3.23. Паралелно на обекта с предавателна функция $W(p)$ се включва модел на обекта с предавателна функция $\tilde{W}(p)$. Изходната величина на системата с вътрешен модел се получава от израза:

$$y(p) = W(p)u(p) \quad (3.21)$$

Регулиращото въздействие се получава в контур с обратна връзка и има следния вид:

$$u(p) = \frac{R(p)}{1+R(p)[W(p)-\tilde{W}(p)]} [y^o(p) - v(p)] \quad (3.22)$$

Регулируемата величина съгласно уравнение (3.22) ще бъде [105, 108]:

$$y(p) = \frac{R(p)}{1+R(p)[W(p)-\tilde{W}(p)]} [y^o(p) - v(p)] + v(p) \quad (3.23)$$

За да бъде системата с вътрешен модел устойчива е необходимо полюсите и на двете характеристични уравнения:

$$\frac{1}{R(p)} + [W(p) - \tilde{W}(p)] = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{1}{R(p)W(p)} + \frac{1}{\tilde{W}(p)} + [W(p) - \tilde{W}(p)] = 0 \quad (3.25)$$

да се намират в лявата част на полуравнината.

Ако моделът на обекта и обекта са еднакви, т.е. [108]:

$$W(p) = \tilde{W}(p), \quad (3.26)$$

Тогава характеристичното уравнение има вида:

$$\frac{1}{R(p)} = 0; \quad \frac{1}{R(p)W(p)} = 0; \quad (3.27)$$

Това налага, както обектът така и регулаторът да бъдат устойчиви.

Следователно системите за управление с вътрешен модел не могат да стабилизират неустойчив обект. Ако обектът е неустойчив, той трябва предварително да бъде стабилизирани, чрез локална обратна връзка и стандартен регулатор.

При условие, че обектът и моделът са идентични изходната величина ще бъде [106]:

$$y(p) = R(p)W(p)[y^o(p) - v(p)] + v(p) \quad (3.28)$$

Системата за регулиране ще бъде „идеална“, ако е изпълнено условието:

$$R(p) = W(p)^{-1} \quad (3.29)$$

Тогава изходната величина ще следи заданието без грешка – $y(p) = y^o(p)$.

Идеалният регулатор обикновено не може да бъде реализиран поради следните причини: обектът има чисто закъснение; редът на числителя се получава по-висок от реда на знаменателя; ако обектът е неминималнофазов неустойчивите нули се превръщат в неустойчиви полюси на регулатора.

За да бъде системата астатична, при подаване на единично стъпално въздействие на входа ѝ съгласно предната теорема е необходимо [105, 106, 108]:

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{R(p)W(p)}{1 + R(p)[W(p) - \tilde{W}(p)]} = 1 \quad (3.30)$$

Горното условие е вярно само, ако при $p \rightarrow 0$ е изпълнено следното:

$$1 - R(p)\tilde{W}(p) = 0 \quad (3.31)$$

или

$$R(p) = \tilde{W}(p)^{-1} \quad (3.32)$$

Тъй като регулаторът $R(p)$ трябва да бъде устойчив и физически реализуем вместо инверсията (горното уравнение) се използва следния подход:

$$\tilde{W}(p) = \tilde{W}_+(p)\tilde{W}(p)_- \quad (3.33)$$

където: $\tilde{W}_+(p)$ съдържа чистото закъснение и всички неустойчиви нули на предварителната функция, т. е. $\tilde{W}_+(p)$ съдържа всички неминималнофазови съставлящи на обекта $W(p)$, а $\tilde{W}(p)_-$ съдържа всички и полюси, които се намират в лявата полуравнина.

Коефициента на усилване на обекта при факторизацията се включва в $\tilde{W}(p)_-$. Към $\tilde{W}(p)_-^{-1}$ се добавят и филтър с предавателна функция [106]:

$$F(p) = \frac{1}{(T_F p + 1)^r} \quad (3.34)$$

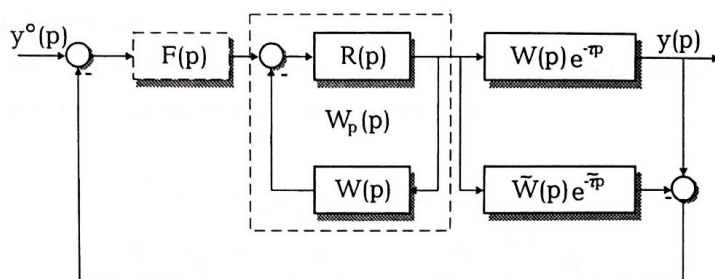
където r се подбира така, че регулатора $R(p)$ да е физически реализуем.

По такъв начин настройката на регулатора се свежда до определяне на реда на филтъра и настройване на време константата му [105, 107, 108].

$$T_F = 1 \div 0.8T_{об} \quad (3.35)$$

Връзка на системите с вътрешен модел с регулатора на Смит

Схемата от Фигура 3.22 може да се представи във форма на система с вътрешен модел. Това е показано на Фигура 3.24 [106, 107, 108].



Фигура 3.24 Регулатор на Смит представен във форма на система с вътрешен модел

Предавателната функция на регулатора има вида:

$$W_p(p) = F(p) \frac{R(p)}{1 + R(p)W(p)} \quad (3.36)$$

За предавателна функция в затворената система се получава [106, 108]:

$$\Phi(p) = \frac{W_p(p)W(p)e^{-p\tau}}{1 + W_p(p)[W(p)e^{-p\tau} - \bar{W}(p)e^{-p\tilde{\tau}}]} \quad (3.37)$$

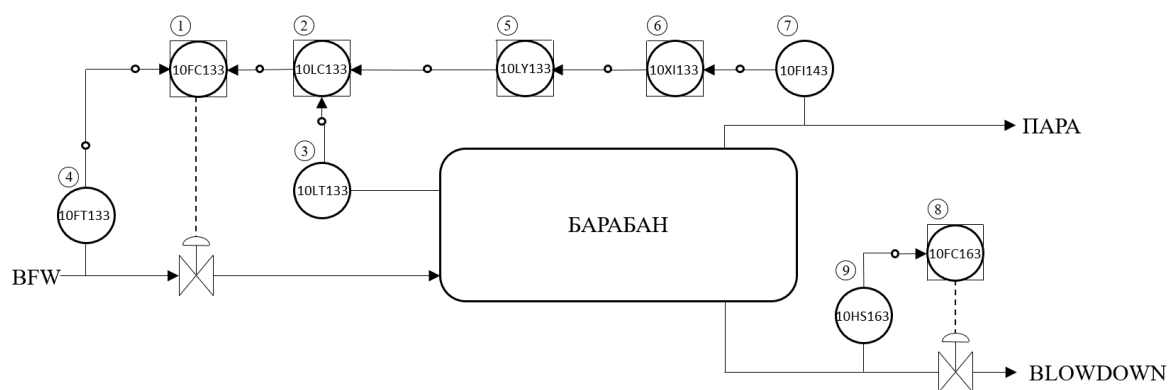
или при изпълнено условие $W(p) = \bar{W}(p)$:

$$\Phi(p) = F(p) \frac{R(p)W(p)}{1 + R(p)W(p)} e^{-p\tau}, \quad (3.38)$$

което е точно предавателната функция на регулатора на Смит.

3.5. Симулационно 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)

Този парогенератор е част от няколко работещи в паралел парогенератори свързани в общ колектор. Поддържа се налягане в колектора. Всеки котел има индивидуален регулатор топлинно натоварване, който получава задание за налягане в колектора от главен регулатор топлинно натоварване. Разходът на пара от котела се измерва чрез трансмитер 10-FI-143.

Захранващата вода на котела влиза в средата на барабана. Нивото на водата в барабана се следи от дублирани/резервирани трансмитери - 10-LT-731X и 10-LT-731Y, които са част от блокировката за ниско ниво в барабана и се управлява от регулатор 10-LC-133. Налягането в барабана се измерва от трансмитер 10-PT-731, който е и част от блокировката за високо налягане на пара в барабана.

Захранващата вода циркулира от дъното на барабана и се придвижва в тръбите на котела и обратно до върха на барабана към воден дифузер. Пара с водни капки се връща до нивото на течността в барабана. Парата постъпваща в горната част или в прегревателя, е наситена пара. Водата в дифузионната плоча (непрекъснати продувки) е прегрята и излиза от барабана към рефинерията. Температурата на изхода на прегревателя се следи от трансмитер 10-TI-941.

Захранващата вода за котела се подава от рефинерията. Както основните, така и спомагателните колектори на питателната вода са свързани към клапана регулиращ разхода на тази вода. Дебитът на захранващата вода в котела се измерва от трансмитера

10-FT-133. който е вход на регулатора 10-FC-133. Нивото на течността в барабана се измерва от 10-LC-133. Управлението на нивото в барабана е реализирано чрез триимпулсна схема за регулиране въздействаща върху захранващата вода.

Използваните сигнали са ниво в барабана, разход вода и разход пара. Регулаторът за нивото в барабана работи в каскаден режим, получавайки изпреварващ сигнал от разликата между разход пара и разход вода и е с обратно действие - грешката се изчислява не като разлика между задание и изпълнение, а като разлика между изпълнение и задание. В следващата таблица са представени имената на контролни модули реализирани в системата за управление на завода.

Таблица 3.3 Създадени контролни модули

<i>Контролен модул</i>	<i>Описание</i>	<i>Разрешени режими</i>	<i>Нормален режим</i>
10FC133	Разход на питателна вода	Auto/Manual/Cascade	Cascade
10LC133	Регулатор за ниво в барабана	Auto/Manual/Cascade	Cascade
10FC163A	Регулатор за непрекъснати продувки	Auto/Manual/Cascade	Auto

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.

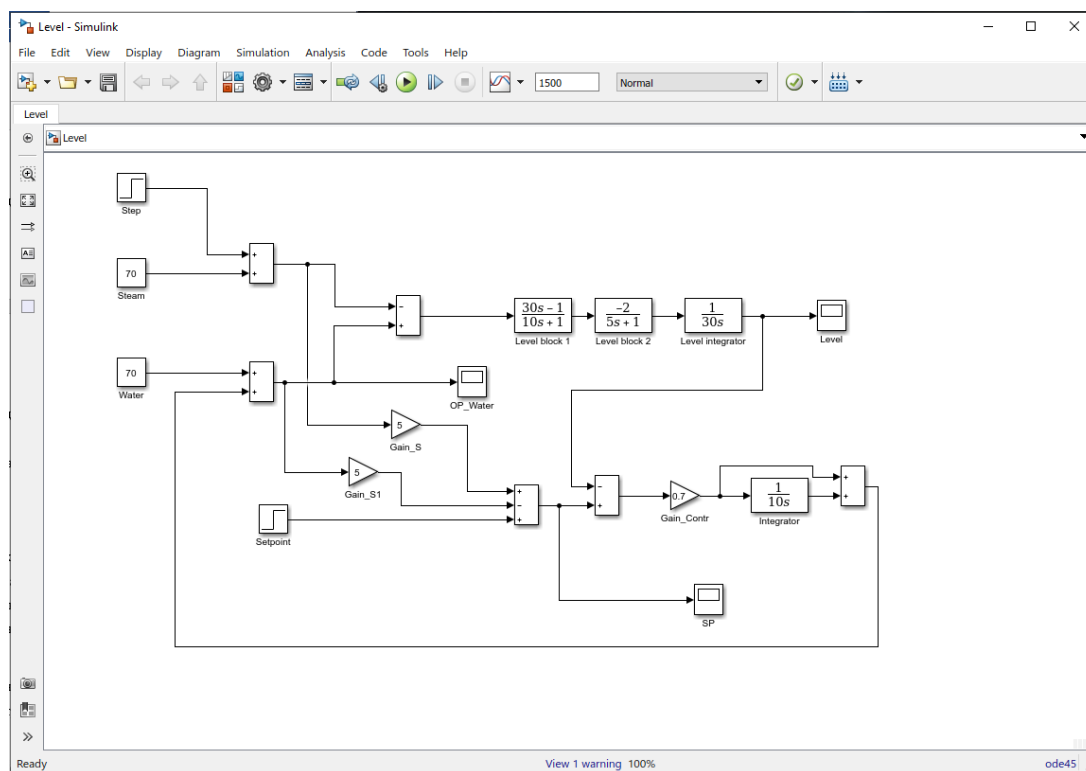
Имаме неминималнофазов обект със следната предавателна функция:

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

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.

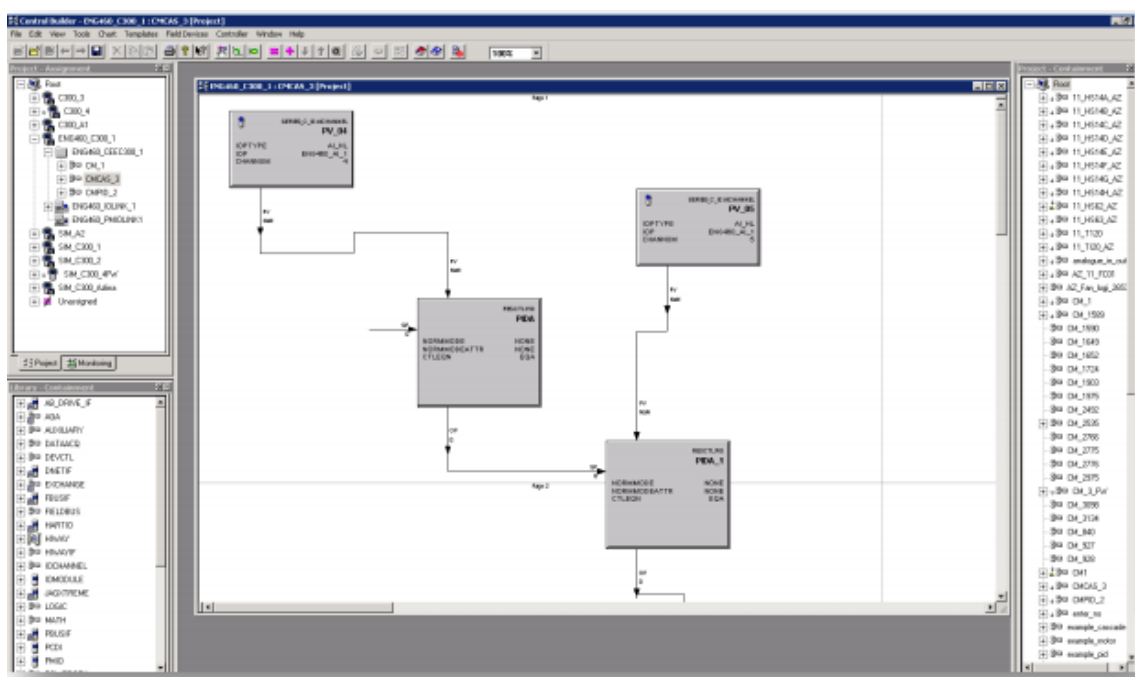
За компенсиране на набухването и свиването на нивото при промяна на разхода на пара или разхода на вода, към заданието се добавя разликата между разход пара и вода с тегловен коефициент, който е част от настройката на схемата за регулиране. Както беше разгледано в литературния обзор, при увеличаване 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.

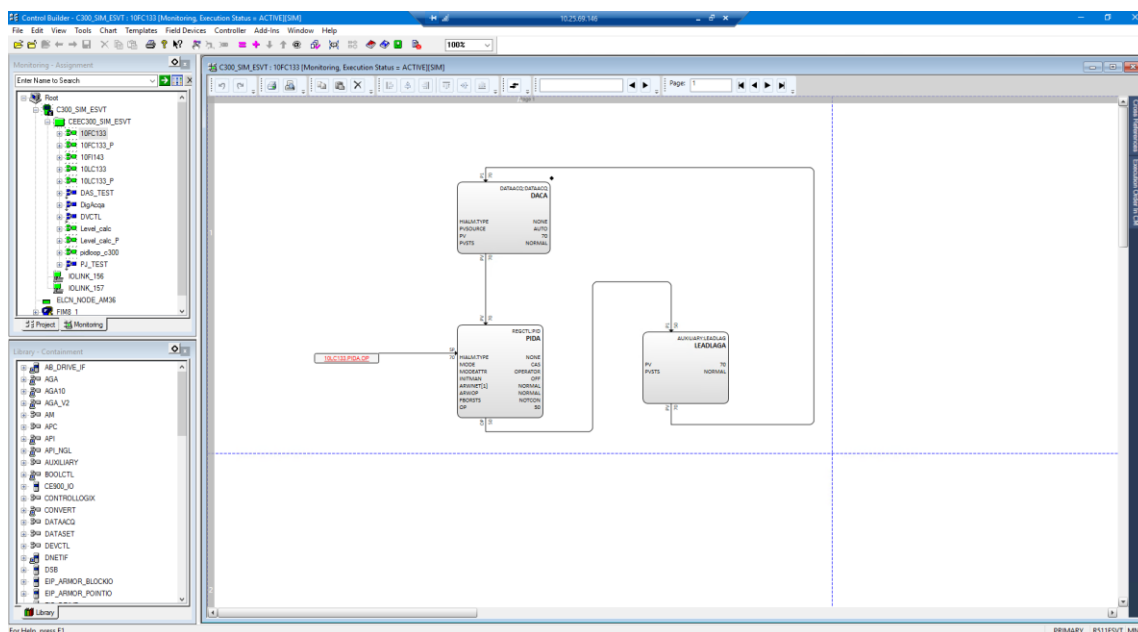


Фигура 3.26 Модел за регулиране на нивото в котел F-1011 (MATLAB Simulink)

Показаната схема за регулиране (Фигура 3.26) е изградена в системата за управление на Honeywell Experion Process Knowledge System (PKS), която е съвременна система за разпределено управление с интегрирана модерна платформа за автоматизация на процесите. Програмирането и конфигурирането на стратегиите за управление в системата се извършва, чрез софтуерния пакет Control Builder (Фигура 3.27). Той предоставя графичен интерфейс за изграждане на стратегии за управление на процеса.



Фигура 3.27 Control Builder



Фигура 3.28 Контролен модул 10FC133

ПИД блока предлага пет различни уравнения, като в този модел е избрано уравнение А:

Където, CV е изхода на ПИД регулатора в проценти, K е коефициент на усилване, L е обратна Лапласова трансформация, s е оператор на Лаплас, PVP е входна процесна стойност в проценти, SPP е зададена стойност в проценти, $T1$ е време на интегриране в минути, $T2$ е време на диференциране, $a=1/16$ е коефициент специфичен за уравнението на ПИД регулатора на Honeywell. При уравнение А пропорционалната, интегралната и диференциалната част действат върху грешката ($PV-SP$).

Control Builder - C300_SIM_ESVT : RALC133 [Monitoring, Execution Status: ACTIVE]SIM

File Edit View Tools Chart Templates Field Devices Controller Add-Ins Window Help

Monitoring - Assignment

Enter Name to Search

Root

- C300_SIM_ESVT
 - ELCN_NODE_AM06
 - FM06_1

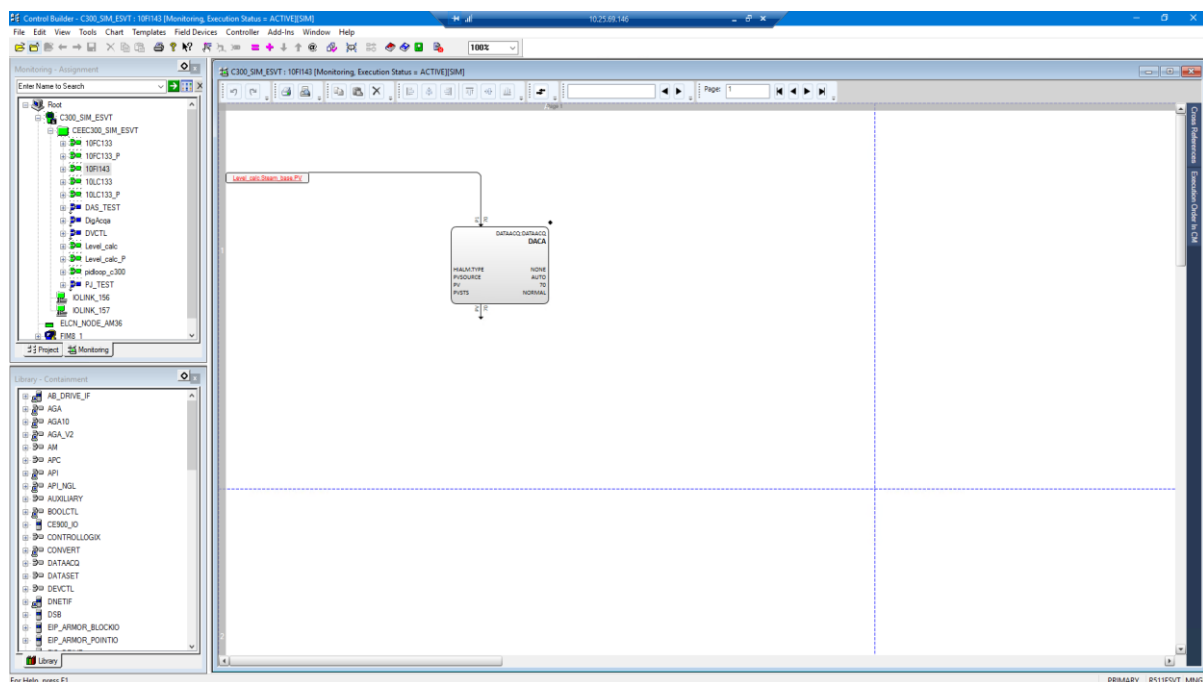
Library - Containment

- AB_DRIVE_IF
- AGA
- AGA10
- AGA_V2
- AM
- APC
- API
- APL_INGL
- AUXILIARY
- BOOCTL
- CE900_ID
- CONTROLLOGIK
- CONVERT
- DATACQ
- DATASET
- DEVCTL
- DNETIF
- DSB
- ESP_ARMOR_BLOCKIO
- ESP_ARMOR_POINTIO

For Help, access F1

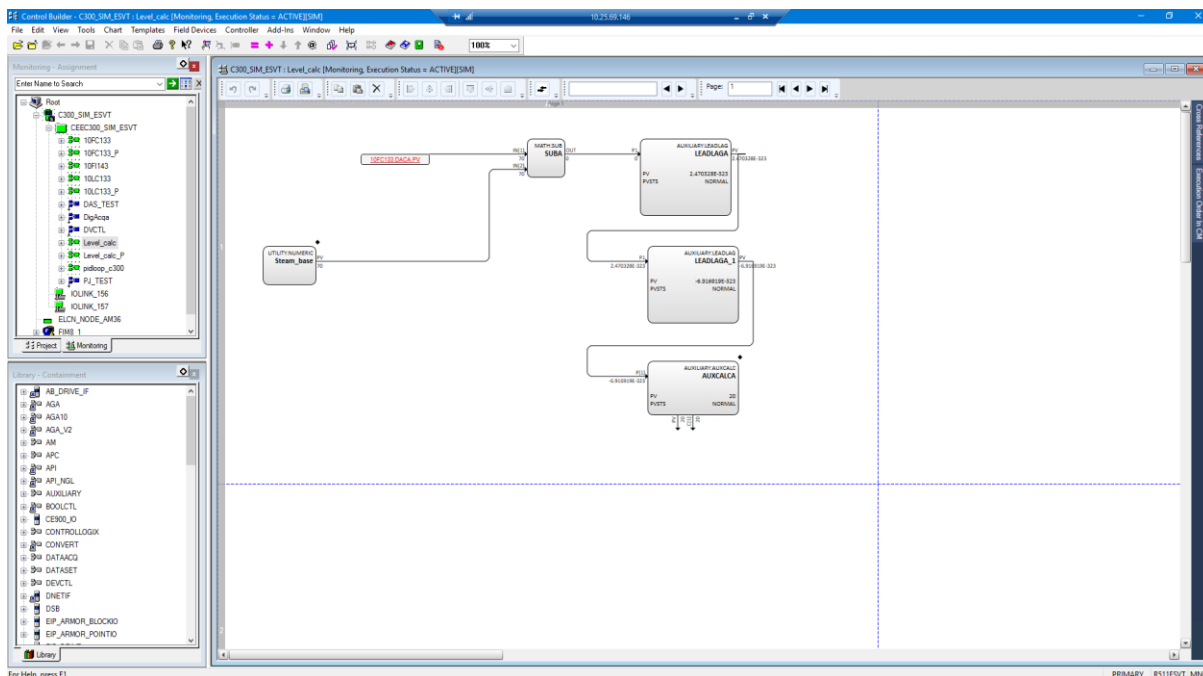
PRIMARY B51ESVT

На Фигура 3.30 е представен контролен модул 10FI143, за разход пара, в който участва DATAACQ функционален блок.



Фигура 3.30 Контролен модул 10FI143

На Фигура 3.31 е представен контролен модул Level_calc, за симулиране на нивото в барабана, където участват LEADLAG, SUB, NUMERIC и AUXCALC функционални блокове.



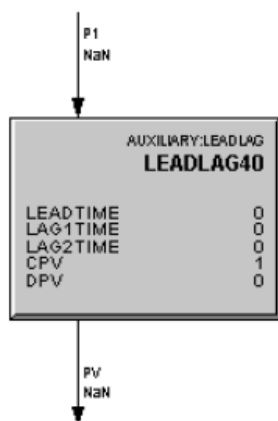
Фигура 3.31 Контролен модул Level_calc

Функционалните блокове използвани за изграждане на контролните модули на модела в Control Builder са изброени и описани по-долу.

Блокът LEADLAG дава възможност за симулиране на форсиращо звено от втори ред. Реализираната предавателна функция има вида:

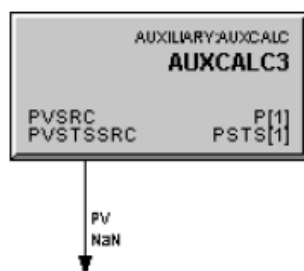
$$W(s) = K \frac{T1s+1}{(T1s+1)(T2s+1)} \quad (3.41)$$

Имаме възможност да въведем нули за всяка една от времеконстантите, както и за коефициента на усилване. Блокът е представен схематично на Фигура 3.32.



Фигура 3.32 LEADLAG блок

Блокът AUXCALC (помощно изчисление) (Фигура 3.33) позволява записване на до осем изрази за изчисляване на изходната стойност. Всеки израз може да изпълнява аритметични или логически операции, условия на тестване и т.н. Информацията за състоянието се предоставя както за входовете, така и за резултатите от изказа.

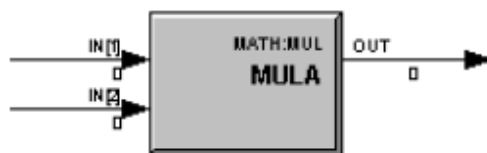


Фигура 3.33 AUXCALC блок

Блокът AUXCALC обработва дефинирани от потребителя изрази и условия, за да изчисли желанния изход и състояние на стратегията за управление. Блокът може да приеме стойности от до шест входа и да определя техните състояния във всеки цикъл на изпълнение на контролния модул. Той изчислява до осем изказа и определя техния

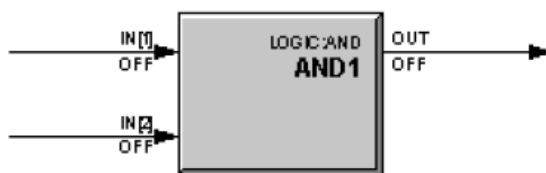
статус. Могат да бъдат въвеждани низове на математически и логически изрази, чийто синтаксис бива проверяван преди зареждане на функционалния блок.

Блокът MUL (Фигура 3.34) предоставя възможност за умножение. По време на изпълнение изходът (OUT) е произведението на свързаните от потребителя входове (IN [1...8]).



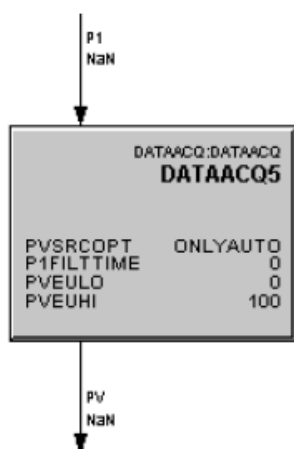
Фигура 3.34 MUL блок

Блокът AND (Фигура 3.35) осъществява логическо „И“ на до 8 входа. Всеки вход (IN [1], IN [2], ..., IN [8]) може да бъде инвертиран, ако е необходимо. Блокът е представен схематично по следния начин:



Фигура 3.35 AND блок

Блокът DATAACQ (Фигура 3.36) обработва определена входна стойност на процеса ($P1$) в желана изходна стойност (PV). Блокът е представен схематично на следващата фигура.



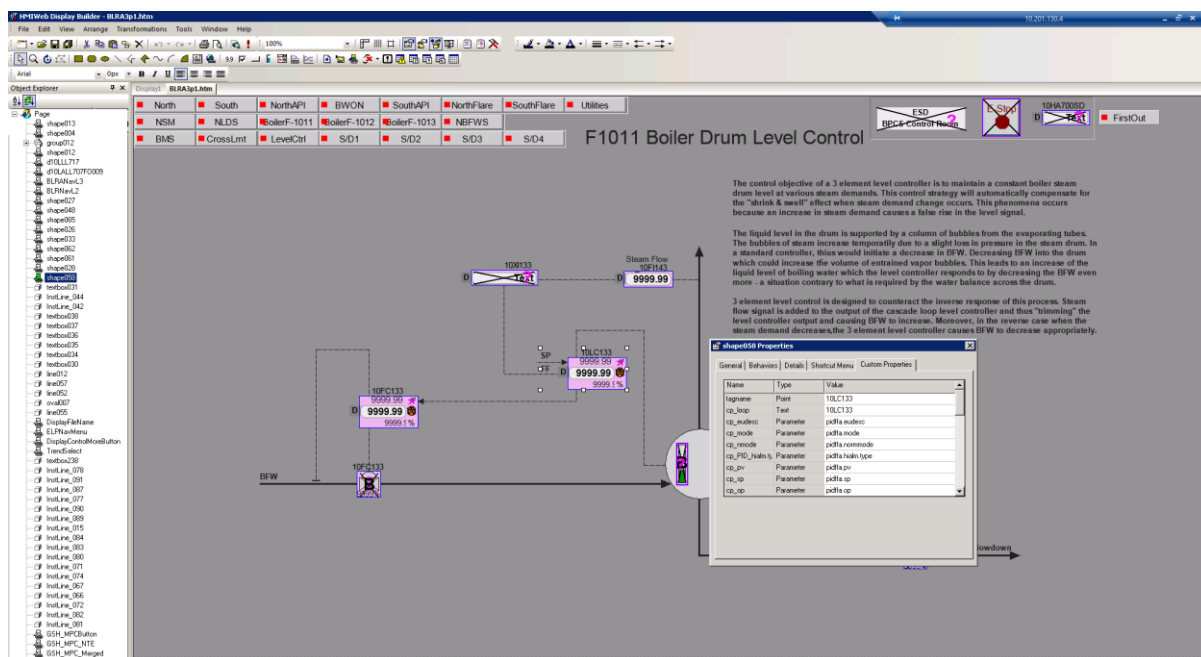
Фигура 3.36 DATAACQ блок

Блокът DATAACQ (Фигура 3.36) обикновено е конфигуриран да извлича аналогов вход от функционален блок AI Channel. Както е описано по-долу, той изпълнява следните основни функции:

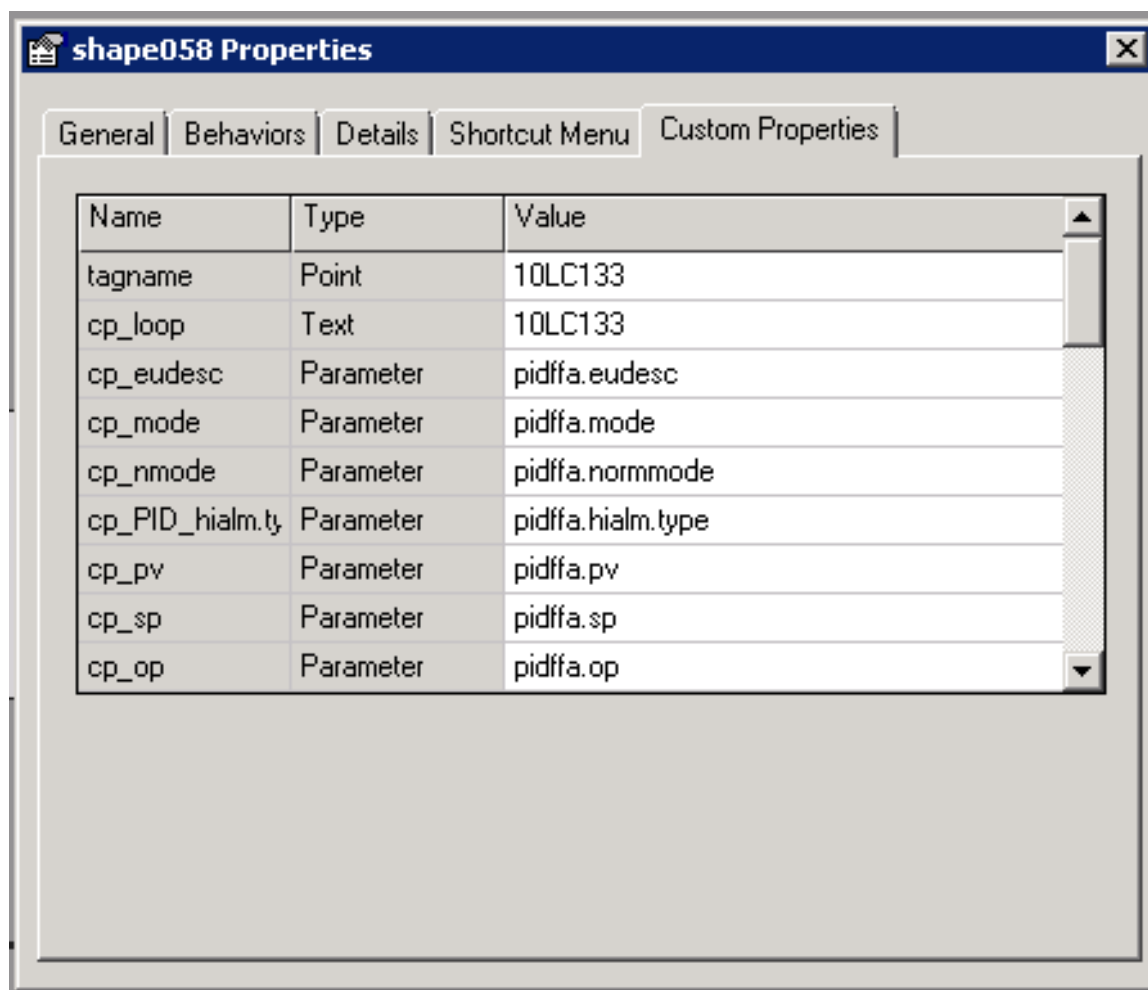
- Обработка на входа - чете входни данни от изхода на друг блок, проверява тяхната валидност и актуализира входните параметри *PI* и *PISTS* според случая.
- *PV* характеристика - преобразува входния параметър *PI* в инженерни единици, когато конфигурируемата от потребителя опция за *PV* характеристика е конфигурирана като линейна или квадратична. Преобразуваната стойност *PI* се съхранява в параметър само за четене.
- Филтриране - извършва филтриране на параметъра само за четене *PIEU* и съхранява резултата в *PVAUTO*.
- Избор на *PV* източник - обикновено копира филтрираната и фиксирана стойност на *PVAUTO* в изходния *PV*, но също така позволява случаи, когато операторът или потребителската програма могат да съхраняват в *PV*, ако конфигурираният от потребителя избор на *PV* източник е конфигуриран съответно за MAN или SUB .
- Обработка на аларма - генерира алармени флагове, когато *PV* надвишава предварително конфигурирана стойност за по-дълъг от определен интервал от време.

HMI Display Builder е пакет използван за изграждане на мнемосхеми използвани от операторите за управление на процеса. Този пакет е използван за създаване на дисплея на котел F-1011. HMI Display Builder е част от Experion Process Knowledge System на Honeywell и представлява графичен инструмент за създаване на потребителски дисплей с помощта на WebBased функции.

Редица вградени графики са достъпни в библиотеката от обекти (регулатори, помпи, мотори, индикатори, алармени обекти, трендове и др.), които потребителите могат да включват в дисплеите. На Фигура 3.37 е представен изглед от HMI Display Builder и на Фигура 3.38 са представени необходимите параметри за конфигуриране на графичен обект.



Фигура 3.37 HMI Display Builder



Фигура 3.38 Необходимите параметри за конфигуриране на графичен обект

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
High limit:	1440.00	Low limit:	NaN
Filter time (minutes):	0.00	High limit:	NaN
		Non linearity form:	0
		Non linear gain factor:	NaN
		External gain factor:	NaN
		☐ Legacy gap	

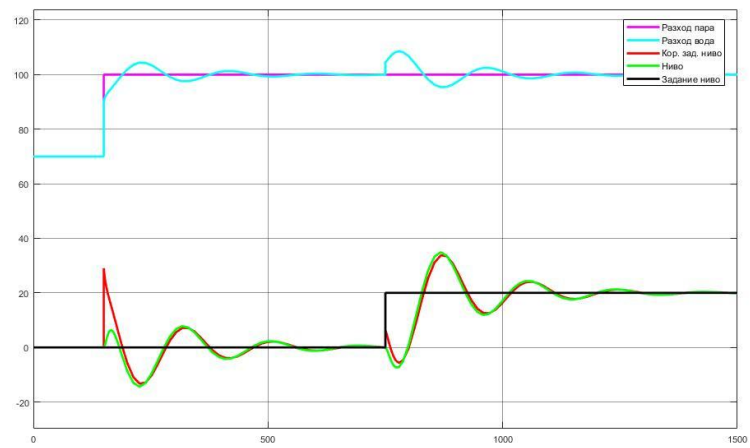
Фигура 3.39 Оригинални настройки на контролен модул 10LC133

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.

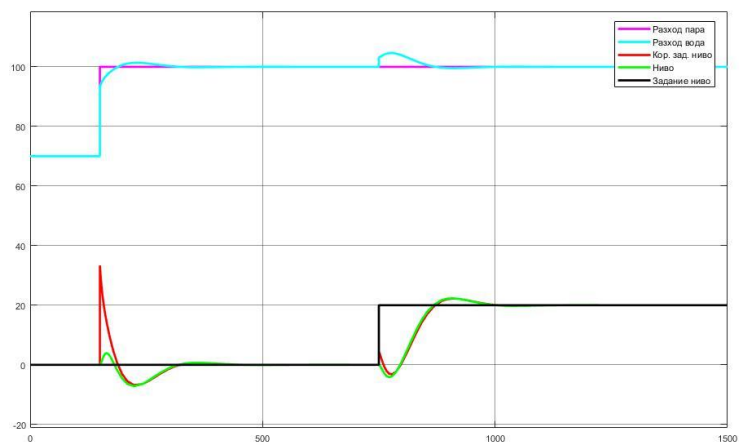
Тегловните коефициенти за разликата между пара и вода са определени експериментално. В проведените симулации те варират от 1 до 7. Настройките на регулатора са коефициент на усилване: $k=0.7$ и време на интегриране $t=10$ секунди. Виждаме значителна разлика във времето на интегриране в сравнение с това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

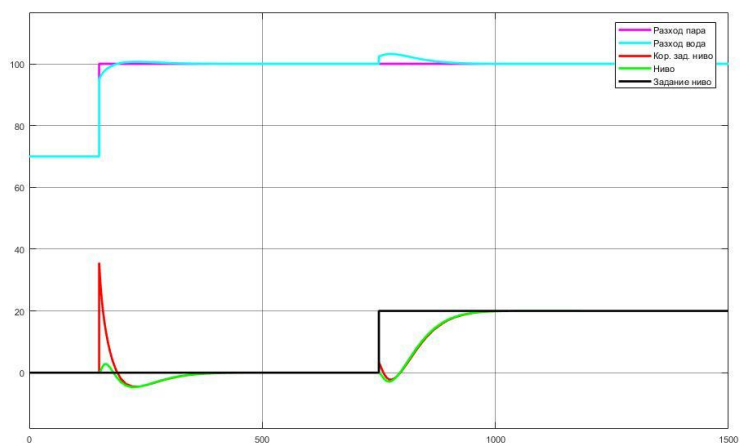
На Фигура 3.41 е показана схемата в отворен контур (изхода на регулатора не въздейства на разхода на питателна вода). Схемата е използвана за илюстриране на отворената систем при смущения по пара и вода. На Фигура 3.42 е показана схемата в затворен контур, като смущенията са по разход пара и задание за ниво. Резултатите са показани по-надолу в текста и са сравнени с тези получени в EPKS.



а)



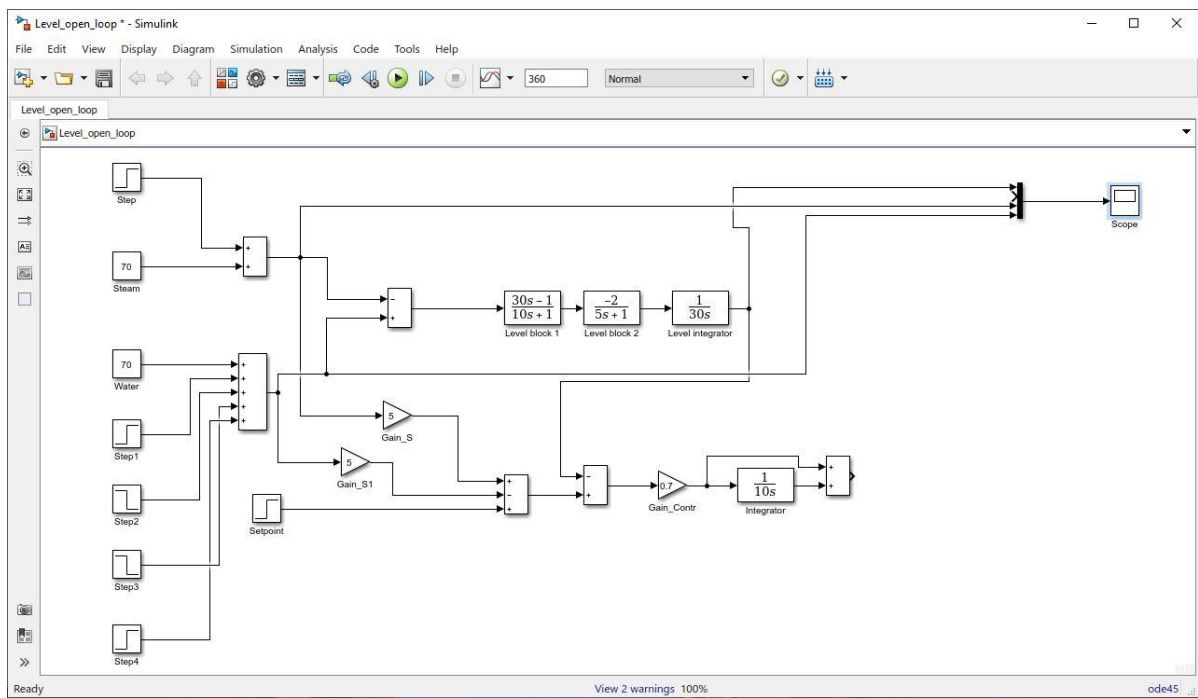
б)



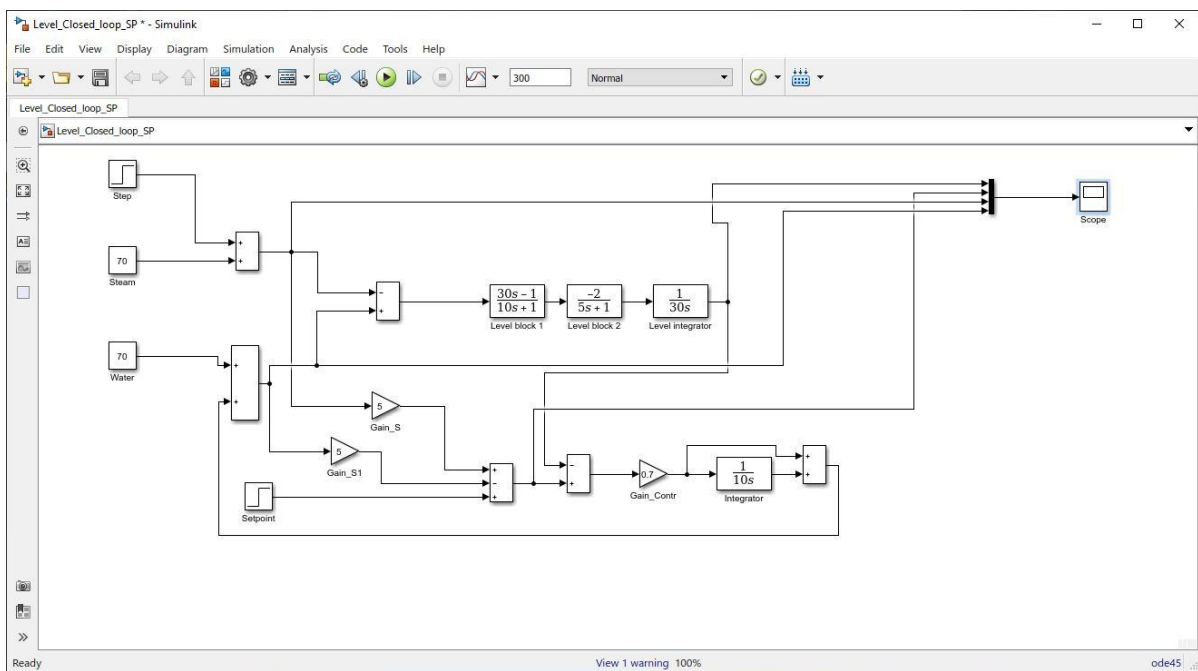
в)

Фигура 3.40 Регулиране на ниво при различни коефициенти на компенсиране

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

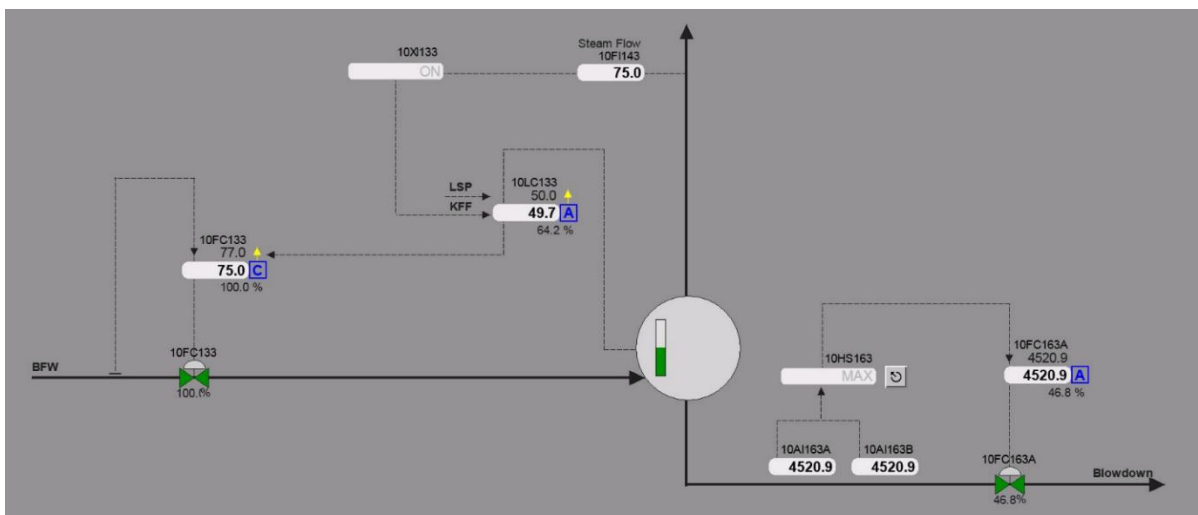


Фигура 3.41 Модел за регулиране на ниво при отворен контур



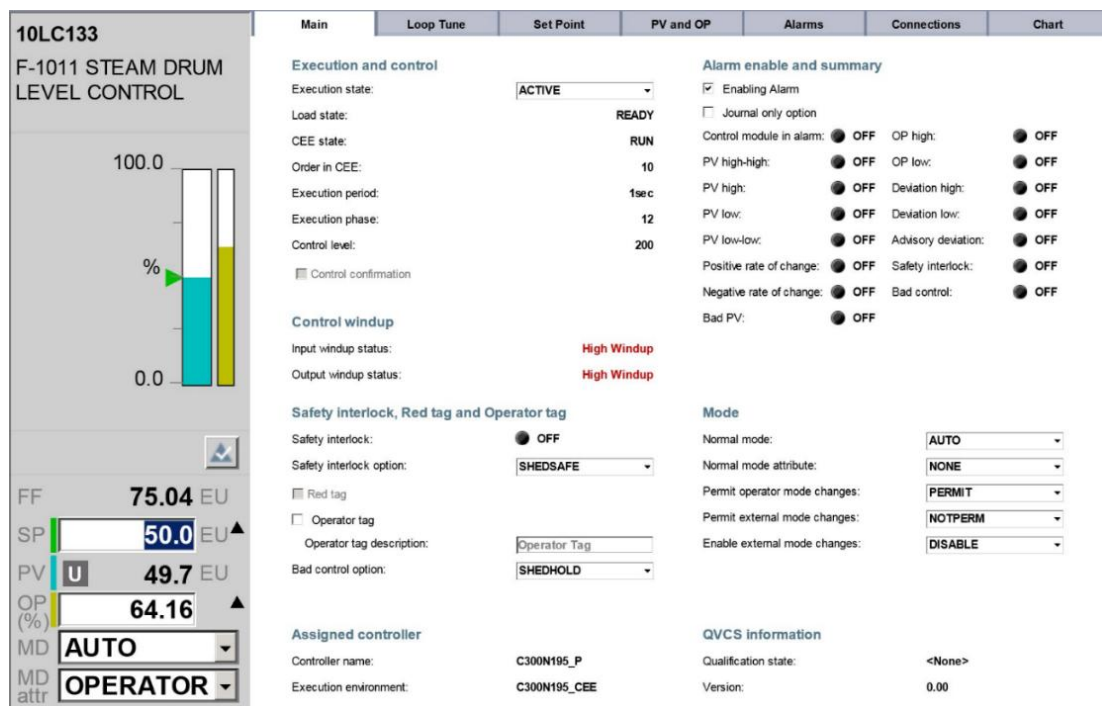
Фигура 3.42 Модел за регулиране на ниво при затворен контур

На Фигура 3.43 е представен дисплей от системата Experion PKS на Honeywell, показващ на оператора схемата за управление и данните от процеса в реално време. В контролният модул 10LC133, който отговаря за регулирането на нивото в барабана, са конфигурирани тегловните коефициенти и настройките на регулатора получени в MATLAB.



Фигура 3.43 Дисплей ниво в барабана на котел F-1011 в Experion PKS STATION

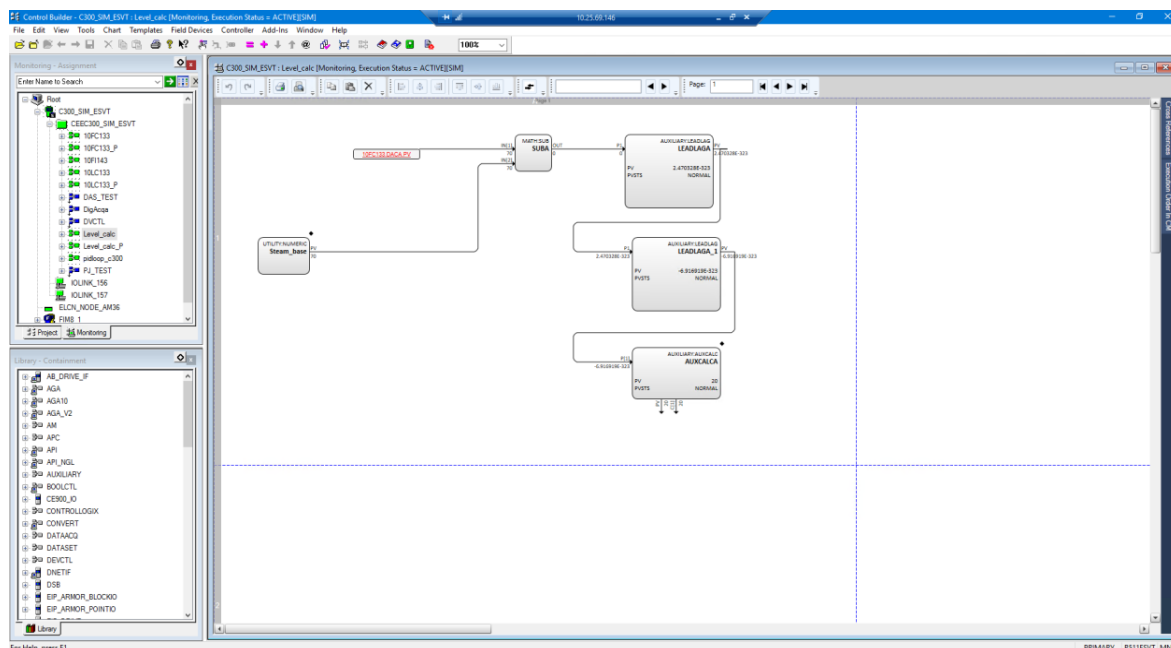
На Фигура 3.44 е представен детайлния дисплей на модул 10LC133, откъдето може да се управлява процеса. От тук може да се променят коефициента на усилване, времето на интегриране, времето на диференциране, уравнението на ПИД регулатора, границите на регулатора, алармите и т.н.



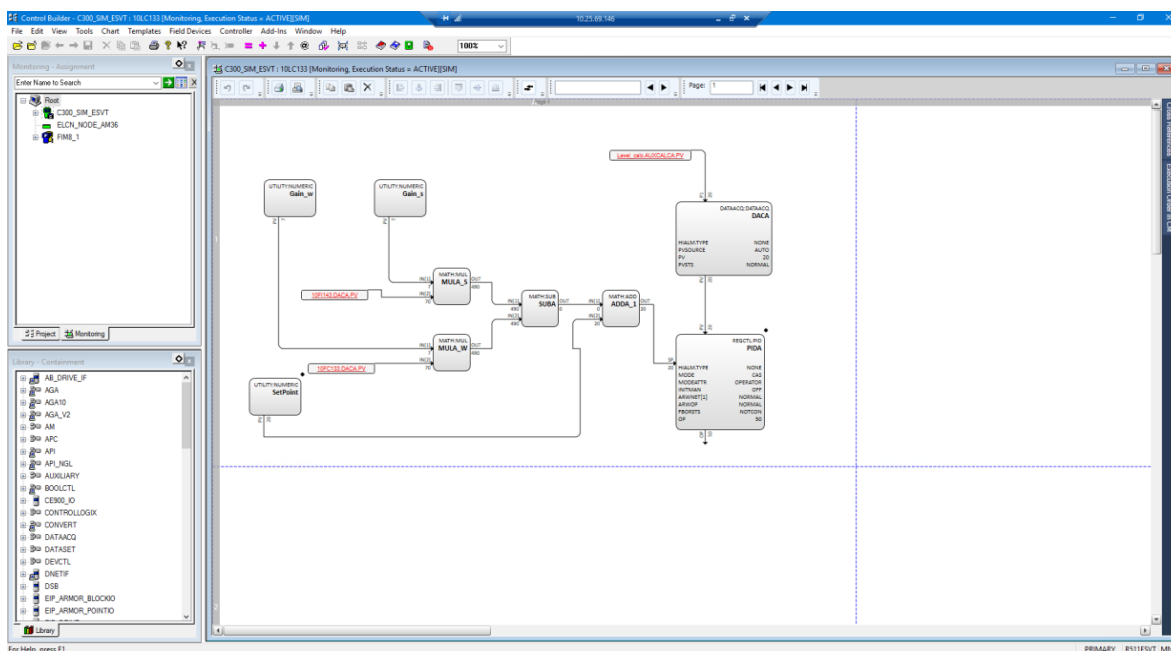
Фигура 3.44 Контролният панел на модул 10LC133

В пакета Control Builder на Experion PKS, процесът може да бъде управляван при превключване в режим MONITORING. Този интерфейс е предвиден само за инженерите по време на настройване и пускане на системата. 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.



Фигура 3.45 Контролен модул Level_calc



Фигура 3.46 Контролен модул 10LC133

Конфигурациите на LEADLAGA, LEADLAGA_1, AUXCALCA и PIDA, които отговарят на Level_block 1, Level_block 2, Level_integrator и ПИ регулатора от представения на Фигура 3.26 MATLAB модел, са представени на Фигури 3.47, 3.48, 3.49 и 3.50.

AUXILIARY:LEADLAG Block, LEADLAGA - Parameters [Monitoring]

Main Identification Dependencies Template Defining

Name: LEADLAGA Execution Order in CM: 50

Description:

Engr Units:

PV Format: D1

Lead and Lag Times:

Lead Time (min): -0.5

Lag 1 Time (min): 0.167

Lag 2 Time (min): 0

Scale and Bias:

Overall Scale Factor: -1

Overall Bias: 0

☐ Show Parameter Names

OK Cancel Help

Фигура 3.47 Настройки на LEADLAGA

AUXILIARY:LEADLAG Block, LEADLAGA_1 - Parameters [Monitoring]

Main Identification Dependencies Template Defining

Name: LEADLAGA_1 Execution Order in CM: 50

Description:

Engr Units:

PV Format: D1

Lead and Lag Times:

Lead Time (min): 0

Lag 1 Time (min): 0.083

Lag 2 Time (min): 0

Scale and Bias:

Overall Scale Factor: -2

Overall Bias: 0

☐ Show Parameter Names

OK Cancel Help

Фигура 3.48 Настройки на LEADLAGA_1

AUXILIARY:AUXCALC Block, AUXCALCA - Parameters [Monitoring]

Identification		Dependencies				Template Defining			
Main	Constants	Expn# 1	Expn# 2	Expn# 3	Expn# 4	Expn# 5	Expn# 6	Expn# 7	Expn# 8

Expression Details

Expression:

Expression Description:

Expression Result = 20

`isnan(Level_calc.AUXCALCA.C[1])?0:Level_calc.AUXCALCA.C[1]+Level_calc.AUXCALCA.P[1]/30`

No Enumerations:

Functions:

Constants

Constant Value 1:

Constant Value 2:

Constant Value 3:

Constant Value 4:

Constant Value 5:

Constant Value 6:

Constant Value 7:

Constant Value 8:

☐ Show Parameter Names

Фигура 3.49 Настройки на AUXCALCA

REGCTL:PID Block, PIDA - Parameters [Monitoring]

Main	Algorithm	SetPoint	Output	Alarms	SCM	Identification	Dependencies	Template Defining	Insertion
------	-----------	----------	--------	--------	-----	----------------	--------------	-------------------	-----------

Control Equation Type:

Control Action: ☐ DIRECT ☒ REVERSE

Integral Time

T1 (minutes):

T1 High Limit (minutes):

T1 Low Limit (minutes):

Derivative Time

T2 (minutes):

T2 High Limit (minutes):

T2 Low Limit (minutes):

Gain Limits

High Gain Limit:

Low Gain Limit:

Linear Gain

☒ LIN

Overall Gain:

Other Gain Options

Linear Gain Factor:

☐ GAP

Gap High Limit:

Gap Low Limit:

Gap Gain Factor:

☐ NONLIN

Non Linearity Form:

Non Linear Gain Factor:

☐ EXT

External Gain Factor:

☐ Legacy gap

P-only (EqnE) Units Option

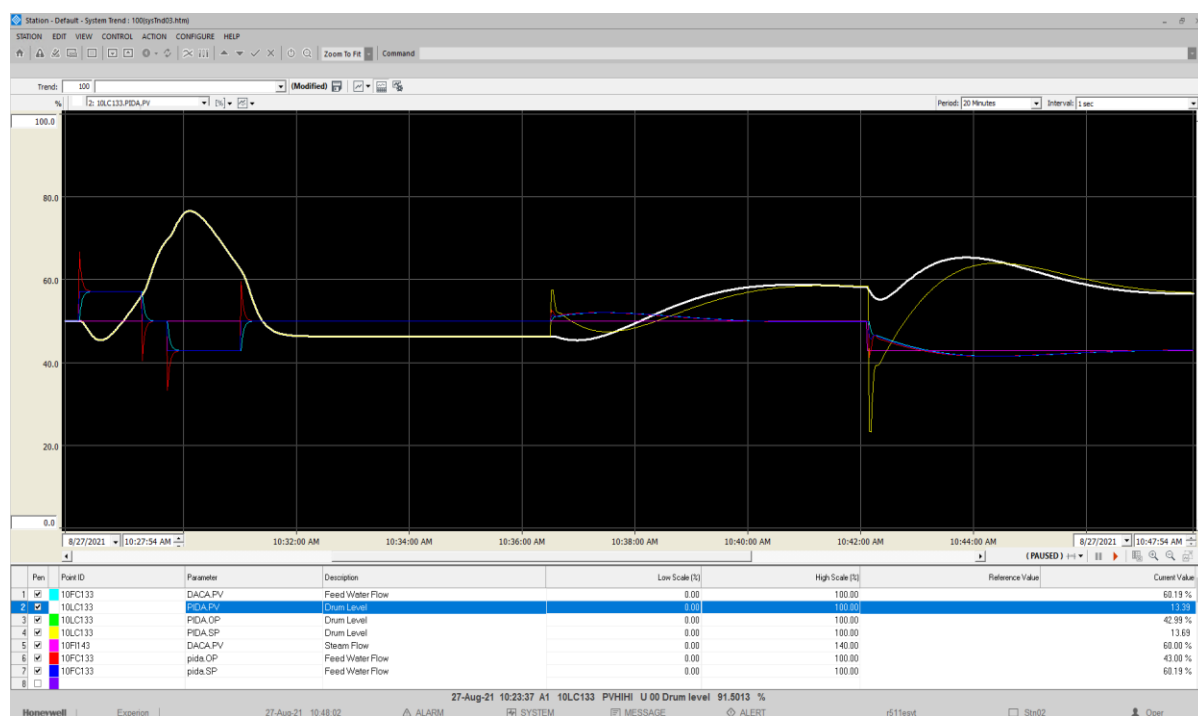
☐ Show Parameter Names

Фигура 3.50 Настройки на PIDA

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.

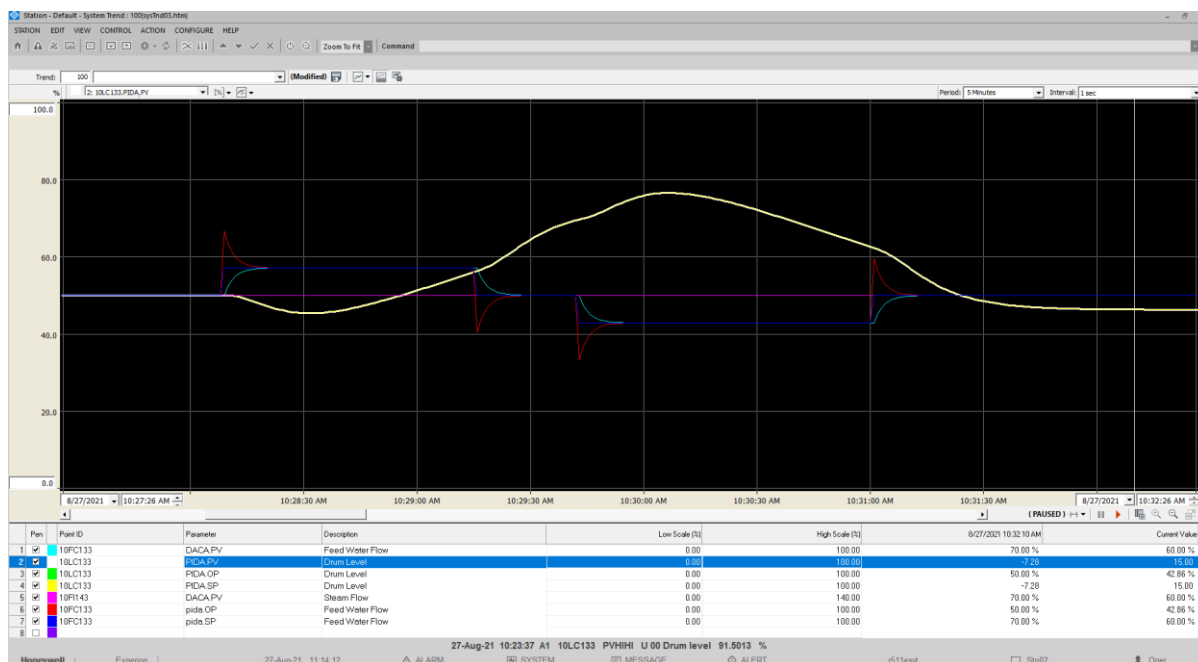
Във втората част е показано смущение по задание в затворен контур. Вижда се спадането на нивото при увеличаване разхода на питателна вода и достигането на новото задание, при което разхода на вода отново става равен на разхода на пара.

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].



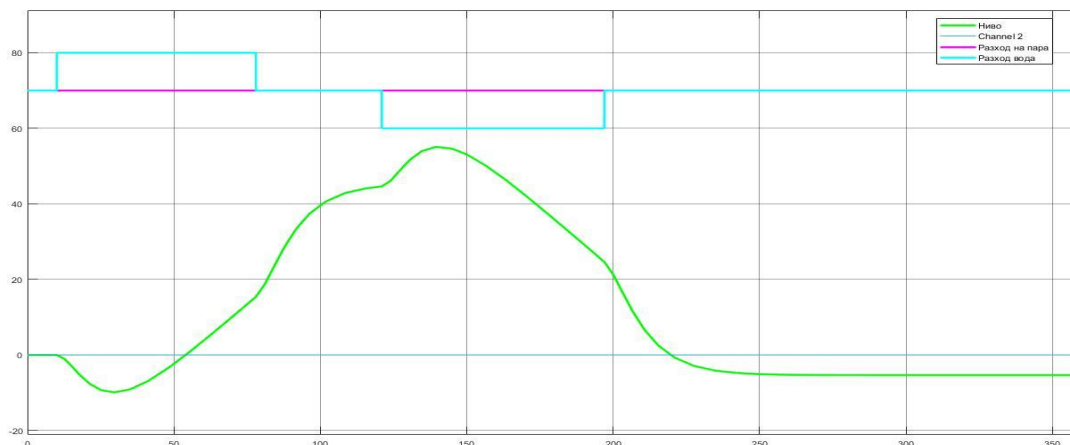
Фигура 3.51 Поведение на обекта за регулиране в отворен и затворен контур, реализиран в програмната среда Experion Process Knowledge System

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 3.52 и 3.53 показват изменението на нивото при отворен контур.



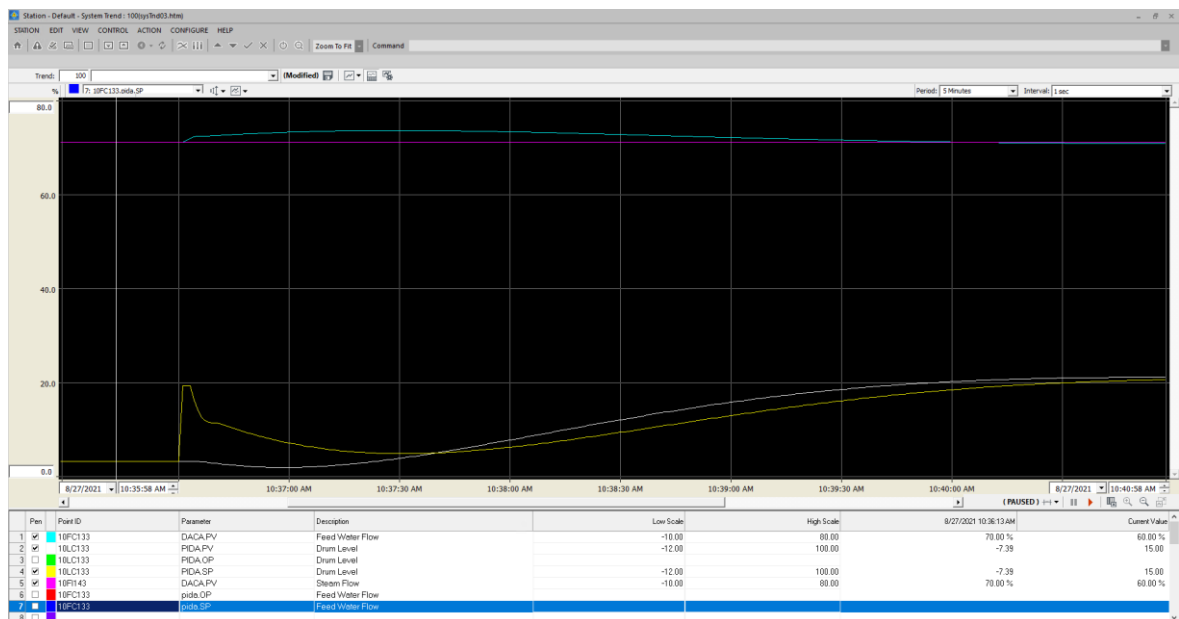
Фигура 3.52 Поведение на нивото в барабана в отворен контур при смущение по вода
(Experion Process Knowledge System)

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



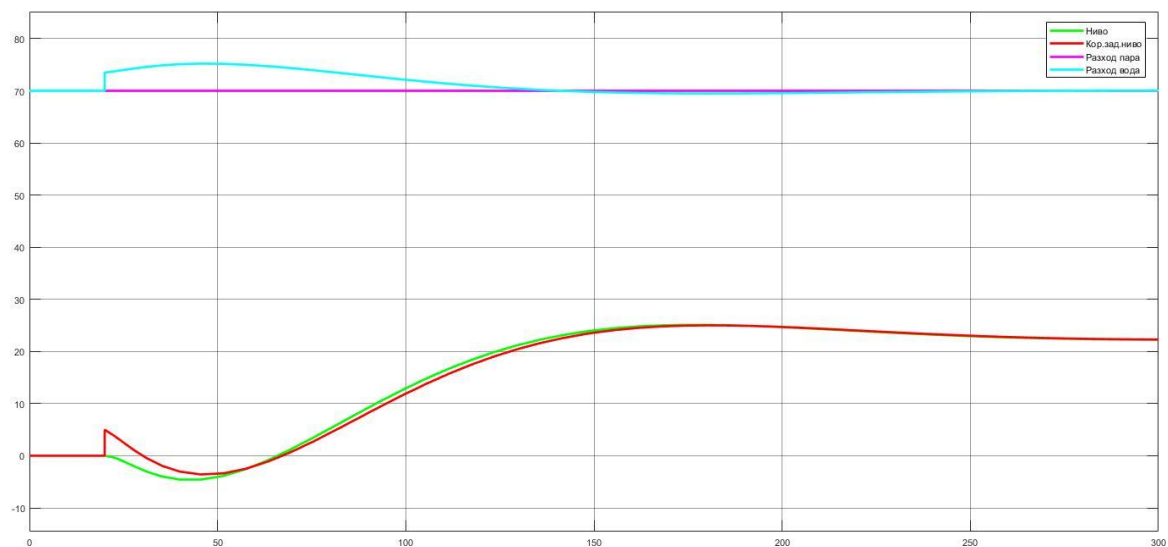
Фигура 3.53 Поведение на нивото в барабана в отворен контур при смущение по вода
(MATLAB)

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



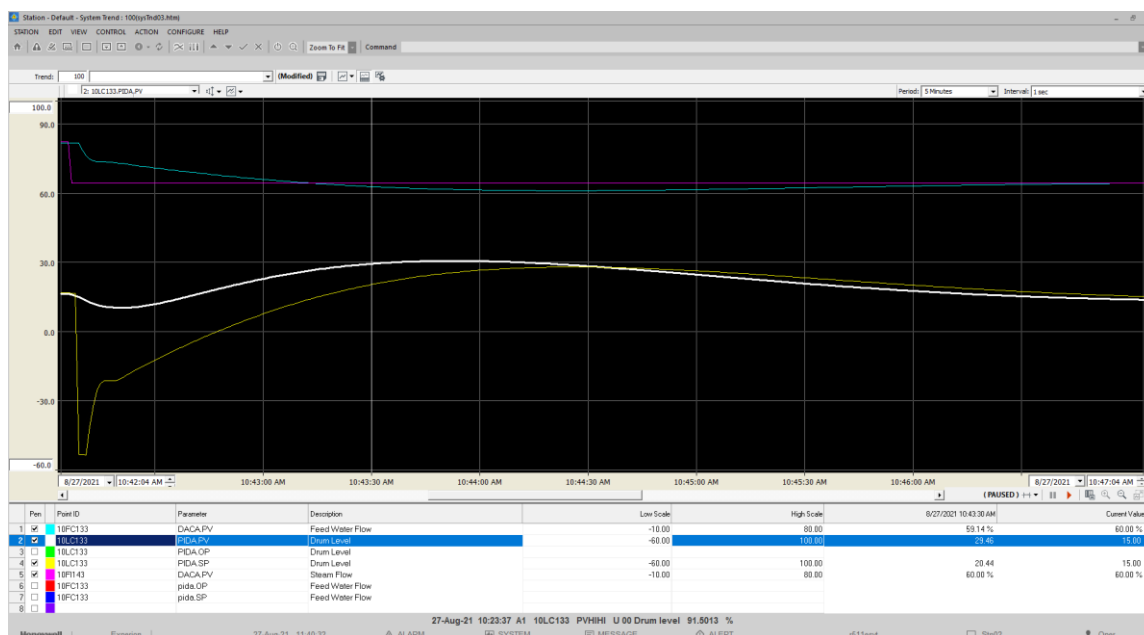
Фигура 3.54 Поведение на нивото в барабана в затворен контур при смущение по задание (Experion Process Knowledge System)

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



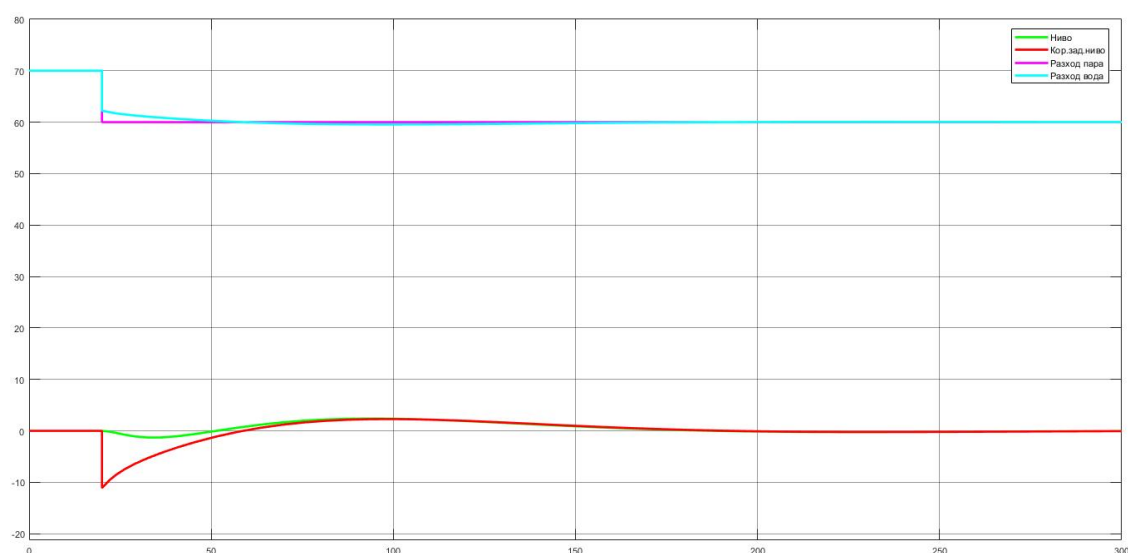
Фигура 3.55 Поведение на нивото в барабана в затворен контур при смущение по задание (MATLAB)

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



Фигура 3.56 Поведение на нивото в барабана в затворен контур при смущение по пара
(Experion Process Knowledge System)

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



Фигура 3.57 Поведение на нивото в барабана в затворен контур при смущение по пара
(MATLAB)

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

Проведени са два експеримента в затворен контур, като при единия смущението е по задание, а при другия има промяна на разхода на пара. Резултатите от първия експеримент са показани на Фигури 3.54 и 3.55. Резултатите от втория експеримент са показани на Фигури 3.56 и 3.57.

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.

Мембранните биореактори интегрират биоконверсия със селективно мембранно разделяне. Наличието на мембрана дава възможност за разделяне на различен тип продукти с достатъчна разлика в молекулната маса от сложни системи с разнообразен

състав и концентрационен диапазон. Интегрираните мембранни реактори успешно се състезават с традиционните такива с разбъркване и свободно суспендирана биомаса в непрекъснат режим на действие.

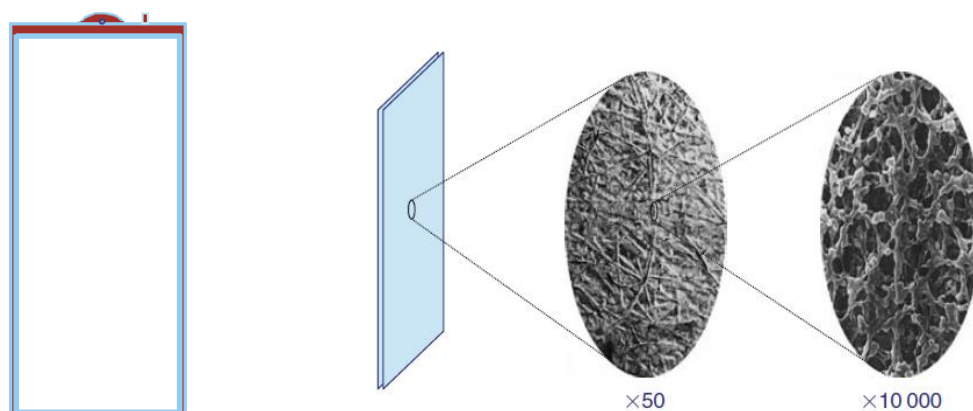
Проектирането на мембранен биореактор става главно на базата на познаване на биокинетиката и на условията, при които настъпва запушването на мембраната, въпреки че хидродинамиката в реактора е от решаващо значение за работата му. Следователно влиянието на режима на потока в процеса на проектиране и работа на реактора не е достатъчно изучен и анализиран процес. Настоящите методи на проектиране на желания работен режим на потока в рамките на реактора до голяма степен се основават на емпирични техники (например: на специфичната енергия на смесване). Трудно е да се предскаже как мащабирането на апарата и проектирането на промишлени инсталации (например: размер и положение на входове, прегради или мембранна ориентация) ще повлияят на хидродинамиката и следователно на цялостно изпълнение на мембранный реактор.

Напоследък все повече проучвания използват изчислителна динамика на флуидите за изследване и моделиране на потока на течността през мембранен модул и за изследване на факторите, които предизвикват замърсяването на мембраната [143, 144]. Това е широко използван инструмент за изследване на замърсяването на мембраната и за проучване механизмите и факторите, които влияят на този процес. Изчислителната динамика на флуидите дава възможност за предсказване на това как геометричните характеристики и работните параметри на барботажния реактор с потопена мембрана ще повлияят на хидродинамиката и на избора на оптималната конструкция и следователно и на производителността на мембранен биореактор с аериране.

В настоящия дисертационен труд ще бъде проектиран мембранен биореактор с механично разбъркване за добив на дрожди *Hansenula polymorpha*, и определяне на необходимата скорост на аерация за постигане на минимална скорост на деформация на материала в граничния слой на мембраната от $0.8 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. Също така ще бъде определена необходимата скорост на бъркачките за постигане на желаната максимална скорост на деформация в камерата за клетъчен растеж от $15 \text{ [s}^{-1}\text{]}$.

Предлаганите мембранни биореакторни могат да бъдат класифицирани според мембранната конфигурация, като: плосък лист, кухо влакно и многотръбни. Оригиналната структура с микрофилтрационна мембрана тип 510 (Фигура 4.1), която все

още е широко използвана, включва плосък панел с размери 0.5 [m] на 1 [m] и с дебелина 6 [mm], осигуряващ ефективна площ на мембраната от 0.8 [m²].



Фигура 4.1 Kubota мембрана

Размерът на порите е 0.4 [μm], но поради формирането на динамичния слой върху мембранната повърхност, ефективният размер на порите при работа е значително по-малък от този и може да бъде в диапазона на ултрафилтрация. Мембранните панели са поставени в пакет на разстояние 7–8 [mm] един от друг. Установено е, че това е достатъчно за предотвратяване на запушването. В основата на резервоара се прилага аериране, така че да се осигури известно количество окисляване на биомасата, в допълнение на аерирането на мембранный модул. Оригиналната тръба за аериране на въздуха, съдържаща отвори от 8 [mm] или 10 [mm], е заменена от патентован аератор за промиване на утайки. Този аератор съдържа централна тръба с по-малки странични тръбички. Всяка странична тръба има 4 [mm] отвори на горната повърхност. Почистването на аератора се постига чрез кратко отваряне на външен клапан, свързан чрез колектор към краищата на централната тръба/тръби. Това позволява интензивен обратен поток от утайки и въздух обратно в резервоара. Този обратен поток изчиства утайките от аератора и помага да се предотврати запушването на системата за аерация. Мембранните модули съдържат до 200 панела в едноетажна конфигурация. Направено е подобрение на този модел през 2002 г., когато се появява double-deck (двойна) дизайн. Той намалява цената, заради способността да се монтират един върху друг два Кубота модула, с което се увеличава мембранната повърхност [124, 140].

Логична алтернатива на двуетажния дизайн е създаването на единичен удължен мембранен панел, с което се постига по-дълъг път на въздушния поток и по-голяма площ на мембраната. Всеки мембранен панел (1.5 [m] на 0.55 [m], осигуряващ ефективна

мембранна площ от 1.25 [m²]) съдържа вътрешни канали, свързващи се с формован пермеатен колектор. Този дизайн намалява сложността на корпуса (Фигура 4.2).



Фигура 4.2 Кубота EW модул

В допълнение на по-голямата площ на панела води до намаляване на енергийната консумация за аериране.

При Koch мембранните системи, мембранный елемент е от потопен тип на базата на 2.6 [mm] и нишки с вътрешен диаметър 1.2 [mm]. За разлика от повечето други потопени реакторни модули, мембранный материал е PES. Специфична характеристика на системата PURON® е закрепването на влакната само в основата, като мембранните нишки са запечатани индивидуално в горната част (Фигура 4.3).

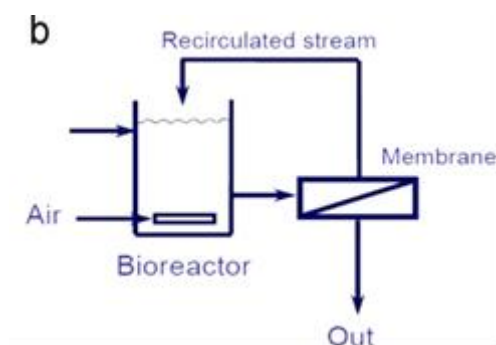


Фигура 4.3 PURON® мембрана

Очистващият въздух се впръсква между нишките периодично с помощта на централна въздушна дюза в основата на модула, така че да се ограничи степента на запушване. Свободното движение на нишките в горната част на модула е проектирано така, че да позволи на грубите твърди частици, като коса и агломерирани целулозни влакна, да излязат, без да причиняват запушване. Влакната се укрепват с вътрешна плетка, тъй като страничното движение на нишките ги подлага на механично напрежение. Филтратът се изтегля от колектора в основата на цилиндричния елемент, в който е разположен и аераторът. Отделните снопчета влакна са високи 2 [m] и осигуряват площ от мембрана от около 3.3 [m²].

Основния недостатък на мембраните биореактори е замърсяването на мембраната, което води до често почистване и подмяна, което прави тази система по-малко привлекателна за широкомащабни приложения [123].

Предимствата на биореактор с потопен мембранен модул са във възможността за пълно задържане на биомасата в реактора; за отделяне на продукт с висока чистота; за своевременно отделяне на продукта, който има инхибиращ ефект върху реакцията, или търпи разлагане в присъствие на определени компоненти на средата в реактора; за наличието на газ (аериране) и сблъсъкът на газовите мехурчета с повърхността на мембраната, които имат положителен ефект върху намаляването на fouling-a (замърсяването); за отпадане на необходимостта от циркуляционен контур и свързаната с него апаратура и енергиен разход; за пестене на енергия и пространство и за поддържане на стерилност в цялата система.

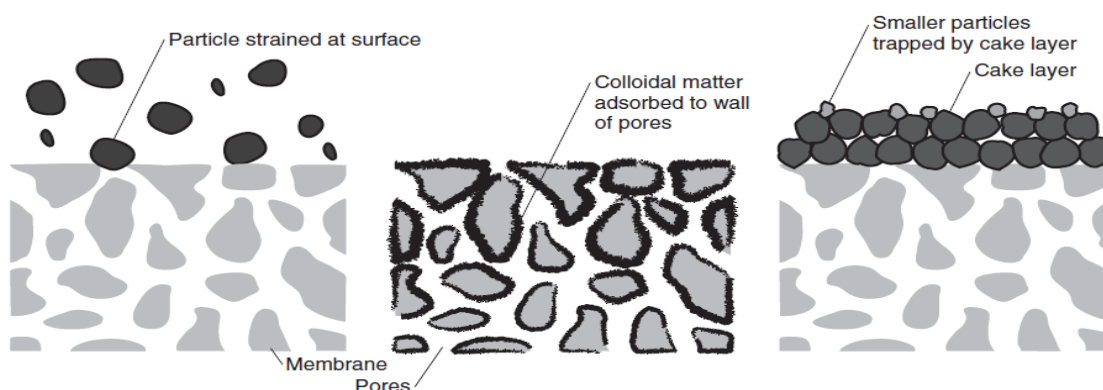


Фигура 4.4 Биореактор с изнесена мембрана

Биореактори с изнесена мембрана (Фигура 4.4) са предпочитани при почистване на отпадни води, когато потоците са с висока температура и високи показатели на рН, токсичност и концентрация на замърсители. Те също така са успешно използвани при

анаеробни системи, например в производството на етанол, млечна киселина и други продукти на анаеробната ферментация на бактерии или дрожди [123, 124].

Върху повърхността на мембраната може да се образува утайка от твърди частици, както е показано на Фигура 4.5. Този слой от утайка може да се разглежда като „динамична“ мембрана, която позволява само по-малки частици да преминават през него, което води до намаляващ поток или увеличаване на транс-мембранното налягане [125].



Фигура 4.5 Запушване на мембранни пори с утаени частици (ляво), колоидни вещества, абсорбирани в порите на стените (център), слой от „динамична“ утайка, който позволява преминаването само на по-малки частици (дясно)

Някои частици, например естествените органични вещества не само се натрупват по повърхността на мембраната, но те могат да достигнат и по-дълбоко в мембраната и след това да се адсорбират до стените на порите, както е показано в средата на Фигура 4.5. Този процес е известен като замърсяване, което също може да бъде причинено от блокиране на порите и образуване на утайка. Тъй като части от порестата област са блокирани и някои пори стават по-малки поради адсорбцията, хидравличното съпротивление, се увеличава значително. С други думи, движещото налягане, което принуждава течността да преминава през мембраната трябва да се увеличи или потокът през мембраната да се отклони.

Голям брой проучвания [126-129] показват, че срязващото напрежение на стената е много важен параметър, който може да се използва за индикация на ефективността на мембраната. Известно е, че частиците, натрупани по повърхността на мембраната, ще бъдат отмити, когато напрежението на срязване се увеличи, тъй като може да увеличи обратния транспорт на частиците далеч от мембраната. Връзката между замърсяването

на мембраната и съотношението между потока на пермеата и напрежението при срязване на стената е изследвано от LeBerre и Daufin през 1996 г. [126]. То показва, че съотношението между потока на пермеата и напрежението при срязване на стената може да бъде полезен параметър за прогнозиране на производителността на мембраната при различни работни условия.

В по-късни проучвания [127-131], ефектът на срязващото напрежение на стената върху замърсяването на мембраната по време на мембранното филтруване се изследва чрез цифрова симулация, като се използва изчислителна динамика на флуидите [127-130] или се изследва експериментално [131].

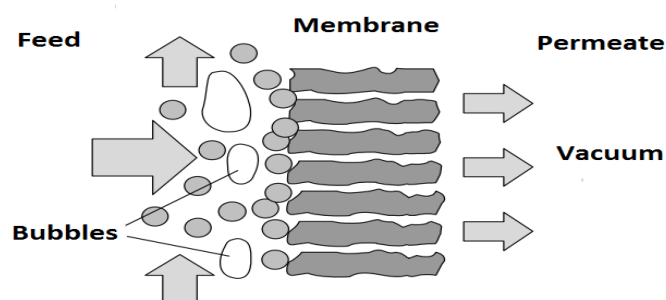
Основен проблем, който ограничава приложението на мембраната е замърсяването и запушването на мембраната и образуване на утайка. За да се сведе до минимум този негативен ефект, трябва да се избере подходящ режим на работа. Режимът на непрекъснато филтруване е най-разпространеният начин, при който потокът на захранване е нормален за мембраната, което води до голям брой съставки, натрупващи се на повърхността на мембраната и генерирайки слой от твърди вещества, известен като филтърна утайка. Тази филтърна утайка може да действа и като филтърна среда.

При режима на филтруване на кръстосан поток се създава кръстосан (тангенциален) поток, който не позволява образуване на филтърна утайка върху мембраната. За тази цел е необходима голяма скорост за създаване на турбуленция, което означава, че консумацията на енергия при кръстосано филтруване е много по-голяма [125].

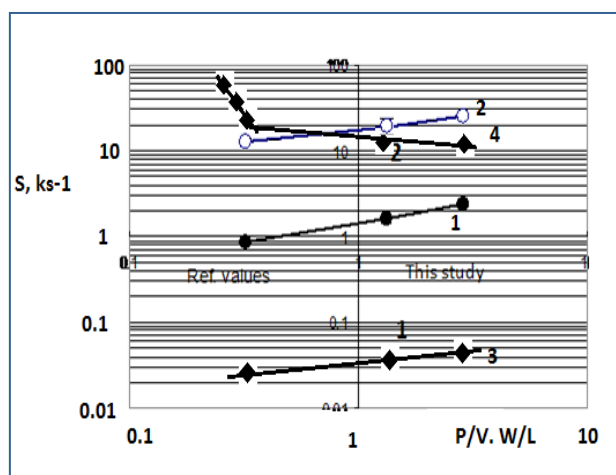
При режима на потопено филтриране мембрана (membrane) е директно монтирана в резервоара със захранващата смес (feed steam). Вакуум (vacuum) се прилага като движеща сила върху вътрешната страна на мембраната, която придвижва продуктивния поток (permeate), за да премине през филтърната среда на мембраната. Този процес на филтруване е илюстриран на Фигура 4.6. Поради вакуума движещата сила е ограничена и е по-ниска от тази в другите режими на филтриране.

В резултат на ограничената движеща сила се налагат ограничения за продуктивния поток и трансмембранното налягане. Максималното трансмембранното налягане в потопената мембранна система е около 0.5 бара [127], а типичното на филтруване с мембранен поток е 0.2 бара [127]. Освен това, разпръскването на газа се прилага по

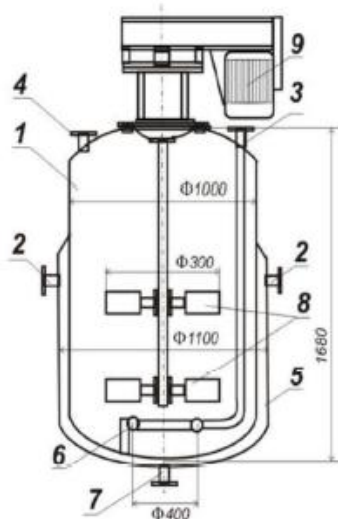
протекане на повърхността на мембраната, за да се стимулира турбулентността на потока, която контролира и ограничава растежа на утайката.



Фигура 4.6 Схема на режим на потопено филтруване



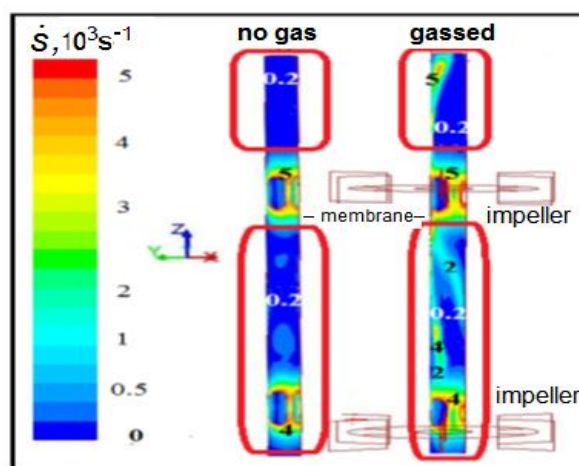
Фигура 4.7 Срязващи напрежения при различна специфична въведена мощност в реактор с разбъркване



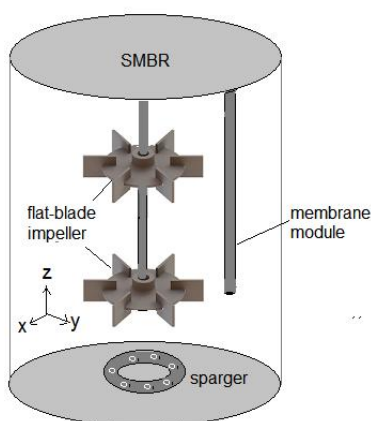
Фигура 4.8 Биореактор с разбъркване и аерация

Конкретната конструкция на бъркачката и разположението на мембраната спрямо нея влияят съществено върху скоростните полета и срязващите напрежения на мембраната. Фигура 4.7 показва тази разлика спрямо въведената в реактора специфична мощност на разбъркване: показани са срязващите напрежения в обема на флуида в реактора (долната линия 3), тези на мембраната (средната линия 1) и тези в зоната до аериращото устройство (горната линия 2).

В този тип реактори (Фигура 4.8), газовите мехурчета и механичното разбъркване влияят съвместно върху равномерността на разпределение на скоростите и срязващите напрежения до повърхността на мембраната. Реактор с разбъркване Biostat показан на Фигура 4.8 с бъркачка с прави лопатки и две работни колела илюстрира на Фигура 4.9 казаното. Разпределението на срязващите напрежения по дължината на мембраната е по-равномерно в присъствие на газ.



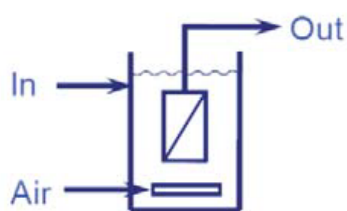
Фигура 4.9 Разпределение на срязващите напрежения по повърхността на тръбен мембранен модул в реактор с разбъркване



Фигура 4.10 Схема на мембранен биореактор с разбъркване

На Фигура 4.10 е представена схема на мембранен биореактор с разбъркване. Мембранный модул се поставя в зоната на аериране, за да се използва благоприятното влияние на двата фактора (газ и механично разбъркване) върху намаляването на замърсяването на мембраната [123, 124, 146].

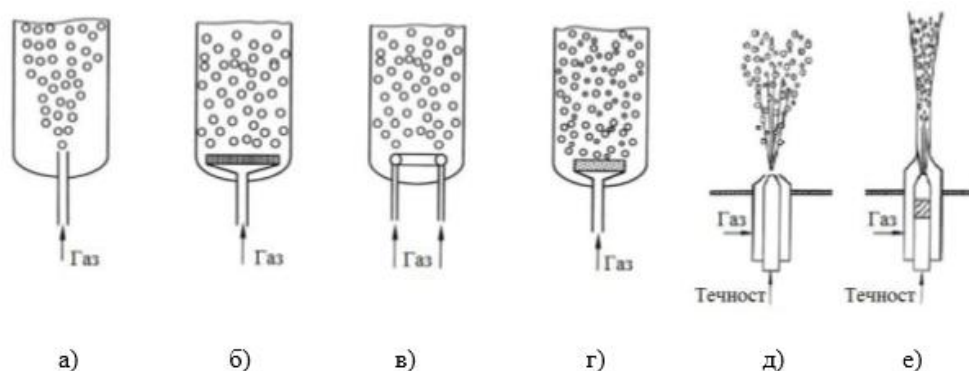
Мембранните реактори с аерация от типа барботажни или ерлифтни колони с вграден мембранен модул (Фигура 4.11) (най-често с кухи влакна или плоско-паралелен), използват благоприятното влияние на двуфазния поток газ-течност върху срязващите напрежения около мембраната [132].



Фигура 4.11 Биореактор с потопен мембранен модул

Целта на аерирането е да се генерират малки газови мехурчета, които да са равномерно разпределени по напречното сечение на апарата, като по този начин се постига по-добро разбъркване на течността и по-интензивен масообмен.

Диспергирането на газа се получават чрез пропускането му през отвори, порьозна среда или чрез смесването на газа с бърза струя течност. Устройствата използвани в първите два случая се наричат статични барботьори (*static spargers*) и са показани на Фигура 4.12 а) и 4.12 г). Най-използваните конструкции са перфорираната тарелка и перфорираната тръба. Другият тип са динамични барботьор (*dynamic spargers*) и при тях се използва енергията на течната струя за разпръскването на газа. Най-използваните конструкции от този тип са т.нар. двуфазна струйна дюза и ежекторите и са показани на Фигура 4.12 д) и 4.12 е).

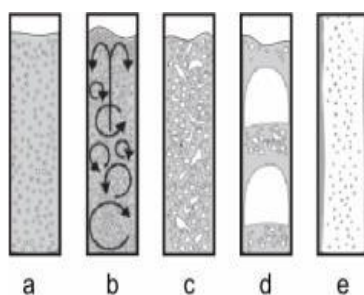


Фигура 4.12 Различни конструкции на барботьори

Издигащите се газови мехурчета при среща с повърхността на мембранната влияят в посока на намаляване на концентрационната поляризация и респективно формирането на слой утайка върху нея. Ефектът идва от страна на течната фаза, респективно от по-високи действителни скорости до мембраната (свързани с обемната част на течната фаза в реактора, $1-\varepsilon_G$), както и на механичното въздействие на мехурите върху мембраната, което отмива слоя отлагания. Съществуват разработки, които свързват всяко съпротивление на процеса в линейна зависимост от създадените от течната и газовата фаза срязващи напрежения на повърхността ѝ. Установено е, че от първостепенно значение за срязващите напрежения на мембранната повърхност е размерът на газовите мехурчета.

Концентрацията на твърда фаза и разпределението на частиците по размер има съществено влияние върху полето на скоростите и срязващите напрежения до мембраната, наблюдавано в диапазон от 1 μm до 100 μm диаметър на частиците. Частици с тези размери търпят процеси на агрегиране или дробене, чиято динамика е все още не достатъчно изследвана област. Оптималното действие на мембранный реактор е свързано с положението на мембранный модул в реактора; със съотношението газ/течност; с трансмембранното налягане и със създаването на достатъчни срязващи напрежения. Сравнително нови и малко на брой са опитите да се моделира процеса като се отчете динамиката на връзката между трансмембранното налягане, срязващите напрежения на мембраната и потока през мембраната.

Хидродинамиката, смесването на фазите и масопреносните параметри в газотечните реактори силно зависят от преобладаващия режим на течение на двуфазния поток. Според [137, 138] в реактори с аериране съществуват следните режими представени на Фигура 4.13:



Фигура 4.13 Режим на потоците във вертикална барботажна колона

a – хомогенен поток; b – турбулентен поток; c – смесен поток; d – тампонен поток;
e – пръстеновиден поток

Газосъдържанието е един от най-важните параметри, които се използват за описание на газотечните системи. Газосъдържанието (ε_G) се дефинира като обема на газовата фаза V_G , отнесен към целия обем на двуфазната смес ($V_G + V_L$) и се дава със следната формула:

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (4.1)$$

Стойността му дава индикация за потенциала на масопреноса и колкото е по-голяма, толкова повече е време пребиваването на газа в реактора (респективно времето за контакт). Стойността на газосъдържанието се определя главно от дизайна на барботьора, налягането, скоростта на аериране и въведената мощност при реакторите с бъркачка [136,137].

Въз основа на концепцията за лимитиращ клетъчния растеж субстрат, скоростта на нарастване на клетките може да се изрази като функция на концентрацията на клетките:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (4.2)$$

Специфичната скорост на клетъчен растеж μ е основен параметър, характеризиращ скоростта на нарастване на клетките. Тя зависи от концентрацията на лимитиращия субстрат съгласно модела, предложен от Жак Моно през 1942 г.:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} \quad (4.3)$$

където $\mu_{\max}$ е максималната скорост на клетъчен растеж, K_s е константата на Моно, а S е концентрацията на лимитиращия клетъчен растеж субстрат. Така кинетиката на клетъчен растеж се описва чрез модела на Моно като:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X \quad (4.4)$$

Съгласно кинетиката на Моно клетъчния растеж описва чрез двупараметричен модел, чиито параметри са максималната скорост на растеж и константата на Моно, подлежат на експериментално определяне. Параметърът $\mu_{\max}$ е максимално достижимата скорост на растеж, когато субстратът престава да бъде лимитиращ. Константата на Моно (K_s) е равна на концентрацията на субстрата, при която скоростта на клетъчен растеж е

половината от максималната. Стойностите на μ_{max} (Таблица 4.1) и K_s (Таблица 4.2) зависят от вида на микроорганизма, от скоростопределящия субстрат, от температурата и рН на средата [123, 139].

Таблица 4.1 Максимална специфична растежна скорост (μ_{max}) при различни микроорганизми

Микроорганизъм	μ_{max} (h ⁻¹)	Температура на култивиране, (°C)
Бактерии	0,6 – 1,2	37
Дрожди	0,3 – 0,5	30
Актиномицети	0,1 – 0,3	28
Гъби	0,1 – 0,3	28

Таблица 4.2 Типични стойности за K_s при различни микроорганизми и субстрати

Субстрат	K_s (мг/л)	Микроорганизъм
глюкоза	1.0	<i>Enterobacter aerogens</i>
глюкоза	2-4	<i>Escherichia coli</i>
глюкоза	25	<i>Sacharomyces cerevisiae</i>
рибоза	3	<i>Hansenula polymorpha</i>
метанол	120	<i>Hansenula polymorpha</i>
амоняк	0.1	<i>Enterobacter aerogens</i>
магнезий	0.6	<i>Enterobacter aerogens</i>

Това е процесът, при който хранителните вещества от ферментационната среда се превръщат в клетъчна маса и метаболити. Масата на образуваните клетки за единица консумиран субстрат се бележи с $Y_{X/S}$:

$$Y_{X/S} = \frac{\Delta X}{\Delta S} \quad (4.5)$$

Количеството на образуваните продукти за единица консумиран субстрат с $Y_{P/S}$:

$$Y_{P/S} = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (4.6)$$

Тези добивни коефициенти са мярка за ефективността на ферментационния процес.

Растежът на клетките и образуването на продукти са тясно свързани с използването на субстрата от хранителната среда. Тази връзка се демонстрира с уравненията на материалния баланс:

- по клетки:

$$\frac{dX}{dt} = \mu x - F_0 \frac{x}{V} \quad (4.7)$$

- по субстрат:

$$-\frac{ds}{dt} = \frac{F}{V} S_0 - \frac{\mu X}{Y_{X/S}} - \frac{q_p x}{Y_{P/S}} - mx - \frac{F_0}{V} S \quad (4.8)$$

- по продукт:

$$\frac{dP}{dt} = q_p x - F_0 \frac{P}{V} - KP \quad (4.9)$$

Уравнение (4.8) показва утилизиранието на субстрата, а уравнение (4.9) образуването на продукт. Където: $\frac{F}{V} S_0$ е внасяне на субстрат, $\frac{\mu X}{Y_{X/S}}$ е растеж, $\frac{q_p x}{Y_{P/S}}$ е синтеза на продукт, mx е разхода на субстрат за поддържане, $\frac{F_0}{V} S$ е загуба на субстрат с продуктите, $q_p x$ е синтеза на продукт, $F_0 \frac{P}{V}$ е отделения продукт, а KP е разграждането на продукт. Специфичната скорост на синтеза на продукт се бележи с q_p [g/g/h] [139]. Основният подход при изчислителната динамика на флуидите (Фигура 4.14) е при моделирането да се използват балансовите уравнения за маса, импулс и топлинна. За тези цел се приема, че изменението на величините във всяка от изследваните фази е непрекъснато.



Фигура 4.14 Схематично представяне на изчислителната динамика на флуидите

Основен физичен закон е този за съхранение на масата, от него се получава и т.нар. уравнение на непрекъснатостта:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho \vec{v}) \quad (4.10)$$

където плътността ρ е транспортната величина.

Скоростта на флуидното течение е основна величина в изчислителната динамика на флуидите и тя се определя от уравнението на движението популярно още, като уравнение на Навие-Стокс:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} = -\nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla \bar{\tau} - \nabla p + \rho \vec{g} \quad (4.11)$$

Тук скоростта сама по себе си не е транспортната величина – такава величина е импулса $\rho \vec{v}$. Тензорът на напреженията $\bar{\tau}$ играе ролята на дифузионния член и е функция от градиента на скоростта.

$$\tau_{ij} = -\Sigma_k \Sigma_l \mu_{ijkl} \frac{\partial v_k}{\partial x_l} \quad (4.12)$$

От уравнение 4.12 се получава за Нютонов флуид $\bar{\tau}$ да има вида:

$$\bar{\tau} = \mu[\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] + \left(k - \frac{2}{3}\mu\right)(\nabla \cdot \vec{v})\delta \quad (4.13)$$

където μ е динамичния вискозитет на флуида, който не зависи от тангенциалното напрежение τ и времето t за Нютонови флуиди.

Последните два члена в уравнение (4.11) са градиента на налягането p и силата на гравитацията $\rho \vec{g}$. Две неща затрудняват числената процедура с това уравнение – едното е нелинейната структура на конвективния член, а другото е налягането. Налягането няма свое балансово уравнение и за свиваеми флуиди се използва допълнително уравнението на състоянието ($\rho = p/(RT)$), чрез което се изчислява налягането, тъй като плътността се получава от уравнението на непрекъснатостта. Съвместното решаване на тези три уравнения (това на непрекъснатостта, на състоянието и това на Навие-Стокс) дава полетата на плътността, налягането и скоростта.

Турбулентният поток, има вихрова структура, при което се различават едромасштабни и дребномасштабни вихри. При преноса на импулс участват всички видове вихри. Най-големите вихри имат мащаб от порядъка на основното течение.

Първата полумемпирична теория за турбулентния пренос е теорията на Бусинеск (*Boussinesq*). По аналогия с ламинарните течения той въвежда, т.нар. турбулентен вискозитет:

$$\tau_{xy}^{(t)} = -\mu^{(t)} \frac{d\overline{v_x}}{dy} \quad (4.14)$$

Голямата трудност при решаването на задачи с турбулентност е, че за да се „обхванат“ тези високочестотни флуктуации е необходимо да се използват мрежи с много малки размери и много малки стъпки във времето. Броят на клетките N необходими за пълна тримерна турбулентна симулация е равен на:

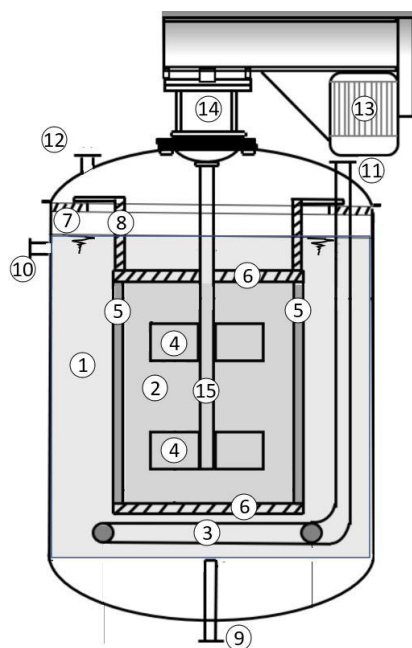
$$N = 5^3 \text{Re}^{9/4} \quad (4.15)$$

където Re е критерия на Рейнолдс за съответното течение. Първоначално стойността на турбулентния вискозитет $\mu^{(t)}$ е считана за постоянна, което е твърде далеч от реалната физическа картина на процеса.

Решението на турбулентните проблеми се свежда до определяне на турбулентните вискозитет. За целта са съставени модели за турбулентност, базиращи се на приблизителни емпирични уравнения.

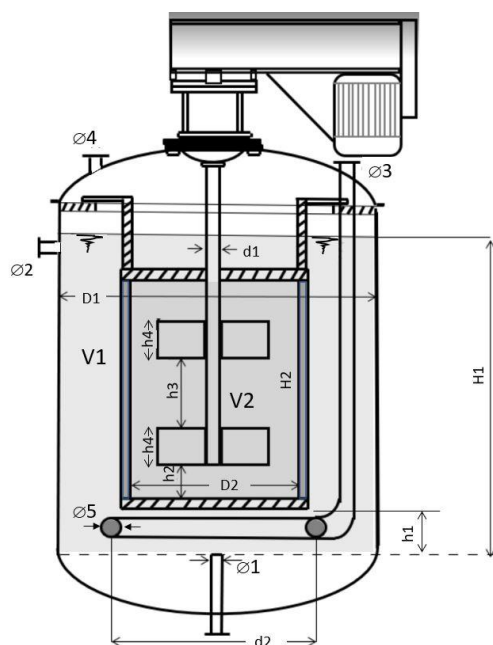
4.2. Проектиране на мембранен биореактор.

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 хранващата 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 елементите 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 мембрания 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. На Фигура 4.16 са показани размерите на съставящите части на биореактора.



Фигура 4.16 Оразмеряване на биореактора

Размерите на биореактора са: $V_1 - 0,0014 \text{ [m}^3\text{]}$; $V_2 - 0,0014 \text{ [m}^3\text{]}$; $D_1 - 0,067 \text{ [m]}$; $D_2 - 0,053 \text{ [m]}$; $H_1 - 0,201 \text{ [m]}$; $H_2 - 0,159 \text{ [m]}$; $d_1 - 0,002 \text{ [m]}$; $d_2 - 0,116 \text{ [m]}$; $h_1 - 0,021 \text{ [m]}$; $h_2 - 0,035 \text{ [m]}$; $h_3 - 0,056 \text{ [m]}$; $h_4 - 0,03 \text{ [m]}$; $\varnothing_1 - 0,01 \text{ [m]}$; $\varnothing_2 - 0,005 \text{ [m]}$; $\varnothing_3 - 0,01 \text{ [m]}$; $\varnothing_4 - 0,01 \text{ [m]}$; $\varnothing_5 - 0,01 \text{ [m]}$.

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:

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

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

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

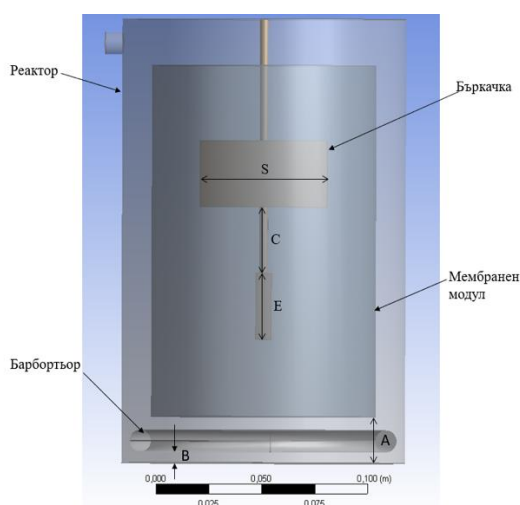
За параметрите на този модел използваме експериментални данни от Фигура 4.15 и Фигура 4.16 (клетъчния растеж): кинетика на Моно с $\mu_{\max} = 0.5 \text{ [h}^{-1}\text{]}$; $K_s = 0.12 \text{ [g/l]}$; $Y_{x/s} = 0.52$; начална концентрация на субстрат $S_0 = 2 \text{ [g/l]}$; проточен дебит в 1-ва камера $\dot{v} = 2 \text{ [l/h]} = 0,00056 \text{ [kg/s]}$; 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. Продуктът ANSYS представлява цялостен софтуерен пакет, който обхваща голяма гама от физични задачи и осигурява достъп до почти всяка сфера от инженерната практика. Софтуерът е широко използван от инженери и проектанти в широк спектър от индустриални задачи. Компанията се фокусира върху развитието на отворени и гъвкави решения, които дават възможност на потребителите да анализират проекти директно на работния плот.

ANSYS инструментите за анализ включват ANSYS Fluent и ANSYS CFX [142], които се предлагат отделно или заедно в модула ANSYS CFD [143]. 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. Потопената мембрана е поставена на разстояние $A=0,021$ [m] от основата на реактора и има височина $H=0,159$ [m] и диаметър $D=0,053$ [m]. Барботьорът с тороидална форма с диаметър $D=0,01$ [m] и радиус на пръстена $R=0.058$ [m], е разположен в долния край на реактора на разстояние $B=0.01$ [m] от основата. Долната бъркачка е разположена на разстояние $C=0,056$ [m] от основата на реактора като разстоянието между двете бъркачки е $E=0,03$ [m]. Този размер също отговаря и на височината им, а дължината е еднаква и за двете $S=0,06$ [m].



Фигура 4.17 Схематично представяне на експерименталния барботажен реактор

Включването на барботьор в конструкцията на реактора увеличава турбулентността и влияе върху скоростта на деформация по дължина на мембранный модул. Процесът на аериране има тенденция да бъде силно турбулентен, което налага подходящ модел на турбулентност. При компютърната симулация моделът за турбулентност $k-\epsilon$ се използва за правилно определяне на скоростта на деформация около стената на мембраната. Този модел на турбулентност обикновено се използва за моделиране на барботажни колони, тъй като е компромис между изчислителната точност и ефективността [145, 146]. Разпределението на скоростта на деформация по дължината на мембраната е по-хомогенно в присъствие на газ. Издигащите се газови мехурчета при среща с мембранната повърхност влияят в посока на намаляване на концентрационната поляризация и респективно на формирането на слой утайка върху нея [123].

Пълното моделиране на двуфазния поток в средата ANSYS бе извършено съгласно методологията включваща създаване на геометричен модел на обекта, омрежване на изследвания обект, настройка на променливите, описващи

физикохимичното поведение на флуида в реактора и задаване на началните и граничните условия на процеса.

За целите на изследването при изграждането на тримерен (3D) модел е генерирана първоначално двумерна (2D) схема.

За създаването на схемата, барботьора и бъркачките в средата на ANSYS Workbench Design Modeler са използвани някои от основните функции: Line – за построяване на линии; Circle- за изчертаване на окръжност и Cylinder- за построяване на цилиндър (външния реактор и мембрания модул).

Построяването на 3D геометричния модел се извършва, като се използват вече създадената скица (Sketch) и основните функции в среда ANSYS Workbench Design Modeler, описани по-долу.

- Функцията **Extrude** е използвана за изчертаване на входа на реактора и за бъркачката.  Extrude

- Функцията **Boolean** е използвана за изваждане на мембрания модул от цялата система и за изваждане на бъркачките от мембрания модул, така че да могат да бъдат отделни обекти.  Boolean

- Функцията **Revolve** е използвана за изчертаване на барботьора.  Revolve

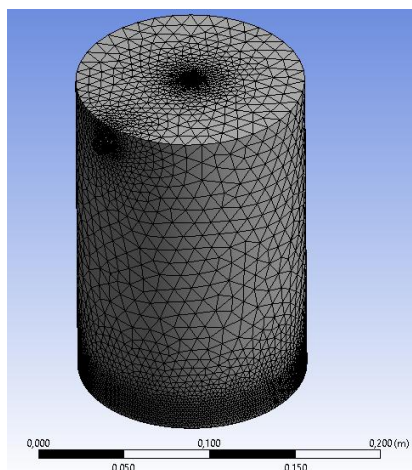
- Функцията **Pattern** е използване за построяване копие на бъркачката.  Pattern

- Функцията **Rotate** е използвана за завъртане на едната бъркачка на 90° градуса, така че да са кръстосани.  Rotate

- Функцията **Freeze** е използвана за „замразяване“ на телата, където е необходимо за да се избегне обединяването на тела.  Freeze

- Функцията **Unfreeze** е използвана за „размразяване“ на телата, където е необходимо за да обединят.  Unfreeze

В началото на процеса на моделиране е извършена компютърна симулация на процеса с мрежа от контролни обеми по подразбиране, генерирана автоматично от компютърната система, показана на Фигура 4.18.

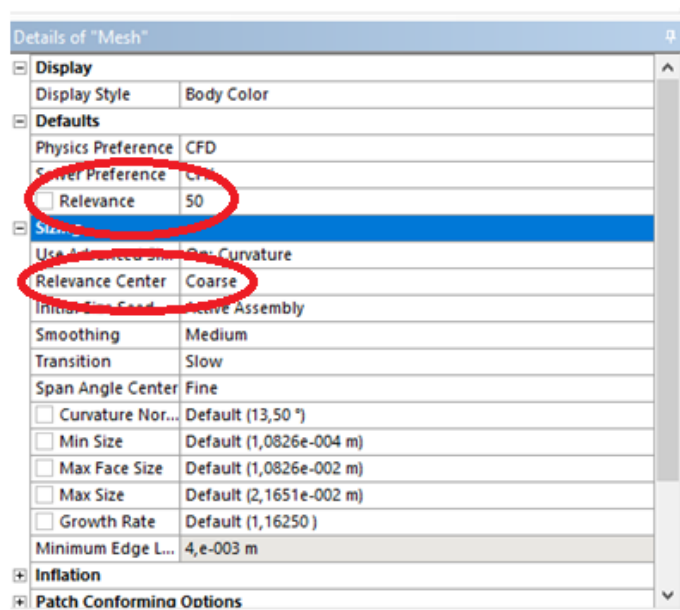


Фигура 4.18 Мрежа от контролни обеми по подразбиране

При автоматичното генериране на мрежата от компютърната система се вижда, че броят на елементите (Фигура 4.19) на получената мрежа е достатъчно голям за прецизно пресмятане на средното квадратично отклонение между итерациите за налягане и количество на движение.

+	Advanced	
+	Defeaturing	
-	Statistics	
	☐ Nodes	155935
	☐ Elements	879389
	Mesh Metric	None

Фигура 4.19 Брой на елементите на изследвания обект



Фигура 4.20 Позиции за съгъстяване на мрежата

Поради това не се налага да се правят промени за съгъстяване на мрежата (Фигура 4.20), единствено може да се направи опит за намаляването ѝ, поради факта че при такъв брой на елементи се нуждае от по-голямо изчислително време.

4.3. Симулационен анализ на мембранен биореактор.

Начални условия на численото изследване:

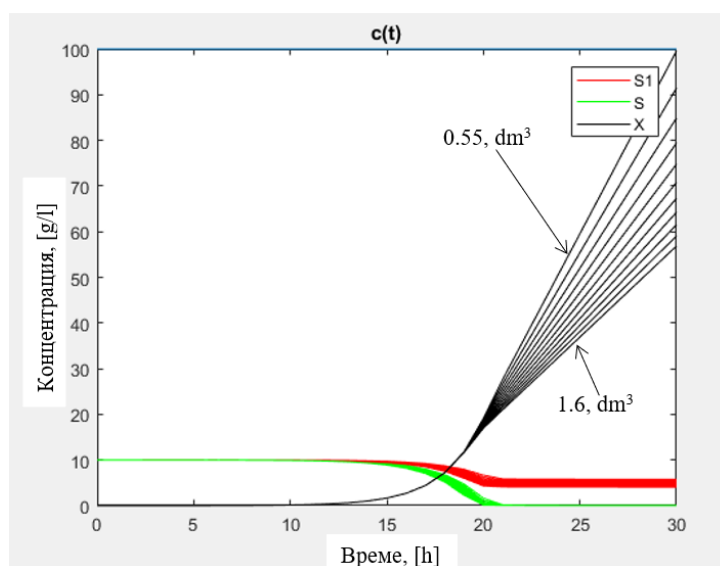
- количество на въздуха подаван от барботьора равно на 0,05 обемни фракции, което при конкретните размери на барботьора отговаря на 100 отвора, създаващи мехурчета с диаметър 6 [мм];
- количество на сместа, която включва два разтвора - Mixture и Kletki, на вход е равна на 0,95 обемни фракции;
- за изход 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 мембранный 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]. За наблюдение на хидродинамичните характеристики на процеса са използвани калкулатора на програмната система и допълнителни равнини.

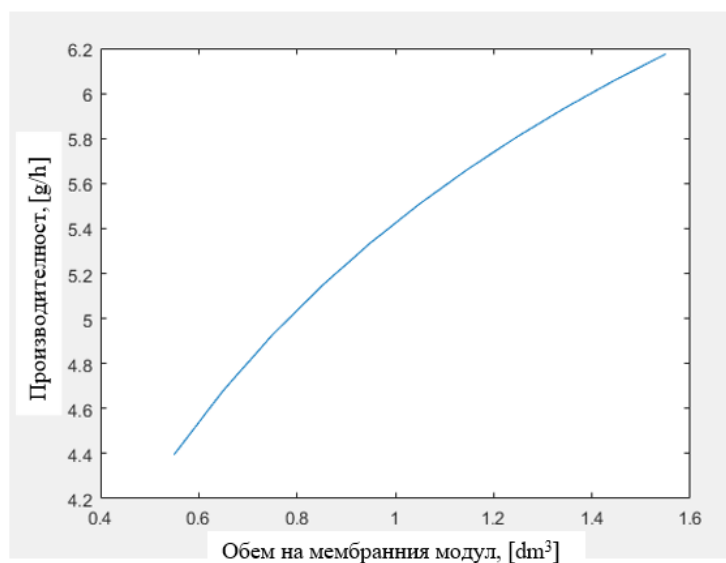
Проведени са числени експерименти в програмната среда MATLAB, за да се оразмерят работните параметри на мембранный модул и на целия реактор, като обемът

на мембрания модул се изменя от $0.55 \text{ [dm}^3\text{]}$ до $1.6 \text{ [dm}^3\text{]}$ със стъпка $0,1 \text{ [dm}^3\text{]}$. Проведена е компютърна симулация с различни обеми на реактора, за да се проследи клетъчния растеж и резултатите са представени на Фигура 4.21.



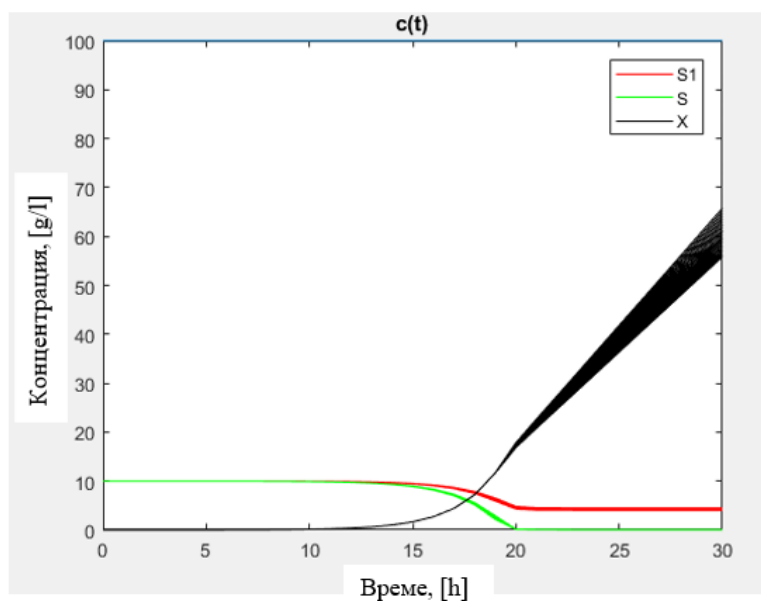
Фигура 4.21 Клетъчен растеж

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.

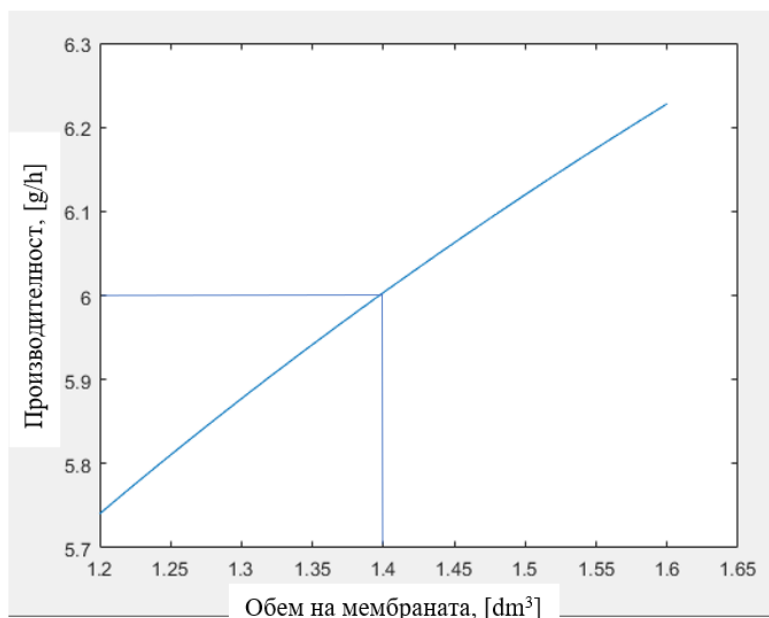


Фигура 4.22 Крива на производителността

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.



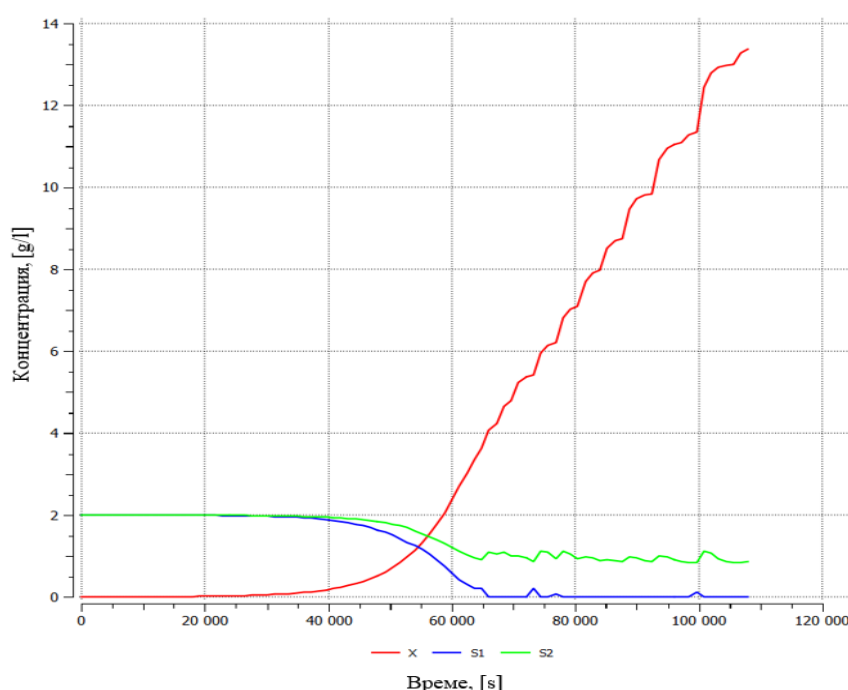
Фигура 4.23 Клетъчен растеж при начален размер на мембраната $1.2 \text{ [dm}^3\text{]}$



Фигура 4.24 Крива на производителността при размер на мембраната между $1.2 \text{ [dm}^3\text{]}$ и $1.6 \text{ [dm}^3\text{]}$

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].

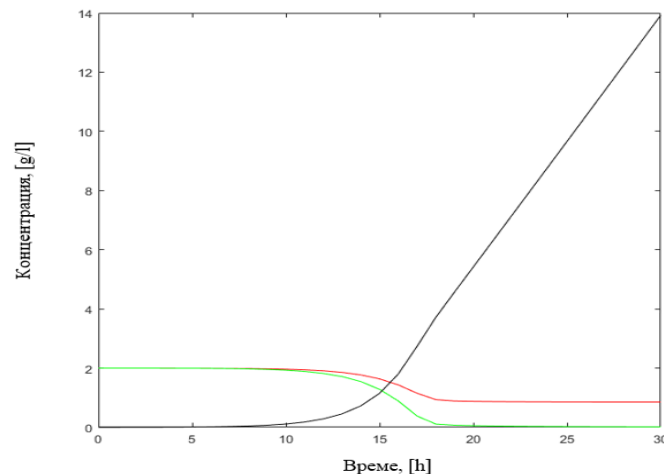
След определянето на размерите и работните параметри на реактора и на мембранный модул с MATLAB, са проведени компютърни симулации на клетъчния растеж в избрания реактор в програмната среда ANSYS. Графиките от Фигура 4.25 и Фигура 4.26 показват изменението на концентрацията на клетките във вътрешната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



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

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.

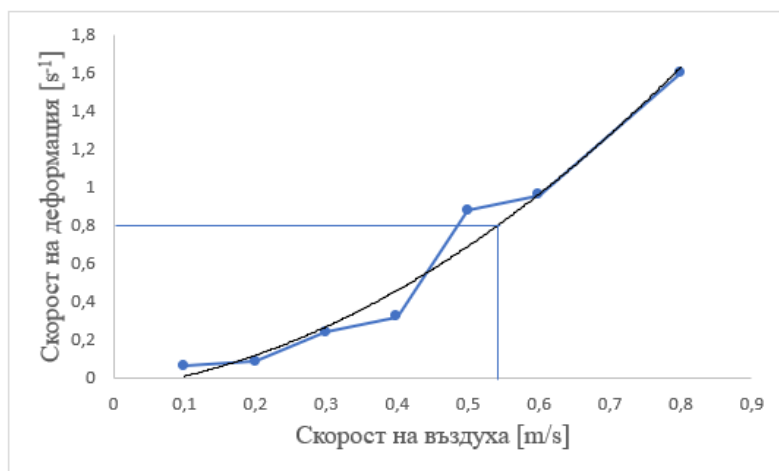


Фигура 4.26 Клетъчен растеж (получен с MATLAB)

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.

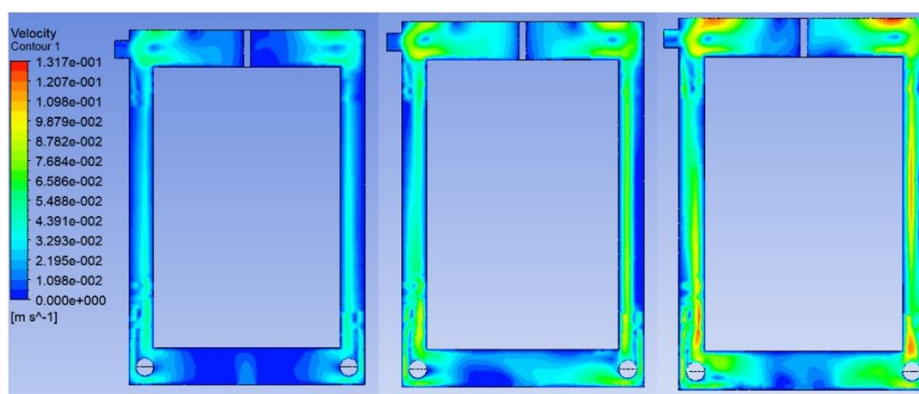
Представени резултатите на Фигура 4.27 показват зависимостта на скоростта на деформация при граничния слой от външната странна на мембраната. В програмната среда ANSYS CFX е изчислена скоростта на деформация в граничния слой при различна скорост на въвеждания въздуха от 0.1 [m/s] до 0.8 [m/s].



Фигура 4.27 Скорост на деформация в граничния слой

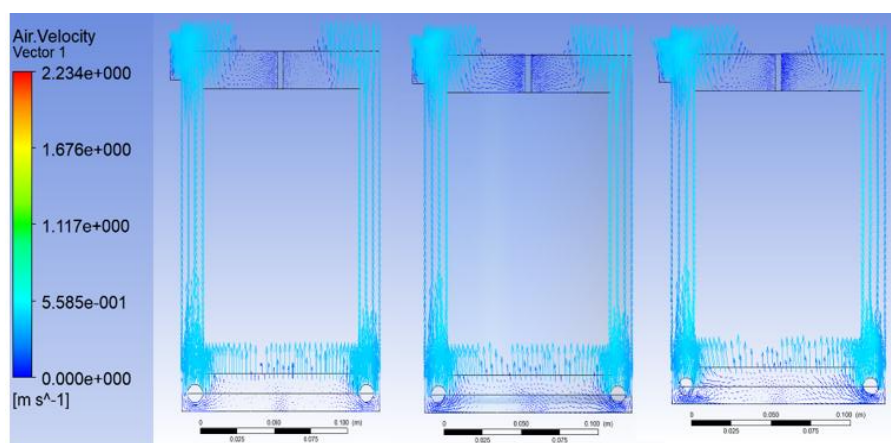
От графиката на Фигура 4.27 е видимо, че с увеличаване на скоростта на въздуха се увеличава и скоростта на деформация. От една страна тази тенденция предотвратява замърсяването на мембранный модул, но може да има неблагоприятно влияние върху клетките, които се развиват в реактора. За зададената минимална 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

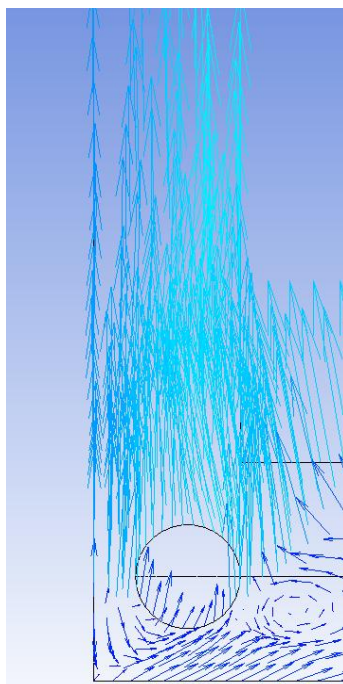
- (a) - при скорост на аериране 0.2 [m/s] ; (b) - при скорост на аериране 0.4 [m/s] ;
(c) - при скорост на аериране 0.6 [m/s]



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

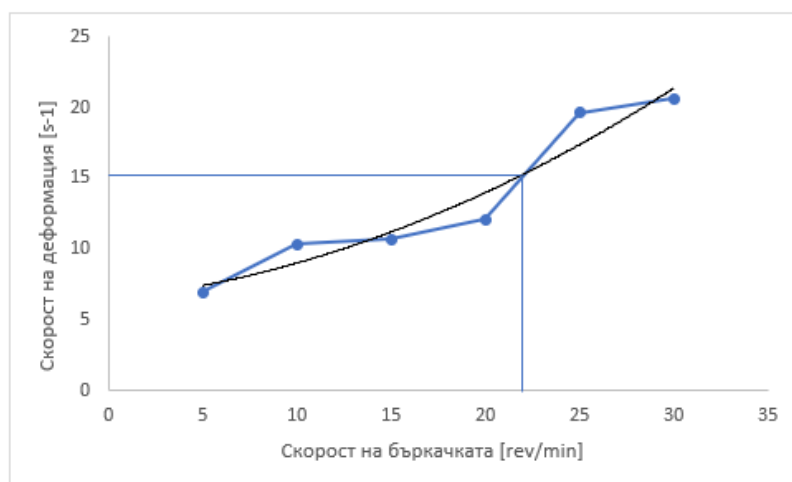
- (a) - при скорост на аериране 0.2 [m/s] ; (b) - при скорост на аериране 0.4 [m/s] ;
(c) - при скорост на аериране 0.6 [m/s]

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



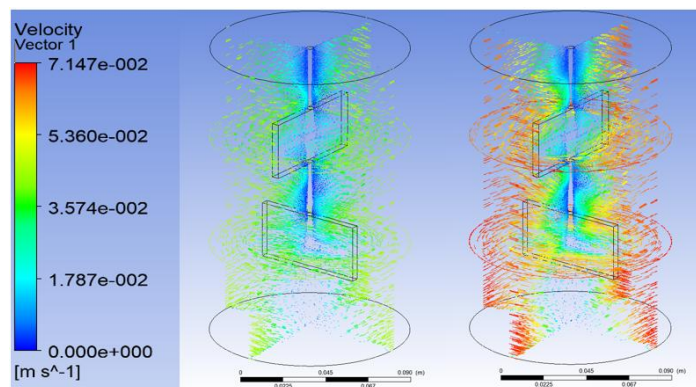
Фигура 4.30 Посока на движение на флуидите във външната камера (векторно представяне)

От горната фигура става ясно, че при по-високи скорости на аериране се достига по-голяма турбулентност около мембранный 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].



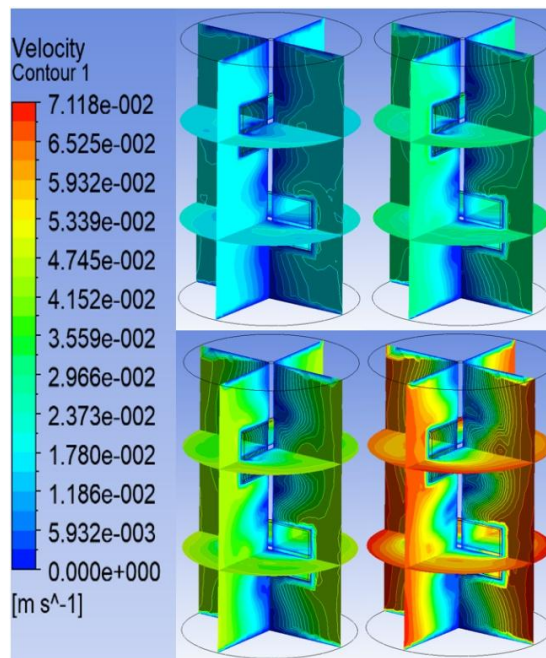
Фигура 4.31 Скорост на деформацията предизвикана от бъркачката

За достигане на зададената максимална скорост на деформацията $15 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, 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

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

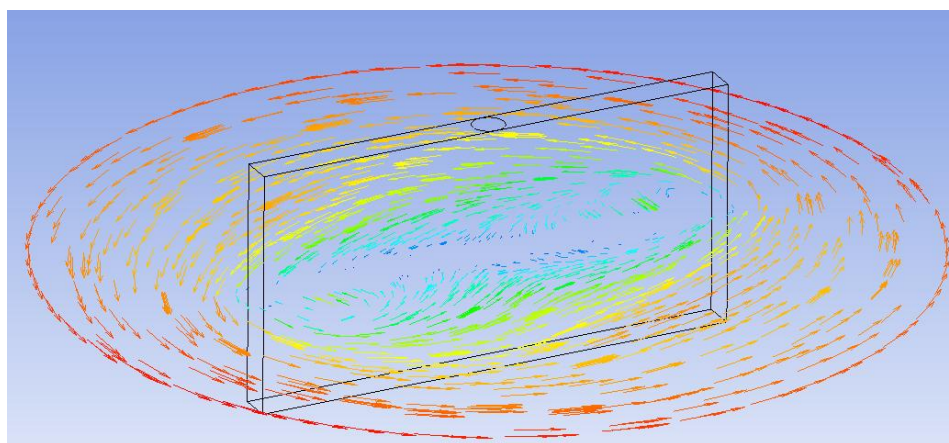


Фигура 4.33 Скорост на деформация във вътрешната камера

(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)

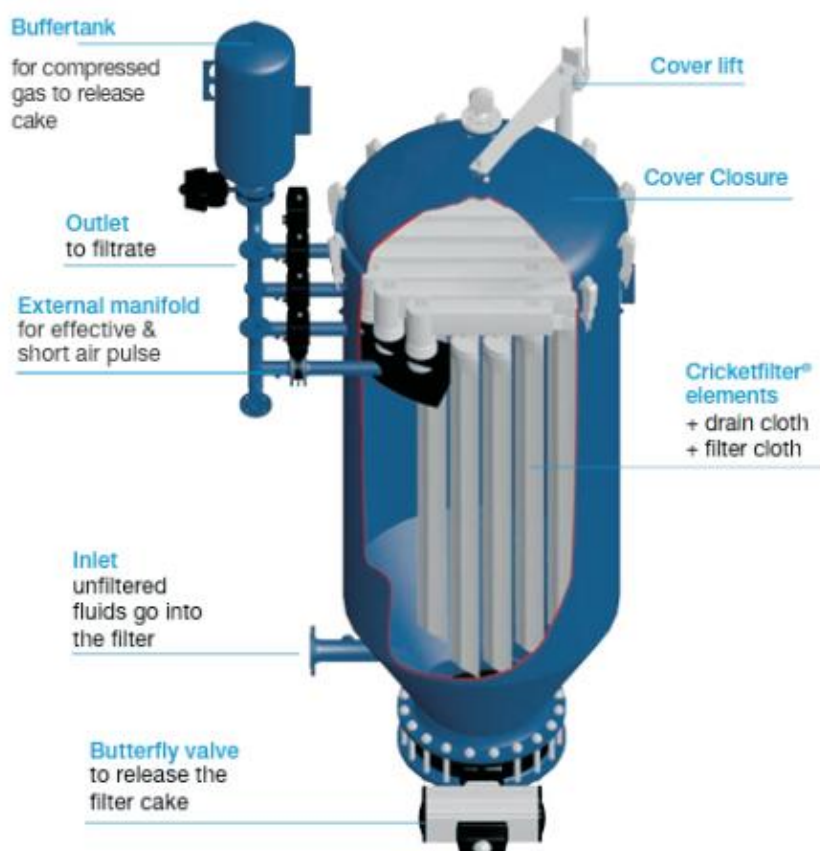
4.4. Управление на крикет филтър.

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. Крикет филтърът предлага гъвкавост за широк спектър от приложения, като същевременно осигурява устойчивост в критични среди. Предлага се стандартно от неръждаема стомана тип 316L. Въглеродна стомана и други специални легирани материали, конструктивни налягания/температурни стойности и конструктивни кодове могат да бъдат предоставени при поискване. За изхвърлянето на кейка, каретката с филтърните листа се премества извън филтърния

резервоар с електрическа или хидравлична система, която също така задейства байонетното затваряне. След това кейкът се изхвърля, чрез пневматичен вибратор [115].

Предимствата на този филтър са: до 40% по-голяма площ на филтриране от традиционните импулсни тръбни филтърни системи, голяма площ на филтриране в рамките на малък отпечатък, херметически затворена система, която може да бъде напълно автоматизирана, подходящ за директна филтрация с плат или филтрация с предварително покритие, високо качество на филтрата, ниска поддръжка и не на последно място е подходящ за широк спектър от приложения.

Крикет филтърът е лесен за почистване. Той използва въздушни или газови импулси за почистване на елементите секция по секция, без да е необходим вибратор. Крикет филтърът може да се използва с филтърни платове с различни размери на порите и материали. Това намалява и понякога елиминира необходимото количество допълнително предварително покритие, което прави филтрацията по-икономически изгодна. Възможно е да се автоматизира, като по този начин се осигурява ниска себестойност на необходимата поддръжка [115].



Фигура 4.35 Крикет филтър

Филтрацията под налягане е метод, използван за отделяне на твърди вещества от течности, има дълга история, датираща от древни времена. Концепцията за използване на налягане при преминаване на течности през пореста среда за отделяне на твърди вещества може да се проследи до египтяните, които са използвали рудиментарни методи за филтриране на вода за питейни нужди. Филтрацията под налягане обаче като систематичен процес започва да се развива по време на индустриалната революция през 18-ти и 19-ти век. Разработването на първата филтър-преса се приписва на сър Чарлз Бари през 1853 г. Сър Ричард Танги обаче патентова дизайна и го въвежда в търговската мрежа през 1858 г. Ранната филтър-преса се състои от серия покрити с плат рамки, разположени между две тежки плочи. Налягането се прилага ръчно, за да се прокара течността през платното, оставяйки след себе си филтърна утайка. Едно значително развитие във филтрацията под налягане се случва в началото на 20-ти век с изобретяването на филтър-пресата от Чарлз Пак. Филтър-пресата използва серия от плочи с филтърни платна за отделяне на твърди вещества от течности под налягане. Това изобретение революционизира процесите на промишлена филтрация, особено в индустрии като минно дело, химическа преработка и пречистване на отпадни води.

През следващите десетилетия са направени различни подобрения и иновации в системите за филтриране под налягане, включително въвеждането на автоматични и непрекъснати процеси на филтриране. Тези подобрения повишават ефективността и производителността в индустриите, зависими от филтрацията, като допълнително затвърждават филтрацията под налягане като ключова технология [1]. Процесът на филтриране под налягане може да се обобщи в 7 части, които са както следва:

- Приготвяне на суспензия: Процесът започва с приготвянето на суспензия или суспензия, съдържаща течност и твърди частици. Тази смес може да бъде получена от различни промишлени процеси, като например минно дело, химическо производство или пречистване на отпадни води.

- Пълнене на филтър-пресата: Суспензията се изпомпва във филтър-пресата, специализиран апарат, състоящ се от поредица камери, образувани от плочи и рамки. Всяка камера е облицована с филтърна среда.

- Прилагане на налягане: Плочите на филтър-пресата се притискат една към друга, прилагайки механична сила върху суспензията. Това налягане принуждава течния

компонент да преминава през филтърната среда, оставяйки твърдите частици да образуват филтърна утайка.

- Филтрация и образуване на филтърна утайка: Докато течността преминава през филтърната среда, твърдите частици се задържат и във всяка камера се натрупва филтърна утайка. Дебелината на филтърната утайка зависи от характеристиките на суспензията и изискванията за филтрация.

- Промиване на филтърната утайка (по избор): В някои приложения допълнителна стъпка включва промиване на филтърната утайка с вода или други подходящи течности за отстраняване на всички останали примеси или остатъчен матернен разтвор.

- Сушене (по избор): В зависимост от предназначението на филтрираните твърди вещества, може да се използва стъпка на сушене за намаляване на съдържанието на влага във филтърната утайка.

- Изхвърляне на филтърната утайка: След като процесът на филтриране приключи, филтърната утайка се изхвърля от филтър-пресата. Сега избистрената течност, свободна от повечето твърди частици, се събира за по-нататъшна обработка или обезвреждане [1].

Научните подходи за разбиране на филтрацията датират от 1850-те години, когато е определена пропорционалната връзка между пада на налягането Δp и течния поток Q през уплътнен слой от твърди вещества. Физически погледнато, твърдата течна суспензия преминава през канали, които се образуват в слоя. Загубите от триене, в зависимост от вискозитета и режима на потока, възникват, когато средата преминава над повърхност. По-големите частици ще започнат да се натрупват от горната страна на кейка, която следователно нараства с времето. По-малките частици постепенно се прилепват към стени и кухини, докато преминават през каналната матрица.

Загубите на налягане през кейка са свързани с дълбочината на проникналата среда, което допълнително влияе върху качеството на разделяне. Характеристики като разпределение на размера на частиците, форма и морфология, повърхностен заряд и pH ще определят градиента на налягането в целия слой (Tarleton and Willmer (1997)) [111-114]. Удобно е да се изрази зависимостта на пада на налягането на потока посредством съпротивление на кейка α :

$$Q = \frac{A\Delta p}{\mu L\alpha} \quad (4.19)$$

Тук L означава мярката за дълбочината на слоя, A - площта на напречното сечение, а μ - вискозитета. В действителност α не е постоянно в целия филтърен утайка, тъй като почти всички филтърни утайки проявяват свиваемост - което означава, че свойствата на пропускливост в утайката не са постоянни. За ограничен диапазон от налягания, емпиричното приближение е дадено от:

$$\alpha(\Delta p, n) = \alpha_0 \Delta p^n, \quad (4.20)$$

където n е индекс на свиваемост (0 означава несвиваем материал) и α_0 е референтно съпротивление. Ако се желае по-удобен израз, решението е осредняване по дълбочината на кейка, както е изведено например от Tien (2006) [111], което води до:

$$\bar{\alpha}(\Delta p, n) = \alpha_0 \Delta p^n. \quad (4.21)$$

За да се разшири описателният характер на уравнение (4.19) до целия цикъл на филтрация, трябва да се установи връзката между растежа на кейка и времето. Ако концентрацията на натрупани частици върху горния слой ($\bar{c}$) и по същия начин структурната цялост на кейка са достатъчно постоянни то,

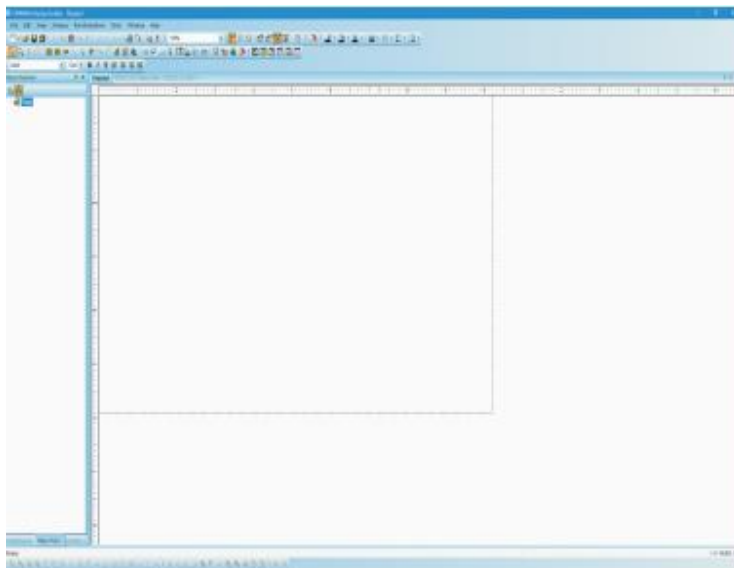
$$L = \frac{\bar{c} \int Q dt}{A} = \frac{\bar{c} V}{A}. \quad (4.22)$$

Дава желаната еквивалентност, където V означава количеството на преработения филтрат. По този начин, уравнение (4.19) и (4.22) и в крайна сметка (4.21) дават необходимата връзка между времето и филтрацията, преработения филтрат и пада на налягането:

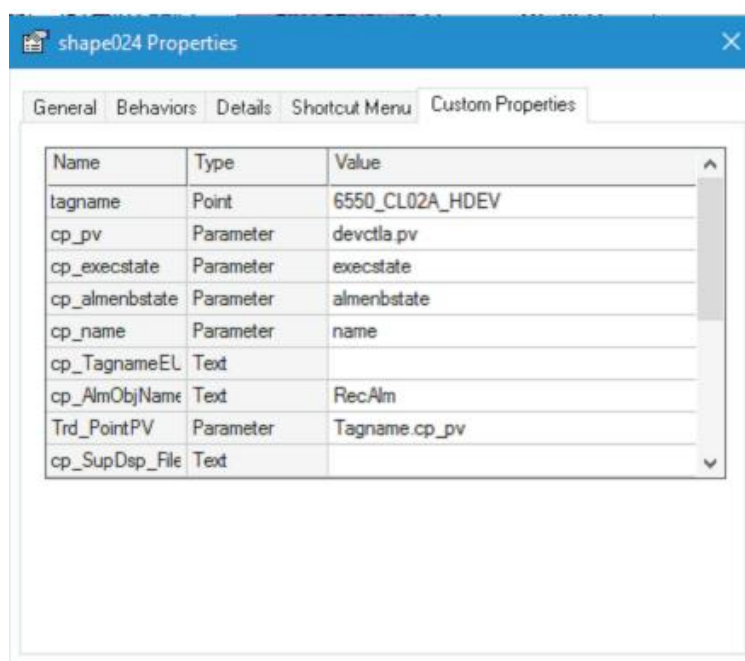
$$\frac{dt}{dV} = \bar{\alpha} \mu \bar{c} \frac{V}{A^2 \delta p} + \frac{\mu R_m}{A \delta p} \quad (4.23)$$

В уравнение (4.23) е включен втори член, който отчита съпротивлението на средата през мембраната (R_m). Общоприето е R_m да се разглежда като константа, освен това съпротивлението на филтърната маса обикновено е по-голямо с няколко порядъка. Надеждните първи главни модели са оскъдни и сложни; следователно, най-добрата практика е да се определят α , c или R_m експериментално в лабораторни или в идеалния случай в пилотни експерименти. Трябва обаче да се има предвид, че дори междумащабната валидност обикновено е проблем, който е представен от Тарлетън и Ханкок (1997) [111-114].

Ако не са в програмен режим, тогава програмата забелязва и активира handler ABORT/RESTART. След създаването на стратегията за управление на процеса, следващата стъпка включва създаване на дисплей, от който операторите могат да виждат какво се случва с крикет филтъра в реално време. Това се прави в HMI Display Builder. Този пакет е използван за създаване на дисплея за управление на крикет филтъра. HMI Display Builder е част от Experion Process Knowledge System и е графичен инструмент за създаване на потребителски дисплеи с помощта на уеб-базирани функции.



Фигура 4.38 HMI Display Builder



Фигура 4.39 Необходими параметри за конфигуриране на графичен обект

В библиотеката с обекти (регулатори, помпи, двигатели, индикатори, алармени обекти и други) са налични няколко вградени графики, които потребителите могат да включат в дисплеите. Фигура 4.38 показва изглед от HMI Display Builder, а Фигура 4.39 показва необходимите параметри за конфигуриране на графичен обект.

Фигура 4.40 Общ преглед на процеса

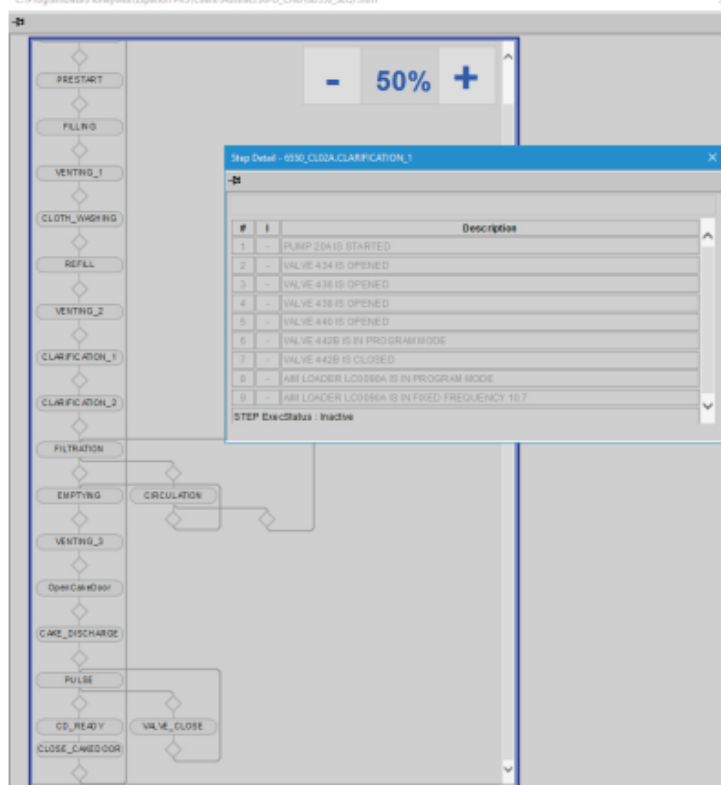
Създаденият дисплей може да бъде извикан от оператора на станцията. Оттам операторът може да контролира крикет филтъра и да вижда точно какво се случва със системата в реално време, а благодарение на функции като „command disagree“, той може да определи дали клапанът например е напълно затворен или не (Фигура 4.40).

На предишната фигура е показано по време на всяка стъпка кои клапани се отварят и има възможност за спиране на процеса в определен момент, благодарение на функцията „задържане/спиране“. По този начин операторът може да контролира системата по-добре и да види дали някой от клапаните или помпите има проблем с изпълнението на командата. По време на технически модификации или смяна на филтър, операторът може да избере един от филтрите, така че процедурата да не спира и по този начин цената на продукта да не бъде променяна.

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.

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



Фигура 4.42 SCM shape

Библиотеката HMI също така предоставя шейп за SCM (Фигура 4.42), точно както на предишната Фигура 4.40, тук могат да се видят стъпките, както и командите, които се изпълняват по време на стъпката. 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 модула configuration studio. Това представяне определено е подобрение спрямо текущото активно изобразяване на процеса на филтриране, който е активен на място.

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. Тези нагреватели играят ключова роля в осигуряването на контролирана топлинна енергия за основни технологични операции, включително предварително загряване на хранването, изпаряване и реакционно нагряване. Възможността за превключване или смесване на горива позволява непрекъсната работа по време на прекъсвания на доставките, дейностите по поддръжка или в отговор на икономически и екологични съображения. Съвременните нагреватели с двойно горене интегрират усъвършенствани архитектури за управление, включително разпределени системи за управление и системи за управление на горелките, които поддържат точни съотношения гориво-въздух, наблюдават условията на пламъка и управляват автоматизираното превключване на горивото. Включването на технология за горелки с ниски емисии на азотни оксиди (NOx) и алгоритми за оптимизация на горивния процес допълнително подобрява топлинната ефективност, като същевременно намалява емисиите. По същество, двойните нагреватели представляват надеждно, адаптивно и енергийно ефективно решение за съвременните технологични индустрии. Способността им да поддържат производителност при различни видове гориво ги прави незаменими за постигане на непрекъснатост на работата, безопасност на процесите и цели постигане на устойчивост в сложни индустриални среди [94-96, 99, 100].

Процесът започва от „захранващ“ блок, който представлява границите на инсталационната батерия. След това пътят на потока се разделя на четири паралелни

прохода, които са идентични по структура и дизайн. След едно преминаване през „преход едно“, суровият петрол преминава от границите на батерията през колектора до регулиращ вентил за поток 32FV240 и по-нататък до изолационен вентил 32ISV600. След това суровият петрол постъпва в секцията за конвективен топлообмен, където за кратко напуска пещта и се инжектира с ускоряваща пара (при регулиране на потока). След това флуидът отново влиза в пещта в секцията за лъчист топлообмен. След като премине през лъчистата секция, суровият петрол излиза от пещта в главен колектор, където се съединяват четирите прохода. Възможно е да има известно проблясване в този колектор, преди горещият суров петрол да излезе от границите на инсталационната батерия.

Газообразното гориво и мазутът следват относително успореден път. И двете се подават от неограничени колектори, преминават през регулиращи вентили 32PV320/32FV220, преминават през изолационни вентили 32ISV621/32ISV622 към горелките. В горелките горивото изгаря, за да образува продукти на горенето, при условие, че е налично необходимото количество въздух и пилотните горелки са запалени. Тези газове преминават през радиационната секция към конвективната секция, нагоре в прегревателя и нагоре през комина в атмосферата. Тягата в пещта се създава от разликата в плътността между горещите димни газове и относително по-плътния атмосферен въздух.

Парата идва от нисконапорния колектор, където се разделя преди прегревателя, за да заобиколи нагревателя за контрол на температурата или да премине през прегревателя, за да се нагрее. Прегрялата пара или се изпуска в атмосферата, или се изпраща към потребители на пара чрез контрол на потока. Количеството гориво, подавано към горелките, се контролира от изходната температура на нагрятия технологичен материал. Контролът на единия или и на двата горивни потока се постига с температурен регулатор, каскадно свързан чрез два автоматични регулатора към двата контролера за гориво. Температурният регулатор 32TC120 изпраща своя изход към два автоматични регулатора 32PX320 и 32FX230. Автоматичната система за управление изпраща изходния сигнал съответно към контролера на налягането на горивния газ 32PC320 и регулатора на потока на мазута 32FC230. Преминаването към каскаден режим без скокове е възможно чрез вътрешно изчислен член на отклонение в автоматичните регулатори. Членът на отклонение намалява до нула за предварително определен период от време. Подаването към пещта се контролира от главен контролер на потока, каскадно свързан към четири независими регулатора на потока за съотношение/отклонение.

Главният контролер 32FC250 изпраща своя изход към всеки от четирите проходни контролера (32FC240, 32FC241, 32FC242 и 32FC243). Четириходните контролери умножават изходния сигнал по неговото съотношение (съотношение = 1) и добавят неговото отклонение, за да определят зададената му точка. Четириходните контролери автоматично изчисляват члена на отклонението, за да осигурят безпроблемно прехвърляне при превключване в каскаден режим. При проектни условия всеки проход ще има един и същ дебит.

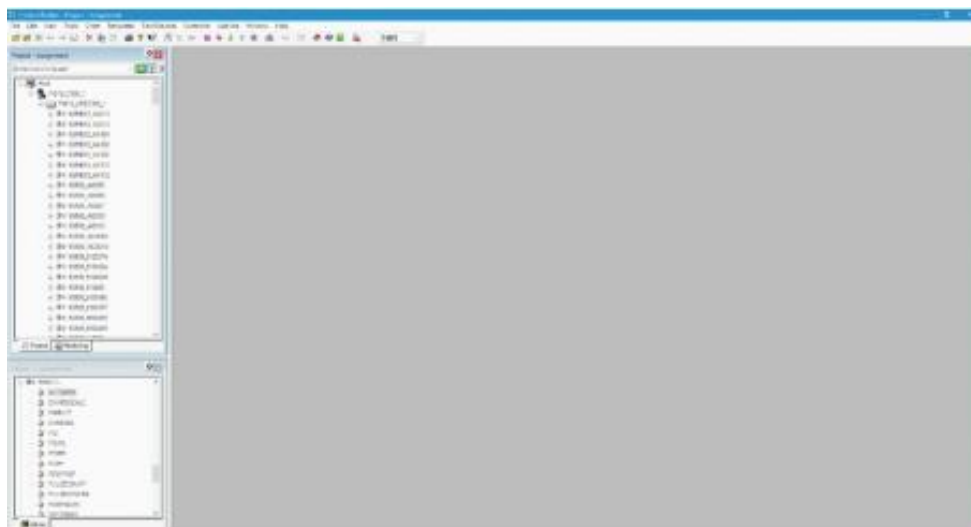
В реални условия тръбите в нагревателя ще се замърсяват различно в зависимост от местоположението им в горивната камера. Изходната температура на всеки проход често е различна, понякога някои индикатори могат да се задействат в режим на аларма, докато други не са близо до условията за аларма. За да се реши този проблем, индивидуалните членове на отклонението на четириходните контролери се използват за регулиране на зададената точка на всеки регулатор на потока. Докато в каскаден режим, главният контролер продължава да регулира зададените стойности на контролера на прохода, докато вторичните контролери вземат предвид въведената от оператора или първоначално изчислената стойност на отклонение.

Следователно, когато един проход има по-висока температура от другите проходи, потокът може да се увеличи към този проход чрез увеличаване на отклонението на контролера на потока. Увеличаването на потока ще доведе до намаляване на температурата на изхода и също така ще доведе до намаляване на дебита от другите проходи, за да се поддържа зададената стойност за 32FC250. Намаляването на потока през другите проходи води до повишаване на техните изходни температури. Процедурата за регулиране на потоците за поддържане на сходни изходни температури се нарича балансиране на проходи [94-96, 99, 100, 121].

4.7. Симулационен анализ на двуслоен нагревател.

Стратегията за управление на двуслойния нагревател е разработена в Honeywell Experion Process Knowledge System (PKS), която е модерна разпределена система за управление с интегрирана платформа за автоматизация на технологични процеси [96, 99, 100].

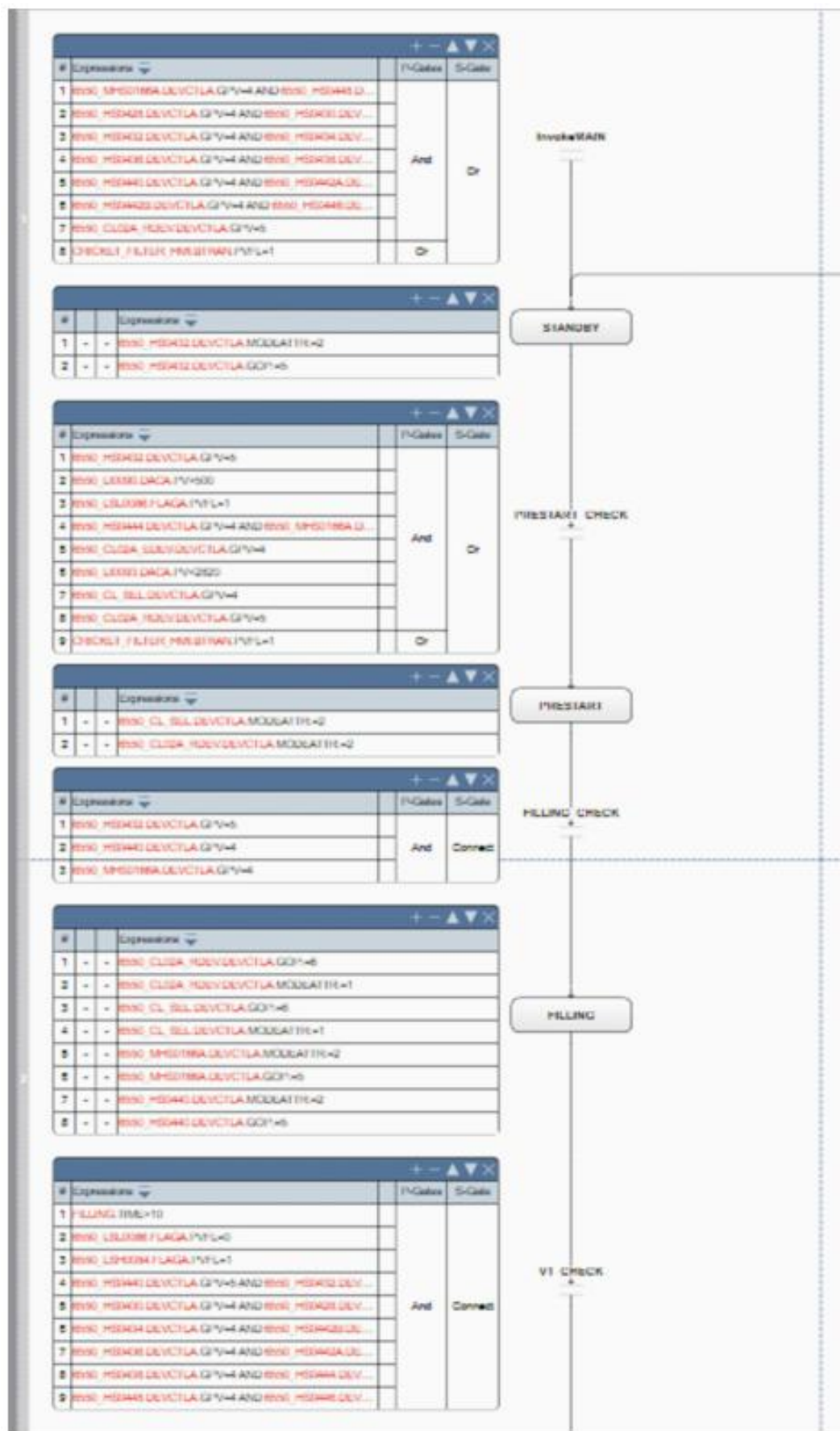
Програмирането и конфигурирането на стратегиите за управление в системата се извършва чрез софтуерния пакет Control Builder (Фигура 4.43). Той предоставя графичен интерфейс за изграждане на стратегии за управление на процеси.



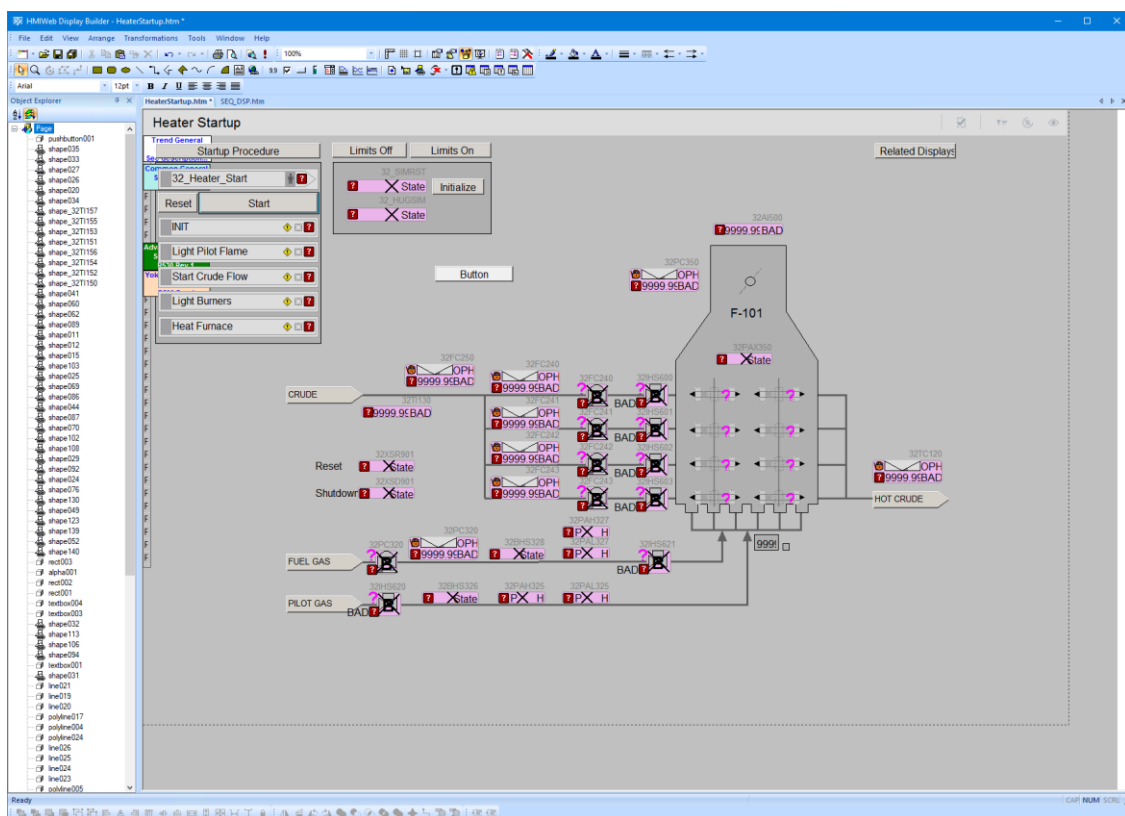
Фигура 4.43 Control Builder

Конструкторът на контроли позволява на потребителя да създава логически или процесни стратегии за управление с помощта на специфични блокове, които могат да бъдат намерени в системната библиотека. 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). В Experion, модулите за последователно управление изпълняват последователно управление, а модулите за управление на рецепти изпълняват процедурно управление. Модулите за последователно управление и свързаните с тях функционални блокове са включени в стандартната система Experion [117-119]. Модулът за последователно управление (SCM) и модулът за управление на рецепти (RCM) са контейнери, съставени от един или повече манипулатори. Всеки SCM манипулатор може да съдържа преходни, стъпкови и/или синхронизационни блокове.

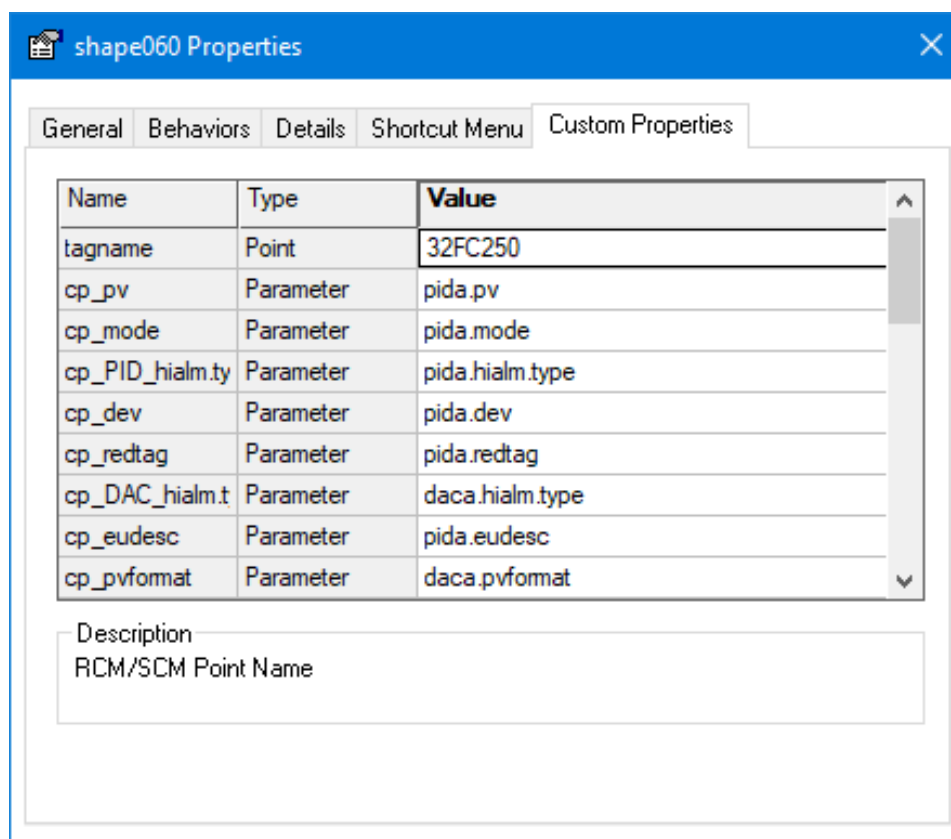
Всеки RCM манипулатор може да съдържа фазови, преходни, стъпкови и/или синхронизационни блокове. SCM командите могат да се изпълняват само ако клапаните или помпите в този сценарий са в програмен режим. Ако не са в програмен режим, програмата забелязва и активира манипулатора ABORT/RESTART. След създаването на стратегията за управление на процеса, следващата стъпка включва създаване на дисплей, от който операторите могат да виждат какво се случва с двойния нагревател в реално време. Това се прави в HMI Display Builder. Този пакет е използван за създаване на дисплей за управление на двойния нагревател. HMI Display Builder е част от системата за знания на Experion Process и е графичен инструмент за създаване на потребителски дисплеи с помощта на уеб-базирани функции.



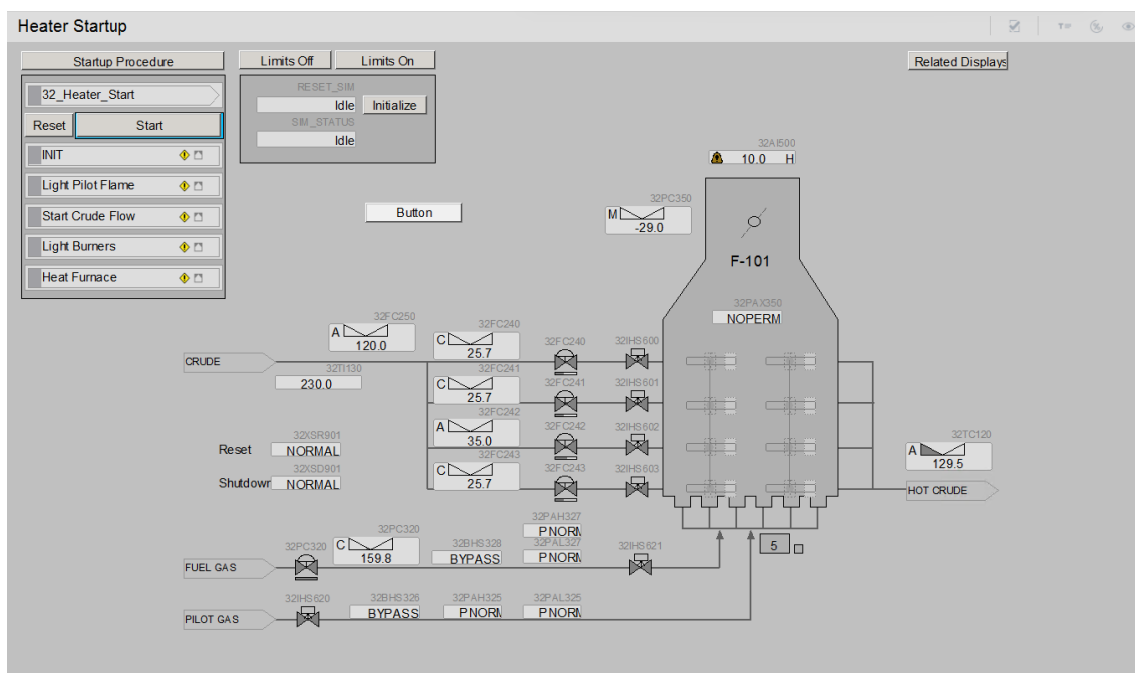
Фигура 4.44 Sequence Control module



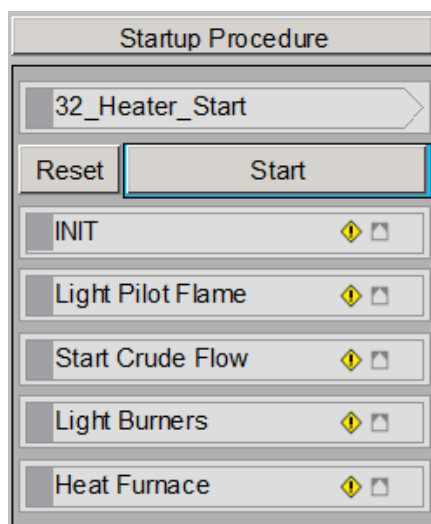
Фигура 4.45 HMIWeb Display Builder



Фигура 4.46 Необходими параметри за конфигуриране на графичен обект



Фигура 4.47 Общ преглед на процеса

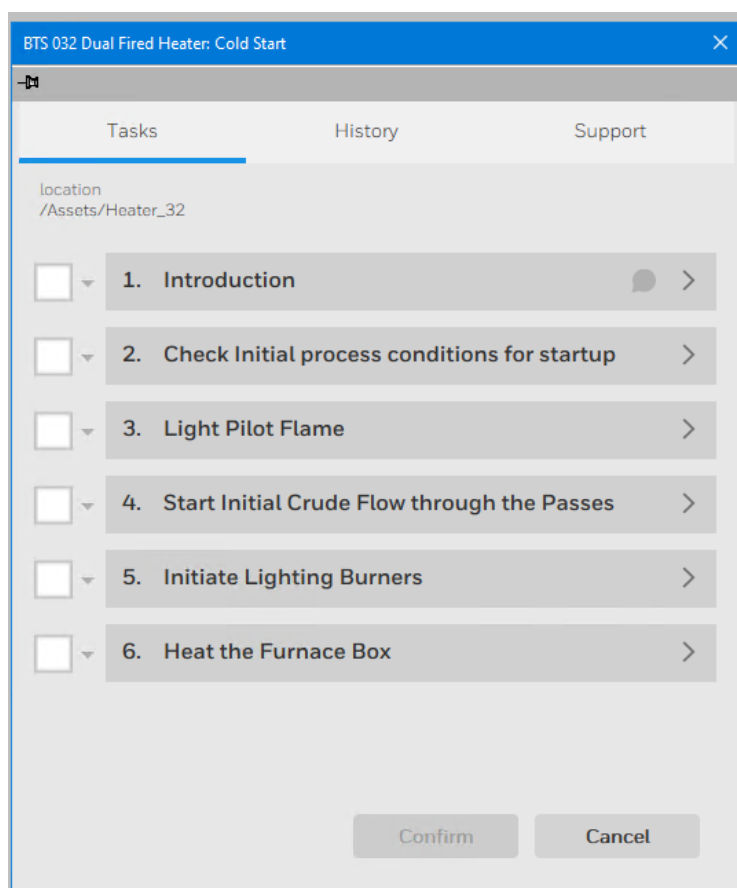


Фигура 4.48 Конфигурирани стъпки за изпълнение

В библиотеката с обекти (регулатори, помпи, двигатели, индикатори, алармени обекти и други) са налични няколко вградени графики, които потребителите могат да включат в дисплеите. Фигура 4.44 показва изглед от HMI Display Builder, а Фигура 4.45 показва необходимите параметри за конфигуриране на графичен обект. Създаденият дисплей може да бъде извикан от оператора от станцията. Оттам операторът може да контролира процеса и да вижда точно какво се случва със системата в реално време, а благодарение на функции като команда „несъответствие“, може да определи дали вентилът например е напълно затворен или не (Фигура 4.47) [96, 99, 100].

Фигура 4.48 показва стъпките, които трябва да бъдат изпълнени, и позволява спиране на процеса в определен момент, благодарение на функцията за задържане/спиране. По този начин операторът може да контролира системата по-добре и да види дали някой от клапаните или помпите има проблем с изпълнението на командата.

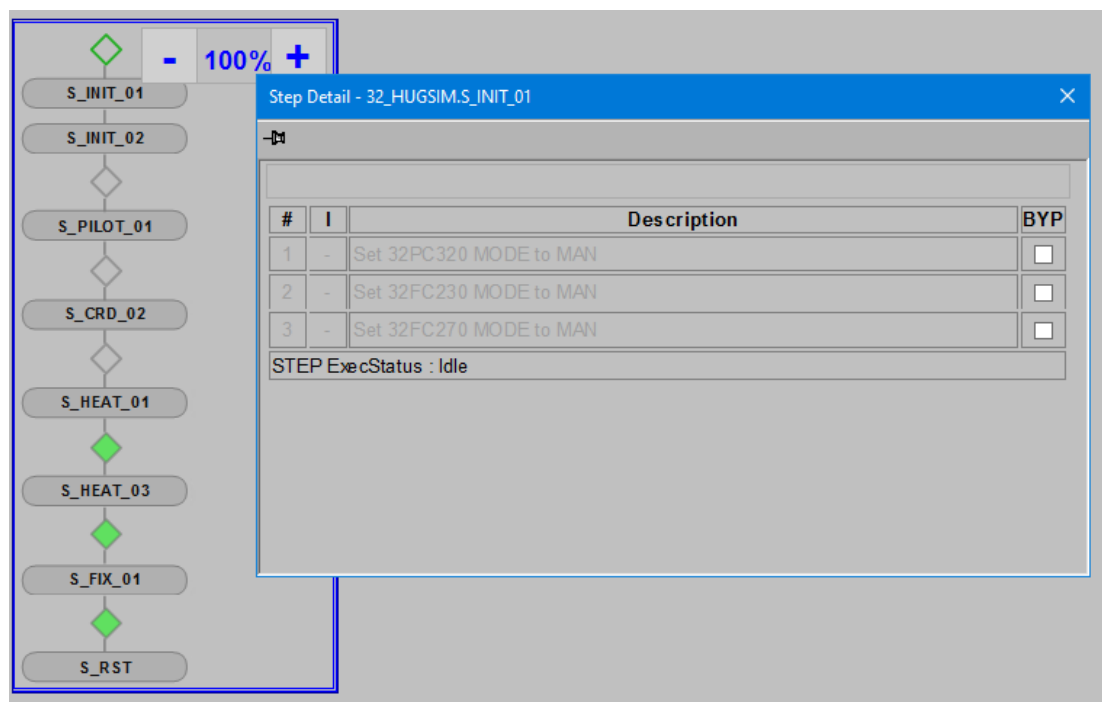
По време на технически модификации или повреди на предавателя, операторът може да избере от списъка с аларми новодобавените електронни работни инструкции (EWI) (Фигура 4.49), които са ефикасен начин за обяснение на стандартни работни процедури за често изпълнявани задачи, като по този начин се гарантира правилно и последователно изпълнение на задачите.



Фигура 4.49 Електронни работни инструкции (EWI)

Това помага за намаляване на грешките в сложни процедури и позволява на операторите на различни места да работят заедно, за да изпълняват инструкциите, така че процедурата да не спира и по този начин цената на продукта да не бъде засегната. Станцията позволява на оператора да вижда всички активни аларми, които могат да се видят в списъка с аларми. Фигура 4.49 показва по-подробен поглед върху стъпките на

двойния пожарен отоплител. Този дисплей позволява на оператора да види действителната стъпка и ако е необходимо, операторът може да поеме контрол. HMI 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

C:\ProgramData\Honeywell\Experion PKS\Client\Abstract\KPO_CNU\60550_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 4.51 Popup 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 Exregion, 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 мембрания 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 мембрания 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 [s⁻¹], 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 миорогледа 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!

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010.
- [2] Y. Shoham, *Agent-Oriented Programming*, *Artificial Intelligence*, vol. 60, no. 1, pp. 51 – 92, 1993. doi: 10.1016/0004-3702(93)90034-9.
- [3] K.P. Murphy, *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. Cambridge, MA: MIT Press, 2012.
- [4] D. Barber, *Bayesian Reasoning and Machine Learning*. New York: Cambridge University Press, 2012.
- [5] C.M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006.
- [6] A.D. Belegundu and T.R. Chandrupatla, *Optimization Concepts and Applications in Engineering*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [7] D. Bertsimas and J.N. Tsitsiklis, *Introduction to Linear Optimization*. Belmont, MA: Athena Scientific, 1997.
- [8] M. Ghallab, D. Nau, and P. Traverso, *Automated Planning: Theory and Practice*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2004.
- [9] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [10] E.K.P. Chong and S.H. Żak, *An Introduction to Optimization*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [11] S.M. LaValle, *Planning Algorithms*. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [12] E.T. Jaynes, *Probability Theory: The Logic of Science*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [13] P.C. Fishburn, *The Axioms of Subjective Probability*, *Statistical Science*, vol. 1, no. 3, pp. 335 – 345, 1986. doi: 10.1214/ss/1177013611.
- [14] D. Koller and N. Friedman, *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. Cambridge, MA: MIT Press, 2009.
- [15] D.P. Bertsekas and J.N. Tsitsiklis, *Introduction to Probability*. Belmont, MA: Athena Scientific, 2002.
- [16] M.J. Dupré and F.J. Tipler, *New Axioms for Rigorous Bayesian Probability*, *Bayesian Analysis*, vol. 4, no. 3, pp. 599 – 606, 2009. doi: 10.1214/09-BA422.
- [17] F.V. Jensen and T.D. Nielsen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, 2nd ed. New York: Springer, 2007.

- [18] J.H. Kim and J. Pearl, A Computational Model for Combined Causal and Diagnostic Reasoning in Inference Systems, in International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 1983.
- [19] D.J.C. MacKay, Information Theory, Inference and Learning Algorithms. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [20] R.E. Neapolitan, Learning Bayesian Networks. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
- [21] G.F. Cooper, The Computational Complexity of Probabilistic Inference Using Bayesian Belief Networks, Artificial Intelligence, vol. 42, no. 2 –3, pp. 393–405, 1990. doi: 10.1016/0004-3702(90)90060-D.
- [22] D.M. Chickering, Learning Bayesian Networks Is NP-Complete, in Learning from Data: Artificial Intelligence and Statistics V, D. Fisher and H.-J. Lenz, eds., New York: Springer, 1996.
- [23] D.M. Chickering, D. Heckerman, and C. Meek, Large-Sample Learning of Bayesian Networks Is NP-Hard, Journal of Machine Learning Research, vol. 5, pp. 1287 –1330, 2004.
- [24] D.M. Chickering, Learning Equivalence Classes of Bayesian-Network Structures, Journal of Machine Learning Research, vol. 2, pp. 445–498, 2002.
- [25] G.F. Cooper and E. Herskovits, A Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data, Machine Learning, vol. 4, no. 9, pp. 309–347, 1992. doi: 10.1007/BF00994110.
- [26] W.L. Buntine, Theory Refinement on Bayesian Networks, in Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI), 1991.
- [27] D. Heckerman, D. Geiger, and D.M. Chickering, Learning Bayesian Networks: The Combination of Knowledge and Statistical Data, Machine Learning, vol. 20, no. 3, pp. 197 – 243, 1995. doi: 10.1007/BF00994016.
- [28] A. Tversky and D. Kahneman, The Framing of Decisions and the Psychology of Choice, Science, vol. 211, no. 4481, pp. 453–458, 1981. doi: 10.1126/science .7455683.
- [29] D. Bernoulli, Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk, Econometrica, vol. 22, no. 1, pp. 23–36, 1954. doi: 10.2307/1909829.
- [30] P.C. Fishburn, Utility Theory, Management Science, vol. 14, no. 5, pp. 335 –378, 1968.
- [31] J.V. Neumann and O. Morgenstern, Theory of Games and Economic Behavior, 3rd ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1953.
- [32] P.J.H. Schoemaker, The Expected Utility Model: Its Variants, Purposes, Evidence and Limitations, Journal of Economic Literature, vol. 20, no. 2, pp. 529 –563, 1982.

- [33] H. Markowitz, The Utility of Wealth, *Journal of Political Economy*, vol. 60, no. 2, pp. 151–158, 1952.
- [34] P.H. Farquhar, Utility Assessment Methods, *Management Science*, vol. 30, no. 11, pp. 1283–1300, 1984.
- [35] R.L. Keeney and H. Raia, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York: Cambridge University Press, 1993.
- [36] D. Ariely, *Predictably Irrational: The Hidden Forces That Shape Our Decisions*. New York: Harper, 2008.
- [37] D. Kahneman and A. Tversky, Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk, *Econometrica*, vol. 47, no. 2, pp. 263–292, 1979. doi: 10.2307/1914185.
- [38] J. Lehrer, *How We Decide*. New York: Houghton Mifflin, 2009.
- [39] R.D. Shachter, Probabilistic Inference and Influence Diagrams, *Operations Research*, vol. 36, no. 4, pp. 589–604, 1988.
- [40] R.D. Shachter, Evaluating Influence Diagrams, *Operations Research*, vol. 34, no. 6, pp. 871–882, 1986.
- [41] S.L. Dittmer and F.V. Jensen, Myopic Value of Information in Influence Diagrams, in *Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI)*, 1997.
- [42] R.A. Howard, Information Value Theory, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 2, no. 1, pp. 22–26, 1966. doi: 10.1109/TSSC.1966.300074.
- [43] Y. Shoham and K. Leyton-Brown, *Multiagent Systems: Algorithmic, Game Theoretic, and Logical Foundations*. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [44] R.D. Shachter, Efficient Value of Information Computation, in *Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI)*, 1999.
- [45] R.B. Myerson, *Game Theory: Analysis of Conflict*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1997.
- [46] D. Koller and B. Milch, Multi-Agent Influence Diagrams for Representing and Solving Games, *Games and Economic Behavior*, vol. 45, no. 1, pp. 181–221, 2003. doi: 10.1016/S0899-8256(02)00544-4.
- [47] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- [48] C.F. Camerer, *Behavioral Game Theory: Experiments in Strategic Interaction*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003.
- [49] C. Daskalakis, P.W. Goldberg, and C.H. Papadimitriou, The Complexity of Computing a Nash Equilibrium, *Communications of the ACM*, vol. 52, no. 2, pp. 89–97, 2009. doi: 10.1145/1461928.1461951.

- [50] J.R. Wright and K. Leyton-Brown, Beyond Equilibrium: Predicting Human Behavior in Normal Form Games, in AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2010.
- [51] J.R. Wright and K. Leyton-Brown, Behavioral Game Theoretic Models: A Bayesian Framework for Parameter Analysis, in International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2012.
- [52] B. Crandall, G.A. Klein, and R.R. Homan, Working Minds: A Practitioner's Guide to Cognitive Task Analysis. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.
- [53] C.D. Wickens, J.G. Hollands, and R. Parasuraman, Engineering Psychology and Human Performance, 4th ed. Boston: HarperCollins, 2013.
- [54] C.D. Wickens, S.E. Gordon, and Y. Liu, An Introduction to Human Factors Engineering. New York: Longman, 1998.
- [55] P.L. Wachtel, Conceptions of Broad and Narrow Attention, Psychological Bulletin, vol. 68, no. 6, pp. 417 –429, 1967. doi: 10.1037/h0025186.
- [56] D. Navon and D. Gopher, On the Economy of the Human-Processing Systems, Psychological Review, vol. 86, no. 3, pp. 214 –255, 1979. doi: 10.1037/0033-295 X.86.3.214.
- [57] C.D. Wickens, The Structure of Attentional Resources, in Attention and Performance VIII, R. Nickerson, ed., New York: Erlbaum, 1980.
- [58] C.D. Wickens, Processing Resources in Attention, in Varieties of Attention, R. Parasuraman and R. Davies, eds., Orlando, FL: Academic Press, 1984.
- [59] G.A. Miller, The Magical Number Seven Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information, Psychological Review, vol. 63, no. 2, pp. 81 –97, 1956. doi: 10.1037/h0043158.
- [60] W.G. Chase and H.A. Simon, The Mind's Eye in Chess, in Visual Information Processing, W.G. Chase, ed., New York: Academic Press, 1973.
- [61] W.G. Chase and A. Ericsson, Skilled Memory, in Cognitive Skills and Their Acquisition, S.A. Anderson, ed., New York: Erlbaum, 1981.
- [62] J.R. Anderson, Cognitive Psychology, 4th ed. London: W. H. Freeman, 1995.
- [63] P.H. Lindsay and D.A. Norman, Human Information Processing. New York: Academic Press, 1972.
- [64] D.E. Broadbent, Language and Ergonomics, Applied Ergonomics, vol. 8, no. 1, pp. 15 – 18, 1977. doi: 10.1016/0003-6870(77)90111-9.
- [65] L.B. Beach and R. Lipshitz, Why Classical Decision Theory Is an Inappropriate Standard for Evaluating and Aiding Most Human Decision Making, in Decision Making in Action:

Models and Methods, G. Klein, J. Orasanu, R. Calderwood, and C. Zsombok, eds., Norwood, NJ: Ablex, 1993.

[66] I.L. Janis and L. Mann, *Decision Making: A Psychological Analysis of Conflict, Choice and Commitment*. New York: Free Press, 1977.

[67] H. Simon, *Models of Man: Social and Rational*. New York: Wiley, 1957.

[68] J. Orasanu and T. Connolly, The Reinvention of Decision Making, in *Decision Making in Action: Models and Methods*, G. Klein, J. Orasanu, R. Calderwood, and C.E. Zsombok, eds., Norwood, NJ: Ablex, 1993.

[69] D. Kahneman, P. Slovic, and A. Tversky, *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*. New York: Cambridge University Press, 1982.

[70] G. Klein, *Sources of Power*. Cambridge, MA: MIT Press, 1999.

[71] N. Moray, A Lattice Theory Approach to the Structure of Mental Models, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 327, no. 1241, pp. 577–583, 1990.

[72] D. Gentner and A.L. Stevens, eds., *Mental Models*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1983.

[73] J.M. Histon, *The Impact of Structure on Cognitive Complexity in Air Traffic Control*, M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2002.

[74] H.J. Davison and R.J. Hansman, Use of Structure as a Basis for Abstraction in ATC, in *International Symposium on Aviation Psychology*, 2003.

[75] B.M. Muir, Trust Between Humans and Machines, and the Design of Decision Aids, *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 27, no. 5-6, pp. 527–539, 1987. doi: 10.1016/S0020-7373(87)80013-5.

[76] R. Parasuraman and V. Riley, Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse, *Human Factors*, vol. 39, no. 2, pp. 230–253, 1997. doi: 10.1518/001872097778543886.

[77] J.S. Warm, R. Parasuraman, and G. Matthews, Vigilance Requires Hard Mental Work and Is Stressful, *Human Factors*, vol. 50, no. 3, pp. 433–441, 2008. doi: 10.1518/001872008X312152.

[78] R. Parasuraman and D.H. Manzey, Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration, *Human Factors*, vol. 52, no. 3, pp. 381 – 410, 2010. doi: 10.1177/0018720810376055.

[79] N. Underhill and R. DeLaura, Estimation of New York Departure Fix Capacities in Fair and Convective Weather, in *Aviation, Range, and Aerospace Meteorology Special Symposium on Weather-Air Traffic Management Integration*, 2012.

- [80] H.J. Davison Reynolds, R. DeLaura, and M. Robinson, Field & (Data) Stream: A Method for Functional Evolution of the Air Tra-c Management Route Availability Planning Tool (RAPT), in Annual Human Factors and Ergonomics Society Conference, 2010.
- [81] H. Davison Reynolds, R. DeLaura, J. Venuti, and M. Wolfson, Uncertainty and Decision Making in Air Tra-c Management, in AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), 2013.
- [82] W. Grigsby, S. Gorman, J. Marr, J. McLamb, M. Stewart, and P. Schierle, Integrated Planning: The Operations Process, Design and the Military Decision-Making Process, Military Review, no. 1, pp. 28 –35, 2011.
- [83] Department of Defense, Design Criteria Standard, Standard MIL-STD-1472F, 2012.
- [84] Farthing D. C., Boiler Drum Level Measurement and Control, A Seminar on the ways and means of increasing boiler room efficiencies, Tech Paper #909, 01/02/2001.
- [85] Spirax-sarco, The Steam and Condensate Loop Book, 2011.
- [86] Manojkumar M. R., Three element control of boiler drum using particle swarm optimization technique, in Proceedings of the 4th IRF International Conference, chennai, 9th March, 2014.
- [87] Astrom R. B., Drum-boiler dynamics, Automatica, vol. 36, pp. 363-378, 2000.
- [88] Robert A. Paz, The Design of the PID Controller, Klipsch School of Electrical and Computer Engineering, June 2001.
- [89] Astrom R. B., PID Controllers - Theory Design and Tuning, 1995.
- [90] Ellis G., Observers in Control Systems, A Practical Guide, 2002.
- [91] Ling M., F. Rahmat, A. R. Husain, R. Ghazali, System Identification and Control of an ElectroHydraulic Actuator System, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 Skudai, Johor, Malaysia, IEEE, 2012.
- [92] Tan H. J. M. T. C. W., H_{∞} Control Design for an Industrial Boiler, in Proceedings of the American Control Conference, Arlington, 2001.
- [93] Dimeo K. Y. R., Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm, IEEE Transaction on energy conversion, vol. vol.10, December 1995.
- [94] Markus Sundbrandt, Control of a Ground Source Heat Pump using Hybrid Model Predictive Control, Department of Electrical Engineering, Linköpings universitet, SE - 581 83 Linköping, Sweden, 2011.
- [95] Niclas Björzell, Control strategies for heating systems, University-Collage of Gävle-Sandviken, 801 76 Gävle, Sweden.
- [96] John H, Lienherd, A heat transfer textbook, Third edition, 31 Jan, 2008.

- [97] Torkel Glad & Lennart Ljung, Control Theory: Multivariable and Nonlinear Methods, Taylor & Francis, USA and Canada, 2000.
- [98] Carl W. Ressel, Modelling and Control of Feed Water Systems in a Pressurized Water Reactor, Department of Signals and Systems, Division of Automatic Control, Automation and Mechatronics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.
- [99] Bazoune A., System Dynamics and Control, King Fahad University of Petroleum and Minerals.
- [100] Diederich Hinrichsen & Anthony J. Pritchard, Mathematical Systems Theory I, Modeling, State Space Analysis, Stability and Robustness, 1.6: Heat Transfer, page-70, ISBN 3-540-44125-5, Springer Berlin Heidelberg New York, 2000.
- [101] David T. Westwick, Robert E. Kearney, An Object-Oriented Toolbox for Linear and Nonlinear System Identification, Dept. Elec. & Comp. Eng., Univ. Calgary, 2500 NW, Calgary, AB, T2N 1N4, Canada, IEEE, 2004.
- [102] Gilman, G. F.(Jerry), Boiler control systems engineering, Second edition, International Society of Automation, United States of America, 2010.
- [103] Mathew A., Internal Model Control of pressure process using ARM Microcontroller, in Proceedings of the International Conference Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), 2012.
- [104] Kosko B., Neural Networks and Fuzzy Systems a Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, 1991.
- [105] Rivera D. E., M. Morari, and S. Snogestad: Internal Model Control, IV, PID Controller Design, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., vol. 25, 1986.
- [106] Хаджийски М., Автоматизация на технологичните процеси в химическата металургичната промишленост, София, Техника, 1989.
- [107] Хаджийски М., К. Бошнаков, Автоматизация на технологични процеси, ХТМУ, 2015.
- [108] Хаджийски М., Г. Николов, К. Бошнаков, Г. Еленков, А. Манолов, Проектиране на системи за управление на технологични обекти, Част III Типови системи за автоматично регулиране на основни технологични параметри, Техника, София, 1984.
- [109] Jesse B. Hoagg & Dennis S. Bernstein, Nonminimum-Phase Zeros — Much To Do About Nothing (Classical Control Revisited — Part II), (June 2007), IEEE Control Systems Magazine.
- [110] F1011 Original Control Narrative, Jan 20, 1993.

- [111] C. Tien, Filtration Process Equipment and Calculations, in: Introduction to Cake Filtration (2006) (1st edition) 13–50.
- [112] E. Tarleton and D. Hancock, Using Mechatronics for the Interpretation and Modelling of the Pressure Filter Cycle. Chemical Engineering Research and Design, (1997) 75 (3) 298–308.
- [113] E. Tarleton and D. Hancock, The Effects of Scale and Process Parameters in Cake Filtration. Chemical Engineering Research and Design, (1997) 75 (5) 497–507, <https://doi.org/10.1205/026387697523750>.
- [114] F. D. Bahner, P. A. Santacoloma, J. Abildskov, and J. K. " Huusom, Analysis and Modelling of an Industrial Pressure Filtration using Process Data, IFAC-PapersOnLine (2017) 50 (1) 12137–12142, <https://doi.org/10.1002/9783527614974.ch11>.
- [115] Amafilter, Cricketfilter® with dry cake discharge datasheet, online: www.amafiltration.com.
- [116] KPO, About KPO, online: www.kpo.kz.
- [117] HONEYWELL, Control Builder User's Guide, online: www.process.honeywell.com.
- [118] HONEYWELL, Sequential Control User's Guide, online: www.process.honeywell.com.
- [119] 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.
- [120] Dukovski Radoy, Implementation and Control of Boiler System. Engineering Sciences, LXII, 2, Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, ISSN:1312-5702, DOI:10.7546/EngSci.LXII.25.02.03, pp. 42-55, 2025.
- [121] HONEYWELL, Guide to the Dual Fired Heater Standard Model, online: www.process.honeywell.com.
- [122] Dukovski, Radoy. 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
- [123] Цибранска, И., Д. Мутафчиева, „Биореакторна техника“, София, 2018.
- [124] Judd, Simon, Claire Judd. The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [125] Borchardt, Borchardt, J.C.C.R.R.T.D.W.H.K.J.H.G.T.J.H., MWH's Water Treatment: Principles and Design, 3rd ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [126] LeBerre, O., G. Daufin, Skimmilk crossflow microfiltration performance versus permeation flux to wall shear stress ratio. Journal of Membrane Science, 117(1-2): pp. 261-270, 1996.

- [127] Chan, C.C.V., P.R. Berube, E.R. Hall, Relationship between types of surface shear stress profiles and membrane fouling. *Water Research*. 45(19): pp. 6403-6416, 2011.
- [128] Kaya, R., et al., Analysis of wall shear stress on the outside-in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation. *Desalination*. 351: pp. 109-119, 2014.
- [129] Chan, C.C.V., P.R. Berube, E.R. Hall, Shear profiles inside gas sparged submerged hollow fiber membrane modules. *Journal of Membrane Science*. 297(1-2): pp. 104-120, 2007.
- [130] Abdullah, S.Z., et al., Distribution of surface shear stress for a densely packed submerged hollow fiber membrane system *Desalination*. 357: pp. 117-120, 2015.
- [131] Wray, H.E., R.C. Andrews, P.R. Berube, Surface shear stress and membrane fouling when considering natural water matrices. *Desalination*. 330: pp. 22-27, 2013.
- [132] Ratkovich, Nicolas, Bentzen, Thomas R., Michael R. Rasmussen, Energy consumption in terms of shear stress for two types of membrane bioreactors used for municipal wastewater treatment processes, Aalborg, Denmark, 2011.
- [133] Deen, N. G., Mudde, R. F., Kuipers, J. A. M., Zehner, P., Kraume, M., Wiley-VCH. Bubble Columns in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th edition, 2011.
- [134] Wild, G., Li, H.Z., Poncin, S., & Olmos, E., Some aspects of the hydrodynamics of bubble columns, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Vol. 1, pp. 1-36, 2003.
- [135] Ruzicka, M. C., Drahos, J., Fialova, M., Thomas, N. H., Effect of bubble column dimensions on flow regime transition. *Chemical Engineering Science*, 56, (21-22), pp. 6117-6124, 2001.
- [136] van Benthum, W.A.J., van der Lans, R.G.J.M., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., Bubble recirculation regimes in an internal-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science* 54, pp. 3995-4006, 1999.
- [137] Мутафчиева, Д., „Хидродинамични и масообменни изследвания в двуфазни системи“, Дисертация, ХТМУ, София, 2014.
- [138] Sengur, Reyhan, Deveci, Gokhan, Kaya, Recep, Turken, Turker, Guclu, Serkan, Y. Imer, Derya, and Ismail Koyuncu, CFD modeling of submerged membrane bioreactors (sMBRs): a review, Istanbul Technical University, Maslak, 2015.
- [139] Кинетика на микробния растеж и образуването на продукти. <http://unilab.net/Materials/e-student/Kinetika-Presentation.pdf>
- [140] Joshi, J.B., Vitankar, V.S., Kulkarni, A.A., Dhotre, M.T., Ekambara, K., Coherent flow structures in bubble column reactors, *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 3157-3183, 2002.

- [141] Ангелов М. С., П. Р. Райнов, Д. П. Стоева, „Възможности за моделни изследвания на обменните процеси в двуходов топлообменник“, УХТ, Пловдив, 2012.
- [142] Freedman, W., JF. Davidson, Hold-up and liquid circulation in bubble columns. Trans. Instn. Chem. Engrs. 47, Y-251-T262, 1969.
- [143] Chisti, M. Y. Airlift Bioreactors. Elsevier Science Publishers LTD, 1989.
- [144] García-Ochoa, J. K. Hydrodynamics and mass transfer in a suspended solid bubble column with polydispersed high density particles. Chemical Engineering Science 52, pp. 3827-3834, 1997.
- [145] Moutafieva, D., Iliev V., Influence of geometrical and operational parameters on the performance of bubble reactor with imersed membrane module, Materials, Methods & Technologies, Vol. 12, pp. 275-285, 2018.
- [146] 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.