



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО

КАТЕДРА „ИНФОРМАТИКА”

маг. инж. Фани Николаева Томова

СИСТЕМА ЗА ПРЕДСКАЗВАЩО ПОДДЪРЖАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ СЪОРЪЖЕНИЯ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
по научна специалност 4.6. Информатика и компютърни науки
(Информатика)

Научен ръководител: доц. д-р инж. Атанас Атанасов
проф. д-р инж. Коста Бошнаков

Научно жури:

1. доц. д-р инж. Димитър Пилев – председател, рецензент
2. доц. д-р инж. Георги Ружеков - рецензент
3. проф. д-р инж. Ташо Ташев
4. доц. д-р инж. Атанас Атанасов
5. доц. д-р инж. Александър Ищев

София, 2017

Дисертационният труд е написан на 156 страници, съдържа 67 фигури и 6 таблици. Цитирани са 114 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен катедрен съвет на научното звено на катедра „Информатика”, състояло се на 02.06.2017г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 18.09.2017 г. от 14:00 часа в зала 321, сграда „А” на ХТМУ.

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

Въведение

Темата на настоящия дисертационен труд "Система за предсказващо поддържане на технологични съоръжения" е важна и актуална, както в научно, така и в приложно отношение. В него се решават проблеми по диагностика и предсказващо поддържане на технологични съоръжения в металургията и в частност Peirce-Smith конвертори, използвани в медодобивното производство.

Предсказващата диагностика и поддръжка на технологични съоръжения е методология, чрез която се удължава живота на техническите съоръжения и системи, и едновременно с това, се оптимизират ремонтните им разходи. Според водещи фирми в областта, всеки един долар инвестиция в предсказваща поддръжка, води до между седем и тридесет и пет пъти възвръщаемост.

Изследването и анализът на специфичните особености, свързани с поддръжката на Peirce-Smith конвертори е от съществено значение за разработката на подходяща методология за обработка и филтрация на данните, създаване на ефективни методи за предсказване на времето за ремонт, както и за генериране на изводи (Case Based Reasoning) за манипулиране на фурмите на съоръжението, с цел равномерно износване на стените му.

Научните изследвания и анализи, описани в дисертацията са насочени към разработка на цялостна система за предсказваща поддръжка, която да подпомогне операторите на технологични съоръжения за вземане на адекватни решения, базирани на натрупания, обобщен и съхранен в специална база данни експертен опит.

В дисертацията детайлно са анализирани съществуващите методи за поддръжка на технологични съоръжения и обекти, и са дискутирани техните положителни и отрицателни страни. Задълбочено са изследвани и анализирани, съществуващи софтуерни системи и стандарти, за предсказваща диагностика и поддръжка. На тази основа са формулирани изискванията към системата за предсказваща поддръжка, цел на настоящата дисертация.

Изследвани са статистически методи за анализ на първичните данни, като е реализиран модул за изглаждането им. Модифициран и подобрен е методът на пълзящите средни.

Изследвани са методи за предсказване на състоянието на технологични съоръжения. Създадени са предсказващи метрики, ползващи линейна и експоненциална регресия, и метода на Холт за предсказване на динамични редове. Направен е сравнителен анализ на предсказващите методи, които са използвани за предсказване на състоянието на стената в областта на фурмения ред на Peirce-Smith конвертор.

Разработен е алгоритъм на Монте Карло симулация за предсказване на продължителността на кампанията, като са използвани вероятностите за пробив на стената в областта на фурмения ред, при всяка една плавка на конвертора.

Разработен е модул за подпомагане на вземането на решения за състоянието на техническото съоръжение, базиран на метода на прецедентите. Формирани са различни критерии

за извличане на прецеденти от базата знания, като критерий по стойност на функцията за близост, критерий по определен брой прецеденти и критерий по процентна извадка на прецедентите.

Реализирани са две функционалности на метода на прецедентите, които подпомагат вземането на решения за манипулиране на фурмите и за продължителност на кампанията на Peirce-Smith конвертора.

Реализиран е интегриран графичен интерфейс, работещ върху описаните модули. Интерфейсът е интерактивен, с възможности за въвеждане на данни и избор на критерии от страна на експерта.

Глава 1 Принципи на изграждане и изисквания на системите за предсказващо поддържане. Сравнителен анализ на съществуващи софтуерни продукти.

1.1 Архитектура, методи и области на приложение на системи за предсказващо поддържане на технологични съоръжения

Икономическият успех и конкурентноспособността на фирмите в химическата, нефтохимическата, силикатната промишленост, енергетиката, металургията и миннодобивната промишленост силно зависят от сигурността на технологичните съоръжения и ниската цена за поддържането им.

Утвърдилите се методи за техническо поддържане са реактивен, превантивен, предсказващ и проактивен.

Svensk Standards (Стандарти на Швеция) SS-EN 13306, 2001 дават следните определения, свързани с предсказващото поддържане:

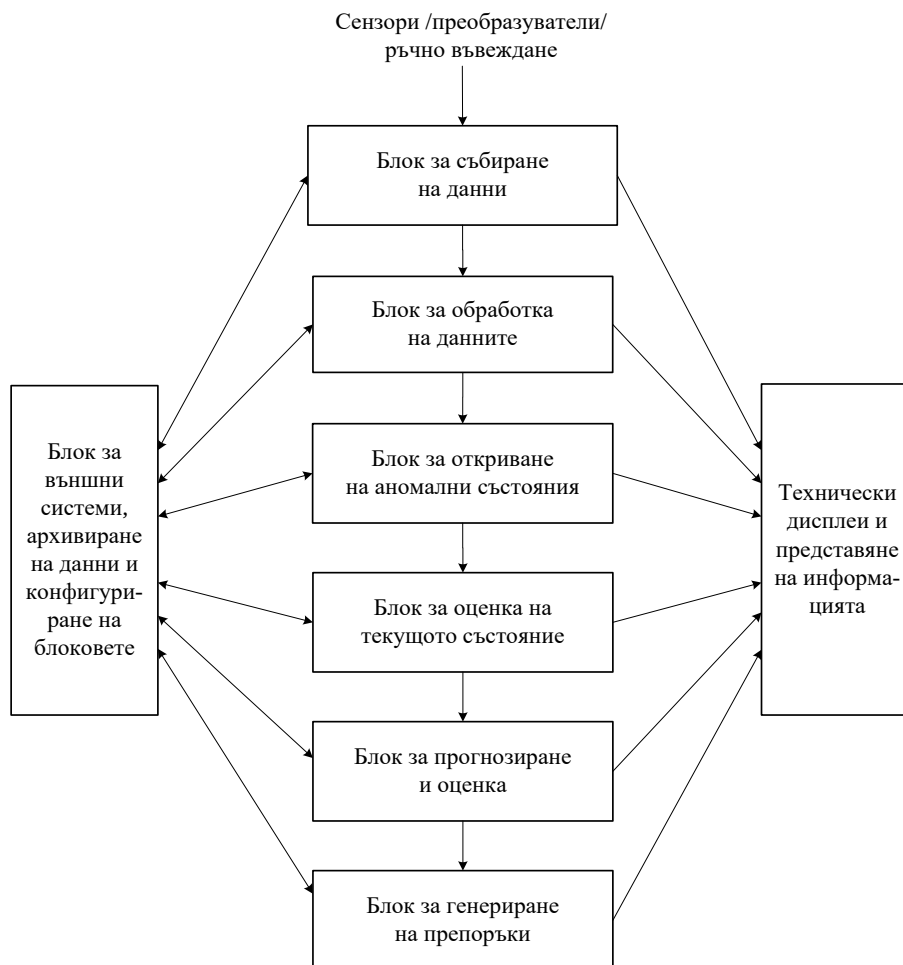
Condition based maintenance - Поддържане основаващо се на състоянието. Това е превантивно поддържане, основаващо се на мониторинг на състоянието и/или параметри и последващи действия.

Predictive maintenance – Предсказващо поддържане. Поддържане основаващо се на състоянието, което се извършва вследствие на прогноза получена от анализа и оценката на значими параметри на деградация на елемент от съоръжението.

Degradation – Деградация (авария). Необратим процес в една или повече характеристики на даден елемент с времето или с употребата или поради външна причина.

Целта на международния стандарт ISO 13374-1:2003 е да специфицира основните изисквания за софтуер с отворен код за поддържане основаващо се на състоянието. На фиг.1.1. е показана схемата за обработка на данните и блоковете включени в информационния поток. От схемата се вижда, че стандартът напълно съответства на предсказващо поддържане поради наличието на блок за прогностика.

Международният стандарт ISO 13381-1:2004 е насочен към прогнозирането. В него се дава следното определение за прогноза: Прогнозата е оценка на времето до настъпване на отказ и риска за един или повече съществуващи и бъдещи откази и обикновено е интуитивна и се основава на



Фиг.1.1. Блокова схема на информационните потоци съгласно ISO 13374-1:2003

Процесът на Condition-Based Maintenance (CBM) съдържа три основни етапа:

- **Събиране на данни** (Data Acquisition (DA)). Основните функции са свързани с процес на събиране и съхраняване на информация, която постъпва от съоръжението, предмет на поддръжка.
- **Обработка на сигнали** (Signal Processing (SP)). Първата стъпка е свързана с първична обработка на сигналите. Тя включва филтрация на постъпващите сигнали и отстраняването на груби грешки при ръчно въвеждане на информацията. Следващата стъпка е анализът на сигналите.
- **Подпомагане на вземането на решение за поддръжка** (Maintenance decision support)

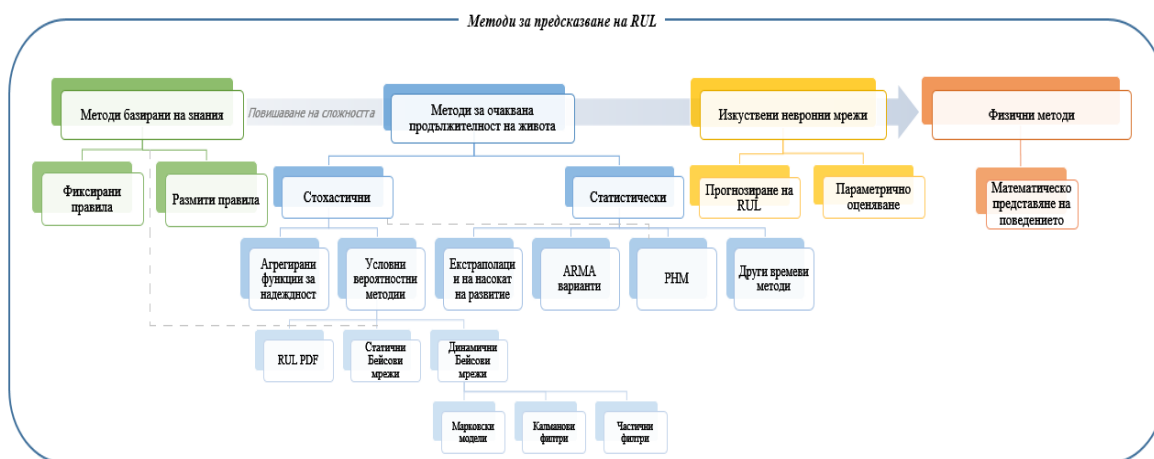
Диагностика: За диагностика на съоръженията най-често се използват статистически подходи и подходи на изкуствения интелект.

Прогностика: Най-използваният подход е въз основа на предходното развитие и настоящото състояние да се предскаже, колко време остава преди да настъпят откази. Времето

оставащо до възникването на повреда се нарича „Remaining Useful Life (RUL)”, „оставащо време на живот” или “оставащо полезно време”.

Една доста популярна система за прогнозиране и мениджмънт/мониторинг на „здравето” на съоръженията е PHM (Prognostic and Health Management/Monitoring) система. За изграждането на такива системи в повечето случаи се използват OSA-CBM (Open Architecture for Condition Based Monitoring) стандарти.

Подобно на диагностиката, методите за прогностика се класифицират в три главни категории: статистически методи, методи на изкуствения интелект и моделно-базирани методи.



Фиг. 1.2. Методи за предсказване на RUL

Методите за прогностика на RUL (фиг. 1.2.) се класифицират като:

- Методи базирани на знания, включващи оценка между близостта на текущото състояние на дадено съоръжение или система и натрупаните в базата знания данни за повреди на аналогични съоръжения, на чиято основа се прогнозира продължителността на живота. Тези методи включват експертните системи, размитите (fuzzy) системи, както и тези базирани на прецеденти (CBR).

- Методи за очаквана продължителност на живота (Life expectancy models): Те определят продължителността на живота на отделните компоненти на машината по отношение на очаквания риск от влошаване на състоянието при известни експлоатационни условия. Те включват като подкатегории статистическите и стохастичните модели.

- Изкуствени невронни мрежи: Те изчисляват RUL на дадено съоръжение директно или индиректно от математическо му представяне, получено от данните от наблюдението му, а не на базата на физическото разбиране на процесите довели до повредата му. Невронните мрежи се разделят на такива за директно прогнозиране на RUL или за параметрично оценяване. Могат да се интегрират и с други методи, като най-често това са методи базирани на прецеденти .

- Физични методи: Те изчисляват RUL на даден компонент или машина от математическо представяне на физическо поведение на процесите на деградация.

Техниките за прогнозиране се категоризират като:

- Моделно-базирани – използват знания за системата и модели на повредите, за да осигурят оценка на RUL. Те могат да използват или физически модели на процеса или някои статистически

методи за оценка, основаващи се на наблюдатели на състоянието такива, като филтри на Калман, както и ARMA модели.

- Базирани на данни – такива модели са статистически класификатори като Principal Component Analysis (PCA), Partial Least Squares (PLS), изкуствени невронни мрежи, системи с размита логика, невро-размити системи, Байесовски мрежи, скрити Марковски процеси. Използват се само налични данни, които се използват за обучение на алгоритмите за оценка на RUL. Илюстрация за тези методи са невронните мрежи и прогностика на базата на размита логика.

Динамичният логически извод на базата на прецеденти (Dynamic Case Based Reasoning - DCBR) е мощна техника за диагностика на отказите и прогностика. Използват се радиално-базисни функции за класификация. Направен е паралел между статична и динамична библиотека от прецеденти. В библиотеката на DCBR са включени времето и наблюдаваните състояния и като решение - времето до отказ.

CBR решава проблемите чрез адаптиране на предишни успешни решения, които са използвани, за да се решат стари проблеми. DCBR е разширение над конвенционалния CBR и включва няколко динамични компоненти, за да разшири възможностите на системата.

Методът на прецедентите (CBR) е ориентиран към автоматизиране на вземането на решения на основата на прецеденти. При възникване на нов проблем, в базата с прецеденти се търсят най-близките до целевия сходни прецеденти, които са били решени в миналото. Ако новият прецедент съвпада със съществуващ такъв в базата данни, то решението на стария прецедент се използва за решение на новия. Ако няма съвпадения, то тогава решенията на най-близките прецеденти се адаптират, за да се реши новият, като базата данни се обновява с новия (ново изучения) прецедент. В случай на липса на близост между новия прецедент и тези в базата данни, се търси експертно решение на новия прецедент, и след валидирането му се добавя в базата данни. Етапите на работа в системите за вземане на решения, базирани на прецеденти, са известни като класически R⁴ цикъл

Някои области на приложение на прогностиката са: изпълнителни механизми, космически структури, двигатели на въздухоплавателни средства, батерии, лагери, пукнатини във въртящи се машини, електроника, газови турбини, хидравлични помпи и мотори, производство на полупроводници, системи за отопление, вентилация и кондициониране на въздуха (HVAC системи) и други.

1.2 Изисквания към системите за предсказващо поддържане

На базата на направения анализ и използвайки стандарта ISO 13374-1:2003, показан на фиг. 1.1., като най-подходящ за предсказващо поддържане, са обобщени изисквания към системите за предсказващо поддържане на технологични съоръжения.

Системите за предсказващо поддържане трябва да имат възможности за:

- въвеждане на данните – интерфейси с измерващи устройства и/или различни бази данни.
- обработване на суровите данни – възможности за филтриране на случайните процеси.

Характерно за данните е, че съдържат случайна съставка, която би могла да се дължи на

шум от измерването (измервателния уред), метода на събиране на данните, влияние на околната среда и др. Освен случайна съставка е възможно съществуването на нехарактерни стойности или цели множества от наблюдения, които са неинформативни или липсващи. За елиминирането на „некоректните“ данни съществуват различни подходи. Например липсващите данни от наблюденията могат да се премахнат или да се заменят с изчислени чрез линейна интерполация. Нетипичните наблюдения също биха могли да се премахнат или да се интерполират, така че да се заменят с по-подходящи стойности. В повечето случаи за целите на изследванията се налага нормализиране и трансформиране на данните. За нормализацията обикновено се използват статистически измерители каквито са средната стойност, стандартното отклонение и др. Трансформирането се налага при анализ на нелинейни процеси, при които се налага линеаризиране чрез прилагане на трансформации като логаритмична, кубична, реципрочна и др. Оценяването на трансформации обикновено се извършва чрез коефициента на Пиърсън.

- анализ на данните – анализират се особеностите на обекта. Анализът на данни може да се раздели на статистически и честотен. Статистическият анализ има за цел да се определят диапазона на изменение, средната стойност, стандартното отклонение, медианата, модата и др., както и да се изолират липсващи стойности. Честотният анализ има за цел да изследва разпределението на срещаните в набора от данни стойности. Често се налага изследването на кумулативната честота, средната стойност на групите и др. В процеса на анализиране на данните се налага използване на методи за корелационен анализ и сегментиране на данни (клъстерен анализ).
- генериране на препоръки – в повечето случаи генерирането на препоръки се извършва от експерт. Особено подходящ за тази цел е методът на прецедентите, основаващ се на вземането на решение на базата на успешно решени в миналото случаи.
- предсказване – предсказващи методи. За предсказващите методи, както е изложено в т. 1.1.2 от Глава 1 на дисертацията, се използват знанията за системата и се прилагат различни статистически методи – авторегресионни пълзящи средни, филтър на Калман и др. Използват се и подходи на изкуствения интелект като размита логика, невронни мрежи, Байесовски мрежи и др., а също и статистически подходи, като верижни средни и пълзящи верижни средни, линейна и експоненциална регресия и др.
- запис и архивиране на информацията – възможности за записване и архивиране на информацията в база данни или плосък файл.
- представяне на информацията (визуализация) – подходящо представяне на информацията от отделните модули. Възможности за различни видове таблично и графично изображение, като и интерактивност на графичните интерфейси.

1.3 Съществуващи софтуерни продукти с възможности в областта на предсказващото поддръжане

Разгледани са накратко няколко софтуерни продукта реализиращи метод за вземане на решение на базата на прецеденти (myCBR, jCOLIBRI, CBR-Works 4.3.0) и метод за предсказваща поддръжка на базата на състоянието (OSA-CBM, MIMOSA). Представени са и възможностите на софтуерния пакет за инженерни и научни изчисления и анализи MATLAB, както и на софтуерната платформа за анализи и вземане на решение MicroStrategy Analytics. В зависимост от методите, които могат да използват за техническа поддръжка на технологични съоръжения са класифицирани в четири категории:

- софтуерни платформи реализиращи метода на прецедентите,
- софтуерни платформи за предсказваща поддръжка,
- софтуерни платформи за анализ,
- софтуер за инженерни и научни изчисления.

1.4 Изводи към Глава 1

1. Анализирани са видовете стандарти и архитектури за предсказваща поддръжка, като са утвърдени четири основни метода за диагностика и поддръжка на съоръжения, като най-ефективен от техническа и икономическа гледна точка е предсказващото поддръжане и неговите вариации CBM, PHM и др.
2. Изследвана е класификацията на различните категории методи за прогностика: статистически метод, методи на изкуствения интелект и моделно-базирани методи и техните подкатегории. Един от най-подходящите за използване, за целите на предсказващата диагностика, методи е методът за вземане на решения на базата на прецеденти, чиито етапи на работа са разгледани.
3. Проучени са областите на приложение на системите за предсказваща поддръжка и диагностика на технически съоръжения от различни сфери на промишлеността. Предсказващата поддръжка успешно се прилага в изпълнителни механизми, космически обекти, двигатели на въздухоплавателни средства, батерии, лагери, пукнатини във въртящи се машини, електроника, газови турбини, хидравлични помпи и мотори, производство на полупроводници, системи за отопление, вентилация и кондициониране на въздуха и др.
4. На базата на направените изследвания и анализи на софтуерни архитектури, методи, системи и области на приложение на предсказващата поддръжка са дефинирани основните изисквания към системите от този клас.
5. Направен е анализ на софтуерни платформи реализиращи метода на прецедентите, за предсказваща поддръжка, за анализ и за инженерни и научни изследвания. Софтуерните продукти за предсказваща поддръжка базирани на стандартите OSA-CBM и MIMOSA предлагат готови решения за различни видове технологични съоръжения, но не са с отворен код и е невъзможно да се разширяват и модифицират. Проучени са възможностите на MicroStrategy Analytics и MATLAB. Тъй като разработването на приложения в

MATLAB коства в пъти повече усилия и време отколкото използването на MicroStrategy Analytics, то функционалности, които не могат да бъдат реализирани в MicroStrategy Analytics е предложено да бъдат разработени в MATLAB и интегрирани в системата за предсказваща поддръжка, която е цел на дисертационния труд.

1.5 Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационния труд е разработването на софтуерна система за предсказващо поддържане на технологични съоръжения. За обект на дисертационния труд са избрани Peirce-Smith конвертори.

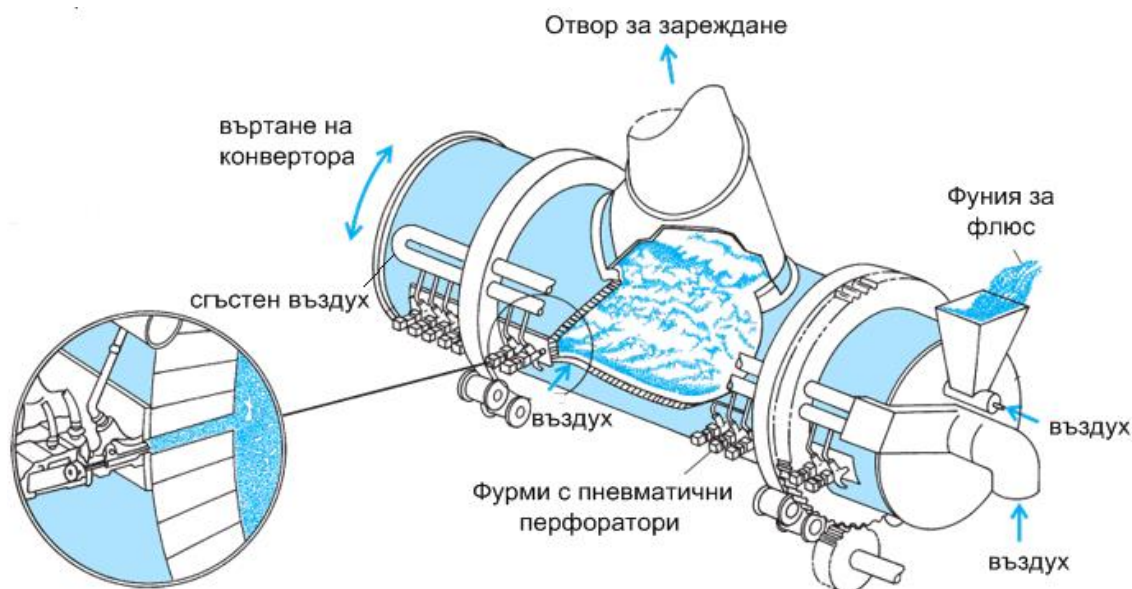
В съответствие с поставената цел се решават следните основни задачи:

1. Анализ на принципите на изграждане и изискванията към системите за предсказващо поддържане. Анализ на съществуващите софтуерни системи и избор на подходящ софтуерен инструментариум за предсказваща поддръжка на технологични съоръжения. Анализ на характеристиките и особеностите на Peirce-Smith конверторите с оглед създаването на система за предсказващата им поддръжка.
2. Изследване на подходящи методи за предварителна обработка на данните.
3. Изследване на методи за прогнозиране на състоянието на технологичните съоръжения. Разработване на софтуер за симулиране на състоянието на Peirce-Smith конвертор.
4. Сравнителен анализ на софтуер за подпомагане на вземането на решение за предсказваща поддръжка, реализиращ метода на прецедентите.
5. Изграждане на цялостна интегрирана софтуерна платформа за предсказваща поддръжка на технологични съоръжения.

Глава 2 Анализ и предварителна обработка на входните данни

2.1 Описание на технологичния обект

Технологичният обект, за който е реализирана системата за предсказващо поддържане представлява Peirce-Smith конвертор. Peirce-Smith конверторите се използват в медодобивните производства за преобразуване на медна руда в черна мед. Конверторите (фиг. 2.1.) са технологични съоръжения с периодично действие (плавки). Те се състоят от барабан с габаритните размери 10.2 x 3.92 m, опорно устройство, механизъм за завъртане на конвертора, устройство за подаване на въздуха с фурми и устройство за отвеждане на конверторните газове. Въздухът за окисление, обогатен с чист кислород се подава към стопилката от меден шейн през 54 фурми с вътрешен диаметър 46.1мм. Течният шейн с температура 1200°C се прехвърля в конвертора от топилната пещ чрез специализирани металургични кофи и се излива в отвора за зареждане. Експлоатационният живот на един конвертор продължава между два и три месеца, през което време се извършват между 150 и 330 плавки, формиращи една кампания. Най-голямо е износването на стената на конвертора в областта на фурмите. След определен брой плавки фурмите на конвертора се запушват (забиват) и ако броят им надвиши 15, конверторът трябва да бъде спрял за ремонт.



Фиг.2.1. Peirce-Smith конвертор

Работният цикъл на Peirce-Smith конвертор включва:

1. **Подготвителен период** – през този период се източва стопилката от предходната плавка, пробиват се забити фурми, изчиства се отворът за зареждане от налепи, отложени се по време на източване на стопилката, зареждат се меден щейн и силикатни добавки, изпълняващи функциите на флюс.

2. **Първи период на конвертиране** – период на образуване на шлага. Зареденият меден щейн се продухва с обогатен с кислород въздух. След спиране на продухването се отлива шлага и се добавят ново количество меден щейн и флюси – силикатни материали. Реакцията е екзотермична. Желязото се отделя от конвертора като шлага. Следва отливане на шлага и второ зареждане и продухване. Отново се отлива шлага и с тази операция приключва първият период на конвертиране. Практически, при различните плавки количеството на заредения меден щейн се поддържа едно и също.

3. **Втори период на конвертиране** – период на получаване на мед. Той започва след приключване на първия етап и е аналогичен на първия период на конвертиране.

При нормална работа на инсталацията за получаване на мед от медни руди след приключване на текущия цикъл започва подготовката на следващия. При възникване на проблеми между последователните цикли настъпва период на престой. Чрез това време на престой може да се управляват материалните потоци в медното производство, където възниква проблем за синхронизация между непрекъснато действаща топилна пещ, два едновременно работещи медни конвертори и анодни пещи с периодично действие.

2.2 Анализ на входните данни

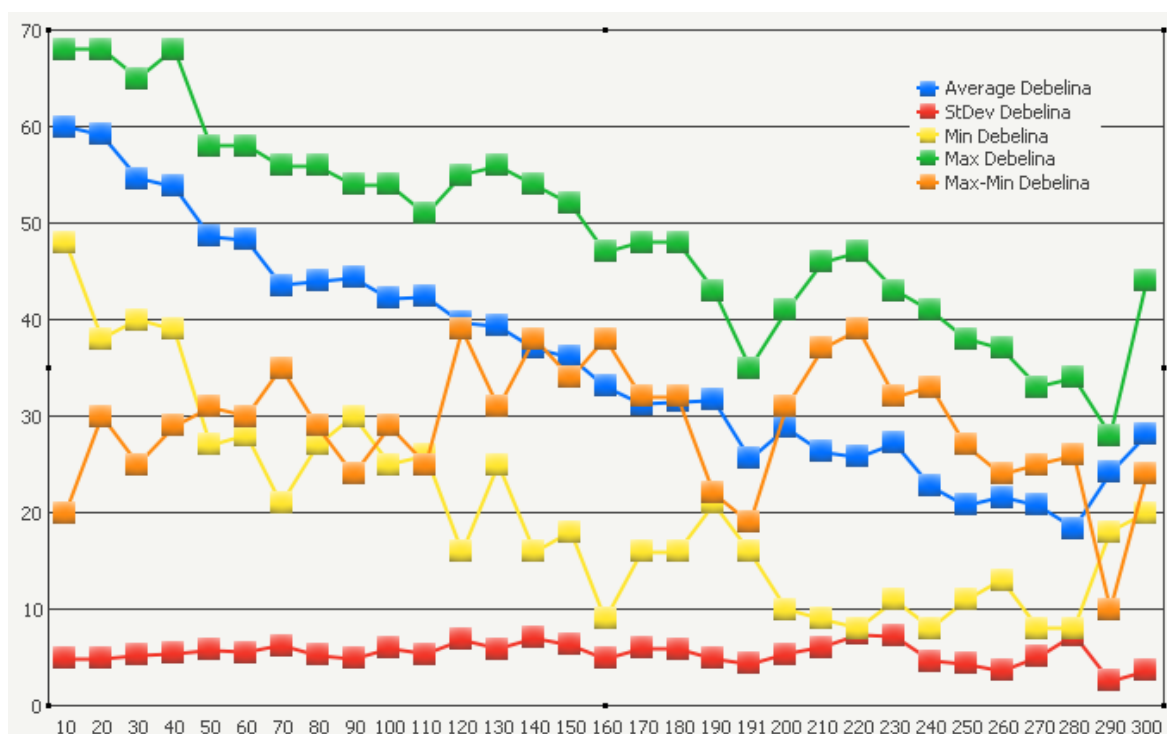
Измерванията на дебелината на стената в областта на фурмения ред се извършва ръчно. Поради тази причина суровите данни, които се зареждат в системата за предсказващо поддържане на Peirce-Smith конвертори, са силно зашумени. Грешките се дължат както на некоректни

измервания, така и на пропуснати измервания. За целите на анализа и изследванията се налага суровите данни да бъдат изгладени, като се елиминират ексцесивните случаи и се заменят с подходящи стойности. След прилагане на съответните методи за изглаждане, данните се използват за прогнозиране и поддръжка на процеса по забиване на фурми и планови ремонти.

Статистическите показатели, които се използват за анализ на суровите данни са:

- **Средноаритметична дебелина на стената.**
- **Мода** е измерената дебелина на стената в областта на фурмения ред, за съответната плавка, която се среща най-често.
- **Минимална дебелина на стената** е най-малката измерена стойност за дебелината на стената за съответната плавка.
- **Максимална дебелина на стената** е най-голямата измерена стойност за дебелината на стената за съответната плавка.
- **Ранг на разсейването** е разликата между максималната и минималната дебелина на стената.
- **Средноквадратично отклонение.**
- **Коефициент на вариация.**

За целите на анализа на суровите данни е създадено хранилище на данни, което е част от системата за предсказващо поддържане на Peirce-Smith конвертори. Таблицата с постъпващи данни от измерванията на дебелината на стената при фурмения ред съдържа следните колони: сурогатен ключ, номер на конвертора, номер на кампанията, номер на плавката, дата на плавката, номер на фурмата и измерената дебелина на стената в сантиметри.



Фиг. 2.2. Графично представяне на статистическите показатели

Системата за предсказващо поддържане на технологични обекти е изградена на базата на създадения в MicroStrategy Analytics проект “Peirce-Smith Convertors”. Основните обекти, които са създадени, са описани по-подробно в точка 2.2.2 на Глава 2 от дисертацията.

От направения статистически анализ за дебелината на стената в областта на фурмения ред за 1-ви конвертор може да се направи извода, че с напредване на плавките дебелината на стената намалява (фиг. 2.2.). Изключение правят плавка 200, 230 и 260. Нарастването на дебелината на стената при тези плавки би могло да се дължи както на грешка при измерванията, така и на кристализация, което не прави стената по-дебела. Средноквадратичното отклонение варира между 4 и 7 см. в зависимост от плавката. След плавка 200 се наблюдават вариации в дебелината на стената както при минималните, така и при максималните стойности. Много е възможно това също да се дължи на кристализации, които с протичане на плавките се отчупват, вероятно и с част от тухлената стена.

2.3 Предварителна обработка на входните данни

Извършен е сравнителен анализ на няколко метода за изглаждане на данните. Тъй като една плавка протича в определен интервал от време, то съвкупността от измервания за всяка една плавка е разгледана като динамичен ред.

Предполага се, че с всяка следваща плавка дебелината на стената в областта на фурмения ред ще намалява, т.е. текущото измерване ще бъде с по-малка стойност от предходното измерване. След анализ на суровите данни бяха установени грешки от следния вид – дебелината на стената на фурма j за плавка i е по-голяма от дебелината на стената за плавка $i-1$, т.е. $x_i > x_{i-1}$ за съответната фурма. Повишаването на дебелината на стената в областта на фурмения ред при следваща плавка би могла да се дължи на грешки от измерване, на кристализация или други причини. Каквито и да са тези причини, тухленият ред няма как да стане по-дебел, освен ако не се направи ремонт за подмяна на тухлите. Тези аномалии във входните данни водят до необходимостта от модификация на алгоритъма за изчисляване на пълзящи средни стойности. Когато $x_i > x_{i-1}$ текущата стойност се осреднява по формулата за пълзяща средна стойност в прозорец с големина на прозореца $m=3$. Осредняват се предходните две стойности и текущата стойност. Когато $x_i \leq x_{i-1}$ се използва изместена пълзяща средна стойност, чиято формула (2.9) е описана в Глава 2 на дисертацията.

В модула за изглаждане на входните данни на системата за предсказващо поддържане на Peirce-Smith конвертори са анализирани и се използват следните методи за изглаждане на суровите данни:

- Пълзяща средна стойност
- Пълзяща средна стойност в прозорец
- Модифицирана пълзяща средна стойност:

$$ModAvg_k = \begin{cases} \frac{1}{s+t+1} \sum_{i=k-2}^k x_i, \text{ за } x_i > x_{i-1} \\ \frac{1}{(p+q+1)} \sum_{i=k-p}^{k+q} x_i, \text{ за } x_i \leq x_{i-1} \end{cases}, \forall k = 1, \dots, N$$

Където:

p и s са отмествания преди текущия ред, $p = 1, s = 2$;

q и t са отмествания след текущия ред $q = 1, t = 0$.

За оценяване на методите за изглаждане на реалните данни се използва стандартната грешка (S):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2}{N}}$$

Където:

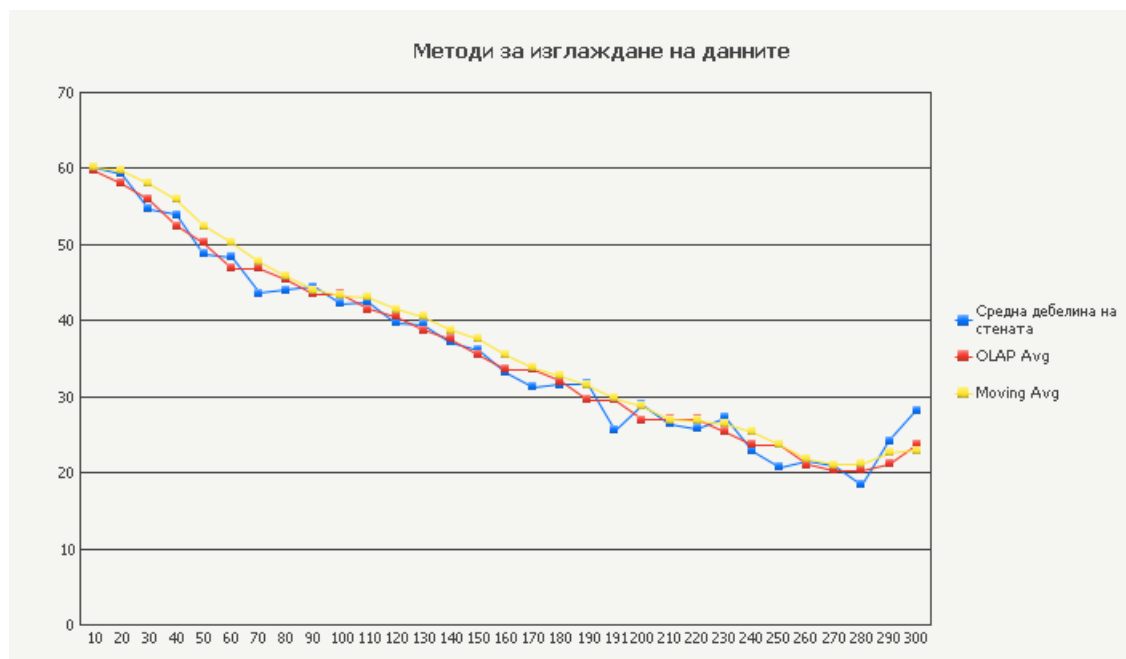
x_i е i -та стойност от измерване на дебелината на стената;

x'_i е i -та изчислена стойност от съответния метод за изглаждане.

Създадени са обекти, които реализират съществуващите методи и модифицирания метод за изглаждане, както и оценяването на методите спрямо реалните данни. Те са описани по-подробно в точка 2.3.2 на Глава 2 от дисертацията.

2.4 Анализ на получените резултати

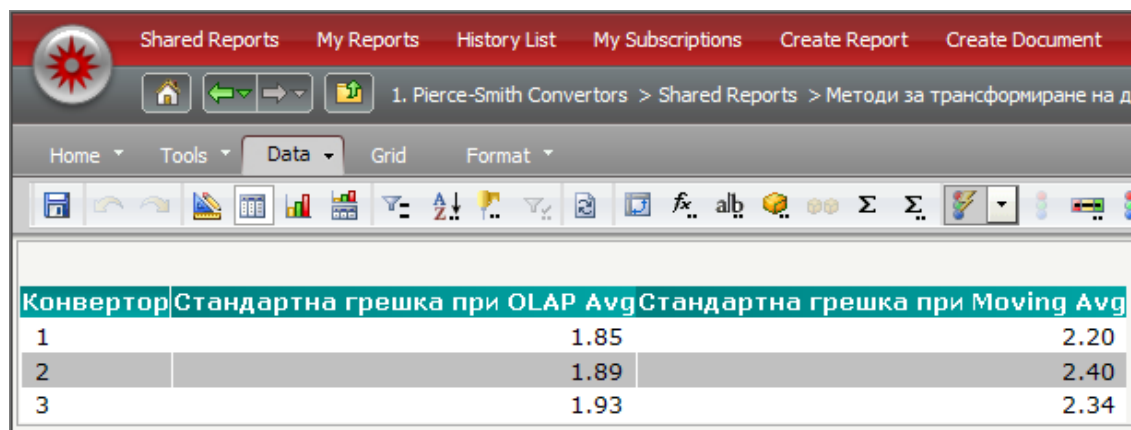
За целите на анализа, методите за изглаждане са илюстрирани графично и са оценени, като е изчислена стандартната грешка за всеки от тях.



Фиг. 2.3. Методи за изглаждане на данните приложени върху Конвертор 1

Върху данните са приложени методите - *Running Avg*, *Moving Avg* и *OLAP Avg*, описани в точка 2.3.2 на Глава 2. На фиг. 2.3. са показани реалните данни (в син цвят) и съответно приложените методи за изглаждане на суровите данни за конвертор 1. На графиката по-горе по абцисната ос са представени номерата на плавките, а по ординатната ос - дебелината на стената в сантиметри.

Оценяването на методите се изчислява чрез стандартната грешка. Получените резултати са показани на фиг. 2.4. Вижда се, че най-добрите доближения до реалните данни се получават чрез метода *OLAP Avg*, където стандартната грешка е най-малка.



Конвертор	Стандартна грешка при OLAP Avg	Стандартна грешка при Moving Avg
1	1.85	2.20
2	1.89	2.40
3	1.93	2.34

Фиг. 2.4. Стандартна грешка при методите за изглаждане.

2.5 Изводи към Глава 2

От направения анализ на характеристиките и особеностите на Peirce-Smith конверторите, както и от анализа на статистическите им показатели са направени следните изводи:

1. Peirce-Smith конверторите са съоръжения от медодобивната промишленост, които имат периодично действие (плавка), което дава възможност за разглеждането на измерванията като времеви ред и прилагането на динамични методи за прогнозиране на състоянието му. Поради подаването на въздух за окисление в процеса на конвертиране на рудата, тухлената стена на конвертора се износва в областта на фурмите за вдухване на въздух. Това налага използване на предсказващи методи за определяне на дебелината на стената в следващата плавка, както и вземане на решение за манипулиране с фурмите (забиване/отбиване). С напредване на плавките, дебелината на стената в областта на фурмения ред намалява, но някои плавки правят изключение. Това би могло да се дължи както на кристализация, така и на лоши измервания. Стената в действителност не става по-дебела.
2. Чрез платформата MicroStrategy Analytics лесно и бързо се създават обекти необходими за визуализиране и анализ. След импортване на данните в базата и създаване на основните обекти на системата, могат да се правят анализи на различни нива на детайлност и да се прилагат голям брой изчисления. Данните могат да се визуализират както в табличен, така и в графичен вид, без да са необходими допълнителни настройки. Създаден е софтуерен

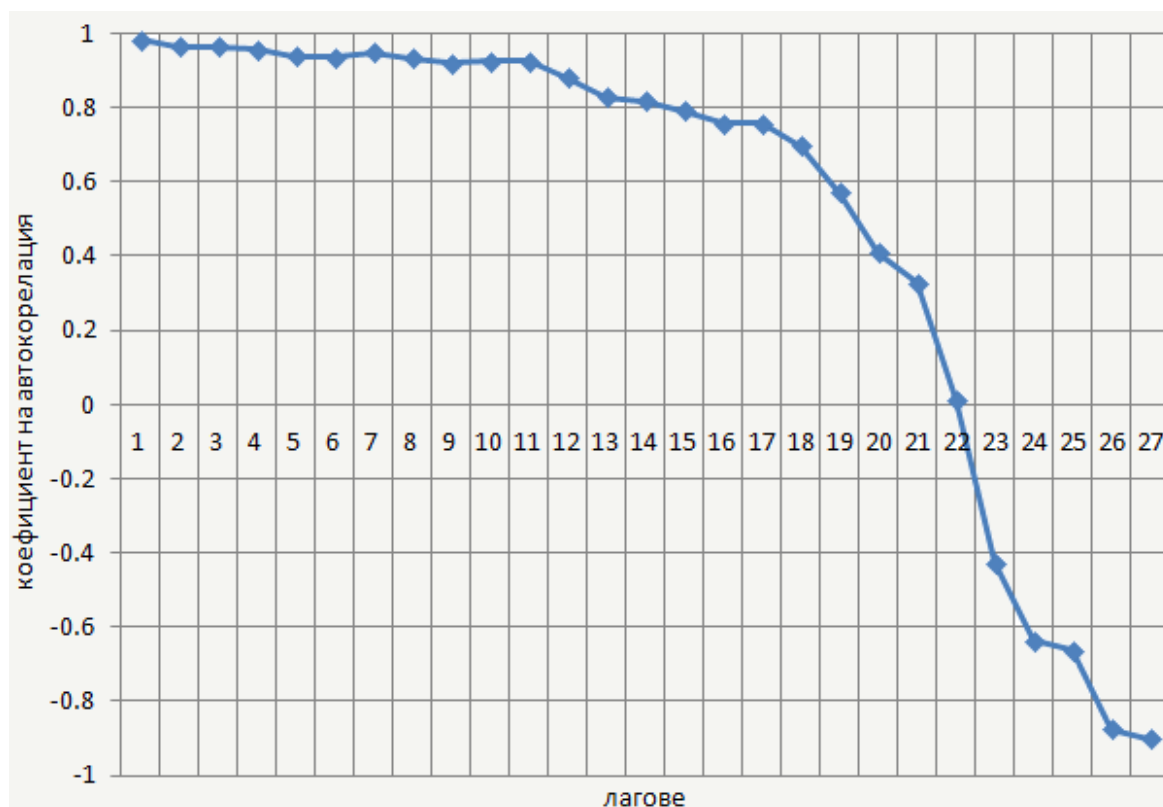
модул от системата за предсказващо поддържане на Peirce-Smith конвертори, който реализира предварителната обработка на суровите данни.

- От анализа на статистическите показатели става ясно, че в края на кампанията се наблюдават големи отклонения в дебелината на стената. Разработени са три метода за изглаждане на данните. Приложена и изследвана е модификация на стандартните алгоритми за изглаждане, основаваща се на анализ на статистическите показатели на конверторите. Методите за изглаждане на суровите данни са изследвани и приложени за целите на последващи обработки в областта на предсказващата поддръжка на конверторите.

Глава 3 Методи за прогнозиране на състоянието на технологични съоръжения

3.1 Автокорелационен анализ

В много случаи състоянието на едно технологично съоръжение в определен момент от времето зависи до някаква степен от състоянието му в предишни моменти или периоди. Тъй като всяка плавка е направена в определен период от време, а измерванията за дебелината на стената на конвертора в областта на фурмения ред са направени за всяка десета плавка, има възможност да се направи анализ за зависимостта на дебелината на стената в даден момент, от по-ранни измервания. Такава вътрешна взаимовръзка между измерените стойности за дебелината на стената е направена чрез автокорелационен анализ.



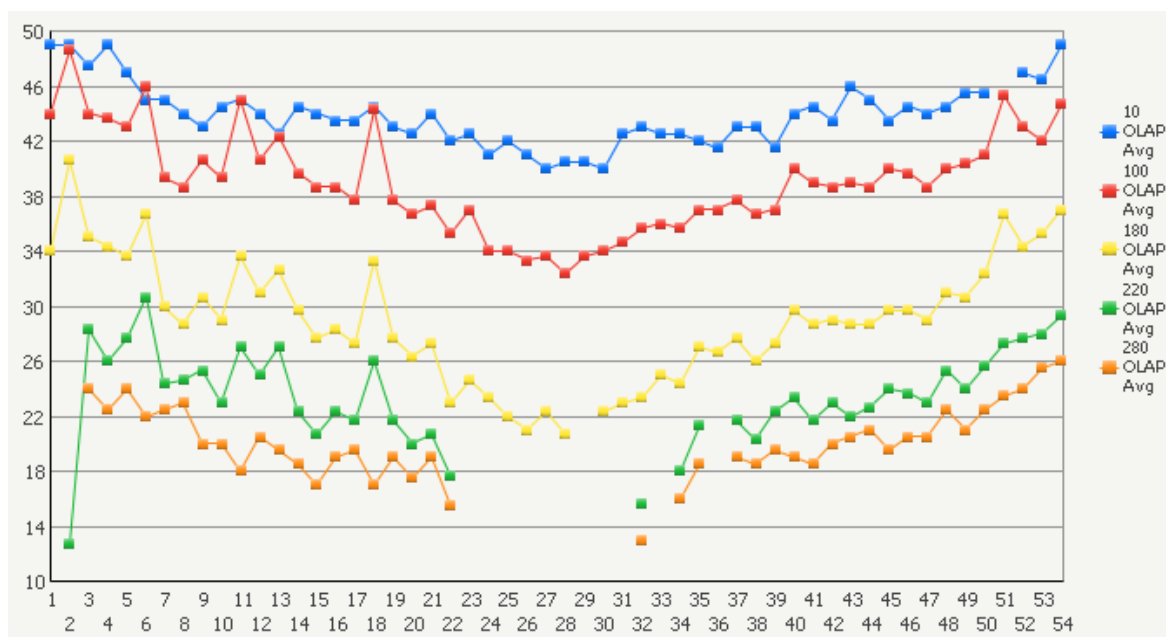
Фиг. 3.1. Автокорелационен коефициент на осреднените дебелини на стените за всяка плавка за Конвертор 1

Множеството от автокорелационни коефициенти за различни лагове формират автокорелационната функция, която при нестационарни динамични редове е затихваща, т.е. с нарастването на лага автокорелационните коефициенти клонят към 0.

На фиг. 3.1. е показана автокорелационната функция изчислена на базата на осреднените стойности за дебелината на стената за всяка плавка на Конвертор 1. От затихващата графика се вижда, че промяната на дебелината на стената е затихващ нестационарен процес. Изследването е извършено за 29 лага, като може да се счита, че има значима статистическа зависимост в първите 5 лага, където автокорелационния коефициент е по-голям от 0.95. След 22-я лаг автокорелационните коефициенти са отрицателни, което означава, че след 220-та плавка дебелината на стената на конвертора става по-малка от средната дебелина на стената за периода на конвертиране. За лагове по-големи от 25, автокорелационните коефициенти се доближават до -1, т.е. за плавките след 260-та плавка дебелината на стената започва да се доближава до критичния минимум. От анализа на автокорелационната функция следва, че са достатъчни пет предходни точки, на базата на които да се предскаже дебелината на стената, което е необходимо да се извършва след 260-та плавка.

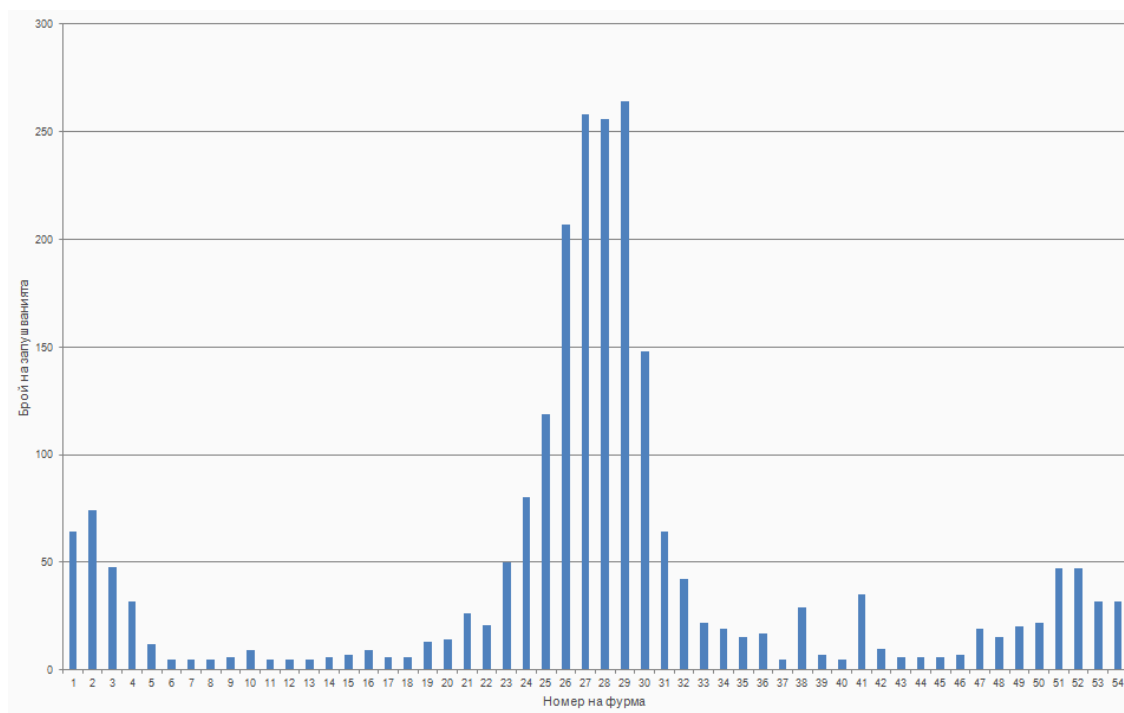
3.2 Групиране на данните

За целите на групирането на фурмения ред е анализирана динамиката на фурмите с напредване на плавките. Данните за всяка една фурма в продължение на всички плавки за кампанията са изгладени чрез модифицирания метод за изглаждане описан в Глава 2. Кампанията се състои от 280 плавки, като за по-добро представяне са избрани пет плавки (10, 100, 180, 220 и 280), разпределени приблизително равномерно в кампанията. На фиг. 3.2. се наблюдава износването на фурмения ред с напредване на плавките. Точките с липсваща информация са запушените фурми.



Фиг. 3.2. Износване на стената в областта на фурмения ред.

Наблюдава се по-голямо износване в средата на фурмения ред и по-малко в краищата. На базата на анализа на износването на стената с напредване на плавките се извършва групиране на фурмите в зависимост от тяхното местоположение. За целта се анализира колко пъти е запушвана всяка фурма. Групирането на данните е направено на базата на разпределението на запушените фурни за всички конвертори. Разпределението е показано на фиг. 3.3.



Фиг. 3.3. Разпределение на запушените фурни за всички конвертори

На базата на статистическите показатели, показани в таблица 3.1. може да се направи следното групиране на фурни в зависимост от броя на запушванията:

- I група (брой запушвания по-малко от 5) – фурни от 6 до 18, от 37 до 46, ексцесивните случаи за фурни 38 и 41 се приемат като следствие на лоши измервания.
- II група (брой запушвания между 5 и 42) – фурни от 1 до 5, от 19 до 23, от 32 до 36 и от 47 до 54.
- III група (брой запушвания повече от 42) – фурни от 24 до 31.

Таблица 3.1. Средни стойности за броя на запушените фурни

Средни стойност	Конвертор 1	Конвертор 2	Конвертор 3	Всички
Аритметична	20	5	18	42
Медиана	98	39	121	257
Мода	4	0	1	5

В I група попадат всички фурни, които са запушвани по-малко от 5 пъти, което е стойността на модата за всички конвертори. Във II група са избрани всички фурни които попадат

в интервала между 5 и 42 броя запусвания, което е средната стойност на запусванията за всички конвертори. За III група остават останалите фурми. От фиг. 3.3., визуално също се разграничават 5 области на фурмения ред. Първата и последната са с фурмите, които попадат във II група, втората и четвъртата област обхващат фурмите от I група, а средната област включва фурмите от III група.

3.3 Изследване на методи за прогнозиране

Като първа стъпка за създаването на методи за прогнозиране на износването на стената на конвертора в областта на фурмения ред е създаване на прогнозен модел, като се използват съществуващите в базата реални данни за състоянието на стената при всяка плавка. В MicroStrategy Analytics съществуват два начина за създаване на прогнозен модел. Първият е чрез вградена функционалност, подпомагаща създаването на обучаваща метрика. В този случай автоматично се генерират PMML (Predictive Model Markup Language) файловете с прогнозните модели. Вторият начин е като се използват създадени от потребителя прогнозни модели описани на PMML. Създадени са и са изследвани три прогнозни модела чрез автоматично генериране на файловете съдържащи моделите.

След създаване на прогнозните модели са генерирани прогнозни метрики, които се използват в справки за предсказване на нови резултати.

За прогнозиране на износването на стената при всяка фурма с напредване на плавките е направен анализ на няколко експоненциално изглаждащи модела. Това се дължи на факта, че плавките са последователни във времето (направени в точно определен момент) и могат да се разгледат като времеви ред.

Върху данните за дебелината на стената в областта на фурмения ред е направен анализ за приложимостта на няколко метода ползващи експоненциално изглаждане. Тези методи могат да съдържат три компонента: ниво, тренд (наклон) и сезонност (цикличност). Процесът на износване на стената предполага, че дебелината ѝ ще намалява с напредване на плавките. Поради тази причина не е изследвано приложението на някои методи, които отчитат сезонния компонент, какъвто е методът на Холт-Уинтър.

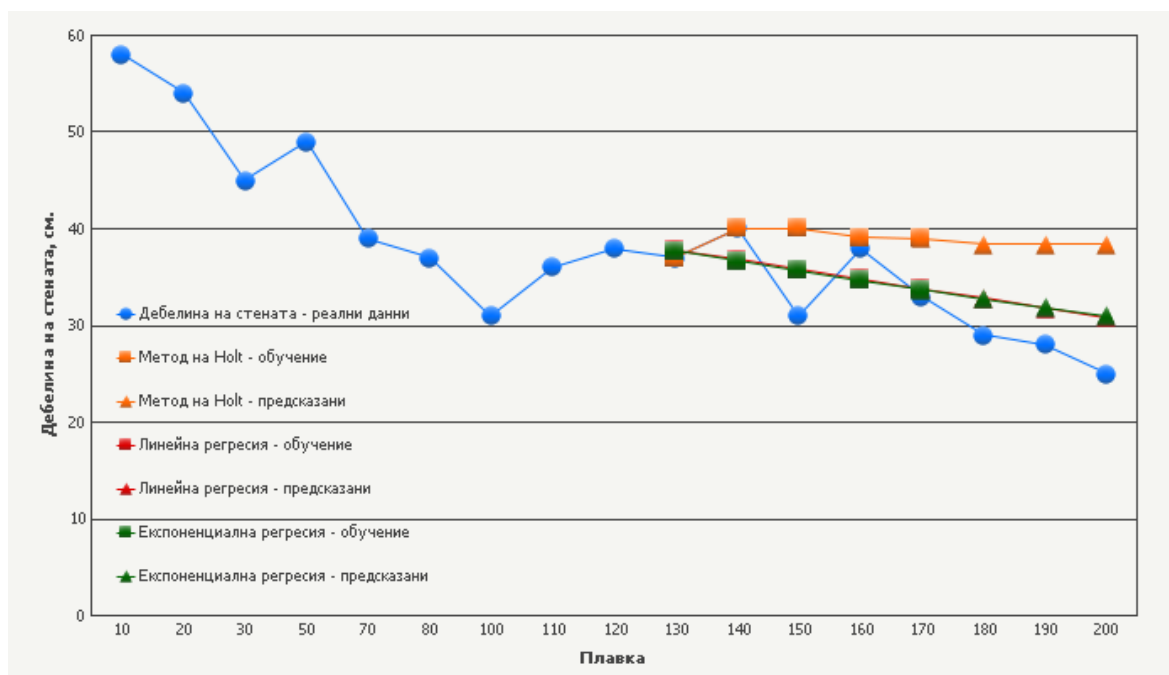
Изследвани са модели за прогнозиране на - стационарни динамични редове, нестационарни динамични редове с линеен тренд – метод на Холт, нестационарни динамични редове със затихващ тренд, мултипликативен, затихващ мултипликативен.

Най-добрият модел, който е с най-малко средно-квадратично отклонение е експоненциално изглаждащият метод на Холт за нестационарни динамични редове с линеен тренд. Оценката на моделите е направена като е изчислено средно-квадратичното отклонение между модела и реалните данни.

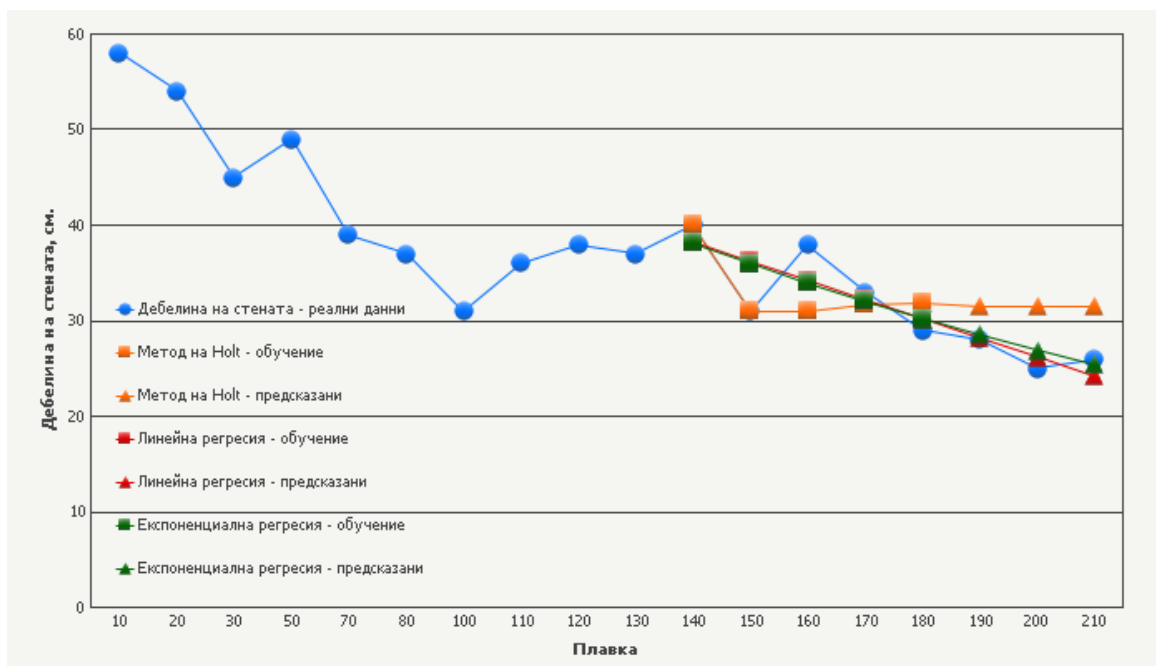
Освен по метода на Холт, са създадени и предсказващи метрики реализиращи линейна регресия и експоненциална регресия.

За методите линейна и експоненциална регресия са създадени обучаващи и предсказващи метрики за износването на дебелината на стената при всяка една фурма.

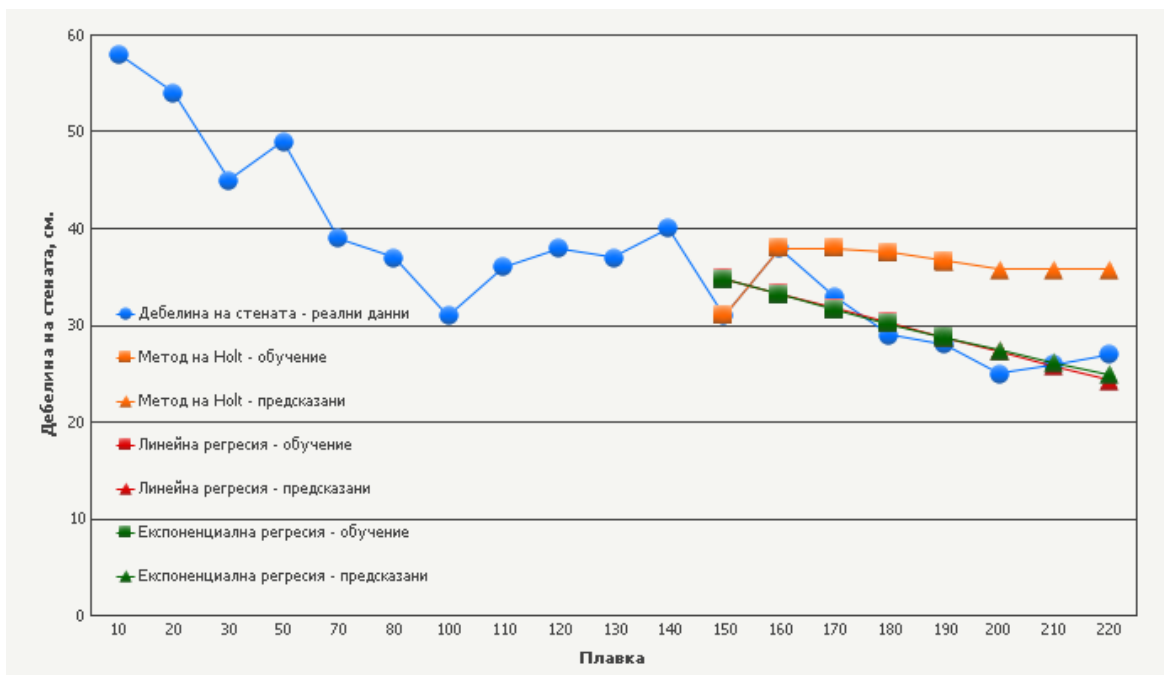
Направен е сравнителен анализ на метода на Холт, линейната и експоненциалната регресия. Сравнението е представено графично за три фурми. За фурма 10 на фиг. 3.4., за фурма 22 на фиг. 3.5. и за фурма 30 съответно на фиг. 3.6.



а)



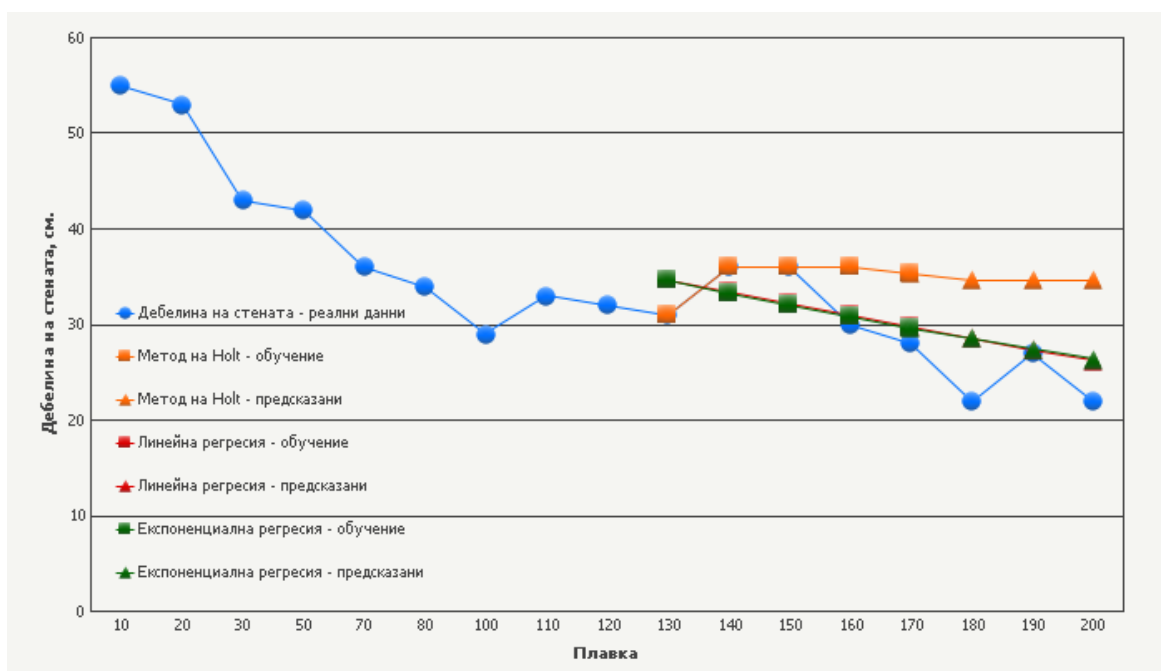
б)



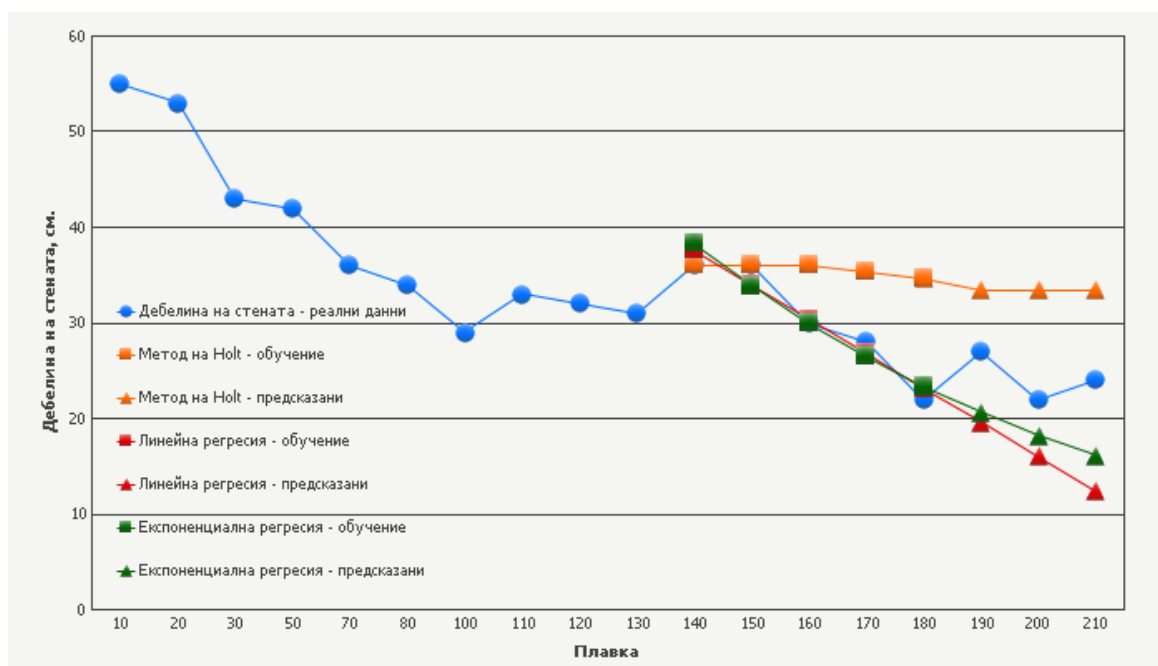
в)

Фиг. 3.4. Предсказани стойности за дебелината на стената при 10-та фурма по трите метода.

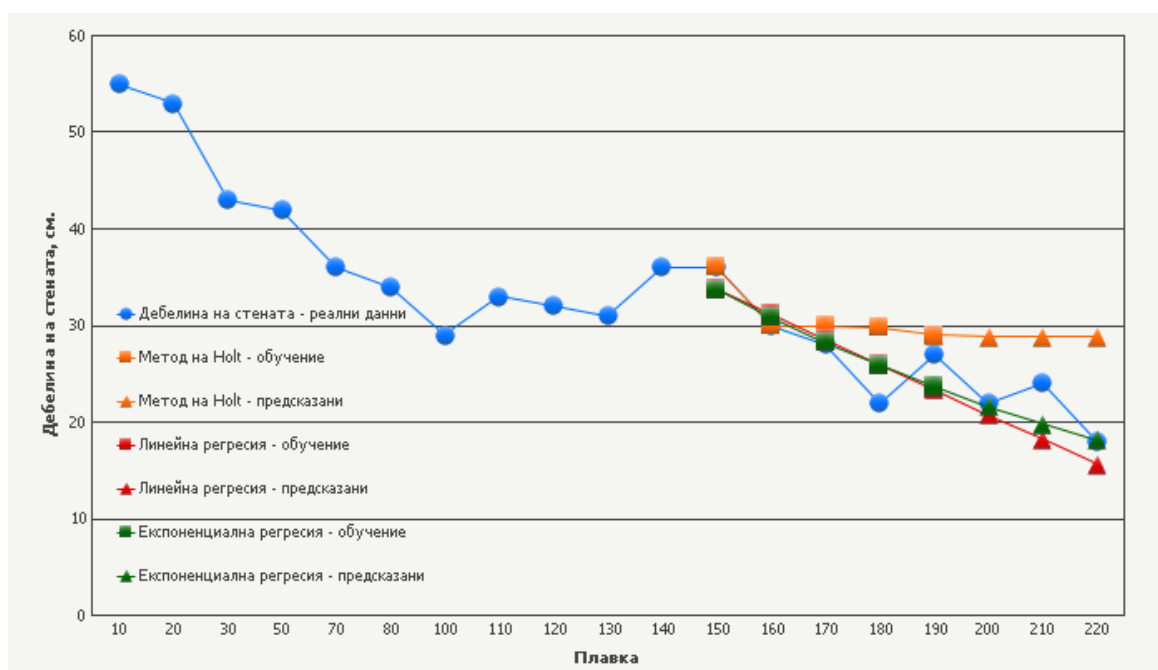
На фиг. 3.4., 3.5. и 3.6. а) е показано приложението на обучаващите процедури и за трите метода върху данните за плавки от 130 до 170 и са предсказани три точки напред (плавки 180, 190 и 200). На фиг. 3.4., 3.5. и 3.6. б) е показано приложението на обучаващите процедури за трите метода върху данните за плавки от 140 до 180 и са предсказани три точки напред (плавки 190, 200 и 210).



а)



б)

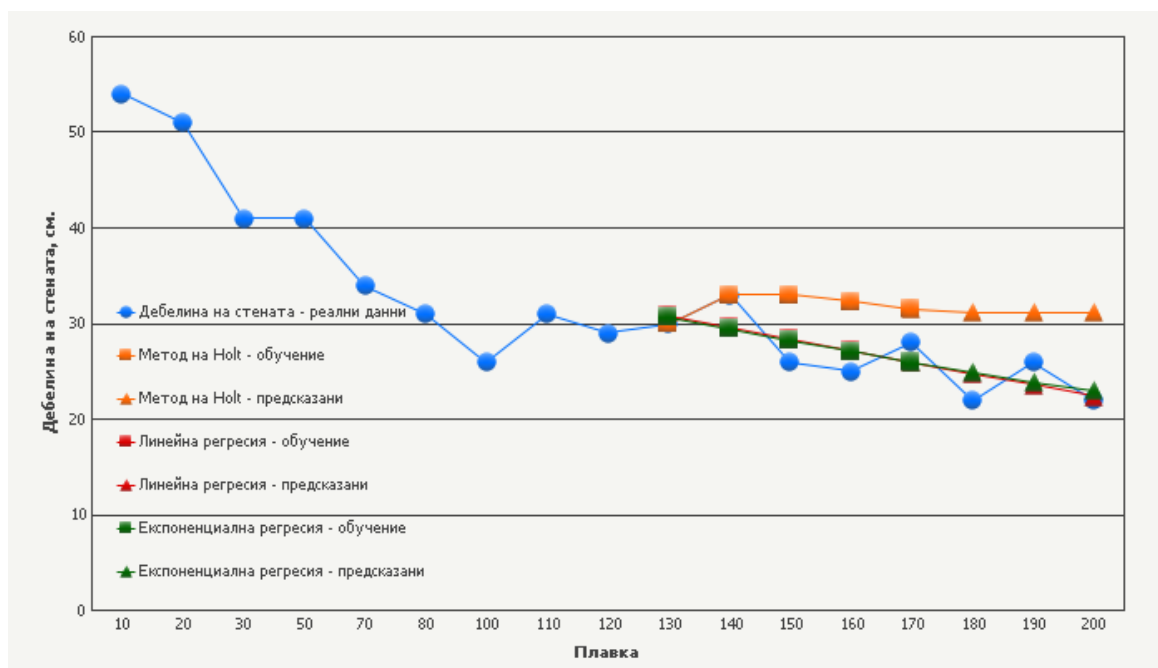


в)

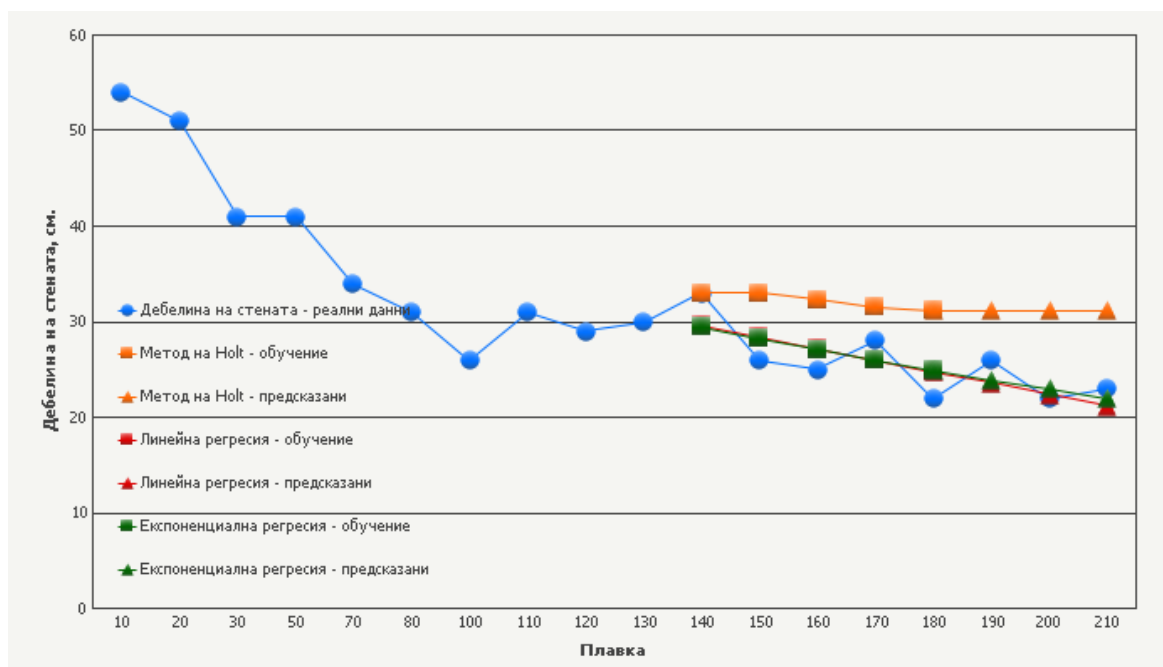
Фиг. 3.5. Предсказани стойности за дебелината на стената при 22-ра фурма по трите метода.

На фиг. 3.4., 3.5. и 3.6. в) е показано приложението на обучаващите процедури за трите метода върху данните за плавки от 150 до 190 и са предсказани три точки напред (плавки 200, 210 и 220). Обучението на предсказващите модели е направено за пет точки и са предсказани следващите три точки. От графичната интерпретация на трите метода за прогнозиране и реалните данни е видно, че най-добри резултати се получават при прогнозиране на дебелината на стената в областта на фурмения ред чрез експоненциална регресия.

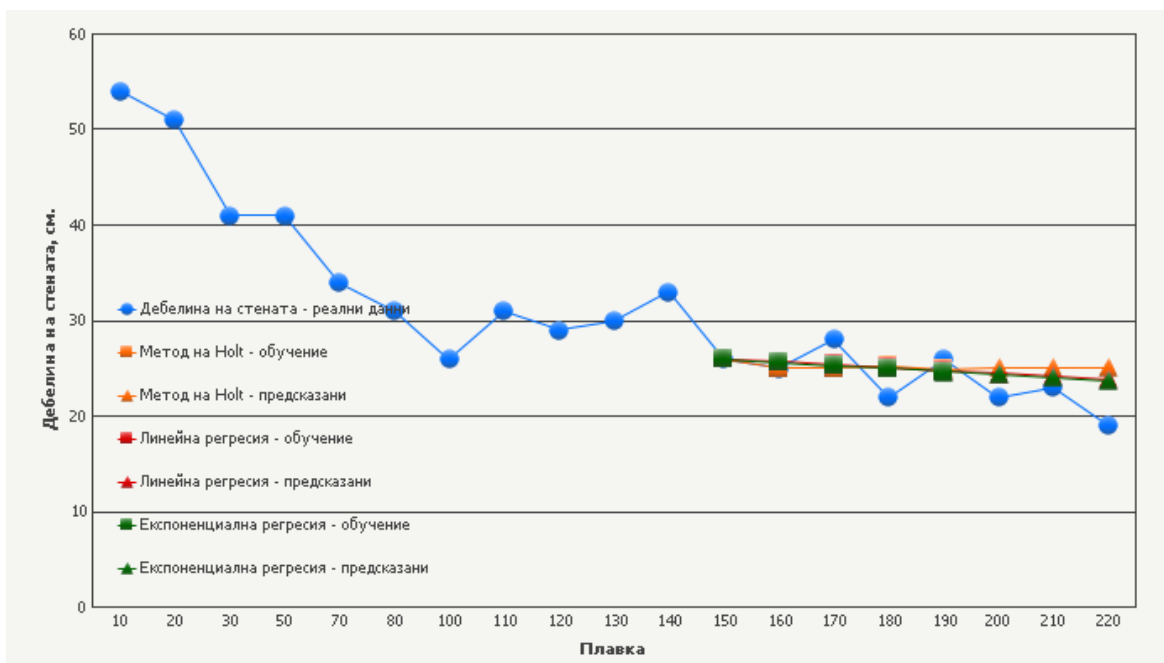
В случаите, в които има пикове в реалните данни, които най-вероятно се дължат на кристализация, водят до по-лоши прогнозни резултати. От друга страна тези пикове в данните за стената не означават, че тя е станала по-дебела в действителност.



а)



б)



в)

Фиг. 3.6. Предсказани стойности за дебелината на стената при 30-та фурма по трите метода.

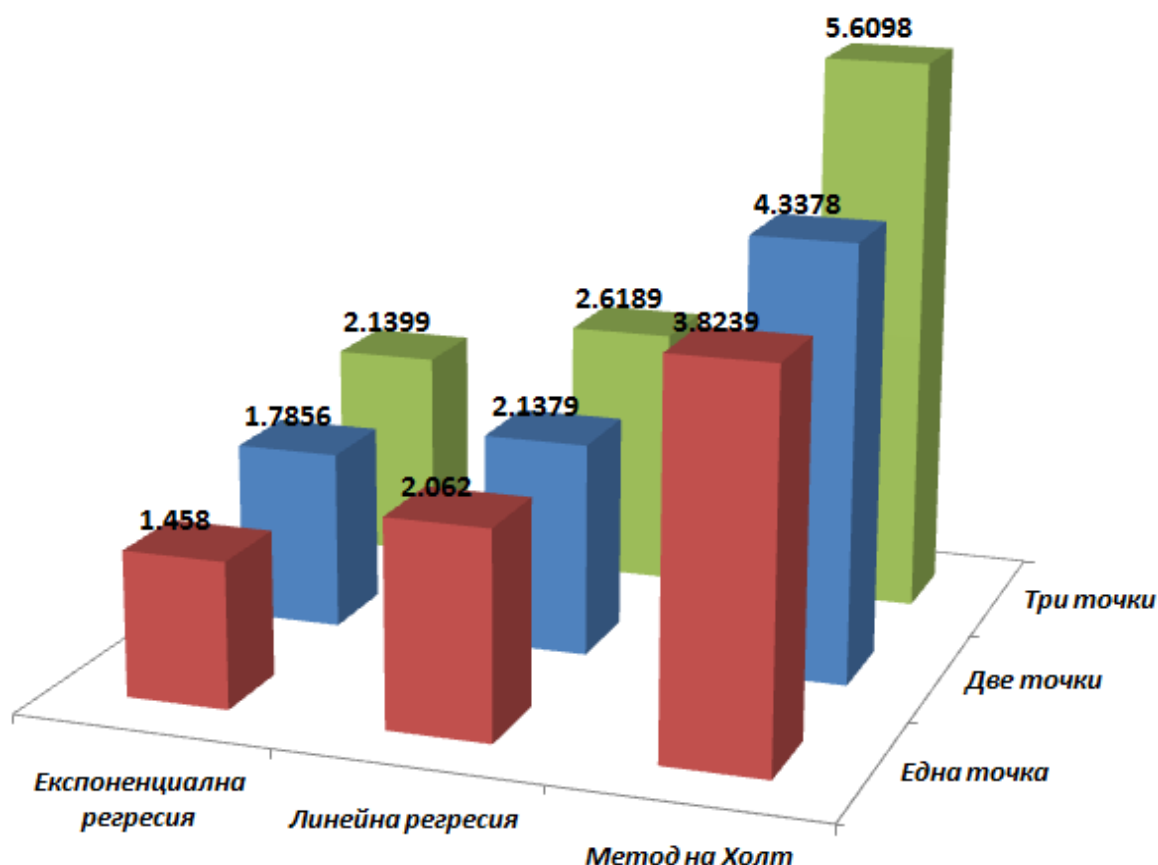
Ако разгледаме например фиг. 3.5. б) за фурма 22, при плавка 190, се вижда как според реалните данни дебелината на стената се повишава спрямо плавка 180. В плавка 200 обаче, се оказва, че дебелината на стената е същата както в плавка 180, от което се предполага, че действителната дебелина на стената в плавка 190 е също както тази в плавки 180 и 200. Това означава, че предсказаната стойност за износването на стената при плавка 190 е доста близо до действителната стойност за дебелината на стената на конвертора.

Тъй като в някои от случаите обучените и предсказаните стойности за дебелината на стената на конвертора са много близки, на някои от фиг. 3.4., 3.5. и 3.6. е възможно графиките да се припокриват.

По отношение на предсказване на стойностите за износване на дебелината на стената на конвертора за една, две или три точки напред, отново може да се наблюдава, че експоненциалната регресия дава по-добри резултати от линейната регресия и метода на Холт, т.е. колкото по-далеч напред се предсказват стойности, толкова по-неточни стават линейната регресия и метода на Холт.

3.4 Оценка на методите за прогнозиране

Оценяването на методите за прогнозиране е направено като е изчислена средно-квадратичната грешка между прогнозните резултати и реалните данни за всеки един метод, за съответно първата, втората и третата предсказана стойност за всички фурни. Резултатите от изследването на трите метода са показани на фиг. 3.7.



Фиг. 3.7. Оценки на методите за предсказване за една, две и три точки напред

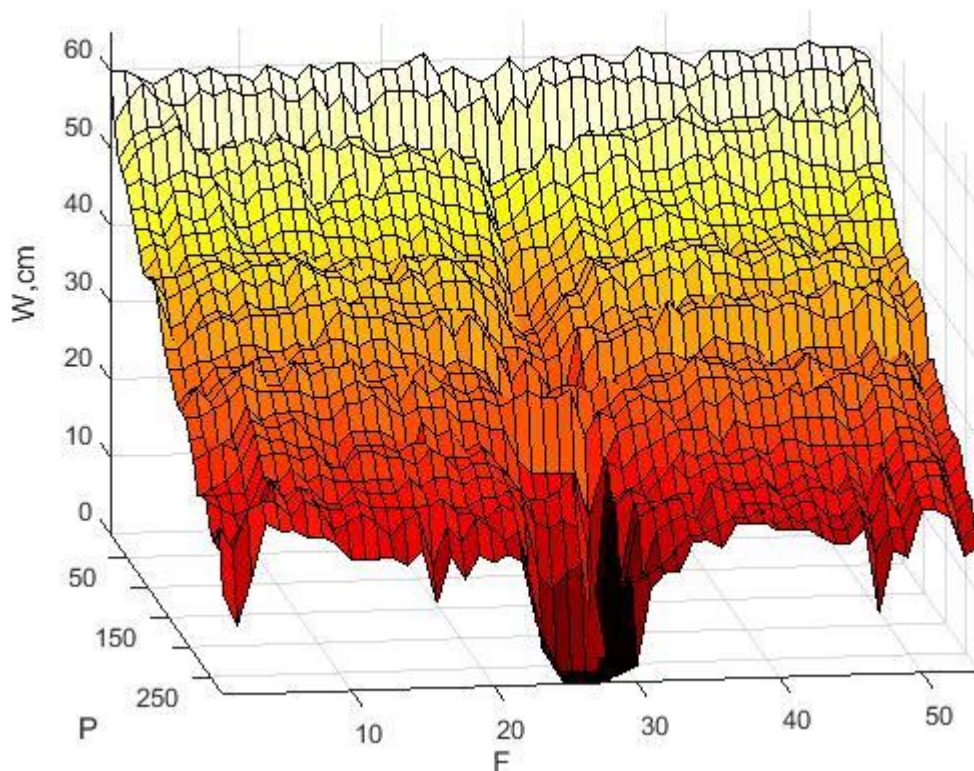
От направения анализ най-подходящ за предсказване на износването на стената в областта на фурмения ред се оказва експоненциалната регресия, която има най-малка средно-квадратична грешка и за трите прогнозни стойности напред. Следва линейната регресия и накрая с най-голяма средно-квадратична грешка е методът на Холт, който се оказва и доста неподходящ за предсказване на износването на стената в областта на фурмения ред на Peirce-Smith конвертора.

3.5 Приложение на метода Монте Карло за определяне на продължителността на кампаниите

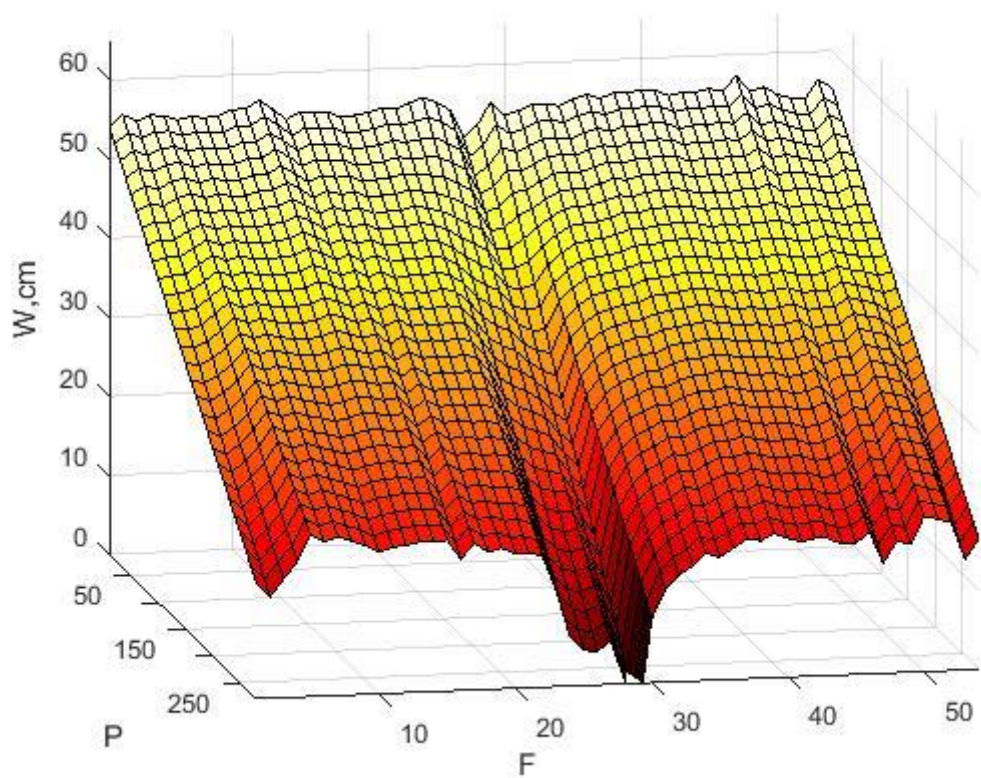
Методът Монте Карло е подходящ за прогнозиране на проблеми, които имат вероятностен характер, прекалено сложни са или имат входни въздействия с неизяснен характер (входни параметри, които не могат да бъдат отчетени), за да е възможно създаването на математически модел. Това прави метода универсален за решаване на широк клас задачи.

Целта на техническата поддръжка на Peirce-Smith конвертор е да се определи най-подходящият, икономически изгоден момент за спиране на конвертора за ремонт преди да се е пробила стената му. Единственият входен параметър, с който разполагаме е износването на стената, измервано през 10 плавки. За износването на стената влияят различни механични и физико-химични процеси, които протичат по време на преобразуването на рудата в черна мед, но не разполагаме с информация за тях. Поради тези причини се счита за подходящо използването на Монте Карло симулации за прогнозиране на дебелината на стената в областта на фурмения ред.

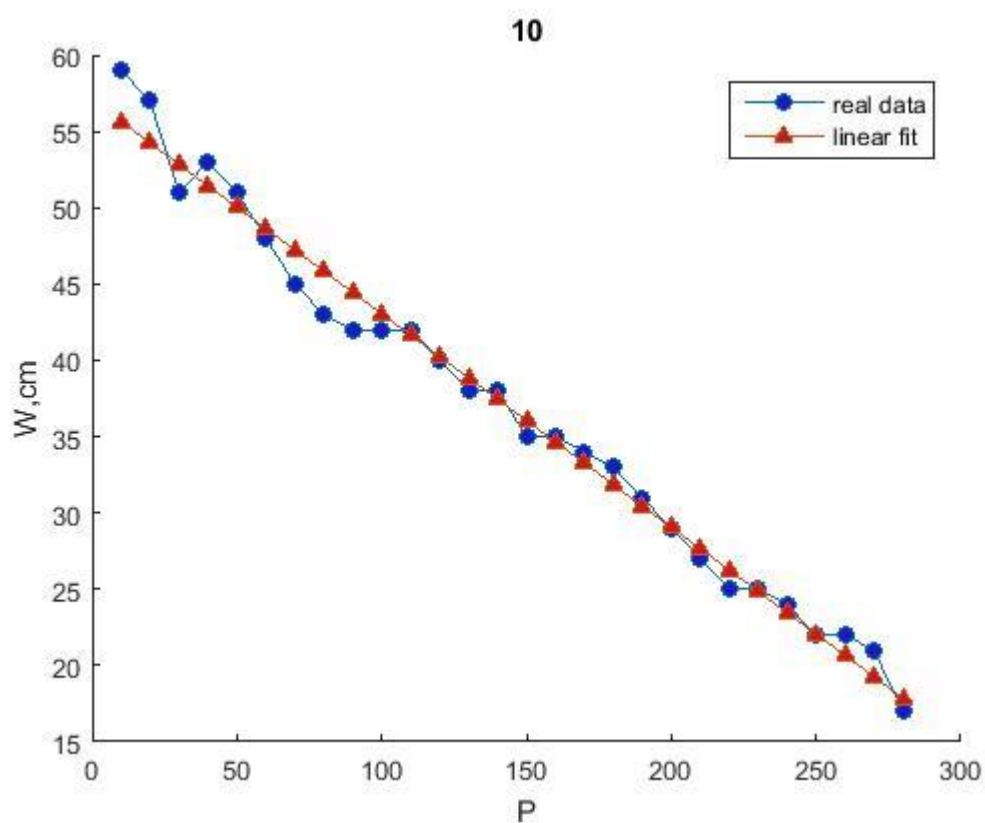
По време на работа на конвертора с напредване на плавките дебелината на стената непрекъснато намалява с променлива по големина скорост. Както е описано в дисертацията, намаляването на дебелината на стената като средно се описва добре с линейна регресия. Необходимо е обаче да бъдат отчетени и флуктуациите дължащи се на променливата скорост на изтъняване. Скоростта на изтъняване има ясно изразен стохастичен характер, с определена средна стойност за всяка фурма и определена големина на отклоненията (флуктуациите) около тази стойност. Именно, за да могат да бъдат инкорпорирани в прогнозния модел и флуктуациите се прилага конструиране и провеждане на Монте Карло симулации на процеса. Входните данни нужни за провеждане на симулациите са средната стойност на скоростта на намаляване на дебелината за всяка фурма плюс някаква средна характеристика на големината на флуктуациите на дебелината на стената. За стойност на средната скорост на изтъняване може да бъде взет наклонът на правата линия получена от линейната регресия. Като характеристика на средната големина на флуктуациите се взема средно квадратичното отклонение в дебелината на стената, като осредняването се води по различните кампании. За всяка фурма е приложено линейно изглаждане на дебелината като функция на плавката.



Фиг. 3.8. Средна дебелина на стена в областта на фурмения ред за всички плавки.



Фиг. 3.9. Линейно изгладена дебелина на стена в областта на фурмения ред за всички плавки.



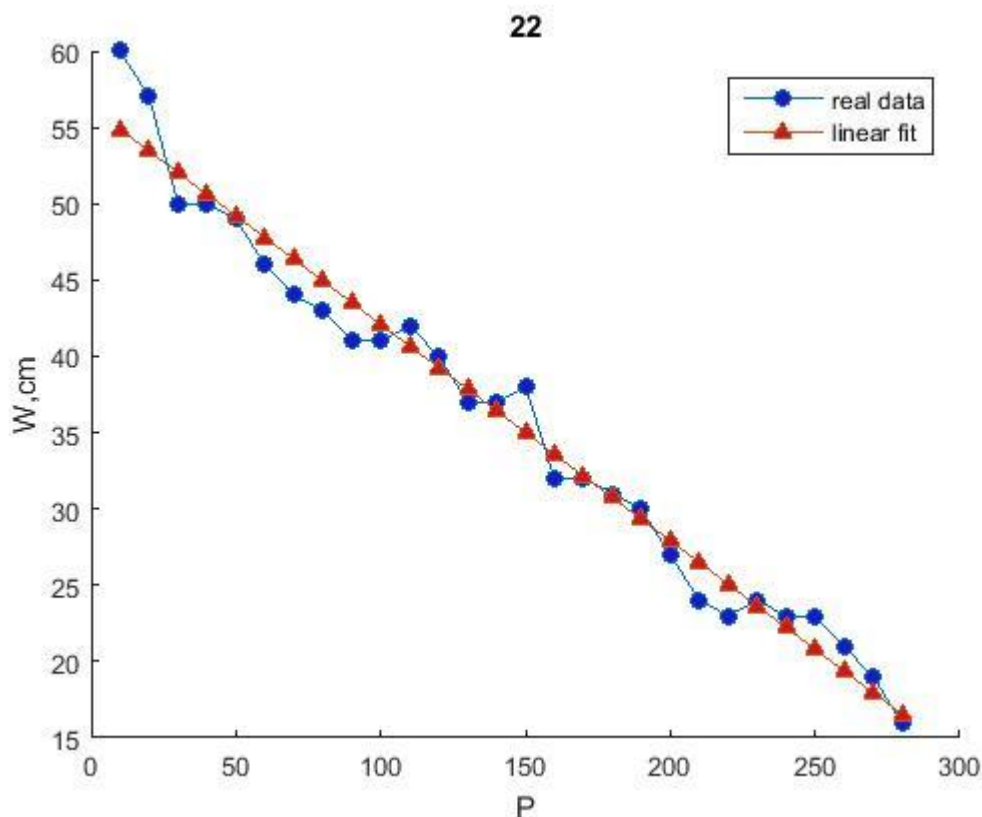
Фиг. 3.10. Линейно изглаждане за фурма 10 (I група)

На фиг. 3.8. е показана средната дебелина на тухлената стена в областта на фурмения ред за всички 300 плавки на Конвертор 1, изчислена на базата на пет кампании на конвертора. W е дебелината на стената в сантиметри, P е номера на плавката, F е номера на фурмата.

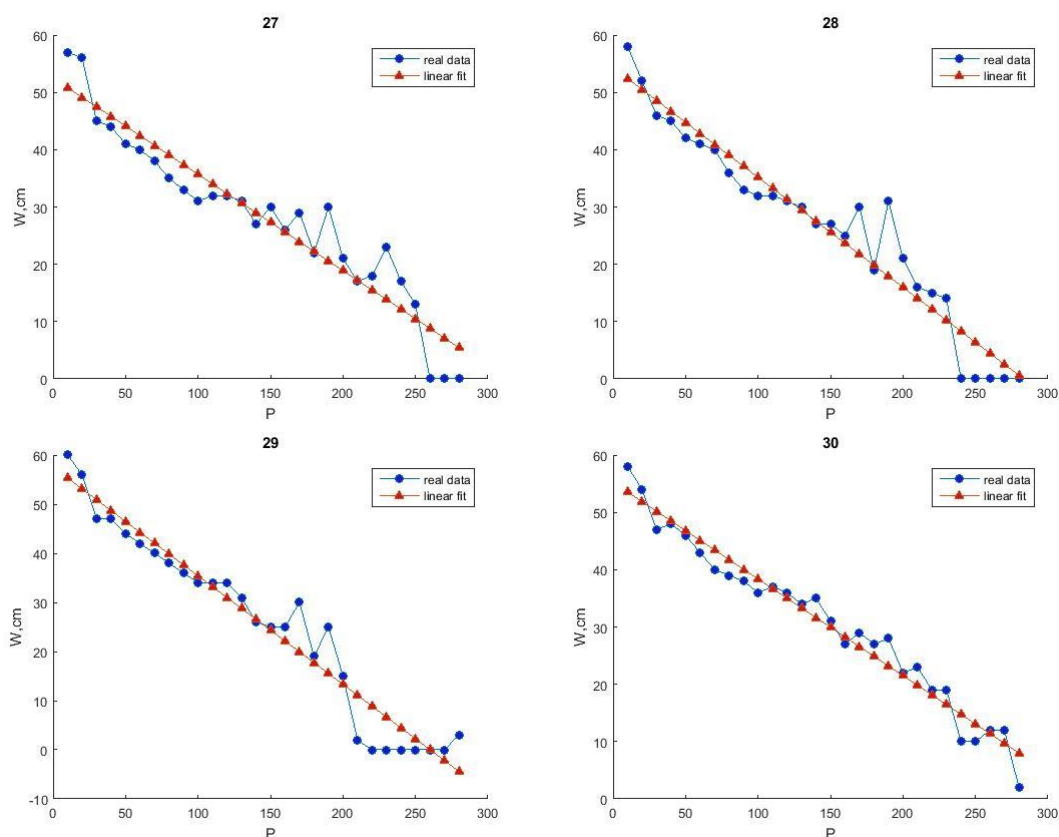
По аналогичен начин, на фиг. 3.9. са представени данните за дебелината на стената след прилагане на линейно изглаждане върху осреднените реални данни показани на фиг. 3.8.

Според групирането на фурмите, описано в точка 3.2, на фиг. 3.10, 3.11 и 3.12 е показано линейното изглаждане на данните за средната дебелина на стената, за фурни попадащи в различните групи.

В зависимост от разсейването (средната големината на флуктуациите) в дебелината на стената в областта на фурни от различните групи, на фиг. 3.10, 3.11 и 3.12, много добре се вижда, че за I група то е незначително и линейно изгладените данни са много близки до реалните. За II група колебанието в дебелината на стената е по-голямо, но въпреки това линейно изгладените данни си съответстват добре с реалните. Тъй като фурни от III група се намират в средата на фурмения ред, където процесите са най-динамични, при тях се наблюдава и най-голямо осцилиране около средната стойност и са с най-голям брой на запусвания, т.е. стената там се износва най-бързо.



Фиг. 3.11. Линейно изглаждане за фурма 22 (II група)



Фиг. 3.12. Линейно изглаждане за фурми 27,28,29 и 30 (III група)

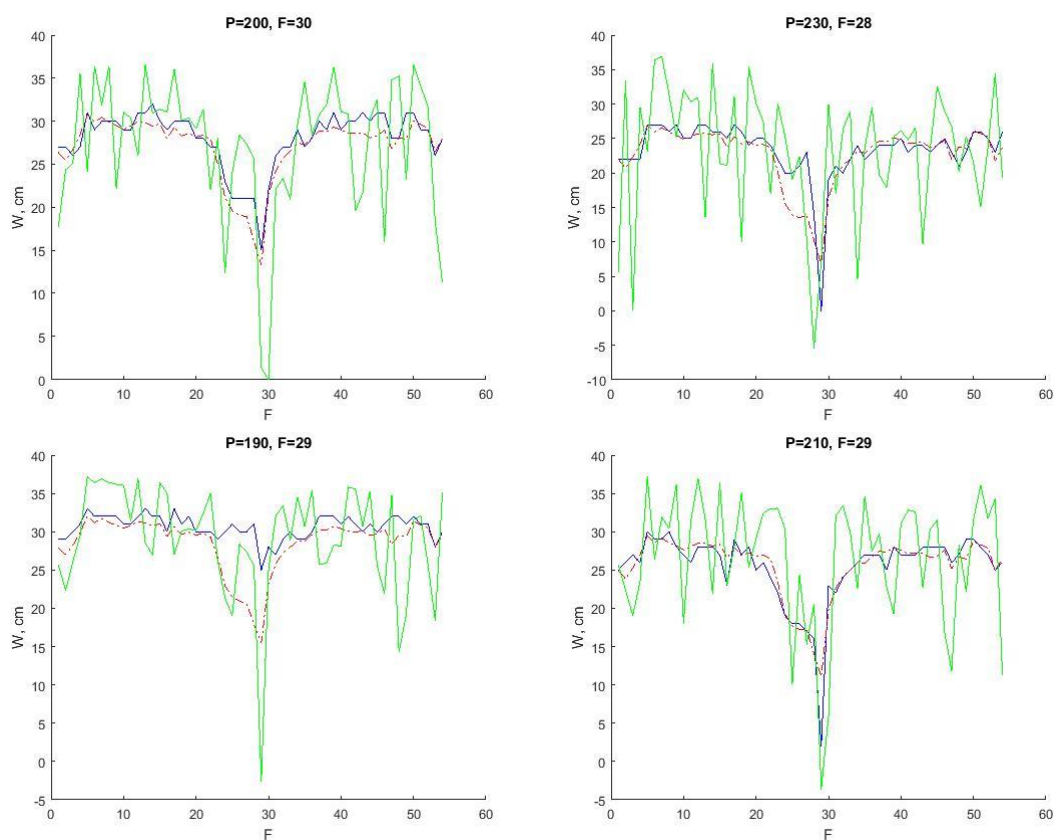
Наличието на значителни флуктуации в дебелината на стената в областта на фурмите от III група, където и най-често е извършвано запушване с цел предотвратяване на пробив, подчертава важноста на използването на метод, в случая Монте Карло симулации, за отчитане на тези флуктуации с цел подобряване на прогнозния модел.

На базата на данните от линейната регресия, а именно наклон на правите линии, описващи дебелината и съответното средноквадратично отклонение, се реализират множество Монте Карло симулации, за да се получи вероятността за пробив при дадена фурма и определена плавка (определен момент от време). Както е отбелязано, Монте Карло симулацията представлява вероятностно, т.е. стохастично, моделиране на износването на стената за всяка фурма. При всяка симулация се правят 'малки' стъпки за намаляване на дебелината на случайно избрана фурма с вероятност пропорционална на разликата между експерименталната крива на дебелината в текущата плавка и в следващата плавка за съответната фурма. На практика, тъй като използваме линейна регресия за описване на намаляването на дебелината с напредване на плавките, тази вероятност се взема пропорционална на големината на наклона на правата линия за дадената фурма. Големината на така наречените 'малки' стъпки пък се определя от средната стойност на отклоненията (респективно дисперсията) изчислена от експериментални данни за множество кампании. Колкото по-голяма е дисперсията толкова по-големи са 'малките' стъпки. За една плавка се правят толкова стъпки, колкото са необходими, за да се обхване площ равна на площта заградена между кривата на дебелината, като функция на фурмите за дадената плавка и същата

крива при следващата плавка. Процесът продължава докато дебелината на стената стане 0 при някоя фурма, т.е. получава се пробив в стената. Записват се номерата на пробитата фурма и плавката, при която е настъпил пробивът. На базата на получените резултати се строи разпределение на вероятността за пробив по фурми и плавки, както и всички други производни разпределения.

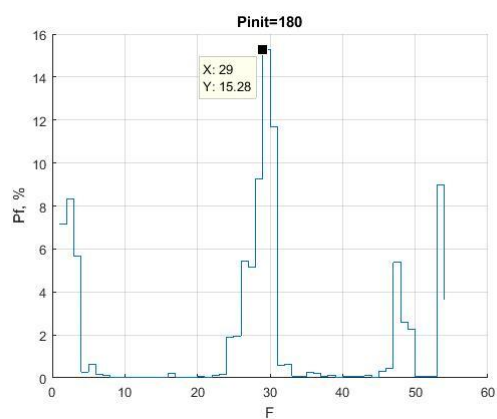
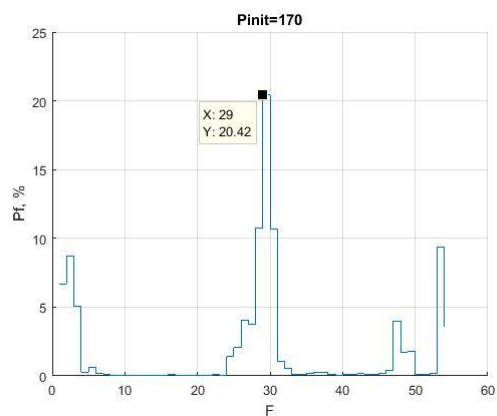
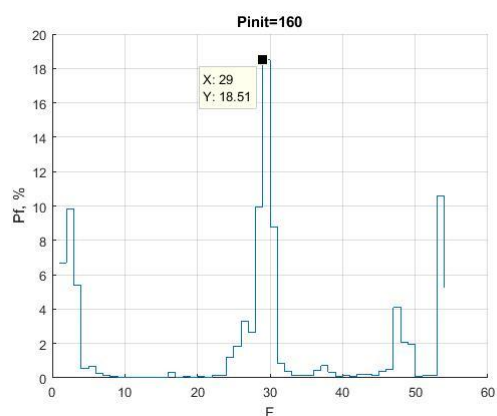
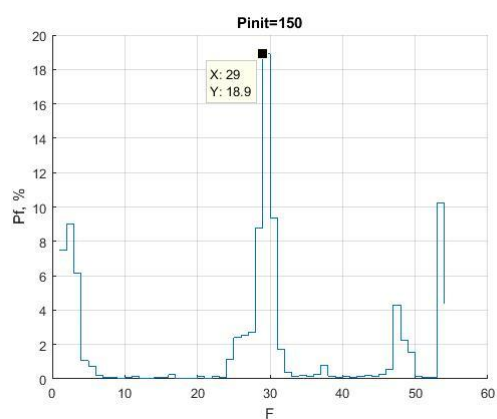
Блоковата схема, по която е реализирана Монте Карло симулацията и описанието на алгоритъма подробно са описани в точка 3.5 от Глава 3 на дисертацията

На фиг. 3.13 са показани четири Монте Карло симулации с начална плавка 150. Осреднени експериментални данни за дебелината на стената, като функция на фурмения ред, са дадени със син цвят. Осредняването е проведено по 5 различни кампании на конвертор 1. С червен цвят са отбелязани съответните данни за дебелина на стената идващи от линейната регресия описана по горе в параграфа. Всяка една конкретна Монте Карло симулация е отбелязана със зелена линия. Симулациите на дебелината на стената предсказват, както и трябва да бъде, флукутираща дебелина колебаеща се около средните стойности (дадени със син цвят, респективно червен за линейно изгладените данни). В симулациите средната големина на тези флукутации се контролира от параметър, който представлява отклонението от средната стойност на дебелината на стената за всяка фурма и всяка плавка. Параметърът е подбран така, че средната големина на флукутациите да е максимално близка до експериментално изчислената.

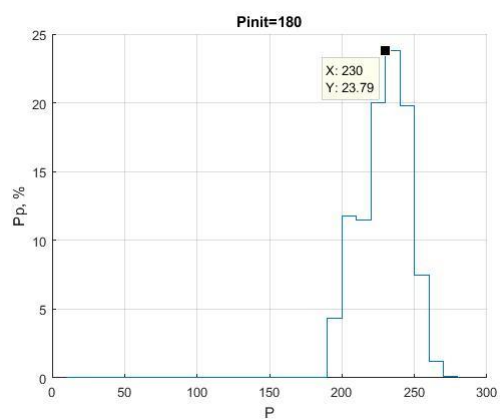
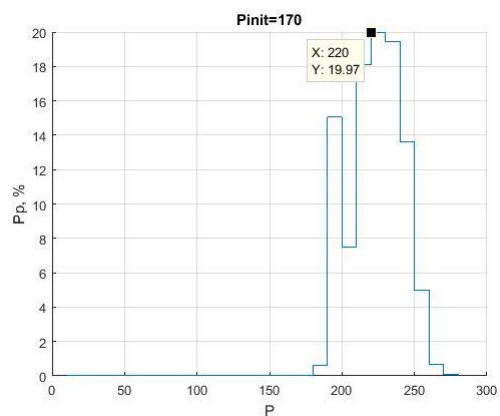
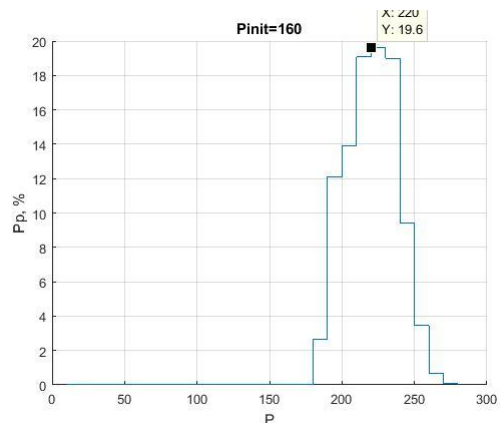
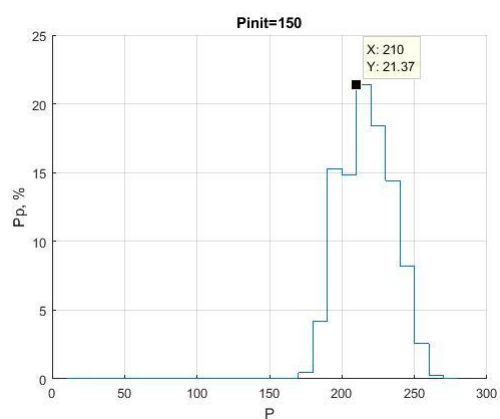


Фиг. 3.13. Дебелина на стената като функция на фурмения ред за четири различни Монте Карло симулации

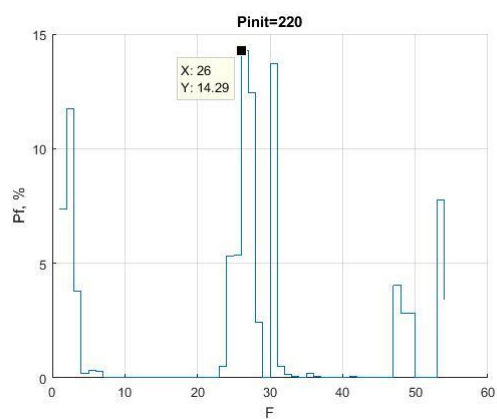
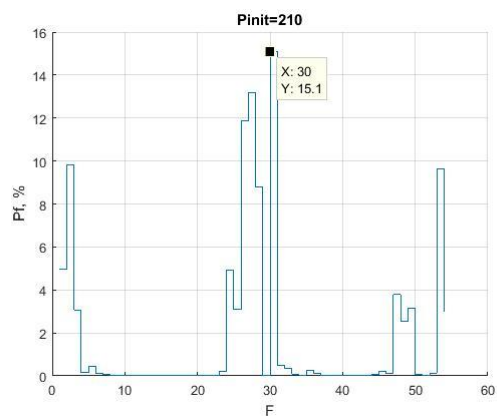
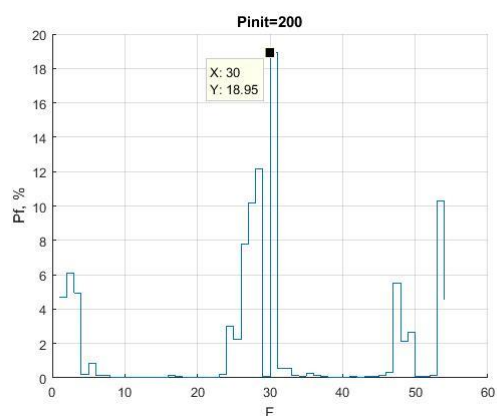
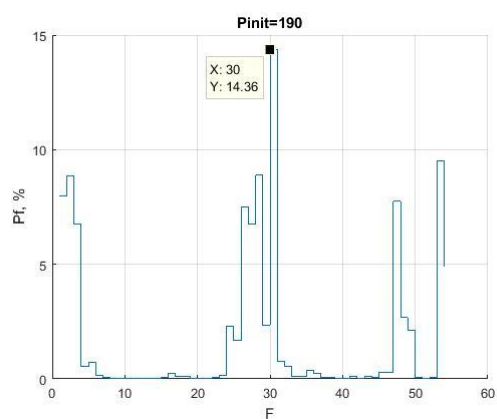
Брой на пробивите в областта на фурмения ред



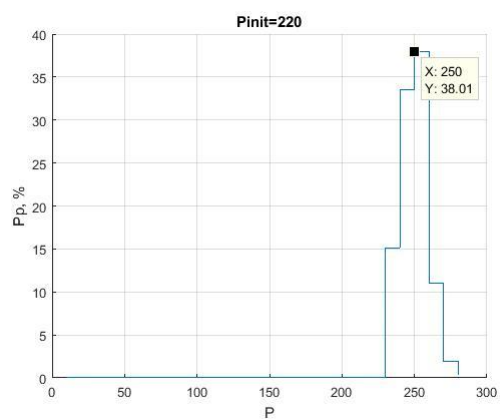
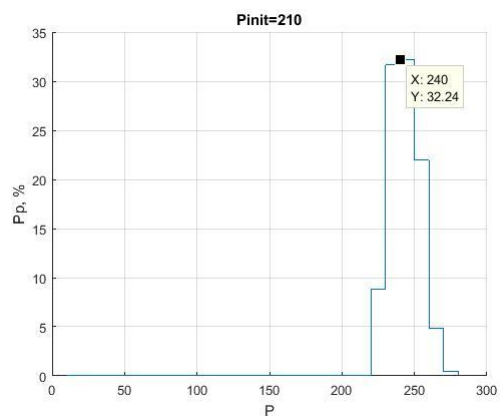
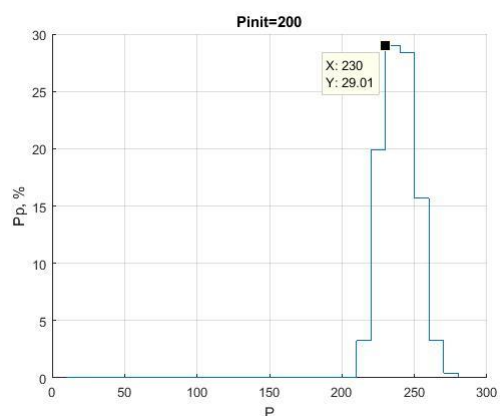
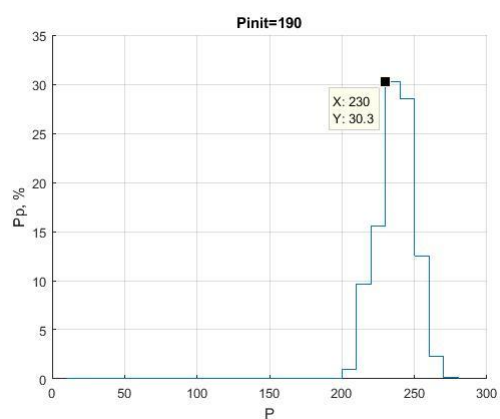
Брой на пробивите за съответните плавки след началната плавка



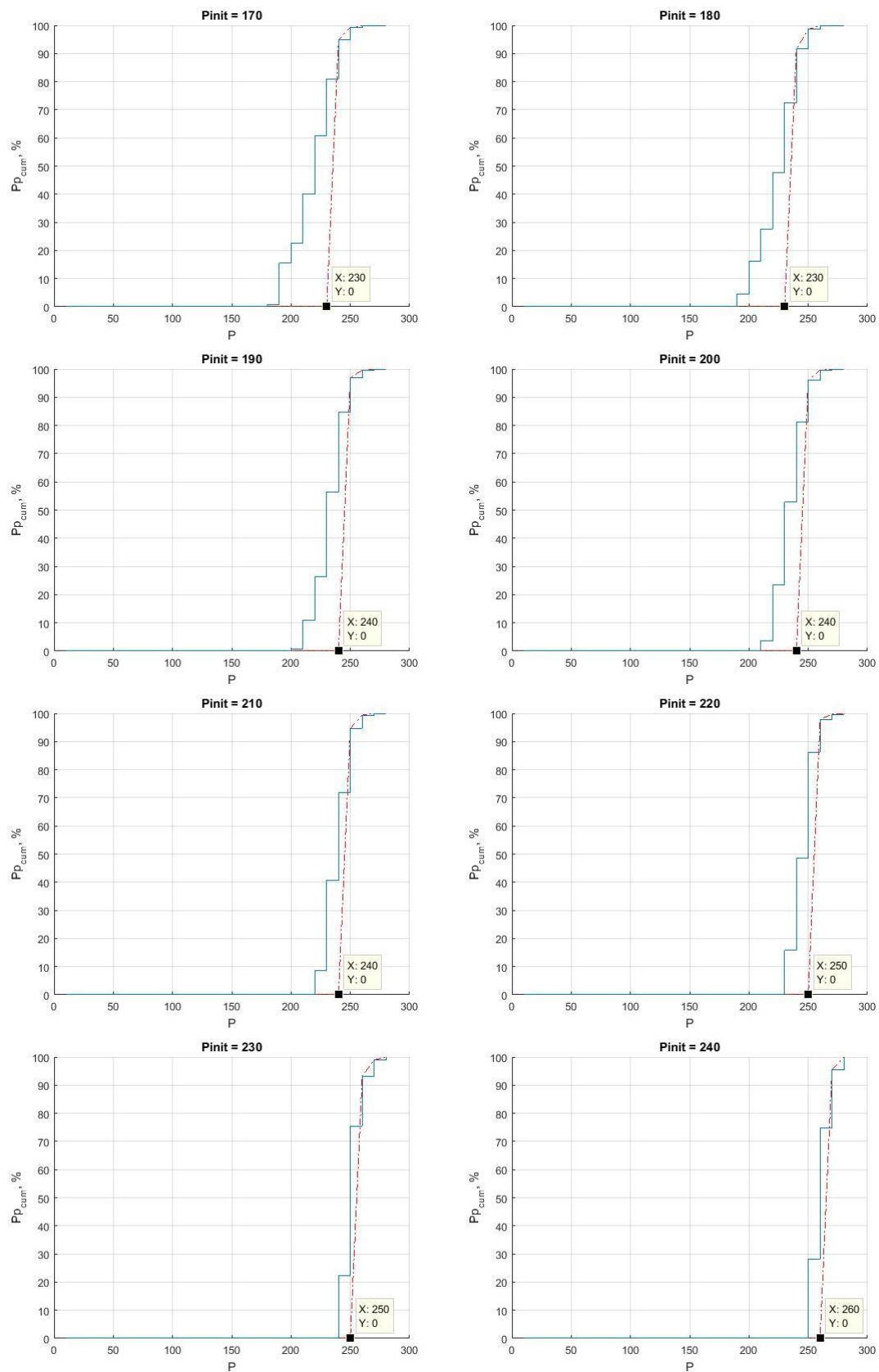
Брой на пробивите в областта на
фурмения ред



Брой на пробивите за съответните
плавки след началната плавка



Фиг. 3.14. Хистограми, показващи броя на пробивите в проценти, за фурмите в областта на фурмения ред и за различните плавки.



Фиг. 3.15. Вероятност за пробив до плавка P , изчислена за симулации стартирани от различни начални плавки

Проведени са 10000 Монте Карло симулации. Получени са хистограми показващи броя на пробивите в проценти в областта на фурмения ред и броя на пробивите в проценти за различните плавки. На фиг. 3.14 са показани хистограми от различни симулации реализирани от различни начални плавки. Означенията на диаграмите са:

F – номер на фурма,

P – номер на плавка,

Pf – брой на пробивите в проценти за съответната фурма,

Pp – брой на пробивите в проценти за съответната плавка,

Pinit – началната плавка.

Наблюдава се, че хистограмите за процентния брой пробиви в областта на фурмения ред, получени от Монте Карло симулациите се доближават до хистограмата показваща разпределението на запушените фурни, реализирана на базата на реалните данни за всички конвертори и представена на фиг. 3.3.

По отношение на броя на пробивите с напредване на плавките, се наблюдава повишаване на възможността за пробив с всяка следваща плавка. На диаграмите във втората колона на фиг. 3.14, се наблюдава повишаване на процента пробиви с увеличаване на номера на началната плавка (показани са диаграми с начални плавки от 150 до 220).

На базата на получените симулационни данни за брой на пробивите на стената в дадена фурма и плавка е построена интегралната (сумарна) вероятност за настъпване на пробива. Накратко ще наричаме тази вероятност: вероятност за пробив до плавка P.

На фиг. 3.15 е показана вероятността за пробив до плавка P при симулации стартирани от различни начални плавки – от 170-та до 250-та плавка. Вероятността е показана със синя линия. Червената разделителна линия е прокарана така, че вероятността за настъпване на пробив преди червената линия да е по малка от 10% .

Има възможност за задаване на различни доверителни вероятности, така че да се вземе адекватно решение за спиране на конвертора за ремонт.

3.6 Изводи към Глава 3

1. Направен е автокорелационен анализ за 29 лага. След анализиране на получената автокорелационна функция се оказва, че процесът на промяна на дебелината на стената е затихващ нестационарен процес и статистическата зависимост е най-силна за пет точки назад във времевия ред, т.е. достатъчни са пет измервания, като се отчете, че измерванията са правени през 10 плавки, за да се предскаже дебелината на стената в областта на фурмения ред. Направено е групиране на фурниите на базата на статистическите показатели за броя забивания на съответната фурма, което дава възможност да се прилагат различни методи за предсказване за различните фурни, в зависимост от групата, в която попадат.
2. Анализирани са пет модела за експоненциално изглаждане и е избран методът на Холт, като най-добър, с най-малко средно-квадратично отклонение в сравнение с останалите четири метода. Създадени са обучаващи метрики за три прогнозни метода – линейна

регресия, експоненциална регресия и метод на Холт. Създадени са предсказващи метрики на базата на обучаващите метрики и са използвани в справки за предсказване на нови резултати. Трите метода са изследвани, като са направени оценки на методите за три точки напред – плавки 220, 230 и 240. От направената оценка следва, че най-добър метод за предвиждане на износването на стената на конвертора в областта на фурмения ред е експоненциалната регресия.

3. Разработен е алгоритъм използващ Монте Карло симулация, който изчислява броя пробиви при дадена фурма за дадена плавка при достатъчно голям брой опити (10000). На базата на тези резултати чрез избрана доверителна вероятност се проверява при коя плавка ще се получи пробив, т.е. каква да бъде продължителността на кампанията. Освен за продължителността на кампанията, Монте Карло симулацията подпомага и вземането на решение за манипулиране на фурмения ред, тъй като дава вероятността за пробив при различните фурни. Алгоритъмът е разработен в MATLAB и е интегриран в MicroStrategy Analytics.

Глава 4 Модул за подпомагане на вземането на решение за състоянието на технически съоръжения

4.1 Сравнителен анализ на софтуерни платформи, реализиращи метода на прецедентите

За целите на подпомагането на вземане на решение за състоянието на техническо съоръжение са анализирани софтуерните платформи myCBR 2.6.6., myCBR3, jCOLIBRI и CBR-Works.

При сравнителния анализ на софтуерните платформи са отчетени следните показатели:

1. Вид и степен на документиране на софтуера, и необходими знания и умения за боравене с него;
2. Вид на софтуера, поддръжка и развитие на нови версии (самостоятелна среда, plugin, WEB-базиран);
3. Наличие на графичен потребителски интерфейс;
4. Първична обработка на прецедентите (автоматична, ръчна);
5. Структура на прецедентите (обектно-ориентирана, текстова);
6. Алгоритъм на търсене и извличане на прецедентите и видове функции на близост;
7. Степен на обезпечаване на етапите на CBR цикъла;
8. Работа с различни бази данни от прецеденти;
9. Клъстеризация и индексация на прецедентите;
10. Интерфейси към външни системи;
11. Приложение на софтуера за решаване на проблеми в промишлеността и в предсказващата диагностика.

Анализът цели да установи и в каква степен самите софтуерни платформи или модули от тях могат да се интегрират в Micrstrategy, която е избрана за имплементация на основните изисквания към системите за предсказваща поддръжка, формулирани в Глава 1, точка 1.2 и е подробно описан в дисертационния труд.

Кратките заключения от направения анализ са:

Софтуерните платформи, myCBR 2.6.6 и myCBR 3, използват непълен R^4 цикъл и поради тази причина не са подходяща за по-сложни CBR приложения. Липсват интерфейси, както за връзка към външни бази данни, така и към външни системи. За разработване на CBR приложение, не се изискват познания и време, за програмиране на приложението. Необходимо е единствено, да се конфигурират прецедентите. Един от недостатъците на myCBR е, че не са ориентирани да работят с атрибути и прецеденти от текстов тип.

jCOLIBRI и CBR Works 4.3.0, реализират пълен R^4 цикъл и имат интерфейси към различни външни бази данни. За използването на jCOLIBRI се изискват отлични познания не само в конкретната област на разработваното CBR приложение, но и по програмиране. Създаването на CBR приложение в jCOLIBRI е времеемък и ресурсоемък процес, свързан с дефиниране на изискванията към софтуера, конфигуриране на база данни, програмиране на процесите и графичния интерфейс, тестване, настройка и верификация на разработвания софтуер. Понеже CBR Works 4.3.0 е краен продукт (изпълним файл), неговата интеграция в други системи не е възможна.

CBR Works 4.3.0 и jCOLIBRI могат да се използват за разработката, както на прости, така и на комплексни CBR приложения. Разработката на сложни приложения предполага експертни знания, не само в областта на изкуствения интелект, но и задълбочени знания в конкретната предметна област, за да могат да се формулират правилата за адаптация на прецедентите. И двете версии на myCBR 3 са приложими за относително прости, некомплексни CBR приложения с непълен R^4 CBR цикъл, които имат малък брой прецеденти с малък брой атрибути. За работа с тези платформи не се изискват специални познания, освен такива в конкретната предметна област.

Графичните интерфейси на CBR Works и jCOLIBRI, имат по-добри функционалности и възможности за моделиране и извличане на прецеденти, спрямо същите на MyCBR версиите.

CBR Works има по-добри възможности за филтриране на прецеденти, спрямо двете версии MyCBR. Навигирането в графичния му интерфейс измежду извлечените прецеденти е по-добро от това в myCBR.

CBR Works и jCOLIBRI, поддържат работа с външни бази данни, както и импорт и експорт на прецеденти, правила и функции за близост от и във външни бази данни.

Всички платформи, обект на сравнителния анализ, с изключение на jCOLIBRI имат недостатък при работата с атрибути от текстов тип, съдържащи големи обеми информация, особено при визуализацията на извлечените прецеденти. Поради тази причина не са удобни при работа с прецеденти, в които решението на проблема е свързано с дълги текстове или предписания от действия. Създаването и интегрирането на приложения с атрибути от посочения по-горе тип, би

могло да се направи с jCOLIBRI, но предполага добри програмистки умения и доста време за имплементация, и тестване на кода.

Независимо от всичко гореказано, всички анализирани платформи могат да се ползват за разработка на CBR системи за предсказваща диагностика, които имат прецеденти с малък брой атрибути (до 10-20). При по-голям брой атрибути, визуализацията на същите предполага множество превъртания нагоре-надолу по екрана с цел анализирането им.

4.2 Описание на процесите на вдухване на въздух в контекста на метода на прецедентите

Разработването на специализиран модул за подпомагане на вземането на решение за оперирането с фурми при управлението на Peirce-Smith конвертори, съоръжения, които се използват при производството на черна мед, се определя от различната степен на квалификация на оперативния персонал и влиянието на този фактор върху продължителността на кампаниите на разглежданите конвертори и като следствие, възможността за икономия от ремонтните разходи. Резултатите от работата на този модул дават отражение върху продължителността на кампанията, поради което е разработен и модул за вземане на решение за продължителността на кампанията.

Проектирането и реализацията на представените модули се основават на исторически анализ на управлението и текущото техническо състояние на разглежданите конвертори и международни стандарти, които специфицират изискванията към разработването на софтуер за предсказващо поддържане и прогнозиране на състоянието на технологични съоръжения.

Модулите са разработени с използване на подхода за вземане на решения на базата на прецеденти (Case-Based Reasoning (CBR)). За конкретния случай е разработен динамичен CBR. Фурмите в разглежданите Peirce-Smith конвертори са 54 на брой и са разположени във фурмен ред, за който първоначално огнеупорната изолация е с по-големи размери в сравнение с останалата изолация на конвертора. През фурмите към стопилката в конвертора се подава под налягане въздух обогатен с кислород. Протичащите окислителни процеси са силно екзотермични. Основно, реакциите протичат в областта на факела, в резултат на което, локалната температура в областта на фурмите е по-висока, отколкото температурата в останалата част на конвертора. Това обуславя и увеличеното износване на огнеупорната изолация във фурмения ред. Поради хидродинамичните процеси в конвертора, инициирани от вдухването на обогатен въздух за окисление в определени участъци от фурмения ред, огнеупорната зидария се износва с по-голяма скорост. В определени граници скоростта на износване може да бъде изравнена чрез забиване на определени дюзи, което от своя страна променя хидродинамичната обстановка в конвертора.

Забиването на дюзи може да протече самопроизволно и целенасочено. Самопроизволното забиване е вследствие от изстиването и втвърдяването на стопилката в някоя от дюзите. При необходимост, дюзите могат да бъдат отбивани в престоите между две плавки. Отбиването на фурма се налага от факта, че една неправилно забита фурма, от една страна, намалява светлото сечение на въздушния поток към конвертора, а от друга, променя хидродинамичната обстановка в него.

Целенасоченото забиване на дюзи се прави с цел намаляване на износването около конкретна фурма, както и за промяна на хидродинамичните условия в конвертора, с цел равномерното износване на огнеупорната изолация във фурмения ред. Равномерното износване позволява по-продължителното използване на конвертора (удължаване на RUL (Remaining Useful Life)) в рамките на една кампания.

Решението за забиване на една или няколко фурни, обикновено се взема въз основа на натрупания опит от експлоатационния персонал. В различните смени и периоди от годината, той е с различна квалификация, което прави актуално събирането и формализирането на знания в предметната област, за които се знае, че са довели до положителен резултат.

Знанията за създаване на настоящия модул за третиране на фурни са събирани на базата на голяма информационна извадка за успешни кампании на конверторите и плавките в рамките на тези кампании. Продължителността на една кампания обикновено е три-три и половина месеца и съдържа в себе си между 280 и 350 плавки.

4.3 Реализиране на модула за вземане на решение

От гледна точка на организацията на процедурата за Case-Based Reasoning (CBR), атрибутите на прецедентите са както следва:

N - номер на плавката в съответната кампания

$Int = \int (Ta_1 + Ta_2) dt$ е интеграл от времената (min) на активно продухване през първия (Ta_1) и втория (Ta_2) период на конвертиране, от началото на кампанията до конкретната плавка, включително.

Понеже основната причина за разрушаване на огнеупорната изолация във фурмения ред е повишената температура на изолацията, вследствие на окислителните процеси, така формираният интеграл е показателен за деструктивните процеси. Номерът на плавките и стойностите на интеграла до съответната плавка са силно корелирани, в резултат на което, в качеството на атрибут може да бъде използвана само една от двете променливи.

Понеже разработеният CBR е динамичен, решението за конкретния прецедент е препоръка за манипулиране (отбиване или забиване) на конкретни дюзи, но се отнася за следващата плавка.

В конкретния пример за вземане на решение относно състоянието на дебелината на стената в областта на фурмения ред на Peirce-Smith конвертор, атрибутите на прецедента са номера на плавката и дебелината на стената при 54-те фурни. Прецедентите са организирани и записани в таблица, която може да бъде обогатявана или да бъдат изключвани прецеденти от нея.

Системата има интерфейси към различни СУБД (системи за управление на бази данни), като MS SQL, Oracle, MySQL и др., както и към NOSQL бази данни Mongo DB, и текстови файлове (txt, csv и др.). За конкретния обект са използвани csv файлове, които са импортирани директно в системата. Данните във файла могат да бъдат както числови така и текстови.

На фиг. 4.1. е даден общият вид на CBR приложението, като чрез левия панел може да бъде избрана фурмата, за която се въвеждат данни, а в десния панел е полето за въвеждане на стойностите за дебелината на стената при съответната фурма.

The screenshot shows the CBR application interface. At the top, there is a navigation bar with tabs: Shared Reports, My Reports, History List, My Subscriptions, Create Report, and Create Document. Below the navigation bar, there is a breadcrumb trail: 1. Pierce-Smith Convertors > Shared Reports > Вземане на решение. The main area is divided into two panels. The left panel contains a list of wall thickness requirements (Дебелина на стената) with values 39, 40, 41, and 54, all marked as (Required). The right panel contains two input fields for wall thickness (Дебелина на стената) with values 61 and 54. Below the input fields, there is a text box for Report Message Name: Вземане на решение. At the bottom, there are buttons for Run Report and Cancel.

Фиг. 4.1. Задаване на стойности за атрибутите на тестовия прецедент

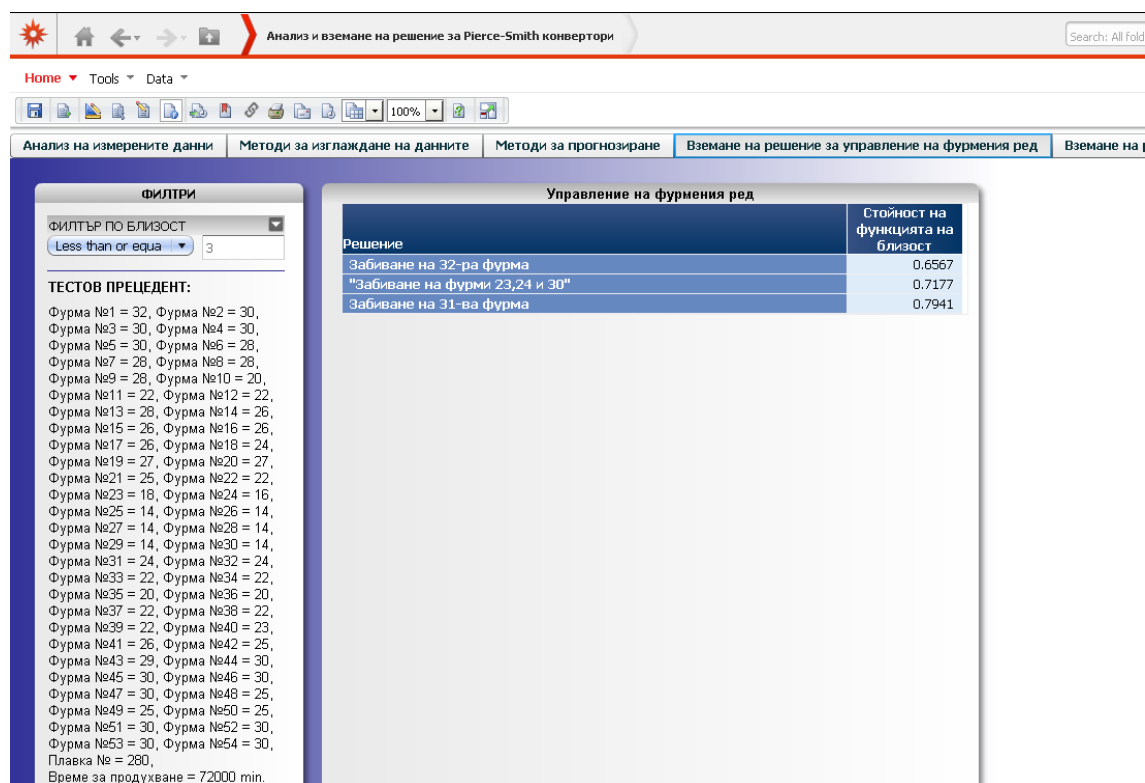
След като данните за даден прецедент са въведени, чрез бутона „Run Report” се активира процедурата по търсене и извличане на К на брой най-близки прецедента до тестовия (въведения).

Функцията за близост между прецедентите е от вида Евклидово разстояние. Освен евклидовото разстояние, като оценител на близостта между прецедентите и техните атрибути са разработени Манхатъновото разстояние и разстоянието на Минковски, частен случай на което, са Евклидовото разстояние и Манхатъновото разстояние.

Освен различни методи за оценяване на близостта между тестовия прецедент и прецедентите в базата са разработени и няколко критерия, чрез които се определя колко броя от прецедентите да се визуализират в зависимост от получената оценка за близост. Критериите за извличане на броя прецеденти от базата са:

- По стойност на функцията на близост – извличане на всички прецеденти, чиито стойности на близост са по-големи или по-малки от зададена стойност;
- По предварително зададен брой прецеденти – извличане на зададен брой прецеденти, сортирани по изчислените стойности на функцията на близост;
- По процентна извадка от всички прецеденти, сортирани по изчислените стойности на функцията на близост.

На фиг. 4.2. са показани резултатите на модула за „Вземане на решение за управлението на фурмения ред” от търсенето в базата с прецеденти, класирани по близост на първите три най-близки прецеденти. Вдясно на екрана са стойностите на атрибутите на въведения тестов прецедент. Когато във филтъра по близост не е избран критерий се извличат всички прецеденти от базата с прецеденти. В лявата част на екрана се визуализират извлечените резултати. За функция на близост е използвано Евклидовото разстояние.



Фиг. 4.2. Извличане на трите най-близки резултати от базата с прецеденти за зададения тестов прецедент

Добавянето на нов прецедент в базата с прецеденти се осъществява с решение на експерта. По време на изпълнение на R^4 цикъла е възможно експерта да реши, че новия тестов прецедент трябва да се запише в базата. В системата за предсказващо поддържане на технологично съоръжение, тази функционалност е решена по два начина. Първият е чрез импорт на csv файл съдържащ новия прецедент, а вторият е чрез т. нар. Transact SQL в MicroStrategy Analytics.

Добавянето на прецедент в базата чрез csv файл се осъществява по същия начин, по който се реализира и импорта на базата с прецеденти. Структурата на файла трябва да бъде същата, както на първоначално въведените данни.

Добавянето на нов тестов прецедент с помощта на Transact SQL в MicroStrategy Analytics е реализирано чрез генериране на заявка към базата данни, с която се записват въведените нови стойности, за атрибутите на прецедента и съответното решение. Преди да се запише в базата, се прави проверка дали съществува такъв прецедент. Сравняват се стойностите на атрибутите, и ако такъв прецедент съществува, се показва съобщение.

4.4 Модули за подпомагане на вземането на решение за опериране с технологичните съоръжения

Разработени са два модула работещи на базата на вземане на решения по метода на прецедентите. Първият е „Вземане на решение за състоянието на фурмения ред”, а вторият е „Вземане на решение за продължителността на кампанията”.

Вземане на решение за състоянието на фурмения ред

В голяма степен тази част от системата е показана при описанието на реализацията на модула в точка 4.3 на дисертационния труд.

Този модул на системата подпомага вземането на решение дали дадена фурма да бъде забита или отбита. Последователността на работа е следната:

1. Задават се стойности за атрибутите на тестовия прецедент. Тъй като плавките представляват последователни точки от времето, то и използвания CBR е динамичен (DCBR), т.е. предоставеното от системата решение се отнася за следващата плавка. Тестовият прецедент е съвкупността от стойности за атрибутите на прецедента от текущата плавка. Въвеждат се стойности за дебелините на стените в сантиметри на 54-те фурми, номера на плавката и времето за продухване.
2. Изчислява се близостта между тестовия прецедент и всеки един прецедент от базата, по избран оценител на близост, и се избира критерий за визуализирането им.
3. Извеждат се избраните, едно или повече решения от базата с прецеденти, сортирани спрямо стойността изчислена за функцията на близост.
4. Експертът, който е отговорен за работата на съоръжението решава, кои от предложените стъпки ще се предприемат. Ако системата не е предложила нито едно адекватно според експерта решение, то той може да предприеме стъпки към добавяне на нов прецедент в базата с прецеденти.

Вземане на решение за продължителността на кампанията

За прогнозиране на продължителността на кампанията на конверторите N_C е разработен специализиран модул от системата за предсказващо поддържане на Peirce-Smith конвертори. В модула е разработен алгоритъм за прогнозиране на продължителността на кампанията (N_C) и оставащото полезно време на конвертора (RUL), базиран на CBR.

Прогнозирането се извършва въз основа на текущото състояние на конвертора и оценка на риска изчислена въз основа на него. Като метод за прогнозиране се използва вземане на решения на базата на прецеденти, които са следствие на експертни знания и натрупан опит. Прогнозирането на RUL дава възможност за вземане на решение, за стартиране на организационните дейности по подготовката, за частичен или цялостен ремонт и за спиране на текущата кампания. Вземането на решение за спиране на кампанията се прави от специализирани модули, които следват настоящия модул в информационния поток, въз основа на предсказаните стойности за N_C (N_C^1), съответно ($RUL = N_C - N$), където с N е означен номерът на текущата плавка.

За създаване на първоначалната база прецеденти (Case-Base), необходима за функциониране на модула, експертно са подбрани начален набор от плавки, съгласно изискванията на CBR от завършителните етапи на 12 успешни кампании на Peirce-Smith конвертори. Кампаниите са завършили, без да се наложат аварийни ремонти във фурмения ред и

огнеупорната изолация като цяло, и е запазена номинална производителност в завършителния период на кампаниите.

Index	
Summary of your selections	
1 Номер на плавка (Required)	✓
2 Брой забити фурми (Required)	✓
3 C1 (Required)	✓
4 C2 (Required)	✓
5 C3 (Required)	✓
6 delta=C3-C1 (Required)	✓
7 T=T1+T2 (Required)	✓
8 CRV (Required)	✓

1. Номер на плавка (Required)	Enter a value (Number). 290
2. Брой забити фурми (Required)	Enter a value (Number). 8
3. C1 (Required)	Enter a value (Number). 16
4. C2 (Required)	Enter a value (Number). 19
5. C3 (Required)	Enter a value (Number). 22
6. delta=C3-C1 (Required)	Enter a value (Number). 6
7. T=T1+T2 (Required)	Enter a value (Number). 300
8. CRV (Required)	Enter a value (Number).

Фиг. 4.3. Задаване на тестовия прецедент, необходим за вземане на решение за продължителността на кампанията

В качеството на атрибути на един прецедент са използвани следните променливи:

N е номерът на плавката, за която се отнася конкретният прецедент.

n_f е броят на забитите фурми до момента на N -тата плавка.

C_1 е координатата на центъра на клъстера, в който са класифицирани най-износените фурми от фурмения ред и с най-голяма вероятност представляват опасност от гледна точка на възможни аварии, cm.

C_2 е координатата на центъра на клъстера, в който попадат фурмите със средна степен на износване, cm.

C_3 е координатата на центъра на клъстера, в който попадат фурмите с най-малко износване и съответно представляващи най-малка опасност от гледна точка на пробив и изтичане на стопилка през тях, cm.

$\Delta = C_3 - C_1$ е разстоянието между координатите на центровете на двата крайни клъстера, см.

$T = T_1 + T_2$ е сумарното време на първия и втория период на конвертиране в цикъла на една плавка, min.

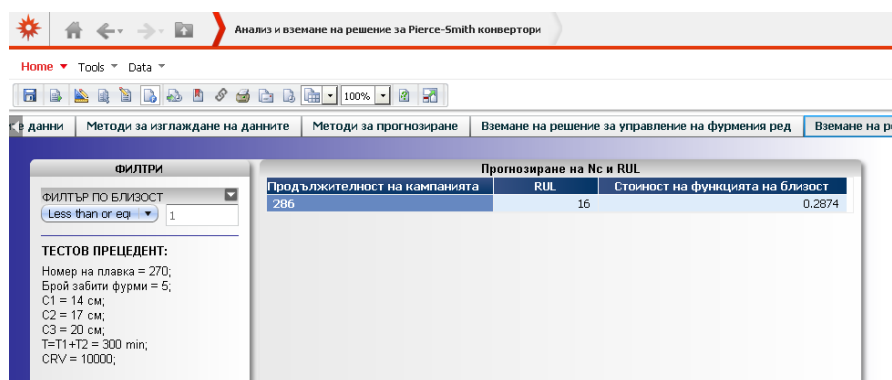
CRV (Complex Risk Value) е комплексен показател за риска, който се изчислява по Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). За конкретния случай CRV се изчислява като произведение на двата Risk Priority Number (RPN), свързани съответно с дебелината на стената RPN_1 и броя забити фурми RPN_2 .

Решението на прецедента включва:

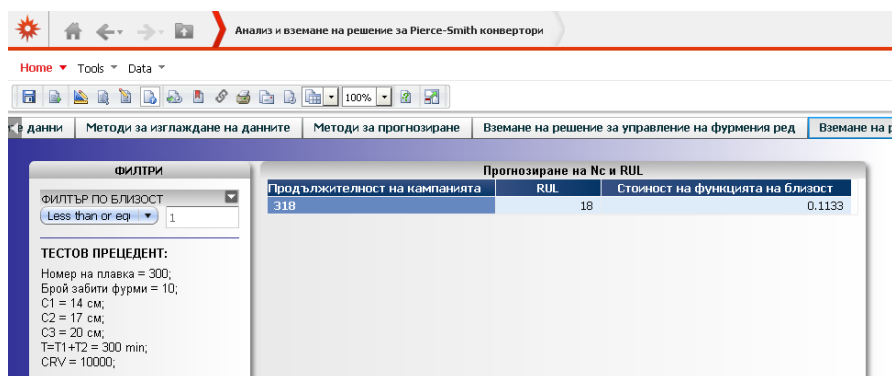
N_C - броят на плавките до приключване на съответната кампания.

RUL е оставащото време за използване (Remaining Useful Life) на конвертора, изразен в брой плавки. Изчислява се по израза $RUL = N_C - N$.

На фиг. 4.3. е показано въвеждането на стойностите за атрибутите на тестовия прецедент за вземане на решение за продължителността на кампанията.

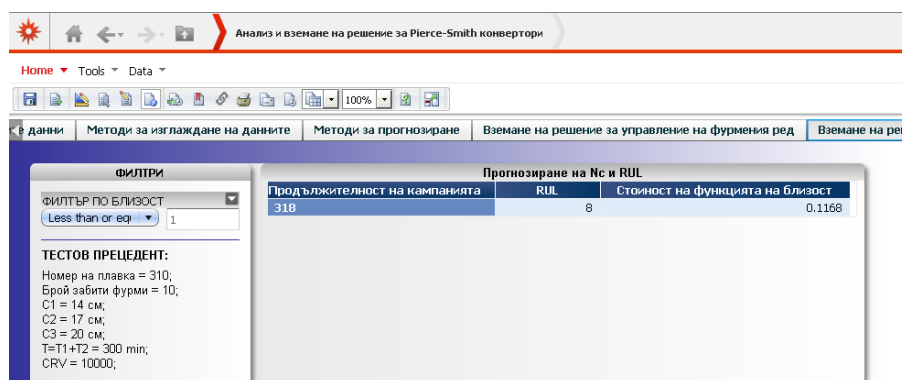


Фиг. 4.4. Работа на модула за вземане на решение за продължителността на кампанията за плавка 270



Фиг. 4.5. Работа на модула за вземане на решение за продължителността на кампанията за плавка 300

На фиг. 4.4., 4.5. и 4.6., са показани резултати от работата на модула за вземане на решение за продължителността на кампанията. За оценител на близостта е използвано Евклидово разстояние. Наблюдава се постепенното намаляване на броя на оставащите плавки с напредване на кампанията. На фиг. 4.4., където номерът на плавката е 270, оставащите плавки до края на кампанията, според извлеченият от базата прецедент, са 16. На фиг. 4.5. и 4.6., може да се види, че резултатите показват 18 и 8 плавки до края на кампанията, а номерата на текущите плавки са съответно 300 и 310.



Фиг. 4.22. Работа на модула за вземане на решение за продължителността на кампанията за плавка 310

4.5 Изводи към Глава 4

1. Направен е сравнителен анализ на възможностите на най-разпространените софтуерни платформи, реализиращи метода на прецедентите. Изборът им е направен на базата на предварителни проучвания и използването им за решаване на проблеми в други предметни области. От анализа следва, че софтуерната платформа MicroStrategy Analytics отговаря на изискванията, описани в точка 1.2 от Глава 1 и показателите от точка 4.1 от настоящата глава. MicroStrategy позволява работа със сложни текстови прецеденти, запазването им в различни бази данни, като предоставя и богати възможности за извличането, филтрацията им и визуализацията им, ползвайки богат набор от функции за близост.
2. Разработен е софтуер за подпомагане на вземането на решение, реализиращ метода на прецедентите с помощта на софтуерната платформа MicroStrategy Analytics. Реализиран е пълен R^4 цикъл на DCBR метода. Разработеният софтуер дава възможност за зареждане на база с прецеденти без значение каква е базата – текстов файл, SQL или NOSQL. Реализирани са различни функции на близост, които се използват за сравнение на тестовия прецедент със съществуващите в базата прецеденти. Извличането/визуализирането на най-близките прецеденти може да се осъществи по различни критерии. Методът може да се стартира многократно с различни стойности на атрибутите на тестовия прецедент, така че експертът да има възможност за адаптация и повторно ползване на метода, независимо дали е въвел нов прецедент или не. Това дава възможност за тестване и верификация на

нововъведен прецедент, като преди да се запише се проверява за съществуването на такъв в базата.

Разработени са два варианта на CBR метода. Първият метод подпомага вземането на решение за манипулиране на фурмения ред. Вторият метод дава препоръка за продължителността на кампанията.

Глава 5 Система за предсказващо поддържане на технологични съоръжения

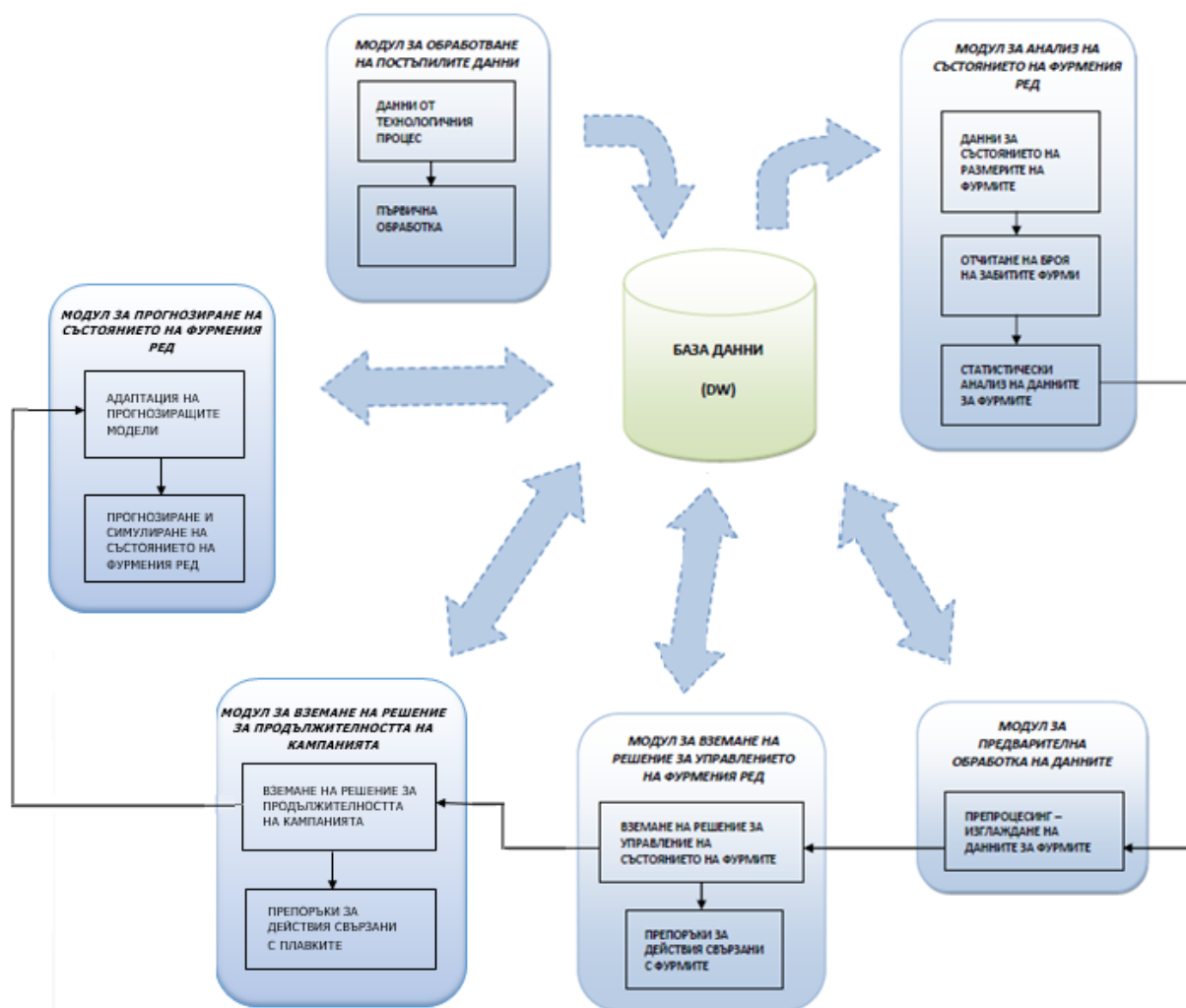
5.1 Общ вид на системата за предсказващо поддържане на технологични съоръжения

Софтуерната система за предсказващо поддържане на технологични съоръжения е съобразена със стандарта ISO 13374-1:2003, показан на фиг. 1.1. и изискванията към системите за предсказващо поддържане, описани в точка 1.2 на Глава 1 от дисертацията, които са разработени на базата на същия стандарт.

Системата, която е и цел на дисертационния труд, е разработена в средата на софтуерната платформа MicroStrategy Analytics, като са използвани богатите ѝ възможности за визуализации на данни, справки и анализи, достъпни за много на брой потребители през web интерфейс, през различни видове браузъри, мобилни и стационарни устройства.

На базата на функционалната схема на системата е реализиран предефиниран графичен интерфейс, под формата на интерактивно табло (dashboard), който представя по най-добрия начин разработените методи, алгоритми и анализи, описани в предходните глави на дисертацията. Функционалностите в системата за предсказваща поддръжка на технологични съоръжения са организирани в модули. Описанието на разработените модули са илюстрирани на фиг. 5.1.

Разработените модули включват модул за обработване на постъпилите данни от конвертора, модул за анализ на състоянието на фурмения ред, модул за предварителна обработка на данните, модул за вземане на решение за управлението на фурмения ред, модул за вземане на решение за продължителността на кампанията и модул за предсказване на състоянието на технологичното съоръжение.



Фиг. 5.1. Разработени модули на системата за предсказващо поддръжане на Peirce-Smith конвертори

5.2 Описание на модулите на системата

Модул за обработване на постъпилите данни – информацията, която постъпва от конверторите се подлага на първична обработка и се записва в хранилището на данни. За целта са създадени съответните таблици в базата и са определени идентификаторите им – номер на конвертора, номер на кампанията, номер на плавката и номер на фурмата.

Платформата MicroStrategy Analytics, която е основа за създаването на системата за предсказваща поддръжка на технологично съоръжение, предоставя възможност за импортиране на данни, както от различни системи за управление на бази данни (СУБД), така и от текстови файлове, електронни таблици и web-страници. Тъй като платформата може да работи с няколко източника на данни едновременно, то част от данните в проекта, които се отнасят за измерената дебелина на стената се намират в Access база данни, а част от данните, които съдържат базите с прецеденти са импортирани от csv файлове. Част от данните, които се намират в базата с прецеденти са илюстрирани на фиг. 4.12. в Глава 4 от дисертационния труд.

Създадената база с данни е реляционна и е проектирана така, че да бъде подходяща за целите на анализа на данни. Таблиците в базата са организирани в така наречените „схеми звезда“

(star schema), като към таблицата съдържаща факт/и на едно и също ниво на детайлност са свързани йерархии (ако съществуват такива) от атрибути. Атрибутите са обектите, които описват факта и участват в нивото на детайлност.

В разработената система за предсказваща поддръжка на Peirce-Smith конвертори един от фактите е дебелината на стената в сантиметри. Неговото ниво на детайлност се състои от атрибутите: дата на измерването, номер на конвертора, номер на кампанията, номер на плавката и номер на фурмата.

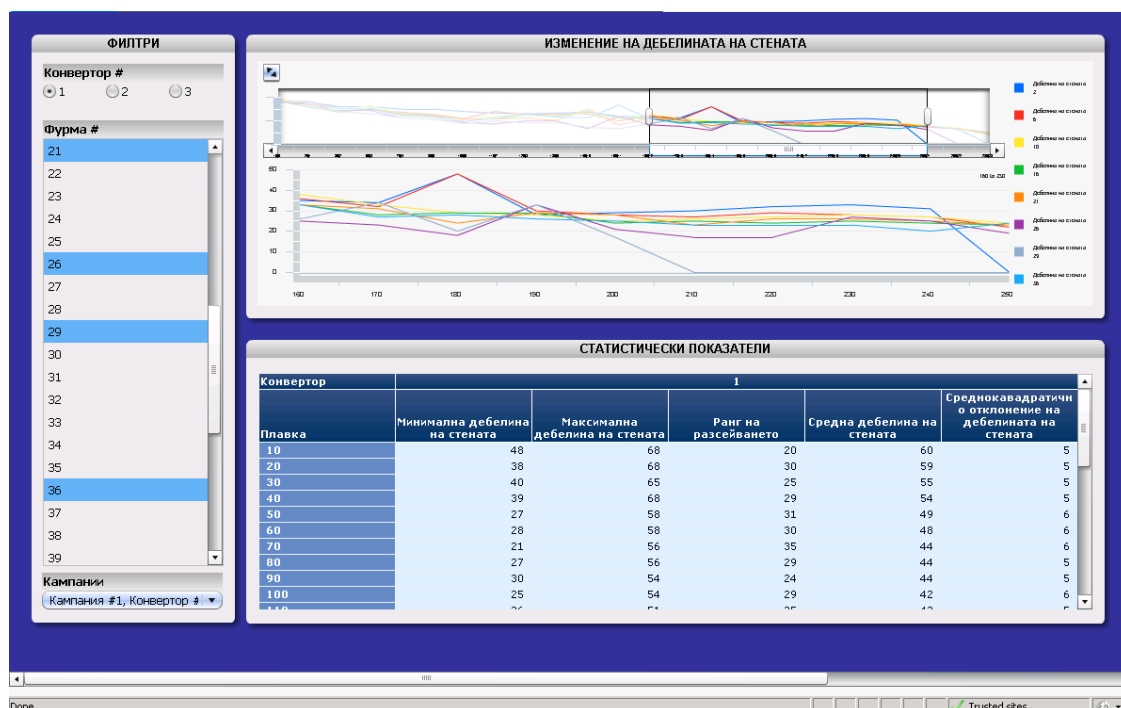
Проектирането и разработването на база данни със star schema, предполага използването на процес на извличане, обработване и зареждане на данни (ETL) в хранилище на данни (Data Warehouse), което до някъде изисква познания и умения в областите на базите данни и програмирането. Платформата MicroStrategy Analytics има интерфейси за връзка с източници на информация, като транзакционните системи (OLTP), т.е. директна връзка с реалната база данни, без необходимост от прилагане на ETL процес, и също възможност за зареждане на данни от плоски файлове, което също изключва до някъде ETL процеса. При импортирането на данни от източник, който не е база данни, трябва да се съобрази, дали данните са в табличен или в обобщен (cross-tabbed) вид.

На базата на организирания в таблици данни са създадени обекти (факти, атрибути, метрики, филтри и др.) в MicroStrategy, чрез които данните могат да бъдат използвани/манипулирани в анализи, справки и интерактивни табла. Създаването на някои обекти е описано в предходните глави на дисертационния труд.

Модул за анализ на състоянието на фурмения ред – този модул предоставя възможността да се анализират суровите данни постъпили от конвертора. Информацията за дебелината на стената се подава през десет плавки и съдържа размерите за всяка една фурма след завършване на последната от десетте плавки. Повече информация за процесите при работа на Peirce-Smith конверторите се намира в предходните глави на настоящата работа.

Разработеният модул съдържа предефиниран графичен интерфейс, който визуализира суровите данни за дебелината на стената, измерена в областта на фурмения ред (фиг. 5.2.). Както е изследвано и анализирано в главите по-горе, всяка плавка е направена в точно определен момент, така че процесът в една кампания може да се разглежда като времеви (динамичен) ред. Това дава възможност фурменият анализ върху суровите данни да се представи чрез времеви прозорец. Времевият прозорец се намира в областта „Изменение на дебелината на стената“ от модула за анализ на състоянието на фурмения ред на фиг. 5.2. Тъй като броят на фурмите и плавките е сравнително голям, за улеснение на експерта, е дадена възможност за избор на фурни и големина на прозореца от плавки. В областта „Филтри“, могат да бъдат избрани номер на конвертор, номера на фурни и кампания. Големината на прозореца, в който се показват данните за дебелината на стената на съответните избрани фурни, се определя чрез влачане с мишката на малкото прозорче в областта „Изменение на дебелината на стената“ (фиг. 5.2.). Илюстрирани са и статистическите показатели за дебелината на стената, като ранг на разсейването, математическо

очакване и средноквадратичното отклонение, което дава възможност за откриване на аномалии във входните за проекта данни.



Фиг. 5.2. Анализ на фурмения ред

Независимо от това, че е създаден предефиниран графичен интерфейс (dashboard), той може да бъде променян от потребителя (за препоръчване е да бъде експерт в предметната област на проблема). Системата дава възможност за добавяне и премахване на статистически показатели, така че показваните в брауъра данни да бъдат удобни и в подходящ вид за анализиране от експерта.

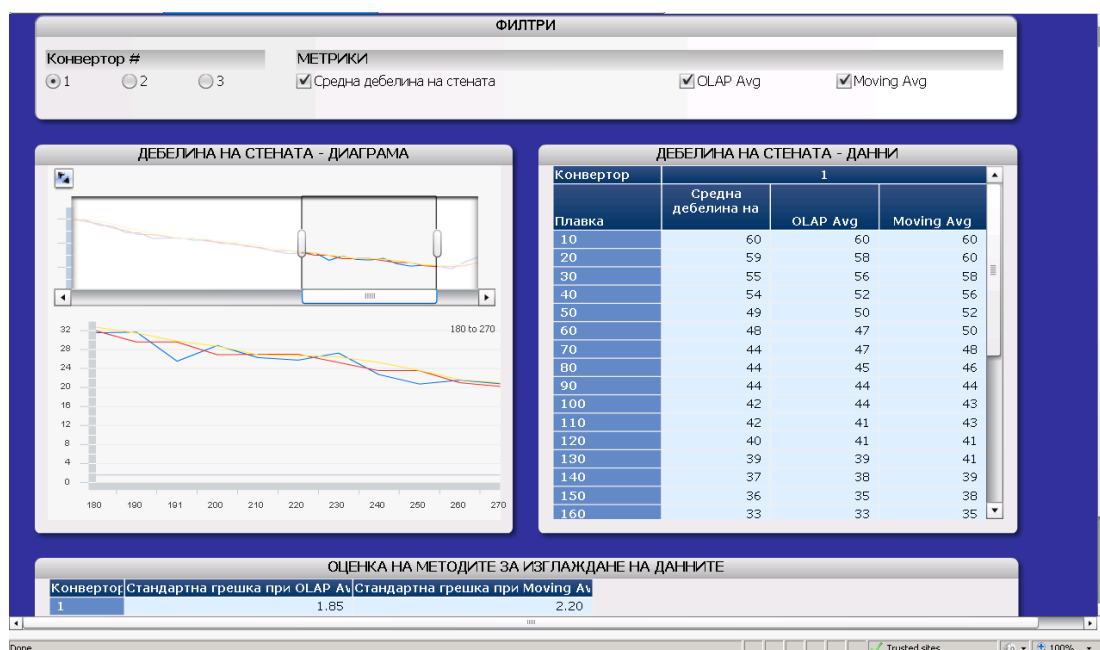
Освен графично представяне на дебелината на стената чрез непрекъсната времева линия, системата дава възможност за представяне на същите данни в табличен вид, само чрез натискане на един бутон. Промяна на разположението на данните в графичната визуализация се постига само чрез влачене на обектите с показалеца на мишката (drag&drop). Други изгледи на данните са илюстрирани в Глава 2 на фиг. 2.6., която показва статистическите показатели в табличен вид и фиг. 2.7., която показва същите показатели в графичен вид. На фиг. 3.2., 3.3., 3.4. и 3.5. в Глава 3, графично са представени данните, които анализират забитите фурми и са част от модула за анализ на състоянието на фурмения ред.

Системата дава възможност за обогатяване на модула чрез създаване от страна на потребителя на нови показатели и характеристики за състоянието на фурмения ред, използвайки функциите, които предоставя платформата MicroStrategy Analytics. Могат да се използват функции от категориите Basic Functions, OLAP Functions и Statistical Functions, показани на фиг. 1.8. (ще стане друг номер).

Модул за предварителна обработка на данните – този модул е илюстриран на фиг. 5.3.

Поради ръчното измерване на дебелината на стената в областта на фурмите и химическите процеси, които протичат при конвертирането на рудата, постъпващите в базата данни са силно зашумени. Грешките се дължат не само на некоректни измервания, но и на пропуснати измервания. За целите на анализа и бъдещите изследвания, се налага, суровите данни да бъдат изгладени, като се елиминират рязко отклоняващи се данни. След прилагане на съответните методи за изглаждане, данните могат да бъдат използвани за прогнозиране и поддръжка на процеса.

Разработен е предефиниран графичен интерфейс (фиг. 5.3.), който съдържа необходимите за този модул методи за предварителна обработка на данните. Модулът съдържа четири области. В областта „Филтри“ се дава възможност за избор на конвертор и методи за изглаждане на данните. Данните за дебелината на стената в областта на фурмения ред и резултатите от методите за изглаждане са показани, както в графичен, така и в табличен изглед. За удобство на анализа от страна на експерта, графичната визуализация е реализирана с плаващ прозорец, чиято големина се определя от потребителя на системата за предсказваща поддръжка. В най-долната област на графичния интерфейс, „Оценка на методите за изглаждане на данните“, в табличен вид са показани резултатите от оценяването на методите.



Фиг. 5.3. Методи за изглаждане на данните

Използват се два метода за изглаждане на данните - *Moving Avg* и *OLAP Avg*, които са описани в Глава 2 на дисертационния труд. За разлика от *Moving Avg*, която включва в изчислението само стойности, които са преди текущия ред, *OLAP Avg* включва стойности, които могат да бъдат както преди, така и след текущия ред на изчислението. За случаите, в които

текущата стойност е по-голяма от предходната $x_i > x_{i-1}$, се осредняват два реда преди текущия, и текущия ред.

Предоставената в табличен вид оценка на методите е изчислена, като е използвана стандартната грешка (стандартно отклонение). Описанието на модифицираните методи и формули, които се използват за разработването на модула за предварителна обработка на данните се намират в Глава 2.

Модул за вземане на решение за управлението на фурмения ред – показан е на фиг. 5.4. Той дава възможност да се анализират процесите върху дебелината на стената на конвертора, в областта на фурмения ред, с напредване на плавките.

На фиг. 4.13. е показан начинът, по който се въвеждат данните за тестовия прецедент. Тестовият прецедент се състои от 54 стойности за дебелината на стената при всяка една фурма и номера на плавката. Чрез левия панел може да бъде избрана фурмата, а в десния панел е полето за въвеждане на дебелината на стената. След стартиране на извличането на прецеденти от базата, се показва разработеният графичен интерфейс на модула, който е показан на фиг. 4.15., 4.16., 4.17 и 5.4.

Номер на плавка	Решение	Близост
30	Не се предприемат действия по забиване или отбиване на фурни	0.0000
50	Не се предприемат действия по забиване или отбиване на фурни	23.0651
70	"Забиване на фурни 2,9,19,21,25,26,29,30,31,32,34,38"	42.4617
60	Забиване на 27-ма фурма	59.6909
40	Отбиване на фурма 19	101.4051

Фиг. 5.4. Вземане на решение за състоянието на фурмения ред

След като данните за зададения прецедент са въведени, се активира процедурата по търсене и извличане на K на брой най-близки прецедента до тестовия. От областта „Филтри“ на модула за вземане на решение за управление на фурмения ред избираме критерий, който да се приложи върху извлечените от базата прецеденти: по стойност на функцията за близост, определен брой прецеденти, или процентна извадка от прецедентите. Описанието на критериите за филтриране на прецедентите от базата се намира в точка 4.3.2 на Глава 4 от дисертационния труд. От параметъра зададен в полето на областта „Филтър“, зависи броят (K) на прецедентите от базата, които ще бъдат показани в браузъра.

Функцията за близост между прецедентите $d(p,q)$ е от вида Евклидово разстояние, където p и q описват дължината на стената на всяка една фурма на текущия прецедент и конкретен прецедент в базата с прецеденти. Нейното описание и начина на създаване е представен също в точка 4.3.2 на Глава 4.

Системата дава възможност за добавяне на други функции за близост, дефинирани от потребителя, който е желателно да има познания в областта на вземане на решения по метода на прецедентите.

В лявата част на страницата, на фиг. 5.4., както и на фиг. 4.15., 4.16. и 4.17., от Глава 4 са показани данните за тестовия прецедент, а в дясната – резултатите от търсенето в базата с прецеденти, класирани по близост. Тъй като е разработен динамичен метод за вземане на решения по метода на прецедентите, то резултатите се отнасят за следващата плавка.

Начинът на функциониране на модула за вземане на решение за управлението на фурмения ред е описан в точка 4.4.1 на Глава 4.

Модул за вземане на решение за продължителността на кампанията – Този модул също реализира динамичен метод CBR (DCBR). Както е описано в точка 4.4.2 на Глава 4, в този модул, на базата на номера на плавката и времената за провеждането ѝ, се определя RUL или оставащото време за работа на конвертора до края на кампанията.

Разработен е предефиниран графичен интерфейс, който е подобен на този в модула за вземане на решение за управлението на фурмения ред. Както е описано в точка 4.3.1 на Глава 4, базата с прецеденти може да бъде която и да е СУБД или плосък файл. Това се отнася, както за всички разработени функционалности за вземане на решения по метода на прецедентите в системата за предсказващо поддържане на технологични съоръжения, така и за такива, които биха били разработени и интегрирани допълнително. Добавянето на нова функционалност по метода на прецедентите може да се осъществи и от потребител, който е експерт в областта.

Типовете на стойностите на атрибутите в базата с прецеденти могат да бъдат от всякакъв вид: числови, текстови, булеви, категорийни и др. Базата с прецеденти за разработената в модула за вземане на решение за продължителността на кампанията функционалност е базирана на Таблица 4.1. от Глава 4. Тя е импортирана в системата чрез csv файл.

Функционирането на този модул е по подобие на предходния модул за вземане на решения по метода на прецедентите. Задаването на тестовия прецедент е показано на фиг. 4.19. Вляво се избира атрибута, а вдясно се въвежда стойността му.

След стартиране на извличането на прецеденти от базата с прецеденти се визуализира графичния интерфейс на модула, който е показан на фиг. 4.20., 4.21. и 4.22. от Глава 4. За функция на близост е използвано Евклидово разстояние, а критериите за визуализиране на прецедентите от базата с прецеденти са същите, като описаните в модула за вземане на решение за управлението на фурмения ред, описани в точка 4.3.2 на Глава 4.

Системата за предсказваща поддръжка дава възможност за въвеждане на нови прецеденти в базата. Това се отнася и за двете разработени функционалности за вземане на решения по метода на прецедентите и е описано в точка 4.3.3 на Глава 4 от дисертацията.

Платформата MicroStrategy Analytics предоставя възможност за записване (export) на резултатите от анализите в текстов, Excel или PDF файл. Това позволява по-лесно манипулиране с базата с прецеденти при анализ и промяна на съществуващи или добавяне на нови прецеденти от

страна на потребители, които нямат опит в базите с данни или притеснения при работа с нови продукти. Системата може да изпраща регулярно справки и анализи, в това число и интерактивни табла (dashboards) по електронна поща, в определена директория на локална/отдалечена машина или мобилно устройство.

Модул за прогнозиране на състоянието на фурмения ред – на базата на статистическите показатели и анализи в модула за анализ на състоянието на фурмения ред, чрез автокорелационната функция, са определени типа на динамичния ред и статистическата зависимост между стойностите от предишни измервания и текущата стойност. Изследвани и анализирани са запушените фурни и са групирани в три групи. Основавайки се на тези предварителни изследвания и анализи, в модулет за предсказване на състоянието на технологичното съоръжение са разработени и изследвани няколко метода за прогнозиране на дебелината на стената, при всяка една фурма на конвертора. Разработен е алгоритъм за симулация на състоянието на фурмения ред, реализиращ Монте Карло метод.

В модула за прогнозиране на състоянието на фурмения ред са създадени обучаващи и предсказващи метрики за всяка от 54-те фурни за няколко експоненциално изглаждащи метода, линейна и експоненциална регресия, като са използвани функции от раздела Data Mining Functions на MicroStrategy Analytics.

За реализирането на прогнозните модели е използвано автоматично генериране на PMML файлове с модели на Data Mining Group. В системата за предсказващо поддържане на технологични съоръжения могат да се интегрират създадени от потребителя и описани на PMML модели, но за целта се изискват програмистки умения.

Изследването и оценяването на прогнозните методи подробно е описано в точки 3.3 и 3.4 на Глава 3 от дисертационния труд.

В този модул е реализирано и вероятностното определяне на продължителността на кампанията, като е разработен алгоритъм на Монте Карло симулация. Алгоритъмът и разработването на вероятностните характеристики са представени подробно в точка 3.5 на Глава 3.

Алгоритъмът за симулация на дебелината на стената в областта на фурмения ред с използване на Монте Карло метод е разработен в средата на MATLAB, тъй като програмирането в MATLAB е доста по-лесно и бързо, отколкото в SDK на MicroStrategy Analytics. За симулацията е използвано линейно изглаждане на данните, което също е реализирано в MATLAB, но би могло да се осъществи и в MicroStrategy Analytics и след това да се използва за целите на Монте Карло симулацията.

Събраните статистически резултати от многократните (10000 опита) изпълнения на Монте Карло симулацията, са заредени в базата данни на системата за предсказващо поддържане, и са използвани за определяне на кумулативните вероятности за получаване на пробив с напредване на плавките. За целта са използвани csv файлове. Резултатите са илюстрирани на фиг. 3.19. от Глава 3.

По отношение на възможностите за модифициране и разширяване на възможностите на модула за прогнозиране на състоянието на фурмения ред от потребителя, то би могло единствено да се използват съществуващите в MicroStrategy Analytics функции в раздела Data Mining Functions. За всяка друга промяна се изискват програмистки умения.

5.3 Изводи към Глава 5

- 1 Разработена е софтуерна система за предсказващо поддържане на технологични съоръжения, която се състои от модули, отговарящи на изискванията към системите, обект на дисертационния труд. Успешно са приложени възможностите на платформата MicroStrategy Analytics в областта на предсказващата поддръжка на технологичните обекти.
- 2 Системата, която е и цел на дисертационния труд е разработена в средата на софтуерната платформа MicroStrategy Analytics. Тя има много добри възможности за визуализации на данни, справки и анализи, достъпни за много на брой потребители през web интерфейс, през различни видове браузъри, мобилни и стационарни устройства. Съществуването на елементи, като плаващи прозорци, чрез които лесно се визуализират и обобщават времеви серии, е предимство при обработването и анализа на големи обеми от данни.
- 3 Разработената система е гъвкава, тъй като чрез създадените обекти могат да се генерират както предефинирани интерактивни табла (dashboards) и справки, така и генерирани от потребителя на момента, от нулата (on the scratch). Предефинираните графичен интерфейси и справки, също могат да бъдат променяни от потребителя. Освен графично представяне, системата дава възможност за представяне на същите данни в табличен вид, само с едно натискане на бутон. Промяна на разположението на данните се постига лесно чрез влачене на обектите с показалеца на мишката (drag&drop).
- 4 Създадени са различни обекти, като например метриките за близост, използването на които от страна на експерта, подобрява възможностите за лесно и бързо търсене и анализ на прецедентите от базата с прецеденти. Системата може да се разширява с нови обекти, които са дефинирани от потребителя, стига той да има познания в областта на вземане на решения по метода на прецедентите и статистиката. Платформата MicroStrategy Analytics предоставя множество от функции организирани в отделни категории.
- 5 За модифициране и разширяване на модула за предсказване на състоянието на фурмения ред се изискват програмистки умения, ако не се използват готовите функции в категорията Data Mining Functions. Симулирането на дебелината на стената с използване на Монте Карло метод, реализирано в среда на MATLAB и интегрирането му в системата за предсказваща поддръжка, също изисква специални знания и умения
- 6 Системата има интерфейси към различни видове бази данни (транзакционни/хранилища на данни, SQL/NOSQL), както и възможност за достъп до няколко различни източника на данни едновременно. Няма ограничение и по отношение на типовете на данните.
- 7 Резултатите от работата на системата, независимо дали са в табличен или графичен вид, могат да се записват в текстов, Excel или PDF файл. Системата може да изпраща регулярно справки

и анализи, в това число и интерактивни табла (dashboards) по електронна поща, в определена директория на локална/отдалечена машина и/или мобилно устройство.

Изводи по дисертационния труд

1. Изследвани са и са анализирани архитектурата и методите на системите за предсказващо поддържане на технически съоръжения. На базата на тези анализи са формулирани изисквания към системите за предсказваща поддръжка на съоръжения от индустрията.
2. Направен е сравнителен анализ на софтуерни платформи, реализиращи метода на прецедентите и платформи за предсказваща поддръжка. Анализирани са софтуерната платформа за анализ и вземане на решения MicroStrategy Analytics и софтуерът за инженерни и научни изследвания MATLAB.
3. Анализирани са характеристиките и особеностите на Peirce-Smith конверторите, които са обект на дисертационния труд и е създадена база данни, съдържаща данни от измервания и данни, основани на знания.
4. Разработени са методи и алгоритми за предварителна обработка на суровите данни, с оглед подобряване на резултатите получени от методите, реализиращи предсказващо поддържане на технологични съоръжения.
5. Разработени, изследвани и анализирани са различни методи за предсказване на състоянието на Peirce-Smith конверторите.
6. Разработен е алгоритъм, реализиращ Монте Карло симулация, за обекти от класа на Peirce-Smith конверторите, чрез който, освен че се симулира дебелината на стената, се определя и продължителността на кампанията, чрез вероятностни характеристики.
7. Разработени са два софтуерни модула, реализиращи различни функционалности на метода на прецедентите. Реализиран е пълен R⁴ цикъл за вземане на решения по метода на прецедентите.

Приноси на дисертационния труд

В дисертационият труд има следните научно-приложни и приложни приноси:

1. Изследвани и анализирани са принципите на изграждане и изискванията към системите за предсказващо поддържане.
2. Направен е сравнителен анализ на съществуващите софтуерни системи и подходящ софтуерен инструментариум за предсказваща поддръжка на технологични съоръжения.
3. Анализирани са характеристиките и особеностите на Peirce-Smith конверторите, с оглед създаването на система за предсказващата им поддръжка.
4. Разработени и изследвани са подходящи методи и алгоритми за предварителна обработка на данните.
5. Изследвани са методи за прогнозиране на състоянието на технологичните съоръжения.
6. Разработени са алгоритъм и софтуер за симулиране на състоянието на Peirce-Smith конвертор, базирани на Монте Карло метод.

7. Разработен е софтуер за подпомагане на вземането на решения за предсказваща поддръжка, реализиращ метода на прецедентите с пълен R^4 цикъл.
8. Изградена е цялостна, интегрирана софтуерна платформа за предсказваща поддръжка на технологични съоръжения съставена от шест модула, реализиращи описаните в дисертацията функционалности.

Авторски публикации по дисертационния труд

- A1.Томова Ф., А. Атанасов, К. Бошнаков, Изследване на методи за прогнозиране за целите на предсказващото поддържане, XXII Международен симпозиум „Управление на енергийни, индустриални и екологични системи (УТЕОС)”, 8-9 май, Баня - 2014
- A2.Томова Ф., А. Атанасов, К. Бошнаков, Система подпомагаща вземането на решение по метода на прецедентите, Списание Автоматика и Информатика, ISSN 0861-7562, книжка 4, 2013
- A3.Томова Ф., А. Атанасов, К. Бошнаков, Приложение на ВІ интерактивните табла за целите на CBR, XXI Юбилеен Международен симпозиум “Управление на топлоенергийни обекти и системи”, 8-9 ноември, Баня – 2013
- A4.Томова Ф., К. Бошнаков, А. Атанасов, Модул за подпомагане на вземането на решение при управление на състоянието на фурни за вдухване на въздух, Научна конференция с международно участие, „Автоматика’ 2013” в рамките на "Дни на науката на ТУ-София", 14 -16 юни, Созопол - 2013, Годишник на Технически Университет София, ISSN 1311-0829, Том 63, книга 1, 2013, стр. 245-250
- A5.Томова Ф., А. Атанасов, К. Бошнаков, Възможности на софтуерната платформа MicroStrategy за интелигентна обработка на данни, Списание Автоматика и Информатика, ISSN 0861-7562, книжка 5-6, 2012, стр. 174-177