ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

ADAM MRÓZEK

MODELE WNIOSKOWANIA OPERATORÓW I ICH WYKORZYSTANIE W KOMPUTERYZACJI OBIEKTÓW TECHNOLOGICZNYCH

P 4193/89

INFORMATYKA

Z. 14
GLIWICE
1989

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 980

ADAM MRÓZEK

P. 4193/89

MODELE WNIOSKOWANIA OPERATORÓW I ICH WYKORZYSTANIE W KOMPUTERYZACJI OBIEKTÓW TECHNOLOGICZNYCH

GLIWICE 1989

17635

OPINIODAWCY
Prof. dr hab. inż Zdzisław Pawlak
Prof. dr hab. inż. Stanisław Piasecki

KOLEGIUM REDAKCYJNE
REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Jan Węgrzyn
REDAKTOR DZIAŁU — Dr inż. Stanisław Kozielski
SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Leśko

OPRACOWANIE REDAKCYJNE
Mgr Anna Błażkiewicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0208-7286

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 160+85 Ark. wyd. 11,2 Ark. druk. 10.25 Papier offset. kl. III 70x100. 70g
Oddano do druku 16.11.88 Podpis. do druku 2.03.89 Druk ukończ. w kwietniu 1989
Zam. 816|88 C-24 Cena zł 224.—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

P 158|89

Pamięci Mojej Matki poświęcam

SPIS TREŚCI

Str.

WPROWADZENIE 15

Rozdział I. PRZEDSTAWIENIE NA DWÓCH PRZYKŁADACH PROBLEMÓW STEROWANIA PRZEZ OPERATORÓW ZŁOŻONYMI OBIEKTAMI TECHNOLOGICZNYMI 21

1.1. Piec obrotowy 21

1.1.1. Piec obrotowy jako obiekt sterowania 22
1.1.2. Ocena stanu pieca obrotowego 23
1.1.3. Sterowanie piecem obrotowym 24
1.1.4. Ocena wyników sterowania 25

1.2. Wielki piec 26

1.2.1. Wielki piec jako obiekt sterowania 27
1.2.2. Obserwowalność procesu wielkopiecowego 28
1.2.3. Wskaźniki procesu wielkopiecowego 29
1.2.4. Ocena stanu wielkiego pieca 29
1.2.5. Sterowanie wielkim piecem 31

1.3. Podsumowanie 34

Rozdział II. PRZEGLĄD METOD SYNTEZY ALGORYTMÓW KOMPUTEROWEGO STEROWANIA W CZASIE RZECZYWISTYM ZŁOŻONYMI OBIEKTAMI 36

2.1. Metody klasyczne 36

2.1.1. Model matematyczny - ogólny algorytm identyfikacji .. 36
2.1.2. Algorytm sterowania - synteza systemu 38
2.1.3. Wyniki stosowania metod klasycznych 40

2.2. Metody nieklasyczne 42

2.2.1. Modele bazowe i frontowe 42
2.2.2. Modele lokalne 43
2.2.3. Heurystyczna samoorganizacja 43
2.2.4. Automaty tablicowe iteracyjne 44
2.2.5. Opis za pomocą zbiorów rozmytych 45
2.2.6. Sterowanie sytuacyjne 45
2.2.7. Systemy ekspertowe 47

2.3. Podsumowanie 48

Str.

Rozdział III. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU 49

3.1. Przesłanki formalizacji 49
3.2. Formalizacja sposobu sterowania 50
3.2.1. Przestrzeń obserwacji 51
3.2.2. Przestrzeń celów sterowania 51
3.2.3. Podział przestrzeni obserwacji 53
3.2.4. Przestrzeń sterowania 57
3.2.5. Reprezentacja modelu wnioskowania 58
3.3. Aspekty identyfikacji 59
3.3.1. Przesłanki realizowalności identyfikacji 59
3.3.2. Zapis danych do identyfikacji 61
3.4. Problemy do rozwiązania 62
3.4.1. Przygotowanie danych 62
3.4.2. Realizacja identyfikacji 62
3.4.3. Implementacja modelu 64
3.5. Podsumowanie 64

Rozdział IV. ELEMENTY TEORII ZBIORÓW PRZYBLIŻONYCH W ANALIZIE MODELI WNIOSKOWANIA 66

4.1. Zbiory przybliżone - pojęcia podstawowe 66
4.1.1. Przestrzeń aproksymacji 67
4.1.2. Aproksymacja zbiorów 68
4.1.3. Aproksymacja rodziny zbiorów 69
4.1.4. Topologiczne własności aproksymacji 71
4.1.5. Klasyfikacja zbiorów przybliżonych 71
4.2. Systemy informacyjne 72
4.2.1. System informacyjny 72
4.2.2. Zależność atrybutów 75
4.2.3. Redukcja atrybutów 77
4.3. Tablice decyzyjne 79
4.3.1. Definicja formalna 79
4.3.2. Dekompozycja tablic decyzyjnych 81
4.4. Zapis sformułowanych problemów 84
4.4.1. Klasyfikacja sytuacji w sterowanym obiekcie 85
4.4.2. Analiza protokołu sterowania 87
4.5. Podsumowanie 88

Str.

Rozdział V. ASPEKTY OBLICZENIOWE 89

5.1. Reprezentacja uniwersum 89
5.2. Generowanie zbiorów elementarnych 93
5.3. Szukanie dolnych i górnych aproksymacji 94
5.4. Ocena ilościowa aproksymacji 96
5.5. Podsumowanie 97

Rozdział VI. PRZYKŁADY ROZWIĄZANIA PROBLEMÓW 99

6.1. Modele wnioskowania palaczy a sterowanie komputerowe piecem obrotowym 99
6.1.1. Reprezentacja danych do identyfikacji 99
6.1.2. Ocena i klasyfikacja sytuacji 102
6.1.3. Analiza porównawcza palaczy 107
6.1.3.1. Założenia analizy porównawczej 107
6.1.3.2. Analiza i ocena modelu wnioskowania palacza X 110
6.1.3.3. Analiza i ocena modelu wnioskowania palacza Y 113
6.1.3.4. Analiza i ocena modelu wnioskowania palacza Z 115
6.1.3.5. Ocena porównawcza modeli wnioskowania palaczy X, Y, Z 118
6.1.3.6. Podsumowanie 121
6.1.4. Implementacja komputerowa 121
6.1.4.1. Atrybuty obserwowalne a atrybuty mierzalne . 121
6.1.4.2. Struktura systemu sterowania 126
6.1.4.3. Dobór cyklu sterowania 128
6.1.4.4. Obiektowy system operacyjny sterowania piecem obrotowym 129
6.1.4.5. Wyniki sterowania komputerowego 129
6.1.5. Podsumowanie 131
6.2. Komputerowe wspomaganie mistrzów wielkopiecowników 132
6.2.1. Sterowanie "od góry" - zadania komputerowego wspomagania 132
6.2.2. Model wnioskowania mistrzów 137
6.2.3. Doświadczenia eksploatacyjne 144
6.3. Podsumowanie 144

Rozdział VII. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 146

Rozdział VIII. ZAKOŃCZENIE 150

LITERATURA 151

STRESZCZENIA 158

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 15

Глава I. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НА ДВУХ ПРИМЕРАХ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТОРАМИ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ 21

1.1. Вращающаяся печь 21

1.1.1. Вращающаяся печь как объект управления 22
1.1.2. Оценка состояния вращающейся печи 23
1.1.3. Управление вращающейся печью 24
1.1.4. Оценка результатов управления 25

1.2. Домна 26

1.2.1. Домна как объект управления 27
1.2.2. Наблюдаемость доменного процесса 28
1.2.3. Показатели доменного процесса 29
1.2.4. Оценка состояния домны 29
1.2.5. Управление домной 31

1.3. Резюме 34

Глава II. ОБОЗРЕНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ 36

2.1. Классические методы 36

2.1.1. Математическая модель – общий алгоритм идентификации 36
2.1.2. Алгоритм управления – синтез системы 38
2.1.3. Результаты применения классических методов 40

2.2. Неклассические методы 42

2.2.1. Базисные и фронтовые модели 42
2.2.2. Локальные модели 43
2.2.3. Эвристическая самоорганизация 43
2.2.4. Итеративно – табличные автоматы 44
2.2.5. Списание при помощи размытых множеств 45
2.2.6. Ситуационное управление 45
2.2.7. Экспертные системы 47

2.3. Резюме 48

Стр.

Глава III. ПОСТАВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ 49

3.1. Предпосылки формализации 49
3.2. Формализация способа управления 50

3.2.1. Пространство наблюдения 51
3.2.2. Пространство целей управления 51
3.2.3. Разделение пространства наблюдения 53
3.2.4. Пространство управления 57
3.2.5. Представление модели мышления 58

3.3. Аспекты идентификации 59

3.3.1. Предпосылки реализуемости идентификации 59
3.3.2. Запись данных для идентификации 61

3.4. Решаемые проблемы 62

3.4.1. Подготовление данных 62
3.4.2. Реализация идентификации 62
3.4.3. Имплементация модели 64

3.5. Резюме 64

Глава IV. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПРИБЛИЖЁННЫХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА МОДЕЛИ МЫШЛЕНИЯ 66

4.1. Приближённые множества – основные понятия 66

4.1.1. Пространство апроксимации 67
4.1.2. Апроксимация множеств 68
4.1.3. Апроксимация семейства множеств 69
4.1.4. Топологические свойства апроксимации 71
4.1.5. Классификация приближённых множеств 71

4.2. Информационные системы 72

4.2.1. Информационная система 72
4.2.2. Зависимость атрибутов 75
4.2.3. Редукция атрибутов 77

4.3. Таблицы решений 79

4.3.1. Формальное определение 79
4.3.2. Декомпозиция таблиц решений 81

4.4. Запись поставленных проблем 84

4.4.1. Классификация ситуации в управляемом объекте 85
4.4.2. Анализ протокола управления 87

4.5. Резюме 88

Стр.

Глава v. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ 89

5.1. Представление универсума 89
5.2. Порождение элементарных множеств 93
5.3. Поиск нижних и верхних апроксимаций 94
5.4. Количественная оценка апроксимации 96
5.5. Резюме 97

Глава vi. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ 99

6.1. Модели мышления машинистов а компьютерное управление вращающейся печью 99

6.1.1. Представление данных для идентификации 99
6.1.2. Оценка и классификация ситуации 102
6.1.3. Сравнительный анализ машинистов 107

6.1.3.1. Предположения сравнительного анализа 107
6.1.3.2. Анализ и оценка модели мышления машиниста X 110
6.1.3.3. Анализ и оценка модели мышления машиниста Y 113
6.1.3.4. Анализ и Оценка модели мышления машиниста Z 115
6.1.3.5. Сравнительная оценка модели мышления машинистов X, Y, Z 118
6.1.3.6. Резюме 121

6.1.4. Компьютерная имплементация 121

6.1.4.1. Измеряемые и наблюдаемые атрибуты 121
6.1.4.2. Структура системы управления 126
6.1.4.3. Подбор цикла управления 128
6.1.4.4. Объектная операционная система управления вращающейся печью 129
6.1.4.5. Результаты компьютерного управления 129

6.1.5. Резюме 131

6.2. Компьютерное поддерживание мастеров домны 132

6.2.1. Управление "сверху" - задачи компьютерного поддерживания 132
6.2.2. Модели мышления мастеров 137
6.2.3. Эксплуатационные опыты 144

6.3. Резюме 144

Глава VII. РЕЗЮМЕ И ВЫВОДЫ 146

Глава VIII. ОКОНЧАНИЕ 150

ЛИТЕРАТУРА 151

РЕЗЮМЕ 158

CONTENTS

Page

INTRODUCTION 15

Chapter I. TWO EXAMPLES OF PROBLEMS OF CONTROL PERFORMED BY OPERATORS OF COMPLEX TECHNOLOGICAL PLANTS 21

1.1. Rotary kiln 21

1.1.1. Rotary kiln as a control object 22
1.1.2. Estimation of the state of a rotary kiln 23
1.1.3. Control of a rotary kiln 24
1.1.4. Estimation of control results 25

1.2. Blast-furnace 26

1.2.1. Blast-furnace as a control object 27
1.2.2. Observability of the blast-furnace process 28
1.2.3. Indicators of the blast-furnace process 29
1.2.4. Estimation of the state of the blast-furnace 29
1.2.5. Control of the blast-furnace 31

1.3. Recapitulation 34

Chapter II. REVIEW OF METHODS APPLIED IN THE SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF REAL-TIME COMPUTER CONTROL OF COMPLEX OBJECTS 36

2.1. Classical methods 36

2.1.1. Mathematical model - general algorithm of identification 36
2.1.2. Control algorithms-synthesis of a system 38
2.1.3. Results of classical methods 40

2.2. Nonclassical methods 42

2.2.1. Basic and front models 42
2.2.2. Local models 43
2.2.3. Heuristic selforganization 43
2.2.4. Table - iterative automata 44
2.2.5. Description based on fuzzy sets 45
2.2.6. Situational control 45
2.2.7. Expert systems 47

2.3. Recapitulation 48

Page

Chapter III. PROBLEM FORMULATION 49

3.1. Formalization criteria 49
3.2. Formalization of means of control 50
3.2.1. Space of observations 51
3.2.2. Space of control goals 51
3.2.3. Division of the space of observations 53
3.2.4. Space of control 57
3.2.5. Representation of inference model 58
3.3. Identification aspects 59
3.3.1. Criteria of identification realizability 59
3.3.2. Registration of data to identify 61
3.4. Problems to solve 62
3.4.1. Data preparation 62
3.4.2. Identification 62
3.4.3. Model implementation 64
3.5. Recapitulation 64

Chapter IV. ELEMENTS OF ROUGH SETS THEORY IN THE ANALYSIS OF INFERENCE MODELS 66

4.1. Rough sets-basic notions 66
4.1.1. Space of approximation 67
4.1.2. Approximation of sets 68
4.1.3. Approximation of set family 69
4.1.4. Topological properties of approximation 71
4.1.5. Classification of rough sets 71
4.2. Information systems 72
4.2.1. Information system 72
4.2.2. Attribute dependencies 75
4.2.3. Reduction of attributes 77
4.3. Decision tables 79
4.3.1. Formal definition 79
4.3.2. Decomposition of decision tables 81
4.4. Note of formulated problems 84
4.4.1. Classification of situations in a controlled object . 85
4.4.2. Analysis of the control protocol 87
4.5. Recapitulation 88

Page

Chapter V. NUMERICAL ASPECTS 89

5.1. Representation of universum 89
5.2. Generation of elementary sets 93
5.3. Seeking for upper and lower approximation 94
5.4. Quantitative estimation of approximation 96
5.5. Recapitulation 97

Chapter VI. EXAMPLES OF PROBLEM SOLUTIONS 99

6.1. Inference models of stokers and computer control of rotary kiln 99
6.1.1. Representation of data being identified 99
6.1.2. Estimation and classification of situation 102
6.1.3. Comparative analysis of stokers 107
6.1.3.1. Assumptions of comparative analysis 107
6.1.3.2. Analysis and estimation of inference model of stoker X 110
6.1.3.3. Analysis and estimation of inference model of stoker Y 113
6.1.3.4. Analysis and estimation of inference model of stoker Z 115
6.1.3.5. Comparative evaluation of inference models of stokers X, Y, Z 118
6.1.3.6. Recapitulation 121
6.1.4. Computer implementation 121
6.1.4.1. Observable attributes and measurable attributes 121
6.1.4.2. Structure of control system 126
6.1.4.3. Choice of control cycle 128
6.1.4.4. Object operating system for rotary kiln control 129
6.1.4.5. Results of computer control 129
6.1.5. Recapitulation 131
6.2. Computer-aid for blast-furnace shift foremen 132
6.2.1. "Upper" control-computer-aided tasks 132
6.2.2. Inference model of shift foremen 137
6.2.3. Run-time experiences 144
6.3. Recapitulation 144

Chapter VII. RECAPITULATION AND CONCLUSIONS 146

Chapter VIII. FINAL REMARKS 150

LITERATURE 151

SUMMARYS 158

WPROWADZENIE

Powszechne i efektywne wykorzystanie systemów komputerowych w różnych dziedzinach zawodowej działalności człowieka wymaga opracowania zbiorów odpowiednich programów użytkowych.

Programy użytkowe to zapis w wybranym języku programowania odpowiednich algorytmów.

Algorytmy są zaś zapisem uporządkowanych operacji, których wykonanie prowadzi do osiągnięcia założonych celów. Stąd podstawowego znaczenia nabiera rozwiązanie problemu syntezy takich algorytmów.

Jedną z pierwszych dziedzin zawodowej działalności człowieka, w której starano się efektywnie wykorzystać systemy komputerowe, były problemy kierowania złożonymi obiektami technologicznymi [HARR 72].

Zakładano, że wprowadzenie systemu komputerowego do wspomagania, w czasie rzeczywistym, operatora nadzorującego pracę takiego obiektu korzystnie wpłynie na stabilizację przebiegających w nim procesów, a tym samym przyczyni się do wzrostu jakości i wydajności produkcji.

Było to związane z pojawieniem się, na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych, systemów minikomputerowych o strukturze urządzeniowej i programowej z układami przerwań i systemami operacyjnymi umożliwiającymi ich wykorzystanie do pracy w czasie rzeczywistym.

Równolegle w dziedzinie teorii obserwuje się lawinę prac poświęconych rozwiązaniu problemów tworzenia modeli matematycznych i syntezy, na ich podstawie, algorytmów komputerowego wspomagania, w czasie rzeczywistym, operatorów kierujących złożonymi obiektami technologicznymi.

W Polsce powołano w 1970 r. problem węzłowy 06.1.2. "Systemy automatyki kompleksowej" w celu zintegrowanego rozwiązania tych zagadnień, a jego koordynację powierzono Zakładowi Systemów Automatyki Kompleksowej PAN w Gliwicach.

Realizacja tego problemu węzłowego zakładała, w wytypowanych gałęziach gospodarki narodowej, wybór przykładowych węzłów technologicznych, które miały być objęte doświadczalnym wprowadzeniem komputerowych systemów wspomagania operatorów.

Były to dla przykładu: walcarka taśmy, piec obrotowy do wypalania klinkieru, wanna szklarska, reaktor syntezy amoniaku.

Dla tych węzłów technologicznych starano się opracować i zidentyfikować odpowiednie modele matematyczne, a następnie wykorzystać je do syntezy algorytmów komputerowego sterowania.

W trakcie realizacji okazało się, że jest to przedsięwzięcie o wiele bardziej trudne, niż przypuszczano.

W większości wybranych węzłów technologicznych napotkano na istotne trudności związane z matematycznym opisem ich funkcjonowania, a następnie z identyfikacją opracowywanych modeli matematycznych.

Często okazywało się także, że wyniki sterowania komputerowego, opartego na zaimplementowanych algorytmach, nie wytrzymują konkurencji z wynikami sterowania ręcznego przez doświadczonych operatorów.

Ta krytyczna sytuacja była przedmiotem wielu analiz, zawartych między innymi w odpowiednich, opracowywanych przez ZSAK-PAN, raportach z realizacji problemu węzłowego, a także niektóre jej elementy, na przykładzie pieca obrotowego do wypalania klinkieru, omówiono w [MRÓZ 77].

Prowadziło to do przekonania, że na drodze całkowania równań różniczkowych, opisujących elementarne zjawiska i procesy fizykochemiczne przebiegające w złożonych obiektach technologicznych, można napotkać istotne trudności w budowie modeli matematycznych, które mogłyby być podstawą syntezy algorytmów komputerowego wspomagania.

Zaczęto więc równolegle poszukiwać innych możliwych dróg wyjścia z zaistniałej sytuacji.

Na jedną z nich wskazano w [WĘGR 72], sugerując poznanie i przejęcie rozumowania stojącego u podstaw sterowania ręcznego złożonymi obiektami technologicznymi przez doświadczonych operatorów, a następnie jego wykorzystanie do syntezy odpowiednich algorytmów komputerowego wspomagania.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest przedstawienie zweryfikowanej doświadczalnie metody syntezy algorytmów komputerowego sterowania, w czasie rzeczywistym, złożonymi obiektami technologicznymi, polegającej na:

1) poznaniu, zrozumieniu, zapisie i analizie sposobu sterowania ręcznego przez doświadczonych operatorów;

2) identyfikacji i opracowaniu na tej podstawie modeli wnioskowania operatorów;

3) wzbogaceniu modeli wnioskowania o zwiększające ich precyzję fragmenty analityczne i przygotowaniu tego rozwiniętego modelu wnioskowania jako podstawy komputerowego wspomagania w czasie rzeczywistym;

4) wzbogaceniu oprogramowania narzędziowego danego komputera o odpowiedni obiektowy system operacyjny i implementacji opracowanego zbioru programów komputerowego wspomagania.

Praktyczna realizacja tego podejścia wymagała:

a) wyboru reprezentatywnych dla szerokiej klasy obiektów sterowanych ręcznie przez doświadczonych operatorów, a następnie przeprowadzenia analizy wyników ich sterowania;

b) zaproponowania sformalizowanego sposobu zapisu realizowanego przez operatorów procesu sterowania obiektami;

c) zdefiniowania odpowiedniego modelu wnioskowania operatorów wraz z jego identyfikacją, analizą i oceną;

d) wskazania sposobu wykorzystania zidentyfikowanych modeli wnioskowania operatorów do syntezy algorytmów komputerowego wspomagania sterowania, w czasie rzeczywistym, danym obiektem technologicznym.

Jako reprezentatywne dla szerokiej klasy złożonych obiektów technologicznych zaproponowano piec obrotowy do wypalania klinkieru w cementowni i wielki piec do wytopu surówki w hucie.

Na ich przykładzie scharakteryzowano realizowane przez operatorów procesy sterowania, a także omówiono uzyskiwane przez nich wyniki ręcznego sterowania tymi obiektami. Było to podstawą przedstawienia i sformułowania problemów, których rozwiązanie postawiono sobie za cel pracy.

W tym kontekście przeprowadzono krytyczną analizę metod matematycznego opisu złożonych obiektów technologicznych i na tej podstawie syntezy odpowiednich algorytmów komputerowego sterowania.

Stwierdzono, że żadna z istniejących metod nie może być bezpośrednio użyta do rozwiązania tak sformułowanych problemów kompleksowych, podania modeli wnioskowania, a następnie ich połączenia z fragmentami ich uzupełnień analitycznych.

Wymagało to zaproponowania odpowiedniego sposobu formalizacji pojęcia modeli wnioskowania operatorów oraz przedstawienia metod ich identyfikacji, analizy, oceny i implementacji w komputerze.

Przedstawiono taką formalizację i wykazano, że do identyfikacji, analizy i oceny modeli wnioskowania operatorów można efektywnie wykorzystać elementy teorii zbiorów przybliżonych [PAWL 82, 83, 85, 86].

Wracając do przykładowych obiektów pokazano praktyczną realizację zaproponowanej w pracy metody syntezy algorytmów komputerowego sterowania, przedstawiając i omawiając jednocześnie uzyskane wyniki.

Rozdział I omawia, na dwu wybranych przykładach, sterowanie przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi i stanowi wprowadzenie do zagadnień omawianych w pracy.

Szczególną uwagę zwrócono przy tym na charakteryzację tych obiektów z punktu widzenia sterowania przez operatorów, wyróżniając zbiory atrybutów warunkowych i decyzyjnych.

Przedstawiono ilustrację sposobu sterowania przez operatorów oraz omówiono uzyskiwane przez nich wyniki.

Rozdział II zawiera krytyczną analizę metod matematycznego opisu złożonych obiektów technologicznych i na ich podstawie syntezy algorytmów komputerowego sterowania.

Omawiane metody umownie podzielono na klasyczne i nieklasyczne, ilustrując je uzyskanymi wynikami, w tych przypadkach, gdy było to możliwe.

Rozdział III jest jądrem pracy i zawiera omówienie i propozycję formalnego przedstawienia modelu wnioskowania operatora przy sterowaniu.

Podano strukturę modelu wnioskowania i omówiono wzajemne powiązanie poszczególnych elementów tej struktury.

Przedstawiono formalny zapis modelu wnioskowania, a także sposób jego implementacji komputerowej w postaci odpowiedniej tablicy decyzyjnej lub równoważnego jej programu decyzyjnego.

Zawarto także analityczny zapis problemów do rozwiązania wynikających z przyjętej formalizacji modelu wnioskowania.

Rozdział IV omawia wykorzystywane w pracy pojęcia teorii zbiorów przybliżonych i wprowadza potrzebne ich modyfikacje. Przedstawia także formalny zapis sformułowanych problemów przy użyciu tych pojęć.

Rozdział V poświęcony jest syntetycznemu omówieniu najistotniejszych aspektów obliczeniowych wynikających z wykorzystania elementów teorii zbiorów przybliżonych do rozwiązania sformułowanych problemów.

Przytoczono zapis podstawowych algorytmów obliczeniowych w języku Pascal.

Rozdział VI ma podstawowe znaczenie dla pracy omawiając, na dwu przykładach, opartą na zaproponowanej metodzie syntezę algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi oraz analizując uzyskane wyniki sterowania.

Przykład pierwszy dotyczy pieca obrotowego do wypalania klinkieru w jednej z cementowni, a przykład drugi wielkiego pieca jednej z hut.

Rozdział VII stanowi podsumowanie pracy i wnioski, a rozdział VIII zakończenie pracy.

Treść pracy jest zapisem wieloletnich doświadczeń Autora związanych z realizacją i koordynacją przez ZSAK PAN problemów węzłowych 06.1.2. "Systemy automatyki kompleksowej" i 06.4. "Rozwój zintegrowanych systemów komputerowego sterowania z uwzględnieniem więzów międzysystemowych".

Dało to możliwość bezpośredniego udziału w pracach nad realizacją komputerowego sterowania złożonymi obiektami technologicznymi i kierowania zespołami specjalistów reprezentujących różne zainteresowania badawcze, a realizujących wspólny cel, jakim była synteza algorytmów komputerowego sterowania.

Istotne znaczenie miał także bezpośredni kontakt z operatorami sterującymi ręcznie wieloma złożonymi obiektami technologicznymi. Ich doświadczenie i uzyskiwane przez nich wyniki sterowania były inspiracją i zachętą do kontynuowania przyjętej metody syntezy algorytmów komputerowego wspomagania.

Większość zebranych w pracy (w jednolitej formie) wyników była opublikowana wcześniej w czasopismach i materiałach konferencji krajowych i zagranicznych.

Kolegom z Zakładu Systemów Automatyki Kompleksowej PAN Autor dziękuje za pomoc w realizacji, przy wykorzystaniu zaproponowanej metody, komputerowego

wspomagania operatorów na różnych obiektach technologicznych w różnych, nieraz trudnych, warunkach.

Operatorom tych obiektów Autor dziękuje za życzliwe podejście i zgodę na udzielenie wielu informacji potrzebnych do zrozumienia istoty sterowania złożonymi obiektami technologicznymi.

Rozdział I

PRZEDSTAWIENIE NA DWÓCH PRZYKŁADACH PROBLEMÓW STEROWANIA PRZEZ OPERATORÓW ZŁOŻONYMI OBIEKTAMI TECHNOLOGICZNYMI

W tym rozdziale pracy przedstawiono dwa przykłady sterowania przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi.

Przykład pierwszy dotyczy sterowania przez palaczy piecem obrotowym do wypalania klinkieru w jednej z cementowni.

Przykład drugi przedstawia prowadzenie procesu wielkopiecowego przez mistrzów wielkopiecowników w jednej z hut.

Reprezentując szeroką klasę zadań sterowania przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi przykłady te będą stanowiły ilustrację do dalszych rozważań.

W obu tych przykładach sterowanie przez operatorów sprowadza się do:

a) obserwacji, oceny i klasyfikacji bieżącej sytuacji w obiekcie;
b) wyboru i realizacji odpowiedniego sterowania.

Obserwacja i ocena bieżącej sytuacji w obiekcie sprowadzają się do wyboru i określenia wartości odpowiednich parametrów obiektu, a realizacja, przez operatora, sterowania sprowadza się do nadania wartości innym parametrom tego obiektu.

Pierwsze z nich, mierzalne i obserwowalne przez operatora, nazwano atrybutami warunkowymi, drugie zaś, mierzalne i sterowalne, nazwano atrybutami decyzyjnymi.

Główny problem, którego rozwiązanie jest celem pracy, polegał będzie na znalezieniu i analizie zależności, między atrybutami decyzyjnymi a atrybutami warunkowymi, opisującej sterowanie obiektem.

1.1. Piec obrotowy

W paragrafie tym przedstawiono wyniki obserwacji i analizy sterowania piecem obrotowym przez palaczy w jednej z cementowni ZSAK 76, MROŻ 81 .

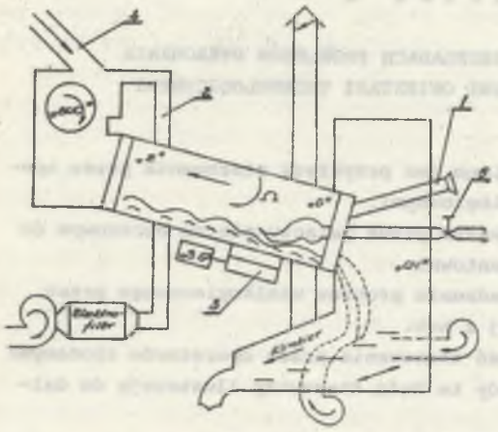
Scharakteryzowano piec obrotowy do wypalania klinkieru jako obiekt sterowania.

Omówiono realizowany przez palaczy sposób oceny i klasyfikacji stanu pieca obrotowego oraz uzyskiwane wyniki sterowania.

Zamieszczono graficzną ilustrację zależności między zbiorami wartości atrybutów warunkowych a zbiorem wartości atrybutów decyzyjnych.

1.1.1. Piec obrotowy jako obiekt sterowania.

Uproszczony schemat pieca obrotowego do wypalania klinkieru w kształcie długiego, metalowego cylindra schematycznie przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie pieca obrotowego

Fig. 1. Rotary kiln schema

Na rys. 1 oznaczono odpowiednio:

"G" - gorąca strefa pieca obrotowego;
"Z" - zimna strefa pieca obrotowego;
"S.G" - silnik obrotów pieca;
"CH" - chłodnik rusztowy;
"B.W.C" - bęben wymiennika ciepła;
1 - wziernik optyczny wraz z pirometrem;
2 - pomiar temperatury przed elektrofiltrem;
3 - pomiar obrotów pieca;
4 - pomiar nadawy szlamu;
5 - pomiar nadawy węgla.

Z wyżej położonego końca ("Z" - zimnego) do pieca podawany jest szlam, a z drugiego końca ("G" - gorącego) wdmuchiwany jest pył węglowy, który spalając się stanowi źródło energii cieplnej pieca.

Z technologicznego punktu widzenia [SEME 72, GELF 73] piec obrotowy można umownie podzielić na 4 strefy od zimnego do gorącego końca: strefa suszenia, strefa podgrzewania, strefa kalcynacji, strefa spiekania.

Celem sterowania jest otrzymanie klinkieru o odpowiednich własnościach fizykochemicznych. Istotnym utrudnieniem jest przy tym ocena jakości klinkieru dokonywana na podstawie wyników tzw. 28-dniowej próby wytrzymałości cementu. Stąd dla potrzeb sterowania wprowadzono pewne wskaźniki pośrednio związane z jakością klinkieru, możliwe do określania na bieżąco w procesie sterowania. Wskaźników takich jest wiele [CZACH 75, PERE 76, GELF 73, ICKO 75], a jednym z nich, najczęściej wykorzystywanym przez palaczy [ZSAK 76] - jest stan strefy spiekania. Oceniając i klasyfikując stan strefy spiekania palacze mogą sterować piecem obrotowym dążąc do otrzymania klinkieru o wymaganych własnościach fizykochemicznych.

Podstawowe atrybuty decyzyjne, wykorzystywane przez palaczy, to:

a) nadawa węgla - oznaczona na rys. 1 przez 5;
b) nadawa szlamu - oznaczona na rys. 1 przez 4;
c) obroty pieca - oznaczone na rys. 1 przez 3.

1.1.2. Ocena stanu pieca obrotowego

W trakcie prowadzenia procesu wypału klinkieru w piecu obrotowym palacze wykorzystują głównie informację dotyczącą (rys. 1):

a) gorącej strefy pieca obrotowego - "G";
b) zimnej strefy pieca obrotowego - "Z".

W przypadku gorącej strefy pieca obrotowego, jak już wspomniano, wiodącą informacją jest stan strefy spiekania. Palacze oceniają i klasyfikują go na podstawie analizy wartości atrybutów warunkowych:

a) temperatury w strefie spiekania;
b) koloru i granulacji materiału w strefie spiekania oraz koloru wnętrza pieca.

Uzyskane informacje są podstawą zaklasyfikowania stanu strefy spiekania do jednego, z wyróżnionych przez palaczy, stanów charakterystycznych pieca obrotowego.

W nomenklaturze palaczy wyróżnione stany charakterystyczne pieca obrotowego to:

I - "piec bardzo słaby";
II - "piec słaby";
III - "piec słabnący lub wyostrzający się";
IV - "piec ostry";
V - "piec przeostrzony".

Relację między zbiorami wartości atrybutów warunkowych a wyróżnianymi przez palaczy stanami charakterystycznymi pieca obrotowego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Stany charakterystyczne pieca obrotowego a wartości atrybutów warunkowych

Numer stanu charakterystycznego	Wartości atrybutów warunkowych			
	temp. [°C]	kolor mat.	granulacja mat.	kolor wnętrza pieca
I	1400 <	szkarłat	miał	ciemne plamy blisko
II	1400-1420	ciemny róż	miał	ciemne plamy daleko
III	1420-1440	jasny róż	miał z bryłkami	opary
IV	1440-1480	zdecydowany jasny róż	wyraźna granulacja	opary rozrzedzone
V	> 1480	biel różana	bryły	opary zanikające

W przypadku zimnej strefy pieca obrotowego uwaga palaczy zwrócona jest głównie na wskazania miernika temperatury przed elektrofiltrem (atrybut warunkowy).

Pożądana wartość temperatury przed elektrofiltrem wynosi około 160 [°C]. Jej zmiana poniżej 140 [°C] lub powyżej 170 [°C] wywołuje interwencję palaczy.

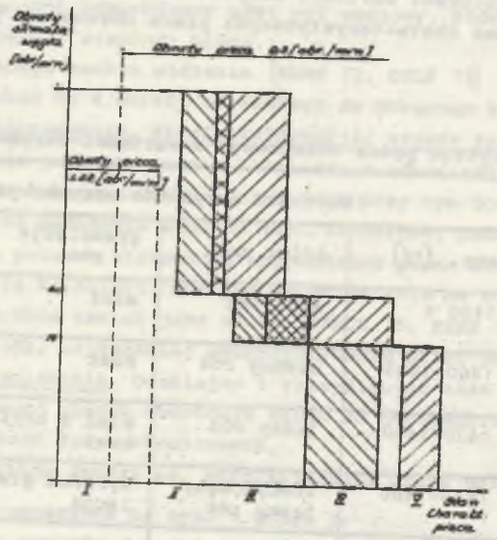
1.1.3. Sterowanie piecem obrotowym

Zasadniczo sposób sterowania piecem obrotowym przez poszczególnych palaczy jest podobny, chociaż występują między nimi pewne różnice. Różnice te wynikają z indywidualnej taktyki obranej przy sterowaniu przez poszczególnych palaczy. Tak na przykład, jedni prowadzą piec bardziej "ostro" na pograniczu stanów charakterystycznych IV i V, inni natomiast preferują pracę "na granicy" stanów charakterystycznych III i IV.

Reakcje palaczy można umownie podzielić na:

a) reakcje wynikające ze stanu gorącej strefy;
b) reakcje wynikające ze stanu zimnej strefy.

Reakcje palaczy wynikające ze stanu gorącej strefy pieca obrotowego schematycznie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Sterowanie palaczy a stany charakterystyczne pieca obrotowego
Fig. 2. Manual control of rotary kiln and its characteristic states

Reakcje palaczy wynikające ze stanu zimnej strefy pieca obrotowego przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Sterowanie palaczy a stan strefy zimnej pieca

Temperatura przed elektrofiltrem [°C]	Nadawa szlamu - ilość dysz
140 <	zmniejszanie po 1
140 - 170	7 - 11
> 170	zwiększanie po 1

Zwiększanie lub zmniejszanie ilości dysz, podających szlam do pieca obrotowego, odbywa się w ramach ogólnie dostępnych 12 dysz. W omawianym przypadku jedna dysza podaje do pieca obrotowego około 2,5 [m^3/h] szlamu.

Jak to wynika z obserwacji, reakcje palaczy, powodowane zmianą stanu strefy zimnej pieca obrotowego, są rzadkie i w związku z tym swoją uwagę koncentrują przede wszystkim na sterowaniu kompensującym zmiany stanu gorącej strefy. Celem sterowania jest przy tym utrzymanie stanu pieca obrotowego w stanie charakterystycznym IV - "piec ostry".

Analizowano także częstotliwość, z jaką palacze oceniają i klasyfikują stan pieca obrotowego oraz określają sterowanie. Stwierdzono, że częstotliwość ta jest różna dla różnych palaczy i waha się od kilkunastu do kilkudziesięciu interwencji w ciągu jednej zmiany roboczej.

Obliczony, na podstawie 200 godz. ciągłej obserwacji sterowania przez palaczy piecem obrotowym, średni okres czasu między oceną stanu pieca i określeniem sterowania wyniósł około 26 [min].

1.1.4. Ocena wyników sterowania

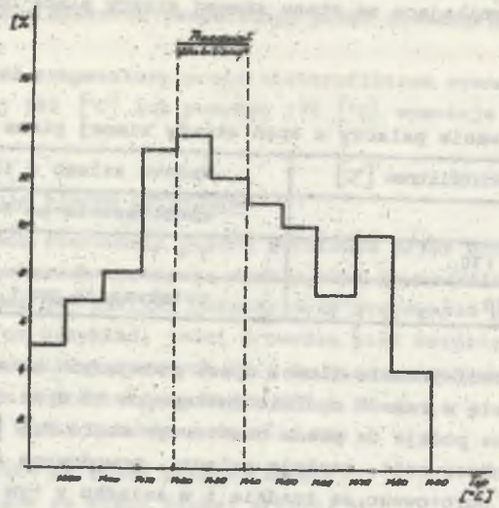
Jak już wspomniano, ocena wyników sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru jest utrudniona. Wynika to z braku możliwości określania na bieżąco wartości wskaźników jakości sterowania związanych z otrzymywanym klinkierem.

Przyjmując w omawianym przypadku jako cel sterowania ciągłe utrzymywanie stanu pieca obrotowego w stanie charakterystycznym IV, przyjęto za miarę jakości sterowania odchylenie standardowe temperatury w strefie spiekania.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy histogram rozkładu temperatury w strefie spiekania obliczony przez komputer w trakcie sterowania ręcznego piecem obrotowym, przez jednego z palaczy, w ciągu jednej zmiany roboczej [MRÓZ 84].

Obliczona z tego histogramu, średnia wartość temperatury w strefie spiekania wyniosła $\bar{T}sp$ = 1434 [°C], odchylenie standardowe zaś σ_{Tsp} = 27,6 [°C].

Histogramy rozkładu temperatury w strefie spiekania przy sterowaniu ręcznym przez innych palaczy są podobne, chociaż na ich podstawie można za-



Rys. 3. Histogram rozkładu temperatury w strefie spiekania przy sterowaniu ręcznym

Fig. 3. Histogram of a sintering zone temperature while under manual control

uważyć pojawiające się u niektórych z nich tendencje do "przegrzewania" lub "chłodzenia" pieca obrotowego [MRÓZ 84, 85].

Jak to wynika z rys. 3, jakość sterowania ręcznego piecem obrotowym nie jest najwyższa. Przyczyny tego należy upatrywać nie tyle w braku umiejętności sterowania przez palaczy, co w ich indywidualnym podejściu do oceny i klasyfikacji stanu pieca obrotowego oraz realizacji sterowania.

Zauważono na przykład dość powszechny przypadek "wyostrzania" pieca w ciągu tzw. dziennych zmian roboczych i "chłodzenia" pieca w ciągu tzw. nocnych zmian.

W efekcie rozkład temperatury w strefie spiekania jest zbliżony do rozkładu równomiernego, na całym przedziale jej zmian, co oczywiście ujemnie wpływa na jakość klinkieru. Zostało to szczegółowo omówione i przeanalizowane w [ZSAK 76].

1.2. Wielki piec

W tym paragrafie przedstawiono wyniki obserwacji i analizy sterowania przez mistrzów wielkim piecem w jednej z hut [ZSAK 77, 78, 79, 80].

Scharakteryzowano wielki piec jako obiekt sterowania oraz realizowany przez mistrzów sposób oceny i klasyfikacji jego stanów.

Omówiono zasady i sposoby sterowania przez mistrzów wielkim piecem, zwracając uwagę na ich różnorodność i złożoność.

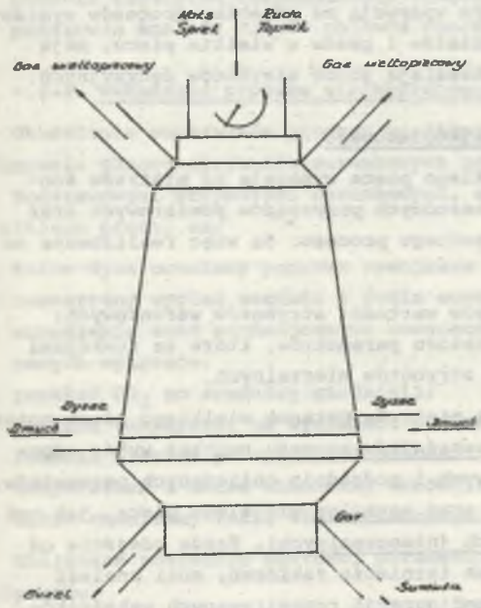
Podano sposób uporządkowanego zapisu zbiorów wartości atrybutów warunkowych w odniesieniu do rozpoznawanych przez mistrzów stanów wielkiego pieca.

Określono zbiory zadań rozwiązywanych przez mistrzów w procesie sterowania wielkim piecem ze szczególnym uwzględnieniem tzw. sterowania "od góry".

Zamieszczono przykładowe tablice decyzyjne reprezentujące zależności między zbiorami warunków opisujących stany wielkiego pieca a zbiorami zadań, jakie należy rozwiązać w tych stanach dla osiągnięcia celu sterowania.

1.2.1. Wielki piec jako obiekt sterowania

W dużym uproszczeniu wielki piec schematycznie przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie wielkiego pieca

Fig. 4. Blast furnace schema

Ładowane z góry i odpowiednio rozsypywane w gardzieli wielkiego pieca materiały wsadowe przemieszczają się w dół podlegając różnorodnym przemianom: mechanicznym, chemicznym, fazowym, w wyniku których powstają płynne produkty wytopu: surówka i żużel wielkopiecowy. Gaz tworzący się przy spalaniu i gazyfikacji węgla zawartego w koksie oraz dodatkowego paliwa podawanego z dmuchem (gaz ziemny, mazut) przemieszcza się do góry przekazując ciepło materiałom wsadowym i wywołując proces redukcji pośredniej i bezpośredniej tlenków żelaza. W dolnej części wielkiego pieca, w tzw. garze, gromadzą się płynne produkty procesu wielkopiecowego: surówka i żużel, okresowo odbierane w czasie tzw. spustów [BENE 76, KRÓL 82].

Celem procesu wielkopiecowego jest otrzymanie surówki o odpowiednich parametrach fizykochemicznych, tj. temperaturze i składzie chemicznym.

Podstawowymi zakłóceniami, wpływającymi na jego przebieg, są zmiany składu chemicznego i granulometrycznego poszczególnych komponentów wsadowych, a także ich charakterystyk wytrzymałościowych, np. na ścieranie.

Ciągła, dokładna obserwacja i pomiar zmian tych parametrów, jak również innych parametrów wielkiego pieca, jest jak dotąd utrudniony lub w niektórych przypadkach technicznie nierealizowalny.

Stąd sterowanie wielkim piecem może być oparte tylko na tych niedokładnych i niepewnych danych pomiarowych.

Ogólnie oddziaływania sterujące na wielki piec można podzielić na dwie klasy [GIMM 69, DOWG 74, BENE 76, KRÓL 82, SZUM 82]:

a) sterowanie "od góry",
b) sterowanie "od dołu".

Sterowanie "od góry" sprowadza się do zmiany struktury i parametrów wsadu, kolejności załadunku poszczególnych komponentów wsadu, sposobu rozsypu materiałów wsadowych w gardzieli wielkiego pieca.

Sterowanie "od dołu" sprowadza się do zmiany parametrów dmuchu, a także sposobu rozdzielenia poszczególnych składników dmuchu na dysze.

Wymienione oddziaływania sterujące wpływają na przebieg procesów wymiany ciepła i masy, a także na ruch materiałów i gazów w wielkim piecu, mają charakter globalny i w tym sensie określają zbiór atrybutów decyzyjnych.

1.2.2. Obserwowalność procesu wielkopiecowego

Ocena i klasyfikacja stanów wielkiego pieca wymagają od mistrzów kontekstowej analizy wskazań wielu różnorodnych przyrządów pomiarowych oraz wyników bezpośrednich obserwacji przebiegu procesu. Są więc realizowane na podstawie:

a) bezpośredniej interpretacji zbiorów wartości atrybutów warunkowych;
b) pośredniego obliczania wartości zbioru parametrów, które są funkcjami o dziedzinach w zbiorze wartości atrybutów mierzalnych.

Poszczególnym, rozróżnianym przez mistrzów, stanom wielkiego pieca można przyporządkować pewne konfiguracje wskaźników procesu poprzez wybór odpowiednich wartości atrybutów warunkowych i pośrednio obliczanych parametrów.

Odnosi się to zarówno do pojęcia stan normalny wielkiego pieca, jak też do wyróżnionych stanów zaburzeniowych (nienormalnych). Każde odejście od stanu normalnego, występujące wskutek istnienia zakłóceń, musi znaleźć swoje odbicie w zmianie wzajemnej konfiguracji rozpatrywanych wskaźników.

Biorąc pod uwagę fakt, że każde przejście od stanu uznawanego za normalny do stanu, w którym konfiguracja wskaźników procesu jednoznacznie określa powstałą nieprawidłowość, odbywa się etapowo, można założyć, że z powstaniem każdego stanu nienormalnego związana jest pewna początkująca i zarazem charakterystyczna dla niego zmiana wzajemnej konfiguracji obserwowanych wartości wskaźników procesu. Zmianę taką nazwano objawem charakterystycznym. Należy przy tym mieć na uwadze fakt, że wśród objawów charakterystycznych mogą być takie, których wystąpienie może prowadzić do różnych stanów nienormalnych i takie, które jednoznacznie opisują te stany. W pierwszym przypadku odejście od stanu normalnego opisywane będzie ciągami objawów charakterystycznych, przy czym końcowe elementy tych ciągów, określające stan wielkiego pieca, muszą być różne dla różnych stanów nienormalnych. W drugim przypadku, rzadziej występującym w praktyce, określenie stanu nienormalnego jest jednoznaczne.

Zagadnienie obserwowalności procesu wielkopiecowego sprowadza się do rozwiązania następujących problemów:

a) zdefiniowania wskaźników procesu poprzez wyszczególnienie zbioru atrybutów warunkowych i pośrednio obliczanych wartości parametrów;
b) zdefiniowania zbioru konfiguracji wartości wskaźników procesu odpowiadających poszczególnym objawom charakterystycznym;
c) wyróżnienia i podania opisu wszystkich stanów wielkiego pieca za pomocą odpowiadających im ciągów objawów charakterystycznych;
d) podania algorytmu rozpoznawania tendencji zmian stanu wielkiego pieca na podstawie analizy ciągów objawów charakterystycznych.

1.2.3. Wskaźniki procesu wielkopiecowego

Określenie wskaźników procesu wielkopiecowego sprowadza się do wyszczególnienia zbioru atrybutów warunkowych oraz zbioru parametrów obliczalnych.

Podstawowymi atrybutami warunkowymi, służącymi mistrzom do oceny stanu wielkiego pieca, są:

a) kolor dysz oceniany poprzez specjalne wzierniki;
b) zewnętrzny wygląd surówki i żużla oceniany przy spustach;
c) schodzenie sond mechanicznych oceniane na podstawie analizy zarejestrowanych wykresów;
d) rozkład CO_2 po średnicy gardzieli;
e) rozkład temperatur po wysokości pieca;
f) rozkład ciśnień po wysokości pieca;
g) temperatura i skład chemiczny surówki;
h) skład chemiczny żużla wielkopiecowego.

Obliczane pośrednio wartości parametrów można podzielić na trzy grupy dotyczące:

a) charakterystyk wsadu, np. bogactwo, obciążenie, zasadność itd.;
b) charakterystyk dmuchu i gazu gardzielowego;
c) charakterystyk stanu cieplnego garu i gardzieli.

Dokładne zależności, pozwalające obliczać wartości tych parametrów, zamieszczono w [ZSAK 80].

1.2.4. Ocena stanu wielkiego pieca

W nomenklaturze mistrzów wyróżnione stany charakterystyczne wielkiego pieca noszą nazwę biegów pieca. Stąd mówi się o biegu normalnym wielkiego

pieca i o zbiorze biegów nienormalnych, do których należą np. bieg gorący, bieg obrzeżny, bieg osiowy itd. [KMHK 79].

Jak już wspomniano, ocena i klasyfikacja biegu wielkiego pieca wymagają znajomości i analizy bieżącej konfiguracji wartości wskaźników procesu. Określenie zbioru ich wartości jest podstawowym zadaniem rozwiązywanym przez mistrzów na etapie diagnostyki wielkiego pieca.

W tabeli 3 przedstawiono przykładowe konfiguracje wartości wskaźników procesu dla kilku wybranych biegów wielkiego pieca.

Tabela 3

Wybrane biegi wielkiego pieca i odpowiadające im konfiguracje wartości wskaźników procesu

Nazwa biegu wielkiego pieca	Wartości atrybutów warunkowych				
	ciśnienie dmuchu	zawartość CO_2 w osi pieca	typ pracy dysz	schodzenie sond	rozrzut pkt. temp. gazu gardzielowego
Gorący	rośnie	rośnie	bardzo gorąco	nierówne	szeroki
Obrzeżny	rośnie	rośnie	gorąco	nierówne	szeroki
Osiowy	rośnie	maleje	gorąco	nierówne	wąski

Analizując tabelę 3, nietrudno zauważyć, że bieg gorący i bieg obrzeżny wielkiego pieca różnią się nieznacznie oceną typu pracy dysz. Wynika to ze słabej rozróżnialności tych biegów wielkiego pieca na podstawie zamieszczonych w tabeli 3 konfiguracji wartości wybranych wskaźników procesu.

Jednoznaczne rozróżnienie tych biegów wielkiego pieca jest możliwe poprzez istotne rozszerzenie zbioru wskaźników procesu, co zostało przedstawione w [ZSAK 80].

W przypadku znacznego podobieństwa opisu biegów wielkiego pieca przez konfiguracje wartości wskaźników procesu, dla ich rozróżnienia konieczna jest dogłębna analiza ciągów objawów charakterystycznych.

Fragment realizowanego przez mistrzów procesu analizy ciągów objawów charakterystycznych dla rozpoznania i klasyfikacji biegu wielkiego pieca przedstawiony jest na rys. 5.

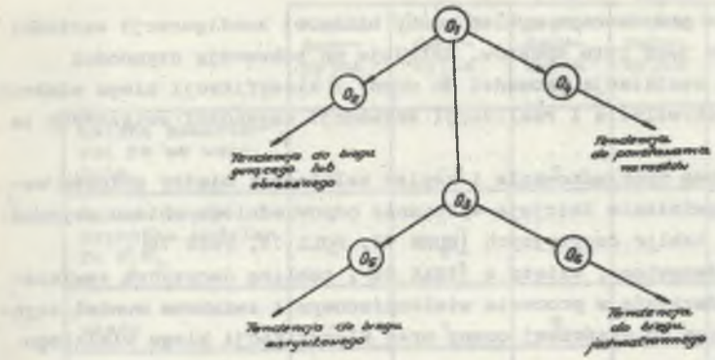
Na rys. 5 objawy charakterystyczne oznaczono odpowiednio przez:

o_1 = {ilość dmuchu maleje i ciśnienie dmuchu wzrasta i temperatura gazów peryferyjnych wzrasta};

o_2 = {rozrzut punktów temperatury gazu gardzielowego rośnie i zawartość CO_2 w osi pieca rośnie};

o_3 = {rozrzut punktów temperatury gazu gardzielowego maleje};

o_4 = {temperatury obmurza martwe};



Rys. 5. Fragment procesu rozpoznania i klasyfikacji biegu wielkiego pieca
Fig. 5. Part of the process of blast furnace work recognition and classification

o_5 = {silne zarywanie sond};

o_6 = {duże różnice wgłębności sond}.

Pełna charakterystyka rozróżnianych przez mistrzów biegów wielkiego pieca nie jest przedmiotem niniejszej pracy, a przedstawione przykłady wzięte z [ZSAK 80] mają charakter ilustracyjny.

1.2.5. Sterowanie wielkim piecem

Proces sterowania przez mistrzów wielkim piecem można najogólniej przedstawić jako: stałą obserwację bieżącej konfiguracji wartości atrybutów warunkowych oraz wskaźników procesu i taki dobór wartości atrybutów decyzyjnych, aby w czasie utrzymywała się, możliwie stale, konfiguracja wartości wskaźników procesu odpowiadająca biegowi normalnemu wielkiego pieca.

Mając na uwadze liczności zbiorów atrybutów warunkowych, pośrednio obliczanych wartości wskaźników procesu i atrybutów decyzyjnych, nietrudno zauważyć, że jest to zadanie złożone, wymagające od mistrzów odpowiedniego podejścia do jego rozwiązania. Istota obserwowanego podejścia mistrzów do jego rozwiązania sprowadza się do określenia przez nich zbioru zadań elementarnych, a następnie rozwiązywania uporządkowanych sekwencji tych zadań w procesie sterowania wielkim piecem. Na podkreślenie zasługuje obserwowane na wielkim piecu zdarzeniowo uwarunkowane zachowanie się mistrzów w procesie sterowania.

Podstawowe zdarzenia, wpływające na przebieg sterowania wielkim piecem, to:

a) periodycznie realizowane spusty surówki i żużla;
b) nowe informacje o materiałach wsadowych i komponentach dmuchu;
c) zmiana warunków materiałowo-eksploatacyjnych.

Stwierdzono, że podstawowym cyklem oceny bieżącej konfiguracji wartości wskaźników procesu jest rytm spustów. Inicjuje on sekwencję czynności mistrzów, których realizacja prowadzi do oceny i klasyfikacji biegu wielkiego pieca oraz określenia i realizacji sekwencji czynności związanych ze sterowaniem.

Możliwym sposobem uporządkowania i zapisu zależności między zbiorem warunków, których spełnienie inicjuje wykonanie odpowiedniego zbioru czynności, jest technika tablic decyzyjnych [HUMB 73, POLL 75, FREI 76].

Na rys. 6 przedstawiono, wziętą z [ZSAK 80], tablicę decyzyjną zawierającą podstawowe zdarzenia w procesie wielkopiecowym i związane z nimi czynności przygotowawcze do właściwej oceny oraz klasyfikacji biegu wielkiego pieca.

Jeżeli		Reguła decyzyjna 1	Reguła decyzyjna 2	Reguła decyzyjna 3	Reguła decyzyjna Else
i	Spust	T	-	-	-
i	Nowe informacje o wsadzie	-	T	-	-
To	Zmiana warunków materiałowo-wsadowych	-	-	T	-
i	Określ parametry surówki i żużla	X	-	-	-
i	Określ wartości atrybutów warunkowych	-	-	X	-
i	Oblicz wartości parametrów procesu	-	X	X	-
i	Ustal konfigurację wartości wskaźników procesu	-	X	X	-
i	Idź do bazowej tablicy decyzyjnej	X	X	X	-
	Czekaj na zdarzenie	-	-	-	X

Rys. 6. Tablica decyzyjna wstępna

Fig. 6. Initial decision table

Bazowa tablica decyzyjna, zawierająca pełny opis diagnostyki biegu wielkiego pieca oraz sterowania, znajduje się w [ZSAK 80].

Dla ilustracji przedstawiono poniżej fragment bazowej tablicy decyzyjnej w części zawierającej ocenę wsadu i warunków materiałowo-wsadowych oraz obliczania naboju dla wielkiego pieca.

Jeżeli		Reguła decyzyjna 1	Reguła decyzyjna 2	Reguła decyzyjna 3	Reguła decyzyjna 4	Reguła decyzyjna 5	Reguła decyzyjna Else
i	Zmiana zawartości Fe we wsadzie	T	-	-	-	-	-
i	Zmiana współczynnika podziału S_iO_2	-	T	-	-	-	-
i	Zmiana analiz wsadu	-	-	T	-	-	-
i	Zmiana zasadowości wsadu	-	-	-	T	-	-
TO	Nowe warunki surowcowe	-	-	-	-	T	-
i	Oblicz poprawkę na zasadowość wsadu	-	X	-	-	-	-
i	Oblicz nowy nabój przy zadanym R/K	X	-	-	-	-	-
i	Oblicz nowy nabój przy zmianach analiz wsadu	X	-	X	-	-	-
i	Oblicz nowy nabój w nowej sytuacji materiałowej	-	-	-	-	X	-
i	Oblicz nowy nabój przy nowej wartości zadanej na zasadowość wsadu	-	X	-	X	-	-
i	Idź do bazowej tablicy decyzyjnej	X	X	X	X	X	X

Rys. 7. Tablica decyzyjna dotycząca wsadu

Fig. 7. Decision table concerning charge

Analizując tablicę decyzyjną przedstawioną na rys. 7, nietrudno zauważyć, że zawiera zbiór warunków dotyczących wsadu i odpowiadający mu zbiór zadań elementarnych, których rozwiązanie określa sterowania "od góry" w części dotyczącej naboju dla wielkiego pieca.

Wykorzystując technikę tablic decyzyjnych, można przedstawić w sposób uporządkowany zbiory warunków określających biegi wielkiego pieca lub ten-

dencje ich zmian i zbiory zadań elementarnych lub czynności opisujących sterowanie.

Tablice decyzyjne, opisując zależność między zbiorami warunków, charakteryzujących wielki piec jako obiekt sterowania, a zbiorami zadań, które należy rozwiązać dla określenia sterowań, mogą być podstawą syntezy algorytmów komputerowego wspomagania mistrzów.

W [KRZA 81, OLEK 83] przedstawiono, opracowany i wdrożony na jednej z hut, system komputerowego wspomagania mistrzów w zakresie namiarowania wsadu, rozsypu materiałów wsadowych w gardzieli wielkiego pieca i obliczania parametrów komory spalania..

1.3. Podsumowanie

Przedstawiono dwa przykłady sterowania przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi.

W przypadku sterowania przez palaczy piecem obrotowym do wypalania klinkieru szczególną uwagę zwrócono na sposób dokonywanej przez nich bieżącej oceny i klasyfikacji sytuacji i wyboru, na tej podstawie, oddziaływań sterujących.

Pokazano, że jest możliwe opisanie tego sposobu na drodze wyselekcjonowania zbioru atrybutów warunkowych, których wartości wykorzystywane są przez palaczy do oceny i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym do wyróżnionych przez nich stanów charakterystycznych.

Przedstawiono także realizowany przez palaczy, na tej podstawie, sposób sterowania piecem obrotowym.

Omówiono wyniki takiego sterowania, charakteryzując syntetycznie zachowanie się palaczy w procesie sterowania.

W przypadku wielkiego pieca starano się przedstawić złożoność i różnorodność zadań, których rozwiązanie przez mistrzów wielkopiecowników składa się na ocenę sytuacji i wybór sterowania.

Na prostych przykładach przedstawiono złożoność realizowanego przez mistrzów wielkopiecowników procesu oceny i analizy sytuacji w wielkim piecu.

Określono najważniejsze etapy tego procesu, zwracając szczególną uwagę na wyselekcjonowanie zbioru atrybutów warunkowych i wskaźników procesu wykorzystywanych przez mistrzów.

Zaproponowano opis zachowania się mistrzów wielkopiecowników w procesie sterowania wielkim piecem za pomocą zbioru odpowiednich tablic decyzyjnych.

Przedstawione i syntetycznie omówione przykłady sterowania przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi charakteryzuje:

a) złożoność i różnorodność zbioru sytuacji ocenianych, analizowanych i klasyfikowanych w procesie sterowania;
b) możliwość wyróżnienia zbioru stanów charakterystycznych, w jakich może znajdować się obiekt;

c) możliwość określenia zbioru sterowań wykorzystywanych przez operatorów w procesie sterowania;
d) możliwość zapisu, realizowanego przez operatorów, sposobu oceny i klasyfikacji sytuacji w sterowanych obiektach i wyboru, na tej podstawie, odpowiedniego sterowania;
e) możliwość syntezy, na tej podstawie, struktury urządzeniowej i programowej systemu komputerowego sterowania, w czasie rzeczywistym, takimi obiektami technologicznymi.

Nietrudno także zauważyć, że w obu przedstawionych przykładach opis sterowania przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi sprowadza się do odpowiedniej interpretacji otrzymanych empirycznie zależności między zbiorami wartości atrybutów warunkowych i atrybutów decyzyjnych.

Na drodze komputerowej implementacji takich zależności można dążyć do bezpośredniego sterowania przez komputer lub do komputerowego wspomagania operatorów w procesie sterowania takimi obiektami.

Prowadzi to do sformułowania następujących zadań:

a) formalizacja sposobu opisu sterowania złożonymi obiektami technologicznymi przez operatorów;
b) wyselekcjonowanie zbioru atrybutów warunkowych i zbioru atrybutów decyzyjnych;
c) określenie stanów charakterystycznych obiektu i synteza algorytmów klasyfikacji sytuacji;
d) badanie zależności między zbiorami atrybutów warunkowych i atrybutów decyzyjnych dla syntezy algorytmów komputerowego sterowania;
e) synteza systemu komputerowego sterowania.

Rozwiązaniu tych zadań poświęcona jest niniejsza praca.

R o z d z i a ł II

PRZEGLĄD METOD SYNTEZY ALGORYTMÓW KOMPUTEROWEGO STEROWANIA W CZASIE RZECZYWISTYM ZŁOŻONYMI OBIEKTAMI

W tym rozdziale scharakteryzowano opisane w dostępnej literaturze niektóre metody syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami.

Zaproponowano ich podział na metody klasyczne i metody nieklasyczne.

Starano się przy tym przedstawić przede wszystkim istotę różnych metod syntezy algorytmów komputerowego sterowania.

Przytoczono także wyniki, koordynowanych przez ZSAK PAN, problemów węzłowych 06.1.2. "Systemy automatyki kompleksowej" i 06.4. "Zintegrowane systemy komputerowego sterowania procesami produkcji" w zakresie modeli matematycznych, identyfikacji i syntezy algorytmów sterowania.

2.1. Metody klasyczne

W tym paragrafie pracy za klasyczną uznano, przedstawioną w [WĘGR 70], metodę syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi. Jej istota sprowadzała się do rozwiązania trzech następujących problemów podstawowych:

a) budowa i identyfikacja modelu matematycznego obiektu;
b) synteza algorytmu sterowania;
c) synteza struktury urządzeniowej i programowej systemu komputerowego sterowania.

Omawiając rozwiązanie wymienionych powyżej problemów podstawowych, przedstawiono wybrane metody klasyczne.

2.1.1. Model matematyczny - ogólny algorytm identyfikacji

Problem budowy i identyfikacji modelu matematycznego powstaje na etapie określania i badania własności obiektu dla celów sterowania. Wymaga to pełnej charakteryzacji obiektu obejmującej określenie:

a) zbioru sygnałów mierzalnych i sterowalnych, które zapisuje się w postaci wektora $\underline{u}^T = [u_1, u_2, \ldots, u_l]$;
b) zbioru sygnałów mierzalnych lecz niesterowalnych, które zapisuje się w postaci wektora $\underline{v}^T = [v_1, v_2, \ldots, v_k]$;

c) zbioru zjawisk niemierzalnych i niesterowalnych, a nawet niezupełnie jeszcze poznanych, które zapisuje się w postaci wektora $\underline{z}^T = [z_1, z_2, \ldots, z_p]$;
d) wskaźnika $\underline{y}$, którego wartość zależy od konfiguracji wartości zmiennych $\underline{u}$, $\underline{v}$, $\underline{z}$, a który można powiązać z celem sterowania.

Podanie modelu matematycznego obiektu to określenie, w jaki sposób wybrany wskaźnik $\underline{y}$ zależy od zmiennych $\underline{u}$, $\underline{v}$, $\underline{z}$.

Ogólnie przybliżony model matematyczny można zapisać w postaci:

$$\underline{y} = F(\underline{x}, A), \tag{2.1}$$

gdzie $\underline{x}^T = [\underline{u}^T, \underline{v}^T]$, A zaś macierzą o stałych współczynnikach.

Identyfikacja modelu matematycznego w postaci (2.1) to określenie wartości współczynników macierzy A.

Rozwiązanie zadania identyfikacji wymaga założenia, że można bezpośrednio mierzyć wartości $\underline{y}$ i odpowiadające im wartości $\underline{x}$.

Po odpowiedniej serii pomiarów dysponuje się wtedy dwoma zbiorami:

$E(\underline{y}) = (\underline{y}_1, \underline{y}_2, \ldots, \underline{y}_m)$ - mierzonych wartości $\underline{y}$;

$E[F(\underline{x}, A)] = [F(\underline{x}_1, A), \ldots, F(\underline{x}_k, A), \ldots, F(\underline{x}_m, A)]$ - obliczonych wartości $\underline{y}$ na podstawie zależności (2.1).

Ogólny algorytm identyfikacji, przy danej postaci zależności F, polega na poszukiwaniu wartości współczynników macierzy A na drodze minimalizacji, w odpowiednio dobranej przestrzeni metrycznej, odległości d między dwoma zbiorami sygnałów $E(\underline{y})$ i $E[F(\underline{x}, A)]$ określonej jako:

$$d\{E(\underline{y}), E[F(\underline{x}, A)]\} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} d[\underline{y}_k, F(\underline{x}_k, A)]. \tag{2.2}$$

Oznaczając przez A_{opt} macierz A, złożoną ze współczynników, które minimalizują odległość (2.2), ogólny algorytm identyfikacji można zapisać w postaci:

$$d\{E(\underline{y}), E[F(\underline{x}, A_{opt})]\} = \min_{A} d\{E(\underline{y}), E[F(\underline{x}, A)]\}. \tag{2.3}$$

Warunki znajdowania A_{opt} na podstawie (2.3) zostały przedstawione np. w [WĘGR 74]. Znaleziony model matematyczny obiektu ma wtedy postać: $\underline{y} = F(\underline{x}, A_{opt})$.

Konkretna realizacja algorytmu (2.3) zależy od przyjętej postaci zależności (2.1).

Zagadnieniu temu poświęcono wiele prac, rozpatrując różne rodzaje zależności (2.1).

W [WĘGR 74, 75a] rozpatrzono przypadki identyfikacji modeli liniowych w przestrzeni euklidesowej, a także pewnej klasy modeli nieliniowych, których identyfikacja sprowadzała się do numerycznego znajdowania minimum funkcji wielu zmiennych, np. jedną z metod przedstawionych w [WILD 64, HIMN 72].

Przypadek identyfikacji zjawisk opisanych modelami matematycznymi w postaci równań różniczkowych zwyczajnych, o współczynnikach będących funkcjami czasu i równań różniczkowych cząstkowych typu parabolicznego rozpatrzono w [CHAV 70, DREW 71].

Najwięcej prac poświęcono identyfikacji modeli matematycznych w postaci liniowych równań różniczkowych lub różnicowych z niewiadomymi współczynnikami. Można tutaj wymienić [SAGE 71, EYKH 74, ASTR 70, MANCZ 71, BUBN 74, ARBA 74, KAMI 75].

Wśród różnorodnych algorytmów identyfikacji, przeznaczonych do oceny współczynników równań, na podstawie mierzonych danych, najczęściej wykorzystywano algorytmy rekurencyjne [PANU 77, 80, SAKA 79] ze względu na ich zalety przy implementacji komputerowej.

Zasady doboru algorytmów identyfikacji były ściśle związane z postacią zależności (2.1) oraz odległości (2.2), w rozpatrywanej przestrzeni metrycznej.

Na ogół miały charakter heurystyczny, uwzględniając w szczególności prostotę i wygodę pracy z wybieranymi modelami matematycznymi i algorytmami identyfikacji.

W konsekwencji problemy budowy odpowiednich modeli matematycznych rzeczywistych obiektów i efektywnych algorytmów ich identyfikacji są nadal aktualne [CYPK 84, RAST 80].

2.1.2. Algorytm sterowania - synteza systemu

Problem syntezy algorytmu sterowania powstaje na etapie praktycznej realizacji komputerowego sterowania obiektem. Poprzedzony jest rozwiązaniem problemu budowy i identyfikacji jego modelu matematycznego. Stąd dla jego rozwiązania przyjmuje się, że dany jest cel sterowania obiektem o wskaźniku charakterystycznym $Y(\underline{u},\underline{v},\underline{z})$ jako wykonanie na tym wskaźniku operacji D [WĘGR 74], realizowanej przez odpowiedni dobór wartości zmiennych mierzalnych i sterowalnych $\underline{u}$, co można zapisać:

$$\underset{\underline{u}}{D}\left[Y(\underline{u},\underline{v},\underline{z})\right]. \tag{2.4}$$

Rozwiązanie tego problemu polega na znalezieniu przyporządkowania wartościom zmiennych $\underline{v}$ i $\underline{z}$ wartości zmiennej $\underline{u}$.

Oznaczając przez $\underline{u} = S_i(\underline{v},\underline{z})$, można zapisać:

$$\underset{\underline{u}}{D}\left[Y(\underline{u},\underline{v},\underline{z})\right] = Y\left[S_i(\underline{v},\underline{z}),\ \underline{v},\underline{z}\right]. \tag{2.5}$$

$Y\left[S_i(\underline{v},\underline{z}),\underline{v},\underline{z}\right]$ można więc uważać za punkt stały operacji D, gdyż, jeżeli $\underline{u} = S_i(\underline{v},\underline{z})$, to:

$$\underset{\underline{u}}{D}\left[Y(\underline{u},\underline{v},\underline{z})\right] = Y(\underline{u},\underline{v},\underline{z}).$$

Przyporządkowanie:

$$\underline{u} = S_i(\underline{v},\underline{z}) \tag{2.6}$$

nazywa się idealnym algorytmem sterowania. Algorytm ten jest nierealizowalny, gdyż wymaga znajomości wartości zmiennych niemierzalnych $\underline{z}$. Dla realizowalnego algorytmu sterowania będzie więc:

$$\underline{u} = S(\underline{v}). \tag{2.7}$$

Gdy zastosuje się (2.7) zamiast (2.6), cel operacji D będzie na ogół osiągnięty tylko z pewnym przybliżeniem Q, które można określić jako pewną odległość między wynikami sterowania idealnego (punktem stałym operacji D) $Y\left[S_i(\underline{v},\underline{z}),\underline{v},\underline{z}\right]$ a wynikami sterowania realnego $Y\left[S(\underline{v}),\underline{v},\underline{z}\right]$.

Formalnie, w odpowiednio dobranej przestrzeni metrycznej, można zapisać:

$$Q = d\left\{Y\left[S_i(\underline{v},\underline{z}),\underline{v},\underline{z}\right],\ Y\left[S(\underline{v}),\underline{v},\underline{z}\right]\right\}. \tag{2.8}$$

Problem znalezienia w zadanym obszarze ograniczeń R realizowalnego, optymalnego algorytmu sterowania $S_o(\underline{v})$ można przedstawić jako problem minimalizacji (2.8). Jest więc:

$$\underset{S\in R}{\operatorname{Min}}\, d\left\{E\left[Y(S(\underline{v}),\underline{v},\underline{z})\right],\left[E\,Y(S_i(\underline{v},\underline{z}),\underline{v},\underline{z})\right]\right\} =$$

$$= d\left\{E\left[Y(S_o(\underline{v}),\underline{v},\underline{z})\right],\ E\left[Y(S_i(\underline{v},\underline{z}),\underline{v},\underline{z})\right]\right\}. \tag{2.9}$$

UWAGA: Zdefiniowany przez (2.1) wskaźnik $\underline{y}$ jest na ogół różny od wskaźnika $Y(\underline{u},\underline{v},\underline{z})$ i poprzez model matematyczny obiektu określa obszar ograniczeń R.

W [WĘGR 74] rozpatrzono niektóre algorytmy sterowania, wykorzystujące modele matematyczne obiektów i informację o zakłóceniach.

Bogata literatura tego problemu dotyczy syntezy algorytmów sterowania w przypadku kwadratowych wskaźników jakości i modeli matematycznych obiektów w postaci liniowych równań różniczkowych [ATHA 69, SPEE 70, LEE 68, MEDI 69].

Połączenie problemu syntezy algorytmów sterowania i identyfikacji modeli matematycznych przedstawiono w [KRAS 74], a także w monografii [SARI 77]. Teorię adaptacyjnych systemów sterowania przedstawiono między innymi w [SRAG 75, KOST 75].

Znajomość algorytmów sterowania jest warunkiem koniecznym przejścia do rozwiązywania problemu syntezy struktury urządzeniowej i programowej systemu komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym obiektem.

Podstawowe zagadnienia związane z rozwiązaniem tego problemu przedstawione są w [HARR 72, WĘGR 75b, NIED 77, YOUR 72, MART 67, BIAŁ 76, GOŁU 74, 75].

2.1.3. Wyniki stosowania metod klasycznych

Reprezentatywna ocena wyników sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi, na podstawie algorytmów otrzymanych na drodze wykorzystania metod klasycznych, jest utrudniona. Trudności te wynikają przede wszystkim z braku odpowiednich opracowań monograficznych ujmujących całościowo ten problem.

Wzmianki o realizacji sterowania rzeczywistymi obiektami rozrzucone są w różnych specjalistycznych czasopismach i dlatego dostęp do nich jest utrudniony.

Jedyny przypadek tego typu danych bibliograficznych, obejmujących koniec lat sześćdziesiątych i początek lat siedemdziesiątych, dotyczy wspomnianej już monografii [HARR 72], zawierając opisy zastosowania komputerów do sterowania w czasie rzeczywistym w następujących przemysłach USA:

a) przemyśle chemicznym i rafinacji nafty;
b) przemyśle metalurgicznym;
c) przemyśle energetycznym;
d) przemyśle cementowym i szklarskim;
e) przemyśle drzewnym i tekstylnym.

Na przełomie lat 1979 i 1980 zaczęło ukazywać się czasopismo "Computers in Industry" prezentujące cyklicznie opracowania zbiorcze poświęcone zastosowaniom komputerów do sterowania w czasie rzeczywistym obiektami technologicznymi kluczowych przemysłów różnych krajów, np. Japonii w [YOSH 80].

Opierając się na analizie dostępnych danych literaturowych można stwierdzić, że efektywnie wykorzystano nieznaczny ułamek opracowanych i opublikowanych klasycznych metod syntezy algorytmów komputerowego sterowania.

Najczęściej wykorzystywaną formą modeli matematycznych były zależności w postaci (2.1) otrzymane na drodze bilansowania strumieni materiałowych i cieplnych [IWAN 75] lub stosowania metod statystycznych ze szczególnym uwzględnieniem metod regresji wielowymiarowej [HIMM 70].

Tak otrzymane modele matematyczne były następnie wykorzystywane do optymalizacji statycznej złożonych obiektów technologicznych.

Zadanie (2.9) sprowadzało się wtedy najczęściej do klasycznych zadań programowania liniowego [MURT 81] lub nieliniowego z kwadratowym wskaźnikiem jakości (2.8) [HIMM 72].

Przykłady takich zadań w przypadku optymalizacji pracy wielkiego pieca przedstawiono np. w [BESW 69, ORAM 61, GREA 65, BROW 65, ROBI 67, SZIB 64, WISD 63, TOWA 78].

W przypadku sterowania procesem produkcji cementu stosowano początkowo komputery do optymalizacji procesu sporządzania mieszanin surowcowych [LEC 63, RONU 66, EVAN 70, ICKO 75]. Wykorzystywano przy tym modele matematyczne otrzymane na drodze sporządzania bilansów materiałowych i ustalania ograniczeń na tzw. wskaźniki technologiczne procesu.

Mniej doniesień w literaturze o efektywnym wykorzystaniu algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi otrzymanych na drodze optymalizacji dynamicznej ich pracy.

Wynika to z sygnalizowanych wcześniej trudności w budowie i identyfikacji takich modeli matematycznych, a także implementacji komputerowej, opracowanych na ich podstawie algorytmów sterowania.

W przypadku budowy modeli matematycznych opisujących dynamikę procesu tlenowo-konwertorowego trudności te zostały scharakteryzowane w [POZO 87].

Problemy budowy modelu matematycznego opisującego dynamikę pieca obrotowego do wypalania klinkieru, a także uzyskane rezultaty sterowania komputerowego zostały przedstawione w [SPAN 72].

W polskiej literaturze technicznej brak opracowań ujmujących syntetycznie te zagadnienia. Dlatego ograniczono się tylko do syntetycznego omówienia wyników uzyskanych w koordynowanych przez ZSAK-PAN problemach węzłowych 06.1.2 i 06.4.

W początkowym okresie wprowadzania komputerów do sterowania w czasie rzeczywistym wybranymi węzłami technologicznymi starano się budować, a następnie identyfikować ich modele matematyczne. Stosowano przy tym różne metody budowy i identyfikacji modeli matematycznych.

Mimo znacznych wysiłków i dużego nakładu pracy nie zawsze uzyskiwano rezultaty wskazujące na wyższość sterowania komputerowego w odniesieniu do sterowania ręcznego przez doświadczonych operatorów. Najostrzej wystąpiło to w przypadku pieca obrotowego do wypalania klinkieru, co zostało przedstawione w [MRÓZ 77]. Przejściowo niektórzy realizatorzy prac w problemie węzłowym 06.1.2 lansowali tezę, że "modele matematyczne są dobre a obiekty złe", która oczywiście nie wytrzymała krytyki.

Z perspektywy czasu, który upłynął, można stwierdzić, że podstawową przyczyną niepowodzeń był fakt nieprzystosowania istniejących metod identyfikacji modeli matematycznych do realiów ruchowo-pomiarowych, w jakich taka identyfikacja przebiegała.

Większość metod identyfikacji opierała się na badaniu zależności między mierzonymi wartościami tzw. wejść i wyjść obiektu w trakcie jego normalnej eksploatacji.

Niektóre z tych metod zakładały ponadto konieczność podawania, na tzw. wejście obiektu, sygnałów o odpowiednio dobranych wartościach i charakterystykach dynamicznych.

Złożone obiekty technologiczne były przy tym stale kontrolowane i sterowane przez operatorów dla osiągnięcia postawionego przed nimi celu sterowania.

Nie były więc prawie nigdy spełnione warunki konieczne identyfikacji, a co więcej - stwierdzono doświadczalnie, że im lepsze było sterowanie przez operatora, tym słabszy w sensie statystycznym był związek między zbiorem wartości sygnałów wyjściowych a zbiorem wartości sygnałów wejściowych [ZSAK 75].

2.2. Metody nieklasyczne

W tym paragrafie pracy pokrótce omówiono niektóre metody syntezy algorytmów komputerowego sterowania, nazwane nieklasycznymi. Powstanie tych metod było próbą poszukiwania dróg wyjścia z zaistniałej w połowie lat siedemdziesiątych sytuacji. Charakteryzowały ją liczne niepowodzenia w budowie, identyfikacji modeli matematycznych i syntezie, na ich podstawie, algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi z wykorzystaniem metod klasycznych.

Metody nieklasyczne powstawały przede wszystkim na gruncie:

a) krytycznej analizy niektórych metod klasycznych, uwzględniającej realia obiektów i istniejące możliwości komputerowego sterowania,
b) poszukiwania nowych sposobów formalnego opisu procesów komputerowego sterowania złożonymi obiektami.

Reprezentatywnymi dla pierwszego z wymienionych podejść mogą być omówione niżej metody oparte na pojęciu modeli matematycznych bazowych i frontowych, lokalnych modeli matematycznych, zasadzie heurystycznej samoorganizacji i technice tzw. automatów tablicowych iteracyjnych.

Reprezentatywnymi dla drugiego z wymienionych podejść mogą być przedstawione dalej metody oparte na teorii zbiorów rozmytych, sterowania sytuacyjnego i technikach stosowanych w tzw. systemach ekspertowych.

2.2.1. Modele bazowe i frontowe

Metoda ta została zaproponowana w [ZSAK 74]. Jej istota polegała na dwuetapowym podejściu do rozwiązywania zadania identyfikacji modelu matematycznego obiektu i syntezy, na tej podstawie, algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym.

Wyróżniony model bazowy to możliwie pełny opis zjawisk i procesów fizykochemicznych przebiegających w rozpatrywanym obiekcie.

Tak otrzymany model bazowy był następnie wykorzystywany do znalezienia na drodze modelowania komputerowego zależności (2.7), co kończyło pierwszy etap proponowanego podejścia.

W etapie drugim, opierając się na znalezionej zależności (2.7), dokonywano syntezy tzw. frontowych modeli matematycznych.

Modele te były następnie przenoszone do sprzęgniętego z obiektem systemu komputerowego jako podstawa sterowania w czasie rzeczywistym.

Podejście to zostało pozytywnie zweryfikowane w przypadku sterowania procesem konwersji tlenku węgla przy produkcji amoniaku, co zostało przedstawione w [SZAF 76].

2.2.2. Modele lokalne

Istota tego podejścia polegała na zastąpieniu rozwiązania jednego zadania (2.3) w całym obszarze dopuszczalnych zmian wartości zmiennych $\underline{y}$ i $\underline{x}$ rozwiązaniem wielu zadań (2.3) w lokalnie określonych obszarach dopuszczalnych zmian wartości zmiennych $\underline{y}$ i $\underline{x}$.

Tak otrzymany zbiór lokalnych modeli matematycznych był następnie podstawą syntezy lokalnych algorytmów sterowania [PUCH 71].

Sposób integracji zbioru lokalnych modeli matematycznych w globalny opis obiektu wykorzystujący logikę matematyczną przedstawiony jest w [ZUK 75].

W [MRÓZ 76] zaproponowano podejście polegające na łączeniu opisu lokalnych modeli matematycznych obiektu z opisem wyróżnionych stanów charakterystycznych, w jakich może się znajdować. Przedstawiono także sposób wykorzystania techniki tablic decyzyjnych do integracji tych opisów w systemie komputerowego sterowania.

Przykład praktycznego wykorzystania tej idei do sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru omówiono w [MRÓZ 81].

2.2.3. Heurystyczna samoorganizacja

Podejście to, zaproponowane w [IWACH 75, 76], polega na poszukiwaniu opisu matematycznego złożonych obiektów na podstawie tzw. zasady heurystycznej samoorganizacji. Zgodnie z tą zasadą opis matematyczny obiektu o optymalnej złożoności strukturalnej minimalizuje tzw. kryterium selekcji.

Punktem wyjścia konstruowania tego opisu jest zbiór formuł matematycznych reprezentujących np. znane prawa fizyczne lub eksperymentalnie ustalone zależności, a także zbiór elementarnych funkcji matematycznych, wielomianów itp.

Kryterium selekcji najczęściej dotyczy bilansu zmiennych występujących w poszukiwanym opisie, regularności jego struktury lub nieobciążoności w sensie statystycznym wyników obliczeń na jego podstawie.

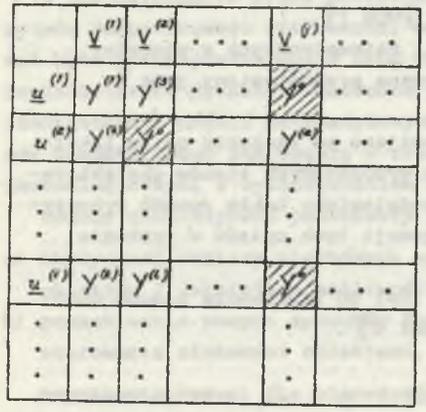
Wykorzystując specjalny algorytm tzw. grupowego przeglądania argumentów, wybrane kryterium selekcji, zbiór wartości zmiennej $\underline{x}$, komputer znajduje najlepszy opis matematyczny obiektu w zbiorze zadanych formuł matematycznych, zależności i wartości zmiennych $\underline{x}$.

W [IWACH 76] przedstawiono wykorzystanie tak otrzymanych modeli matematycznych do sterowania, przytaczając jednocześnie wiele reprezentatywnych i interesujących przykładów.

2.2.4. Automaty tablicowe iteracyjne

Przedstawione w monografii [SKUR 77] podejście zakłada reprezentację modelu matematycznego obiektu w postaci tablicy dwuwymiarowej.

Wiersze tej tablicy etykietowane są odpowiednimi konfiguracjami wartości zmiennej $\underline{u}$, kolumny zaś konfiguracjami wartości zmiennej $\underline{v}$. Na przecięciach wierszy i kolumn wpisywane są zmierzone lub obliczone wartości wskaźnika charakterystycznego Y. Przykładową strukturę takiej tablicy przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Model matematyczny obiektu w postaci tablicy

Fig. 8. Plant model as a decision table

Na rys. 8 zakreskowano pożądaną wartość Y° wskaźnika charakterystycznego Y reprezentującego cel sterowania obiektem.

Algorytm sterowania (2.7), na podstawie modelu matematycznego obiektu w postaci tablicy o strukturze przedstawionej na rys. 8, można przedstawić w następujący sposób: przy danej lub zmierzonej konfiguracji wartości zmiennej $\underline{v} = \underline{v}^{(j)}$ znajdź taką konfigurację wartości zmiennej $\underline{u}$, dla której wartość wskaźnika charakterystycznego $Y = Y^\circ$.

Realizacja takiego algorytmu jest oczywista na przykład za pomocą odpowiedniego automatu.

W przytoczonej monografii przedstawiono interesujący przykład wykorzystania odpowiednio skonstruowanego automatu tablicowego do sterowania w czasie rzeczywistym procesem produkcji szklanych rur.

Omawiając to podejście należy zwrócić uwagę na istotne trudności, jakie trzeba pokonać przy jego realizacji.

Trudności te mogą dotyczyć:

a) określenia zbioru odpowiednich konfiguracji wartości zmiennych $\underline{v}$, $\underline{u}$ i wskaźnika charakterystycznego Y;
b) odpowiedniego kodowania i reprezentowania w pamięci automatu tablicy z rys. 8;
c) redukcji tablicy w przypadku, gdy zbiory konfiguracji wartości zmiennych $\underline{v}$ i $\underline{u}$ są liczne;
d) konieczności wprowadzenia do tablicy z rys. 8 dodatkowej informacji w przypadku istotnej niestacjonarności obiektu lub niejednoznaczności w określaniu sterowań.

2.2.5. Opis za pomocą zbiorów rozmytych

Wykorzystanie, zapoczątkowane pracą [ZADE 65], tak zwanego zbioru rozmytego do opisu stanu złożonego obiektu technologicznego, a następnie do syntezy, na tej podstawie, programów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym jest, mimo bardzo wielu publikowanych z tej dziedziny prac teoretycznych, nadal problematyczne.

Istota zagadnienia wiąże się bowiem nie z pojęciem i z algebrą zbiorów rozmytych, ale z praktycznym określaniem funkcji przynależności. Dlatego w literaturze z tego zakresu przeważają prace teoretyczne przyjmujące, że funkcja przynależności sygnałów opisujących stan obiektu jest dana i określające, na tej podstawie oraz na podstawie tzw. rozmytego opisu obiektu i celu sterowania, funkcje przynależności dla sygnałów sterujących. Brak jest natomiast prac przyjmujących jako podstawę liczbowe wyniki pomiarowe charakteryzujące stan obiektu i podające programy, które na podstawie tych danych pomiarowych pozwalają obliczyć wartości numeryczne odpowiednich zmiennych sterujących, co musi być podstawą wszystkich komputerowych układów sterujących.

Można jednak wskazać prace starające się wyraźnie omówić i te aspekty aplikacyjne.

Zdaniem Autora zapoczątkowała je praca [BELL 70] przedstawiająca ogólny problem podejmowania decyzji w tzw. otoczeniu rozmytym. W nurcie prac mających wyraźne aspekty aplikacyjne, ukierunkowane na problemy sterowania obiektami technologicznymi, można wymienić [MAMD 74, 75, 76, KICK 76, 78, KING 75, TONG 76a, b, 77, PROC 77, BRAA 97, GUPT 79].

Przykład sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru, na podstawie algorytmu zapisanego za pomocą logiki rozmytej (wielowartościowej), przedstawiony jest w [MAMD 83].

Niektóre aspekty budowy modeli matematycznych obiektów sterowania za pomocą formalizmów teorii zbiorów rozmytych przedstawiono w [KAIP 85a]. Problemy klasyfikacji w tzw. otoczeniu rozmytym przedstawiono w pracy [KAIP 83], a wykorzystanie ich rozwiązania do klasyfikacji jakości klinkieru w pracach [KAIP 82, 85b].

Przykład sterowania spiekalnią, na bazie algorytmu zapisanego za pomocą logiki rozmytej, przedstawiono w [RUTH 76].

Kilka przykładów aplikacji tzw. rozmytych algorytmów sterowania przytoczono także w monografii [POSP 86a].

2.2.6. Sterowanie sytuacyjne

Idea sterowania sytuacyjnego została wprowadzona do literatury pracą [POSP 71]. Polegała na zaproponowaniu specjalnego języka opisu obiektu uwzględniającego jego specyficzną strukturę, funkcjonowanie w czasie, a także zachowanie się ludzi w procesie sterowania.

Zasady sterowania sytuacyjnego zostały zebrane i przedstawione w [KŁYK 72]. W [POSP 86] zwrócono uwagę na niektóre warunki efektywnego wykorzystania tych zasad w przypadku komputerowego sterowania złożonymi obiektami technologicznymi.

Poniżej zebrano najważniejsze z nich.

1. Sterowanie sytuacyjne wymaga znacznych nakładów pracy na zebranie informacji o obiekcie, jego funkcjonowaniu i o sposobach sterowania tym obiektem. Nakłady te sa uzasadnione tylko w przypadku, gdy tradycyjne metody formalizacji opisu działania obiektu i syntezy algorytmów sterowania nie mogą być zastosowane.

2. Opis sytuacji (bieżących), jakie mogą wystąpić w sterowanym obiekcie, powinien być realizowany w języku, za pomocą którego można także wyrazić wszystkie podstawowe parametry i związki konieczne do klasyfikacji tego opisu i przyporządkowania mu odpowiedniego sterowania.

3. Język opisu sytuacji powinien także pozwalać na wyrażanie w nim nie tylko faktów i relacji ilościowych, charakteryzujących obiekt sterowania, ale także ocen jakościowych, które nie mogą być sformalizowane w matematycznym sensie.

4. Sterowanie sytuacyjne jest metodą heurystyczną gwarantującą, że osiągnięte wyniki sterowania nie powinny być gorsze od tych, jakie osiąga doświadczony operator.

Wykorzystanie sterowania sytuacyjnego do sterowania tzw. wielkimi systemami przedstawiono w monografii [KŁYK 74].

Aktualny stan teorii sterowania sytuacyjnego i jej zastosowań przedstawiono w monografii [POSP 86b]. Przedstawiono tam także ogólną strukturę systemu sterowania obiektem opartego na idei sterowania sytuacyjnego.

Istota proponowanego podejścia polega na wyróżnieniu w opisie obiektu pojęć: bieżąca sytuacja i kompletna sytuacja.

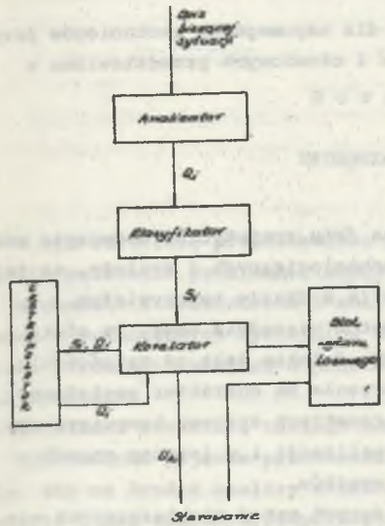
Bieżąca sytuacja to zbiór informacji o strukturze obiektu sterowania i jego funkcjonowania w danej chwili czasowej.

Kompletna sytuacja to zbiór informacji o stanie obiektu w danej chwili czasowej i wiedzy o technologii sterowania.

Oznaczając przez S_i kompletną sytuację, przez Q_j bieżącą sytuację, zaś przez u_k sterowanie, elementarny akt sterowania obiektem można przedstawić w następujący sposób:

$$S_i : Q_j \xrightarrow[u_k]{} Q_l.$$

Zapis ten oznacza, że jeżeli w obiekcie sterowania rozpoznano bieżącą sytuację Q_j, a stan obiektu i schemat technologiczny sterowania odpowiadają kompletnej sytuacji S_i, w której można zastosować sterowanie u_k, to to sterowanie realizuje się na obiekcie, a bieżąca sytuacja Q_j przejdzie pod wpływem tego sterowania w nową sytuację Q_l.



Rys. 9. Idea sterowania sytuacyjnego

Fig. 9. The concept of situational control

Można to schematycznie przedstawić tak jak na rys. 9.

Zaznaczony na rys. 9 blok wyboru losowego przeznaczony jest do określenia sterowania w przypadku, gdy nie udało się wybrać sterowania na podstawie opisu bieżącej sytuacji.

Praktyczna realizacja idei sterowania sytuacyjnego jest niezwykle złożona, gdyż wymaga pełnego opisu funkcjonowania obiektu poprzez określenie zbiorów sytuacji bieżących, kompletnych, sterowań i ich ewolucji w czasie pod wpływem sterowania.

Stąd podstawowe kierunki zastosowań idei sterowania sytuacyjnego to obiekty o dobrze określonej strukturze i zasadzie funkcjonowania jak np. system śluz, port przeładunkowy, lotnisko pasażerskie itp. [ZAGA 71, POSP 86a,b].

Kombinowany algorytm sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru, obejmujący sterowanie obliczone z modelu i sterowanie określone na podstawie analizy bieżącej sytuacji na obiekcie, przedstawiony jest w [BRUS 74].

2.2.7. Systemy ekspertowe

Pojęcie systemy ekspertowe pojawiło się w literaturze na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych, wywołując sporo zamieszania i lawinę publikacji [SIMO 83]. Obecnie po okresie euforii, obserwuje się krytyczne i zarazem konstruktywne podejście do ich tworzenia. Metodologiczne aspekty budowy systemów ekspertowych, ich klasyfikację i przykłady zastosowań przedstawiono w [ALTY 84, WATE 85].

Ogólnie system ekspertowy można rozpatrywać jako narzędzie pozwalające w konkretnej dziedzinie przedmiotowej rejestrować wiedzę człowieka (eksperta) i udostępnić ją innym [ALTY 84, HAYE 83].

Stąd podstawowego znaczenia nabiera efektywne rozwiązanie następujących problemów:

a) przejmowania wiedzy od ekspertów;
b) reprezentacji tej wiedzy w komputerze;
c) udostępniania jej użytkownikom.

Rozwiązanie niektórych z tych problemów przedstawiono w [HAYE 84, JOHN 85, FORS 84, WEIS 84, MRÓZ 83b, 85b, 87a,b].

Wykorzystanie systemów ekspertowych do podejmowania decyzji w przemyśle wyczerpująco omówiono w pracy [EFST 86].

Elementy tworzenia systemu ekspertowego dla wspomagania technologów przy kierowaniu procesem spiekania rud cynkowych i ołowiowych przedstawiono w [MRÓZ 83b, ZSAK 85].

2.3. Podsumowanie

Przedstawiony przegląd literatury miał na celu syntetyczne omówienie różnych podejść do opisu złożonych obiektów technologicznych i syntezy, na tej podstawie, algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym.

Różnorodność, zwłaszcza nieklasycznych metod uzasadnia tezę, że efektywne i uniwersalne rozwiązanie tego problemu dalekie jest od zakończenia.

Nadal przy wyborze metody decydujące znaczenie ma charakter posiadanej informacji o obiekcie, celu sterowania i parametrach systemu komputerowego.

Informacja ta wyznacza ramy możliwej formalizacji i w istotny sposób ogranicza zakres wykorzystania otrzymanych wyników.

Nietrudno także zauważyć, że żadna z opisanych metod nieklasycznych nie może być bezpośrednio wykorzystana do rozwiązania sformułowanych, w podsumowaniu rozdziału 2, zadań.

Wynika stąd konieczność formalnego opisu sterowania przez operatorów złożonymi obiektami technologicznymi.

R o z d z i a ł III

SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

W tym rozdziale przedstawiono mające podstawowe znaczenie dla całej pracy sformułowanie problemów, których rozwiązaniu jest poświęcona.

Wychodząc z doświadczeń i analizy wyników obserwacji procesu sterowania przez doświadczonych operatorów złożonymi obiektami technologicznymi, omówiono przesłanki stojące u podstaw pojęcia i formalizacji modelu wnioskowania operatora.

Określono strukturę takiego modelu wnioskowania.

Wprowadzono pojęcie przestrzeni obserwacji i przestrzeni celów sterowania, aby na drodze analizy zależności między tymi przestrzeniami wprowadzić pojęcie stanu charakterystycznego obiektu.

W przestrzeni sterowania wyróżniono zbiór sterowań charakterystycznych.

Model wnioskowania operatora przedstawiono jako uporządkowaną trójkę, której poszczególne elementy składowe reprezentują: zbiór stanów charakterystycznych obiektu, zbiór sterowań charakterystycznych, realizowane przez niego przyporządkowanie stanom charakterystycznym odpowiednich sterowań charakterystycznych.

Jako reprezentację modelu wnioskowania operatora zaproponowano odpowiednią tablicę decyzyjną.

Przedstawiono także ogólną strukturę programu decyzyjnego będącego komputerową implementacją tablicy decyzyjnej.

Omówiono aspekty identyfikacji modelu wnioskowania operatora ze szczególnym uwzględnieniem przygotowania i reprezentacji danych.

Przedstawiono sformułowanie zbioru problemów, których rozwiązanie może doprowadzić do efektywnej implementacji modelu wnioskowania operatora w systemie komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonym obiektem.

3.1. Przesłanki formalizacji

Z punktu widzenia operatora obiekt sterowania charakteryzuje:

a) przestrzeń obserwacji określona zmiennymi mierzalnymi i zmiennymi obserwowalnymi;
b) przestrzeń celów sterowania określona zmiennymi charakteryzującymi cele sterowania;
c) przestrzeń sterowania określona zmiennymi mierzalnymi i sterowalnymi.

Współrzędne przestrzeni obserwacji to te parametry obiektu, na które operator zwraca uwagę, określając, na podstawie analizy ich wartości, bieżącą sytuację w sterowanym obiekcie.

Określenie i analiza bieżącej sytuacji jest punktem wyjścia do oceny przez operatora osiągnięcia lub nie celu sterowania.

Wynika to z faktu, że cel sterowania wyrażany jest przez operatora nie przez a za pomocą konfiguracji wartości zmiennych mierzalnych i zmiennych obserwowalnych.

Współrzędne przestrzeni celów sterowania to używane przez operatora pojęcia opisujące stopień osiągnięcia celu sterowania, których wartości określa na podstawie konfiguracji wartości współrzędnych bieżącej sytuacji.

Stąd między przestrzenią obserwacji a przestrzenią celów sterowania istnieje ścisła zależność.

Z jednej strony bieżąca sytuacja w sterowanym obiekcie, określona w przestrzeni obserwacji, może być odwzorowana w przestrzeni celów sterowania.

Z drugiej strony określone, w przestrzeni celów sterowania, cele sterowania mogą być odwzorowane w przestrzeni obserwacji dokonując jej rozbicia (pokrycia).

Wyznaczone przez te rozbicia obszary przestrzeni obserwacji nazwano stanami charakterystycznymi obiektu.

Współrzędne przestrzeni sterowania to te parametry obiektu, których wartość określa operator w procesie sterowania, dążąc do osiągnięcia celu sterowania.

W przestrzeni sterowania operator określa pewne typowe konfiguracje wartości zmiennych mierzalnych i sterowalnych.

Przy technologicznie ustalonych możliwościach sterowania obiektem wynika to najczęściej ze zwyczajowo przyjętych zasad bądź też z indywidualnych upodobań operatora.

Zbiory konfiguracji wartości zmiennych mierzalnych i sterowalnych nazwano sterowaniami charakterystycznymi.

Model wnioskowania operatora przy zadanej strukturze przestrzeni celów sterowania zawiera:

a) podział przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu;
b) podział przestrzeni sterowania na sterowania charakterystyczne;
c) przyporządkowanie każdemu stanowi charakterystycznemu odpowiadającego mu sterowania charakterystycznego.

3.2. Formalizacja sposobu sterowania

Przedstawiono formalizację sposobu sterowania przez operatora złożonym obiektem technologicznym na podstawie określonych elementów modelu wnioskowania [MRÓZ 86].

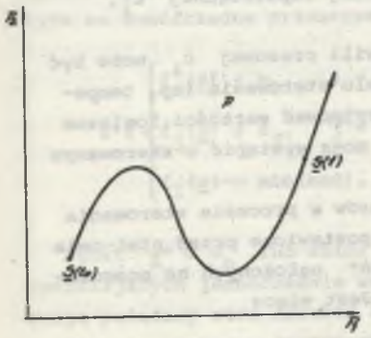
3.2.1. Przestrzeń obserwacji

Niech $p_1, p_2, \ldots, p_n$ oznaczają współrzędne przestrzeni obserwacji. Z każdą współrzędną p_i, $i = 1,2,\ldots,n$, wiąże się skończony zbiór P_i jej wartości.

Przestrzeń obserwacji jest określona przez iloczyn kartezjański w postaci:

$$P = P_1 \times P_2 \times \ldots \times P_n \tag{3.1}$$

Sytuacja w sterowanym obiekcie to dowolny punkt $\underline{s} \in P$, a więc $\underline{s} = [p_1, p_2, \ldots, p_n]$ dla $p_i \in P_i$.



Rys. 10. Trajektoria ewolucji sytuacji $\underline{s}(t)$ w przestrzeni obserwacji

Fig. 10. Trajectory of situation evolution $\underline{s}(t)$ in the observation space

Iloczyn kartezjański (3.1) określa wszystkie, teoretycznie możliwe, sytuacje w sterowanym obiekcie.

W rzeczywistości istnieje pewien podzbiór $S_D \subseteq P$ sytuacji dopuszczalnych technologicznie.

Pod wpływem stale działających zakłóceń i sterowania realizowanego przez operatora obserwuje się zmianę w czasie (ewolucję) sytuacji w przestrzeni obserwacji. Ilustruje to rys. 10.

Wybór i realizacja przez operatora sterowania w czasie rzeczywistym obiektem wymaga odwzorowania bieżącej sytuacji w przestrzeni celów sterowania.

3.2.2. Przestrzeń celów sterowania

Niech $c_1, c_2, \ldots, c_p$ oznaczają współrzędne przestrzeni celów sterowania.

Przyjmuje się, że każda współrzędna c_i, $i = 1,2,\ldots,p$, jest jednoznacznie określona przez bieżącą sytuację $\underline{s} \in S_D$.

Jest więc

$$c_i = f_i(\underline{s}), \quad i = 1,2,\ldots,p, \tag{3.2}$$

gdzie funkcje $f_i(\cdot)$ określają związek bieżącej sytuacji $\underline{s} \in S_D$ w sterowanym obiekcie ze składową c_i celu sterowania.

Tak więc cel sterowania to punkt $\underline{c} = [c_1, c_2, \ldots, c_p]$ w przestrzeni celów sterowania, którego współrzędne wyznaczone są przez zależności (3.2).

Przestrzeń celów sterowania oznaczono przez $\mathcal{C}$.

Ogólnie transformację podzbioru $S_D \subseteq P$ w przestrzeni celów sterowania $\mathcal{C}$ można zapisać w postaci:

$$\underline{c} = F(\underline{s}) \tag{3.3}$$

gdzie:

$$F(\cdot) = (f_1(\cdot),\ldots,f_p(\cdot)) \tag{3.4}$$

jest zadaną funkcją wektorową wiążącą bieżącą sytuację w przestrzeni obserwacji z przyjętym celem sterowania.

W szczególnym przypadku, tożsamości przestrzeni obserwacji i przestrzeni celów sterowania, (3.3) może przyjąć postać $\underline{c} = \underline{s}(p=n)$.

Odrębnym zagadnieniem jest określenie dla każdej współrzędnej c_i, $i = 1,2,\ldots,p$, zbioru C_i jej wartości.

Wynika to z faktu, że w każdej konkretnej chwili czasowej c_i może być liczbą charakteryzującą wartość tej składowej celu sterowania (np. temperatura, ciśnienie, przepływ, koszt itp.) lub przyjmować wartości logiczne 0,1 dla stwierdzenia wystąpienia zdarzeń, które mogą wystąpić w sterowanym obiekcie.

Z obserwacji i analizy zachowania się operatorów w procesie sterowania złożonymi obiektami technologicznymi wynika, że postawione przed nimi cele sterowania formułują za pomocą zbioru warunków c^* nałożonych na poszczególne współrzędne przestrzeni celów sterowania. Jest więc:

$$\underline{c}^* = [c_1^*, c_2^*, \ldots, c_p^*], \tag{3.5}$$

gdzie c_i^*, $i = 1,\ldots,p$, są warunkami nałożonymi na sytuację $\underline{s} \in S_D$ w przestrzeni obserwacji, wyrażonymi za pomocą współrzędnej $c_i = f_i(\underline{s})$.

Te warunki - cele mogą mieć różny charakter. Z punktu widzenia formalizacji należy zmierzać do ujednoliconego sposobu ich reprezentacji.

Z praktycznych obserwacji wynika, że można je przedstawić w jednej z następujących postaci:

a) c_i^* oznacza warunek, aby i-ta współrzędna przestrzeni celów sterowania $c_i = f_i(\underline{s})$ była utrzymywana na stałej, zadanej wartości m_i, a więc $c_i = m_i$;
b) c_j^* oznacza warunek, aby wartości j-tej współrzędnej przestrzeni celów sterowania spełniały ograniczenia: $c_j \leqslant g_j$, $d_j \leqslant c_j$, $d_j \leqslant c_j \leqslant g_j$;
c) c_l^* oznacza warunek ekstremalizacji wartości przyjmowanych przez l-tą współrzędną przestrzeni celów sterowania, co można zapisać w postaci $c_l \to \min$ lub $c_l \to \max$.

Zadanie celów sterowania to przede wszystkim określenie ich struktury przez wskazanie sposobu ich reprezentacji w jednej z wymienionych wyżej postaci. Następnie należy określić wartości parametrów m_i, $i = 1,2,\ldots,k_1,d_j,g_j$, $j = 1,2,\ldots,k_2,k_3$, gdzie parametry k_1, k_2, k_3 oznaczają odpowiednio liczby celów wyrażonych w każdej z wymienionych postaci.

Proces określania struktury przestrzeni celów sterowania zawiera więc:

a) określenie funkcji wektorowej (3.4);
b) określenie zbioru warunków (3.5).

3.2.3. Podział przestrzeni obserwacji

Zadanie zbioru warunków - celów (3.5) w przestrzeni celów sterowania może być odwzorowane poprzez zależności (3.3), (3.4) w przestrzeń obserwacji. Wystarczy rozpatrzyć obszar $S^* \subseteq S_D$ określony układem warunków, nakładanych na współrzędne przestrzeni celów sterowania, w postaci:

$$S^*: \begin{cases} f_i(\underline{s}) = m_i, & i = 1,2,\ldots,k_1; \\ f_j(\underline{s}) \geqslant d_j, & j = 1,2,\ldots,k_2; \\ f_l(\underline{s}) \to \min(\max), & l = 1,2,\ldots,k_3. \end{cases} \tag{3.6}$$

Punkt $\underline{s}^* \in S_D$ lub zbiór $S^* \subseteq S_D$ punktów w przestrzeni obserwacji, spełniających jednocześnie wszystkie warunki określone przez (3.6), wyznaczają pożądany stan obiektu sterowania.

Stan ten nazwano stanem charakterystycznym normalnym lub krótko stanem normalnym obiektu.

Stany, dla których wszystkie warunki określone przez (3.6) nie są jednocześnie spełnione, nazwano stanami charakterystycznymi nienormalnymi lub krótko stanami nienormalnymi obiektu.

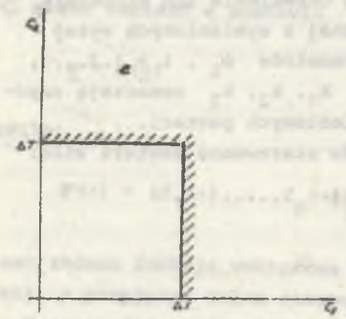
Przykład 3.1

Mierzy się temperaturę w m punktach pieca obrotowego: $p_1,\ldots,p_m$. Należy utrzymywać temperaturę w piecu obrotowym tak, aby spadek temperatury w sąsiednich punktach nie był większy od zadanej wartości ΔT.

W tym przypadku m-wymiarowa przestrzeń obserwacji utworzona jest wskazaniami przyrządów pomiarowych: $p_1,p_2,\ldots,p_m$. Przestrzeń celów sterowania $\mathcal{C}$ ma rozmiar $m-1$ i jest określona odwzorowaniami (3.2) w postaci:

$$c_i = f_i(\underline{s}) = |p_{i+1} - p_i|, \quad i = 1,\ldots,m-1.$$

Zbiór warunków $\underline{c}^*$ jest w tym przypadku określony zbiorem nierówności o postaci $c_i^* \leqslant \Delta T$ dla $i = 1,2,\ldots,k_2$, gdzie $k_2 = m-1$.



Rys. 11. Odwzorowanie celu w przestrzeni celów sterowania

Fig. 11. Mapping of the goal into the control goal space

W przypadku dwuwymiarowym ilustruje to rys. 11.

W celu zbadania, jak określenie zbioru warunków $\underline{c}^*$ może być odwzorowane w przestrzeni obserwacji, wystarczy rozpatrzyć obszar $S^* \subset S_D$ określony w przykładzie, jak poniżej:

$$S^* : |p_{i+1} - p_i| \leq \Delta T, \quad i = 1,2,\ldots,m-1. \tag{3.7}$$

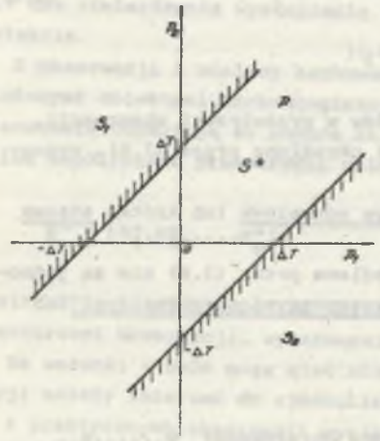
W przypadku dwuwymiarowym można to zilustrować jak na rys. 12.

Analizując rys. 12, nietrudno zauważyć, że zależność (3.7) dokonuje rozbicia przestrzeni obserwacji na trzy stany charakterystyczne:

a) stan normalny ("piec ostry") oznaczony przez S^* i wyznaczony przez $\underline{s} \in S_D$, dla których zachodzi $|p_2 - p_1| \leq \Delta T$;

b) stan nienormalny ("piec przegrzany") oznaczony przez S_1 i wyznaczony przez $\underline{s} \in S_D$, dla których zachodzi $p_2 > p_1 + \Delta T$;

c) stan nienormalny ("piec zimny") oznaczony przez S_2 i wyznaczony przez $\underline{s} \in S_D$, dla których zachodzi $p_2 < p_1 - \Delta T$.



Rys. 12. Odwzorowanie przestrzeni celów w przestrzeń obserwacji w rozpatrywanym przykładzie pieca obrotowego

Fig. 12. Mapping of the goal space into the observation space for the rotary kiln example

Przykład 3.2

Dla opisu i klasyfikacji stanów cieplnych garu wielkiego pieca wykorzystuje się zależność pomiędzy zawartością krzemu w surówce, oznaczoną przez Si_{sur}, zawartością siarki w surówce, oznaczoną przez S_{sur} i zasadowością żużla spustowego, oznaczoną przez $z_ż$ i obliczoną na podstawie wzoru [BENE 76]:

$$z_ż = \frac{CaOż}{SiO_2ż}.$$

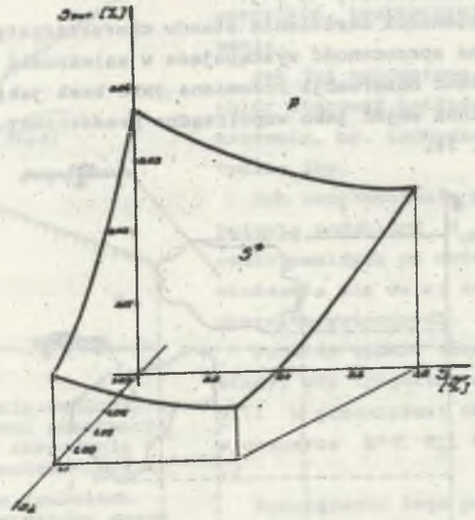
Zależność tę, na podstawie analizy danych z wielkiego pieca, przedstawiono w tabeli 4 [ZSAK 80].

Tabela 4

Wartości współrzędnych przestrzeni celów sterowania w przypadku wielkiego pieca

Zasadowość żużla	Krzem [%] ⩽ 0,6	0,6-0,8	⩾ 0,8
	siarka [%]	siarka [%]	siarka [%]
⩽ 1,05	0,037	0,028	0,027
1,05-1,09	0,030	0,025	0,024
⩾ 1,1	0,026	0,023	0,021

W przestrzeni obserwacji, wyznaczonej współrzędnymi Si_{sur}, S_{sur} i $z_ż$, zależność ta przedstawiona jest na rys. 13.



Rys. 13. Podział przestrzeni obserwacji przy ocenie i klasyfikacji stanu cieplnego garu wielkiego pieca

Fig. 13. Division of the observation space for furnace well heat state evaluation and classification

Opierając się na przedstawionym na rys. 13 podziale przestrzeni obserwacji, można dokonywać jednoznacznej oceny i klasyfikacji stanów cieplnych garu wielkiego pieca.

Podział przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu generowany jest zależnością (3.6) lub w przypadku $\underline{c} = \underline{s}$ (p=n) dokonywany jest przez operatora.

Dla jego oceny przyjmuje się, że $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \ldots, S_r\}$ jest zbiorem wszystkich stanów charakterystycznych określonych w przestrzeni obserwacji.

Stany charakterystyczne ze zbioru $\mathcal{S}$ nazywa się <u>poprawnie określonymi</u>, jeżeli:

$$\text{a)} \quad \bigcup_{i=1}^{r} S_i = S_D; \qquad \text{b)} \quad S_i \cap S_j = \emptyset, \quad i,j = 1,2,\ldots,r, \quad i \neq j. \tag{3.8}$$

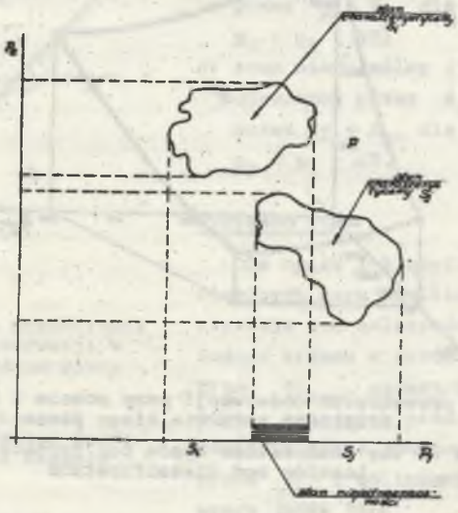
W przypadku niepoprawnie określonych stanów charakterystycznych przy ocenie bieżącej sytuacji w sterowanym obiekcie mogą pojawić się sytuacje nieokreślone i sytuacje niejednoznaczne.

<u>Sytuacją nieokreśloną</u> nazywa się każdą sytuację $\underline{s} \in S_D \setminus \bigcup_{i=1}^{r} S_i$.

<u>Sytuację niejednoznaczną</u> nazywa się każdą sytuację $\underline{s} \in S_D$ taką, że $\underline{s} \in S_i \cap S_j$, $i,j = 1,2,\ldots,r$, $i \neq j$.

Przyczyną niepoprawności określenia stanów charakterystycznych obiektu może być niezauważona sprzeczność występująca w zależności (3.6) lub niekompletność przestrzeni obserwacji rozumiana jako brak jakiejś istotnej zmiennej, która powinna wejść jako współrzędna przestrzeni obserwacji.

Ilustruje to rys. 14.



Rys. 14. Ilustracja wpływu wymiarowości przestrzeni obserwacji na określenie stanów charakterystycznych obiektu

Fig. 14. Influence of observation space dimensionality on determining characteristic states of the plant

Pokazane na rys. 14 stany charakterystyczne S_i, S_j są poprawnie określone w przestrzeni obserwacji o współrzędnych p_1, p_2, a niepoprawnie określone w przestrzeni obserwacji o współrzędnej p_1.

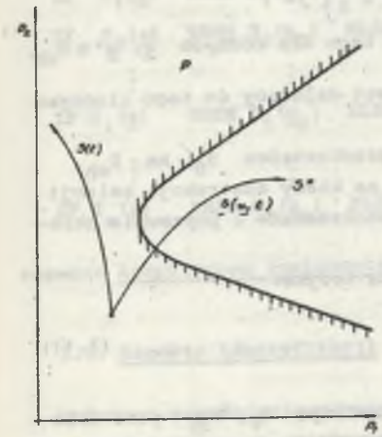
Poprawne określenie w przestrzeni obserwacji stanów charakterystycznych obiektu ma podstawowe znaczenie dla opisu sterowania.

3.2.4. <u>Przestrzeń sterowania</u>

Niech $u_1, u_2, \ldots, u_k$ oznaczają <u>współrzędne</u> przestrzeni sterowania. Z każdą współrzędną u_i, $i = 1,2,\ldots,k$, wiąże się skończony zbiór U_i jej wartości.

<u>Przestrzeń sterowania</u> jest określona przez iloczyn kartezjański w postaci:

$$U = U_1 \times U_2 \times \ldots \times U_k. \tag{3.9}$$



Rys. 15. Trajektoria ewolucji sytuacji w przestrzeni obserwacji w przypadku braku sterowania - $\underline{s}(t)$ i ze sterowaniem - $\underline{s}(\underline{u},t)$.

Fig. 15. Situation evolution trajectory in observation space with no control $s(t)$ and under control $s(\underline{u},t)$

<u>Sterowanie</u> to dowolny punkt $\underline{u} \in U$, a więc $\underline{u} = [u_1, u_2, \ldots, u_k]$, gdzie $u_i \in U_i$.

Iloczyn kartezjański (3.9) określa wszystkie, teoretycznie możliwe, sterowania.

Jak już wspomniano, w praktyce na zbiór sterowań nakładane są istotne ograniczenia, np. technologiczne, energetyczne itp.

Ich uwzględnienie prowadzi do wyodrębnienia podzbioru $U_{ch} \subset U$ sterowań realizowalnych na obiekcie. Zbiór ten utożsamia się dalej ze zbiorem sterowań charakterystycznych.

Problem wyboru sterowania pojawia się wtedy, gdy trajektoria ewolucji sytuacji $\underline{s}(t)$ w przestrzeni obserwacji nie leży w obszarze $S^* \subset S_D$. Ilustruje to rys. 15.

Rozwiązanie tego problemu wymaga przyjęcia założenia o <u>sterowalności</u> każdej sytuacji $\underline{s} \in S_D$.

Sytuację $\underline{s}(t) \in S_D$ nazywa się <u>sterowalną</u>, w zapisie $\underline{s}(t) = \underline{s}(\underline{u},t)$, jeżeli istnieje takie sterowanie charakterystyczne $\underline{u} \in U_{ch}$, że pod wpływem tego sterowania trajektoria ewolucji sytuacji w przestrzeni obserwacji spełni warunek $\underline{s}(\underline{u},t) \subset S^*$.

Przyjmując, że wszystkie sytuacje $\underline{s} \in S_D$ są sterowalne, przez <u>proces sterowania</u> rozumie się taki dobór sterowań $\underline{u} \in U_{ch}$, aby stale w czasie zachodziło:

$$\underline{s}(\underline{u},t) \subset S^*. \tag{3.10}$$

3.2.5. Reprezentacja modelu wnioskowania

Ze względu na skończoność zbiorów S_D i U_{ch} można opisać realizowane przez operatora przyporządkowanie każdej sytuacji $\underline{s} \in S_D$ odpowiadającego jej sterowania $\underline{u} \in U_{ch}$, a następnie zbadać jego własności.

Niech $\Phi : S_D \rightarrow U_{ch}$ będzie surjekcją [BIRK 72]. Można pokazać:

Stwierdzenie 3.1. Odwzorowanie Φ indukuje w S_D relację równoważności, a klasy abstrakcji tej relacji są poprawnie określonymi stanami charakterystycznymi.

Dowód tego stwierdzenia jest elementarny np. [SZRE 76]. Wystarczy rozpatrzyć relację $A_\Phi \subseteq S_D \times S_D$ określoną w następujący sposób:

$$\bigvee_{\underline{x},\underline{y} \in S_D} ((\underline{x}\ A_\Phi\ \underline{y}) \Rightarrow (\Phi(\underline{x}) = \Phi(\underline{y})))$$

Niech dla każdego $\underline{u} \in U_{ch}$, $S_{\underline{u}} = \left\{ \underline{s} \in S : \Phi(\underline{s}) = \underline{u} \right\}$.

Łatwo zauważyć, że $\bigcup_{\underline{u} \in U_{ch}} S_{\underline{u}} = S_D$, a prócz tego dla różnych $\underline{u}, \underline{u}^* \in U_{ch}$, $S_{\underline{u}} \cap S_{\underline{u}^*} = \emptyset$, gdyż w przeciwnym przypadku element należący do tego iloczynu miałby dwa różne obrazy: $\underline{u}$, $\underline{u}^*$.

Dla dowolnego $\underline{u} \in S$, $S_{\underline{u}} \neq \emptyset$, ponieważ Φ przekształca S_D na U_{ch}.

Zbiory $S_{\underline{u}}$ tworzą więc podział zbioru S_D na klasy abstrakcji relacji A, a zatem spełniając warunek (3.8) mogą być utożsamiane z poprawnie określonymi stanami charakterystycznymi.

Model wnioskowania operatora to uporządkowana trójka:

$$M = \langle S_D/A_\Phi,\ U_{ch},\ \Phi_M \rangle, \tag{3.11}$$

gdzie S_D/A_Φ oznacza iloraz zbioru S_D przez relację A_Φ, U_{ch} jest zbiorem sterowań charakterystycznych, zaś $\Phi_M : S_D/A_\Phi \rightarrow U_{ch}$.

Niech $U_{ch} = \left\{ \underline{u}_1, \underline{u}_2, \ldots, \underline{u}_m \right\}$ będzie zbiorem sterowań charakterystycznych.

Łatwo zauważyć, że zgodnie z (3.11) i stwierdzeniem 3.1. $S_D/A_\Phi = \left\{ S_1, S_2, \ldots, S_m \right\}$ jest zbiorem poprawnie określonych stanów charakterystycznych.

Model wnioskowania (3.11) definiuje m przyporządkowań o postaci: $S_1 \rightarrow \underline{u}_1$, $S_2 \rightarrow \underline{u}_2, \ldots, S_m \rightarrow \underline{u}_m$.

Przyporządkowanie $S_i \rightarrow \underline{u}_i$, $i = 1,2,\ldots,m$, nazwano regułą decyzyjną R_i^M zgodną z modelem wnioskowania M.

Reprezentacją modelu wnioskowania (3.11) nazwano tablicę decyzyjną DT^M o postaci:

$$DT^M = \left\{ R_1^M, R_2^M, \ldots, R_m^M \right\}. \tag{3.12}$$

Z każdym zbiorem $S_i \in S_D/A_\Phi$, $i = 1,2,\ldots,m$, można związać predykat $T_i(\underline{s})$ zdefiniowany następująco:

$$\bigvee_{\underline{s} \in S_D} T_i(\underline{s}) = \begin{cases} \text{TRUE}, & \text{jeżeli } \underline{s} \in S_i; \\ \text{FALSE}, & \text{jeżeli } \underline{s} \notin S_i. \end{cases}$$

Z każdym sterowaniem charakterystycznym $\underline{u}_i \in U_{ch}$, $i = 1,2,\ldots,m$, można związać operację podstawienia $O_i(\underline{u}_i)$, która jest równoważna wykonaniu ciągu podstawień $u_1 := u_1^i$, $u_2 := u_2^i, \ldots, u_k = u_k^i$,

gdzie: $u_j^i \in U_j$, $j = 1,2,\ldots,k$, $i = 1,2,\ldots,m$.

Program decyzyjny DP^M o postaci:

$$\begin{array}{l} \text{IF } T_1(\underline{s}) \text{ THEN } O_1(\underline{u}_1) \text{ ELSE} \\ \text{IF } T_2(\underline{s}) \text{ THEN } O_2(\underline{u}_2) \text{ ELSE} \\ \quad\vdots \qquad\qquad\quad \vdots \\ \text{IF } T_i(\underline{s}) \text{ THEN } O_i(\underline{u}_i) \text{ ELSE} \\ \quad\vdots \qquad\qquad\quad \vdots \\ \text{IF } T_m(\underline{s}) \text{ THEN } O_m(\underline{u}_m) \text{ ELSE STOP} \end{array} \tag{3.13}$$

nazwano komputerową implementacją modelu wnioskowania operatora.

3.3. Aspekty identyfikacji

Omówiono zagadnienie identyfikacji modelu wnioskowania operatora przy sterowaniu złożonymi obiektami technologicznymi.

Szczególną uwagę zwrócono na możliwość zebrania odpowiednich i reprezentatywnych danych do identyfikacji.

Zaproponowano uporządkowany sposób zapisu tych danych.

3.3.1. Przesłanki realizowalności identyfikacji

Pełna charakteryzacja sposobu sterowania przez operatora wymaga zgodnie z (3.11) określenia:

a) przestrzeni obserwacji;
b) przestrzeni sterowania;
c) podziału przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu;
d) podziału przestrzeni sterowania na sterowania charakterystyczne;

e) realizowanego sposobu przyporządkowania stanom charakterystycznym odpowiadających im sterowań charakterystycznych.

Określenie przestrzeni obserwacji nie jest zagadnieniem prostym, gdyż obok zmiennych mierzalnych wyznaczają ją zmienne obserwowalne, których liczba oraz sposób nadawania im wartości mogą być różne dla różnych operatorów. Okazuje się także, że różna może być waga przypisywana przez operatorów zmiennym mierzalnym. Wynika to przede wszystkim z ich "zaufania" do wykorzystywanych metod pomiarowych, dokładności zastosowanych czujników i przetworników, reprezentatywności i powtarzalności pomiarów. W przypadku zmiennych mierzalnych okazuje się często, że operatora nie interesuje chwilowa wartość jakiejś zmiennej, ale przedział, w jakim się ona znajduje.

W ten sposób, przy odpowiednio dobranym sposobie wartościowania przez doświadczonego operatora, zmienne mierzalne nabierają cech zmiennych obserwowalnych. To z kolei prowadzi do jakościowego, a nie ilościowego opisu sytuacji w sterowanym obiekcie, co może być dużym utrudnieniem przy implementacji w komputerze modelu wnioskowania operatora.

Określenie przestrzeni sterowania jest dużo prostsze i najczęściej wynika z narzuconych technologicznie możliwości sterowania obiektem. Dąży się przy tym do minimalizacji ingerencji człowieka w przebiegające w nim procesy technologiczne. Stąd przestrzeń sterowania jest taka sama dla wszystkich operatorów. Indywidualne różnice mogą dotyczyć wyodrębnienia w niej sterowań charakterystycznych i realizowanej strategii sterowania. Różnice te można jednak opisać i jednoznacznie zinterpretować.

Podział przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu jest podstawowym zagadnieniem przy identyfikacji modelu wnioskowania operatora.

W przypadku gdy podział ten wynika ze zbioru warunków (3.6), zdefiniowanych w przestrzeni celów sterowania, stany charakterystyczne obiektu są poprawnie określone a rola operatora sprowadza się do nabycia umiejętności odpowiedniej klasyfikacji sytuacji w przestrzeni obserwacji.

Przypadki takie występują jednak rzadko ze względu na trudności w formalizacji i reprezentacji, w przestrzeni celów sterowania, celu sterowania obiektem. Stąd podział przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu dokonywany jest bezpośrednio przez operatora w oparciu o jego doświadczenie.

Należy się przy tym liczyć ze znacznym zróżnicowaniem przez poszczególnych operatorów indywidualnych ocen sytuacji w sterowanym obiekcie. Przyczyny tego zróżnicowania mogą być różne; mogą zależeć od doświadczenia, ale także od specyficznych dla każdego operatora zdolności analizowania, kojarzenia i zapamiętywania objawów charakteryzujących określone sytuacje w sterowanym obiekcie.

Dlatego takich podziałów przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu może być tyle, ilu jest operatorów sterujących tym obiektem. Stąd wybór lub określenie jednego takiego podziału nie jest zagadnieniem

prostym i wymaga analizy porównawczej wyników sterowania uzyskanych przez wszystkich operatorów.

Mając wybrany bądź określony podział przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu oraz przestrzeni sterowania na sterowania charakterystyczne, można przystąpić do identyfikacji modelu wnioskowania operatora polegającej na znalezieniu właściwego dla niego sposobu przyporządkowania poszczególnym stanom charakterystycznym sterowań charakterystycznych.

Wymaga to odpowiedniej reprezentacji danych do identyfikacji.

3.3.2. Zapis danych do identyfikacji

Zachowanie się operatora przy sterowaniu złożonym obiektem może być opisane za pomocą protokołu sterowania o strukturze przedstawionej na rys. 16.

Chwile czasowe	Wartości współrzędnych przestrzeni obserwacji					Wartości współrzędnych przestrzeni sterowania				
	p_1	...	p_i	...	p_n	u_1	...	u_j	...	u_k
T_1	v_1^1	...	v_i^1	...	v_n^1	d_1^1	...	d_j^1	...	d_k^1
T_2	v_1^2	...	v_i^2	...	v_n^2	d_1^2	...	d_j^2	...	d_k^2
.	.		.		.	.		.		.
.	.		.		.	.		.		.
.	.		.		.	.		.		.
T_l	v_1^l	...	v_i^l	...	v_n^l	d_1^l	...	d_j^l	...	d_k^l
.	.		.		.	.		.		.
.	.		.		.	.		.		.
.	.		.		.	.		.		.
T_N	v_1^N	...	v_i^N	...	v_n^N	d_1^N	...	d_j^N	...	d_k^N

Rys. 16. Struktura protokołu sterowania

Fig. 16. Control protocol structure

Protokół sterowania jest zapisem, w ustalonym horyzoncie czasowym wyznaczonym chwilami czasowymi $T_1,\ldots,T_N$, realizowanego przez operatora odwzorowania zbioru sytuacji $\underline{s} \in S_D$ na zbiór sterowań charakterystycznych U_{ch}.

Jego wypełnienie stanowi punkt wyjścia do analizy własności tego odwzorowania, a tym samym identyfikacji modelu wnioskowania operatora przy sterowaniu złożonym obiektem.

3.4. Problemy do rozwiązania

Sformułowano zbiór problemów, których rozwiązanie może doprowadzić do efektywnej implementacji w komputerze modelu wnioskowania operatora.

Wyodrębniono problemy związane z przygotowaniem danych do identyfikacji, realizacją identyfikacji i implementacją w komputerze.

3.4.1. Przygotowanie danych

Przygotowanie danych do identyfikacji modelu wnioskowania operatora obejmuje:

a) wyselekcjonowanie zbioru zmiennych mierzalnych i zmiennych obserwowalnych jako współrzędnych przestrzeni obserwacji;
b) określenie dla każdej z tych współrzędnych skończonego zbioru wartości, które może przyjmować;
c) ustalenie sposobu opisu sytuacji w sterowanym obiekcie za pomocą konfiguracji zbiorów wartości zmiennych mierzalnych i zmiennych obserwowalnych;
d) wyselekcjonowanie zbioru zmiennych mierzalnych i sterowalnych jako współrzędnych przestrzeni sterowania;
e) określenie dla każdej z tych współrzędnych skończonego zbioru wartości, które może przyjmować;
f) ustalenie sposobu opisu i określenie zbioru sterowań charakterystycznych;
g) wypełnienie, przez lub przy udziale operatora, przykładowego protokołu sterowania w ustalonym horyzoncie czasowym obejmującym jego sterowanie obiektem.

Szczególnego znaczenia nabiera efektywne rozwiązanie problemu selekcji zbioru zmiennych mierzalnych i zmiennych obserwowalnych jako współrzędnych przestrzeni obserwacji.

Wynika to z ich roli, jaką odgrywają przy opisie i klasyfikacji sytuacji w przestrzeni obserwacji.

W kontekście implementacji komputerowej istotnego znaczenia nabiera także znalezienie sposobu określenia zależności między zbiorami obserwowanych wartości współrzędnych przestrzeni obserwacji. Znalezienie takiego sposobu może, z jednej strony, uprościć strukturę przestrzeni obserwacji, a więc tym samym reprezentację danych za pomocą protokołu sterowania z rys. 16.

Z drugiej strony przez analizę zależności między obserwowanymi wartościami zmiennych mierzalnych i zmiennych obserwowalnych można i należy zmierzać do eliminacji z opisu sytuacji w sterowanym obiekcie wartości zmiennych obserwowalnych.

3.4.2. Realizacja identyfikacji

Podstawowe zadanie identyfikacji to opisanie zbioru stanów charakterystycznych obiektu za pomocą konfiguracji wartości przyjmowanych przez odpowiednio wyselekcjonowane współrzędne przestrzenie obserwacji, a także realizowanego przez operatora przyporządkowania stanom charakterystycznym sterowań charakterystycznych.

Sformułowanie tego zadania zależy od sposobu określenia zbioru stanów charakterystycznych.

Jak wspomniano podział przestrzeni obserwacji na stany charakterystyczne obiektu może wynikać ze zbioru warunków (3.6) lub może być określony przez operatora.

Operator może określić podział przestrzeni obserwacji bezpośrednio - wskazując zbiór stanów charakterystycznych obiektu lub pośrednio - wypełniając protokół sterowania jak na rys. 16.

W przypadku gdy stany charakterystyczne obiektu wynikają ze zbioru warunków (3.6) lub są wskazane przez operatora, można sformułować następujące zadanie do rozwiązania:

Jest dany podział przestrzeni obserwacji na zbiór $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \ldots, S_r\}$ stanów charakterystycznych obiektu:

a) znaleźć opis tych stanów za pomocą konfiguracji wartości współrzędnych przestrzeni obserwacji;
b) sprawdzić, czy stany charakterystyczne obiektu są poprawnie określone;
c) w zbiorze możliwych opisów znaleźć opis minimalny za pomocą konfiguracji wartości współrzędnych przestrzeni obserwacji.

W przypadku gdy stany charakterystyczne obiektu są określone niejawnie, poprzez protokół sterowania zawierający zapis, realizowanego przez operatora, odwzorowania $\Phi : S_D \rightarrow U_{ch}$, można sformułować następujące zadanie do rozwiązania:

Jest dany, wypełniony w ustalonym horyzoncie czasowym, protokół sterowania (PS):

a) określić dla wszystkich, występujących w tym protokole, sterowań charakterystycznych $\underline{u} \in PS \subseteq U_{ch}$, zbiory $S_{\underline{u}} = \{\underline{s} \in SP \subseteq S_D : \Phi(\underline{s}) = \underline{u}\}$;
b) sprawdzić, czy zbiory te stanowią pokrycie czy rozbicie zbioru wszystkich sytuacji $\underline{s} \in SP \subseteq S_D$;
c) w przypadku rozbicia znaleźć opis minimalny zbiorów $S_{\underline{u}}$ za pomocą konfiguracji wartości współrzędnych przestrzeni obserwacji;
d) w przypadku pokrycia wskazać sytuacje niejednoznaczne.

UWAGA: Identyfikacja modelu wnioskowania operatora na drodze rozwiązania drugiego z tych zadań może być niepełna w przypadku, gdy protokół sterowania nie obejmuje wszystkich sytuacji $\underline{s} \in S_D$ i odpowiadających im sterowań charakterystycznych $\underline{u} \in U_{ch}$.

Można wtedy mówić o δ-identyfikacji modelu wnioskowania operatora, gdzie:

$$\delta = \frac{\operatorname{card}\left(\bigcup_{u \in PS} S_u\right)}{\operatorname{card}(S_D)} \qquad (3.14)$$

zaś card(•) oznacza liczność zbioru.

Z (3.14) wynika, że $0 < \delta < 1$. Przypadek $\delta = 1$ oznacza pełną identyfikację modelu wnioskowania operatora.

3.4.3. Implementacja modelu

Naturalnym sposobem zapisu modelu wnioskowania operatora jest tablica decyzyjna (3.12). Zgodnie z przyjętą interpretacją struktury tablicy decyzyjnej [POLL 75] zawiera ona zapis zbioru warunków, jakie muszą być spełnione, aby mógł być wygenerowany odpowiadający im ciąg czynności. Na podstawie tablicy decyzyjnej można utworzyć, równoważny jej, program decyzyjny o strukturze (3.13).

Stąd problem implementacji w komputerze modelu wnioskowania operatora można zastąpić problemem realizacji odpowiedniego programu decyzyjnego.

Istnieje wiele sposobów realizacji w komputerze programów decyzyjnych [HUMB 73, ZSAK 78, MRÓZ 79, MORE 82] uwzględniających istniejące ograniczenia, np. pamięć operacyjna, czas przetwarzania reguł decyzyjnych i dających efektywny kod wynikowy lub możliwość bezpośredniej realizacji hardware'owej.

Istotnym problemem jest natomiast wykorzystanie zaimplementowanego modelu wnioskowania operatora do komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonym obiektem.

Zawiera on efektywne rozwiązanie takich zagadnień, jak:

a) synteza obiektowego systemu operacyjnego;
b) dobór cyklu sterowania obiektem przez komputer;

3.5. Podsumowanie

Przedstawiono propozycję formalizacji sposobu sterowania przez operatora złożonym obiektem.

Szczególną uwagę starano się przy tym zwrócić na określenie przesłanek stojących u podstaw takiej formalizacji. Stąd przedstawione rozważania oparte są przede wszystkim na obserwacjach własnych i doświadczeniu nabytym przez Autora przy realizacji różnych systemów komputerowego sterowania bądź wspomagania operatorów przy sterowaniu złożonymi obiektami technologicznymi.

W przypadku takich obiektów można zauważyć, że istotny wzrost efektywności i niezawodności pracy systemu komputerowego sterowania możliwy jest na drodze integracji jego funkcji użytkowych z zadaniami rozwiązywanymi przez człowieka-operatora. Integracja taka wymaga jednak opracowania odpo-

wiedniego zapisu zadań rozwiązywanych w procesie sterowania obiektem przez operatora wraz z charakterystycznym dla niego sposobem ich rozwiązania. Zapis taki mógłby być następnie podstawą formalizacji i implementacji w komputerze odpowiednich algorytmów. Jego realizacja wymaga jednak wykorzystania odpowiednich narzędzi formalnych. W następnym rozdziale pokazano, że mogą nimi być elementy teorii zbiorów przybliżonych.

R o z d z i a ł IV

ELEMENTY TEORII ZBIORÓW PRZYBLIŻONYCH W ANALIZIE MODELI WNIOSKOWANIA

W tym rozdziale pracy przedstawiono elementy teorii zbiorów przybliżonych [PAWL 82, 83, 85, 86] wykorzystywane do rozwiązania sformułowanych problemów.

Przytoczono istotne z punktu widzenia zastosowań pojęcia podstawowe. Szczególną uwagę zwrócono przy tym na pojęcie przestrzeni aproksymacji i jej konstrukcję przy wykorzystaniu pojęcia systemu informacyjnego [PAWL 81].

Przedstawiono także przykłady aproksymacji konkretnych zbiorów i rodzin zbiorów.

Omówiono zagadnienie zależności pomiędzy atrybutami systemu informacyjnego, ze szczególnym uwzględnieniem różnych możliwości ich redukcji.

Za istotne uznano pojęcie tablicy decyzyjnej jako pewnego sposobu interpretacji systemu informacyjnego [PAWL 85, 86].

Szczególną uwagę zwrócono przy tym na reprezentację w komputerze tablicy decyzyjnej i jej dekompozycję, co ma istotne znaczenie praktyczne. Przytoczono przykład redukcji tablicy decyzyjnej.

Wykorzystując wprowadzone pojęcia, przedstawiono ujęcie klasyfikacji sytuacji w sterowanym obiekcie jako analizy danych reprezentowanych za pomocą zapisu odpowiedniego systemu informacyjnego.

Zaproponowano także pewne modyfikacje niektórych pojęć dla celów analizy rzeczywistych danych.

Przedstawiono analizę protokołu sterowania przez operatora złożonym obiektem poprzez wykorzystanie równoważnej mu tablicy decyzyjnej.

Wykorzystano także prace [MRÓZ 84, 85a, 86] dla ilustracji omawianych pojęć.

4.1. Zbiory przybliżone - pojęcia podstawowe

W tym paragrafie przedstawiono istotne z punktu widzenia zastosowań pojęcia teorii zbiorów przybliżonych.

Za podstawowe uznano pojęcie przestrzeni aproksymacji oraz zagadnienie aproksymacji zbiorów i rodziny zbiorów w takiej przestrzeni.

Wykorzystując pojęcie systemu informatycznego, pokazano, jak taka przestrzeń może być skonstruowana oraz przytoczono przykłady aproksymacji konkretnych zbiorów i rodzin zbiorów.

Wprowadzono pojęcie zapisu systemu informacyjnego ze względu na jego znaczenie dla reprezentacji danych.

4.1.1. Przestrzeń aproksymacji

Pojęcie przestrzeni aproksymacji odgrywa w teorii zbiorów przybliżonych podstawowe znaczenie. Konstrukcja takiej przestrzeni jest konieczna do rozpatrywania zadań aproksymacji dowolnych zbiorów w tej przestrzeni za pomocą specjalnych zbiorów wyznaczających jej współrzędne.

Opiera się na wyróżnieniu skończonego zbioru U zwanego uniwersum i określeniu na tym zbiorze relacji binarnej R zwanej relacją nierozróżnialności.

OKREŚLENIE 4.1. Przestrzeń aproksymacji to uporządkowana para $A = \langle U,R \rangle$, w której U jest skończonym zbiorem elementów zwanym uniwersum, $R \subseteq U \times U$ jest relacją nierozróżnialności.

Oczywiście, dowolny element $x \in U$ jest nierozróżnialny sam ze sobą. Podobnie jeżeli x jest nierozróżnialny z y, to y jest nierozróżnialny z x.

Wynika stąd zwrotność i symetryczność relacji nierozróżnialności R, co można zapisać w postaci:

a) $\forall_{x \in U}, \quad R(x,x);$ (4.1)

b) $\forall_{x,y \in U}, \quad R(x,y)$ implikuje $R(y,x)$.

Każda relacja binarna spełniająca (4.1) nosi nazwę relacji tolerancji [ZEEM 62].

Interesujące własności relacji tolerancji, jako matematycznego odpowiednika pojęcia podobieństwa, przedstawione są w [SZRE 75].

Przyjmiemy dodatkowo, że relacja nierozróżnialności jest przechodnia, co można zapisać w postaci:

c) $\forall_{x,y,z \in U}, \quad R(x,y)$ i $R(y,z)$ implikuje $R(x,z)$. (4.2)

Każda relacja binarna, spełniająca warunki (4.1) i (4.2), nosi nazwę relacji równoważności i dzieli zbiór, nad którym jest określona, na rodzinę podzbiorów zwanych klasami równoważności (abstracji) tej relacji.

Dla relacji nierozróżnialności $R \subseteq U \times U$ rodzinę tę oznacza się przez R^*.

OKREŚLENIE 4.2. Klasy równoważności relacji nierozróżnialności R nazywa się R-elementarnymi zbiorami w A lub blokami rodziny R^*. Gdy R jest ustalona, mówi się o zbiorach elementarnych (atomach) w A.

R-elementarny zbiór zawierający element $x \in U$ oznacza się przez $[x]_R$.

OKREŚLENIE 4.3. Elementy $x,y \in U$ nazywa się R-nierozróżnialnymi, jeżeli $R(x,y)$.

OKRESLENIE 4.4. Zbiorem R-rozróżnialnym, symbolicznie, DIS(R), nazywa się skończoną sumę zbiorów R-elementarnych.

OKRESLENIE 4.5. Zbiorem R-nierozróżnialnym (przybliżonym) nazywa się, w przestrzeni aproksymacji $A = \langle U,R \rangle$, każdy zbiór, który nie jest R-rozróżnialny.

Przyjmuje się, że zbiór pusty ϕ jest zbiorem R-rozróżnialnym w przestrzeni aproksymacji $A = \langle U,R \rangle$.

Wniosek 4.1. Uniwersum U jest zbiorem R-rozróżnialnym dla każdej relacji nierozróżnialności $R \subseteq U \times U$.

OKREŚLENIE 4.6. Przestrzeń aproksymacji $A = \langle U,R \rangle$ nazywa się dyskretną przestrzenią aproksymacji, jeżeli wszystkie zbiory R-elementarne są jednoelementowe.

Wniosek 4.2. W dyskretnej przestrzeni aproksymacji każdy podzbiór uniwersum jest R-rozróżnialny.

4.1.2. Aproksymacja zbiorów

Wyznaczenie w przestrzeni aproksymacji zbiorów R-elementarnych pozwala sformułować i rozwiązać problem aproksymacji zadanych podzbiorów uniwersum U.

Niech będzie dana przestrzeń aproksymacji $A = \langle U,R \rangle$ i dowolny podzbiór $X \subseteq U$.

OKREŚLENIE 4.7. R-dolną aproksymacją X, symbolicznie $\underline{R}X$, nazywa się zbiór zdefiniowany w następujący sposób:

$$\underline{R}X = \left\{ x \in U : [x]_R \subseteq X \right\} . \tag{4.3}$$

OKREŚLENIE 4.7. R-górną aproksymacją X, symbolicznie $\overline{R}X$, nazywa się zbiór zdefiniowany w następujący sposób.

$$\overline{R}X = \left\{ x \in U : [x]_R \cap X \neq \phi \right\} \tag{4.4}$$

Prawdziwa jest

W ł a s n o ś ć 4.1. Dla dowolnego $X \subseteq U$

a) X jest R-rozróżnialny, gdy $\underline{R}X = \overline{R}X$;
b) X jest przybliżony, gdy $\underline{R}X \neq \overline{R}X$.

Dowód tego stwierdzenia jest elementarny i opiera się na określeniach 4.4, 4.7, 4.8.

Wniosek 4.3. Z określeń 4.7 i 4.8 oraz własności (4.1) wynika, że:

a) $\underline{R}X$ jest maksymalnym (w sensie zawierania się zbiorów) zbiorem R-rozróżnialnym zawartym w X;
b) $\overline{R}X$ jest minimalnym (w sensie zawierania się zbiorów) zbiorem R-rozróżnialnym zawierającym X.

W celu pełniejszej charakteryzacji problemu aproksymacji zadanych podzbiorów U wprowadza się następujący podział zbiorów R-rozróżnialnych.

OKREŚLENIE 4.9. Niech $X \subseteq U$

a) zbiór

$$Bn_R(X) = \overline{R}X \setminus \underline{R}X$$

nazywa się R-brzegiem zbioru X;

b) zbiór

$$Pos_R(X) = \underline{R}X;$$

nazywa się obszarem pozytywnym zbioru X;

c) zbiór

$$Neg_R(X) = U \setminus \overline{R}X;$$

nazywa się obszarem negatywnym zbioru X.

OKREŚLENIE 4.10. Liczbę

$$\alpha_R(X) = \frac{\text{card } \underline{R}X}{\text{card } \overline{R}X} \tag{4.5}$$

nazywa się R-dokładnością aproksymacji X, zaś liczbę

$$\rho_R(X) = 1 - \alpha_R(X) \tag{4.6}$$

nazywa się R-przybliżonością aproksymacji X.

Wniosek 4.4. Liczby te spełniają warunek:

$$0 \leq \alpha_R(X), \quad \rho_R(X) < 1$$

przy czym $\alpha_R(X) = 1 (\rho_R(X) = 0)$, gdy X jest R-rozróżnialny.

4.1.3. Aproksymacja rodziny zbiorów

Problem aproksymacji zbiorów w przestrzeni aproksymacji można uogólnić na problem aproksymacji zadanej rodziny zbiorów.

Niech $F = \left\{ X_1, X_2, \ldots, X_n \right\}$ będzie rodziną zbiorów U, zaś $A = \langle U,R \rangle$ przestrzenią aproksymacji.

OKREŚLENIE 4.11. R-dolną aproksymacją rodziny F nazywa się zbiór zdefiniowany w następujący sposób:

$$\underline{R}F = \left\{\underline{R}X_1, \underline{R}X_2, \ldots, \underline{R}X_n\right\}.$$

OKREŚLENIE 4.12. R-górną aproksymacją rodziny F nazywa się zbiór zdefiniowany w następujący sposób:

$$\overline{R}F = \left\{\overline{R}X_1, \overline{R}X_2, \ldots, \overline{R}X_n\right\}.$$

OKREŚLENIE 4.13. Dla rodziny F

a) zbiór

$$Pos_R(F) = \bigcup_{X_i \in F} \underline{R}X_i;$$

nazywa się obszarem pozytywnym rodziny F;

b) zbiór

$$Neg_R(F) = U \setminus \bigcup_{X_i \in F} \overline{R}X_i;$$

nazywa się obszarem negatywnym rodziny F;

c) zbiór

$$Bn_R(F) = \bigcup_{X_i \in F} Bn_R(X_i)$$

nazywa się R-brzegiem rodziny F.

OKREŚLENIE 4.14. Liczbę

$$\gamma_R(F) = \frac{\text{card } Pos_R(F)}{\text{card } U} \tag{4.7}$$

nazywa się jakością aproksymacji F przez R, zaś liczbę

$$\beta_R(F) = \frac{\text{card } Pos_R(F)}{\sum_{X_i \in F} \text{card } \overline{R}X_i} \tag{4.8}$$

nazywa się dokładnością aproksymacji F przez R.

Wniosek 4.5. Liczby te spełniają warunek:

$$0 < \beta_R(F) < \gamma_R(F) < 1.$$

4.1.4. Topologiczne własności aproksymacji

Każda przestrzeń aproksymacji $A = \langle U, R\rangle$ jednoznacznie definiuje przestrzeń topologiczną $T_A = \langle U, DIS(R)\rangle$, gdzie $DIS(R)$ jest rodziną wszystkich otwartych i domkniętych zbiorów w T_A (topologia dla U), zaś R^* jest bazą dla T_A [KURA 72].

R-dolna i R-górna aproksymacje X w A są operacjami wnętrza i domknięcia w przestrzeni topologicznej T_A i posiadają następujące własności:

1) $\underline{R}X \subseteq X \subseteq \overline{R}X$
2) $\underline{R}\emptyset = \overline{R}\emptyset = \emptyset$; $\underline{R}U = \overline{R}U = U$;
3) $\underline{R}(X \cup Y) \supseteq \underline{R}X \cup \underline{R}Y$;
4) $\overline{R}(X \cup Y) = \overline{R}X \cup \overline{R}Y$;
5) $\underline{R}(X \cap Y) = \underline{R}X \cap \underline{R}Y$;
6) $\overline{R}(X \cap Y) \subseteq \overline{R}X \cap \overline{R}Y$;
7) $\underline{R}(-X) = -\overline{R}X$;
8) $\overline{R}(-X) = -\underline{R}X$;
9) Jeżeli $X \subset Y$, to $\underline{R}X \subset \underline{R}Y$ oraz $\overline{R}X \subset \overline{R}Y$.

Ponadto w przestrzeni topologicznej T_A prawdziwe są także następujące własności:

10) $\underline{R}\overline{R}X = \overline{R}\underline{R}X = \underline{R}X$
11) $\overline{R}\underline{R}X = \underline{R}\overline{R}X = \overline{R}X$;

Dowód tych własności jest elementarny.

4.1.5. Klasyfikacja zbiorów przybliżonych

Ważna jest następująca topologiczna klasyfikacja zbiorów przybliżonych.

OKREŚLENIE 4.15. Niech $X \subseteq U$ będzie zbiorem R-przybliżonym. Będziemy mówili, że:

a) zbiór X jest w przybliżeniu R-rozróżnialny, jeżeli $\underline{R}X \neq \emptyset$ i $\overline{R}X \neq U$;
b) zbiór X jest wewnętrznie R-nierozróżnialny, jeżeli $\underline{R}X = \emptyset$ i $\overline{R}X \neq U$;
c) zbiór X jest zewnętrznie R-nierozróżnialny, jeżeli $\underline{R}X \neq \emptyset$ i $\overline{R}X = U$;
d) zbiór X jest całkowicie R-nierozróżnialny, jeżeli $\underline{R}X = \emptyset$ i $\overline{R}X = U$.

Intuicyjna interpretacja zaproponowanej klasyfikacji zbiorów przybliżonych jest następująca:

a) jeżeli zbiór X jest w przybliżeniu R-rozróżnialny, to dla niektórych elementów z U można rozstrzygnąć, czy należą do X czy do $-X$;
b) jeżeli zbiór X jest wewnętrznie R-nierozróżnialny, to można rozstrzygnąć, czy pewne elementy U należą do $-X$, natomiast nie można rozstrzygnąć, czy jakiś element U należy do X;

c) jeżeli zbiór X jest zewnętrznie R-nierozróżnialny, to można rozstrzygnąć, czy niektóre elementy U należą do X, natomiast nie można rozstrzygnąć dla dowolnego elementu z U jego przynależności do -X,

d) jeżeli zbiór X jest całkowicie R-nierozróżnialny, to nie można rozstrzygnąć o żadnym elemencie z U, czy należy on do X bądź do -X.

4.2. Systemy informacyjne

Praktyczne wykorzystanie wprowadzonych powyżej pojęć do rozwiązania problemów aproksymacji zbiorów i rodzin zbiorów wymaga ich konkretyzacji poprzez podanie sposobu opisu elementów zbioru U i konstruktywne zdefiniowanie relacji nierozróżnialności $R \subseteq U \times U$.

4.2.1. System informacyjny

W [PAWL 81] zaproponowano opis elementów ze zbioru U za pomocą skończonego ciągu wartości charakteryzujących je atrybutów wprowadzając pojęcie systemu informacyjnego.

OKREŚLENIE 4.16. System informacyjny to uporządkowana czwórka

$$S = \langle U, Q, V, f \rangle,$$

gdzie:

U - jest niepustym, skończonym zbiorem zwanym uniwersum;

Q - jest skończonym zbiorem atrybutów;

$V = \bigcup_{q \in Q} V_q$ gdzie V_q jest dziedziną atrybutu q;

$f : U \times Q \to V$ - jest funkcją informacji taką, że

$f(x,q) \in Vq$ dla każdego $q \in Q$ i $x \in U$.

Funkcję $f_x : Q \to V$ taką, że $f_x(q) = f(x,q)$ dla każdego $q \in Q$, nazywa się informacją o x w S.

Dla ustalonych zbiorów U, Q, V funkcja f_x może być zapisana w postaci ciągu wartości atrybutów $v_{i1}, v_{i2}, \ldots, v_{in}$ spełniających warunek $v_{ij} \in V_{qj}$.

Prowadzi to do zapisu systemu informacyjnego S w postaci przedstawionej na rys. 17.

Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym i niech $P \subseteq Q$.

Przez $\tilde{P}$ oznacza się relację binarną nad U zdefiniowaną w następujący sposób:

$\tilde{P}(x,y)$ wtedy i tylko wtedy, gdy $f_x(q) = f_y)q)$ dla każdego $q \in P$.

Łatwo sprawdzić, że $\tilde{P}$ jest relacją zwrotną, symetryczną i przechodnią, a więc relacją równoważności.

U	Wartości atrybutów ze zbioru Q					
	q_1	q_2	...	q_i	...	q_n
x_1	v_{11}	v_{12}	...	v_{1i}	...	v_{1n}
x_2	v_{21}	v_{22}	...	v_{2i}	...	v_{2n}
	. . .	. . .		. . .		. . .
x_1	v_{11}	v_{12}	...	v_{1i}	...	v_{1n}
	. . .	. . .		. . .		. . .
x_N	v_{N1}	v_{N2}	...	v_{Ni}	...	v_{Nn}

Rys. 17. Zapis systemu informacyjnego
Fig. 17. Information system notation

Dowolny podzbiór atrybutów systemu informacyjnego S generuje w nim relacje nierozróżnialności. Elementy U posiadające te same wartości atrybutów, z wyróżnionego zbioru P, są nierozróżnialne ze względu na wartości atrybutów z P.

Nietrudno zauważyć, że $\tilde{P} = \bigcap_{q \in P} \tilde{q}$ dla każdego $P \subseteq Q$.

W szczególnym przypadku $P = Q$ system informacyjny $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ jednoznacznie definiuje przestrzeń aproksymacji $A_S = \langle U, \tilde{S} \rangle$, gdzie $\tilde{S} = \tilde{Q}$ jest relacją nierozróżnialności generowaną przez S.

Jest więc, zgodnie z określeniami 4.7, 4.8 i 4.9, dla $P \subseteq Q$ i $X \subseteq U$;

$$\underline{P}X = \left\{ x \in U : [x]_{\tilde{P}} \subseteq X \right\};$$

$$\overline{P}X = \left\{ x \in U : [x]_{\tilde{P}} \cap X \neq \emptyset \right\};$$

$$Bn_P(X) = \overline{P}X \setminus \underline{P}X.$$

Zbiór $\underline{P}X$ jest zbiorem tych wszystkich elementów U, które mogą być na pewno sklasyfikowane jako elementy X przy wykorzystaniu zbioru atrybutów P.

Zbiór $\overline{P}X$ jest zbiorem tych elementów U, które być może mogą być sklasyfikowane jako elementy X przy wykorzystaniu zbioru atrybutów P.

Przykład 4.1

Niech będzie dany system informacyjny przedstawiony poniżej:

U	p	q	r
x_1	1	0	3
x_2	0	1	1
x_3	0	1	1
x_4	1	1	0
x_5	1	1	0
x_6	2	0	1
x_7	0	1	1
x_8	2	0	1
x_9	2	0	2
x_{10}	1	0	3

W systemie tym istnieją następujące zbiory elementarne.

$$E_1 = \{x_1, x_{10}\}; \quad E_2 = \{x_2, x_3, x_7\}; \quad E_3 = \{x_4, x_5\};$$

$$E_4 = \{x_6, x_8\}; \quad E_5 = \{x_9\};$$

Dla przykładu zbiory:

$$X_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_7, x_9, x_{10}\},$$

$$X_2 = \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\};$$

są Q-rozróżnialne w tym systemie, gdzie $Q = \{p,q,r\}$.
Jest bowiem

$$\underline{Q}X_1 = E_1 \cup E_2 \cup E_5 = \overline{Q}X_1, \quad \alpha_Q(X_1) = 1,$$

$$\underline{Q}X_2 = E_2 \cup E_3 \cup E_4 = \overline{Q}X_2, \quad \alpha_Q(X_2) = 1,$$

Zbiory

$$X_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_7, x_8\},$$

$$X_4 = \{x_1, x_3, x_9\}$$

są w przybliżeniu Q-rozróżnialne, gdyż:

$$\underline{Q}X_3 = E_2, \quad \overline{Q}X_3 = E_1 \cup E_2 \cup E_4, \quad \alpha_Q(X_3) = \frac{3}{7}, \quad \rho_Q(X_3) = \frac{4}{7},$$

$$\underline{Q}X_4 = E_5, \quad \overline{Q}X_4 = E_1 \cup E_2 \cup E_5, \quad \alpha_Q(X_4) = \frac{1}{3}, \quad \rho_Q(X_4) = \frac{2}{3}.$$

Dla przykładu zbiór $X_5 = \{x_1, x_2, x_5, x_8\}$ jest wewnętrznie Q-nierozróżnialny, gdyż $\underline{Q}X_5 = \emptyset$, $\overline{Q}X_5 = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_8 \neq U$.

Zbiór $X_6 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_9\}$ jest zewnętrznie Q-nierozróżnialny, gdyż $\underline{Q}X_6 = E_5$, $\overline{Q}X_5 = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5 = U$.

Dla rodziny $F = \{X_1, X_2, X_3\}$, gdzie $X_1 = \{x_1, x_2, x_{10}\}$, $X_2 = \{x_3, x_4, x_5\}$, $X_3 = \{x_6, x_7, x_8, x_9\}$ jest odpowiednio:

$$\underline{Q}F = \{\underline{Q}X_1, \underline{Q}X_2, \underline{Q}X_3\} = \{E_1, E_3, E_4 \cup E_5\};$$

$$\overline{Q}F = \{\overline{Q}X_1, \overline{Q}X_2, \overline{Q}X_3\} = \{E_1 \cup E_2, E_2 \cup E_3, E_2 \cup E_4 \cup E_5\};$$

$$\gamma_Q(F) = \frac{7}{10}, \quad \beta_Q(F) = \frac{7}{16}.$$

4.2.2. Zależność atrybutów

Pojęcie zależności między zbiorami atrybutów systemu informacyjnego ma podstawowe znaczenie dla zastosowań. Opiera się na wykorzystaniu własności relacji nierozróżnialności generowanej przez podzbiory atrybutów systemu informacyjnego.

Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym, a $P, B \subseteq Q$.

OKREŚLENIE 4.17. Zbiór atrybutów B zależy od zbioru atrybutów P w S, symbolicznie $P \longrightarrow B$, jeżeli $\widetilde{P} \subseteq \widetilde{B}$.

Oznaczając przez B* rodzinę wszystkich klas abstrakcji relacji B, na drodze prostych rachunków, można udowodnić:

W ł a s n o ś ć 4.2. Poniższe warunki są równoważne:

a) $\widetilde{P} \subseteq \widetilde{B}$;
b) $\widetilde{P \cup B} = \widetilde{P}$;
c) $Pos_P(B^*) = U$.

Przykład 4.2

Niech będzie dany zapis systemu informacyjnego przedstawiony poniżej.

U	q_1	q_2	q_3	q_4
x_1	0	0	0	0
x_2	0	1	0	2
x_3	1	1	0	1
x_4	1	1	0	1
x_5	0	1	1	2

Łatwo sprawdzić, że $q_4 \rightarrow q_2$ i $q_4 \rightarrow q_1$, ponieważ $\tilde{q}_4 \subset \tilde{q}_2$ i $\tilde{q}_4 \subset \tilde{q}_1$.

W ł a s n o ś ć 4.3

1) Jeżeli $P \rightarrow B$ i $P' \subset P$, to $P' \rightarrow B$.
2) Jeżeli $P \rightarrow B$ i $B' \supset B$, to $P \rightarrow B$.

W ł a s n o ś ć 4.4

1) $P \rightarrow B$ i $B \rightarrow R$ implikuje $P \rightarrow R$;
2) $P \rightarrow R$ i $B \rightarrow R$ implikuje $P \cup B \rightarrow R$;
3) $P \rightarrow R \cup B$ implikuje $P \rightarrow R$ i $P \rightarrow B$;
4) $P \rightarrow B$ i $B \cup R \rightarrow T$ implikuje $P \cup R \rightarrow T$;
5) $P \rightarrow B$ i $R \rightarrow T$ implikuje $P \cup R \rightarrow B \cup T$.

Pojęcia te mogą być uogólnione w sposób przedstawiony poniżej.

Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym i $P, B \subseteq Q$.

OKREŚLENIE 4.18. Zbiór atrybutów B <u>zależy w stopniu k</u> $(0 \leq k \leq 1)$ od zbioru atrybutów P w S, symbolicznie $P \xrightarrow{k} B$, jeżeli $k = \gamma_P(V^*)$.

Jeżeli przy tym:

1) $k = 1$ powiemy, że B <u>całkowicie</u> zależy od P;
2) $0 < k < 1$ powiemy, że B <u>częściowo</u> zależy od P;
3) $k = 0$ powiemy, że B <u>nie zależy</u> od P.

Wykorzystane są także interesujące własności częściowej zależności atrybutów.

W ł a s n o ś ć 4.5

1) Jeżeli $R \xrightarrow{k} P$ i $B \xrightarrow{l} P$, to $R \cup B \xrightarrow{m} P$, gdzie $m \geq \max(k,l)$;
2) Jeżeli $R \cup P \xrightarrow{k} B$, to $R \xrightarrow{l} B$ i $P \xrightarrow{m} B$, gdzie $l,m \leq k$;
3) Jeżeli $R \xrightarrow{k} B$ i $R \xrightarrow{l} P$, to $R \xrightarrow{m} B \cup P$, gdzie $m \leq \min(k,l)$;
4) Jeżeli $R \xrightarrow{k} B \cup P$, to $R \xrightarrow{l} B$ i $R \xrightarrow{m} P$, gdzie $l,m \geq k$;
5) Jeżeli $R \xrightarrow{k} P$ i $P \xrightarrow{l} B$, to $R \xrightarrow{m} B$, gdzie $m \geq l$.

4.2.3. <u>Redukcja atrybutów</u>

Istnienie zależności między atrybutami systemu informacyjnego S może być wykorzystane do ich redukcji.

Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym i $P \subsetneq Q$.

OKREŚLENIE 4.19. Podzbiór atrybutów P jest <u>niezależny</u> w S, jeżeli dla każdego $B \subset P$, $\tilde{P} \neq \tilde{B}$; w przeciwnym przypadku P jest <u>zależny</u> w S.

OKREŚLENIE 4.20. Podzbiór $P \subseteq B \subseteq Q$ jest <u>reduktem</u> B w S, jeżeli P jest maksymalnym (w sensie zawierania się zbiorów) niezależnym podzbiorem B.

<u>Wniosek 4.5</u>. Jeżeli R jest reduktem P, to $\tilde{R} = \tilde{P}$.

<u>Przykład 4.3</u>

Dla systemu informacyjnego, którego zapis przedstawiono w przykładzie 4.2, istnieją dwa redukty zbioru atrybutów $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$ odpowiednio $P = \{q_1, q_2, q_3\}$ i $B = \{q_3, q_4\}$. Łatwo sprawdzić, że $\tilde{P} = \tilde{Q}$ i $\tilde{B} = \tilde{Q}$.

<u>Wniosek 4.6</u>. System informacyjny S może mieć więcej niż jeden redukt.

Oczywiste są następujące własności:

W ł a s n o ś ć 4.6. Jeżeli P jest reduktem B, to $P \rightarrow B$.

W ł a s n o ś ć 4.7. Jeżeli P jest zależny, to istnieje podzbiór $B \subset P$ $(B \neq \emptyset)$ taki, że B jest reduktem P. Atrybuty $p,q \in Q$ są niezależne w S, jeżeli nie zachodzi $p \rightarrow q$ ani $q \rightarrow p$.

W ł a s n o ś ć 4.8. Jeżeli $P \subseteq Q$ jest niezależnym podzbiorem atrybutów, to wszystkie atrybuty są parami niezależne.

W ł a s n o ś ć 4.9. Jeżeli $P \subseteq Q$ jest niezależnym podzbiorem atrybutów, to każdy podzbiór właściwy $B \subset P$ jest niezależny.

W ł a s n o ś ć 4.10. Jeżeli $P \xrightarrow{k} B$ i R jest reduktem P, to $R \xrightarrow{k} B$.

Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym i $P,B \subseteq Q$.

OKREŚLENIE 4.21. Podzbiór atrybutów P jest <u>niezależny ze względu</u> na podzbiór atrybutów B, jeżeli dla każdego $R \subset P$ $Pos_P(B^*) \neq Pos_R(B^*)$; w przeciwnym przypadku P jest zależny ze względu na B.

OKREŚLENIE 4.22. Zbiór $R \subseteq P$ nazywa się <u>reduktem względnym</u> P ze względu na B lub po prostu <u>B-reduktem</u> P, jeżeli R jest maksymalnym, niezależnym podzbiorem P ze względu na B.

<u>Wniosek 4.7</u>. Jeżeli P = B, to redukt względny P ze względu na B pokrywa się z reduktem P. Jeżeli R jest reduktem względnym P ze względu na B, to

$$Pos_R(B^*) = Pos_P(B^*).$$

Prawdziwe są następujące własności.

W ł a s n o ś ć 4.11. Jeżeli $P \xrightarrow{k} B$ i R jest reduktem względnym P ze względu na B, to $R \xrightarrow{k} B$.

W ł a s n o ś ć 4.12. Jeżeli P i B są reduktem i odpowiednio reduktem ze względu na R, to $\overline{P} \supseteq \overline{B}$.

Badanie zależności między atrybutami prowadzi do określenia pewnego podzbioru atrybutów, które muszą pozostać w systemie informacyjnym. Wyselekcjonowanie takiego podzbioru atrybutów ma istotne znaczenie praktyczne.

Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym $P \subseteq Q$, $p \in P$.

OKREŚLENIE 4.23. Atrybut $p \in P$ jest zbędny w P, jeżeli $\overbrace{P \setminus \{p\}} = \overline{P}$; w przeciwnym przypadku atrybut p jest nieusuwalny z P.

OKREŚLENIE 4.24. Zbiór wszystkich, nieusuwalnych atrybutów z P nazywa się rdzeniem P, w zapisie

$$CORE(P) = \left\{ p \in P : \overbrace{P \setminus \{p\}} \neq \overline{P} \right\}.$$

Wniosek 4.8. Atrybut $p \in P$ jest zbędny w P, jeżeli $P \setminus \{p\} \longrightarrow p$.

Poniższe własności wyjaśniają wzajemne relacje pomiędzy rdzeniem i reduktem atrybutów.

W ł a s n o ś ć 4.13. Niech RED(P) oznacza rodzinę wszystkich reduktów P. Zachodzi

$$CORE(P) = \bigcap_{B \in RED(P)} B .$$

Przykład 4.4

Dla przykładu 4.3 jest odpowiednio:

$$RED(Q) = \{P,B\}, \quad \text{gdzie } P = \{q_1, q_2, q_3\}, \quad B = \{q_3, q_4\};$$

$$CORE(Q) = P \cap B = \{q_3\}.$$

OKREŚLENIE 4.25. Podzbiory atrybutów $P,B \subseteq Q$ są równoważne, w zapisie $P \approx B$, jeżeli $\overline{P} = \overline{B}$.

Łatwo udowodnić

W ł a s n o ś ć 4.14. Niech $R_1, R_2, \ldots, R_n$, $n \geq 2$, będą reduktami zbioru atrybutów P. Dla każdego i,j $(2 \leq i,j \leq n)$

$$R_i \setminus CORE(P) \approx R_j \setminus CORE(P).$$

Można także wprowadzić pojęcie względnego rdzenia zbioru atrybutów. Niech $S = \langle U,Q,V,f \rangle$ będzie systemem informacyjnym i $P,B \subseteq Q$.

OKREŚLENIE 4.25. Atrybut $p \in P$ jest zbędny w P ze względu na B (B-zbędny), jeżeli

$$Pos_P(B^*) = Pos_{P \setminus \{p\}}(B^*)$$

W przeciwnym przypadku atrybut p jest nieusuwalny z P ze względu na B (B-nieusuwalny).

OKREŚLENIE 4.26. Względnym rdzeniem P ze względu na B (B-rdzeń P) jest zbiór wszystkich B-nieusuwalnych atrybutów z P określony w następujący sposób:

$$CORE_B(P) = \left\{ p \in P : Pos_P(B^*) \neq Pos_{P \setminus \{p\}}(B^*) \right\}.$$

Dla względnego rdzenia atrybutów prawdziwa jest

W ł a s n o ś ć 4.15

$$CORE_B(P) = \bigcap_{R \in RED_B(P)} R .$$

Wniosek 4.9. W przypadku gdy P = B, rdzeń i rdzeń względny pokrywają się.

4.3. Tablice decyzyjne

Jak już wspomniano, tablica decyzyjna jest uporządkowanym sposobem zapisu zbioru warunków, jakie muszą być spełnione, aby mógł być zrealizowany odpowiadający im zbiór czynności [POLL 75].

Nietrudno zauważyć, na podstawie określenia 4.16 i zapisu systemu informacyjnego (rys. 17), że to samo można wyrazić poprzez odpowiednią modyfikację pojęcia systemu informacyjnego.

4.3.1. Definicja formalna

Przyjmuje się, że zbiór atrybutów Q może być rozbity na dwa rozłączne podzbiory zwane odpowiednio atrybutami warunkowymi W i atrybutami decyzyjnymi D.

Jest więc $W \cup D = Q$ oraz $W \cap D = \emptyset$.

OKREŚLENIE 4.27. Tablicą decyzyjną nazywa się uporządkowaną piątkę

$$DT = \langle U,W,D,V,f \rangle,$$

gdzie:

U - jest skończonym zbiorem zwanym uniwersum;

W - jest skończonym zbiorem atrybutów warunkowych;

D - jest skończonym zbiorem atrybutów decyzyjnych;

$V = \bigcup_{a \in W \cup D} Va$, Va - jest dziedziną atrybutu a;

$f : U \times (W \cup D) \rightarrow V$ jest funkcją decyzyjną taką, że $f(x,a) \in Va$ dla każdego $a \in W \cup D$ i $x \in U$.

OKREŚLENIE 4.28. Funkcję $g : W \cup D \rightarrow V$ nazywa się regułą decyzyjną w DT, jeżeli istnieje $x \in U$ taki, że $g = f_x$.

Obcięcie g do W, w zapisie g/W i obcięcie g do D, w zapisie g/D, nazywa się odpowiednio: warunkami i decyzjami reguły decyzyjnej g.

OKREŚLENIE 4.29. Reguła decyzyjna g jest deterministyczna w DT, jeżeli dla każdego $x,y \in U$, $x \neq y$, z $f_x(W = f_y)W$ wynika $f_x(D = f_y)D$; w przeciwnym przypadku f jest niedeterministyczna.

OKREŚLENIE 4.30. Tablica decyzyjna DT jest dobrze określona, jeżeli wszystkie reguły decyzyjne w niej zawarte są deterministyczne; w przeciwnym przypadku DT jest źle określona.

Zapis tablicy decyzyjnej przedstawiono na rys. 18.

U	Wartości atrybutów warunkowych					Wartości atrybutów decyzyjnych				
	w_1		w_i		w_n	d_1		d_j		d_k
1	v_{11}		v_{i1}		v_{n1}	u_{1n}		u_{j1}		u_{k1}
l	v_{1l}		v_{il}		v_{nl}	u_{1l}		u_{jl}		u_{kl}
N	v_{1N}		v_{iN}		v_{nN}	u_{1N}		u_{jN}		u_{kN}

Rys. 18. Zapis tablicy decyzyjnej

Fig. 18. Decision table notation

Przykład 4.5

W tablicy decyzyjnej, której zapis przedstawiono poniżej, jest odpowiednio:

U	a	b	c	d	e
1	1	0	2	2	0
2	0	1	1	1	2
3	2	0	0	1	1
4	1	0	0	2	2
5	1	0	2	0	1
6	2	2	0	1	1
7	2	1	1	1	2
8	0	1	1	0	1

$W = \{a,b,c\}$, $D = \{d,e\}$.

Reguła decyzyjna 1 jest niedeterministyczna, zaś reguła decyzyjna 3 jest deterministyczna, a więc tablica decyzyjna jest źle określona.

Związek między zależnością występujących w DT atrybutów a rodzajem jej określoności przedstawia

W ł a s n o ś ć 4.16. Tablica decyzyjna $DT = \langle U,W,D,V,f \rangle$ jest dobrze określona wtedy i tylko wtedy, gdy $W \longrightarrow D$.

4.3.2. Dekompozycja tablic decyzyjnych

W przypadku gdy tablica decyzyjna jest źle określona, istotnego znaczenia nabiera wydzielenie wszystkich reguł decyzyjnych niedeterministycznych. Ujmuje to:

W ł a s n o ś ć 4.17. Każdą tablicę decyzyjną $DT = \langle U,W,D,V,f \rangle$ można jednoznacznie rozłożyć na dwie tablice decyzyjne: $DT_1 = \langle U_1,W,D,V_1,f_1 \rangle$ i $DT_2 = \langle U_2,W,D,V_2,f_2 \rangle$ takie, że $W \xrightarrow{1} D$ w DT_1 i $W \xrightarrow{0} D$ w DT_2, gdzie $U_1 = Pos_W(D^*)$, f_1 jest obcięciem f do U_1, $U_2 = \bigcup_{X \in D^*} Bn_W(X)$, f_2 jest obcięciem f do U_2, a V_1, V_2 są przeciwdziedzinami funkcji f_1 i f_2.

Przykład 4.6

Tablica decyzyjna z przykładu 4.5 może być zdekomponowana na tablicę decyzyjną

U_1	a	b	c	d	e
3	2	0	0	1	1
4	1	1	0	2	2
6	2	2	0	1	1
7	2	1	1	1	2

dla której $W \xrightarrow{1} D$ i na tablicę decyzyjną

U_2	a	b	c	d	e
1	1	0	2	2	0
2	0	1	1	1	2
5	1	0	2	0	1
8	0	1	1	0	1

dla której $W \xrightarrow{0} D$.

Wprowadzone powyżej pojęcie względnego reduktu może być także wykorzystane do upraszczania zapisu tablicy decyzyjnej.

Ilustruje to

Przykład 4.7

Dana jest tablica decyzyjna, której zapis przedstawiono poniżej.

U	a	b	c	d	e	f
1	3	2	2	2	2	4
2	3	2	2	1	2	4
3	2	2	2	1	1	4
4	2	2	2	2	1	4
5	3	2	2	3	2	3
6	3	3	2	3	2	3
7	4	3	2	3	2	3
8	4	3	3	3	2	2
9	4	4	3	3	2	2
10	4	4	3	2	2	2

11	4	3	3	2	2	2
12	4	2	3	2	2	2
13	3	3	2	2	2	4

W tablicy tej zbiór atrybutów warunkowych $W = \{a,b,c,d\}$ jest niezależny.

Łatwo sprawdzić, że zbiór W jest zależny ze względu na zbiór atrybutów decyzyjnych $D = \{e,f\}$.

D-reduktem zbioru atrybutów warunkowych jest zbiór $W' = \{a,c,d\}$, co oznacza, że atrybut b jest zbędny przy podejmowaniu decyzji scharakteryzowanych zbiorem atrybutów decyzyjnych.

Odpowiednio zredukowana tablica decyzyjna przedstawiona jest poniżej.

U	a	c	d	e	f
1	3	2	2	2	4
2	3	2	1	2	4
3	2	2	1	1	4
4	2	2	2	1	4
6	3	2	3	2	3
7	4	2	3	2	3
8	4	3	3	2	2
11	4	3	2	2	2

Analizując wartości atrybutów decyzyjnych można zauważyć, że występują cztery różne konfiguracje ich wartości.

Konfiguracje tych wartości można zakodować za pomocą nowych atrybutów q_1, q_2, q_3, q_4, otrzymując zmodyfikowaną tablicę decyzyjną przedstawioną poniżej.

U	a	c	d	q_1	q_2	q_3	q_4
1	3	2	2	1	0	0	0
2	3	2	1	1	0	0	0
3	2	2	1	0	1	0	0
4	2	2	2	0	1	0	0
6	3	2	3	0	0	1	0

7	4	2	3	0	0	1	0
8	4	3	3	0	0	0	1
11	4	3	2	0	0	0	1

Interpretacja tak zmodyfikowanej tablicy decyzyjnej jest oczywista. Dla przykładu, jeżeli atrybut q_1 przyjmuje wartość 1, to oznacza to, że należy podjąć decyzję, dla której atrybut decyzyjny e przyjmuje wartość 2, zaś atrybut decyzyjny f przyjmuje wartość 4.

Obliczając redukty atrybutów warunkowych W' ze względu na atrybuty q_1, q_2, q_3, q_4 otrzymuje się odpowiednio: $\{a,d\}$, $\{a\}$, $\{c,d\}$ i $\{c\}$. To oznacza, że dla podjęcia decyzji, opisanej przez atrybut q_i, wystarczy znać wartości wszystkich atrybutów należących do q_i - reduktu atrybutów warunkowych W' dla $i = 1,\ldots,4$.

W rezultacie wyjściowa tablica decyzyjna jest równoważna tablicy decyzyjnej przedstawionej poniżej:

U	a	c	d	e	f
1	3	x	1	2	4
2	3	x	2	2	4
4	2	x	x	1	4
7	x	2	3	2	3
10	x	3	x	2	2

w której znak "x" denotuje wartości atrybutów nieistotnych z punktu widzenia podejmowanych decyzji.

4.4. Zapis sformułowanych problemów

Wykorzystując wprowadzone uprzednio elementy teorii zbiorów przybliżonych, przedstawiono zapis sformułowanych problemów.

Szczególną uwagę zwrócono na analizę możliwości bezpośredniego użycia odpowiednich pojęć i własności zbiorów przybliżonych i systemów informacyjnych do reprezentacji danych i zapisu sposobu rozwiązania dla postawionych problemów.

W przypadku gdy bezpośrednie wykorzystanie odpowiednich pojęć nie było możliwe, zaproponowano potrzebne ich modyfikacje.

4.4.1. Klasyfikacja sytuacji w sterowanym obiekcie

Bieżąca sytuacja w przestrzeni obserwacji jest określana przez konfigurację wartości odpowiednich współrzędnych. Utożsamiając współrzędne $p_1,p_2,\ldots,p_n$ przestrzeni obserwacji ze zbiorem $W = \{w_1,w_2,\ldots,w_n\}$ atrybutów warunkowych i ustalając dla każdego atrybutu warunkowego $w_i \in W$ jego dziedzinę V_{w_i}, określony przez operatora zbiór sytuacji w sterowanym obiekcie można przedstawić w postaci systemu informacyjnego, którego zapis pokazany jest na rys. 19.

U	Wartość atrybutów warunkowych					Kod stanów charakterystycznych
	w_1	...	w_i	...	w_n	
1	v_{11}	...	v_{i1}	...	v_{n1}	S_1
2	v_{12}	...	v_{i2}	...	v_{n2}	S_K
. . .	. . .		. . .		. . .	. . .
l	v_{1l}	...	v_{il}	...	v_{nl}	S_m
. . .	. . .		. . .		. . .	. . .
N	v_{1N}	...	v_{iN}	...	v_{nN}	S_2

Rys. 19. Zapis danych do klasyfikacji sytuacji
Fig. 19. Data notation for situation classification

Na rys. 19 zbiór $U = \{1,2,\ldots,N\}$ jest ustalonym horyzontem czasowym obserwacji odpowiadającym poszczególnym chwilom czasowym, w których operator określał konfigurację wartości atrybutów warunkowych i klasyfikował bieżącą sytuację w obiekcie do jednego z wyróżnionych stanów charakterystycznych $S_1,S_2,\ldots,S_m$.

Wykorzystanie tak przygotowanego zestawu danych do analizy i oceny, dokonywanej przez operatora, klasyfikacji bieżącej sytuacji w obiekcie wymaga określenia sposobu zadania na zbiorze U relacji nierozróżnialności R.

W systemie informacyjnym, którego zapis przedstawiony jest na rys. 17, relacja nierozróżnialności została zadana przez warunek równości wartości odpowiednich atrybutów.

W praktyce jest to możliwe w przypadku, gdy atrybuty warunkowe przyjmują wartości kodowane, np. za pomocą liczb całkowitych lub są wyrażane w języku naturalnym, np. dla atrybutu kolor w postaci: biały, czarny, czerwony... .

Najczęściej zbiór atrybutów warunkowych można podzielić na dwa rozłączne podzbiory atrybutów obserwowalnych Obs i atrybutów mierzalnych Mes. Jest więc $W = Obs \cup Mes$ i $Obs \cap Mes = \emptyset$.

Zadanie relacji nierozróżnialności, poprzez warunek równości wartości atrybutów mierzalnych, nie jest racjonalne i najczęściej prowadzi do dyskretnej przestrzeni aproksymacji.

Mając na uwadze fakt, że każdy pomiar dokonywany jest z określoną dokładnością (np. klasa przyrządu pomiarowego), można dla atrybutów ze zbioru Mes określić relację ε-nierozróżnialności.

Niech $Mes = \{w_{i+1}, w_{i+2}, \ldots, w_n\}$, $i > 0$.
Dla dowolnego atrybutu $w_j \in Mes$ relację nierozróżnialności $\widetilde{w}_j$ można dla dowolnych wierszy 1,k, tablicy z rys. 19 określić jako żądanie spełnienia warunku:

$$\left| f_l(w_j) - f_k(w_j) \right| < \varepsilon_j .$$

Relacja nierozróżnialności $\widetilde{Mes}$ na całym zbiorze Mes, przy ustaleniu zbioru wartości $\varepsilon_{i+1}, \varepsilon_{i+2}, \ldots, \varepsilon_n$, będzie wtedy określona w postaci $\widetilde{Mes} = \bigcap_{w_j \in Mes} \widetilde{w}_j$.

Tak określona relacja $\widetilde{Mes}$ nie musi być oczywiście relacją równoważności (jest tylko relacją tolerancji), ale przez odpowiedni dobór wartości $\varepsilon_{i+1}, \varepsilon_{i+2}, \ldots, \varepsilon_n$ można to osiągnąć.

Niech $S^* = \{S_1, S_2, \ldots, S_m\}$ będzie podziałem zbioru U na rozłączne podzbiory sytuacji zaklasyfikowane przez operatora do odpowiednich stanów charakterystycznych.

Praktyczne znaczenie ma możliwość określenia wpływu poszczególnych atrybutów ze zbioru W na zbiory sytuacji zaklasyfikowane do poszczególnych stanów charakterystycznych ze zbioru S^*.

Można to uzyskać na drodze wprowadzenia pojęcia rozstrzygalności zbiorów przez atrybuty.

Niech $S_i \in S^*$. Mówi się, że:

1) zbiór $S_i^+(w_j) = \underline{WS}_i \setminus \underline{W \setminus \{w_j\}}\, S_i$ jest pozytywnie rozstrzygalny przez atrybut $w_j \in W$;

2) zbiór $S_i^-(w_j) = \overbrace{W \setminus \{w_j\}}\, S_i \setminus \overline{WS}_i$ jest negatywnie rozstrzygalny przez atrybut $w_j \in W$.

Pojęcia te można uogólnić na dowolne podzbiory zbioru W. Można także wprowadzić dwie miary związane z tymi pojęciami:

1) dla zbiorów pozytywnie rozstrzygalnych przez atrybut $w_j \in W$

$$m_i^+ = 1 - \frac{\operatorname{card}\left[\underline{W \setminus \{w_j\}}\, S_i\right]}{\operatorname{card}(\underline{WS}_i)}$$

2) dla zbiorów negatywnie rozstrzygalnych przez atrybut $w_j \in W$

$$M_i^- = \frac{\operatorname{card}(\overbrace{W \setminus \{w_j\}}\, S_i) - \operatorname{card}(\overline{WS}_i)}{\operatorname{card}(U) - \operatorname{card}(\overline{WS}_i)}$$

Nietrudno zauważyć, że miary te mają następujące własności:

1) $0 \leqslant m_i^+ \leqslant 1$;

$m_i^+ = 0$, gdy usunięcie atrybutu w_j nie zmienia $\underline{WS}_i$;

$m_i^+ = 1$, gdy S_i, po usunięciu atrybutu w_j, jest wewnętrznie W-nierozróżnialny.

2) $0 \leqslant M_i \leqslant 1$;

$M_i^- = 0$, gdy usunięcie atrybutu w_j nie zmienia $\overline{WS}_i$;

$M_i^- = 1$ gdy S_i, po usunięciu atrybutu w_j, jest zewnętrznie W-nierozróżnialny.

Opierając się na danych zapisanych w postaci jak na rys. 19, można:

a) zbadać własność przestrzeni obserwacji na drodze analizy zależności między atrybutami ze zbioru W;
b) określić $\gamma_w(S^*)$ i $\beta_w(S^*)$;
c) znaleźć redukty W ze względu na klasyfikację daną przez operatora;
d) określić algorytm klasyfikacji sytuacji.

4.4.2. Analiza protokołu sterowania

Sterowanie w przestrzeni sterowania określone jest konfiguracją wartości odpowiednich współrzędnych. Gdy utożsamia się współrzędne $u_1, u_2, \ldots, u_k$ ze zbiorem $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_k\}$ atrybutów decyzyjnych i ustali dla każdego atrybutu decyzyjnego $d_i \in D$ jego dziedzinę V_{d_i}, przedstawiony na rys. 16 protokół sterowania jest równoważny zdefiniowanej uprzednio tablicy decyzyjnej $DT = \langle U, W, D, V, f \rangle$.

Zbiór $U = \{1, 2, \ldots, N\}$ jest ustalonym horyzontem czasowym obserwacji odpowiadającym poszczególnym chwilom czasowym, w których operator określał konfigurację wartości atrybutów warunkowych i przyporządkowywał im odpowiednią konfigurację wartości atrybutów decyzyjnych.

Na podstawie tych danych, zapisanych w odpowiedniej tablicy decyzyjnej DT, można:

a) zbadać zależność $W \longrightarrow D$;
b) określić $\gamma_w(D^*)$ i $\beta_w(D^*)$;
c) znaleźć redukty W ze względu na D;
d) znaleźć zredukowaną tablicę decyzyjną równoważną wyjściowej tablicy decyzyjnej DT;
e) określić algorytm sterowania.

4.5. Podsumowanie

Przedstawiono wybrane elementy teorii zbiorów przybliżonych w kontekście ich wykorzystania do zapisu danych i sformułowania podstawowych etapów rozwiązania dla postawionych problemów.

Wykorzystanie teorii zbiorów przybliżonych do identyfikacji analizy i oceny modeli wnioskowania operatorów ma charakter pionierski, a uzyskane przy tym wyniki [MRÓZ 84, 85, 86, 87] stymulowały także rozwój tej teorii [PAWL 85, 86].

Istotnym zagadnieniem jest analiza danych reprezentowanych za pomocą odpowiednich zapisów systemu informacyjnego lub tablicy decyzyjnej.

Ponieważ dane te zawierają wyniki bezpośredniej obserwacji, o charakterze jakościowym, jak i wyniki pomiarów, o charakterze ilościowym, podstawowego znaczenia nabiera problem określenia relacji nierozróżnialności będącej podstawą analizy tych danych.

W przypadku gdy system informacyjny zawiera wyniki pomiarów i jest możliwy dobór odpowiednich wartości ε, można skorzystać z pojęcia ε-nierozróżnialności. Gdy tak nie jest, można zaproponować dwuetapowe postępowanie.

W etapie pierwszym dokonywana jest logiczna analiza zarejestrowanych danych, w wyniku której ustalane są rozłączne podzbiory wartości zarejestrowanych pomiarów. Etap drugi to właściwa analiza danych zawartych w zapisie odpowiedniego systemu informacyjnego lub tablicy decyzyjnej.

U podstaw tej analizy stoi przyjęty sposób komputerowej realizacji niezbędnych obliczeń.

Zagadnienie to zostanie omówione w następnym rozdziale pracy.

R o z d z i a ł V

ASPEKTY OBLICZENIOWE

W tym rozdziale pracy przedstawiono wybrane zagadnienia komputerowej realizacji obliczeń.

Omówiono reprezentację, w pamięci komputera, danych zapisanych w odpowiednim systemie informacyjnym lub w tablicy decyzyjnej.

Przedstawiono sposoby generowania zbiorów elementarnych zależne od wybranej reprezentacji danych.

Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienie znajdowania dolnych i górnych aproksymacji zbiorów lub próbek klasyfikacji.

Opisano sposoby obliczania wartości liczbowych odpowiednich wskaźników charakteryzujących aproksymacją zbiorów lub zależność między analizowanymi zbiorami atrybutów.

Przytoczono odpowiednie algorytmy zapisane w języku Pascal [WIRT 80, IGLE 78].

5.1. Reprezentacja uniwersum

Obiekty uniwersum systemu informacyjnego opisane są konfiguracjami wartości charakteryzujących je atrybutów. W matematyce reprezentację taką zwie się iloczynem kartezjańskim, oczywiście przy ustalonym porządku atrybutów. Wypływa to z faktu, że zbiór konfiguracji wartości atrybutów, tworzących tę reprezentację, może się składać ze wszystkich możliwych kombinacji wartości wziętych odpowiednio ze wszystkich dziedzin atrybutów. Teoretycznie liczba takich możliwych konfiguracji wartości atrybutów jest równa iloczynowi liczb elementów należących do dziedzin poszczególnych atrybutów.

W przetwarzaniu danych typy złożone, takie jak przedstawione wyżej konfiguracje wartości atrybutów, reprezentowane są za pomocą tzw. typów rekordowych.

Ogólnie, typ rekordowy T jest zdefiniowany w następujący sposób:

```
type T = record
           S1 : T1;
           S2 : T2;                    (5.1)
           ...  ...
           Sn : Tn;
         end
```

Moc typu rekordowego wyraża się w następujący sposób:

moc(T) = moc(T1). ... . moc(Tn).

Identyfikatory S1,...,Sn, wprowadzone w definicji (5.1), stanowią nazwy przydzielone poszczególnym składowym zmiennych tego typu. Stosuje się je w selektorach rekordowych odnoszących się do zmiennych rekordowych. Dla danej zmiennej x typu T jej i-ta składowa jest oznaczona przez $x.s_i$.

Aktualizację selektywną x prowadzi się przy użyciu tego samego oznacznika selektora stojącego po lewej stronie instrukcji przypisania: $x.S_i := X_i$, gdzie X_i jest wartością typu T_i, i = 1,2,...,n.

Przykład 5.1

Reprezentację danych o stanie pieca obrotowego można przedstawić za pomocą typu rekordowego STAN PIECA w sposób przedstawiony poniżej:

```
type STAN PIECA = record
                    KOLOR : T1;
                GRANULACJA : T2;
                TEMPERATURA: T3;
            KOLOR WNĘTRZA  : T4;
           end
```

gdzie występujące w jego opisie proste typy danych mają postać:

T_1 = (szkarłat, ciemny róż, jasny róż, zdecydowany jasny róż, biel różana);
T_2 = (miał, miał z bryłkami, wyraźna granulacja, bryły);
T_3 = (1380 ... 1480);
T_4 = (ciemne plamy blisko, ciemne plamy daleko, opary, opary rozrzedzone, opary zanikające).

W celu zapisania wszystkich zarejestrowanych danych o stanie pieca obrotowego można z rekordem STAN PIECA związać tablicę jednowymiarową UN w następujący sposób:

```
Var UN : array [1..N] of STAN PIECA;
```

Przytoczony poniżej krótki fragment programu ilustruje użycie zmiennych rekordowych. Jego zadaniem jest zliczenie liczby stanów pieca obrotowego, w których opisie wystąpił "szkarłat" i "miał".


```
var UN : array [1..N] of STAN PIECA;
    l : integer;
    l :=0;
    for i = 1 to N do
    If(a[i].KOLOR = szkarłat)and (a[i].GRANULACJA = miał)
    Then  l:= l+1;
```

W innym wariancie tego programu można skorzystać z konstrukcji zwanej instrukcją wiążącą with. Prostszy zapis powyższego fragmentu programu ma wtedy postać:

```
For i:= 1 to N do
with   a [i] do
If (KOLOR = szkarłat) and (GRANULACJA = miał)
Then l:= l+1;
```

Reprezentacja danych za pomocą typu rekordowego (5.1), elegancka z formalnego punktu widzenia, ma pewne ograniczenia istotne dla opisywanych zastosowań.

Należą do nich:

a) relatywnie długi czas przetwarzania rekordów na komputerach klasy IBM PC/XT/AT;
b) brak operacji porównywania rekordów (np. w języku Pascal), a więc konieczność programowej realizacji tej operacji, co w przypadku dużej liczby atrybutów może być uciążliwe;
c) ograniczenia wnoszone różnymi implementacjami języków wysokiego poziomu, a dotyczące np. liczby pól w rekordzie, wymiarów tych pól, typów danych dla pól itp.

Inna, interesująca i efektywna, możliwość reprezentacji danych w komputerze, np. przy użyciu języka Pascal, polega na wykorzystaniu typu łańcuchowego oraz procedur i funkcji łańcuchowych.

Typ łańcuchowy ma postać:

```
Type Lancuch = string [M];                    (5.2)
```

gdzie M jest długością łańcucha.

Z łańcuchem można związać tablicę jednowymiarową UN używając konstrukcji:

```
var UN : array [1..N] of Lancuch;
```

Usunięcie z łańcucha określonej liczby elementów składowych umożliwia procedura łańcuchowa DELETE (STR, K, N),

gdzie STR - nazwa zmiennej łańcuchowej, K - pozycja w łańcuchu, od której należy usunąć N znaków.

Przykład 5.2

W systemie informacyjnym zawarte są dane o osobach zawierające: nazwisko, imię, datę urodzenia, płeć, stan cywilny. Struktura przykładowego łańcucha reprezentującego te dane przedstawiona jest na rys. 20.

Nazwisko		Imię		Data urodzenia		P	SC
1		9		17		25	26
K	O W A L S K I	J	A N U S Z	1	3 0 3 1 9 4 8	M	Z

Rys. 20. Struktura przykładowego łańcucha
Fig. 20. Example of chain structure

Zapis tego łańcucha ma postać:

```
Type Lancuch = string [26];
```

Z łańcuchem tym można związać tablicę jednowymiarową UN używając konstrukcji:

```
var UN : array [1..N] of Lancuch;
```

Wykonanie operacji DELETE (UN[i], 17, 10) usuwa dane o dacie urodzenia, płci i stanie cywilnym osoby, której przypisany jest element UN[i].

Podstawowe zalety zmiennych typu łańcuchowego można scharakteryzować następująco:

a) oszczędność pamięci operacyjnej, np. tablica UN zajmuje N.(M+1) bajtów;
b) możliwość bezpośredniego porównywania zmiennych typu łańcuchowego, oczywiście gdy mają tę samą liczbę znaków;
c) istnienie standardowych procedur modyfikacji łańcuchów, co ma duże znaczenie dla opisywanych zastosowań.

Pewne ograniczenia, zależnie od typu komputera, nakładane są na długość łańcucha (maksymalną liczbę znaków, które może zawierać).

5.2. Generowanie zbiorów elementarnych

Przyjmuje się, że w pamięci operacyjnej komputera znajdują się obiekty uniwersum systemu informacyjnego zapamiętane w wybranym sposobie reprezentacji (zbiór rekordów, zbiór łańcuchów, tablica dwuwymiarowa). Każdy obiekt jest więc jednoznacznie scharakteryzowany numerem (kolejna liczba naturalna) i konfiguracją wartości opisujących go atrybutów.

Zbiory elementarne to podzbiory uniwersum utworzone przez numery tych wszystkich obiektów, które mają identyczne konfiguracje wartości opisujących je atrybutów.

Dla ich generowania wprowadza się:

a) tablicę roboczą DA identyczną z tablicą UN;
b) tablicę jednowymiarową MA dla zapamiętania kolejnych numerów obiektów uniwersum;
c) tablicę dwuwymiarową KA dla zapamiętania generowanych zbiorów elementarnych;
d) tablicę jednowymiarową KK dla zapamiętania liczby obiektów wchodzących w poszczególne zbiory elementarne.

W przypadku gdy obiekty systemu informacyjnego reprezentowane są w pamięci operacyjnej w postaci zbioru łańcuchów, poniższy fragment programu generuje wszystkie zbiory elementarne.

```
Label
      11;
Type
      Lancuch = string [M];
Var   UN,V
      DA : array [1..N] of Lancuch;
      KA : array [1..S,1..T] of integer;
      MA : array [1..N] of integer;
      KD : array [1..P] of integer;

      pp: Lancuch;
       d,
       h,
       k,
       l,
       i,
       j: integer;
      for i:=1 to N do DA [i]:= UN[i];
```

```
For i:=1  to N do MA[i]:=i;
  h:=N;
  j:=Φ;
11:k:=Φ;
  l:=Φ;
  j:=j+1;
  pp:=DA[1];
For i:=1  to h do
If  DA[i] = pp then
Begin
k:=k+1;
KA[j,k]:= MA[i]
End
Else
Begin
l:=l+1;
DA[l]:= DA[i];
MA[l]:= MA[i];
End;
KK[j]:= k;
h:= l;
If h > Φ then goto 11;
g:=j;
```

Zbiory elementarne zapamiętywane są w tablicy dwuwymiarowej KA, zaś ich liczba równa jest g.

Wykonując na tablicy DA procedurę standardową DELETE(.,.,.), można usuwać poszczególne atrybuty i badać zależność między nimi [BORY 86].

W przypadku gdy w pamięci operacyjnej komputera reprezentowana jest tablica decyzyjna, usuwając za pomocą procedury DELETE(.,.,.) atrybuty warunkowe można generować klasyfikację obiektów uniwersum ze względu na decyzje.

5.3. Szukanie dolnych i górnych aproksymacji

Przyjmuje się, że znalezione zbiory elementarne przechowywane są w tablicy dwuwymiarowej KA, zaś zbiory lub próbki klasyfikacji przechowywane są w tablicy dwuwymiarowej PR.

Biorąc dowolny zbiór, zapamiętany w tablicy PR, można szukać jego dolnej aproksymacji, sprawdzając, które zbiory elementarne zapamiętane w tablicy KA są w nim zawarte. Suma tych zbiorów to poszukiwana dolna aproksymacja.

W celu znalezienia górnej aproksymacji dowolnego zbioru zapamiętanego w tablicy PR wystarczy sprawdzić, które zbiory elementarne zapamiętane w

tablicy KA mają z nim niepuste przecięcie. Suma tych zbiorów to poszukiwana górna aproksymacja.

W przypadku poszukiwania dolnej aproksymacji zbiorów lub próbek klasyfikacji przechowywanych w tablicy dwuwymiarowej PR wprowadza się dodatkowo:

a) tablicę jednowymiarową KD zawierającą liczby obiektów wchodzących w poszczególne zbiory lub próbki klasyfikacji;
b) tablicę dwuwymiarową AP dla zapamiętania numerów zbiorów elementarnych tworzących poszukiwaną dolną aproksymacji;
c) tablicę dwuwymiarową PA dla zapamiętania liczności poszczególnych zbiorów elementarnych tworzących poszukiwaną dolną aproksymację;
d) tablicę jednowymiarową MIN dla zapamiętania liczby zbiorów elementarnych tworzących poszczególne dolne aproksymacje zbiorów zawartych w tablicy PR.

Przyjmując, że w tablicy PR znajduje się d zbiorów, fragment programu znajdującego ich dolne aproksymacje przedstawiony jest poniżej:

```
For j:= 1 to d do
Begin
     k:=Φ;
     For i:=1 to g do
Begin
     l:=Φ;
     For t:=1 to KK[i] do
Begin
     For a:=1 to KD[j] do
     If KA[i,t] = PR[j,a] then  l:=l+1
End;
     If l = KK[i] then
Begin
     k:=k+1;
     AP [j,k]:=i;
     PA [j,k]:=KK[i]
End
End;
     MIN[j]:=k
End;
```

W przypadku poszukiwania górnej aproksymacji zbiorów lub próbek klasyfikacji przechowywanych w tablicy dwuwymiarowej wprowadza się jeszcze:

a) tablicę dwuwymiarową HA dla zapamiętania numerów zbiorów elementarnych wchodzących w poszukiwaną górną aproksymację;
b) tablicę dwuwymiarową AH dla zapamiętania liczności poszczególnych zbiorów elementarnych wchodzących w poszukiwaną górną aproksymację;

c) tablicę jednowymiarową MAX dla zapamiętania liczby zbiorów elementarnych wchodzących w poszczególne górne aproksymacje zbiorów zawartych w tablicy PR.

Odpowiedni fragment programu znajdującego górne aproksymacje zbiorów zawartych w tablicy PR przedstawiony jest poniżej:

```
    j:=Ø;
12: j:=j+1;
    i:=Ø;
    k:=Ø;
13: i:=i+1;
    For a:=1  to KD[j] do
    For t:=1  to KK[i] do
    If  PR [j,a] = KA[i,t] then
    Begin
    k:= k+1;
    HA[j,k] :=i;
    AH[j,k] :=KK[i];
    goto 14;
    End;
    14 : If i < g then goto 13;
         MAX[j] :=k;
         If  j < d  then goto 12;
```

Tak znalezione dolne i górne aproksymacje zbiorów lub próbek klasyfikacji zawartych w tablicy PR mogą być wykorzystane do oceny ilościowej klasyfikacji przybliżonej.

5.4. Ocena ilościowa aproksymacji

Ocena ilościowa aproksymacji dotyczy:

a) obliczania dokładności aproksymacji dla poszczególnych zbiorów zawartych w tablicy PR;
b) obliczania jakości klasyfikacji i dokładności klasyfikacji danej tablicą PR.

W przypadku obliczania dokładności aproksymacji dla poszczególnych zbiorów zawartych w tablicy PR odpowiedni fragment programu ma postać:


```
For j:=1  to  d  do
Begin
     s:=Ø;
  For k:=1 to MIN[j]do
     s:= s+PA[j,k];
     t:=Ø;
  For k:=1  to MAX[j]  do
     t:= t+AH[j,k];
  alfa[j]:= s/t;
    ro[j]:= 1-alfa[j]
End;
```

Dla obliczania jakości klasyfikacji i dokładności klasyfikacji odpowiedni fragment programu ma postać:

```
s:=Ø;
For j:=1 to g do
For i:=1 to MIN[j] do
s:= s+PA[j,i];
t:=Ø;
For j:=1 to g do
For i:=1 to MAX[j] do
t:= t+AH[j,i];
gamma:= s/N;
beta := s/t;
```

5.5. Podsumowanie

Przedstawiono zasadnicze aspekty obliczeniowe związane z praktycznym wykorzystaniem formalizmu zbiorów przybliżonych. Uznano, że stanowią je następujące zagadnienia:

a) reprezentacja w komputerze systemu informacyjnego (tablicy decyzyjnej);
b) generowanie zbiorów elementarnych i próbek klasyfikacji;
c) poszukiwanie dolnej i górnej aproksymacji zbiorów;
d) ocena ilościowa aproksymacji.

W przypadku reprezentacji w komputerze systemu informacyjnego omówiono dwie potencjalne możliwości, a mianowicie: wykorzystanie typu rekordowego (5.1) lub typu łańcuchowego (5.2). Nie omawiano oczywistego przypadku reprezentacji w komputerze systemu informacyjnego w postaci tablicy dwuwymiarowej.

Generowanie zbiorów elementarnych omówiono na przykładzie reprezentacji systemu informacyjnego w postaci zbioru łańcuchów. Otrzymuje się wtedy najprostszy zapis odpowiedniego programu.

W przypadku innych reprezentacji systemu informacyjnego w pamięci komputera można skonstruować odpowiednią funkcję rekursywną sprawdzającą dla zadanej liczby atrybutów warunek identyczności ich wartości. Za pomocą odpowiednio skonstruowanej funkcji rekursywnej można także sprawdzać warunek równości wartości odpowiednich atrybutów.

Nie omawiano bliżej zagadnień analizy zależności atrybutów i poszukiwania reduktów systemu informacyjnego, gdyż ich rozwiązanie opiera się także na wykorzystaniu przedstawionych fragmentów programów obliczeniowych.

Przedstawiając fragmenty programów znajdujących dolne i górne aproksymacje, kierowano się przede wszystkim ich użytecznością i prostotą, nie analizując ich optymalnej postaci.

Nie zamieszczono listingów opracowanych i wykorzystywanych programów ze względu na ich roboczy, podręczny charakter.

Programy te były pisane w języku TURBO PASCAL dla mikrokomputera IBM PC/AT.

Ich wykorzystanie do identyfikacji, analizy i oceny modeli wnioskowania operatorów i syntezy odpowiednich algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi zostanie przedstawione w następnym rozdziale pracy.

R o z d z i a ł VI

PRZYKŁADY ROZWIĄZANIA PROBLEMÓW

W tym rozdziale powrócono do omówionych w rozdziale I złożonych obiektów technologicznych i przedstawiono wykorzystanie wprowadzonych formalizmów do identyfikacji, analizy i oceny modeli wnioskowania kierujących nimi operatorów.

Pokazano, jak modele takie mogą być przedmiotem implementacji w komputerze, a następnie podstawą sterowania w czasie rzeczywistym. Jako pierwsze omówiono sterowanie piecem obrotowym.

6.1. Modele wnioskowania palaczy a sterowanie komputerowe piecem obrotowym

Przedstawiono zagadnienie identyfikacji modeli wnioskowania palaczy ze szczególnym uwzględnieniem sposobów i warunków przygotowania odpowiednich danych.

Dla wybranego palacza przedstawiono identyfikację i analizę jego modelu wnioskowania w odniesieniu do oceny i klasyfikacji przez niego stanów charakterystycznych pieca obrotowego.

Omówiono wyniki analizy porównawczej modeli wnioskowania trzech wybranych palaczy w aspekcie interpretacji i wyjaśnienia wyraźnych różnic między nimi w sposobie sterowania piecem obrotowym.

Pokazano także, jak na drodze badania zależności między zbiorami atrybutów obserwowalnych i atrybutów mierzalnych można wyeliminować atrybuty obserwowalne i zapisać model wnioskowania na podstawie komputerowej analizy wartości atrybutów mierzalnych, co jest podstawą jego implementacji.

Omówiono syntetycznie zagadnienie komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym do wypalania klinkieru, opierając się na zaimplementowanym modelu wnioskowania, a także uzyskanych wynikach takiego sterowania.

6.1.1. Reprezentacja danych do identyfikacji

Sposób reprezentacji danych o zachowaniu się palaczy w procesie sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru zaproponowano na rys. 16 w postaci odpowiedniego protokołu sterowania.

Nietrudno zauważyć, że protokół ten jest równoważny zdefiniowanej uprzednio tablicy decyzyjnej.

Współrzędne przestrzeni obserwacji można utożsamiać z atrybutami warunkowymi, zaś współrzędne przestrzeni sterowania można utożsamiać z atrybutami decyzyjnymi.

Szczególnym przypadkiem atrybutu decyzyjnego może być występujący na rys. 19 kod stanów charakterystycznych, a więc zapis ten jest także równoważny odpowiedniej tablicy decyzyjnej.

Palacz, oceniając bieżącą sytuację w piecu obrotowym, określa wartości atrybutów warunkowych i na tej podstawie może ją zaklasyfikować na jednego z wyróżnionych stanów charakterystycznych, a także odpowiednio dobrać wartości atrybutów decyzyjnych.

Obserwując zachowanie się palacza w procesie sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru, można wypełnić odpowiedni protokół sterowania, a następnie przystąpić do jego analizy.

Wymaga to określenia dziedzin dla poszczególnych atrybutów warunkowych i decyzyjnych oraz sposobu kodowania rozróżnianych stanów charakterystycznych.

W rozpatrywanym przypadku pieca obrotowego zbiór atrybutów warunkowych można podzielić na zbiór atrybutów obserwowalnych Obs i zbiór atrybutów mierzalnych Mes.

Poszczególne atrybuty obserwowalne ze zbioru Obs to:

c_1 - temperatura w strefie spiekania;
c_2 - kolor materiału w strefie spiekania;
c_3 - granulacja materiału w strefie spiekania;
c_4 - kolor wnętrza pieca.

Atrybuty te wykorzystywane będą w przypadku identyfikacji i analizy modeli wnioskowania palaczy w odniesieniu do oceny i klasyfikacji przez nich stanów charakterystycznych pieca obrotowego.

Rozpatrywany dalej zbiór atrybutów mierzalnych Mes zawiera następujące agrybuty:

c_1 - temperatura w strefie spiekania;
c_5 - pochodna temperatury w strefie spiekania.

Nietrudno zauważyć, że atrybut c_1 występuje w zbiorze atrybutów obserwowalnych i w zbiorze atrybutów mierzalnych. Wynika to z opisanego w rozdziale 1 faktu, że palacze obserwują wskazania miernika temperatury w strefie spiekania określając przedział temperatury.

Ustalono następujące dziedziny dla poszczególnych atrybutów warunkowych:

$V_{c_1} = \{1,2,3,4\}$, gdzie cyfry 1,2,3,4 oznaczają przedziały temperatur, jak to podano niżej:
1 - 1380-1420 [°C];
2 - 1420-1440 [°C];

3 - 1440-1480 [°C];
4 - 1480-1500 [°C];

$V_{c_2} = \{1,2,3,4,5\}$, gdzie cyfry 1,2,3,4,5 oznaczają odpowiednio:
1 - skarłat;
2 - ciemny róż;
3 - jasny róż;
4 - zdecydowany róż;
5 - biel różana;

$V_{c_3} = \{1,2,3,4\}$, gdzie cyfry 1,2,3,4 oznaczają odpowiednio:
1 - miał;
2 - miał z bryłkami;
3 - wyraźna granulacja;
4 - bryły;

$V_{c_4} = \{1,2,3\}$, gdzie cyfry 1,2,3 oznaczają odpowiednio:
1 - wyraźne ciemne pasma;
2 - niewyraźne ciemne pasma;
3 - brak ciemnych pasm;

$V_{c_5} = \{1,2,3,4\}$, gdzie cyfry 1,2,3,4 oznaczają odpowiednio:
1 - temperatura rośnie wolno;
2 - temperatura rośnie szybko;
3 - temperatura maleje szybko;
4 - temperatura maleje wolno;

Ścisła zależność między wartością atrybutu c_5 a pochodną temperatury $\frac{dTsp}{dt}$ w strefie spiekania przedstawiona jest w tabeli 5.

Tabela 5

Kodowanie pochodnej temperatury w strefie spiekania

$\text{arctg}\,\frac{dTsp}{dt}$	$0 - \frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}$	$\frac{3}{2}\pi - \frac{7}{4}\pi$	$\frac{7}{4}\pi - 2\pi$
V_{c_5}	1	2	3	4

Zbiór atrybutów decyzyjnych $D = \{d_1, d_2\}$, gdzie:

d_1 = obroty pieca;
d_2 = obroty II ślimaka nadawy węgla.

Wynikające z realiów technicznych dziedziny atrybutów decyzyjnych to:

$V_{d_1} = \{1,2\}$, gdzie cyfry 1,2 oznaczają obroty pieca:

1 - 0,9 [obr/min];

2 - 1,22 [obr/min];

$V_{d_2} = \{1,2,3,4\}$, gdzie cyfry 1,2,3,4 oznaczają obroty II ślimaka nadawy węgla:

1 - 0 [obr/min];

2 - 15 [obr/min];

3 - 20 [obr/min];

4 - 40 [obr/min].

Dla poszczególnych rozróżnianych przez palaczy stanów charakterystycznych pieca obrotowego do wypalania klinkieru przyjęto następujące oznaczenia:

1 - oznacza stan charakterystyczny "piec bardzo słaby";

2 - oznacza stan charakterystyczny "piec słaby";

3 - oznacza stan charakterystyczny "piec słabnący lub wyostrzający się";

4 - oznacza stan charakterystyczny "piec ostry";

5 - oznacza stan charakterystyczny "piec przeostrzony".

Przy tych założeniach można, obserwując sterowanie operatora piecem obrotowym, przy każdej ocenie i klasyfikacji przez niego sytuacji notować jej opis otrzymując odpowiednie protokoły sterowania.

6.1.2. Ocena i klasyfikacja sytuacji

W tym paragrafie rozpatrzono dla przykładu ocenę i klasyfikację przez jednego z palaczy sytuacji w piecu obrotowym. Odpowiedni protokół oceny sytuacji i ich klasyfikacji do wyróżnionych stanów charakterystycznych, zarejestrowany w ciągu jednej zmiany roboczej, przedstawiony jest poniżej.

Kolejne numery sytuacji	Wartości atrybutów obserwowalnych				Numer stanu charakterystycznego
	c_1	c_2	c_3	c_4	
1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1
4	2	2	1	1	2
5	2	2	1	1	2
6	1	2	1	1	2
7	2	2	1	1	2
8	2	2	2	1	3
9	1	2	2	1	3

1	2	3	4	5	6
10	2	2	2	1	3
11	2	2	2	1	3
12	3	2	2	1	3
13	3	2	2	2	3
14	2	2	2	2	3
15	2	2	2	2	3
16	1	2	2	1	3
17	2	2	2	1	3
18	2	2	2	1	3
19	3	2	2	1	3
20	3	3	2	1	4
21	3	3	2	1	4
22	4	3	3	1	4
23	4	3	3	1	4
24	3	3	3	1	4
25	2	3	3	1	4
26	2	3	3	1	4
27	2	3	3	1	4
28	3	4	3	1	4
29	4	4	3	1	4
30	4	4	3	1	4
31	4	4	4	1	5
32	4	4	4	1	5
33	4	5	4	1	5
34	3	4	4	1	5
35	3	4	4	1	5
36	3	4	4	1	5
37	3	4	4	1	5
38	3	4	3	1	4
39	3	3	3	1	4
40	3	3	3	1	4
41	2	3	3	1	4
42	2	3	3	1	4
43	2	3	3	1	4
44	2	2	2	1	3
45	2	2	2	1	3

Rozpatrując klasy abstrakcji relacji nierozróżnialności ze względu na wartości numeru stanu charakterystycznego, otrzymuje się klasyfikację $F = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$ sytuacji w piecu obrotowym, dokonaną przez palacza, gdzie:

$X_1 = \{1,2,3\}$;

$X_2 = \{4,5,6,7\}$;

$X_3 = \{8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,44,45\}$;

$X_4 = \{20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,38,39,40,41,42,43\}$;

$X_5 = \{31,32,33,34,35,36,37\}$;

Klasy równoważności relacji nierozróżnialności Obs przedstawione są poniżej:

$E_1 = \{1,2\}$; $E_2 = \{3\}$; $E_3 = \{4,5,7\}$; $E_4 = \{6\}$; $E_5 = \{8,10,11,17,18,44,45\}$; $E_6 = \{9,16\}$; $E_7 = \{12,19\}$; $E_8 = \{13\}$; $E_9 = \{14,15\}$; $E_{10} = \{20,21\}$; $E_{11} = \{22,23\}$; $E_{12} = \{24,39,40\}$; $E_{13} = \{25,26,27,41,42,43\}$; $E_{14} = \{28,38\}$; $E_{15} = \{29,30\}$; $E_{16} = \{31,32\}$; $E_{17} = \{33\}$; $E_{18} = \{34,35,36,37\}$.

Dla przykładu określono dolną i górną aproksymację zbioru X_5. Jest odpowiednio:

$$\underline{Obs}\ X_5 = E_{16} \cup E_{17} \cup E_{18} = \overline{Obs}\ X_5$$

a więc zbiór X_5 jest Obs - rozróżnialny.

Analogiczne obliczenia można przeprowadzić dla pozostałych zbiorów. Wyniki obliczeń zamieszcza tabela 6.

Tabela 6

Obs - dokładność aproksymacji zbiorów F

Nazwa stanu charakterystycznego	Liczba elementów	Liczba elementów dolnej aproksymacji	Liczba elementów górnej aproksymacji	Obs-dokładność aproksymacji $\alpha_{Obs}(F)$
Piec bardzo słaby	3	3	3	1,0
Piec słaby	4	4	4	1,0
Piec słabnący lub wyostrzający się	14	14	14	1,0
Piec ostry	17	17	17	1,0
Piec przeostrzony	7	7	7	1,0
$\gamma_{Obs}(F)$	-	-	-	1,0
$\beta_{Obs}(F)$	-	-	-	1,0

Z tabeli 6 wynika, że wszystkie zbiory rodziny F są Obs - rozróżnialne, a więc palacz ocenił i zakwalifikował sytuacje w piecu obrotowym do poprawnie określonych stanów charakterystycznych.

Zbadano zależność pomiędzy atrybutami ze zbioru Obs.

Tabela 7 zawiera wyniki obliczeń przedstawiające związek między usuwanymi atrybutami ze zbioru Obs a liczbą zbiorów elementarnych.

Tabela 7

Zbiory elementarne przy usuwaniu atrybutów

Usunięty atrybut	żaden	$\{c_1\}$	$\{c_2\}$	$\{c_3\}$	$\{c_4\}$
Liczba zbiorów elementarnych	18	9	12	13	16

Z tabeli 7 wynika, że atrybuty ze zbioru Obs są niezależne.

Tabela 8 przedstawia wpływ atrybutów ze zbioru Obs na Obs - dokładność aproksymacji poszczególnych zbiorów rodziny F, a także na jakość i dokładność aproksymacji klasyfikacji F przez te atrybuty.

Tabela 8

Wpływ atrybutów na Obs - dokładność aproksymacji i klasyfikację zbiorów z F

Nazwa stanu charakterystycznego	Usunięty atrybut					
	żaden	$\{c_1\}$	$\{c_2\}$	$\{c_3\}$	$\{c_4\}$	$\{c_1,c_4\}$
Piec bardzo słaby	1,0	1,0	00	1,0	1,0	1,0
Piec słaby	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0
Piec słabnący lub wyostrzający się	1,0	1,0	0,75	0,28	1,0	1,0
Piec ostry	1,0	1,0	0,79	0,56	1,0	1,0
Piec przeostrzony	1,0	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0
$\gamma_{Obs}(F)$	1,0	1,0	0,75	0,49	1,0	1,0
$\beta_{Obs}(F)$	1,0	1,0	0,6	0,32	1,0	1,0

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 8, nietrudno zauważyć, że zbiór atrybutów Obs ma trzy redukty ze względu na klasyfikację F.

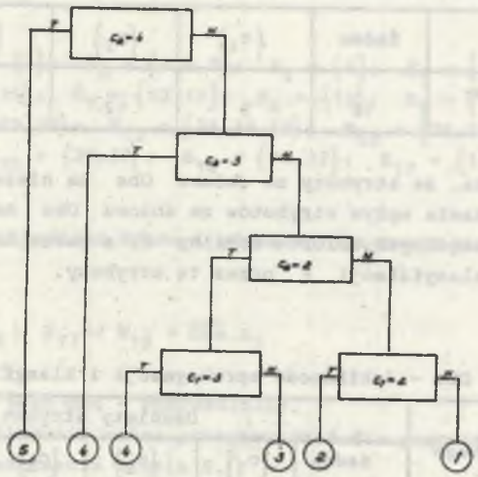
Redukty te to:

$Obs_1 = \{c_1,c_2,c_3\}$; $Obs_2 = \{c_2,c_3,c_4\}$; $Obs_3 = \{c_2,c_3\}$;

Stąd rdzeń atrybutów obserwowalnych ze względu na klasyfikację F ma postać:

$$CORE_{Obs}(F) = Obs_1 \cap Obs_2 \cap Obs_3 = \{c_2, c_3\}.$$

Wykorzystując atrybuty c_2 i c_3, można przedstawić model wnioskowania palacza, przy ocenie i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym, w postaci drzewa klasyfikacji sytuacji pokazanego na rys. 20 [MRÓZ 79, 85, 86, MORE 82].



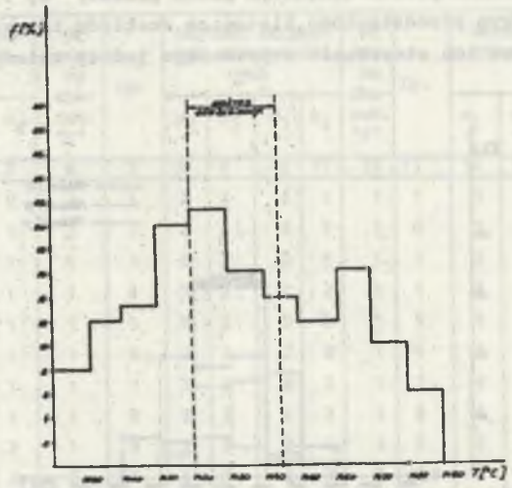
Rys. 21. Drzewo klasyfikacji sytuacji przez palacza
Fig. 21. Tree of situations as classified by operator

Liście drzewa klasyfikacji sytuacji przedstawionego na rys. 21 reprezentują numery odpowiednich, rozróżnianych przez palacza, stanów charakterystycznych pieca obrotowego.

Jak to wynika z tabeli 8 i z rys. 21, podstawowe znaczenie przy ocenie przez palacza sytuacji w piecu obrotowym mają atrybuty obserwowalne: c_2 - kolor materiału w strefie spiekania i c_3 - granulacja materiału w strefie spiekania.

Dla ilustracji wyników sterowania piecem obrotowym, przez omawianego palacza, na rys. 22 przedstawiono zarejestrowany i obliczony przez komputer histogram temperatury w strefie spiekania.

Obliczona z tego histogramu średnia wartość temperatury w strefie spiekania wynosi $\bar{T}_{sp} = 1435$ [°C], zaś odchylenie standardowe wynosi $\sigma_{Tsp} = 31{,}6$ [°C].



Rys. 22. Histogram temperatury w strefie spiekania przy sterowaniu ręcznym
Fig. 22. Histogram of a sintering zone temperature whille manual control

Nietrudno zauważyć, że mimo poprawnej oceny i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym wyniki sterowania ręcznego przez palacza dalekie są od zadowalających.

6.1.3. Analiza porównawcza palaczy

W tym paragrafie omówiono wyniki analizy porównawczej modeli wnioskowania trzech wybranych palaczy w aspekcie interpretacji i wyjaśnienia wyraźnych różnic między nimi w sposobie sterowania piecem obrotowym [MRÓZ 84].

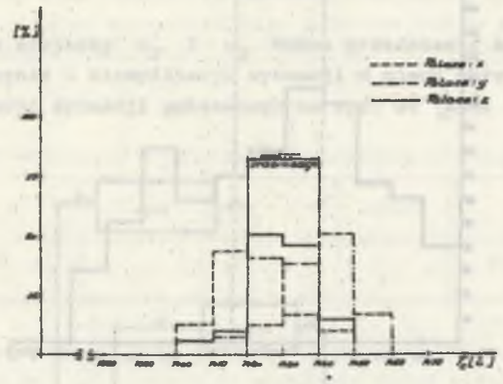
6.1.3.1. Z a ł o ż e n i a a n a l i z y p o r ó w n a w c z e j

Analiza porównawcza modeli wnioskowania palaczy przy sterowaniu piecem obrotowym do wypalania klinkieru opiera się na następujących założeniach:

a) palacze sterują tym samym piecem obrotowym;
b) do oceny i klasyfikacji bieżącej sytuacji w piecu obrotowym wykorzystują te same atrybuty obserwowalne;
c) celem ich sterowania jest stabilizacja temperatury w strefie spiekania;
d) do oceny jakości sterowania palaczy wykorzystywany jest zarejestrowany i obliczony przez komputer histogram obrazujący uzyskany przez nich rozkład temperatury w strefie spiekania przy sterowaniu ręcznym.

Na podstawie długotrwałej obserwacji zachowania się palaczy przy sterowaniu piecem obrotowym do analizy porównawczej wybrano trzech, których umownie nazwano X, Y, Z.

Wyniki sterowania piecem obrotowym przez palaczy X, Y, Z reprezentuje rys. 23, na którym przedstawiono histogram rozkładu temperatury w strefie spiekania podczas ich sterowania w przeciągu jednej zmiany (ok. 8 godz.).



Rys. 23. Histogramy temperatury w strefie spiekania przy sterowaniu ręcznym przez palaczy X, Y, Z

Fig. 23. Histogram of a sintering zone temperature while manual control by operators X, Y, Z

Analizując rys. 23, nietrudno zauważyć, że palacze X, Y, Z w istotny sposób różnią się uzyskanymi wynikami sterowania.

Przyjmując, że postawione przed nimi zadanie sterowania polegało na utrzymaniu temperatury w strefie spiekania w zadanym zakresie stabilizacji najlepiej z niego wywiązał się palacz Z, który relatywnie najdłużej w czasie zmiany utrzymywał piec w tym zakresie.

Palacz Y prowadził piec "ostro", przekraczając zakres stabilizacji temperatury w strefie spiekania.

Palacz X prowadził piec "chłodno", utrzymując tę temperaturę poniżej zakresu stabilizacji.

Nasuwa się pytanie, czy można i w jaki sposób wytłumaczyć te różnice na podstawie posiadanej informacji o ich sterowaniu piecem obrotowym do wypalania klinkieru.

Informacja ta to przedstawione poniżej, w uproszczonym zapisie, protokoły oceny i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym przez omawianych palaczy.

Lp.	Wartość atrybutów obserwowalnych				Nr stanu charak. "X"	Lp.	Wartość atrybutów obserwowalnych				Nr stanu charak. "Y"	Lp.	Wartość atrybutów obserwowalnych				Nr stanu charak. "Z"
	c_1	c_2	c_3	c_4			c_1	c_2	c_3	c_4			c_1	c_2	c_3	c_4	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	3	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	3	1	3	2	2
2	3	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	2	3	2	3
3	3	2	2	1	1	3	2	2	2	1	1	3	3	1	3	2	3
4	2	2	2	1	1	4	2	2	2	2	1	4	4	2	3	2	4
5	2	2	2	1	1	5	2	2	2	2	1	5	4	2	4	2	4
6	2	2	2	1	1	6	2	2	2	2	1	6	4	2	4	3	4
7	2	2	2	1	1	7	3	2	2	2	1	7	4	1	4	3	4
8	2	2	2	1	1	8	3	2	2	2	1	8	4	1	3	3	4
9	2	2	2	2	1	9	3	3	2	2	2	9	4	1	3	2	4
10	2	2	2	2	2	10	3	3	2	2	2	10	4	3	3	2	4
11	2	2	2	2	2	11	3	3	2	2	2	11	3	1	3	2	3
12	3	2	2	2	2	12	3	3	2	3	2	12	3	1	3	2	3
13	3	2	2	2	3	13	3	3	2	3	2	13	3	1	3	2	2
14	3	2	2	3	3	14	4	3	2	3	3	14	3	3	3	2	2
15	3	2	2	3	3	15	4	3	2	3	3	15	3	3	2	2	2
16	3	2	2	3	3	16	4	3	3	3	3	16	3	1	2	2	2
17	3	3	2	3	3	17	4	3	3	3	3	17	3	2	2	2	2
18	3	3	2	3	3	18	4	4	3	3	4	18	3	2	3	2	3
19	3	3	2	3	3	19	4	4	3	3	4	19	3	2	3	2	3
20	4	3	2	3	3	20	5	4	3	3	4	20	4	2	3	2	4
21	4	3	2	3	3	21	5	4	3	3	4	21	4	2	4	2	2
22	4	3	2	3	3	22	5	5	3	3	5	22	4	2	4	3	4
23	4	3	3	3	4	23	5	5	3	3	5	23	4	1	4	3	4
24	4	3	3	3	4	24	5	5	3	3	5	24	4	1	3	3	4
25	4	3	3	3	4	25	5	4	3	3	5	25	4	1	3	2	4
26	4	4	3	3	4	26	5	4	3	3	4	26	4	3	3	2	4
27	4	4	3	3	4	27	5	4	3	3	4	27	3	3	3	2	2
28	4	4	3	3	4	28	5	4	3	3	4	28	3	3	3	2	2
29	4	4	3	3	4	29	5	5	3	3	5	29	3	3	2	2	2
30	4	4	3	2	4	30	5	5	3	2	5	30	3	3	2	2	2
31	4	4	3	2	4	31	5	4	3	2	4	31	3	1	2	2	2
32	4	4	3	2	4	32	5	4	3	2	4	32	3	2	2	2	2
33	4	3	3	2	3	33	4	4	3	2	5	33	3	2	3	2	3
34	4	3	3	2	3	34	4	4	3	2	3	34	3	2	3	2	3
35	4	3	3	2	3	35	4	4	3	2	3	35	3	2	3	3	3
36	4	2	3	2	3	36	4	3	3	2	3	36	4	2	3	3	4
37	4	2	3	2	3	37	4	3	3	1	3	37	4	2	4	3	4
38	3	2	2	2	2	38	3	3	3	1	3	38	4	1	4	3	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
39	3	2	2	2	2	39	3	3	3	1	3	39	4	1	3	3	4
40	3	2	2	2	2	40	3	3	3	1	3	40	4	1	3	2	4
41	3	3	2	2	2	41	3	3	2	1	3	41	4	1	3	2	4
42	3	3	2	2	2	42	3	3	2	1	3	42	4	3	3	2	4
43	3	3	2	2	2	43	3	3	2	1	3	43	4	3	3	2	4
44	3	3	2	3	3	44	3	3	2	2	2	44	3	3	2	2	2
45	3	3	2	3	3	45	3	3	2	2	2	45	3	3	2	2	2
46	4	3	2	3	3	46	3	3	2	3	2	46	3	1	2	2	2
47	4	3	2	3	3	47	3	3	2	3	2	47	3	2	2	2	2
48	4	3	3	3	4	48	4	3	2	3	4	48	3	2	3	2	3
49	4	3	3	3	4	49	4	3	2	3	4	49	3	2	3	2	3
50	4	4	3	3	4	50	4	3	2	2	4	50	3	2	3	3	3
51	4	4	3	3	4	51	4	2	3	2	4	51	3	2	3	3	3
52	4	4	3	3	4	52	4	3	3	3	4	52	3	2	3	3	3
						53	4	4	3	2	4	53	4	1	3	3	4
						54	4	4	3	3	4	54	4	3	3	3	2
						55	5	4	3	3	4	55	3	3	2	3	2
						56	5	4	3	2	4	56	3	3	2	2	2
						57	5	5	3	3	5	57	3	3	2	2	2
						58	5	5	2	3	5	58	2	3	2	2	1
						59	5	5	3	2	5	59	2	3	2	1	1
						60	5	4	3	3	4	60	2	3	1	1	1
						61	5	4	3	2	4	61	2	1	1	1	1
						62	4	4	3	2	3	62	2	2	1	1	1
						63	4	4	3	2	4	63	2	2	2	1	1
						64	4	4	3	2	3	64	3	2	3	1	1
						65	3	3	2	2	2	65	3	2	3	2	3
						66	3	3	2	2	2	66	3	1	3	2	2
						67	3	3	2	2	2	67	3	1	3	2	2
						68	3	3	2	2	2	68	3	1	3	2	2
						69	3	2	2	2	1	69	3	1	3	2	2
						70	3	2	2	2	1	70	3	1	3	2	2

6.1.3.2. Analiza i ocena modelu wnioskowania palacza X

Protokół sterowania reprezentujący ocenę i klasyfikację sytuacji w piecu obrotowym, dokonywane w ciągu zmiany przez palacza X, zawiera 52 elementy.

Do stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" palacz X zaklasyfikował następujące sytuacje $X_1 = \{3,4,5,6,7,8\}$, do stanu charakterystycznego "piec słaby" sytuacje $X_2 = \{1,2,10,11,12,38,39,40,41,42,43\}$, do stanu charakterystycznego "piec słabnący lub wyostrzający się" sytuacje $X_3 = \{13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,33,34,35,36,37,44,45,46,47\}$, zaś do

stanu charakterystycznego "piec ostry" sytuacje $X_4 = \{23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,48,49,50,51,52\}$.

Obs - dokładność aproksymacji tych podzbiorów przedstawia tabela 9.

Tabela 9

Parametry klasyfikacji palacza X

Nazwa stanu charakterystycznego	Liczba elementów	Liczba elementów dolnej aproksymacji	Liczba elementów górnej aproksymacji	Obs - dokładność aproksymacji $\alpha_{Obs}(F)$
Piec bardzo słaby	7	5	10	0,5
Piec słaby	11	3	14	0,21
Piec słabnący lub wyostrzający się	19	18	24	0,75
Piec ostry	15	15	15	1,0
$\gamma_{Obs}(F)$	-	-	-	0,79
$\rho_{Obs}(F)$	-	-	-	0,65

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 9 nietrudno zauważyć, że palacz X poprawnie klasyfikuje sytuacje do stanu charakterystycznego "piec ostry". Pozostałe sytuacje są przez niego klasyfikowane w sposób przybliżony.

Zbadano zależność w zbiorze atrybutów rozróżnianych przez palacza X.

Tabela 10 przedstawia wpływ poszczególnych atrybutów na liczbę zbiorów elementarnych.

Tabela 10

Zbiory elementarne przy usuwaniu atrybutów

Usunięty atrybut	Żaden	c_1	c_2	c_3	c_4
Liczba zbiorów elementarnych	13	10	8	12	7

Z tabeli 10 wynika, że rozróżniany przez palacza X zbiór atrybutów jest minimalny.

Tabela 11 ujmuje wyniki obliczeń dotyczących wpływu atrybutów na Obs-dokładność aproksymacji poszczególnych określonych przez palacza X podzbiorów oraz na dokładność jego podziału.

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 11, łatwo zauważyć wpływ poszczególnych atrybutów na klasyfikację przez palacza sytuacji w piecu obrotowym.

Tabela 11

Obs-dokładność aproksymacji i podział przy usuwaniu atrybutów

Nazwa stanu charakterystycznego	Usunięty atrybut				
	żaden	c_1	c_2	c_3	c_4
Piec bardzo słaby	0,5	0,0	0,50	0,50	0,0
Piec słaby	0,21	0,16	0,0	0,21	0,0
Piec słabnący lub wyostrzający się	0,75	0,66	0,43	0,45	0,2
Piec ostry	1,0	1,0	0,60	0,50	0,55
$\gamma_{Obs}(F)$	0,79	0,69	0,57	0,59	0,33
$\beta_{Obs}(F)$	0,65	0,47	0,40	0,42	0,17

Analizując tylko podzbiór X_4 widać, że o zakwalifikowaniu bieżącej sytuacji do stanu charakterystycznego "piec ostry" decydują atrybuty c_2, c_3, c_4.

Ich wpływ można przeanalizować dokładniej, badając rozstrzygalność tego podzbioru ze względu na te atrybuty.

Wyniki odpowiednich obliczeń zawiera tabela 12.

Tabela 12

Rozstrzygalność przez atrybuty podzbioru X_4

Miara rozstrzygalności \ Usunięty atrybut	c_1	c_2	c_3	c_4
m_4^+	0,0	0,2	0,33	0,33
M_4^-	0,0	0,13	0,13	0,08

Podsumowując otrzymane wyniki można stwierdzić, że palacz X poprawnie klasyfikuje sytuacje należące do stanu charakterystycznego "piec ostry". Decydujący wpływ na tę klasyfikację mają takie atrybuty obserwowalne jak: c_2 - kolor materiału w strefie spiekania, c_3 - granulacja materiału w strefie spiekania i c_4 - kolor wnętrza pieca. Mając na uwadze fakt, że pozostałe sytuacje klasyfikuje w sposób przybliżony, może to tłumaczyć jego skłonność do "chłodzenia" pieca obrotowego.

6.1.3.3. Analiza i ocena modelu wnioskowania palacza Y

Protokół sterowania, reprezentujący ocenę i klasyfikację sytuacji w piecu obrotowym dokonywane w ciągu zmiany przez palacza Y, zawiera 70 elementów.

Palacz Y zaproponował podział $F = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$ zbioru sytuacji, klasyfikując do poszczególnych stanów charakterystycznych pieca obrotowego następujące elementy protokołu:

$X_1 = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,70\}$;

$X_2 = \{9,10,11,12,13,44,45,46,47,65,66,67,68\}$;

$X_3 = \{14,15,16,17,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,62,64\}$;

$X_4 = \{18,19,20,21,26,27,28,31,32,48,49,50,51,52,53,54,55,56,60,61,63\}$;

$X_5 = \{22,23,24,25,29,30,33,57,58,59\}$.

Obs - dokładność aproksymacji tych podzbiorów oraz parametry klasyfikacji przedstawia tabela 13.

Tabela 13

Parametry klasyfikacji palacza Y

Nazwa stanu charakterystycznego	Liczba elementów	Liczba elementów dolnej aproksymacji	Liczba element. górnej aproksymacji	Obs-dokładność aproksymacji $\alpha_{Obs}(F)$
Piec bardzo słaby	10	10	10	1,0
Piec słaby	13	13	13	1,0
Piec słabnący lub wyostrzający się	16	8	21	0,38
Piec ostry	21	10	31	0,32
Piec przeostrzony	10	8	22	0,36
$\gamma_{Obs}(F)$	-	-	-	0,70
$\beta_{Obs}(F)$	-	-	-	0,50

Zbadano zależność w zbiorze atrybutów rozróżnianych przez palacza Y.

Tabela 14 przedstawia wpływ poszczególnych atrybutów obserwowalnych na liczbę zbiorów elementarnych.

Tabela 14

Zbiory elementarne przy usuwaniu atrybutów

Usunięty atrybut	Żaden	c_1	c_2	c_3	c_4
Liczba zbiorów elementarnych	20	14	14	16	11

Z tabeli 14 wynika, że rozróżniany przez palacza Y zbiór atrybutów obserwowalnych jest minimalny.

Tabela 15 ujmuje wyniki obliczeń dotyczących wpływu poszczególnych atrybutów obserwowalnych na Obs-dokładność aproksymacji podzbioru F oraz na parametry klasyfikacji dokonanej przez palacza Y.

Tabela 15

Obs - dokładność aproksymacji i podział przy usuwaniu atrybutów

Nazwa stanu charakterystycznego	Usunięty atrybut				
	żaden	c_1	c_2	c_3	c_4
Piec bardzo słaby	1,0	1,0	0,31	1,0	1,0
Piec słaby	1,0	0,0	0,23	1,0	0,0
Piec słabnący lub wyostrzający się	0,38	0,27	0,27	0,32	0,97
Piec ostry	0,32	0,02	0,02	0,28	0,03
Piec przepstrzony	0,36	0,26	0,03	0,36	0,26
$\gamma_{Obs}(F)$	0,70	0,38	0,27	0,67	0,31
$\beta_{Obs}(F)$	0,50	0,21	0,15	0,47	0,17

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 15, łatwo zauważyć wpływ poszczególnych atrybutów na Obs - dokładność aproksymacji poszczególnych podzbiorów F oraz na parametry tej klasyfikacji.

Ograniczając się tylko do podzbiorów X_1 i X_2 widać, że o zakwalifikowaniu przez palacza Y bieżącej sytuacji w piecu obrotowym do stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" decyduje atrybut obserwowalny c_2, zaś do stanu charakterystycznego "piec słaby" atrybuty obserwowalne c_1, c_2, c_4.

Usunięcie atrybutu obserwowalnego c_1 lub c_2 powoduje, że podzbiór X_2 staje się zbiorem wewnętrznie Obs-nierozróżnialnym.

Dokładniej wpływ tych atrybutów obserwowalnych można prześledzić, badając rozstrzygalność podzbiorów X_1 i X_2 ze względu na te atrybuty. Tabela 16 zawiera wyniki odpowiednich obliczeń.

Tabela 16

Rozstrzygalność przez atrybuty podzbiorów X_1 i X_2

Miara rozstrzygalności \ Usunięty atrybut	c_1	c_2	c_3	c_4
m_1^+	0,0	0,4	0,0	0,4
M_1^-	0,0	0,15	0,0	0,0
m_2^+	1,0	0,7	0,0	1,0
M_2^-	0,1	0,1	0,0	0,09

Podsumowując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że palacz Y właściwie klasyfikuje sytuacje w piecu obrotowym do poprawnie określonych stanów charakterystycznych "piec bardzo słaby" i "piec słaby".

O zakwalifikowaniu bieżącej sytuacji do stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" decydują atrybuty obserwowalne: c_2 - kolor materiału w strefie spiekania i c_4 - kolor wnętrza pieca.

W przypadku stanu charakterystycznego "piec słaby" decydujący wpływ na klasyfikację mają atrybuty obserwowalne: c_1 - temperatura materiału w strefie spiekania, c_2 - kolor materiału w strefie spiekania, c_4 - kolor wnętrza pieca.

Dobra ocena i klasyfikacja przez palacza Y sytuacji opisujących "chłodny" bieg pieca obrotowego mogą tłumaczyć, obserwowaną na obiekcie, tendencję do jego "przegrzewania".

6.1.3.4. Analiza i ocena modelu wnioskowania palacza Z

Protokół sterowania reprezentujący ocenę i klasyfikację sytuacji w piecu obrotowym dokonywane w ciągu zmiany przez palacza Z zawiera 70 elementów.

Palacz Z zaproponował podział $F = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$ zbioru sytuacji klasyfikując do poszczególnych stanów charakterystycznych pieca obrotowego następujące elementy protokołu:

$X_1 = \{58,59,60,61,62,63,64\}$;

$X_2 = \{1,13,14,15,16,17,27,28,29,30,31,32,44,45,46,47,54,55,56,57,66,67,68,69,70\}$;

$X_3 = \{2,3,11,12,18,19,33,34,35,48,49,50,51,52,65\}$;

$X_4 = \{4,5,6,7,8,9,10,20,21,22,23,24,25,26,36,37,38,39,40,41,42,43,53\}$;

Obs - dokładność aproksymacji tych podzbiorów oraz parametry klasyfikacji zawiera tabela 17.

Tabela 17

Obs - dokładność aproksymacji dla palacza Z

Nazwa stanu charakterystycznego	Liczba elementów	Liczba elementów dolnej aproksymacji	Liczba elementów górnej aproksymacji	Obs-dokładność aproksymacji $\alpha_{Obs}(F)$
Piec bardzo słaby	7	7	7	1,0
Piec słaby	25	18	28	0,64
Piec słabnący lub wyostrzający się	15	12	22	0,54
Piec ostry	23	23	23	1,0
$\gamma_{Obs}(F)$	-	-	-	0,86
$\beta_{Obs}(F)$	-	-	-	0,75

Zbadano zależność w zbiorze atrybutów obserwowalnych wykorzystywanych przez palacza Z.

Tabela 18 ujmuje wyniki obliczeń wpływu poszczególnych atrybutów obserwowalnych na liczbę zbiorów elementarnych.

Tabela 18

Zbiory elementarne przy usuwaniu atrybutów

Usunięty atrybut	Żaden	c_1	c_2	c_3	c_4
Liczba zbiorów elementarnych	24	19	12	16	16

Z tabeli 18 wynika, że rozróżniamy przez palacza Z zbiór atrybutów obserwowalnych jest minimalny.

Tabela 19 zawiera wyniki obliczeń dotyczących wpływu poszczególnych atrybutów obserwowalnych na Obs-dokładność aproksymacji zbiorów rodziny A, a także na parametry tej klasyfikacji.

Tabela 19

Obs - aproksymacja i klasyfikacja przy usuwaniu atrybutów

Nazwa stanu charakterystycznego	Usunięty atrybut				
	żaden	c_1	c_2	c_3	c_4
Piec bardzo słaby	1,0	0,43	1,0	1,0	0,31
Piec słaby	0,64	0,22	0,34	0,33	0,53
Piec słabnący lub wyostrzający	0,54	0,0	0,16	0,14	0,0
Piec ostry	1,0	0,25	0,75	1,0	0,79
$\gamma_{Obs}(F)$	0,86	0,37	0,61	0,66	0,6
$\beta_{Obs}(F)$	0,75	0,2	0,44	0,49	0,43

Opierając się na wynikach obliczeń zamieszczonych w tabeli 19, można prześledzić wpływ poszczególnych atrybutów obserwowalnych na Obs-dokładność aproksymacji rozróżnianych przez palacza Z podzbiorów sytuacji w piecu obrotowym oraz na dokładność jego klasyfikacji.

Analizując tylko podzbiory X_1 i X_4 widać, że:

a) o zaklasyfikowaniu bieżącej sytuacji do stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" decydują atrybuty c_1 i c_4;

b) o zaklasyfikowaniu bieżącej sytuacji do stanu charakterystycznego "piec ostry" decydują atrybuty c_1, c_2, c_4.

Dokładniej ich wpływ można przeanalizować badając rozstrzygalność podzbiorów X_1 i X_4 ze względu na te atrybuty.

Wyniki obliczeń ujmuje tabela 20.

Tabela 20

Rozstrzygalność przez atrybuty obserwowalne podzbiorów X_1 i X_4

Miara rozstrzygalności \ Usunięty atrybut	c_1	c_2	c_3	c_4
m_1^+	0,14	0,0	0,0	0,14
M_1^-	0,11	0,0	0,0	0,19
m_4^+	0,48	0,22	0,0	0,17
M_+^-	0,53	0,02	0.0	0,02

Podsumowując otrzymane wyniki obliczeń, należy stwierdzić, że palacz Z prawidłowo klasyfikuje sytuacje w piecu obrotowym należące do poprawnie określonych stanów charakterystycznych "piec bardzo słaby" i "piec ostry".

W przypadku stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" decydujący wpływ na jego klasyfikację mają atrybuty obserwowalne: c_1 - temperatura w strefie spiekania i c_4 - kolor wnętrza pieca zaś w przypadku stanu charakterystycznego "piec ostry" atrybuty obserwowalne: c_1, c_2 - kolor materiału w strefie spiekania, c_4.

Atrybut obserwowalny c_3 - granulacja materiału w strefie spiekania nie ma żadnego wpływu na tę klasyfikację.

Poprawna określoność przez palacza Z "skrajnych" stanów charakterystycznych pracy pieca obrotowego może tłumaczyć obserwowany na obiekcie fakt, że "najlepiej" stabilizuje temperaturę w strefie spiekania.

6.1.3.5. Ocena porównawcza modeli wnioskowania palaczy X, Y, Z

Analizując rys. 23 stwierdzono, że w istotny sposób różnią się wyniki sterowania piecem obrotowym uzyskane przez poszczególnych palaczy. Wytłumaczenia tych różnic szukano na drodze analizy modelu wnioskowania każdego z palaczy przy ocenie i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym na podstawie posiadanej informacji.

Otrzymane wyniki tej analizy mogą tłumaczyć zauważone indywidualne różnice w sposobie prowadzenia przez nich pieca obrotowego.

Różnice te wynikają przede wszystkim ze sposobu klasyfikacji przez palaczy, ocenianych na bieżąco, sytuacji w piecu obrotowym.

Palacz X poprawnie klasyfikuje sytuacje należące do stanu charakterystycznego "piec ostry", biorąc przy tym pod uwagę następujące atrybuty obserwowalne: c_2 - kolor materiału w strefie spiekania, c_3 - granulacja materiału w strefie spiekania, c_4 - kolor wnętrza pieca. Pozostałe sytuacje w piecu obrotowym klasyfikuje w sposób przybliżony, przy czym najniższą Obs-dokładność aproksymacji uzyskuje dla stanu charakterystycznego "piec słaby".

To tłumaczy obserwowaną, w jego przypadku, tendencję do utrzymywania biegu pieca obrotowego w stanach charakterystycznych chłodnych - "piec bardzo słaby", "piec słaby".

Palacz Y poprawnie klasyfikuje sytuacje należące do stanów charakterystycznych "piec bardzo słaby" i "piec słaby", biorąc przy tym pod uwagę następujące atrybuty obserwowalne: c_1 - temperatura w strefie spiekania, c_2 - kolor materiału w strefie spiekania, c_4 - kolor wnętrza pieca.

Może to tłumaczyć obserwowaną podczas jego sterowania piecem obrotowym tendencję do utrzymywania jego biegu w stanach charakterystycznych gorących - "piec ostry", "piec przeostrzony".

Tezę tę dodatkowo popiera fakt wystąpienia, w przypadku jego sterowania, zbioru sytuacji, które zaklasyfikował do stanu charakterystycznego "piec przeostrzony".

Palacz Z dobrze klasyfikuje sytuacje należące do stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" i "piec ostry".

W przypadku stanu charakterystycznego "piec bardzo słaby" bierze pod uwagę atrybuty obserwowalne: c_1 - temperatura w strefie spiekania i c_4 - kolor wnętrza pieca, zaś w przypadku stanu charakterystycznego "piec ostry" atrybuty obserwowalne c_1, c_2 - kolor materiału w strefie spiekania, c_4.

Dobra rozróżnialność przez palacza Z "skrajnych" stanów charakterystycznych biegu pieca obrotowego może tłumaczyć uzyskane przez niego wyniki sterowania.

Tabela 21 ujmuje wartości liczbowe charakteryzujące Obs - dokładność aproksymacji i parametry, zaproponowanej przez poszczególnych palaczy, klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym.

Tabela 21

Obs - dokładność aproksymacji i jakość podziału palaczy X, Y, Z

Palacz / Nazwa stanu charakterystycznego	X	Y	Z
Piec bardzo słaby	0,5	[1,0]	[1,0]
Piec słaby	0,21	[1,0]	0,64
Piec słabnący lub wyostrzający się	0,75	0,38	0,54
Piec ostry	[1,0]	0,32	[1,0]
Piec przeostrzony	-	0,36	-
$\gamma_{Obs}(F)$	0,79	0,7	0,86
$\beta_{Obs}(F)$	0,65	0,5	0,75

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 21, nietrudno zauważyć, że wszyscy palacze najsłabiej klasyfikują sytuacje należące do stanu charakterystycznego "piec słabnący lub wyostrzający się". Może to wynikać z faktu, że stan ten charakteryzuje się największą dynamiką zmian parametrów pieca obrotowego i stąd trudności w ocenie i określeniu wartości atrybutów obserwowalnych.

Interesujące jest porównanie palaczy ze względu na atrybuty, którymi kierują się przy klasyfikacji.

Przedstawia to tabela 22.

Z tabeli 22 wynika, że atrybut obserwowalny c_4 - kolor wnętrza pieca jest brany pod uwagę przez palaczy przy ocenia i klasyfikacji wszystkich sytuacji w piecu obrotowym. Pozostałe atrybuty mają różne znaczenia dla poszczególnych palaczy.

Tabela 22

Zależność podziału palaczy X, Y, Z od atrybutów

Nazwa stanu charakterystycznego \ Palacz	X	Y	Z
Piec bardzo słaby	$\{c_1, c_4\}$	$\{c_2, c_4\}$	$\{c_1, c_4\}$
Piec słaby	$\{c_2, c_3, c_4\}$	$\{c_1, c_2, c_4\}$	$\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$
Piec słabnący lub wyostrzający się	$\{c_2, c_3, c_4\}$	$\{c_2, c_3, c_4\}$	$\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$
Piec ostry	$\{c_2, c_3, c_4\}$	$\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$	$\{c_1, c_2, c_4\}$
Piec przeostrzony	-	$\{c_1, c_2, c_4\}$	-

Aby je określić, zbadano pozytywną rozstrzygalność ich podziałów zbioru sytuacji ze względu na te atrybuty. Otrzymane wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 23.

Tabela 23

Miara pozytywnej rozstrzygalności podziału palaczy przez atrybuty obserwowalne

Nazwa stanu charakterystycznego \ Atrybut	Temperatura w strefie spiekania			Kolor materiału w strefie spiekania			Granulacja materiału w strefie spiekania			Kolor wnętrza		
Piec bardzo słaby	1,0	0,0	0,14	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,4	0,14
Piec słaby	0,0	1,0	0,15	1,0	0,7	0,4	0,4	0,0	0,3	1,0	1,0	0,5
Piec słabnący lub wyostrzający się	0,0	0,0	1,0	0,3	0,1	0,16	0,3	0,1	0,2	0,6	0,6	1,0
Piec ostry	0,0	0,9	0,5	0,2	0,9	0,2	0,3	0,1	0,0	0,3	0,9	0,2
Piec przeostrzony	-	0,4	-	-	0,9	-	-	0,0	-	-	0,5	-
Palacz	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z

Szczegółowa analiza wyników obliczeń zamieszczonych w tabeli 23 potwierdza wymienioną powyżej charakterystykę oceny i klasyfikacji przez palaczy sytuacji w piecu obrotowym.

6.1.3.6. P o d s u m o w a n i e

Celem była analiza porównawcza modeli wnioskowania palaczy przy sterowaniu piecem obrotowym do wypalania klinkieru na jednej z cementowni.

Analizę ograniczono tylko do przypadku oceny i klasyfikacji przez palaczy bieżącej sytuacji w piecu obrotowym, nie biorąc pod uwagę podejmowanych przez nich, na tej podstawie, oddziaływań sterujących.

Przedstawione wyniki analizy pozwalają zinterpretować zaobserwowane na piecu obrotowym różnice w sposobie i rezultatach sterowania przez poszczególnych palaczy.

Duże znaczenie praktyczne ma przede wszystkim możliwość obiektywnej selekcji atrybutów obserwowalnych będących podstawą dokonywanej przez palaczy klasyfikacji sytuacji obserwowanych na piecu obrotowym.

Informację tę można wykorzystać do opisu stanów charakterystycznych pieca obrotowego, a następnie, po uwzględnieniu atrybutów mierzalnych i sterowań, do pełnej identyfikacji i implementacji komputerowej modeli wnioskowania palaczy.

6.1.4. Implementacja komputerowa

W tym paragrafie omówiono zagadnienie implementacji komputerowej modeli wnioskowania jako podstawy sterowania w czasie rzeczywistym przez komputer piecem obrotowym do wypalania klinkieru.

Rozpatrzono problem wyboru atrybutów mierzalnych i zapisu modelu wnioskowania opierając się na komputerowej analizie ich wartości.

Przedstawiono ogólną strukturę systemu komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru na podstawie zaimplementowanego modelu wnioskowania.

Omówiono zagadnienie doboru cyklu sterowania i syntezy obiektowego systemu operacyjnego, a także scharakteryzowano uzyskane wyniki komputerowego sterowania.

6.1.4.1. A t r y b u t y o b s e r w o w a l n e a a t r y b u t y m i e r z a l n e

Implementacja w komputerze modelu wnioskowania wymaga jego zapisu w postaci umożliwiającej automatyczne określenie wartości atrybutów mierzalnych i ich analizę dla odpowiedniego wyselekcjonowania oddziaływań sterujących. Stąd dla jej realizacji konieczne jest wyselekcjonowanie zbioru Mes atrybutów mierzalnych. Można w tym celu wykorzystać wyniki analizy porównawczej modeli wnioskowania palaczy oraz istniejące realia pomiarowe na obiekcie.

Prowadzi to do wyboru następujących atrybutów mierzalnych:

c_1 - temperatura w strefie spiekania;
c_5 - pochodna temperatury w strefie spiekania;
c_6 - temperatura przed elektrofiltrem;
c_7 - pochodna temperatury przed elektrofiltrem.

Opierając się na analizie wartości atrybutów mierzalnych c_1, c_5 można oceniać i klasyfikować sytuacje w strefie spiekania pieca obrotowego, zaś na podstawie analizy wartości atrybutów mierzalnych c_6, c_7 można oceniać i klasyfikować sytuacje we wnętrzu i zimnym końcu pieca obrotowego [ZSAK 76].

Poniżej ograniczono się dla przykładu do atrybutów mierzalnych c_1, c_5 wykorzystując określone powyżej zbiory ich wartości.

W tabeli 24 przedstawiono protokół sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru. Obejmuje on jedną zmianę roboczą.

Wartości atrybutów obserwowalnych określone były przez palacza i wprowadzane do komputera w tych chwilach czasowych, w których oceniał on sytuację w piecu obrotowym.

Wartości atrybutów mierzalnych określone były wtedy automatycznie przez komputer na podstawie odpowiednio uśrednionych pomiarów temperatury w strefie spiekania.

Wykorzystywano w tym celu proste wygładzanie eksponencjalne [BEND 74]. W celu estymacji mierzonej temperatury w strefie spiekania wykorzystywano filtr o postaci:

$$DF_n = \alpha D_n + (1 - \alpha) DF_{n-1},$$

gdzie:

DF_n - wielkość odfiltrowana w chwili n-tej;
D_n - wielkość mierzona w chwili n-tej;
$\alpha = 0{,}25$ - eksperymentalnie dobrana wartość.

W celu estymacji wartości pochodnej temperatury w strefie spiekania wykorzystywano filtr o postaci:

$$DF_n = \frac{\alpha}{T_p}(DF_n - DF_{n-1}) + (1 - \alpha) DF'_{n-1}$$

gdzie:

DF'_n - pochodna w chwili n-tej;
$T_p = 1$ [min] - cykl pomiarowy;
$\alpha = 0{,}5$ - eksperymentalnie dobrana wartość.

Tabela 24

Protokół sterowania piecem obrotowym

Kolejne numery sytuacji	Wartości atrybutów obserwowalnych			Wartości atrybutów mierzalnych		Wartości atrybutów decyzyjnych	
	c_2	c_3	c_4	c_1	c_5	d_1	d_2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	2	2	1	2	4
2	1	1	2	2	1	2	4
3	2	1	2	2	2	2	3
4	2	1	2	3	2	2	3
5	2	2	2	3	2	2	3
6	2	2	2	3	4	2	3
7	2	2	2	2	1	2	3
8	2	2	2	2	1	2	3
9	1	2	2	2	1	2	4
10	1	1	2	2	1	2	4
11	1	1	2	2	1	2	4
12	1	1	2	2	1	2	4
13	1	1	2	2	2	2	4
14	1	1	2	2	2	2	4
15	2	1	2	3	1	2	2
16	2	2	2	3	1	2	2
17	3	2	2	4	1	2	2
18	3	2	2	4	2	2	1
19	3	3	2	4	2	2	1
20	3	3	2	4	2	2	1
21	3	3	2	4	1	2	3
22	2	3	2	2	2	2	3
23	2	2	2	2	2	2	3
24	2	2	2	2	2	2	3
25	1	1	1	2	4	1	4
26	1	1	1	2	4	1	4
27	1	1	1	2	4	1	4
28	1	1	1	2	4	1	4
29	1	1	2	2	1	2	4
30	2	1	2	2	2	2	3
31	2	2	1	3	2	2	3
32	2	2	1	3	1	2	2
33	2	2	1	2	1	2	4
34	2	2	1	2	3	2	4
35	2	2	1	3	2	2	3
36	3	2	2	4	2	2	1
37	3	3	2	4	4	2	3

cd. tabeli 24

1	2	3	4	5	6	7	8
38	3	3	2	4	4	2	3
39	3	3	2	3	1	2	2
40	2	3	2	3	4	2	4
41	1	2	2	2	4	2	4
42	1	1	2	2	1	2	4

Dla analizy semantycznej protokołu sterowania przestawionego w tabeli 24 można rozpatrzyć klasy abstrakcji generowane przez relację równoważności $\tilde{D}$. Opierając się na tabeli 24:

$$D^* = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\},$$

gdzie:

$X_1 = \{1,2,9,10,11,12,13,14,29,33,34,35,41,42,43\}$;

$X_2 = \{3,4,5,6,7,8,21,22,23,24,30,31,36,38,39\}$;

$X_3 = \{15,16,17,32,40\}$;

$X_4 = \{18,19,20,37\}$;

$X_5 = \{25,26,27,28\}$.

Zbadano zależność $W \xrightarrow{k} D$, gdzie $W = Obs \cup Mes$. Na podstawie tabeli 24 jest $k = \gamma_W(D^*) = 1$, a więc $W \longrightarrow D$.

W tabeli 25 przedstawiono wpływ poszczególnych atrybutów ze zbioru W na wielkość współczynnika $k = \gamma_W(D^*)$.

Tabela 25

Wpływ atrybutów warunkowych na $\gamma_W(D^*)$

Usunięty atrybut	Żaden	c_2	c_3	c_4	c_1	c_5
$\gamma_W(D^*)$	1,0	0,84	0,91	0,91	0,81	0,63

Z tabeli 25 wynika, że atrybuty ze zbioru W są niezależne.

Zbadano zależność $Mes \xrightarrow{k} D$, otrzymując $k = \gamma_{Mes}(D^*) = 0,91$, a więc zbiór Mes jest $\varepsilon = 0,09$ reduktem względnym zbioru atrybutów warunkowych.

Odpowiednia, niedeterministyczna tablica decyzyjna, otrzymana na podstawie tabeli 24, przedstawiona jest poniżej.

Na podstawie własności 4.17 tablica decyzyjna przedstawiona w tabeli 26 może być zdekomponowana na dwie tablice decyzyjne, z których pierwsza jest deterministyczna, a druga źle określona.

Tablice te, w uproszczonym zapisie, przedstawione są poniżej.

Tabela 26

Niedeterministyczna tablica decyzyjna

Numer reguły decyzyjnej	Wartości atrybutów mierzalnych		Wartości atrybutów decyzyjnych	
	$\{c_1\}$	$\{c_5\}$	$\{d_1\}$	$\{d_2\}$
1	2	3	4	5
1	2	1	2	4
2	2	2	2	3
3	2	3	2	4
4	3	2	2	3
5	3	1	2	2
6	4	2	2	1
7	3	4	2	4
8	3	4	2	3
9	4	1	2	2
10	4	1	2	3
11	4	4	2	3
12	2	4	1	4
13	2	4	2	4

Tabela 27

Deterministyczna składowa tablicy decyzyjnej

1	2	1	2	4
2	2	2	2	3
3	2	3	2	4
4	3	2	2	3
5	3	1	2	2
6	4	2	2	1
11	4	4	2	3

Opierając się na tabeli 28 można przy udziale palacza przeanalizować przyczyny występującej w tablicy decyzyjnej niejednoznaczności w doborze reguł decyzyjnych.

Przyczyny tej niejednoznaczności mogą być różne. Najczęściej wynikają z nieuwzględnienia jakiejś współrzędnej w przestrzeni obserwacji lub ze sposobu określania i analizowania wartości atrybutów mierzalnych.

Tabela 28

Niedeterministyczna składowa tablicy decyzyjnej

7	3	4	2	4
8	3	4	2	3
9	4	1	2	2
10	4	1	2	3
12	2	4	1	4
13	2	4	2	4

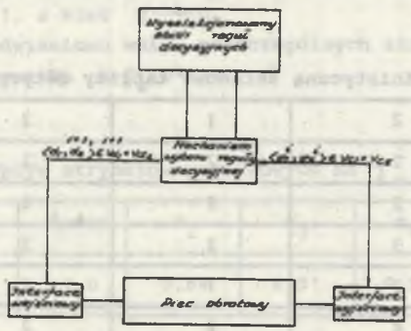
Można jednak doświadczalnie uzyskać zgodność oceny i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym dokonywanej przez komputer z klasyfikacją dokonywaną przez palacza. Zostało to opisane w [ZSAK 76, MRÓZ 81].

W przypadku otrzymania takiej zgodności można przystąpić do implementacji w komputerze odpowiedniego modelu wnioskowania.

Wymaga to określenia struktury systemu komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru.

6.1.4.2. S t r u k t u r a s y s t e m u s t e r o w a n i a

Struktura systemu komputerowego sterowania, opartego na zaimplementowanym modelu wnioskowania, przedstawiona jest na rys. 24.



Rys. 24. Struktura systemu komputerowego sterowania
Fig. 24. Computer system structure

Podstawowe elementy tej struktury to:

a) wyselekcjonowany zbiór reguł decyzyjnych;
b) mechanizm wyboru reguły decyzyjnej;
c) interface wyjściowy;
d) interface wejściowy.

Praktyczna realizacja systemu komputerowego sterowania, opartego na zaimplementowanym modelu wnioskowania, wymaga więc:

a) określenia sposobu reprezentacji w pamięci komputera zbioru reguł decyzyjnych;
b) programowej lub hardware'owej realizacji mechanizmu wyboru reguły decyzyjnej;
c) określenia funkcji interface'u wyjściowego;
d) określenia funkcji interface'u wejściowego.

Naturalnym sposobem reprezentacji, w pamięci komputera, zbioru reguł decyzyjnych jest implementacja odpowiedniej tablicy decyzyjnej przy wykorzystaniu np. metody opisanej w [HAMB 74, ZSAK 78].

Odpowiedni program realizuje wtedy także mechanizm wyboru reguły decyzyjnej i określenia wartości atrybutów decyzyjnych.

Taka droga reprezentacji zbioru reguł decyzyjnych i realizacji mechanizmu wyboru reguły decyzyjnej została przedstawiona w [ZSAK 76, MRÓZ 79, 81].

Inne podejście zostało przedstawione w [MRÓZ 87], gdzie zaproponowano wykorzystanie do tego celu języka PROLOG [CLOCK 82].

Wynika to z analogii pomiędzy regułą decyzyjną (3.12) a podstawową jednostką syntaktyczną języka PROLOG, jaką jest tzw. klauzula Horna [ROSS 86].

Program napisany w PROLOGu jest skończonym zbiorem klauzul Horna o postaci:

$$A: - B_1, B_2, \ldots, B_n. \quad n \geq 0. \tag{6.1}$$

Każda taka klauzula może być traktowana jako reguła decyzyjna w której:

A jest konkluzją;

$B_1, B_2, \ldots, B_n$ jest koniunkcją klauzul;

$A, B_1, B_2, \ldots, B_n$ są predykatami w postaci:

$P(t_1, t_2, \ldots, t_m)$, $m \geq 0$, zaś P jest nazwą predykatu, a $t_1, t_2, \ldots, t_m$ są termami. Każdy term jest albo stałą, albo termem złożonym w postaci $f(s_1, \ldots, s_k)$, w której f jest symbolem funkcji k-argumentowej, a $s_1, \ldots, s_k$ są termami. Symbole zmiennych mogą występować w (6.1) zarówno w konkluzji, jak i w koniunkcji klauzul. Po prawej stronie klauzuli (6.1) można także definiować dysjunkcję klauzul w postaci:

$$A: - B_1; B_2; \ldots; B_n. \tag{6.2}$$

Zapis przykładowej reguły decyzyjnej, wziętej z tabeli 27, przedstawiony jest poniżej:

decrul (X,Y,D,T): -

((X ⩾ 1420, X < 1440), (Y ⩾ 0, Y < $\frac{\pi}{4}$));

((X ⩾ 1420, X < 1440), (Y ⩾ $\frac{3}{2}\pi$, Y < $\frac{7}{4}\pi$));

D is 2,

T is 4.

Zmienne X, Y w tym zapisie oznaczają poszczególne atrybuty mierzalne, zaś zmienne D, T oznaczają odpowiednie atrybuty decyzyjne.

Mechanizm wyboru reguły decyzyjnej, na podstawie określonych wartości atrybutów mierzalnych, jest realizowany w języku PROLOG automatycznie, co przy bogatych możliwościach programowania w tym języku operacji wejścia, wyjścia stawia go wśród najbardziej efektywnych języków programowania takich aplikacji.

Funkcje interface'u wyjściowego sprowadzają się do realizacji pomiarów i kodowania wartości atrybutów mierzalnych i, gdy to potrzebne, atrybutów obserwowalnych przy udziale palacza (np. za pomocą klawiatury lub zadajników wartości [ZSAK 76]).

Funkcje interface'u wejściowego sprowadzają się do realizacji oddziaływań sterujących pośrednio po akceptacji przez palacza lub bezpośrednio - bez jego akceptacji.

Pełna realizacja komputerowego sterowania piecem obrotowym wymaga jeszcze doboru cyklu sterowania.

6.1.4.3. Dobór cyklu sterowania

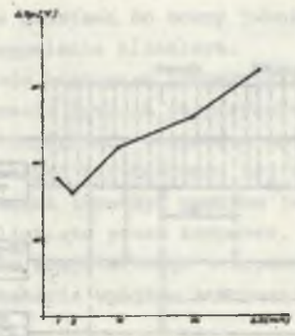
Zagadnienie doboru cyklu sterowania przez komputer złożonym obiektem należy do najważniejszych na etapie wdrażania [HARR 72]. W przypadku gdy algorytmy komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym zostały opracowane na podstawie modelu matematycznego obiektu, do jego rozwiązania można wykorzystać własności tego modelu [SRAG 76].

Rozwiązanie tego zagadnienia jest utrudnione, gdy - jak to zostało opisane powyżej - podstawą algorytmów komputerowego sterowania są modele wnioskowania np. palaczy.

Istotne trudności wynikają z faktu, że różni palacze z różną częstotliwością oceniają sytuacje w piecu obrotowym i podejmują odpowiednie oddziaływania sterujące. Tak więc taka informacja nie może być podstawą racjonalnego określenia cyklu sterowania przez komputer piecem obrotowym.

W tej sytuacji postanowiono rozwiązać to zagadnienie eksperymentalnie. W tym celu jako wskaźnik jakości sterowania przez komputer piecem obrotowym przyjęto odchylenie standardowe σ_{Tsp} temperatury w strefie spiekania obliczane od temperatury Tz zadanej przez technologów.

Na rys. 25 przedstawiono zależności σ_{Tsp} od cyklu sterowania Δ_s przez komputer piecem obrotowym.



Rys. 25. Zależność σ_{Tsp} od cyklu sterowania Δ_s

Fig. 25. Dependence of σ_{Tsp} on the control cycle Δ_s

Przy określaniu zależności przedstawionej na rys. 25 wykorzystano dane rejestrowane przez komputer w czasie ciągłego, 8-godzinnego sterowania automatycznego z cyklem sterowania wynoszącym odpowiednio: 30, 20, 10, 3, 1,5 minuty.

Na podstawie rys. 25 przyjęto cykl sterowania przez komputer piecem obrotowym do wypalania klinkieru jako $\Delta_s = 3$ [min].

Dobór cyklu sterowania pozwala przejść do rozwiązania zadania syntezy obiektowego systemu operacyjnego.

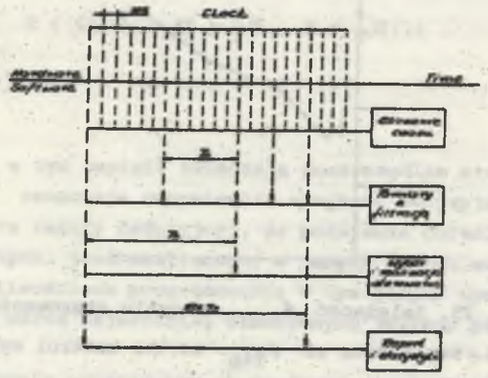
6.1.4.4. Obiektowy system operacyjny sterowania piecem obrotowym

Istota komputerowego sterowania, opartego na implementacji modelu wnioskowania, sprowadza się do bieżącego określania wartości atrybutów ze zbioru Mes i wyznaczania, na tej podstawie, w chwilach wynikających z przyjętego cyklu sterowania Δ_s, wartości atrybutów decyzyjnych ze zbioru D.

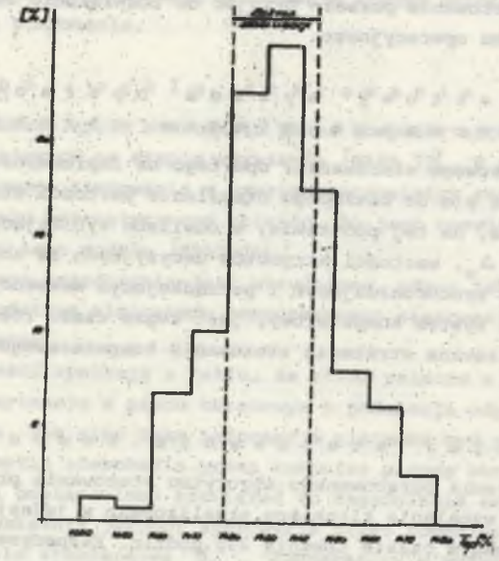
Stąd elementem synchronizującym i porządkującym sekwencje czynności, realizowane przez system komputerowy, jest zegar czasu rzeczywistego, zaś przyjęta i zrealizowana strategia sterowania komputerowego przedstawiona jest na rys. 26.

6.1.4.5. Wyniki sterowania komputerowego

W celu sprawdzenia opracowanego algorytmu sterowania przez komputer piecem obrotowym do wypalania klinkieru zrealizowano w jednej z cementowni eksperyment o łącznym czasie trwania 250 godzin. Eksperyment ten polegał na ciągłym sterowaniu przez komputer piecem obrotowym, przy czym każdorazowo jedna z osób biorących udział w eksperymencie przebywała w pomieszczeniu, w którym znajdował się komputer, a druga - w sterowni pieca. Komputer na bieżąco rejestrował temperaturę w strefie spiekania i sporządzał histogram tej temperatury za interaktywnie określane odcinki czasu.



Rys. 26. Strategia sterowania komputerowego piecem obrotowym
Fig. 26. Rotary kiln computer control strategy



Rys. 27. Histogram temperatury w strefie spiekania przy sterowaniu komputerowym
Fig. 27. Histogram of a sintering zone temperature while computer control

Dane te były następnie podstawą do oceny jakości komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru.

Na rys. 27 przedstawiono histogram temperatury w strefie spiekania obliczony przez komputer w czasie trwania eksperymentu.

Porównując histogram temperatury w strefie spiekania przedstawiony na rys. 27 z wcześniej omawianymi histogramami tej temperatury przy sterowaniu ręcznym (patrz rys. 3), można zauważyć poprawę jakości sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru przez komputer.

Ilościową ocenę wyników komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru, w kontekście wyników sterowania ręcznego, zawiera tabela 29.

Tabela 29

Wyniki ręcznego i komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru

Nazwa parametru	Wartość parametru przy sterowaniu ręcznym	Wartość parametru przy sterowaniu komputerowym
Temperatura zadana w strefie spiekania T_z [°C]	1440	1440
Średnia, obliczona temperatura w strefie spiekania T_{sp} [°C]	1434	1435
Odchylenie standardowe σ_{Tsp} [°C]	27,6	17,1

Z analizy wyników zamieszczonych w tabeli 29 widać istotne zmniejszenie σ_{Tsp} przy sterowaniu komputerowym, co ma związek z poprawą jakości stabilizacji temperatury w strefie spiekania, a więc pośrednio z poprawą jakości wypalanego klinkieru i zmniejszeniem zużycia paliwa.

6.1.5. Podsumowanie

Przedstawiono przykład syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym do wypalania klinkieru wychodząc z modeli wnioskowania palaczy.

Identyfikację, analizę i ocenę modeli wnioskowania palaczy przeprowadzono opierając się na elementach teorii zbiorów przybliżonych.

Przedyskutowano identyfikację, analizę i ocenę modeli wnioskowania palaczy w odniesieniu do dokonywanej przez nich bieżącej oceny i klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym.

Wyniki wykorzystano także do interpretacji i wyjaśnienia istotnych różnic w sposobie sterowania piecem obrotowym przez poszczególnych palaczy.

Omówiono i zilustrowano sposób doboru atrybutów mierzalnych dla potrzeb komputerowej implementacji modeli wnioskowania palaczy.

Ograniczono się przy tym, ze względu na obszerność posiadanego materiału eksperymentalnego, do przedstawienia najważniejszych zagadnień zapisu modeli wnioskowania palaczy przy użyciu atrybutów mierzalnych. Dokładniej zagadnienie to w ujęciu formalnym przedstawione jest w [PAWL 85, 86], zaś praktyczne wyniki omówiono w [ZSAK 76, 78, MROZ 85a,c, 86].

Syntetycznie omówiono także strukturę systemu komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru opartego na zaimplementowanym modelu wnioskowania.

Przedstawiono wybrane problemy doboru cyklu sterowania i syntezy obiektowego systemu operacyjnego.

6.2. Komputerowe wspomaganie mistrzów wielkopiecowników

W tym paragrafie skoncentrowano się na drugim z omówionych w rozdziale I obiektów technologicznych i przedstawiono komputerowe wspomaganie mistrzów wielkopiecowników kierujących procesem wielkopiecowym w jednej z hut.

Omówiono zagadnienie sterowania wielkim piecem "od góry" ze szczególnym uwzględnieniem możliwości stosowania modeli matematycznych w zakresie namiarowania wsadu.

Pokazano, jak model wnioskowania mistrza wielkopiecownika może być wykorzystany do integracji analitycznych modeli matematycznych opisujących podstawowe problemy namiarowania wsadu.

Przedstawiono wyniki doświadczeń eksploatacyjnych komputerowego wspomagania mistrzów w jednej z hut.

6.2.1. Sterowanie "od góry" - zadania komputerowego wspomagania

Jak wspomniano w rozdziale I, zasadniczy wpływ na przebieg procesu wielkopiecowego oraz na jakość otrzymanej surówki wywiera sposób przygotowania wsadu, stabilizacji jego składu chemicznego i cech fizycznych, rozsypu w gardzieli wielkiego pieca.

O ile problemy dotyczące stabilizacji cech fizycznych wsadu oraz rozsypu w gardzieli wielkiego pieca związane są i zależą od osiągniętego stopnia mechanizacji, automatyzacji, jakości i niezawodności stosowanych do tego celu urządzeń, o tyle zagadnienie doboru właściwej struktury i stabilizacja składu chemicznego wsadu wymagają rozwiązania problemów związanych z szybką i precyzyjną analizą składu chemicznego jego poszczególnych komponentów wraz z wykorzystaniem komputera do ich namiarowania.

Wagę tego problemu podkreśla również fakt, że źródłem podstawowych zakłóceń w procesie wielkopiecowym, najbardziej wpływających na jego przebieg i na jakość uzyskanych produktów wytopu, są wahania własności fizycznych i składu chemicznego wsadu [BENE 76, KRÓL 82].

Z tego względu wraz z pojawieniem się z początkiem lat sześćdziesiątych komputerów przystosowanych do sterowania procesami technologicznymi jednym z pierwszych zadań rozwiązywanych za ich pomocą na użytek procesu wielkopiecowego było zadanie namiarowania wsadu [ORAM 61, WISD 63, SHIB 64, SORO 63, BROW 65, GREA 65, ROBI 67, BESW 69].

Namiarowanie wsadu było przy tym rozumiane jako określenie struktury i udziałów masowych poszczególnych komponentów wchodzących w skład tzw. naboju dla wielkiego pieca.

Rozwiązanie zadania namiarowania wsadu wymagało opracowania odpowiedniego modelu matematycznego, a następnie na jego podstawie syntezy algorytmów komputerowego obliczania wsadu dla wielkiego pieca.

Należy przy tym zauważyć, że nie dopracowano się jakiejś uniwersalnej metody formalizacji tego zagadnienia, dostosowanej do dowolnego wielkiego pieca lecz, że warunki wsadowe oraz realia technologiczne każdorazowo określały ramy tej formalizacji.

Sformułowanie zadania namiarowania wsadu wymaga:

a) pełnej charakteryzacji struktury i własności komponentów wsadowych;
b) określenia zbioru ograniczeń technologicznych i kryteriów komponowania wsadu;
c) wyboru metody rozwiązania.

Wsad do wielkiego pieca stanowi:

a) grupa komponentów żelazodajnych;
b) grupa topników (tzw. skała płonna);
c) koks.

Struktura tych poszczególnych grup komponentów może być znacznie zróżnicowana, w zależności od realiów wsadowych danej huty i możliwości uzyskania reprezentatywnych analiz ich składu chemicznego oraz oceny ich własności fizycznych.

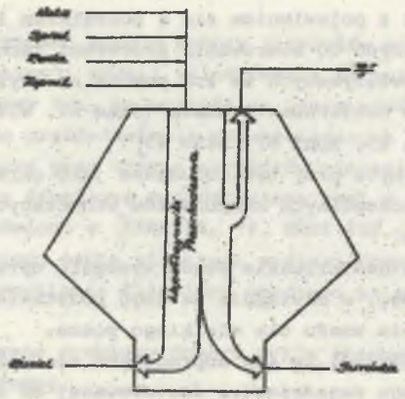
Grupę komponentów żelazodajnych mogą stanowić np. spiek, grudki, rudy kawałkowe; grupę topników np. kamień wapienny, dolomit, kwarcyt.

Ograniczenia technologiczne i kryteria komponowania wsadu określają łącznie model matematyczny namiarowania wsadu.

W celu ilustracji idei tworzenia modelu matematycznego, będącego następnie podstawą syntezy algorytmów komputerowego obliczania wsadu, można posłużyć się schematyczną reprezentacją wielkiego pieca przedstawioną na rys. 28.

Z rys. 28 widać, że idea tworzenia modelu matematycznego namiarowania wsadu polega na wypisaniu wymaganych przez technologię równań bilansowych charakteryzujących proces powstawania produktów finalnych (surówka, żużel, gaz wielkopiecowy) z komponentów wsadowych (rudy, topniki, koks).

Z technologii tego procesu wiadomo, że jego podstawę stanowią reakcje redukcji, których mechanizm zapewnia np. przechodzenie żelaza ze wsadu do surówki, siarki ze wsadu i koksu do żużla wielkopiecowego itp.



Rys. 28. Schematyczna reprezentacja procesu wielkopiecowego
Fig. 28. Schematic representation of a blast furnace process

W modelu matematycznym namiarowania wsadu efekt tych reakcji jest globalnie reprezentowany tzw. współczynnikami przechodzenia (podziału), których odpowiednio dobrane wartości (np. poprzez identyfikację) pozwalają na domknięcie wykorzystywanych bilansów.

Struktura tych bilansów jest oczywista i ma postać przedstawioną poniżej:

$$- \text{WEJŚCIE} + \text{WYJŚCIE} = 0$$

Ich liczba w tworzonym modelu matematycznym jest różna i zależy od strategii prowadzenia wielkiego pieca.

Najczęściej są to następujące bilanse [BENE 76]:

a) bilans żelaza;
b) bilans manganu;
c) bilans fosforu;
d) bilans składników skały płonnej;
e) bilans masowy surówki spustowej,
f) bilans masowy żużla spustowego,

uzupełnione ograniczeniami technologicznymi na takie wielkości, jak np.:

a) zasadowość żużla wielkopiecowego definiowana jako:

$$z_1 = \frac{(CaO)ż}{(SiO_2)ż} \quad \text{lub} \quad z_2 = \frac{(CaO)ż + (MgO)ż}{(SiO_2)ż} \quad \text{lub} \quad z_3 = \frac{(CaO)ż + (MgO)ż}{(SiO_2)ż + (AL_2O_3)ż}$$

gdzie: (.)ż oznacza odpowiedni bilans masowy w żużlu;

b) obciążenie wsadu definiowane jako:

$$N = \frac{R}{K} \quad \text{lub} \quad N = \frac{R + T}{K} \quad \text{lub} \quad N = \frac{(C)\text{wsadu}}{(Fe)\text{wsadu}}$$

gdzie:

R - masa części żelazodajnej wsadu;
T - masa topników we wsadzie;
(C) - bilans czystego węgla we wsadzie;
(Fe) - bilans czystego żelaza we wsadzie;

c) bogactwo wsadu B rozumiane jako procent czystego żelaza w całym wsadzie;

d) zawartości procentowe poszczególnych pierwiastków chemicznych w surówce np. siarki (S), manganu (Mn), fosforu (P), krzemu (Si) itp.

Tak utworzony model matematyczny namiarowania wsadu, uzupełniony odpowiednio dobraną funkcją celu, może być podstawą obliczeń i optymalizacji wsadu dla wielkiego pieca.

Dobór funkcji celu, reprezentującej kryterium komponowania wsadu, nie jest zagadnieniem prostym. Najczęściej technologom chodzi nie o wybór jednego optymalnego rozwiązania, ale o wskazanie zbioru dopuszczalnych rozwiązań i pozostawienie im wyboru odpowiedniego rozwiązania.

Oczywiście utrudnia to lub wręcz uniemożliwia wykorzystanie standardowych algorytmów programowania matematycznego.

Pewien kompromis, opisany w [KRZA 81, OLEK 83], dotyczy przyjęcia funkcji celu w postaci:

$$F(X) = (X - X_o)^T Q (X - X_o)$$

gdzie:

$X^T = [x_1, x_2, \ldots, x_n]$ - wektor udziałów masowych poszczególnych komponentów wsadowych;

$X_o^T = [x_1, x_2, \ldots, x_n]$ - wektor zadanych wartości udziałów masowych poszczególnych komponentów wsadowych;

$Q = [q_{ij}]_{nxn}$ - macierz diagonalna współczynników wagowych;

Tak przyjęta funkcja celu określa zmiany w strukturze i wielkości masowego udziału poszczególnych komponentów wsadu w odniesieniu do poprzedniego naboju. Minimalizacja tych zmian ma istotne znaczenie dla utrzymania stałej pojemności cieplnej strumienia materiałów wsadowych i stałych proporcji objętościowych w rozkładzie materiałów wsadowych.

Formalnie zadanie namiarowania wsadu można zapisać w postaci:

$$\min_X (X - X_o)^T Q (X - X_o)$$

przy ograniczeniach:

$$AX < B;$$

$$X > 0$$

gdzie:

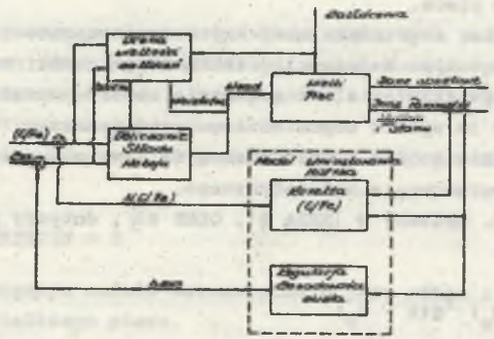
$A = [a_{ij}]_{nxm}$ - macierz współczynników przechodzenia;

$B^T = [b_1, b_2, \ldots, b_m]$ - wektor ograniczeń technologicznych.

Tak postawione zadanie namiarowania wsadu można rozwiązać wykorzystując standardową metodę programowania kwadratowego przedstawioną w [FIND 77].

Interesujące jest wykorzystanie rozwiązania zadania namiarowania wsadu do stabilizacji procesu wielkopiecowego "od góry".

Ilustruje to rys. 29, na którym przedstawiono uproszczony schemat funkcjonalny układu stabilizacji wielkiego pieca "od góry".



Rys. 29. Uproszczony schemat funkcjonalny układu stabilizacji wielkiego pieca "od góry"

Fig. 29. Simplified functional schematic of a "top-down" blast furnace stabilization schema

Przedstawiona na rys. 29 idea stabilizacji wielkiego pieca "od góry" opiera się na założeniu, że ocena jego stanu normalnego dokonywana będzie przez mistrzów wielkopiecowników w trakcie dialogu z komputerem [OLEK 83].

Wynika przede wszystkim z następujących przyczyn:

a) konieczności utrzymywania wskaźnika (C/Fe) we wsadzie na zadanym przez mistrzów poziomie;
b) konieczności utrzymywania globalnej zasadowości wsadu Z_{ws} w przedziale wynikającym z przewidywanych zmian zasadowości żużla spustowego.

Dla jej realizacji konieczne jest uzupełnienie modelu matematycznego namiarowania wsadu odpowiednimi modelami matematycznymi obejmującymi:

a) bilans globalnych wskaźników wsadu C/Fe i Z_{ws} w funkcji udziałów masowych wszystkich tworzyw wsadowych i ich składów chemicznych;
b) zależność pomiędzy globalną zasadowością wsadu Z_{ws} a zasadowością żużla spustowego $Z_{ż}$.

W [OLEK 83] przedstawiono sposób budowy tych modeli matematycznych otrzymując odpowiednio:

$$(C/Fe) = \frac{\alpha}{N \cdot B} \tag{6.3}$$

gdzie:

N = R/K - obciążenie wsadu;
B - bogactwo wsadu;
α - odpowiedni współczynnik;

$$Z_{ws} = \frac{W_p}{W_p + 1} \cdot Z_{ż} \tag{6.4}$$

gdzie:

$W_p = \frac{(MSiO_2)ż}{(M_{Si})Sur \cdot 2,14}$ - współczynnik podziału dla krzemionki.

Integracja tych zależności, z modelem matematycznym namiarowania wsadu, dla potrzeb komputerowego wspomagania mistrzów w zakresie stabilizacji wielkiego pieca "od góry", wymaga identyfikacji, analizy i oceny ich modelu wnioskowania.

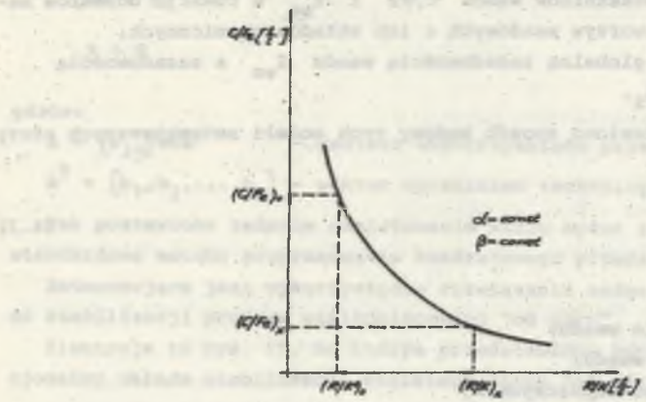
6.2.2. Model wnioskowania mistrzów

Jak już wspomniano, ocena stanu procesu wielkopiecowego dokonywana jest przez mistrzów i oni też określają wynikające z niej, wymagane zmiany obciążenia wsadu (R/K) bezpośrednio wpływające na wskaźnik (C/Fe). Wykorzystując zapisaną powyżej zależność (6.3), można określić zmiany wskaźnika (C/Fe) odpowiadające zmianom wskaźnika (R/K) wprowadzanym przez mistrza. Ilustruje to rys. 30.

Wykorzystanie w programie komputerowym zależności przedstawionej na rys. 30 jest oczywiste. Wprowadzona przez mistrza wielkopiecownika każda zmiana obciążenia wsadu przeliczona jest natychmiast na odpowiadającą jej zmianę (C/Fe) występującą w modelu matematycznym namiarowania wsadu.

Bardziej złożona sytuacja występuje w przypadku wykorzystania zależności (6.4) wiążącej zasadowość wsadu z zasadowością żużla spustowego.

Nietrudno zauważyć, że zależność ta ma charakter statyczny, w związku z czym nie uwzględnia opóźnienia transportowego pomiędzy zmianą parametrów wsadu a odpowiadającą jej zmianą parametrów surówki i żużla spustowego.



Rys. 30. Ilustracja zależności pomiędzy (C/Fe) i (R/K)

Fig. 30. Interdependency between (C/Fe) and (R/K)

Występujący w niej współczynnik podziału dla krzemionki może być przy tym wyznaczany w sposób przybliżony, z częstotliwością spustów, gdy dysponuje się odpowiednimi danymi.

Ze względu na brak jak dotychczas odpowiedniego modelu matematycznego, opisującego dynamikę procesu wielkopiecowego, dla wykorzystania zależności (6.4) konieczne jest oparcie się na odpowiednim modelu wnioskowania mistrzów wielkopiecowników.

Istota tego modelu wnioskowania polega na określeniu związku między oceną stanu wielkiego pieca a wielkością współczynnika W_p podziału dla krzemionki i charakterem zmian zależności (6.4).

Każdorazowo przy spuście mistrz wielkopiecownik ocenia stan wielkiego pieca, analizując konfiguracje wartości składu chemicznego surówki i zasadowości żużla spustowego.

Istota tego modelu wnioskowania polega na określeniu związku między oceną stanu wielkiego pieca a wielkością współczynnika W_p podziału dla krzemionki i charakterem zmian zależności (6.4).

Każdorazowo przy spuście mistrz wielkopiecownik ocenia stan wielkiego pieca, analizując konfiguracje wartości składu chemicznego surówki i zasadowości żużla spustowego.

Na tej podstawie określa bieg wielkiego pieca. Każdemu rozróżnianemu przez niego biegowi wielkiego pieca odpowiada przedział wartości dla współczynnika W_p podziału dla krzemionki.

Ustalenie wartości współczynnika W_p jest równoważne z określeniem charakteru przewidywanych zmian zależności (6.4).

Dla reprezentacji tych zmian wykorzystuje się zmodyfikowaną postać zależności (6.4) wprowadzając dwie proste ograniczające o równaniach:

$$z^{(1)}_{ws} = \frac{W_p + d_1(W_p)}{W_p + d_1(W_p) + 1} z_{\dot{z}}; \qquad z^{(2)}_{ws} = \frac{W_p + d_2(W_p)}{W_p + d_2(W_p) + 1} z_{\dot{z}}. \tag{6.4}$$

gdzie:

$d_1(W_p)$ i $d_2(W_p)$ - określone w modelu wnioskowania mistrzów wielkopiecowników współczynniki korygujące.

Wykorzystanie zależności (6.4) dla określenia ograniczeń na zasadowość wsadu, w modelu matematycznym namiarowania, jest następujące.

Z częstotliwością spustów estymowana jest wartość współczynnika podziału dla krzemionki zgodnie z zależnością rekurencyjną:

$$\hat{W}_p(i) = \alpha W_p(i) + (1 - \alpha)\hat{W}_p(i - 1), \tag{6.5}$$

gdzie:

$W_p(i)$ - obliczona wartość współczynnika podziału dla krzemionki przy spuście w chwili i;

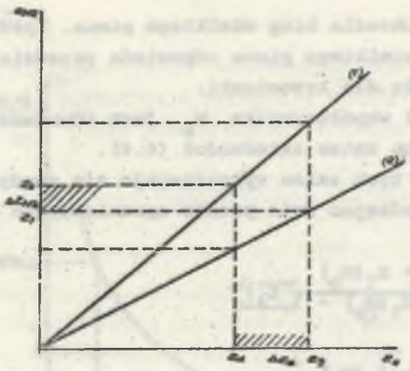
α - współczynnik wygładzania eksponencjalnego określany eksperymentalnie.

Dla tak określonej estymaty wartości współczynnika podziału dla krzemionki, z modelu wnioskowania mistrzów, dobierane są współczynniki korekcyjne w równaniach (6.4).

Następnie przy zadanym, dopuszczalnym przedziale zmian zasadowości żużla określany jest przedział odpowiednich, dopuszczalnych zmian zasadowości wsadu. Ilustruje to schematycznie rys. 31.

Wykorzystanie przedstawionego na rys. 31 sposobu określania ograniczeń na zasadowość wsadu, uwzględniającego zadany przedział dopuszczalnych zmian zasadowości żużla i spodziewane "zachowanie się" wielkiego pieca, wymaga określenia modelu wnioskowania mistrzów.

W celu identyfikacji, analizy i oceny takiego modelu wnioskowania przeprowadzono obserwację prowadzenia przez nich procesu wielkopiecowego w ciągu trzech zmian roboczych.



Rys. 31. Dobór ograniczeń na zasadowość wsadu
Fig. 31. Choice of limitations for charge base balance

Przy każdym spuście notowano wartości poszczególnych analiz składu chemicznego surówki oraz zasadowość żużla spustowego - atrybuty mierzalne, a także, określany przez mistrzów, numer biegu wielkiego pieca - atrybut decyzyjny.

Następnie przypisano poszczególnym biegom wielkiego pieca dobrane eksperymentalnie przedziały wartości estymat współczynnika podziału dla krzemionki i odpowiadające im wartości współczynników korekcyjnych.

Przyjęto przy tym następujący sposób kodowania wyróżnianych przez mistrzów biegów wielkiego pieca:

"bieg nadmiernie gorący" - numer 1;
"bieg gorący" - numer 2;
"bieg normalny" - numer 3;
"bieg chłodny" - numer 4.

Odpowiedni protokół oceny i klasyfikacji biegu wielkiego pieca przedstawiono w tabeli 30.

Klasyfikacja biegów wielkiego pieca dokonana przez mistrzów ma postać

$$F = \{X_1, X_2, X_3, X_4\},$$

gdzie:

$X_1 = \{28,29,30\}$;

$X_2 = \{1,4,5,9,17,26,31,32,33,34\}$;

$X_3 = \{2,3,6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,18,19,20,25,27\}$;

$X_4 = \{21,22,23,24\}$.

Tabela 30

Protokół oceny i klasyfikacji biegu wielkiego pieca

Numer spustu	Wartości atrybutów mierzalnych					Numer biegu
	Si	Mn	P	S	$z_{\dot{z}}$	
1	0,79	0,71	0,08	0,016	1,1	2
2	0,49	0,63	0,08	0,017	1,1	3
3	0,57	0,65	0,08	0,016	1,1	3
4	0,68	0,68	0,08	0,015	1,09	2
5	0,84	0,71	0,08	0,015	1,1	2
6	0,63	0,68	0,08	0,018	1,13	3
7	0,53	0,62	0,08	0,02	1,11	3
8	0,56	0,65	0,08	0,019	1,12	3
9	0,72	0,64	0,08	0,018	1,14	2
10	0,63	0,61	0,08	0,018	1,11	3
11	0,54	0,59	0,08	0,023	1,12	3
12	0,63	0,66	0,08	0,018	1,11	3
13	0,63	0,66	0,08	0,015	1,11	3
14	0,59	0,58	0,07	0,018	1,1	3
15	0,47	0,64	0,08	0,017	1,13	3
16	0,57	0,60	0,08	0,017	1,14	3
17	0,73	0,62	0,08	0,016	1,11	2
18	0,60	0,63	0,08	0,016	1,1	3
19	0,64	0,64	0,08	0,017	1,12	3
20	0,55	0,62	0,08	0,018	1,12	3
21	0,44	0,55	0,08	0,022	1,11	4
22	0,27	0,47	0,08	0,028	1,13	4
23	0,34	0,48	0,07	0,023	1,14	4
24	0,40	0,46	0,07	0,024	1,13	4
25	0,50	0,65	0,08	0,014	1,14	3
26	0,72	0,70	0,08	0,012	1,13	2
27	0,53	0,70	0,08	0,014	1,14	3
28	0,95	0,78	0,08	0,009	1,13	1
29	0,86	0,77	0,08	0,013	1,13	1
30	0,96	0,80	0,09	0,013	1,13	1
31	0,65	0,64	0,08	0,013	1,13	2
32	0,81	0,75	0,09	0,012	1,14	2
33	0,84	0,70	0,09	0,015	1,17	2
34	0,81	0,67	0,08	0,015	1,16	2

Dla analizy Mes - dokładności aproksymacji poszczególnych podzbiorów F i określenia parametrów klasyfikacji wykorzystano relację ε-nierozróżnialności dobierając eksperymentalnie:

$$\varepsilon_{Si} = 0{,}03,\quad \varepsilon_{Mn} = 0{,}03,\quad \varepsilon_{P} = 0{,}03,\quad \varepsilon_{S} = 0{,}003,\quad \varepsilon_{Zż} = 0{,}01.$$

Mes - dokładność aproksymacji zbiorów F przedstawiono w tabeli 31.

Tabela 31

Mes - dokładność aproksymacji zbiorów F

Numer biegu wielkiego pieca	Liczba elementów	Liczba elementów dolnej aproksymacji	Liczba elementów górnej aproksymacji	Mes - dokładność aproksymacji
1	3	3	3	1,0
2	10	10	10	1,0
3	17	17	17	1,0
4	4	4	4	1,0
$\gamma_{Mes}(F)$	-	-	-	1,0
$\beta_{Mes}(F)$	-	-	-	1,0

Zbadano zależność pomiędzy atrybutami ze zbioru Mes.

Tabela 32 zawiera wyniki obliczeń przedstawiające związek między usuwanymi atrybutami ze zbioru Mes a liczbą zbiorów elementarnych.

Tabela 32

Zbiory elementarne przy usuwaniu atrybutów

Usunięty atrybut	Żaden	{Si}	{Mn}	{P}	{S}	{Zż}
Liczba zbiorów elementarnych	29	18	26	29	28	24

Z tabeli 32 wynika, że atrybut {P} jest zbędny w opisie oceny i klasyfikacji biegu wielkiego pieca.

Tabela 33 przedstawia wpływ atrybutów ze zbioru Mes na Mes-dokładność aproksymacji poszczególnych zbiorów rodziny F, a także na jakość i dokładność aproksymacji klasyfikacji F przez te atrybuty.

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 33, nietrudno zauważyć, że istnieje redukt atrybutów Mes ze względu na klasyfikację F.

Tabela 33

Wpływ atrybutów na Mes-dokładność aproksymacji i klasyfikacji zbiorów z F

Numer biegu wielkiego pieca	Usunięty atrybut mierzalny					
	żaden	{Si}	{Mn}	{P}	{S}	{Zż}
1	1,0	0,5	1,0	1,0	0,0	0,5
2	1,0	0,28	1,0	1,0	1,0	1,0
3	1,0	0,6	1,0	1,0	1,0	0,88
4	1,0	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0
$\gamma_{Mes}(F)$	1,0	0,65	1,0	1,0	0,92	0,91
$\beta_{Mes}(F)$	1,0	0,47	1,0	1,0	0,94	0,91

Redukt ten to $Mes_1 = \{Si, S, Zż\}$, a więc dla klasyfikacji biegów wielkiego pieca wystarczy analiza wartości zawartości w surówce spustowej: krzemu, siarki, a także zasadowości żużla spustowego.

Odpowiedni algorytm klasyfikacji, np. w postaci drzewa oceny biegu wielkiego pieca, można zbudować na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 30.

Związek między biegiem wielkiego pieca, estymowanymi wartościami współczynnika podziału dla krzemionki oraz wartościami współczynników korygujących przedstawia tabela 34.

Tabela 34

Biegi wielkiego pieca a wartości W_p i współczynników korekcyjnych

Numer biegu wielkiego pieca	Przedział zmian wartości współczynnika W_p	Wartości współczynników korygujących	
		$d_1(W_p)$	$d_2(W_p)$
1	$W_p < 10$	2	-1
2	$W_p = 10$	1	-1
3	$10 < W_p \leq 25$	1	-1
4	$W_p > 25$	1	-2

Wykorzystanie tabeli 34 dla bieżącego określania ograniczeń na zasadowość wsadu jest oczywiste.

Z rytmem spustów wprowadzane są do komputera odpowiednie dane dotyczące analizy chemicznej surówki i żużla spustowego, a także szacunkowej wielkości ich mas.

Na tej podstawie jest klasyfikowany bieg wielkiego pieca i określana estymata współczynnika podziału dla krzemionki.

Na podstawie tabeli 34 dobierane są odpowiednie wartości współczynników korygujących.

Przy zadanych ograniczeniach na zasadowość żużla spustowego, opierając się na równaniach (6.4), zgodnie z zasadą schematycznie przedstawioną na rys. 31, określane są ograniczenia na zasadowość wsadu.

Z rys. 31 nietrudno zauważyć, że jeżeli $\Delta Z_{ws} = Z_2 - Z_1$, to:

$$Z_1 = \frac{W_p + d_2(W_p)}{W_p + d_2(W_p) + 1} \cdot Zg;$$

$$Z_2 = \frac{W_p + d_1(W_p)}{W_p + d_1(W_p) + 1} \cdot Zd.$$

6.2.3. Doświadczenia eksploatacyjne

Przedstawiona na rys. 29 idea stabilizacji wielkiego pieca "od góry" została praktycznie zrealizowana i pozytywnie zweryfikowana w jednej z hut.

W tym celu opracowano interaktywny program komputerowego wspomagania mistrzów wielkopiecowników o nazwie NAMIAR, który został zaimplementowany w komputerze PDP 11/05 pod systemem operacyjnym RSX-11M [KRZA 81].

Za pomocą dialogu z komputerem istniała możliwość bieżącej oceny biegu wielkiego pieca oraz doboru ograniczeń technologicznych i materiałowych dla modelu matematycznego namiarowania wsadu.

Następnie komputer rozwiązywał zadanie namiarowania wsadu i sporządzał odpowiedni raport w formie graficznej zbliżonej do tradycyjnie używanej w hucie.

Przewidziano także i zrealizowano możliwość integracji programu NAMIAR z kolejno rozwijanymi i implementowanymi programami komputerowego wspomagania mistrzów, np. ROZSYP - modelowania rozkładu materiałów wsadowych w gardzieli wielkiego pieca i KOMOS - obliczania parametrów komory spalania [ZSAK 80].

Długotrwała obserwacja sposobu wykorzystywania przez mistrzów wielkopiecowników tych programów oraz stosowania w praktyce ruchowej uzyskiwanych wyników obliczeń potwierdziła ich przydatność i przyniosła także wymierne efekty ekonomiczne (umowa wdrożeniowa z ZSAK PAN).

6.3. Podsumowanie

Przedstawiono dwa przykłady podejścia do rozwiązania zagadnień syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi.

Przykład pierwszy dotyczył syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym do wypalania klinkieru na podstawie implementacji odpowiednich modeli wnioskowania palaczy.

Przeprowadzono identyfikację, analizę i ocenę modeli wnioskowania palaczy w kontekście osiąganych przez nich rezultatów sterowania.

Pokazano, jak takie modele wnioskowania mogą być wykorzystane do syntezy odpowiednich algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym.

Omówiono zagadnienie doboru cyklu sterowania i syntezy obiektowego systemu operacyjnego.

Przedstawiono także wyniki komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym do wypalania klinkieru opartego na zaimplementowanych algorytmach.

Przykład drugi dotyczył syntezy algorytmów komputerowego wspomagania mistrzów wielkopiecowników przy sterowaniu wielkim piecem w jednej z hut.

Ograniczono się przy tym do omówienia zagadnień sterowania wielkim piecem "od góry".

Szczególną uwagę zwrócono na sformułowanie i rozwiązanie problemu namiarowania wsadu dla wielkiego pieca oraz wykorzystanie opracowanego modelu matematycznego do stabilizacji procesu wielkopiecowego "od góry".

Wymagało to wykorzystania modelu wnioskowania mistrzów wielkopiecowników w zakresie zintegrowanej oceny biegu wielkiego pieca i określenia na tej podstawie ograniczeń na zasadowość wsadu.

Przeprowadzono identyfikację, analizę i ocenę takiego modelu wnioskowania, przedstawiając syntetyczne omówienie uzyskanych wyników.

Pokazano, jak model wnioskowania mistrzów wielkopiecowników może być wykorzystany do integracji modelu matematycznego namiarowania wsadu z cząstkowymi modelami matematycznymi opisującymi ograniczenia dla stabilizacji wielkiego pieca "od góry".

Syntetycznie scharakteryzowano uzyskane doświadczenia eksploatacyjne systemu komputerowego wspomagania mistrzów wielkopiecowników w jednej z hut.

R o z d z i a ł VII

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono propozycję metody syntezy algorytmów komputerowego sterowania złożonymi obiektami technologicznymi w przypadku, gdy nie dysponuje się ich modelami matematycznymi, a posiadana informacja ma charakter niepełny i przybliżony.

Jej istota polegała na przyjęciu założenia, że należy w takich przypadkach wykorzystać wiedzę i doświadczenie operatorów sterujących takimi obiektami.

Przedstawiono dwa przykłady reprezentujące szeroką klasę złożonych obiektów technologicznych sterowanych ręcznie przez doświadczonych operatorów.

Szczegółowa analiza sposobu sterowania przez palaczy piecem obrotowym do wypalania klinkieru w jednej z cementowni przyniosła wyniki wskazujące, że u podstaw takiego sterowania stoi dokonywana przez palaczy bieżąca ocena i klasyfikacja sytuacji w obiekcie, a następnie na tej podstawie odpowiedni wybór oddziaływań sterujących.

W wyniku długotrwałych obserwacji zachowania się palaczy przy sterowaniu piecem obrotowym udało się określić te parametry obiektu, których wartości biorą pod uwagę i analizują przy bieżącej ocenie i klasyfikacji sytuacji oraz te parametry obiektu, na które oddziałują dążąc do osiągnięcia celu sterowania.

Było to podstawą przyjęcia założenia, że można opracować odpowiednie algorytmy "naśladujące" zachowanie się palaczy przy sterowaniu piecem obrotowym i umożliwiające tym samym komputerowe sterowanie w czasie rzeczywistym tym obiektem.

W przypadku wielkiego pieca zwrócono przede wszystkim uwagę na złożoność i różnorodność zadań rozwiązywanych przez mistrzów w procesie sterowania.

Starano się przy tym wyselekcjonować te z nich, które można by rozwiązać za pomocą komputera, wprowadzając go tym samym do efektywnego wspomagania mistrzów wielkopiecowników w procesie sterowania.

W wyniku długotrwałych obserwacji zachowania się mistrzów w procesie sterowania wielkim piecem ustalono, na czym polegają dokonywane przez nich ocena, analiza i klasyfikacja sytuacji w wielkim piecu i jak od wyników tej analizy zależą podejmowane przez nich sekwencje czynności związane ze sterowaniem. Przedstawiono uporządkowany ich zapis za pomocą tablic decyzyjnych.

Wnioski wynikające z omówionych przykładów sterowania przez doświadczonych operatorów złożonymi obiektami technologicznymi były podstawą wprowadzenia pojęcia modelu wnioskowania, który wykorzystują przy sterowaniu.

Przedstawiono strukturę takiego modelu wnioskowania, szczegółowo omawiając jej poszczególne elementy.

Szczególną uwagę zwrócono przy tym na związek między przestrzenią celów sterowania a przestrzenią obserwacji, pokazując, jak określenie celu w przestrzeni celów sterowania może być odwzorowane w przestrzeni obserwacji, dokonując jej rozbicia na stany charakterystyczne obiektu.

Omówiono także relację między wyróżnionymi stanami charakterystycznymi obiektu a określonymi w przestrzeni sterowania sterowaniami charakterystycznymi.

Przedstawiono formalny zapis modelu wnioskowania, a także jego reprezentację w postaci odpowiedniej tablicy decyzyjnej.

Pokazano strukturę programu decyzyjnego będącego zapisem równoważnej mu tablicy decyzyjnej.

Wykorzystując formalne pojęcie modelu wnioskowania, sformułowano podstawowe problemy, których rozwiązaniu poświęcona była praca.

Szczególną uwagę zwrócono przy tym na zagadnienie przygotowania i reprezentacji danych dla identyfikacji, analizy i oceny modeli wnioskowania operatorów przy klasyfikacji sytuacji i sterowaniu obiektem.

Przedstawiono formalny zapis problemów do rozwiązania, stwierdzając jednocześnie, że nie można ich rozwiązać bezpośrednio, wykorzystując omówione w rozdziale 2| pracy metody klasyczne i nieklasyczne identyfikacji modeli matematycznych obiektów i na ich podstawie syntezy algorytmów komputerowego sterowania.

Proponowane w pracy rozwiązanie sformułowanych problemów oparte zostało na wykorzystaniu elementów teorii zbiorów przybliżonych.

W tym celu wprowadzono wykorzystywane w pracy pojęcia podstawowe oraz przytoczono najistotniejsze wyniki uzyskane w teorii zbiorów przybliżonych.

Zaproponowano także niektóre potrzebne do rozwiązania postawionych problemów modyfikacje wykorzystywanych pojęć i wyników, przedstawiając jednocześnie ich zapis formalny w kategoriach teorii zbiorów przybliżonych.

Szczególną uwagę poświęcono analizie aspektów obliczeniowych związanych z wykorzystaniem elementów teorii zbiorów przybliżonych do rozwiązania postawionych problemów.

Wyszczególniono podstawowe elementy procesu obliczeniowego, przedstawiając jednocześnie zapis w języku PASCAL przykładowych algorytmów.

Nawiązując ponownie do przykładów sterowania przez operatorów piecem obrotowym do wypalania klinkieru i wielkim piecem, przedstawiono rozwiązanie postawionych problemów.

W przypadku pieca obrotowego szczególną uwagę zwrócono przy tym na identyfikację, analizę i ocenę modeli wnioskowania palaczy w aspekcie klasyfikacji sytuacji w piecu obrotowym, a także wyboru i realizacji sterowania.

Pokazano, jak można wykorzystać model wnioskowania palacza do syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym.

Omówiono zagadnienie implementacji komputerowej tak otrzymanych algorytmów sterowania, zwracając jednocześnie uwagę na dobór cyklu sterowania i syntezę obiektowego systemu operacyjnego.

Przedstawiono wyniki komputerowego sterowania piecem obrotowym do wypalania klinkieru.

W przypadku wielkiego pieca szczególną uwagę zwrócono na komputerowe wspomaganie mistrzów wielkopiecowników przy sterowaniu "od góry".

Syntetycznie omówiono zagadnienie namiarowania wsadu, szczególną uwagę zwracając na strukturę odpowiedniego modelu matematycznego.

Pokazano, jak można wykorzystać model wnioskowania mistrzów do integracji modelu matematycznego namiarowania wsadu z cząstkowymi modelami matematycznymi dotyczącymi globalnego bilansu węgla i żelaza we wsadzie, a także relacji pomiędzy zasadowością wsadu ą wynikową zasadowością żużla spustowego.

Przedstawiono strukturę odpowiedniego układu stabilizacji wielkiego pieca "od góry" i pokrótce omówiono wyniki doświadczeń eksploatacyjnych przeprowadzanych w jednej z hut.

Podstawowe tezy pracy, w kontekście przykładu pieca obrotowego, można przy tym sformułować następująco:

a) w przypadku braku modeli matematycznych złożonych obiektów technologicznych i niepełnej lub przybliżonej informacji o ich własnościach należy wykorzystać wiedzę i doświadczenie operatorów sterujących takimi obiektami;
b) możliwe są identyfikacja, analiza i ocena modeli wnioskowania operatorów przy sterowaniu;
c) na podstawie zidentyfikowanych i zweryfikowanych modeli wnioskowania operatorów możliwa jest synteza, na ich podstawie, odpowiednich algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi;
d) do rozwiązania tych zadań można wykorzystać elementy teorii zbiorów przybliżonych;
e) wyniki sterowania przez komputer w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi, na podstawie tak otrzymanych algorytmów, nie są gorsze od wyników sterowania ręcznego przez doświadczonych operatorów.

Przykład wielkiego pieca miał na celu ilustrację tezy, że modele wnioskowania operatorów mogą być także efektywnie wykorzystane do integracji cząstkowych modeli matematycznych i określenia struktury programowej systemu komputerowego.

Na tych przykładach wykazano także przydatność i efektywność wykorzystania elementów teorii zbiorów przybliżonych do identyfikacji, analizy i oceny modeli wnioskowania operatorów.

W odniesieniu do sformułowanych i rozwiązanych w pracy zagadnień formalizacja ta charakteryzuje się przede wszystkim:

a) prostotą ujęcia i zapisu oceny i klasyfikacji przez operatorów bieżącej sytuacji w sterowanym obiekcie jako zadania aproksymacji zbioru lub rodziny zbiorów w odpowiedniej przestrzeni aproksymacji;
b) możliwością formalnej analizy zależności między wyróżnionymi zbiorami atrybutów warunkowych i decyzyjnych, prowadzącej do redukcji posiadanej informacji i syntezy zbioru odpowiednich reguł decyzyjnych;
c) zachowaniem informacji wyjściowej, w postaci odpowiednich protokołów, co umożliwia ich ponowną analizę, przy udziale operatorów, w sytuacji niskiej jakości i dokładności klasyfikacji bądź niejednoznaczności reguł decyzyjnych.

Na podkreślenie zasługuje także przejrzystość, wynikającego z tej formalizacji, procesu obliczeniowego realizującego podstawowe etapy wykorzystania teorii zbiorów przybliżonych do identyfikacji, analizy i oceny modeli wnioskowania operatorów.

W pracy zwrócono także uwagę na efektywność wykorzystania języka PROLOG do komputerowej implementacji wyselekcjonowanego zbioru reguł decyzyjnych.

Ma to duże znaczenie praktyczne ze względu na wzrastającą popularność tego języka wśród użytkowników zwłaszcza systemów mikrokomputerowych [POSS 86].

Rozdział VIII

ZAKOŃCZENIE

W pracy skoncentrowano się przede wszystkim na przedstawieniu i rozwiązaniu problemu syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym złożonymi obiektami technologicznymi, wychodząc od przejęcia i analizy modeli wnioskowania operatorów.

Zaproponowana metoda ma, zdaniem Autora, znacznie szersze znaczenie i może być efektywnie wykorzystane do syntezy i implementacji komputerowej nowej klasy systemów informacyjnych, tzw. systemów ekspertowych, [MRÓZ 87a, 87b].

Podstawowe problemy syntezy takich systemów, polegające na:

a) przejmowaniu wiedzy od ekspertów;
b) reprezentacji tej wiedzy w komputerze;
c) udostępnienia tej wiedzy użytkownikom;

mogą być efektywnie rozwiązane przy użyciu elementów teorii zbiorów przybliżonych.

Dotyczy to przede wszystkim tzw. systemów ekspertowych pierwszej generacji [HAYE 83, JOHN 85, FORS 84], w których przyjętą formą zapisu i reprezentacji w komputerze wiedzy ekspertów jest zbiór reguł decyzyjnych, z których każda ma strukturę przedstawioną poniżej:

IF {zbiór warunków} THEN {zbiór czynności} .

W pracy wykazano, jak na podstawie odpowiednich protokołów można generować takie reguły decyzyjne, sprawdzając jednocześnie ich formalną poprawność.

Szczególnie interesujące może być wykorzystanie zaproponowanego w pracy podejścia do syntezy szerokiej klasy systemów diagnostycznych.

Pozytywne rezultaty uzyskano także, wykorzystując zaproponowane podejście do selekcji czynników powodujących zakażenia pooperacyjne w jednym ze szpitali, a także do analizy sprawności pilotów w wybranych fazach lotu (np. lądowanie) [ZSAK 87].

Autor wykorzystał także opisane podejście do syntezy algorytmów komputerowego wspomagania technologów w zakresie optymalizacji namiarowania wsadu i korekcji wytopów nietrafionych na wydziale odlewni wlewków jednej z hut [MRÓZ 80], a także przy operatywnym kierowaniu kompleksem spiekania - piec szybowy [MRÓZ 83b].

LITERATURA

ALTY 84 Alty J.L., Coombs M.J.: Expert systems concepts and examples. NCC Publ., London.

ARBA 74 Арбачаускене Х., Балтрунас И., Немура А., Ненорта А., Рубикас Г.: Идентификация динамических систем. Изд. МИНТИС, Вильнюс.

ASTR 70 Astrom K.J.: Introduction to stochastic control theory. Academic Press, New York.

ATHA 69 Athans M., Falb P.L.: Sterowanie optymalne. WNT, Warszawa.

BELL 70 Bellman R., Zadeh L.A.: Decision-making in a fuzzy environment. Management Science vol. 17, p. 141.

BEND 74 Bendat J.S., Piersol A.G.: Randon data: analysis and measurement procedures. Wiley-Interscience, New York.

BENE 76 Benesch R.: Proces wielkopiecowy. Wyd. "Śląsk", Katowice.

BESW 69 Beswick A.: Blast furnace control by computer. Journal Iron and Steel Inst., June 1969.

BIAŁ 76 Białaszewicz J., Aderek A., Maliszewski K.: Oprogramowanie podstawowe komputerowych systemów sterowania. WNT, Warszawa.

BIRK 76 Birkhoff G., Bartee T.C.: Modern applied algebra. McGraw-Hill Book Co., New York - London.

BORY 86 Boryczka M.: Komputerowe algorytmy przybliżonej analizy danych. Podstawy sterowania t. 16, z. 2, p. 249

BRAA 79 Braae M., Rutherford D.A.: Selection of parameters for a fuzzy logic controller. Fuzzy Sets and Systems vol. 2, p. 185.

BROW 65 Brower A.: Digital control computers for the metals industry. Proceeding ISA, February 1965.

BRUS 74 Брусиловский Р.Д., Распопов Б.М., Седюгин А.А.: Управление процессом обжига цементного клинкера во вращающейся печи. Автоматизация планирования и управления, ИЛИМ, Фрунзе.

BURN 74 Bubnicki Z.: Identyfikacja obiektów sterowania. PWN, Warszawa.

CHAU 70 Chauvent G.: Une méthode de resolution de problème inverse dans les équations aux derivées partielles. Bull. Polish Acad. Sc. T.S., vol. XVIII.

CLOC 82 Clocksin W., Mellish C.: Programming in PROLOG. Springer-Verlag, Berlin.

CYPK 84 Цыпкин Я.З.: Основы информационной теории идентификации. Изд. Наука, Москва.

CZAC 75 Czachor G.: Automatic control of a cement rotary kiln. Materiały Międzynarodowej Konferencji nt.: Mathematical Modelling, Politechnika Wrocławska, Wrocław.

DOWG 74 Довгаль А.М., Шумилов К.А.: Проблемы автоматизированного управления доменным производством. Изд. Наукова Думка, Киев.

DREW 71 Drewniak J., Mrózek A.: Metoda identyfikacji układów opisanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi typu parabolicznego. Podstawy sterowania t. 1, z. 2, p. 6.

EFST 86 Efstathion J., Mamdami E.H.: Expert systems and how they are applied to industrial decision making. G. Mitra and UNICOM (eds.), North-Holland, Amsterdam.

EVAN 70 Evans R.E., Herz J.H.: Seven years of process computer control at California Portland Cement Co. IEEE Trans. Ind. Gen. Appl., IGA-6, vol. 5, Sept/Octob. 1970.

EYKH 74 Eykhoff P.: System identification. Parameter and state estimation. John Wiley and Sons, New York.

FIND 77 Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. PWN, Warszawa.

FORS 84 Forsyth R.: Expert systems. Principles and case studies. Chapman and Hall, London.

FREI 76 Freitag G., Gode W., Jacobi H., Lautz H., Simon J.: Einführung in die Entscheidungsstabellentechnik. Veb Verlag Technik, Berlin.

GELF 73 Гельфанд Я.Е.: Управление цементным производством с использованием средств вычислительной техники. Изд. Стройиздат, Москва.

GIMM 69 Гиммельфарб А.А., Ефименко Г.Г.: Автоматическое управление доменным процессом. Изд. Металлургия, Москва.

GOŁU 74 Gołubowicz J.: System segmentacji czasowej i pamięciowej obsługi zgłoszeń. Podstawy Sterowania t. 4, z. 4, p. 335.

GOŁU 75 Gołubowicz J., Mrózek A.: Dobór długości segmentu w systemie segmentacji czasowej. Podstawy Sterowania t. 5, z. 3, p. 211.

GREA 65 Greaves M., Ponstingle J.: Automation today charging blast furnaces. Automation, 12 (5), 1965.

GUPT 79 Gupta M.M., Ragade R.K., Yager R.R.: Advances in fuzzy set theory and applications. North-Holland, Amsterdam.

HARR 72 Harrison T.: Handbook of industrial control computers. John Wiley and Sons, New York.

HAYE 83 Hayes-Roth R., Waterman D., Lenat D.: Building Expert Systems. Addison-Wesley, New York.

HIMM 70 Himmelblau D.M.: Process analysis by statistical methods. John Wiley and Sons Inc., New York.

HIMM 72 Himmelblau D.M.: Applied nonlinear programming. McGraw-Hill, New York.

HUMB 73 Humby E.: Programs from decision tables. Macdonald, London and American Elsevier, New York.

ICKO 75 Ицкович Э.Л.: Контроль производства с помощью вычислительных машин. Изд. Энергия, Москва.

IGLE 78 Iglewski M., Madej J., Matwin S.: Pascal. Język wzorcowy i Pascal 6000. WNT, Warszawa.

IWAC 75 Ивахненко А.Г.: Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Изд. Техника, Киев.

IWAC 76 Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д.: Принятие решений на основе самоорганизации. Изд. Советское Радио, Москва.

IWAN 75 Иванов В.В.: Методы алгоритмизации непрерывных производственных процессов. Изд. Наука, Москва.

JOHN 85 Johnson L., Keramon E.T.: Expert systems technology - a guide. Abacus Press, London.

KAIP 82 Kaipov V.K., Seliugin A.A.: Classification in Fuzzy environments. [W:] Approximate reasoning in decision analysis. North-Holland Publ. Co. 119.

KAIP 83 Каипов В.Х., Коханова Е.В.: О основах измерения расстояний между векторами с расплывчатыми компонентами. [B:] Синтез и применение алгоритмов обработки информации и управления при различных типах неопределенности. Изд. ИЛИМ, Фрунзе.

KAIP 85a Каипов В.Х., Коханова Е.В., Селюгин А.А.: Управление объектами в условиях неопределенности расплывчатого типа. [B:] Адаптация и оптимизация систем управления. Изд. ИЛИМ, Фрунзе.

KAIP 85b Каипов В.Х., Селюгин А.А., Дубровский С.А.: О решении некоторых задач управления методами прикладной теории расплывчатых множеств. Podstawy sterowania t. 15, z. 1-2.

KAMI 75 Каминскас В., Немура А.: Статистические методы в идентификации систем. Изд. МИНИТИС, Вильнюс.

KICK 76 Kickert W.J.M., Van Nauta Lemke H.R.: Application of a fuzzy controller in a warm water plant. Automatica, 12, p. 301.

KICK 78 Kickert W.J.M., Mamdami E.H.: Analysis of a fuzzy logic controller. Fuzzy Sets and Systems 1, p. 29.

KING 75 King P.J., Mamdami E.H.: The application of fuzzy control systems to industrial processes. IFAC 6-th Triennal World Congress, Boston/Cambridge MA, August.

KŁYK 72 Клыков Ю.И., Поспелов Д.А.: Ситуационное управление в АСУ. Управляющие машины и системы № 1, с. 27.

KŁYK 74 Клыков Ю.И.: Ситуационное управление большими системами. Изд. Энергия, Москва.

KMHK 79 Instrukcje technologiczne wielkich pieców. Kombinat Metalurgiczny Huta Katowice, Dąbrowa Górnicza.

KOST 75 Костюк В.И.: Адаптивные системы идентификации. Изд. Техника, Киев.

KRAS 74 Красовский А.А., Фазовое пространство и статистическая теория динамических систем. Изд. Наука, Москва.

KRÓL 82 Król L.: Nowoczesny wielki piec. Wyd. "Śląsk", Katowice.

KRZA 81 Krzaklewski M., Mrózek A., Winiarczyk R., Szafranek A.: NAMIAR - Program komputerowego wspomagania mistrzów wielkiego pieca nr 2 Huty Katowice. Sprawozdania z prac Rady Naukowo-Technicznej Kombinatu Metalurgicznego Huta Katowice, październik 1981.

LEC 63 Lec W.T.: Cement manufacture under computer control. Cement, Lime and Gravel, vol. 38 (3), March 1963.

LEE 68 Lee T.H., Adams G.E., Gaines W.M.: Computer process control: modeling and optimization. John Wiley and Sons, New York.

MAMD 74 Mamdami E.H.: Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. IEEE vol. CS-121, p. 1585.

MAMD 75 Mamdami E.H., Assilian S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int. Journal of Man-Machine Studies vol, 7, p. 1.

MAMD 76 Mamdami E.H.: Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. Int. Journal of Man-Machine Studies vol. 8, p. 669.

MAMD 83 Mamdami E.H., Ostergaard J.J., Lembesis E.: Use of fuzzy logic for implementing rule-based control of industrial processes. [W:] Advances in fuzzy sets, possibility theory and applications. Plenum Press, New York, p. 307.

MAŃC 71 Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. WNT, Warszawa.

MART 67 Martin J.: Design of real-time computer systems. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New York.

MEDI 69 Meditch J.S.: Stochastic optimal linear estimation and control. McGraw-Hill, New York.

MORE 82 Moret B.M.E.: Decision trees and diagrams. ACM Computing Surveys 14, p. 593.

MRÓZ 76 Mrózek A., Pozowski R.: Synteza modeli matematycznych obiektów drogą analizy stanów charakterystycznych. Podstawy Sterowania t. 6, z. 4, p. 413.

MRÓZ 77 Mrózek A.: Praktyka pomyślnego projektowania i wdrażania systemów informatycznych na przykładzie zastosowań przemysłowych. Materiały II Szkoły Podstaw Inżynierii Systemów Orzysz, maj 1977.

MRÓZ 79 Mrózek A., Piwowarski M., Wełnicki L.: Modele wnioskowania, tablice decyzyjne i sterowanie. Podstawy Sterowania t. 9, z. 3, p. 243.

MRÓZ 80 Mrózek A. i in.: Optymalizacja i korekcja wsadu do pieców do topienia. Rudy i Metale Nieżelazne nr 3-4, p. 36.

MRÓZ 81 Mrózek A., Pozowski R.: АСУТП цементных заводов основанная на непрерывном анализе характеристик состояний процесса и программированных таблицах решений. Materiały konferencji międzynarodowej nt.: Применение вычислительной техники в управлении производственными процессами химико-технологического типа. МНИПЫ, Москва.

MRÓZ 83a Mrózek A.: Klasyfikacja przybliżona w identyfikacji, analizie i ocenie modeli wnioskowania. Podstawy Sterowania t. 4, z. 1, p. 3.

MRÓZ 83b Mrózek A., Winiarczyk R.: O realizacji interaktywnego systemu wspomagania. Podstawy Sterowania t. 13, z. 3, p. 259.

MRÓZ 84 Mrózek A.: Analiza porównawcza modeli wnioskowania ekspertów w oparciu o teorię zbiorów przybliżonych. Podstawy Sterowania t. 14, z. 3, p. 197.

MRÓZ 85a Mrózek A.: Information systems and control algorithms. Bull. Polish Acad. Sc. T.S. vol. 33, nr 3-4, p. 195.

MRÓZ 85b Mrózek A.: Интерактивные системы и средства в творческой деятельности. Управление производственными процессами. Труды международного совещания: Состояние и развитие гибких автоматизированных производств. Москва.

MRÓZ 85c Mrózek A.: Analiza modelu wnioskowania operatora przy pomocy teorii zbiorów przybliżonych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Informatyka 7, p. 49.

MRÓZ 86 Mrózek A.: Use of rough sets and decision tables for implementing rule-based control of industrial processes. Bull. Polish Acad. Sc. T.S. vol. 34, nr 5-6, p. 357.

MRÓZ 87a Mrózek A.: Rough sets and some aspects of expert systems realization. 7-th Inter. Workshop Expert Systems and Their Applications. Avignon, France 13-15 may.

MRÓZ 87b Mrózek A.: Rough sets and dependency analysis among attributes in computer implementation of experts inference models. Int. Journal of Man-Machine Studies (w druku).

MRÓZ 87c Mrózek A., Winiarczyk R.: System wspomagania komponowania mieszanin wsadowych - wybrane aspekty implementacji. Materiały XII Międzynarodowej Konferencji Informatyków Przemysłu Metali Nieżelaznych, Wisła, listopad, 1987.

MURT 81 Murtagh B.A.: Advanced linear programming: computation and practice. McGraw-Hill Inter. Book Co., New York, Hamburg, London, Tokyo.

NIED 77 Niederliński A.: Systemy cyfrowe automatyki przemysłowej, t. 1 i2. PWN, Warszawa.

OLEK 83 Olek T., Krzaklewski M., Mrózek A., Winiarczyk R.: Namiarowanie wsadu a zagadnienie stabilizacji procesu wielkopiecowego. Hutnik, nr 7-8, p. 266.

ORAM 61 Oram J.E.: The automated blast furnace-fact of fiction. Iron and Steel, vol. 38, nr 7.

PANU 77 Panuška V.: Derivation of the recursive maximum likelihood identification algorithm. Electronics Letters, vol. 13, No 1, p. 19.

PANU 80 Panuška V.: A new form of the extended Kalman filter for parameter estimation in linear systems with correlated noise. IEEE Trans. on Aut. Contr. vol. AC-25, No 2, p. 229.

PAWL 81 Pawlak Z.: Information systems. Theoretical foundations. Information Systems 6, p. 205.

PAWL 82 Pawlak Z.: Rough sets. Int. Journal of Inform. Comp. Sc. 11, p. 341.

PAWL 83 Pawlak Z.: Systemy informacyjne. Podstawy teoretyczne. WNT, Warszawa.

PAWL 85 Pawlak Z.: Decision tables and decision algorithms. Bull. Polish Acad. Sc. T.S. vol. 33, p. 487.

PAWL 86 Pawlak Z.: On decision tables. Bull. Polish Acad. Sc. T.S. vol. 34, nr 9-10, p. 563.

PERE 76 Перельман И.И.: Конструирование и предварительная проверка экономически эффективных САУ. Изд. ИПУ АНСССР, Москва.

POLL 75 Pollack S.L., Hicks H.T., Harrison W.J.: Tablice decyzyjne. PWN, Warszawa.

POSP 71 Поспелов Д.А.: Принципы ситуационного управления. Изд. АН СССР, Техническая Кибернетика № 2, с. 10.

POSP 86a Поспелов Д.А. ред. : Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интелекта. Изд. Наука, Москва.

POSP 86b Поспелов Д.А.: Ситуационное управление. Теория и практика. Изд. Наука, Москва.

POZO 78 Pozowski R.: Modele matematyczne i systemy sterowania procesem tlenowo-konwertorowym. Problemy Projektowania, nr 3, Gliwice.

PROC 77 Procyk M.T.I.: A self-organizing controller for single-input single-output systems. Res. Rep. No 6, Fuzzy Logic Working Group, Queen Mary Call. London.

PUCH 71 Пухов Г.Е., Хатиашвил Ц.С.: Локальные математические модели систем управления. Изд. Наукова Думка, Киев.

RAST 80 Растригин Л.А.: Современные принципы управления сложными объектами. Изд. Советское Радио, Москва.

ROBI 67 Robins N.: Computer control of Inlands blast furnace No 5. Iron and Steel Eng., December 1967.

RONU 66 Ronug J.R., Morton W.R.: Application of a digital computer to the cement making process. IEEE Trans. Ind. Electr. and Contr., IECI-13, vol. 1, April 1966.

ROSS 86 Rossi G.: Uses of PROLOG in implementation of expert systems. New Generation Computing, IJFGC, vol. 4, No 3, p. 321.

RUTH 76 Rutherford D.A.: The implementation and evaluation of a fuzzy control algorithm for a sinter plant. Queen Mary Coll., London, January.

SAGE 71 Sage A.P., Melsa J.L.: Estimation theory with application to communications and control. McGraw-Hill, New York.

SAKA 79 Sakai H., Arase M.: Recursive parameter estimation of an autoregressive process disturbed by white noise. Int. Journal of Control, vol. 30, No 6, p. 949.

SARI 77 Saridis G.N.: Self-organizing control of stochastic systems. Marcel Dekker Inc., New York.

SEME 72 Семендяев А.Ф.: Контроль цементного производства. Изд. Литературы по Строительству, Ленинград.

SHIB 64 Shibuya J.: Computer control of blast furnace. Iron and Stell Eng., February 1964.

SIMO 83 Simons G.L.: Towards fifth-generation computers. NCC Publ., London.

SKUR 77 Скурихин В.И., Житецкий Л.С., Проценко И.М.: Итеративно-табличные автоматы. Изд. Наукова Думка, Киев.

SORO 63 Сорокин В.А.: Комплексная автоматизация доменных печей. Изд. Металлургиздат, Москва.

SPAN 72 Spang III H.A.: A dynamic model of a cement kiln. Automatica vol. 8 (3), May 1972.

SPEE 70 Speedy C.B., Brown R.F., Goodwin G.C.: Control theory: identification and optimal control. Oliver and Boyd, Edinburgh.

SRAG 76 Сраговић В.Г.: Теория адаптивных систем. Изд. Наука, Москва.

SZAF 76 Szafranek A.: O wykorzystaniu bazowych modeli matematycznych dla syntezy bezpośrednich algorytmów sterowania procesami technologicznymi. Podstawy Sterowania t. 6, z. 3, p. 321.

SZRE 75 Szrejder J.A.: Równość, podobieństwo, porządek. WNT, Warszawa.

SZUM 82 Шумилов К.А., Довгаль А.М., Мельничук В.Л., Удовенко К.И.: Автоматическое управление газодинамическом режимом доменной печи. Изд. Металлургия, Москва.

TONG 76a Tong R.M.: Some problems with the design and implementation of fuzzy controllers. LUED (F-CAMS) TR 127, Cambridge University Control Engineering Department.

TONG 76b Tong R.M.: Analysis of fuzzy control algorithms using the relation matrix. Int. Journal of Man-Machine Studies 8, p. 679.

TONG 77 Tong R.M.: A control engineering review of fuzzy systems. Automatica 13, p. 559.

TOWA 78 Товаровский И.Г., Райх Е.Н., Шкодин К.К., Улахович В.А.: Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом. Изд. Металлургия, Москва.

VILL 64 Villis V.: Cement kiln regulation by digital process control computer. Cement, Lime and Gravel, vol. 39 (4).

WATE 85 Waterman D.A.: A guide to expert systems. Addison-Wesley, London.

WEIS 84 Weiss S.M., Kulikowski C.A.: A practical guide to designing expert systems. Rowman and Allanheld Publ., New York.

WĘGR 70 Węgrzyn S.: Systemy automatyki kompleksowej. Materiały Międzynarodowej Konferencji nt.: Modele matematyczne i identyfikacja procesów. Warszawa-Jabłonna.

WĘGR 72 74 Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa.

WĘGR 75a Węgrzyn S.: Aproksymacja, estymacja i identyfikacja. Podstawy Sterowania t. 5, z. 3, p. 199.

WĘGR 75b Węgrzyn S.: Systemy automatyki kompleksowej. Teoria i doświadczenie. Podstawy Sterowania t. 5, z. 1, p. 5.

WILD 64 Wilde D.J.: Optimum seeking methods. Prentice-Hall, New York.

WIRT 80 Wirth N.: Algorytmy + struktury danych = programy. WNT, Warszawa.

WISD 63 Wisdon K.: Power to furnace under computer control. Data and Control July 1963.

YOSH 80 Yoshitani Y.: The background and present status of computer usage in the Japanese iron and steel industry. Computers in Industry vol. 1, No 4, p. 263.

YOUR 72 Yourdon E.: Design of on-line computer systems. Prentice-Hall Inc., New York.

ZADE 65 Zadeh L.A.: Fuzzy sets. Information and Control vol. 8, p. 338.

ZAGA 71 Загадская Л.С., Клыков Ю.И.: Практическое применение ситуационной модели управления. Изд. АН СССР, Техническая Кибернетика № 2, с. 18.

ZEEM 62 Zeeman E.O.: Topology of the brain. [W:] N.K. Fort (ed.): Topology on S-Manifolds. New York 1962.

ZSAK 74 Realizacja na maszynie cyfrowej ODRA-1204 algorytmów sterowania reaktorem syntezy amoniaku. Raport A. 2.5. (06.1.2) 74, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 76 Opracowanie metodyki strategii sterowania wieloparametrowymi procesami technologicznymi na przykładzie pieca obrotowego w cementowni ODRA w Opolu. Raport A.2.1 (06.4) 76, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 77 Metodyka dochodzenia do algorytmów wspomagania operatora złożonego procesu technologicznego na przykładzie wielkiego pieca w Hucie Katowice. Raport A.2.1 (06.4) 77, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 78 Podstawy projektowania systemów komputerowego wspomagania operatorów złożonych procesów technologicznych na przykładzie systemu SYZAP w Hucie Katowice. Raport A.2.1 (06.4) 78, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 79 Rozwój struktury oprogramowania użytkowego systemu komputerowego sterowania złożonymi procesami technologicznymi na przykładzie wielkiego pieca nr 2 w Hucie Katowice. Raport A.2.3 (06.4) 79, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 80 Podstawowy i doświadczalny rozwój metod komputerowego wspomagania na przykładzie wielkiego pieca nr 2 w Hucie Katowice. Raport A.2.2 (06.4) 80, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 85 Interaktywne systemy komputerowego wspomagania procesów sterowania i projektowania. Raport A.2.3 (06.4) 85, ZSAK PAN, Gliwice.

ZSAK 87 Formalizacja rozumowań indukcyjnych dla potrzeb wnioskowania i uczenia w systemach ekspertowych. Raport A.2.7 (CPBR 8.6) 87, ZSAK PAN, Gliwice.

ŻUK Жук К.Д., Тимченко А.А., Доленко Т.И.: Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Изд. Наукова Думка, Киев.

MODELE WNIOSKOWANIA OPERATORÓW
I ICH WYKORZYSTANIE W KOMPUTERYZACJI OBIEKTÓW TECHNOLOGICZNYCH

S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono propozycję metody syntezy algorytmów komputerowego sterowania złożonymi obiektami technologicznymi w przypadku, gdy nie dysponuje się ich modelami matematycznymi, a posiadana informacja ma charakter niepełny i przybliżony.

Jej istota polegała na przyjęciu założenia, że należy w takich przypadkach wykorzystać wiedzę i doświadczenie operatorów sterujących takimi obiektami.

Przedstawiono dwa przykłady reprezentujące szeroką klasę złożonych obiektów technologicznych sterowanych ręcznie przez doświadczonych operatorów.

Na przykładzie pieca obrotowego do wypalania klinkieru w jednej z cementowni wykazano, że u podstaw sterowania przez palaczy stoi dokonywana przez nich bieżąca ocena i klasyfikacja sytuacji w obiekcie, a następnie na tej podstawie odpowiedni wybór oddziaływań sterujących.

W przypadku wielkiego pieca zwrócono przede wszystkim uwagę na złożoność i różnorodność zadań rozwiązywanych przez mistrzów w procesie sterowania.

Wnioski wynikające z omówionych przykładów sterowania przez doświadczonych operatorów złożonymi obiektami technologicznymi były podstawą wprowadzenia pojęcia modelu wnioskowania, który wykorzystują przy sterowaniu.

Przedstawiono strukturę takiego modelu wnioskowania, szczegółowo omawiając jej poszczególne elementy.

Zaproponowano formalny zapis modelu wnioskowania, a także jego reprezentację w postaci odpowiedniej tablicy decyzyjnej.

Wykorzystując formalne pojęcie modelu wnioskowania, sformułowano podstawowe problemy, których rozwiązaniu poświęcona była praca.

Przedstawione w pracy rozwiązanie sformułowanych problemów oparte zostało na wykorzystaniu elementów teorii zbiorów przybliżonych.

Szczególną uwagę poświęcono analizie aspektów obliczeniowych związanych z wykorzystaniem elementów teorii zbiorów przybliżonych do rozwiązania postawionych problemów.

Nawiązując ponownie do omówionych przykładów sterowania przez operatorów piecem obrotowym do wypalania klinkieru i wielkim piecem do wytopu surówki, przedstawiono rozwiązanie postawionych problemów.

Pokazano, jak można wykorzystać model wnioskowania palacza do syntezy algorytmów komputerowego sterowania w czasie rzeczywistym piecem obrotowym, przedstawiając także wyniki takiego sterowania.

W przypadku wielkiego pieca szczególną uwagę zwrócono na komputerowe wspomaganie mistrzów wielkopiecowników przy sterowaniu "od góry".

Pokazano, jak można wykorzystać model wnioskowania mistrzów do integracji modelu matematycznego namiarowania wsadu z cząstkowymi modelami matematycznymi dotyczącymi globalnego bilansu węgla i żelaza we wsadzie, a także relacji pomiędzy zasadowością wsadu a wynikową zasadowością żużla spustowego.

Przedstawiono strukturę odpowiedniego układu stabilizacji wielkiego pieca "od góry" i pokrótce omówiono wyniki doświadczeń eksploatacyjnych przeprowadzonych w jednej z hut.

Główne tezy pracy zebrano i przedstawiono w podsumowaniu.

МОДЕЛИ МЫШЛЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ В АСУ ТП

Р е з ю м е

В работе представлен метод синтеза алгоритмов управления сложными технологическими обьектами в случае, когда нет подходящих математических моделей, а вся доступная информация имеет неполный и приближённый характер.

Сущность метода заключается в предположении, что в таких случаях надо использовать знание и опыт операторов, управляющих этими обьектами.

Представлены два примера сложных техногических обьектов, управляемых вручную опытными операторами.

На примере вращающейся печи для обжига клинкера на цементном заводе показано, что основой управления машинистами является текущая оценка и классификация состояния печи, а затем соответствующий подбор управляющих воздействий.

В случае домны внимание обращено прежде всего на сложность и разнообразие задач, решаемых мастерами в процессе управления.

Выводы, вытекающие из представленных примеров, послужили основой определения понятия модели мышления операторов, которую используют в процессе управления.

Представлена структура модели мышления, подробно обсуждаются отделеные элементы.

Предложена формальная запись модели мышления, а также её представление в виде таблицы решений.

Определены основные проблемы, решаемые в работе.

Показано, как для решения этих проблем использовать элементы теории приближённых множеств.

Особое внимание обращено при этом на вычислительные аспекты решений.

Возвращаясь к примерам управления операторами вращающейся печью для обжига клинкера и домной для выплавки чугуна, представлены решения поставленных проблем.

Показано, как использовать модель мышления машиниста для синтеза алгоритмов компьютерного управления вращающейся печью в реальном масштабе времени, а также представлены результаты этого управления.

В случае домны особое внимание обращено на компьютерную поддержку мастеров при управлении "сверху". Показано, как использовать модель мышления мастеров для интеграции математической модели расчёта шихты с частными математическими моделями, касающимися баланса угля и железа в шихте, а также отношения между основностью шихты и основностью шлака.

Представлена структура соответствующей системы стабилизации домны "сверху", а также кратко описаны результаты эксплуатационных экспериментов на одном из металлургических заводов.

Основные тезисы работы собраны и представлены в конце работы.

OPERATORS INFERENCE MODELS AND THEIR USAGE
IN THE COMPUTERIZATION OF TECHNOLOGICAL OBJECTS

S u m m a r y

The present study proposes a method of the synthesis of computer control algorithms of complex technological objects in the case when mathematical models of these objects are not available and the information at our disposal is incomplete and approximate.

The essence of the method consists in the assumption that in such cases it is necesary to make use of the knowledge and experience of operators who control such objects.

Two examples are presented, representing a large class of complex technological object manually controlled by experienced operators.

On the example of a rotary clinker kiln in a cement plant it is proved that the current estimation and classification of the situation in the plant followed by the proper choice of control actions on this basis, lies at the foundation of control conducted by stokers.

In the case of the blast-furnace, attention is primarily paid to the complexity and diversity of tasks solved by shift foremen in the process of control.

Conclusions stemming from the examples discussed above, concerning the control performed by experienced human operators, serve as the basis to introduce the notion of an inference model.

The structure of such an inference model is presented and its elements are discussed in detail.

A formal notation of the model and its representation as a proper decision table is proposed.

Using the formal notation of the inference model some problems are formulated and solved.

The solution presented in the study makes use of the theory of rough sets. Special attention is paid to the analysis of numerical aspects related to the use of elements of the rough sets theory in the solving of the problems formulated earlier in the study.

A solution is proposed to the problems of rotary clinker kiln and blast-furnace control by operators.

The study also shows how the operator's inference model can be applied in the synthesis of real-time computer control algorithms is concerning the operation of the rotary kiln. The results of such control are also presented in the study.

In the case of the blast-furnace, particular attention is paid to computer-aided "upper" control conducted by blast-furnace foremen.

It is shown in the study how the inference model may be used in the integration of the mathematical model of blast-furnace charge calculation with partial mathematical models concerning the global balance of coal and iron in the charge and also with the relation between charge basicity and resulting slag basicity.

The proper structure of the blast-furnace "upper" stabilization system is presented.

Some run-time experiences gathered in a steelworks are discussed.

The main subjects of the thesis are contained in the recapitulation.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P.4193/89/14

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-956 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 3
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnice Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.