

POLITECHNIKA OPOLSKA



**OPTYMALIZACJA UKŁADÓW
MASZYNOWYCH Z ZASTOSOWANIEM
RÓWNAŃ LOGICZNYCH I STRUKTUR
GRAFOWYCH**

mgr inż. Adam Deptuła

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem
prof. dr. hab. Mariana A. PARTYKI

Lipiec 2013

SPIS TREŚCI

Spis treści.....	1
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SYMBOLI.....	4
ROZDZIAŁ 1.....	6
PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY	6
1.1. Przedmiot rozważań	6
1.2. Cel i zakres pracy	8
ROZDZIAŁ 2.....	14
PODSTAWOWE ZAGADNIENIA Z MINIMALIZACJI FUNKCJI	
LOGICZNYCH	14
2.1. Algebra Boole'a	14
2.1.1. Funkcje boolowskie	16
2.1.2. Implikanty pierwsze funkcji boolowskiej	17
2.2. Metody minimalizacji funkcji logicznych	18
2.2.1. Metoda tablic Karnaugh'a	18
2.2.2. Metoda iteracyjnego konsensusu	19
2.2.3. Metody graficzne	19
2.3. Algorytm Quine'a-Mc Cluskeya minimalizacji cząstkowych	
wielowartościowych funkcji logicznych.....	23
ROZDZIAŁ 3.....	29
RÓWNIANIA LOGICZNE W OPTYMALIZACJI UKŁADÓW	
MASZYNOWYCH.....	29
3.1. Wielowartościowe funkcje logiczne z wagowymi współczynnikami.....	30
3.1.1. Współczynniki wagowe	31
3.1.2. Minimalizacja wielowartościowych funkcji logicznych z wagowymi	
współczynnikami.....	31
3.2. Układy wielowartościowych równań logicznych z wagowymi iloczynami.....	39
3.2.1. Rozwiązywanie układu wielowartościowych równań logicznych z	
wagowymi współczynnikami.....	41
3.3. Zastosowanie wielowartościowych funkcji logicznych z wagowymi	
iloczynami w badaniu rangi ważności parametrów konstrukcyjnych zaworów	
hydraulicznych.....	43
3.3.1. Hydrauliczny zawór przelewowy.....	43
3.3.2. Ranga ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych	
hydraulicznego zaworu przelewowego.....	46
3.3.3. Hydrauliczny zawór proporcjonalny	75
3.3.4. Model matematyczny hydraulicznego zaworu proporcjonalnego	76
3.3.5. Ranga ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych	
hydraulicznego zaworu proporcjonalnego	83
3.4. Analiza decyzyjna wytycznych projektowania badanego układu w	
warunkach niepewności	96
3.4.1. Rozłączna analiza logiczna wytycznych projektowania na przykładzie	
zaworu przelewowego.....	96
3.4.2. Analiza logiczna wytycznych projektowania zaworu przelewowego z	
uwzględnieniem niepewności	101
3.4.3. Rozłączna analiza logiczna wytycznych projektowania zaworu	
przelewowego z uwzględnieniem niepewności.....	105
ROZDZIAŁ 4.....	110

DRZEWY DECYZYJNE W UCZENIU MASZYNOWYM	110
4.1. Pozyskiwanie wiedzy w uczeniu maszynowym	110
4.1.1. Indukcyjne drzewa decyzyjne	111
4.1.2. Analiza porównawcza optymalnych logicznych drzew decyzyjnych i indukcyjnych drzew systemu DeTreeX w wyznaczaniu rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych danych układów.....	113
ROZDZIAŁ 5.....	124
STRUKTURY GRAFOWE W OPTYMALIZACJI UKŁADÓW MASZYNOWYCH.....	124
5.1. Grafy.....	125
5.2. Grafy jako modele układów mechanicznych	126
5.3. Grafy zależności i struktury rozgrywające parametrycznie	128
5.3.1. Graf zależności rozgrywający parametrycznie	129
5.3.2. Współczynniki złożoności w ujęciu struktur rozgrywających parametrycznie	133
5.3.3. Struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie	135
5.4. Zastosowanie grafu zależności i struktur rozgrywających parametrycznie w badaniu własności układu maszynowego	140
5.4.1. Skierowany graf przepływu sygnałów struktur rozgrywających parametrycznie.....	146
5.4.2. Skierowany graf przepływu sygnałów z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego w strukturach rozgrywających parametrycznie.....	164
5.5. KOMPLEKSOWE DRZEWY ROZGRYWAJĄCE PARAMETRYCZNIE.....	172
5.6. Technika powrotów (backtracking BT) w drzewach rozgrywających parametrycznie	182
5.6.1. Idea techniki powrotów.....	182
5.7. Współczynnik złożoności struktury w ujęciu wielowartościowych drzew logicznych	184
ROZDZIAŁ 6.....	189
OPTYMALIZACJA DYSKRETNA POMPY ZĘBATEJ Z PODCIĘTĄ STOPĄ ZĘBA	189
6. 1. Obiekt badań.....	189
6. 2. Stanowisko pomiarowe	191
6. 3. Badania hydrauliczne pompy zębatej z podciętą stopą zęba.....	196
6. 4. Optymalizacja pompy zębatej z podciętą stopą zęba.....	206
6.4.1. Zastosowanie wielowartościowych drzew logicznych	207
6.4.2. Zastosowanie kompleksowych wielowartościowych drzew logicznych ..	213
6.4.3. Zastosowanie kompleksowego współczynnika złożoności ze struktur rozgrywających parametrycznie.....	217
6.4.4. Zastosowanie układów wielowartościowych równań logicznych z wagowymi współczynnikami.....	223
ROZDZIAŁ 7.....	226
Podsumowanie	226
Bibliografia.....	232

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SYMBOLI

MZAPN	– minimalna złożona alternatywna postać normalna
ZKAPN	– złożona kanoniczna alternatywna postać normalna
$f(x_1, x_2, x_3)$	– wielowartościowa funkcja logiczna trzech zmiennych
w_i	– współczynnik wagowy dla wielowartościowych iloczynów logicznych
A	– cząstkowy iloczyn elementarny
Y_S^R	– wielowartościowy układ R- zbioru równań logicznych ze S- zbiorem iloczynów kanonicznych
k_{vx}, k_{vy}	– współczynniki strat w stopniu sterującym hydraulicznego zaworu proporcjonalnego
F_m	– siła elektromagnetyczna
P	– ciśnienie robocze
Q_p	– rzeczywista wydajność pompy
Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}	– natężenie przepływu przez dyszę D1, D2, D3 w zaworze proporcjonalnym
Q_{odb}	– natężenie przepływu odbiornika w zaworze proporcjonalnym
$K_{p1} \cdot K_{p2}$	– wzmacnienie regulatora w zaworze proporcjonalnym
U_z	– wymuszenie skokowe napięcia sterującego w zaworze proporcjonalnym
P_i	– prawdopodobieństwo pojawienia się i -tego elementu zbioru
E	– zbiór przykładów uczących
$ E $	– liczba przykładów w zbiorze uczącym E
H	– wysokość podnoszenia, spad
φ	– kąt ustawienia łopatek wirnika
n	– prędkość obrotowa
μ	– lepkość dynamiczna cieczy
ρ	– gęstość cieczy
$G_{q_1}^+$	– wyrażenie analityczne struktury drzewiastej z rozkładu grafu zależności G od wierzchołka q_1
$G_{q_1}^{++}$	– wyrażenie analityczne struktury drzewiastej z cyklami z rozkładu grafu zależności G od wierzchołka q_1
${}^w G_{q_1}^{++}$	– wyrażenie analityczne struktury drzewiastej z cyklami z rozkładu grafu zależności G od wierzchołka q_1 z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej

${}^W_D G_{q_1}^{++}$	– wyrażenie analityczne struktury drzewiastej z cyklami z rozkładu grafu zależności G od wierzchołka q_1 z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej i dekompozycji
$L(G_{q_1}^{++})$	– współczynnik złożoności struktury drzewiastej $G_{q_1}^{++}$
$L^K(G_{q_1}^{++})$	– kompleksowy współczynnik złożoności struktury drzewiastej $G_{q_1}^{++}$
Q_t	– wydajność teoretyczna pompy (dla ustalonego układu hydraulicznego)
Q_{zp}	– natężenie przepływu przez zawór przelewowy
R_{p0}	– wypadkowa oporność przecieków wewnętrznych w układzie
R_{pp}	– oporność przecieków pompy określona ze sprawności wolumetrycznej
R_{pz}	– oporność przecieków zaworu przelewowego określona z nachylenia charakterystyki statycznej zaworu dla ciśnień poniżej ciśnienia otwarcia
R_r	– oporność przecieków rozdzielacza
R_s	– oporność przecieków silnika określona ze sprawności wolumetrycznej
T	– stała czasowa zaworu przelewowego
K	– przewodność zaworu przelewowego
ω	– prędkość kątowna wału silnika
D	– chłonność jednostkowa silnika
C	– pojemność układu
V	– objętość cieczy w linii tłocznej układu
B	– zastępczy moduł ściśliwości cieczy uwzględniający również sprężystość przewodów ścianek
R	– oporność mechaniczna w ruchu obrotowym silnika
J	– duży masowy moment bezwładności mas wirujących
η_v	– sprawność objętościowa pompy
η_c	– sprawność całkowita pompy
η_{hm}	– sprawność hydrauliczno-mechaniczna pompy
M_t	– moment teoretyczny dla pompy zębatej
ΔM	– moment strat hydrauliczno-mechanicznych

ROZDZIAŁ 1

PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY

1.1. PRZEDMIOT ROZWAŻAŃ

Etap formułowania zadania projektowego wyznacza istotne potrzeby jakie mają być zaspokojone, a więc określa cel projektowania. W związku z czym zadanie projektowe powinno być sformułowane ogólnie, tak aby nie ograniczać liczby możliwych rozwiązań. Jednocześnie powinno konkretyzować potrzebę, a tym samym umożliwić efektywne rozwiązanie problemu oraz jego polepszenia. Na etapie analizy zadania projektowego ustala się zasadnicze warunki jego wykonania, a przede wszystkim dokonuje się optymalizacji wymagań projektowych. Projektowanie traktuje się jako działanie przygotowawcze, którego celem jest organizacyjno-informacyjne i konstrukcyjno-technologiczne zapewnienie procesu realizacji, w wyniku którego powstaje wytwór o określonych własnościach. W procesie projektowania można zauważyć cztery równoległe realizowane działania: organizacyjno-badawcze, konstrukcyjne, optymalizacyjne oraz wdrożeniowo-technologiczne. Czynnością początkową do podjęcia działań projektowych jest odpowiednie sformułowanie problemu. Finalnym celem definiowania problemu powinien być zbiór koncepcji przedmiotu, który spełnia żądane funkcje całego procesu.

W otaczającym nas świecie można wyróżnić dwa podstawowe procesy: robocze i procesy oddziaływania na nie. Projektowanie składa się z teorii, syntezy, konstruowania, a także zbioru algorytmów. W ogólnym sensie zajmuje się tworzeniem schematów i budową tych procesów roboczych. Jest więc składową wszystkich nauk.

W zakres projektowania procesów wchodzi problem takiego opracowywania koncepcji, modeli i oddziaływania (poprzez sterowanie, kierowanie, uzyskiwanie), aby wydobyć z nich maksimum zadowolenia. Stwierdza się więc, że projektowanie ma charakter interdyscyplinarny podobnie jak cybernetyka. Do zaprojektowania układu potrzebne są trzy składowe wiedzy w zakresie: procesów fizycznych, prawidłowości oddziaływania na te procesy oraz polepszania zachodzących procesów-optymalizacji. Dlatego optymalne projektowanie lub przeprojektowywanie w ogólnym przypadku rozpatruje się jako proces dynamiczny, który obejmuje oddziaływanie oraz tworzenie nowych wartości [5, 89, 99, 120, 165].

Wspólną cechą modeli procesu projektowania jest etapowość. Oznacza to, że proces realizowany jest stopniowo (etapami), tj. poprzez realizację poszczególnych stadiów projektowych (faz projektu). Po zakończeniu poszczególnych faz ocenia się ich wyniki i podejmuje decyzje, co do dalszego przebiegu procesu. W kolejnym etapie wyznacza się dalsze działania, gdy ocena jest pozytywna, albo powtarza się dane działania lub sekwencje działań, gdy ocena jest negatywna. Metodologia projektowania jest zbiorem ram i reguł narzuconych w procesie projektowania, wspomaganego komputerem, z wykorzystaniem metod strukturalizacyjnych,

umożliwiających zwiększenie modułowości, agregacji i dekompozycji oraz formalizacji w odpowiednich jego etapach:

- formułowaniu problemu,
- analizę problemu,
- poszukiwaniu rozwiązań zadania projektowego,
- wyborze i optymalizacji.

W danym procesie projektowania każdy problem, jako całość należy rozbić na tyle oddzielnych elementów, na ile to jest możliwe (Galileusz 1564-1642; Kartezjusz-„Rene Descartes 1596-1650). Projektowany element składa się z pod elementów (wzajemnie przenikających się), które powiązane ze sobą mają pewne cechy integralne ("Całość to coś więcej niż suma jego części składowych"; Arystoteles 384-322 p.n.e).

Przed przystąpieniem do poszukiwania rozwiązania, projektant musi rozważyć możliwość podziału (dekompozycji) danego zadania na podzadania cząstkowe, które powinny być od siebie niezależne. Często podział taki jest dokonywany w sposób intuicyjny. Po zakończeniu poszczególnych etapów cząstkowych następuje proces ich łączenia (agregacji).

Wybór najlepszego rozwiązania jest jednym z najważniejszych działań twórczych w procesie projektowania. Ponieważ często istnieje tylko jedno rozwiązanie, dlatego konieczne jest wariantowe działanie projektanta, implikujące różne możliwe rozwiązania. W celu optymalizacji wymagań projektowych ustala się funkcję celu i poszukuje takich wartości zmiennych decyzyjnych, aby ta funkcja osiągnęła wartość ekstremalną.

Często zachodzą różne konkurencje i pozorne sprzeczności pomiędzy elementami zbioru kryterialnego, co wymaga uwzględnienia kryterium kompromisu, optymalizacji Pareto, nakładkowych logicznych drzew decyzyjnych, itd. W literaturze istnieje wiele różnych opisów zarówno poszczególnych etapów jak i całych procesów projektowania i konstruowania. W rzeczywistości istnieje wiele metod poszukiwania pomysłów i strukturalizacji problemu, które wchodzi w skład metod projektowania, np.: metoda morfologiczna, analiza wzajemnie powiązanych obszarów decyzji AIDA, metoda tablic decyzyjnych, graf decyzji, sieć interakcji, graf hierarchiczny, dendryt, logiczne drzewa decyzyjne, klasyfikatory drzewiaste,

Wprowadzenie odpowiednich zapisów formalnych w procesie strukturalizacji problemu, łączy kompleksowe cechy ilościowe i jakościowe o różnym stopniu szczegółowości według zasad wielowymiarowej tablicy morfologicznej. Tablice decyzyjne i morfologiczne mogą być analitycznie i numerycznie zakodowane według definicji i twierdzeń logiki wielowartościowych procesów decyzyjnych, co umożliwia wariantowy sposób identyfikacji i klasyfikacji informacji w ujęciu informatycznym podczas poszukiwania rozwiązań w procesie projektowania.

Metoda minimalizacji złożonych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych wyznacza rangę ważności parametrów konstrukcyjno - eksploatacyjnych, odgrywających rolę logicznych zmiennych decyzyjnych. Istotnego znaczenia nabiera wprowadzenie wagowych układów równań logicznych, jako wytycznych projektowania, z możliwością minimalizacji rozdzielnej albo wspólnej z zachowaniem równoważności logicznej. Nawet w przypadku dwuwartościowym (boolowskim) minimalizacja wspólna nie jest gorsza w sensie liczności literałów od minimalizacji

rozdzielnej. Z kolei, gdyby proces projektowania na etapie doboru wartości liczbowych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych w modelu matematycznym przetłumaczyć na graf zależności, wówczas algorytmiczna kolejność zmian wartości liczbowych (oraz sprawdzanie wyników) jest zgodna z graficznym zapisem drzew rozgrywających parametrycznie. Dotychczas grafy i drzewa w ujęciu parametrycznym były stosowane m.in. w teorii automatów z zachowaniem celowym.

Proces decyzyjny, określający myślowe i obliczeniowe operacje uzasadnia potrzebę wprowadzania ww. zagadnień dla strukturalizacji problemu projektowego.

1.2. CEL I ZAKRES PRACY

Pośród narzędzi wspomagania decyzji można wyróżnić: tablice decyzyjne, dendryty, logiczne drzewa decyzyjne, klasyfikatory drzewiaste, a także równania logiczne z wagowymi współczynnikami oraz grafy rozgrywające parametrycznie. Procesy decyzyjne mogą być programowane w różnych językach komputerowych z zastosowaniem różnych metod i algorytmów do osiągnięcia tego samego celu.

Wraz z rozwojem techniki informatycznej zmienia się charakter i możliwości stosowanych w praktyce metod optymalizacyjnych oraz systemów wspomagania decyzji. Wprowadzanie sztucznej inteligencji, często zwanej inteligencją obliczeniową, do praktyki jest już dzisiaj koniecznością. Istnieje szeroki zakres badań, dotyczących opracowań metodyki wspomagania procesów podejmowania decyzji i sterowania w badaniach własności układów maszynowych oraz w systemach o różnej skali złożoności z udziałem sztucznej inteligencji. Dokonując analizy stanu badań związanych z systemami wspomagania podejmowania decyzji i sterowania, można zauważyć ciągły rozwój metod inteligencji obliczeniowej tj.: sieci neuronowych, logiki rozmytej, zbiorów przybliżonych, systemów ekspertowych oraz kombinacji tych metod np.: w systemach hybrydowych. Jednocześnie następuje ciągła propagacja stanu wiedzy w tzw. uczeniu maszynowym. Obejmuje ono problematykę konstruowania systemów, których działanie wzrasta wraz z doświadczeniem reprezentowanym przez zbiór przykładów uczących. Coraz częściej wykorzystuje się algorytmy maszynowego uczenia w takich dziedzinach jak: mechatronika, robotyka, sterowanie złożonymi obiektami, projektowanie inteligentnych systemów wspomagania decyzji oraz w badaniu właściwości dynamicznych układów maszynowych. Wśród najczęściej wykorzystywanych metod uczenia maszynowego są algorytmy indukcji drzew decyzyjnych (tworzące graficzną reprezentację wiedzy) oraz sieci neuronowe [9, 38, 97, 118, 142, 203, 206, 207].

W pracy przedstawiono metody weryfikacji doświadczalnej już istniejących przedmiotów-środków technicznych, tzn. zaprojektowanych i skonstruowanych. Finalnym etapem jest m.in. zbadanie rangi ważności różnych wielkości z dopuszczalnych zakresów, dla istniejących lub nowych warunków pracy, co może być związane z przeprojektowaniem gotowego już środka technicznego na nową sytuację decyzyjną. Zamiast od początku tworzyć nowy środek techniczny, można sprawdzić czy praca istniejącego już środka technicznego będzie poprawna w nowej sytuacji. W szczególności w pracy doktorskiej kategorii informatyczne ograniczono opisowo do CAD (Computer Aided Design), czyli do komputerowego wspomagania

projektowania. Nie należy tutaj dosłownie rozumieć jedynie gotowych już programów obliczeniowych i graficznych języków programowania takich jak np.: Visual Fortran, Visual Basic, AutoCad, I-DEAS, (...), lecz także nowych metod algorytmicznych z wykorzystaniem logiki matematycznej, teorii algorytmów, metod numerycznych, procesów decyzyjnych, teorii struktur grafowo-dendrytowo-drzewiastych, stosowanych w procesie projektowo- konstrukcyjnym z wykorzystaniem komputera [60, 145, 142, 182, 192].

W złożonych sytuacjach procesu projektowania, ważne jest odpowiednie zapisanie algorytmiczne i oprogramowanie przedstawionych metod projektowania grafów i drzew rozgrywających parametrycznie, aby w szczególności uniknąć złożoności obliczeniowej typu wykładniczego. Właściwość taką uzyskuje się m.in. w zagadnieniach minimalizacji funkcji logicznych dwu- i wielowartościowych. W matematyce funkcja wykładnicza rośnie szybciej niż dowolny wielomian i dlatego złożoność obliczeniowa NP- zupełna nie gwarantuje otrzymania wyniku obliczeniowego danego problemu projektowo-konstrukcyjnego w czasie realnym. W pracy doktorskiej nie uwzględniono dosłownego, pełnego słownictwa Metodologii Szkoły Śląskiej z Politechniki Śląskiej w Gliwicach [12, 22, 23, 25, 28, 30, 60] w zakresie rozumienia następujących zagadnień:

- poprzez działania techniczne na abstraktach uzyskuje się utwory, a na konkretach (materialne obiekty) wytwory,
- utwory oznaczają system, zbiór relacji sprzężeń i przekształceń opisujący działanie przyszłego środka technicznego lub konstrukcję (układ rozkładu struktur i stanów wytworu, który opisują cechy konstrukcyjne- geometryczne i montażowe). Zastosowana w pracy doktorskiej terminologia dotyczy informacji (wielkości) wejściowych i wyjściowych, zmiennych niezależnych i zależnych (funkcji).

W Metodologii Szkoły Śląskiej istnieją:

- uporządkowania rodzin konstrukcji,
- unifikacja i typizacja,
- relacje między cechami charakterystycznymi, a cechami konstrukcyjnymi,
- relacje między zunifikowanymi parametrami, a wartościami wymiarów wyróżnionych konstrukcji elementów,
- relacje między typowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, a typowymi postaciami konstrukcyjnymi elementów,
- reguły doboru uporządkowanych składników rodziny konstrukcji,
- metody podobieństwa konstrukcyjnego.

Do celów niniejszej pracy należy opracowanie algorytmów optymalizacyjnych układów maszynowych, z jednoczesnym opisem wytycznych projektowania na podstawie równań logicznych i struktur grafowych o realizowalności technicznej.

W pracy uwzględniono:

- opracowanie algorytmu struktur grafowych, umożliwiających zmiany wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych według modelowania matematycznego w zagadnieniach optymalizacji układów maszynowych,
- opracowanie algorytmu Quine'a Mc-Cluskeya minimalizacji funkcji logicznych z wagowymi współczynnikami,
- opracowanie algorytmów wielowartościowych równań logicznych, umożliwiających otrzymanie najważniejszych wytycznych projektowania w procesie optymalizacji układów maszynowych,
- przeprowadzenie obliczeń w celu potwierdzenia opracowanych algorytmów.

Zakres pracy:

1. Matematyczna i informatyczna analiza grafów rozgrywających parametrycznie i wielowartościowych równań logicznych w metodologii projektowania:
 - rozkład grafu rozgrywającego parametrycznie od dowolnych wierzchołków opisujących parametry konstrukcyjno- eksploatacyjne,
 - analiza złożoności obliczeniowej wytycznych projektowania po przejściu na drzewo rozgrywające parametrycznie,
 - kompozycja istniejących drzew rozgrywających parametrycznie, celem otrzymania w decyzyjnej strukturze graficznej wszystkich podgrup wytycznych projektowania z uwzględnieniem niezależnych układów wytycznych projektowania,
 - upraszczanie (redukcja) logicznych drzew decyzyjnych przez odcinanie identycznych sekwencji parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych z jednoczesnym zapewnieniem ciągłości procesu decyzyjnego (jako braku gałęzi izolowanych),
 - interpretacja badania rangi ważności zmian wartości arytmetycznych parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, według logicznych wartości z wielowartościowych systemów logicznych,
 - układy równań logicznych realizowalnych wytycznych projektowania ustalonych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych jako formalny decyzyjny opis badania rangi ważności zmian wartości arytmetycznych takich parametrów,
 - wyznaczenie najważniejszych realizowalnych wytycznych projektowania w wyniku rozwiązania układu równań logicznych,
 - przykłady obliczeniowe zastosowań w/w zagadnień w komputerowym wspomaganii procesu projektowania układów maszynowych.
2. Zastosowanie grafów rozgrywających parametrycznie i wielowartościowych równań logicznych w optymalizacji układów maszynowych :
 - analiza złożoności obliczeniowej kompozycji drzew w ujęciu parametrycznym,
 - minimalizacja równań logicznych układów wielowartościowych z uwzględnieniem różnej wielowartościowości zmiennych decyzyjnych i

różnych wielowartościowych współczynników logicznych w iloczynach logicznych opisujących ciągi wytycznych projektowania,

- uwzględnienie pewnych (100%-owa pewność wystąpienia danej wartości) i niepewnych (brak możliwości określenia danej wartości) oraz pełnych i niepełnych danych informacyjnych w optymalizacji własności dynamicznych układów maszynowych,
- opracowanie algorytmów struktur grafowych umożliwiających zmiany wartości parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych w zagadnieniach optymalizacji układów maszynowych,
- opracowanie algorytmów wielowartościowych równań logicznych umożliwiających otrzymanie najważniejszych wytycznych projektowania w procesie optymalizacji układów maszynowych,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych w celu potwierdzenia opracowanych algorytmów,
- przykłady obliczeniowe zastosowań w/w zagadnień w komputerowym wspomaganie procesu projektowania układów maszynowych.

W pracy przedstawiono 7 głównych rozdziałów. Poza zawierającym wstęp pierwszym rozdziałem, pozostałe poświęcono następującym zagadnieniom:

Rozdział 2: to omówienie podstawowych informacji, dotyczących minimalizacji funkcji logicznych.

Funkcję logiczną można przedstawić za pomocą różnych formuł. Zagadnienie minimalizacji funkcji logicznych polega na wyznaczeniu formuły równoważnej o jak najprostszej postaci. Ogólne metody minimalizacji funkcji logicznych, można podzielić na graficzne i algebraiczne. Zastosowanie odpowiednich definicji i twierdzeń umożliwia przekształcenie dowolnego zapisu logicznego na minimalną alternatywną postać normalną mającą zastosowanie w strukturalizacji metodologicznej. Wszystkie warianty, jako rozwiązania prawdziwe (realizowalne) opisane są przez kanoniczną alternatywną postać normalną KAPN funkcji logicznej (dwu- lub wielowartościowej). Po zastosowaniu algorytmu Quine'a-McCluskeya otrzymuje się z rozwiązań realizowalnych podrozwiązania realizowalne, jako nieredukowalną alternatywną postać normalną NAPN funkcji logicznej, a następnie z MAPN- najważniejsze podrozwiązania realizowalne. Minimalna złożona alternatywna postać normalna MZAPN funkcji logicznej buduje się ze złożonej alternatywnej postaci normalnej ZAPN, uwzględniając krotności piętrowego upraszczania się zmiennych logicznych.. Wykorzystując zagadnienia minimalizacji złożonych funkcji logicznych możliwe jest badanie rangi ważności ustalonych zmiennych, szczegółowa analiza podrozwiązań realizowalnych, itd.

Rozdział 3: poświęcono zagadnieniu zastosowań równań logicznych w optymalizacji układów maszynowych.

W procesie optymalizacji, zmiany wartości liczbowe parametrów konstrukcyjnych wpływają na zachowanie się funkcji zależnych od czasu. Zmiany

takie można zapisać kodowo w logice wielowartościowej, natomiast wytyczne projektowania- jako wielowartościowe iloczyny logiczne. Takie postępowanie może być przeprowadzone oddzielnie, uwzględniając w każdej wielkości wyjściowej dodatkowe, wagowe logiczne współczynniki odpowiadające czasowi stabilizacji. Wagowy wielowartościowy układ równań logicznych, opisujących wytyczne projektowania, można zminimalizować rozdzielnie albo wspólnie z zachowaniem równoważności logicznej, ale już nawet w przypadku dwuwartościowym (boolowskim) minimalizacja wspólna nie jest gorsza w sensie liczności literałów od minimalizacji rozdzielnej. Zwiększenie, zmniejszenie lub pozostawienie bez zmian wartości liczbowych w procesie przeprojektowania układu na inne warunki pracy można zapisać kodowo w logice wielowartościowej, natomiast zbiory wytycznych projektowania- jako sumy wielowartościowych iloczynów logicznych. Postępowania takie można przeprowadzić oddzielnie analizując każdą wielkość wyjściową z dodatkowym, wagowym logicznym współczynnikiem dla czasu stabilizacji, tzn. mniejszy (lepszy) czas stabilizacji ma ważniejszą (większą) wartość współczynnika wagowego odpowiedniego wielowartościowego iloczynu wagowego. W rozdziale 3 przedstawiono przykłady zastosowania wielowartościowych funkcji logicznych z wagowymi iloczynami w badaniu rangi ważności parametrów konstrukcyjnych zaworów hydraulicznych.

Rozdział 4: zawiera przedstawienie zastosowań struktur drzewiastych, jako narzędzi zastosowania i wspomagania procesu projektowania, optymalizacji i podejmowania decyzji. Jeśli parametry konstrukcyjne i /lub eksploatacyjne, przyjmujące wartości liczbowe z określonego przedziału, oznaczono jako ustaloną zmienną logiczną, to można przeprowadzić dyskretyzację takich przedziałów liczbowych. Zbiór wszystkich kombinacji liczbowych jest drzewem wariantów o liczbie pięter równej liczbie parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych. W rozdziale 4 przedstawiono drzewa decyzyjne, generowane w sposób indukcyjny na zasadzie przyrostu entropii. Indukcyjne drzewa decyzyjne reprezentują serie testów wykonanych w określonej kolejności, gdzie każdy kolejny test rozdziela pewne próbki danych na podgrupy zawierające coraz więcej próbek z danej tylko klasy. W rozdziale 4 zastosowano indukcyjne drzewa decyzyjne systemu DeTreeX w wybranych przykładach konstrukcyjnych.. Następnie zastosowano wielowartościowe drzewa logiczne. Porównano proces identyfikacji i klasyfikacji oraz ocenę rangi ważności zmiennych decyzyjnych przy użyciu obu metod. Indukcyjne drzewa decyzyjne można identyfikować ze zmodyfikowanymi drzewami logicznymi.

Rozdział 5: to opis grafów zależności i drzew rozgrywających parametrycznie, jako graficznych struktur w analizie modeli matematycznych układów maszynowych.

Model matematyczny danego problemu (układu, elementu) zapisany analitycznie, jako układ równań algebraiczno-różniczkowo-całkujących albo graficznie jako graf zależności, w którym powiązania (relacje) są dowolnymi ustalonymi w sensie wartości arytmetycznych zmiennymi wejściowymi, a wierzchołki - wielkościami

wyjściowymi zależnymi od czasu. Ostatecznie z grafu można otrzymać różne struktury drzewiaste z cyklami i różne struktury rozgrywające parametrycznie dla różnych początkowych wierzchołków rozkładu – jako zbiory wytycznych projektowania. Struktury rozgrywające parametrycznie otrzymane w wyniku rozkładu grafu zależności od każdego z wierzchołków pozwalają zalgorytmizować tok obliczeń oraz podzielić całą przestrzeń przeszukiwania grafu na podgrupy. Kompleksowe struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie generowane są w ostatnim etapie dekompozycji grafu zależności. W rozdziale 5 przedstawiono przykład zastosowania grafu i drzew w analizie właściwości dynamicznych układu hydraulicznego składającego się z pompy zębatej, zaworu przelewowego, rozdzielacza i silnika obciążonego dużym masowym momentem bezwładności.

Rozdział 6: zawiera przykład optymalizacji dyskretnej pompy zębatej z podciętą stopą zęba.

Badany prototyp wyprodukowano w Wytwórni Pomp Hydraulicznych Sp. z o.o. we Wrocławiu. Innowacyjność jednostki prototypowej polega na modyfikacji profilu ewolwenty w jej dolnej części poprzez tzw. podcięcie stopy zęba. W optymalizacji pompy zębatej oblicza się sprawność objętościową, hydrauliczno-mechaniczną oraz całkowitą. Optymalizacja sprawności pompy może przebiegać jako wielokryterialna, bądź monokryterialna. Zastosowanie wielowartościowych drzew logicznych w optymalizacji dyskretnej pompy zębatej prezentuje nowe podejście do zagadnienia, gdyż dotychczas była obliczona innymi metodami. W pierwszym etapie badań zastosowano wielowartościowe logiczne drzewa decyzyjne do analizy rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych oraz kompleksowe wielowartościowe drzewa decyzyjne. W drugim etapie, badania rangi ważności pompy zębatej z podciętą stopą zęba, zastosowano kompleksowy współczynnik złożoności struktur rozgrywających parametrycznie.

Rozdział 7: to wnioski, spostrzeżenia i omówienie możliwości kontynuacji badań.

ROZDZIAŁ 2

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA Z MINIMALIZACJI
FUNKCJI LOGICZNYCH

Wyszukiwanie i klasyfikacja informacji znajduje odpowiednie wyrażenia logiczne o możliwie jak najkrótszym zapisie, równoważnym z daną informacją pierwotną i wyodrębnionymi najmniej lub najbardziej ważnymi informacjami. W układach cyfrowych stosuje się algebrę Boole'a z punktu widzenia funkcji logicznych dwuwartościowych. Wszystkie kombinacje decyzyjne w danym systemie (np. układzie mechanicznym) opisuje się w tablicy kombinacji skończonej liczby zmiennych dwójkowych. Wyrażeniom (funkcjom) jako prawdziwym sytuacjom decyzyjnym (realizowalnym) przypisuje się wartość 1, oznaczającą prawdę. Zbiór alternatywnych wersji prawdziwych zapisuje się w alternatywnej postaci normalnej APN jako sumę iloczynów zmiennych. Dalsze przekształcenia wykonuje się według definicji i twierdzeń algebry Boole'a. Podobne modyfikacje z warunkami i regułami decyzji przeprowadza się w odniesieniu do wielowartościowej tablicy decyzyjnej. Podstawowe definicje i twierdzenia umożliwiają przekształcenie dowolnego zapisu logicznego na minimalną alternatywną postać normalną i na minimalną złożoną alternatywną postać normalną wielowartościowej funkcji logicznej.

2.1. ALGEBRA BOOLE'A

W 1854 roku George Boole, angielski matematyk i filozof utworzył, chociaż z pewnością nie zdawał sobie jeszcze z tego sprawy, podstawy dzisiejszej informatyki. Wprowadził on algebraiczne ujęcie logiki matematycznej w niewielkiej pracy „The Mathematical Analysis of Logic” (Matematyczna analiza logiki), która została opublikowana w 1847 roku. Natomiast w późniejszej książce „The Laws of Thought” (Prawa myśli) w 1854, Boole sformułował problem w bardziej dojrzały sposób. Dalszy rozwój algebra Boole'a zawdzięcza Williamowi Jevonsowi i Charlesowi Peirce'owi, których prace opublikowano w latach sześćdziesiątych XIX wieku. Rezultaty w dziedzinie logiki matematycznej i aksjomatycznej teorii zbiorów osiągnęli m.in. Paul Cohen i Dana Stewart Scott.

W oparciu o algebrę Boole'a zdefiniowano dwa ważne działy matematyki jak teoria mnogości oraz logika klasyczna. W algebrze tej definiuje się symbole podstawowe, aksjomaty oraz zbiór twierdzeń z nich wyprowadzonych. Zbiór aksjomatów może być wybierany arbitralnie. Algebrę Boole'a można zdefiniować na kilka sposobów [1, 14, 17, 18, 20, 91, 104, 109, 111, 113, 130, 135, 144]. W dalszej części pracy przedstawiony został jeden z nich [17, 176, 189, 219].

Algebrę Boole'a nazywa się układ $A = \{A, +, \cdot, 0, 1\}$, gdzie do A należą przynajmniej dwa różne elementy i muszą być spełnione następujące aksjomaty:

- A1. $\bigwedge_{a,b,c} (a+b)+c = a+(b+c),$
- A2. $\bigwedge_{a,b,c} (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c),$
- A3. $\bigwedge_{a,b} a+b = b+a,$
- A4. $\bigwedge_{a,b} a \cdot b = b \cdot a,$
- A5. $\bigvee_0 \bigwedge_a a+0 = 0+a = a,$
- A6. $\bigvee_1 \bigwedge_a a \cdot 1 = 1 \cdot a = a,$
- A7. $\bigwedge_{a,b,c} a+(b \cdot c) = (a+b) \cdot (a+c),$
- A8. $\bigwedge_{a,b,c} a \cdot (b+c) = (a \cdot b) + (a \cdot c),$
- A9. $\bigwedge_a \bigvee_{\bar{a}} a \cdot \bar{a} = 0 \quad i \quad a + \bar{a} = 1.$

Jeśli przyjmie się, że a, b będą dowolnymi elementami algebry Boole'a, można wyróżnić następujące własności [176, 219]:

- W1. $a + a = a$
- W2. $aa = a$
- W3. $a + 1 = 1$
- W4. $a0 = 0$
- W5. $a + ab = a$
- W6. $a = \bar{\bar{a}}$
- W7. Prawo De Morgana sumy: $\overline{(a+b)} = \bar{a}\bar{b}$
- W8. Dowolna, skończona liczba elementów a_1, \dots, a_k należących do algebry Boole'a:
 $\overline{a_1 + a_2 + \dots + a_k} = \bar{a}_1 \bar{a}_2 \dots \bar{a}_k$
- W9. Prawo De Morgana iloczynu: $\overline{(ab)} = \bar{a} + \bar{b}$
- W10. $\overline{(a_1 a_2 \dots a_k)} = \bar{a}_1 + \bar{a}_2 + \dots + \bar{a}_k$

2.1.1. FUNKCJE BOOLOWSKIE

Funkcjami boolowskimi nazywa się funkcje dowolnej, skończonej liczby zmiennych dwójkowych, które przyjmują wartości 0 lub 1 [143, 157, 158, 159, 190, 219, 219].

Obszarem określoności funkcji boolowskiej n zmiennych jest zbiór możliwych wektorów o n składowych x_1, \dots, x_n , przy czym każdemu $i = 1, \dots, n$ odpowiada $x_i = 0$ lub $x_i = 1$. Każdy taki wektor można traktować jako zestaw dwójkowy, któremu odpowiada liczba całkowita nieujemna, wyrażoną w układzie dwójkowym.

Na przykład liczba 0 to wektor $(0,0,0,0,0)$ liczbę 0, a liczba 9 to wektor $(1,0,0,1)$ 1, ponieważ zachodzą równości: $0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 0$ oraz $1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 9$.

W celu naturalnego uporządkowania n wymiarowych zestawów dwójkowych stosuje się tzw. tablicę kombinacji (n wymiarową). Zestawem zerowym (mającym same zera) jest zestaw pierwszy, a zestawem jedynkowym (mającym same jedynki) – ostatni.

Gdy $n = 3$ otrzymuje się tablicę kombinacji zmiennych dwójkowych x_1, x_2, x_3 :

$N_{(10)}$	x_1	x_2	x_3
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Wyrażenie, które jest iloczynem dowolnego skończonego zbioru liter parami różnych, nazywa się iloczynem elementarnym. Skończoną sumę, parami różnych iloczynów elementarnych, nazywa się alternatywną postacią normalną (APN). Jeśli APN funkcji boolowskiej składa się z kanonicznych iloczynów elementarnych tego samego zbioru zmiennych, to APN nazywa się kanoniczną alternatywną postacią normalną (KAPN).

W celu sprowadzenia dowolnej funkcji boolowskiej do postaci kanonicznej pozbywa się nawiasów oraz wprowadza brakujące zmienne tak, aby wartość logiczna była taka sama [157, 158]:

Przykład 2.1

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2, x_3) &= x_1 \bar{x}_2 + x_2 x_3 = x_1 \bar{x}_2 (x_3 + \bar{x}_3) + (x_1 + \bar{x}_1) x_2 x_3 = \\
 &= x_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_1 x_2 x_3 + x_1 x_2 x_3.
 \end{aligned}$$

2.1.2. IMPLIKANTY PIERWSZE FUNKCJI BOOLOWSKIEJ

Implikantem funkcji boolowskiej f jest iloczyn literałów (zmiennie zanegowane albo zwykłe) o następującej właściwości: jeśli w poszczególnych zestawieniach wartości zmiennych, implikan jest równy jedności, także funkcja f jest równa jedności. Istotę implikantów pierwszych określił Quine [202] w 1952 roku.

W procesie minimalizacji funkcji boolowskiej znajduje się najprostszą funkcję równoważną danej funkcji początkowej, to znaczy, że istnieje możliwość jej zapisu za pomocą najmniejszej liczby liter i symboli logicznych (negacja, koniunkcja i alternatywa) [176, 202].

W algorytmie opracowanym przez Quine'a znajduje się implikanty pierwsze funkcji boolowskiej. Związany jest z etapami:

- poszukiwania wszystkich implikantów pierwszych danej funkcji,
- tworzenia zredukowanego systemu implikantów pierwszych, czyli nieredukowalnej postaci NAPN funkcji boolowskiej,
- tworzenia minimalnej alternatywnej postaci normalnej (MAPN).

Sumę wszystkich implikantów pierwszych danej funkcji boolowskiej nazywa się skróconą alternatywną postacią normalną (SAPN). Po zastosowaniu odpowiednich twierdzeń analizy kombinatorycznej, można ogólnie zbadać liczbę wszystkich możliwych implikantów pierwszych danej funkcji logicznej.

Po przeprowadzeniu operacji sklejanie i pochłaniania elementarnego w algorytmie Quine'a, znajduje się wszystkie implikanty pierwsze danej funkcji boolowskiej [163, 164].

Znalezienie zredukowanego systemu implikantów pierwszych przeprowadza się na podstawie tablicy implikantów danej funkcji boolowskiej, w której wierszami są implikanty pierwsze, natomiast kolumnami – kanoniczne wyrazy iloczynowe, gdzie funkcja ma wartość 1.

Przykład 2.2

Funkcja $f(x, y, z) = \bar{x}y + x\bar{y} + xz + yz$ ma cztery implikanty pierwsze; $f(x, y, z)$ przyjmuje wartość 1 dla pięciu zestawów wartości zmiennych dwójkowych: (010), (011), (100), (101), (111), którym odpowiadają iloczyny kanoniczne: $\bar{x}y\bar{z}$, $\bar{x}yz$, $x\bar{y}\bar{z}$, $x\bar{y}z$, xyz ;

	$\bar{x}y\bar{z}$	$\bar{x}yz$	$x\bar{y}\bar{z}$	$x\bar{y}z$	xyz
$\bar{x}y$	*	*			
$x\bar{y}$			*	*	
xz				*	*
yz		*			*

Wybieranie zredukowanych zbiorów implikantów pierwszych przeprowadza się bezpośrednio z tablicy, przy czym należy przede wszystkim wybrać te wiersze, dla których znajduje się w kolumnie dokładnie jedna gwiazdka. Takie implikanty pierwsze wchodzi w skład każdego zredukowanego zbioru implikantów pierwszych danej funkcji.

Jeśli takie implikanty pierwsze pokrywają tylko część jedynek funkcji, to z pozostałego zbioru implikantów pierwszych trzeba dodać takie, aby powstało całkowite pokrycie (w przykładzie $\bar{x}y$ i $x\bar{y}$ nie pokrywają całej funkcji, więc należy dodać jeszcze implikant xz lub yz).

Przy szukaniu zredukowanego systemu implikantów pierwszych, na podstawie tablicy funkcji boolowskiej dużej liczby zmiennych, stosuje się w celu ułatwienia rachunków metodę algebraiczną, którą wprowadził Petrick [167].

Podczas stosowania algorytmu Quine’a funkcji boolowskiej dużej liczby zmiennych, należy stosować algorytm Mc Cluskeya, gdyż występują tutaj kanoniczne wyrazy elementarne zapisane kodowo, a nie – jak poprzednio – literami.

2.2. METODY MINIMALIZACJI FUNKCJI LOGICZNYCH

W minimalizacji funkcji logicznej wyznacza się jej najprostszej formuły równoważne. Opracowano wiele metod minimalizacji funkcji boolowskich. Ogólnie metody minimalizacji funkcji logicznych można podzielić na: graficzne, analityczne i komputerowe. Tradycyjnymi metodami oprócz metody Quine’a- McCluskeya są: metoda map Karnaugh [149, 213], metoda iteracyjnego konsensusu [150, 198] czy metoda Espresso [108] (oparta na algorytmie ekspansji). Metody bazujące na generowaniu pokryć przy jak najmniejszej liczbie implikantów prostych. zaproponowali m.in: Michel R. Dagenais [48], Jean C. Madre [46], Patrick C. McGeer [141], Oliver Coudert [44, 45, 46].

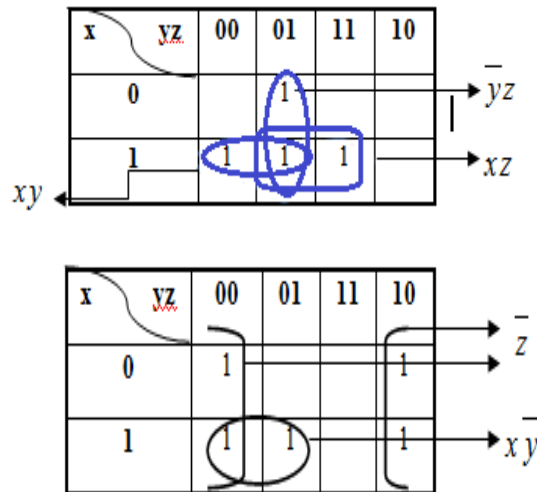
2.2.1. METODA TABLIC KARNAUGHA

Metoda Karnaugh to sposób minimalizacji funkcji boolowskich, który został odkryty w 1950 roku przez Maurice Karnaugh. Tablica (mapa) Karnaugh jest uporządkowaną w specyficzny sposób postacią zapisu tablicy wartości funkcji logicznej [149].

Układając tablicę Karnaugh grupuje się wszystkie kombinacje wartości argumentów, aby zawsze, przy przejściu z danego pola do pola sąsiedniego, zmieniała się wartość tylko jednego argumentu. Zasadę sąsiedztwa stosuje się również dla pól leżących przy krawędziach tablicy. W metodzie Karnaugh rozwiązuje się to w ten sposób, że różniącym się tylko o negację pełnym iloczynom przyporządkowuje się sąsiednie pola tablicy, do k [213].

Przykład 2.3

Na rysunku 2.1 przedstawiono przykłady minimalizacji funkcji boolowskiej metodą Karnaugh: $F(x, y, z) = \bar{x}yz + x\bar{y}z + x\bar{y}\bar{z} + x\bar{y}z + xyz$.



Rys. 2.1. Przykłady minimalizacji funkcji boolowskiej metodą Karnaugh

2.2.2. METODA ITERACYJNEGO KONSENSUSU

Metoda ta, rozpoczyna się od implikantów funkcji i polega na iteracyjnym wykonaniu następujących kroków [150, 198]:

- usunięciu wszystkich pokrytych implikantów (z postaci dysjunkcyjnej),
- wygenerowaniu wszystkich konsensusów z par iloczynów, dodaniu ich do postaci dysjunkcyjnej i przejście do kroku pierwszego.

Obliczenia algorytmiczne wykonuje się dotąd, aż wszystkie uzyskane iloczyny będą miały postać implikantów prostych.

Poza wymienionymi pozycjami, pozostałe prace odnoszące się do metod wyznaczania implikantów pierwszych to [6, 15, 45, 98, 106, 114, 117, 123, 135, 136, 137, 139, 170, 174, 175, 183, 188].

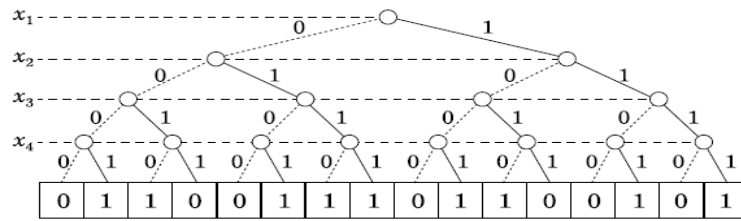
2.2.3. METODY GRAFICZNE

2.2.3.1. DRZEWA DECYZYJNE

Złożoność tablic logicznych lub tablic prawdy rośnie wykładniczo względem liczby zmiennych. W przypadku większej liczby zmiennych decyzyjnych istnieją praktyczne trudności geometryczne w celu wyodrębnienia najmniej lub najbardziej ważnych informacji.

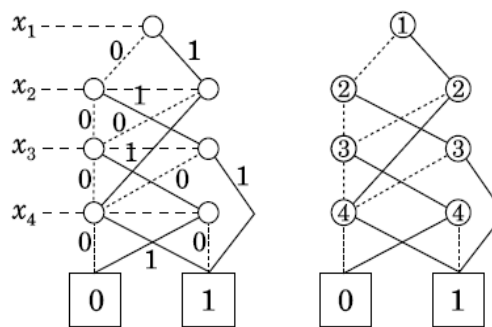
Drzewa decyzyjne pozwalają na łatwe i szybkie wyszukiwanie i klasyfikację informacji. W technice stosuje się bardzo dużo rodzajów drzew. Ze względu na charakter pracy zostały zaprezentowane tylko wybrane.

Drzewa decyzyjne wprowadził po raz pierwszy Macfarlane w 1885 roku [135, 136]. Macfarlane’a przekodował tablicę Marquanda [138] do liniowego ciągu kratek, a przynależność kratek do odpowiednich zmiennych została przedstawiona w postaci drzewa. Na rysunku 2.2. przedstawiono drzewo Macfarlane’a przykładowej funkcji logicznej.



Rys. 2.2. Ustalone drzewo Macfarlane'a przykładowej funkcji logicznej

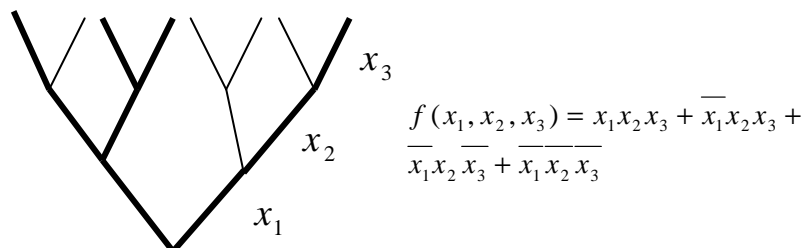
Przedstawione na rysunku 2.2 drzewo posiada złożoność wykładniczą względem liczby zmiennych podobnie jak tablice logiczne. Dlatego stosuje się drzewa zredukowane, otrzymywane przez stosowanie dwóch prostych diagramowych reguł redukcji przedstawione na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Zredukowane drzewa Macfarlane'a

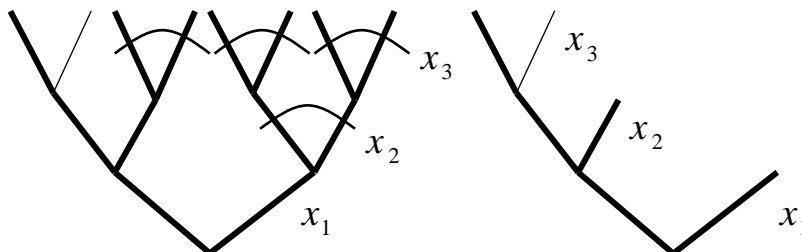
W dalszych modyfikacjach uwzględniono jeszcze lepsze rezultaty [173].

W przypadku drzew logicznych wartości logiczne zmiennych są kodowane na gałązkach drzewa. Na danym poziomie drzewa może występować tylko jedna zmienna logiczna, przy czym liczba pięter jest dokładnie równa liczbie zmiennych niezależnych danej funkcji logicznej [156, 160, 161, 162]. Przedstawienie danej funkcji boolowskiej, zapisanej w kanonicznej alternatywnej postaci normalnej (KAPN), na drzewie logicznym polega na zakodowaniu poszczególnych iloczynów kanonicznych na ścieżce drzewa od korzenia do wierzchołka końcowego [156]. Poszczególne ścieżki na drzewie (od korzenia do wierzchołka) jest składnikiem jedynek funkcji logicznej, opisującej realizację jednego możliwego rozwiązania. Zbiór ścieżek jest natomiast zbiorem wszystkich możliwych rozwiązań. Na rysunku 2.4 przedstawiono drzewo logiczne, na którym zakodowano ustaloną funkcję boolowską trzech zmiennych.



Rys. 2.4. Funkcja boolowska trzech zmiennych zakodowana na drzewie logicznym

W algorytmie Quine'a-Mc Cluskeya poprzez upraszczanie funkcji boolowskich zapisanych w KAPN, otrzymuje się skróconą alternatywną postać normalną (SAPN), a ostatecznie minimalną alternatywną postać normalną (MAPN) (Rys. 2.5) [156, 160].

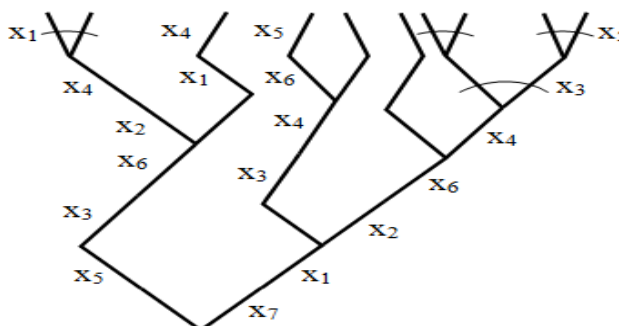


Rys. 2.5. Drzewo logiczne i uproszczone drzewo logiczne

Uzyskuje się wówczas zminimalizowaną postać wyjściowej funkcji (o minimalnej liczbie literałów). Nie jest to jednak minimalna postać decyzyjna, gdyż występują tu tak zwane gałązki izolowane, oznaczające brak ciągłości między korzeniem, a wierzchołkami [10].

W przypadku zmodyfikowanych drzew logicznych, na danym poziomie drzewa może występować wiele zmiennych logicznych, co oznacza, że tradycyjne drzewa logiczne są szczególnym przypadkiem zmodyfikowanych drzew logicznych [11, 53, 130, 131].

Na rysunku 2.6 przedstawiono przykład zmodyfikowanego drzewa logicznego.



Rys. 2.6. Przykładowe zmodyfikowane drzewo logiczne [131]

Na zmodyfikowanym drzewie logicznym z rysunku 2.6 można wyróżnić lewą (L) i prawą (P) część z następującą kolejnością zmiennych na poszczególnych piętrach:

$$\begin{aligned}
 \text{L: } & x_7 \equiv 0 \rightarrow \underbrace{x_5 \equiv 0, x_3 \equiv 1, x_6 \equiv 1}_{\rightarrow} x_2 = 0 \rightarrow x_4 \equiv 0 \rightarrow x_1; \\
 & \phantom{\text{L: }} \phantom{\underbrace{x_5 \equiv 0, x_3 \equiv 1, x_6 \equiv 1}_{\rightarrow}} x_2 = 1 \rightarrow \underbrace{x_1 \equiv 0, x_4 \equiv 1}_{}; \\
 \text{P: } & x_7 \equiv 1 \rightarrow x_1 \equiv 1 \rightarrow x_2 = 0 \rightarrow \underbrace{x_3, x_4}_{\rightarrow} \rightarrow \underbrace{x_5, x_6}_{}; \\
 & \phantom{\text{P: }} x_2 = 1 \rightarrow x_6 \equiv 1 \rightarrow x_4 = 0 \rightarrow \underbrace{x_3, x_5}_{}; \\
 & \phantom{\text{P: }} x_4 = 1 \rightarrow \underbrace{x_3, x_5}_{}.
 \end{aligned}$$

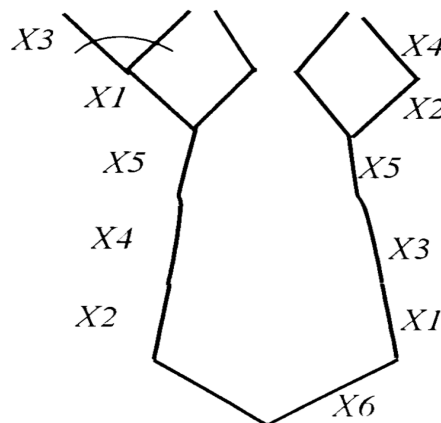
Spośród wielu zmodyfikowanych drzew danego wariantu obliczeniowego, istnieją drzewa optymalne, które tak samo jak w przypadku drzew tradycyjnych, po uproszczeniu graficznym, mają minimalną liczbę gałęzi [131, 53].

Przykład 2.4

W tabeli 2.1 przedstawiono funkcję logiczną zapisaną kodowo w KAPN. Optymalne zmodyfikowane drzewo logiczne odpowiadające tabeli 2.1 przedstawiono na rysunku 2.7.

Tab. 2.1 Kodowy zapis funkcji boolowskiej

	X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	0	1	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	1
3	0	1	0	1	1	0
4	1	1	0	1	1	0
5	0	1	1	1	1	0

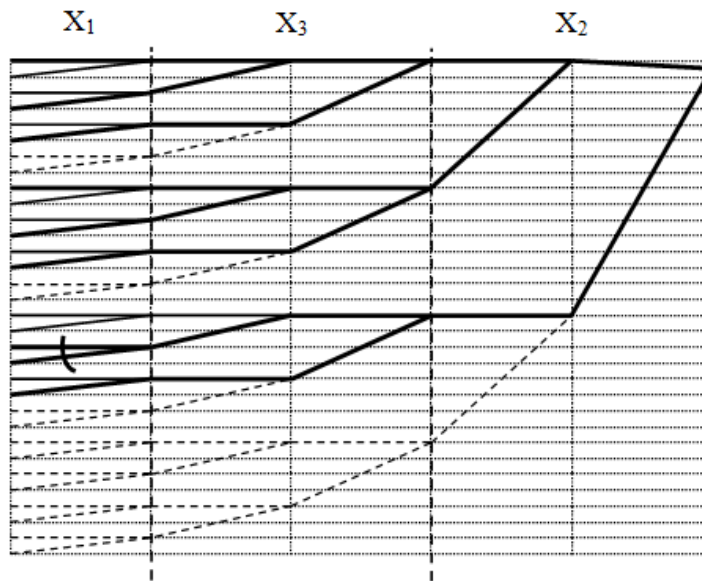


Rys. 2.7. Optymalne zmodyfikowane drzewo logiczne dla funkcji boolowskiej z Tab. 2.1

Inne rodzaje struktur drzewiastych m.in. z logiką rozmytą można znaleźć w [107, 124, 169, 187, 213].

2.2.3.2. METODA SIATKOWO-DRZEWIASTA

W metodzie siatkowo-drzewiastej analizuje się minimalizację upraszczania graficznego drzewa logicznego położonego na siatce. Należy tu funkcję przedstawić za pomocą układów dwuwartościowych i uprościć całe dwuwartościowe drzewo lub podgrupy drzew. Zastosowanie metody siatkowo-drzewiastej, jako jednej ze strukturalnych metod optymalizacyjnych układów maszynowych przedstawiono w [10, 130]. Na rysunku 2.8 pokazano położenie na siatce drzewa logicznego o układzie zmiennych X_2, X_3, X_1 .



Rys. 2.8. Położenie na siatce drzewa logicznego o układzie zmiennych X_2, X_3, X_1 .

Zagadnieniami minimalizacji funkcji logicznych zajmowali się m.in.: R. Rudell, A. Sangiovanni-Vincentelli, G. W. Dueck, D. M. Miller, P. W. Besslich, J. A. Armstrong, G. Pomper, R. K. Brayton, (...).

2.3. ALGORYTM QUINE’A-MC CLUSKEYA MINIMALIZACJI CZĄSTKOWYCH WIELOWARTOŚCIOWYCH FUNKCJI LOGICZNYCH

Dawniej zagadnienia minimalizacji funkcji boolowskich były przydatne w sieciach przełączających i w teorii automatów. W minimalizacji uwzględniającej wielowartościowe systemy logiczne pełne, wyznacza się rangę ważności ustalonych zmiennych, szczegółową analizę podrozwiązań realizowalnych, itd. W przypadku wielowartościowych funkcji logicznych, podobnie jak w funkcjach boolowskich, podstawową rolę w szukaniu implikantów pierwszych odgrywają pojęcia niepełnego sklejanania i pochłaniania elementarnego, które stosuje się do APN danej funkcji logicznej.

Operacją **sklejanania** nazywa się przekształcenie [156, 140]:

$$A_{j_o}(x_r) + \dots + A_{j_{m_r-1}}(x_r) = A,$$

gdzie: $r = 1, \dots, n$ oraz A - cząstkowy iloczyn elementarny, którego

zmienne poszczególnych literałów należą do zbioru $\{x_1, \dots, x_{r-i}, x_{r+i}, \dots, x_n\}$.

Operacją **niepełnego sklejanania** nazywa się przekształcenie:

$$A_{j_o}(x_r) + \dots + A_{j_{m_r-1}}(x_r) = A + A_{j_o}(x_r) + \dots + A_{j_{m_r-1}}(x_r),$$

gdzie $r = 1, \dots, n$ oraz A - cząstkowy iloczyn elementarny, którego zmienne poszczególnych literałów należą do zbioru $\{x_1, \dots, x_{r-1}, x_{r+1}, \dots, x_n\}$.

Operacją **pochłaniania elementarnego** nazywa się przekształcenie:

$$A j_u(x_r) + A = A,$$

gdzie: $0 \leq u \leq m_r - 1$, $1 \leq r \leq n$, oraz A - cząstkowy iloczyn elementarny, którego zmienne poszczególnych literałów należą do zbioru $\{x_1, \dots, x_{r-1}, x_{r+1}, \dots, x_n\}$. (Jeśli zachodzi powyższa równość, to A pochłania $A j_u(x_r)$).

Znaki (v) oznaczają, że dany cząstkowy iloczyn elementarny zapisany za pomocą cyfr układu (m_1, \dots, m_n) -pozycyjnego bierze udział w sklejaniu z tymi iloczynami, które mają znak (v) w tej samej kolumnie.

Znaki zapisu operacji sklejanego wpisuje się oddzielnie w kolumnach, a nie jak w dotychczasowych opracowaniach literaturowych przypadków dwuwartościowych w jednej kolumnie.

W przypadku jednakowej wielowartościowości zmiennych x_1, \dots, x_n danej funkcji logicznej, zbiór implikantów pierwszych otrzymuje się jako przypadek szczególny z różnej wielowartościowości zmiennych.

Przykład 2.5

Korzystając z zależności:

$$A j_0(x_r) + \dots + A j_{m-1}(x_r) = A, \quad A j_u(x_r) + A = A,$$

gdzie: $A = A(x_1, \dots, x_{r-1}, x_{r+1}, \dots, x_n)$,

$$j_u(x_r) = \begin{cases} m-1 & , \quad u = x_r \\ 0 & , \quad u \neq x_r \end{cases} \quad 0 \leq u \leq m-1;$$

kolejne etapy minimalizacji wielowartościowej funkcji logicznej [156] można przedstawić w następujący sposób:

0 2 0	0 2 -
1 0 1	2 0 -
<u>2 0 0</u>	<u>1 - 1</u>
0 2 1	2 1 -
1 1 1	- 2 1
2 0 1	2 - 1
<u>2 1 0</u>	
0 2 2	
1 2 1	
2 0 2	
<u>2 1 1</u>	
2 1 2	
2 2 1	

	020	200	101	021	201	210	111	022	121	202	211	212	221
02-	*			*				*					
20-		*			*					*			
1-1			*				*		*				
21-						*					*	*	
-21				*					*				*
2-1					*						*		*

Ostatecznie otrzymuje się dwie NAPN i MAPN danej funkcji logicznej, zapisanie za pomocą liczb układu m-pozycyjnego:

$$\{(02-), (20-), (1-1), (21-), (-21)\} \text{ oraz } \{(02-), (20-), (1-1), (21-), (2-1)\}.$$

Ranga ważności kolejnych zmiennych decyzyjnych wyznaczana jest poprzez złożone alternatywne postacie normalne, dzięki zamianie pięter w logicznych drzewach decyzyjnych. Zamiana pięter drzewa logicznego w złożonych wielowartościowych funkcjach logicznych, ustala rangę ważności zmiennych logicznych od najważniejszej (przy korzeniu) do najmniej ważnej (na górze). Istnieje uogólnienie dwuwartościowego wskaźnika jakości na wielowartościowy; $(C_k - k_i m_i) + (k_i + K_i)$, gdzie C_k – liczba gałęzi k-tego piętra, k_i – krotność upraszczania na k-tym piętrze m_i – wartościowej zmiennej, K_i – liczba gałęzi (k-1) – ego piętra, z których powstały nie upraszczające się gałęzie k – tego piętra. W ten sposób można otrzymać minimalną złożoną alternatywną postać normalną MZAPN danej funkcji logicznej bez gałęzi izolowanych na drzewie decyzyjnym, z jednoczesną minimalną liczbą gałęzi prawdziwych (realizowalnych), które w szczególności można uznać za elementarne wytyczne projektowania. Wszystkie przekształcenia dotyczą tzw. algorytmu Quine’a - Mc Cluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych.

Przykład 2.6

Wielowartościowa funkcja logiczna $f(x_1, x_2, x_3)$, gdzie $x_1, x_2, x_3 = 0, 1, 2$, zapisanej numerycznie KAPN: 100, 010, 002, 020, 101, 110, 021, 102, 210, 111, 201, 120, 022, 112, 211, 121, 212, 221, 122, z jedną MZAPN po zastosowaniu algorytmu Quine’a – Mc Cluskey’a minimalizacji indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych, posiada 13 literałów [156]:

$$f(x_1, x_2, x_3) = j_0(x_1)(j_0(x_2)j_2(x_3) + j_1(x_2)j_0(x_3) + j_2(x_2)) + j_1(x_1) + j_2(x_1)(j_0(x_2)j_1(x_3) + j_1(x_2) + j_2(x_2)j_1(x_3))).$$

Na rysunku 2.8 przedstawiono wszystkie możliwe ZKAPN danej wielowartościowej funkcji logicznej.

			v			
x ₁	x ₂	x ₃				
1	0	0		V		
0	1	0				<u>V</u>
<hr/>						
0	0	2				<u>V</u>
0	2	0		V		
1	0	1			V	
1	1	0				V
<hr/>						
0	2	1		V		
1	0	2			V	
2	1	0				V
1	1	1			V	
2	0	1				<u>V</u>
1	2	0				V
<hr/>						
0	2	2		V		
1	1	2			V	
2	1	1				V
1	2	1				V
<hr/>						
2	1	2				V
2	2	1				<u>V</u>
1	2	2			V	

			v			
x ₁	x ₂	x ₃				
1	0	0				<u>V</u>
0	1	0		V		
<hr/>						
0	0	2				<u>V</u>
0	2	0				<u>V</u>
1	0	1				<u>V</u>
1	1	0		V		
<hr/>						
0	2	1		V		
1	0	2				<u>V</u>
2	1	0		V		
1	1	1				<u>V</u>
2	0	1				<u>V</u>
1	2	0				<u>V</u>
<hr/>						
0	2	2				<u>V</u>
1	1	2				<u>V</u>
2	1	1				<u>V</u>
1	2	1		V		
<hr/>						
2	1	2				<u>V</u>
2	2	1		V		
1	2	2				<u>V</u>

			v			
x ₁	x ₂	x ₃				
1	0	0	V			
0	1	0			<u>V</u>	
<hr/>						
0	0	2				<u>V</u>
0	2	0			<u>V</u>	
1	0	1		V		
1	1	0	V			
<hr/>						
0	2	1				<u>V</u>
1	0	2		V		
2	1	0				<u>V</u>
1	1	1		V		
2	0	1			V	
1	2	0	V			
<hr/>						
0	2	2				<u>V</u>
1	1	2		V		
2	1	1			V	
1	2	1	V			
<hr/>						
2	1	2				<u>V</u>
2	2	1		V		
1	2	2		V		

$$x_1 : 19 - 2 \cdot 3 + 2 + 7 = 22$$

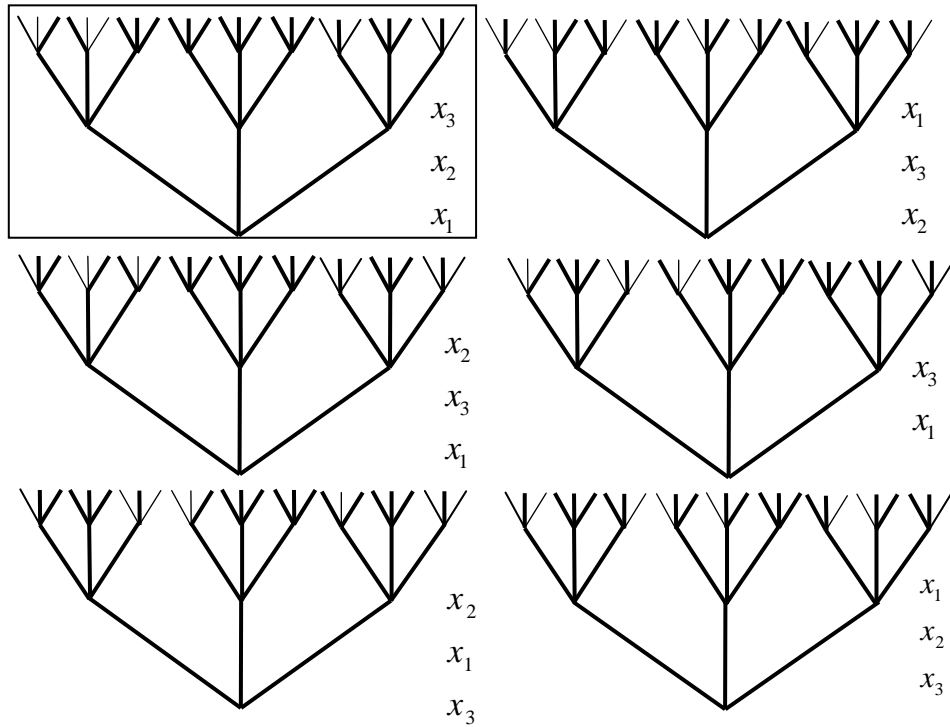
$$x_2 : 19 - 4 \cdot 3 + 4 + 5 = 16$$

$$x_3 : 19 - 5 \cdot 3 + 5 + 4 = 13$$

			v							v
x ₁	x ₂						x ₁	x ₂		
0	0				<u>V</u>		0	0		<u>V</u>
-	1	0	V				-	1	0	<u>V</u>
0	1				<u>V</u>		0	1		<u>V</u>
-	0	2			<u>V</u>		-	0	2	<u>V</u>
-	1	1	V				-	1	1	<u>V</u>
2	0				<u>V</u>		2	0		<u>V</u>
-	2	1			<u>V</u>		-	2	1	<u>V</u>
-	1	2	V				-	1	2	<u>V</u>
2	2				<u>V</u>		2	2		<u>V</u>

$$x_1 : 9 - 0 \cdot 3 + 0 + 3 = 12$$

$$x_2 : 9 - 1 \cdot 3 + 1 + 2 = 9$$



Rys. 2.8. ZKAPN i MZAPN danej funkcji logicznej z przykładu 2.6

Przedstawione podstawowe zagadnienia minimalizacji funkcji logicznych dwu- i wielowartościowych mogą być uogólnione na inne graficzne struktury decyzyjne, celem dostosowania do wymagań optymalizacji dyskretnej układów maszynowych. złożonych z typowych elementów – optymalizacja strukturalna. Dodatkowo należy uwzględnić wielowartościowe współczynniki wagowe.

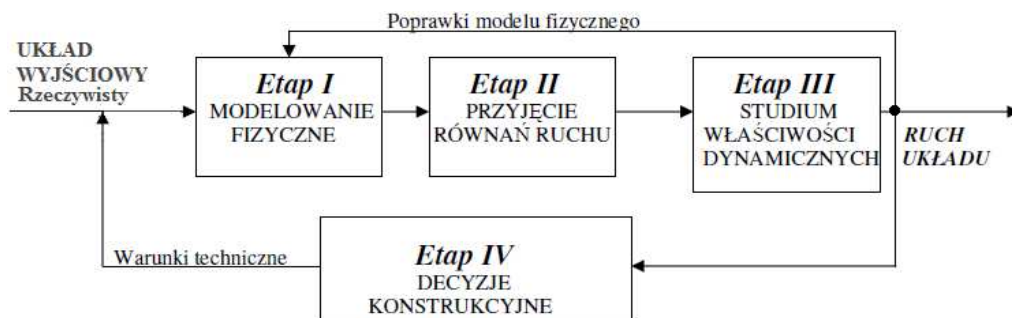
W dotychczasowych opracowaniach literaturowych nie uwzględniono różnych współczynników dla iloczynów logicznych w procesach minimalizacji rozdzielnej i wspólnej układów wielowartościowych równań logicznych.

ROZDZIAŁ 3

RÓWNANIA LOGICZNE W OPTYMALIZACJI
UKŁADÓW MASZYNOWYCH

We współczesnej technice wyróżnia się systemy zawierające układy o różnym charakterze fizycznym, np.: elektromechaniczne, pneumatyczne, hydrauliczne, itp.. Projektowanie i analiza tego typu układów wymaga stosowania odpowiednich form opisu i metod badawczych, w celu zastosowania odpowiedniej procedury optymalizacyjnej [35, 89, 100, 132, 145, 218]. W studium dynamiki dowolnego systemu występują następujące etapy (rysunek 3.1):

- opracowanie modelu matematycznego tzn. sformułowanie związków (np. równań różniczkowych), opisujących procesy zachodzące w przyjętym modelu fizycznym;
- określenie własności dynamicznych układu na podstawie badań modelu matematycznego, w celu przewidywania przebiegów procesów wywołanych różnymi przyczynami;
- podjęcie ewentualnych decyzji projektowych zapewniających żądane (optymalne) zmiany w zachowaniu badanego układu.



Rys. 3.1. Etapy studium dynamiki układu [193, 218]

Szeroka grupa układów stosowanych w przemyśle to maszyny przepływowe [33, 105, 193, 195, 212, 214]. W ich działaniu wyróżnia się dwa stany: stan przejściowy (w którym wartości funkcji układu zmieniają się w czasie) i stan ustalony (wartości funkcji nie ulegają zmianie w czasie lub zmiany te występują cyklicznie). Zmiany parametrów konstrukcyjnych x_1, x_2, \dots, x_n wpływają na zachowanie się funkcji f_1, f_2, \dots, f_n zależnych od czasu t . W procesie optymalizacji dla tych samych zmian parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, można zaobserwować różne zachowanie się funkcji zależnych od czasu [52].

Tablice decyzyjne [39] i funkcje logiczne [52, 79, 82, 101, 102] mają zastosowanie w zagadnieniach modelowania układów maszynowych z równaniami różniczkowymi (zwykłymi lub cząstkowymi). Wynika to z faktu, że elementy nieliniowe można rozdzielić na skończoną liczbę elementów (części) liniowych, co prowadzi do otrzymania kilku układów liniowych w sensie przebiegu modelowania z pierwotnego pojedynczego modelu.

Optymalizacja dyskretna przepływowych układów maszynowych polega na wyznaczeniu rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych. Wytyczne co do kolejności podejmowanych decyzji wynikają z wielowartościowych drzew decyzyjnych z uwzględnieniem realizacji założonej funkcji celu (np. stabilności układu).

3.1. WIELOWARTOŚCIOWE FUNKCJE LOGICZNE Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

Działanie maszyn przepływowych najczęściej oparta jest na dwóch stanach: stan przejściowy (w którym wartości funkcji układu zmieniają się w czasie) i stan ustalony.

Określenie stabilności modelu układu, a w następnej kolejności rzeczywistego obiektu jest podstawowym problemem dynamiki. Analizę stabilności można rozpatrywać w aspekcie stabilności elementu lub stabilności całego układu z uwzględnieniem analitycznych lub graficznych zależności wiążących, np. parametry użytkowe (ciśnienie i natężenie przepływu) z parametrami eksploatacyjnymi, np.: wzmocnieniami regulatorów, pojemnością układu hydraulicznego, ruchomą masą, itd.. Opóźnienia układu przez parametry eksploatacyjne oraz nieodpowiednie zastosowanie wzmocnień pętli, wiąże się z niestabilną pracą całego układu. W analizie dynamiki hydraulicznych elementów lub układów wyróżnia się trzy zasadnicze kryteria stabilności spotykane w literaturze:

- sprowadzenie nieliniowych równań różniczkowych do równoważnych im równań zlinearyzowanych,
- rozwiązywanie zagadnień stabilności modelu z ograniczeniem nieliniowości,
- rozwiązywanie zagadnień stabilności na podstawie układu, opisanego nieliniowymi równaniami różniczkowymi.

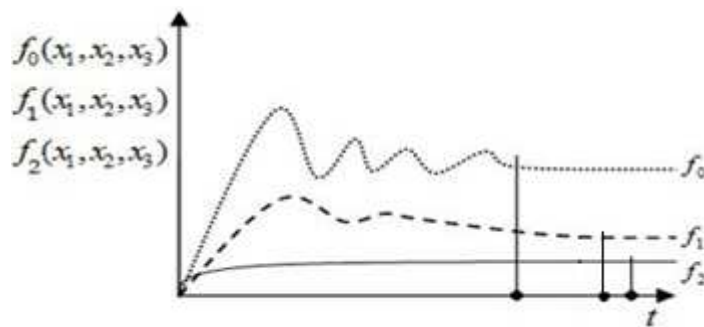
W celu ułatwienia procesu optymalizacji i określenia rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, przyjmowany jest najczęściej układ zlinearyzowany. Stabilizacja układu będzie zależeć od zmian wartości parametrów konstrukcyjnych i /lub eksploatacyjnych, od cech i własności dynamicznych układu lub elementu.

Zachowanie się funkcji f_1, f_2, \dots, f_n zmiennych w czasie t , uzależnione jest od zmiany parametrów konstrukcyjnych x_1, x_2, \dots, x_n . W procesie optymalizacji dla tych samych zmian parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, można zaobserwować różne zachowanie się funkcji zależnych od czasu [52, 55, 57, 77]. Wykresy wielkości wyjściowych z oznaczonymi czasami stabilizacji jako wyniki modelowania (np.: w programie MATLAB [221], FLUENT [96]) zależą od danych wartości liczbowych parametrów konstrukcyjnych. Zmiany takich wartości (np.: zmniejszenie, zwiększenie, pozostawienie bez zmian) w procesie przeprojektowania układu na inne warunki pracy można zapisać kodowo w logice wielowartościowej, natomiast zbiór wytycznych projektowania jako sumy wielowartościowych iloczynów logicznych. Działanie to związane jest z każdą wielkością wyjściową z uwzględnieniem dodatkowych, wagowych logicznych współczynników. Wówczas

mniejszy (lepszy) czas stabilizacji ma ważniejszą (większą) wartość współczynnika wagowego odpowiedniego wielowartościowego iloczynu logicznego.

3.1.1. WSPÓŁCZYNNIKI WAGOWE

W cząstkowej wielowartościowej funkcji logicznej $f_i(x_1, \dots, x_n)$ n zmiennych (m_1, \dots, m_n) -wartościowych współczynnik wagowy w_i przed iloczynem kanonicznym przyjmuje wartości z przedziału $\langle w_1, \dots, w_n \rangle$, przy czym $w_j = w_{j-1} + w_{j-2} + \dots + w_1$, gdzie $j = 2, \dots, n$. Dlatego wagi funkcji z wykresu na rysunku 3.2 mogą być opisane następującym układem równań logicznych: $f_1 : w_1(0,1,2)$, $f_2 : w_2(0,1,2)$, co oznacza, że stabilność f_0 osiągnięta jest najszybciej, a f_2 najpóźniej, tzn. $w_0 > w_1 > w_2$ [57, 82], czyli f_i i f_j , $w_i < w_j$, gdy $t_i > t_j$.



Rys. 3.2. Wykresy funkcji f_0, f_1, f_2 zależnych od czasu dla kodowego zapisu wielowartościowych zmiennych decyzyjnych $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 2$ [57, 82]

Przy takich założeniach można dodatkowo wprowadzić warunki niepewności odpowiednich iloczynów logicznych przedstawiających wytyczne projektowania. W teorii automatów przyjmuje się funkcję logiczną częściowo określoną, gdzie nieredukowalna (i minimalna) alternatywna postać normalna jest wyznaczana bez udziału niepewnych iloczynów logicznych. W ogólnym przypadku, zbiór ustalonych funkcji modelowania, może być rozdzielony na poszczególne wykresy zmiennych wyjściowych. Następnie tworzy się wielowartościową alternatywną postać normalną, gdzie większy logiczny współczynnik wagowy oznacza mniejszy czas stabilizacji [57, 82].

3.1.2. MINIMALIZACJA WIELOWARTOŚCIOWYCH FUNKCJI LOGICZNYCH Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

W wielowartościowych funkcjach logicznych z wagowymi iloczynami możliwe jest zastosowanie algorytmu Quine'a - McCluskeya minimalizacji wielowartościowych funkcji [156]. Podobnie jak w przypadku minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych bez współczynników wagowych, w algorytmie iloczyny elementarne zapisuje się jako liczby w odpowiednich układach pozycyjnych. Dokładny algorytm Quine'a - McCluskeya minimalizacji cząstkowych funkcji logicznych wraz z odpowiednimi definicjami i twierdzeniami z izomorfizmem

takich przekształceń przedstawiono w pracy [156]. W celu uwzględnienia współczynników wagowych wprowadza się dodatkowe elementy oraz operacje.

W danych cząstkowych wielowartościowych funkcjach logicznych $f_i(x_1, \dots, x_n)$ n zmiennych (m_1, \dots, m_n) - wartościowych należy w operacjach sklejanie oraz pseudosklejania uwzględnić współczynniki wagowe $(w_n, w_{n-1}, w_{n-2}, \dots, w_1)$, przypisane odpowiednim wielowartościowym iloczynom logicznym.

Algorytm Quine'a - McCluskeya minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych buduje się z n kolumn o (w_1, \dots, w_n) współczynnikach wagowych (Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Kolumnowy zapis współczynników wagowych iloczynów elementarnych w układzie (m_1, \dots, m_n) - pozycyjnym

x_1, \dots, x_n	w_n	w_{n-2}	...	w_1
(w_1, \dots, w_n) 0 0 ... 0 0	.			
(w_1, \dots, w_n) 0 0 ... 0 1	.			
.	.			
.	.			
.	.			
(w_1, \dots, w_n) 0 0 ... 1 $m_n - 2$.			
.	.			
.	.			
(w_1, \dots, w_n) $m_1 - 1$ $m_2 - 1$... $m_{n-1} - 1$ $m_n - 2$.			
(w_1, \dots, w_n) $m_1 - 1$ $m_2 - 1$... $m_{n-1} - 1$ $m_n - 1$.			
p_i	1 2 3 4 n...	$i = 1, \dots, n$	$i = 1, \dots, n$	$i = 1, \dots, n$

Symbole, oznaczające pseudosklejanie (\underline{V}) oraz sklejanie (\vee) kolejno względem grup indeksów różniących się o 1, umieszcza się w kolumnach odpowiadającym wartościom współczynników wagowych dla odpowiednich iloczynów logicznych.

Przy uwzględnieniu wielowartościowych współczynników wagowych indywidualne (równoległe) operacje pseudosklejania (twierdzenie 5.3[156]), kolejno względem grup indeksów, różniących się co najmniej o 1, zawierającymi (zgodnie z definicjami 2.2.1 i 2.2.2 [156]) co najwyżej $(m_i - 1)$ elementów, mogą przebiegać w kanonicznych iloczynach o różnych współczynnikach wagowych.

Znaki występują w różnych kolumnach (uwaga 3.2 [156]). Dodatkowo mogą znajdować się w kolumnach o odpowiednim współczynniku $(w_n, w_{n-1}, w_{n-2}, \dots, w_1)$, dlatego w kolumnach o (w_1, \dots, w_n) współczynnikach wagowych (Tab.3.1) wprowadza się numery pozycyjne p_i , przy czym $i=1, \dots, n$, co jest przydatne w obliczaniu jakości minimalizacji w dalszych etapach.

W przypadku operacji sklejania indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych z wagowymi współczynnikami wprowadza się definicje „czystego” i „nieczystego” sklejania.

Definicja 3.1

Operacja czystego sklejania jest sklejaniem wielowartościowych kanonicznych iloczynów elementarnych wg algorytmu Quine’a - McClusekya o takim samym współczynniku wagowym w_i .

Operacja czystego sklejania to przekształcenie

$$w_i A_j(x_r) + \dots + w_i A_{j_{m_r-1}}(x_r) = w_i A, \quad (3.1)$$

gdzie: $r = 1, \dots, n$ oraz A - cząstkowy iloczyn elementarny, którego zmienne poszczególnych literałów należą do zbioru $\{x_1, \dots, x_{r-i}, x_{r+i}, \dots, x_n\}$. W n zmiennych (m_1, \dots, m_n) - wartościowych współczynnik wagowy w_i przed cząstkowym kanonicznym iloczynem przyjmuje wartości z przedziału $\langle w_1, \dots, w_n \rangle$, przy czym $w_j = w_{j-1} + w_{j-2} + \dots + w_1$ oraz $j = 2, \dots, n$ (w przypadku oznaczeń z [156], przykładowy zapis tego przekształcenia może być jako: $1 \cdot (000) + 1 \cdot (010) + 1 \cdot (020) = 1 \cdot (0-0)$).

Definicja 3.2

Operacja sklejania wg algorytmu Quine’a McCluskey’a wielowartościowych kanonicznych iloczynów elementarnych o różnych wartościach współczynników wagowych (w_1, \dots, w_n) jest nieczystym sklejaniem.

Operację nieczystego sklejania dla wielowartościowych kanonicznych iloczynów elementarnych przeprowadza się względem współczynnika wagowego o najmniejszej wartości tzn. $\min\{w_1, \dots, w_n\}$.

Operacja nieczystego sklejania to przekształcenie:

$$\begin{aligned} w_0 A_j(x_r) + \dots + w_{m_r-1} A_{j_{m_r-1}}(x_r) = \\ = \left(\min\{w_0, \dots, w_{m_r-1}\} \right) \cdot A + \sum_{s=i_0, \dots, i_{m_r-2}} w_s \cdot A \cdot j_s(x_r), \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdzie: $r = 1, \dots, n$, $w_s > \min\{w_0, \dots, w_{m_r-1}\}$ oraz A - cząstkowy iloczyn elementarny, którego zmienne poszczególnych literałów należą do zbioru $\{x_1, \dots, x_{r-i}, x_{r+i}, \dots, x_n\}$. W n zmiennych (m_1, \dots, m_n) - wartościowych współczynnik wagowy w_i przed cząstkowym kanonicznym iloczynem przyjmuje wartości z przedziału $\langle w_1, \dots, w_n \rangle$, przy czym $w_j = w_{j-1} + w_{j-2} + \dots + w_1$ gdzie $j = 2, \dots, n$ (w przypadku oznaczeń z [156], przykładowy zapis tego przekształcenia może być przedstawiony jako: $1 \cdot (000) + 2 \cdot (010) + 2 \cdot (020) = 1 \cdot (0-0) + 2(010) + 2(020)$).

Definicja 3.3

Operacja niepełnego sklejanja to przekształcenie, które po wykonaniu algorytmu w wyniku, zatrzymuje pierwotne zapisy podlegające sklejeniu.

Uwaga 2.1

W operacji czystego sklejanja znaki (V) iloczynów elementarnych o w_i współczynniki wagowym umieszcza się w jednej kolumnie na pozycji p_i (co wynika z definicji 3.1).

Uwaga 2.2

W operacji nieczystego sklejanja znaki (V) iloczynów elementarnych o (w_1, \dots, w_n) współczynnikach umieszcza się w jednej kolumnie odpowiadającej najmniejszej wartości współczynnika $\min\{w_1, \dots, w_n\}$ na pozycji p_i . W pozostałych sklejących się iloczynach o współczynnikach wagowych $W_s > \min\{w_0, \dots, w_{m-1}\}$, w kolumnach o odpowiednim współczynniku (w_1, \dots, w_n) stawia się znaki (V). Przy czym umieszcza się je na tej samej pozycji p_i , na której umieszcza się znaki V w kolumnie o współczynniku $\min\{w_1, \dots, w_n\}$.

Istnieje izomorficzna interpretacja przekształceń logicznych, dlatego algorytm Quine'a- McCluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych [156], może być rozpatrywany z uwzględnieniem wspomnianych współczynników wagowych, co ma znaczenie w opisywaniu rangi ważności wytycznych projektowania.

Minimalizację graficzną na drzewach wykonuje się zawsze od wierzchołków do korzenia, przy założeniu, że nie powinny powstawać gałązki izolowane.

Przykład 3.1

W cząstkowej funkcji logicznej $f(x_1, x_2, x_3)$, zapisanej numerycznie w KAPN: 010, 100, 002, 011, 110, 012, 112, algorytm Quine'a - Mc Cluskeya minimalizacji funkcji logicznych z wielowartościowymi współczynnikami wagowymi daje jedną MZAPN, która ma 11 literałów $f(x_1, x_3, x_2)$, czyli:

$$f(x_1, x_3, x_2) = j_0(x_1)(1j_0(x_3)j_1(x_2)) + 2j_1(x_3)2j_1(x_2) + 2j_2(x_3) + \\ + j_1(x_1)(1j_2(x_3)j_1(x_2)) + 2j_0(x_3)j_1(x_2))$$

natomiast pozostałe ZAPN $f(x_1, x_2, x_3)$, $f(x_2, x_1, x_3)$, $f(x_2, x_3, x_1)$, $f(x_3, x_1, x_2)$ danej funkcji logicznej mają odpowiednio 12 oraz $f(x_3, x_2, x_1)$ 13 literałów:

$$f(x_2, x_3, x_1) = j_0(x_2)(1j_0(x_3)j_1(x_1) + 2j_2(x_3)j_0(x_1)) + j_1(x_2)(2j_0(x_3)j_1(x_1) + 2j_1(x_3)j_0(x_1) + 2j_1(x_3)j_0(x_1))$$

$$f(x_2, x_1, x_3) = j_0(x_2)(2j_0(x_1)j_2(x_3) + 1j_1(x_1)j_0(x_3)) + j_1(x_2)(2j_0(x_1)(j_1(x_3) + j_2(x_3)) + j_1(x_1)(2j_0(x_3) + 1j_2(x_3)))$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = j_0(x_1)(2j_0(x_2)j_2(x_3) + 2j_1(x_2)(j_1(x_3) + j_2(x_3))) + j_1(x_1)(1j_0(x_2)j_0(x_3) + j_1(x_2)(2j_0(x_3) + 1j_2(x_3)))$$

$$f(x_3, x_1, x_2) = j_0(x_3)(1j_0(x_1)j_1(x_2) + 2j_1(x_1)j_1(x_2)) + 2j_1(x_3)j_0(x_1)j_1(x_2) + j_2(x_3)(2j_0(x_1) + 1j_1(x_1)j_1(x_2))$$

$$f(x_3, x_2, x_1) = j_0(x_3)(1j_0(x_2)j_1(x_1) + 2j_1(x_2)j_1(x_1)) + 2j_1(x_3)j_1(x_2)j_0(x_1) + j_2(x_3)(2j_0(x_2)j_0(x_1) + 2j_1(x_2)j_0(x_1)).$$

		v															
w_i	x_1	x_2	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
1	0	1	0									V					
1	1	0	0											V			
2	0	0	2				V										
2	0	1	1	V								V					
2	1	1	0		V												
2	0	1	2	V								V					
1	1	1	2										V				
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		

		v															
w_i	x_1	x_2	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
1	0	1	0										V				
1	1	0	0									V					
2	0	0	2		V												
2	0	1	1				V										
2	1	1	0	V								V					
2	0	1	2		V												
1	1	1	2													V	
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		

		v															
w_i	x_1	x_2	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
1	0	1	0									V					
1	1	0	0										V				
2	0	0	2				V										
2	0	1	1					V									
2	1	1	0		V							V					
2	0	1	2	V								V					
1	1	1	2									V					
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		

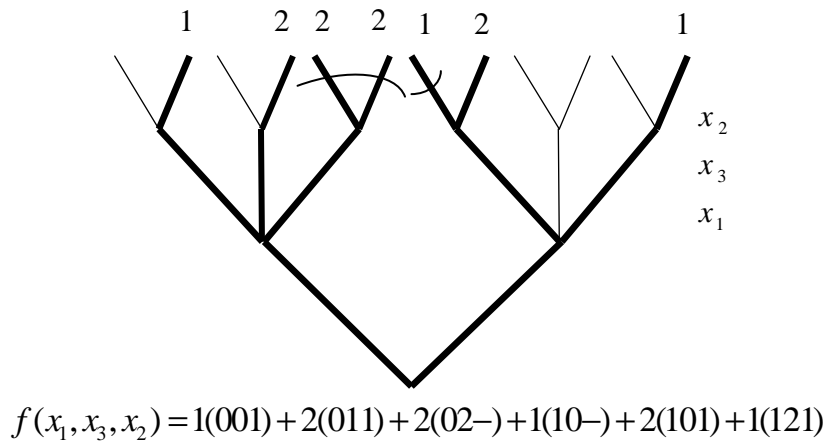
		V																
		w_i	x_2	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
2(012)	1 -	1	2									<u>V</u>						
2(110)	1 -	1	0									<u>V</u>						
	2	1	1	<u>V</u>														
	2	0	2	<u>V</u>														
	2	0	0	<u>V</u>														
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			

		V																
		w_i	x_2	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
2(012)	1 -	1	2									<u>V</u>						
2(110)	1 -	1	0									<u>V</u>						
	2	1	1	<u>V</u>														
	2	0	2	<u>V</u>														
	2	0	0	<u>V</u>														
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			

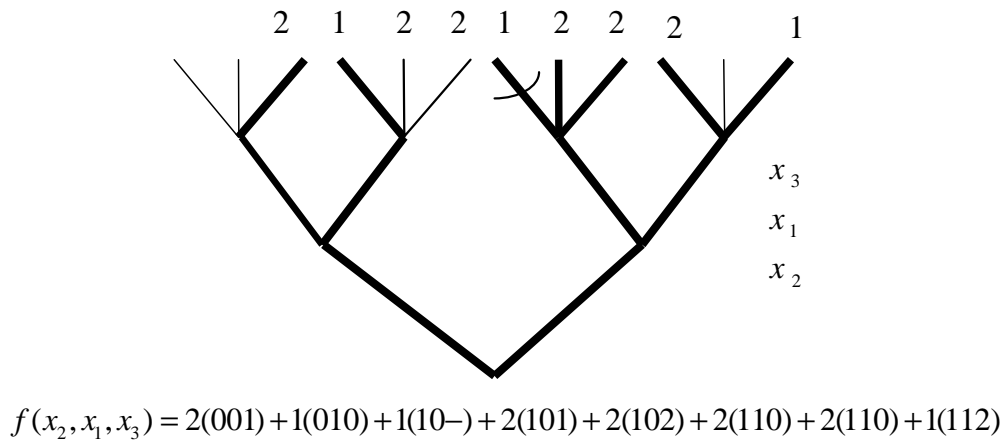
		V																
		w_i	x_1	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
	1	0	0									<u>V</u>						
2(110)	1 -	1	0									<u>V</u>						
	2 -	0	2	<u>V</u>														
	2	0	1	<u>V</u>														
	1	1	2									<u>V</u>						
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			

		V																
		w_i	x_1	x_3	$w_i=2$						$w_i=1$							
	1	0	0									<u>V</u>						
2(110)	1 -	1	0									<u>V</u>						
	2 -	0	2		<u>V</u>													
	2	0	1	<u>V</u>														
	1	1	2									<u>V</u>						
	p_i			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			

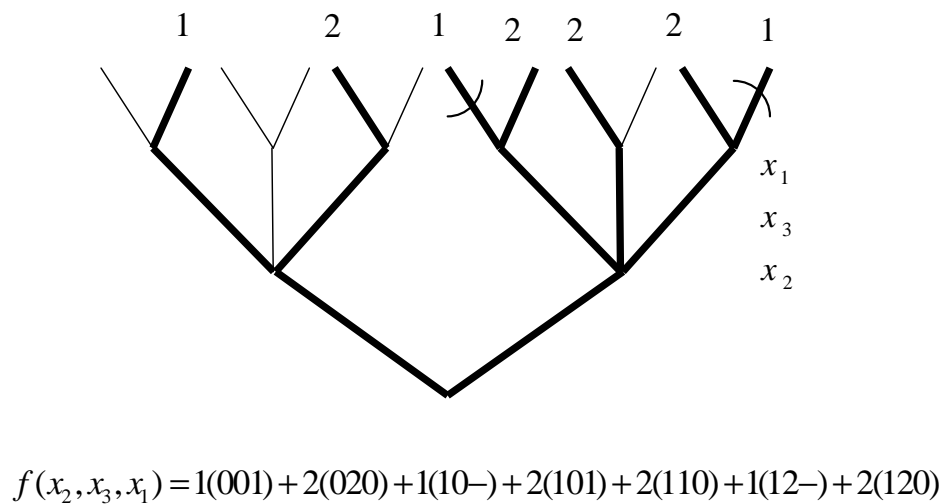
Na rysunku 3.3 przedstawiono MZAPN wielowartościowej funkcji logicznej z przykładu 3.1. Na rysunkach 3.4- 3.8 przedstawiono natomiast ZAPN danej funkcji logicznej.



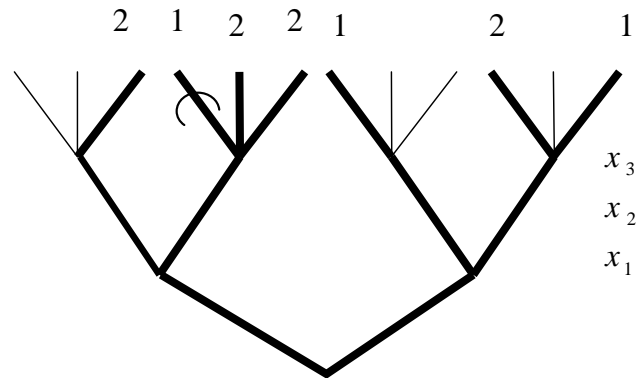
Rys. 3.3. Drzewo logiczne MZAPN wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_1, x_3, x_2)$ z przykładu 3.1



Rys. 3.4. Drzewo logiczne ZAPN wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_2, x_1, x_3)$ z przykładu 3.1

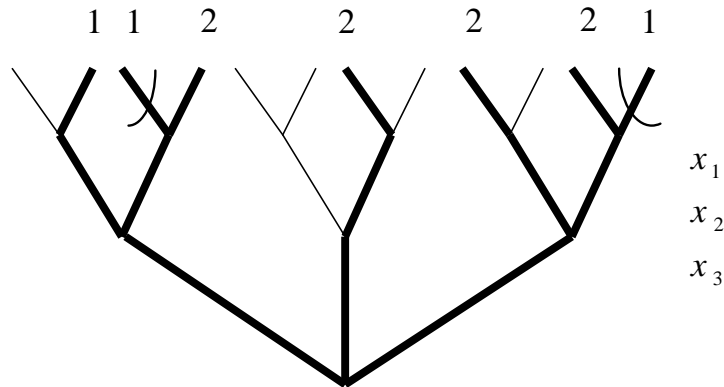


Rys. 3.5. Drzewo logiczne ZAPN wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_2, x_3, x_1)$ z przykładu 3.1



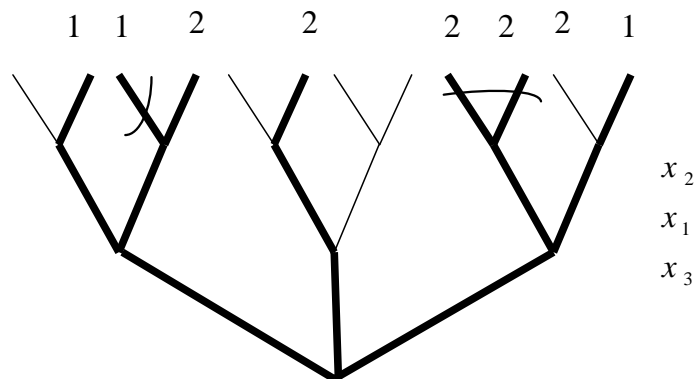
$$f(x_1, x_2, x_3) = 2(001) + 1(01-) + 2(011) + 2(012) + 1(100) + 2(110) + 1(112)$$

Rys. 3.6. Drzewo logiczne ZAPN wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_1, x_2, x_3)$ z przykładu 3.1



$$f(x_3, x_2, x_1) = 1(001) + 1(01-) + 2(011) + 2(110) + 2(200) + 1(21-) + 2(210)$$

Rys. 3.7. Drzewo logiczne ZAPN wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_3, x_2, x_1)$ z przykładu 3.1



$$f(x_3, x_1, x_2) = 1(001) + 1(01-) + 2(011) + 2(101) + 2(20-) + 1(211)$$

Rys. 3.8. Drzewo logiczne ZAPN wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_3, x_1, x_2)$ z przykładu 3.1

Gdyby nie uwzględniać wielowartościowych współczynników wagowych, wówczas dla cząstkowej funkcji logicznej $f(x_1, x_2, x_3)$ z przykładu 3.1, zapisanej numerycznie w KAPN: 010, 100, 002, 011, 110, 012, 112, wynikiem algorytmu Quine'a - Mc Cluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych funkcji logicznych [156] są cztery rozwiązania MZAPN złożone z 10 literałów:

$$f(x_1, x_2, x_3) = j_0(x_1)(j_0(x_2)j_2(x_3) + j_1(x_2)) + \\ + j_1(x_1)(j_0(x_2)j_2(x_3) + j_1(x_2)(j_0(x_3) + j_2(x_3))),$$

$$f(x_2, x_1, x_3) = j_0(x_2)(j_0(x_1)j_2(x_3) + j_0(x_1)j_2(x_3)) + \\ + j_1(x_2)(j_0(x_1) + j_1(x_1)(j_0(x_3) + j_2(x_3))),$$

$$f(x_2, x_3, x_1) = j_0(x_2)(j_0(x_3)j_1(x_3) + j_2(x_3)j_0(x_1)) + \\ + j_1(x_2)(j_0(x_3) + j_1(x_3)j_0(x_3) + j_2(x_3)),$$

$$f(x_1, x_3, x_2) = j_0(x_1)(j_0(x_3)j_1(x_2) + j_1(x_3)j_1(x_2) + j_2(x_3)) + \\ + j_1(x_1)(j_0(x_3) + j_2(x_3)j_1(x_2)).$$

3.2. UKŁADY WIELOWARTOŚCIOWYCH RÓWNAŃ LOGICZNYCH Z WAGOWYMI ILOCZYNAMI

Funkcje logiczne uwzględniane są w zagadnieniach modelowania układów maszynowych opisywanych m.in. równaniami różniczkowymi (zwykłymi lub częstkowymi). W przypadku, gdy układ maszynowy opisany jest zbiorem funkcji $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$, zależnych od czasu t , zmiana parametrów konstrukcyjnych x_1, \dots, x_n implikuje zmianę (dobrą lub złą) w przebiegu takich funkcji. W procesie optymalizacji dopuszcza się zmniejszenie, zwiększenie lub pozostawienie bez zmian wartości liczbowych parametrów konstrukcyjnych. Współczynnik wagowy l_i przy iloczynie zmiennych kanonicznych zależy od czasu t stabilizacji wielkości wyjściowych, przy czym $l_i < l_j$ gdy $t_i > t_j$ [77, 79, 82].

W przypadku obliczeń przepływowych (np. w pompach wyporowych lub wirowych) jednocześnie badanych jest wiele charakterystyk, stanowiących zbiór funkcji $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ odpowiednich zmian parametrów konstrukcyjnych $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Przykład 3.2

Iloczyny kanoniczne zmiennych decyzyjnych x_1, x_2, x_3 poszczególnych funkcji f_1, f_2, f_3 , poprzedzone zostały odpowiednimi współczynnikami wagowymi l_i [82].

Tab. 3.2 Iloczyny kanoniczne zmiennych decyzyjnych x_1, x_2, x_3 dla funkcji f_1, f_2, f_3 z odpowiednimi współczynnikami wagowymi

	l_i	x_1, x_2, x_3	l_i	x_1, x_2, x_3	l_i	x_1, x_2, x_3	l_i	x_1, x_2, x_3	l_i	x_1, x_2, x_3	l_i	x_1, x_2, x_3
f_1	2	000	2	001	2	100	1	101	1	200	2	002
f_2	2	000	2	001	2	100	2	101	2	200	2	002
f_3	2	000	2	001	2	100	1	101	2	200	2	002

Minimalizacja oddzielna funkcji f_1 :

$$f_1 : 2(00-) + 1(-00) + 2(000) + 2(100) + 1(101).$$

W optymalizacji układów przepływowych ważne jest, aby przeprowadzać minimalizację wspólną wszystkich wielkości wyjściowych. Wówczas może istnieć

minimalne rozwiązanie o mniejszej liczbie literałów w porównaniu do minimalizacji oddzielnej [101, 102, 156].

Przykład 3.3

Logicznie zapisane możliwości teoretyczne zmian wartości liczbowych parametrów konstrukcyjnych oznaczono przez $x_1=0,1$, $x_2=0,1,2$, $x_3=0,1$, (gdzie znak "_" oznacza "zostawić bez zmiany" i otrzymano z modelowania układ dwóch wielowartościowych równań logicznych dla wielkości wyjściowych [72]):

$$\begin{cases} y_1(t) = 1(001) + 1(011) + 2(021) + 1(000), \\ y_2(t) = 1(001) + 2(011) + 3(021) + 1(000), \end{cases}$$

to ostatecznie po minimalizacji oddzielnej uzyskano zapis:

$$\begin{cases} y_1(t) = 1(00-) + 1(0-1) + 2(021), \\ y_2(t) = 1(00-) + 1(0-1) + 2(011) + 3(021). \end{cases}$$

Gdyby zastosować minimalizację wspólną, wtedy może istnieć w ogólnym przypadku minimalne rozwiązanie o mniejszej liczbie literałów (czyli znaczących cyfr kodowych) wobec minimalizacji oddzielnej [77].

Rozwiązanie wagowego wielowartościowego układu równań logicznych, opisujących wytyczne projektowania, można przeprowadzić kombinatorycznie w ujęciu analizy morfologicznej z zachowaniem aksjomatów systemu Rossera-Turquette'a.

Jeśli kolejne równania R_1, \dots, R_m mają odpowiednio po r_1, \dots, r_n iloczynów (jako składników), to istnieje $r_1 \cdot \dots \cdot r_n$ wariantów teoretycznych rozwiązań, z których po usunięciu wariantów logicznie sprzecznych otrzymuje się rozwiązania prawdziwe jako warianty realizowalne. Współczynnik wagowy w_i przy iloczynie kanonicznym zależy od czasu stabilizacji t_i wielkości wyjściowych, gdzie $w_i < w_j$ przy $t_i > t_j$.

W szczególności, jeśli $x_1=0,1$, $x_2=0,1,2$, $x_3=0,1$ oraz

$$\begin{cases} y_1 = 1 \cdot 001 + 1 \cdot 011 + 2 \cdot 021 + 1 \cdot 000, \\ y_2 = 1 \cdot 001 + 2 \cdot 011 + 3 \cdot 021 + 1 \cdot 000. \end{cases}$$

to istnieje $4 \cdot 4 = 16$ wariantów teoretycznych.

Rozwiązanie realizowalne można zapisać:

$$y = 1 \cdot 001 + 1 \cdot 011 + 2 \cdot 021 + 1 \cdot 000 = 1 \cdot (00-) + 1 \cdot (0-1) + 2 \cdot (021).$$

Identyczne rozwiązanie układu otrzymuje się po wykonaniu wcześniejszej minimalizacji rozdzielnej układu z $3 \cdot 4 = 12$ wariantów teoretycznych:

$$\begin{cases} y_1 = 1 \cdot (00-) + 1 \cdot (0-1) + 2 \cdot (021), \\ y_2 = 1 \cdot (00-) + 1 \cdot (0-1) + 2 \cdot (011) + 3 \cdot (021). \end{cases}$$

3.2.1. ROZWIĄZYWANIE UKŁADU WIELOWARTOŚCIOWYCH RÓWNAŃ LOGICZNYCH Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

Układ wielowartościowych równań logicznych można rozwiązać kombinatorycznie, w ujęciu analizy morfologicznej z zachowaniem aksjomatów systemu Rossera-Turquette'a. Układ równań można zdefiniować jako Y_S^R , gdzie: R - zbiór równań logicznych- $R : \{R_i, R_{i+1}, \dots, R_m\}$, S - zbiór iloczynów kanonicznych jako składników- $S : \{r_i, r_{i+1}, \dots, r_n\}$, przy czym: $S \subset R$, $R_i = r_i + r_{i+1} + \dots + r_n$, $r_i = w_i A$, gdzie: A - cząstkowy iloczyn elementarny, którego zmienne poszczególnych literałów należą do zbioru $\{x_1, \dots, x_{r-i}, x_{r+i}, \dots, x_n\}$. W n zmiennych (m_1, \dots, m_n) -wartościowych współczynnik wagowy w_i przed cząstkowym kanonicznym iloczynem przyjmuje wartości z przedziału $\langle w_1, \dots, w_n \rangle$, przy czym $w_j = w_{j-1} + w_{j-2} + \dots + w_1$ dla $j = 2, \dots, n$.

$$Y_S^R : \begin{cases} R_i = r_i + r_{i+j} + \dots + r_n, \\ R_{i+1} = r_i + r_{i+j} + \dots + r_n, \\ R_m = r_i + r_{i+j} + \dots + r_n. \end{cases} \quad (3.3)$$

Układ wielowartościowych równań logicznych zapisuje się za pomocą tablicy morfologicznej, gdzie liczba wierszy odpowiada liczbie równań $R_j, j=1, \dots, m$.

Każdemu j - temu równaniu odpowiada i iloczynów kanonicznych (Tab. 3.3):

Tab. 3.3 Tablica morfologiczna układu wielowartościowych równań logicznych

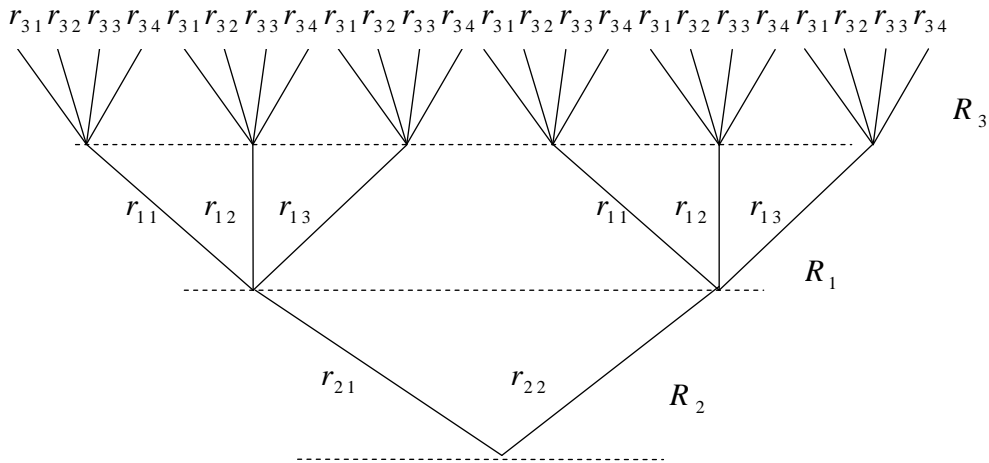
$i=1, \dots, n$		r_{ji}					
		1	2	3	4	...	N
R_j	1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	...	r_{1n}
	2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	...	r_{2n}
	3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}	...	r_{3n}
	4	r_{41}	r_{42}	r_{43}	r_{44}	...	r_{4n}
	M	r_{m1}	r_{m2}	r_{m3}	r_{m4}		r_{mn}

W celu rozwiązania układu wielowartościowych równań logicznych buduje się drzewo morfologiczne o j piętrach przy R_j równaniach logicznych, $j=1, \dots, m$. Na każdym piętrze liczba iloczynów kanonicznych dla danego równania. Dlatego zapis iloczynu kanonicznego r_{ji} oznacza i - ty iloczyn na j -tym piętrze. Czasem przyjmuje się zasadę, że równania o najmniejszej liczbie iloczynów kanonicznych powinny się znajdować w korzeniu drzewa morfologicznego.

W układzie 3 równań:

$$Y : \begin{cases} R_1 = r_{11} + r_{12} + r_{13}, \\ R_2 = r_{21} + r_{22}, \\ R_3 = r_{31} + r_{32} + r_{33} + r_{34}, \end{cases} \quad (3.4)$$

istnieje drzewo morfologiczne przedstawione na rys. 3.9.



Rys. 3.9. Drzewo morfologiczne układu trzech równań logicznych R_1, R_2, R_3

Każda ścieżka z dołu do góry na drzewie morfologicznym jest iloczynem odpowiednich iloczynów kanonicznych $r_1 \cdot \dots \cdot r_n$, przy czym obecnie już $r_i = w_i A$. Liczba wariantów teoretycznych rozwiązań określona jest przez zbiór wszystkich ścieżek prawdziwych. Na drzewie z rysunku 3.9 istnieją 24 ścieżki:

- 1 : $r_{21}r_{11}r_{31}$, 2 : $r_{21}r_{11}r_{32}$, 3 : $r_{21}r_{11}r_{33}$, 4 : $r_{21}r_{11}r_{34}$, 5 : $r_{21}r_{12}r_{31}$, 6 : $r_{21}r_{12}r_{32}$, 7 : $r_{21}r_{12}r_{33}$, 8 : $r_{21}r_{12}r_{34}$,
- 9 : $r_{21}r_{13}r_{31}$, 10 : $r_{21}r_{13}r_{32}$, 11 : $r_{21}r_{13}r_{33}$, 12 : $r_{21}r_{13}r_{34}$, 13 : $r_{22}r_{11}r_{31}$, 14 : $r_{22}r_{11}r_{32}$, 15 : $r_{22}r_{11}r_{33}$,
- 16 : $r_{22}r_{11}r_{34}$, 17 : $r_{22}r_{12}r_{31}$, 18 : $r_{22}r_{12}r_{32}$, 19 : $r_{22}r_{12}r_{33}$, 20 : $r_{22}r_{12}r_{34}$, 21 : $r_{22}r_{13}r_{31}$, 22 : $r_{22}r_{13}r_{32}$,
- 23 : $r_{22}r_{13}r_{33}$, 24 : $r_{22}r_{13}r_{34}$,

z których należy wybrać rozwiązania realizowalne.

Jeśli w danej ścieżce we wszystkich iloczynach $r_{ij} \cdot \dots \cdot r_{nm} = (w_0, \dots, w_{m_r-1})A_1 \cdot (w_0, \dots, w_{m_r-1})A_2 \cdot \dots \cdot (w_0, \dots, w_{m_r-1})A_n$, gdzie (w_0, \dots, w_{m_r-1}) oznaczają wielowartościowe współczynniki wagowe, zachodzi $A_1 = A_2 = \dots = A_n = A$ (tzn. każdy cząstkowy iloczyn elementarny posiada zmienne $\{x_1, \dots, x_{r-i}, x_{r+i}, \dots, x_n\}$ posiadające te same (m_1, \dots, m_n) -wartościowości na n -pozycjach) to $r_{ij} \cdot \dots \cdot r_{nm} = \min(w_0, \dots, w_{m_r-1})A$.

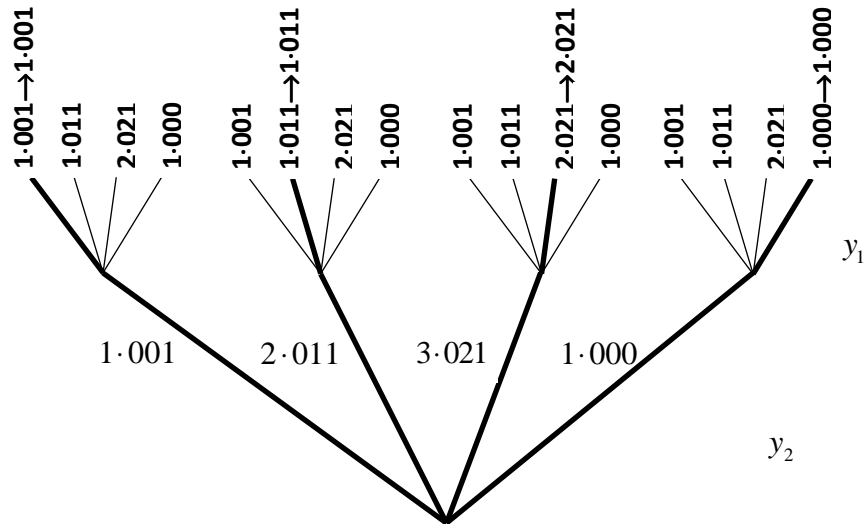
Jeśli ścieżka na drzewie morfologicznym jest pogrubiona, to oznacza, że iloczynem kanonicznym określany jest wariant realizowalny. Na danym drzewie morfologicznym może być $r_1 \cdot \dots \cdot r_n$ prawdziwych iloczynów kanonicznych. Suma wszystkich iloczynów kanonicznych, jako wariantów realizowalnych (pogrubionych ścieżek) jest rozwiązaniem prawdziwym danego problemu projektowego i w szczególności może oznaczać zbiór (alternatywny) prawdziwych wytycznych projektowania.

Przykład 3.4

Jeśli $x_1=0,1$, $x_2=0,1,2$, $x_3=0,1$ oraz

$$\begin{cases} y_1 = 1 \cdot 001 + 1 \cdot 011 + 2 \cdot 021 + 1 \cdot 000, \\ y_2 = 1 \cdot 001 + 2 \cdot 011 + 3 \cdot 021 + 1 \cdot 000, \end{cases}$$

to istnieje drzewo morfologiczne przedstawione na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Drzewo morfologiczne dla układu równań z przykładu 3.4

Po minimalizacji, rozwiązanie prawdziwe można zapisać jako:

$$y = 1 \cdot 001 + 1 \cdot 011 + 2 \cdot 021 + 1 \cdot 000, \text{ co daje } 1 \cdot (00-) + 1 \cdot (0-1) + 2 \cdot (021).$$

Do rozwiązania wielowartościowego układu równań z wagowymi współczynnikami może zostać zaimplementowana metoda przeszukiwania drzewa morfologicznego. Jednym z algorytmów poszukiwania rozwiązań prawdziwych jako wytycznych realizowalnych na drzewie morfologicznym jest algorytm przeszukiwania w głąb (ang. Depth-first search, DFS) [103, 223]. Algorytm przeszukuje wszystkie ścieżki drzewa odrzucając iloczyny iloczynów kanonicznych $r_{ij}, \dots, r_{nm} = (w_0, \dots, w_{m_r-1})A_1 \cdot (w_0, \dots, w_{m_r-1})A_2 \cdot \dots \cdot (w_0, \dots, w_{m_r-1})A_n$, dla których nie zachodzi warunek $A_1 = A_2 = \dots = A_n = A$.

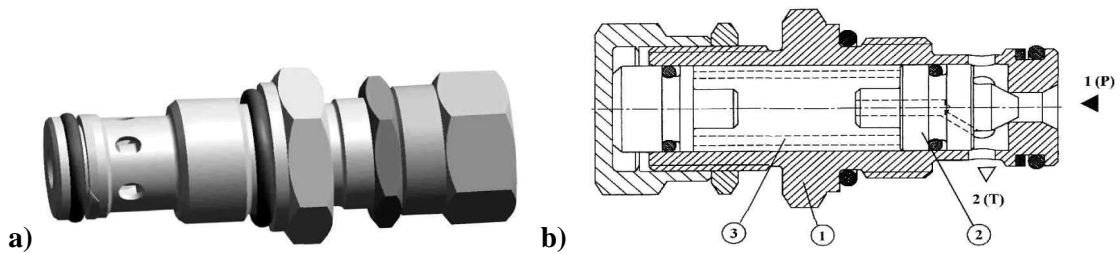
3.3. ZASTOSOWANIE WIELOWARTOŚCIOWYCH FUNKCJI LOGICZNYCH Z WAGOWYMI ILOCZYNAMI W BADANIU RANGI WAŻNOŚCI PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH ZAWORÓW HYDRAULICZNYCH

3.3.1. HYDRAULICZNY ZAWÓR PRZELEWOWY

W celu zapewnienia rzeczywistemu układowi stabilnej pracy przeprowadza się badania modelowe, na podstawie których dobierane są istotne parametry. Zjawiska zachodzące podczas przepływu medium, są dość często określone mało precyzyjnie,

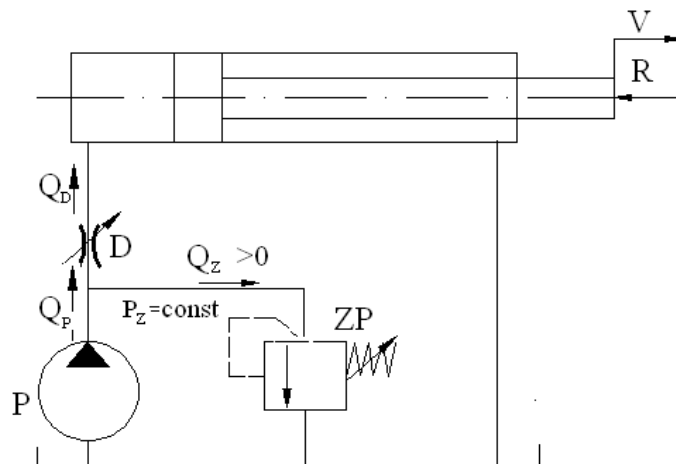
stad też podczas przeprowadzenia takich badań – zachodzi konieczność identyfikacji modelu analitycznego. Dodatkowo zachodzi konieczność analizy rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych i zbadania ich wpływu na funkcje zależne od czasu.

Zawory hydrauliczne są podstawowymi elementami układów hydraulicznych oraz integralną częścią każdego układu sterowania. Istnieje bardzo liczna grupa różnych typów zaworów, co wynika z bardzo zróżnicowanych funkcji, jakie mają do spełnienia w układzie. Na rysunku 3.11 przedstawiono zawór przelewowy bezpośredniego działania typ UZPD 4 [222]. Ciśnienie regulowane działa na różnicę powierzchni tłoczka 2 korpusu 1, który utrzymywany jest przez sprężynę 3 w położeniu wyjściowym (zamknięcia).



Rys. 3.11. Zawór przelewowy bezpośredniego działania typ UZPD 4 – a) wygląd ogólny, b) budowa [222]

Zawór przelewowy stosuje się w układach w celu przepuszczenia do zbiornika nadmiaru tłoczonej cieczy, gdy wydajność pompy przewyższa zapotrzebowanie. Na rysunku 3.12 przedstawiono przykład układu napędowego siłownika z zaworem przelewowym [129].



Rys. 3.12. Układ napędowy siłownika z zaworem przelewowym [129]

W układzie, przedstawionym na rysunku 3.12, prędkość ruchu tłoka sterowana jest za pomocą zaworu dławiącego D . W wyniku czego, tylko część strumienia cieczy, pompowanej przez pompę P dopływa do siłownika. Reszta strumienia cieczy

($Q_Z = Q_P - Q_D$) przepływa przez zawór przelewowy ZP, który musi być ciągle otwarty gdyż $Q_Z > 0$.

Podczas działania zaworu przelewowego należy uwzględnić m. in:

- siły statyczne (od ciśnienia siły roboczej),
- siły hydrodynamiczne,
- siły tarcia lepkiego,
- siły sprężyny,
- siły inercji słupa cieczy.

W celu modyfikacji własności dynamicznych układów przepływowych buduje się modele strukturalne, które odzwierciedlają własności transformacyjne układu. Przy budowie modelu zaworu przelewowego korzysta się z równań przepływu cieczy przez zawór (opartych o zasadę zachowania masy). W pracy zaworu wyróżnia się dwa rodzaje równań:

- równanie sił działających na zawieradło,
- równanie przepływów.

Równanie sił, działających na zawieradło zgodnie przedstawia się następująco [53, 209]:

$$\begin{aligned} \frac{Q_p^2}{A_1} \rho + \rho \cdot A_2 + \rho \cdot l \frac{dQ_p}{dt} = G_{ap} + S + k \cdot x + \\ + f \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2x}{dt^2} + \Phi \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot \cos(\nu) \cdot Q_p \sqrt{p} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Równania przepływów:

$$Q = \mu \cdot K \cdot x \sqrt{p} + A_1 \frac{dx}{dt} + \frac{V}{B} \frac{dp}{dt}, \quad (3.6)$$

$$Q_p = \mu \cdot K \cdot x \sqrt{p} + A_1 \frac{dx}{dt}, \quad (3.7)$$

gdzie:

$$K = \pi \cdot d_m \sqrt{\frac{2}{\rho}}. \quad (3.8)$$

Modelując pracę zaworu przelewowego wprowadzone zostały pewne uproszczenia. Najważniejsze uproszczenia:

- przyjęto jednakową zmianę ciśnienia w całej objętości zaworu,
- w hydraulicznej instalacji pominięto procesy falowe,
- zawór jest zaworem idealnym- bez przecieków,
- generator przepływu jest generatorem idealnym- nie ma pulsacji,
- ruchoma masa jest masą zawieradła i 0,33 masy sprężyny, całkowicie pominięto masę cieczy i elementów mechanicznych,
- przyjęto jednakową wartość modułu sprężystości cieczy w całym zakresie pracy,

- nie uwzględniono wpływu uderzeń elementu zamykającego o gniazdo zaworu,
- przyjęto liniowy spadek wartości ciśnienia w przestrzeni pomiędzy zawieradłem a gniazdem zaworu,
- dla całego zakresu pracy zaworu przyjęto stały kąt \mathcal{U} odchylenia strugi,
- nie uwzględniono oddziaływania ściśliwości ścianek zaworu,
- przyjęto, że nie następuje zmiana objętości V wraz z przemieszczeniem zaworu x ,
- uwzględniono zmianę współczynnika wypływu podczas otwarcia zaworu.

W przypadku zaworów, drgania pochodzą głównie od siły hydrodynamicznej oraz w wyniku różnorodnych wewnętrznych i zewnętrznych zaburzeń. Do jednych z największych zaburzeń występujących w czasie pracy zaworu przyczynia się pulsacja tłoczona przez pompę cieczy, oraz znajdujące się w cieczy nie rozpuszczone powietrze

3.3.1.1. BEZWYMIAROWE RÓWNANIA PRACY ZAWORU

Równania zaworu w postaci bezwymiarowej, służącej do wykonania symulacji, przyjmuje się w następującej formie [53, 209]:

$$\rho \frac{Q_o^2}{A_1 S_o} Q_{pw}^2 + \frac{A_2 p_o}{S_o} p_w + \frac{T_{Qp}}{T_o} \frac{dQ_{pw}}{dt_w} = 1 + \frac{kx_o}{S_o} x_w + \frac{T_f}{T_o} \frac{dx}{dt_w} + \left(\frac{T_{ms}}{T_o} \right)^2 \frac{d^2 x}{dt_w^2} + \Phi \frac{\sqrt{2\rho}}{S_o} \cos(\nu) Q_o Q_{pw} \sqrt{p_o} \sqrt{p_w}, \quad (3.9)$$

$$Q_w = \mu x \sqrt{p_w} + \frac{T_A}{T_o} \frac{dx}{dt_w} + \frac{dp_w}{dt_w}, \quad (3.10)$$

$$Q_{pw} = \mu x \sqrt{p_w} + \frac{T_A}{T_o} \frac{dx}{dt_w}. \quad (3.11)$$

Równania (3.9-3.11) zamodelowano w programie Matlab firmy MathWork [53, 209, 221].

3.3.2. RANGA WAŻNOŚCI PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH I/LUB EKSPLOATACYJNYCH HYDRAULICZNEGO ZAWORU PRZELEWOWEGO

Badania modelowe mają na celu obranie istotnych parametrów, aby była zapewniona stabilność układu rzeczywistego. Istotne w weryfikacji modelu jest określenie rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i /lub eksploatacyjnych, a następnie wybór odpowiedniej procedury optymalizacyjnej. Zmieniane parametry konstrukcyjne zaworu to: średnica zaworu d , masa grzybka m i stała sprężyny k - przy obserwacji wzniosu x , ciśnienia p i natężenia przepływu Q . Opóźnienia układu przez parametry eksploatacyjne oraz nieodpowiednie zastosowanie wzmocnień pętli, wiąże się z niestabilną pracą całego układu. W celu przeprowadzenia optymalizacji

dyskretnej zmiany parametrów zakodowano następująco: 0- duże zmniejszenie, 1- małe zmniejszenie, 2- bez zmian, 3- zwiększenie, 4- duże zwiększenie (m i k) oraz : 0- małe zmniejszenie, 1- bez zmian, 2- zwiększenie (d). W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych uzyskano 75 wykresów [53, 209] przebiegów wzniosu zaworu x , ciśnienia cieczy p oraz natężenia przepływu Q w funkcji czasu- kolejnych zmian parametrów: m , k i d .

W celu przeprowadzenia procesu optymalizacji wprowadzono zależności wiążące ograniczenia na parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne, m in. z punktu widzenia różnych wartości czasu stabilizacji t_w oraz stosunku wartości maksymalnej

funkcji do jej wartości po ustabilizowaniu $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}}$, np.:

I. Czas stabilizacji $t_w < 300t_o$; Stosunek wartości maksymalnej funkcji do jej wartości po ustabilizowaniu: $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 2,4$,

II. Czas stabilizacji $t_w < 1000t_o$; Stosunek wartości maksymalnej funkcji do jej wartości po ustabilizowaniu: $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 3,6$, dla jednoczesnych przebiegów czasowych realizacji wzniosu x , ciśnienia p oraz natężenia przepływu Q .

W przypadku ograniczenia **I**, selekcję przeszło 20 wykresów [53, 209] o zmianach kodowych parametrów konstrukcyjnych m , k i d przedstawionych w tabeli 3.4 W ograniczeniu **II** selekcję przeszło 37 wykresów [53, 209] o zmianach kodowych parametrów konstrukcyjnych m , k i d (tabela 3.5).

Tab. 3.4. KAPN danych zmian wartości parametrów m , k i d ($t_w < 300 t_o$, $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 2,4$)

M	K	d	m	K	d
2	2	2	0	2	2
2	1	2	0	3	2
1	2	1	0	1	1
1	2	2	0	1	2
1	1	1	0	0	1
1	1	2	0	0	2
1	3	2	3	2	2
2	0	2	3	1	2
1	0	2	0	3	1
0	2	1	0	1	0

Tab. 3.5. KAPN danych zmian wartości parametrów m, k i d ($t_w < 1000 t_o$, $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 3,6$)

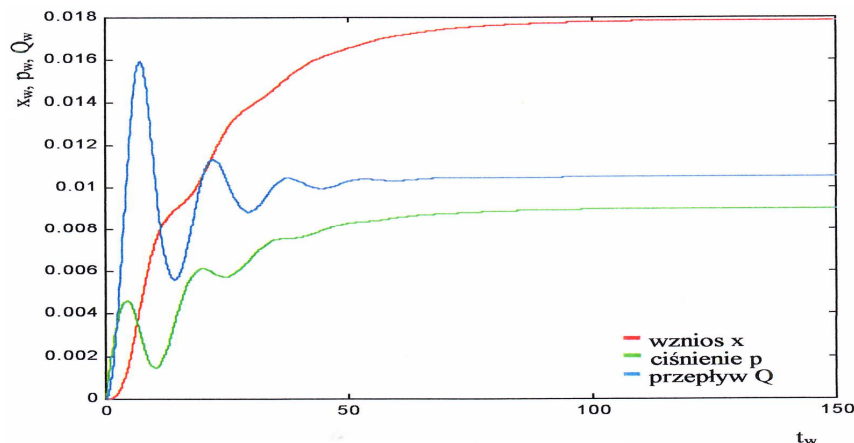
M	K	d	m	k	d
2	2	2	0	3	1
2	1	2	0	1	0
1	2	1	2	3	2
1	2	2	3	0	2
1	1	1	0	2	0
1	1	2	2	2	1
1	3	2	3	3	2
2	0	2	2	1	1
1	0	2	2	0	1
0	2	1	1	0	1
0	2	2	4	2	2
0	3	2	4	1	2
0	1	1	0	0	0
0	1	2	1	1	0
0	0	1	1	0	0
0	0	2	4	3	2
3	2	2	4	0	2
2	2	2	0	3	0
3	1	2	2	4	2
			0	3	1

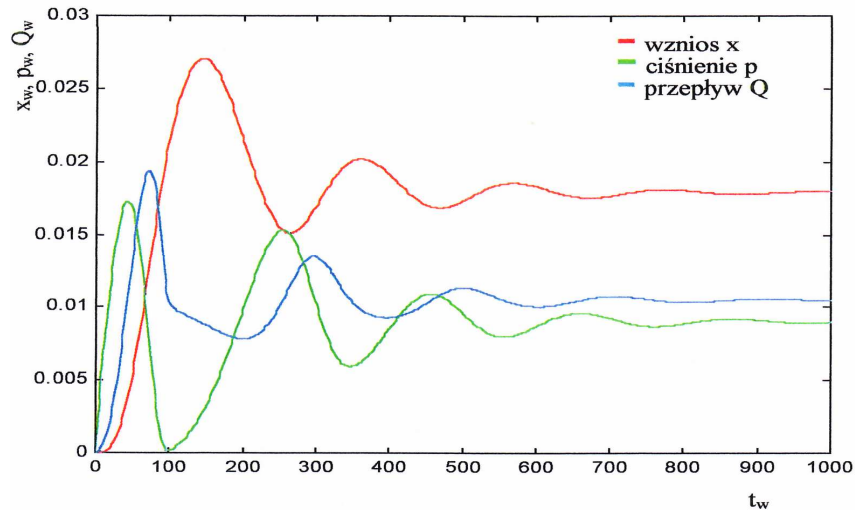
Warunek kryterialny **I** nie pozwala na stabilność działania układu, gdy $m=4$. W związku z czym w tabeli 3.4 istnieją tylko iloczyny kanoniczne (jako warianty prawdziwe wytycznych projektowania), w których parametr m jest zakodowany jako: 0, 1, 2, 3.

Na rysunku 3.13 pokazano przykładowe wykresy przebiegu funkcji x , Q oraz p kodowych zmian parametrów (m, k i d) 202 (spełniających ograniczenia: $t_w < 300t_o$;

$\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 2,4$). Na rysunku 3.14 przedstawiono wykresy funkcji x , Q oraz p kodowych

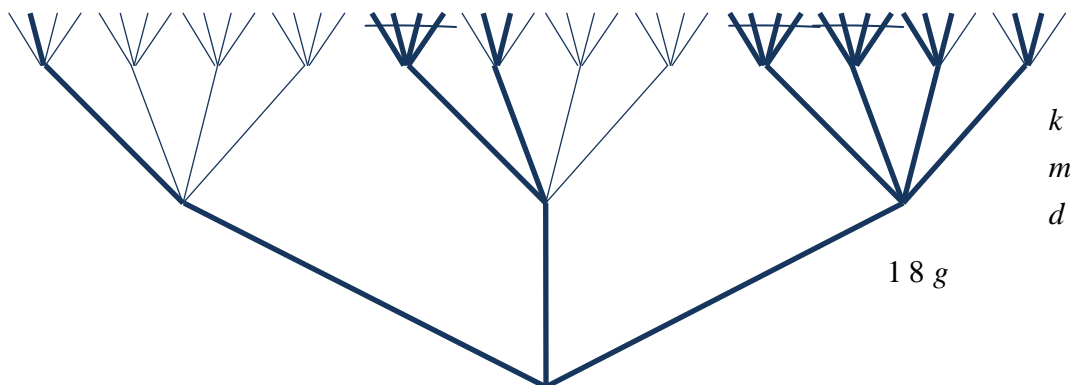
zmian parametrów (m, k i d) 432 (spełniających ograniczenia: $t_w < 1000t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 3,6$).

**Rys. 3.13.** Charakterystyka działania zaworu przy zmianach kodowych parametrów m, k i d -202

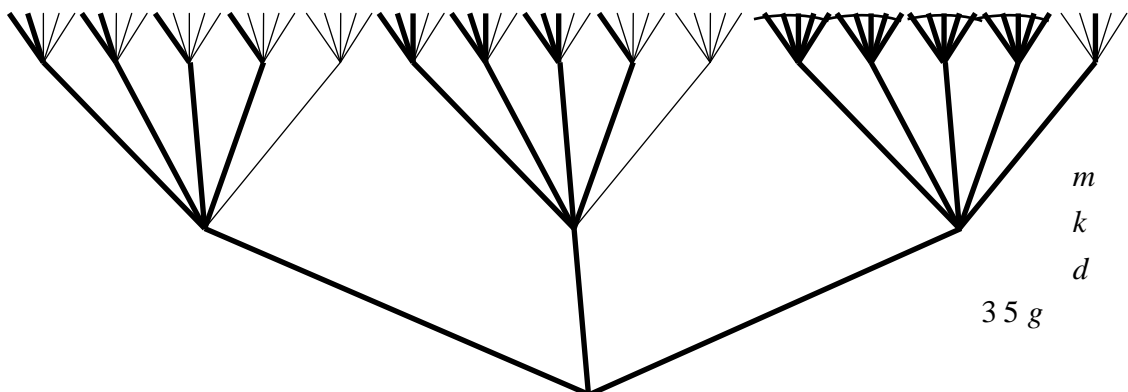


Rys. 3.14. Charakterystyka działania zaworu przy zmianach kodowych parametrów m, k i d - 432

Każdemu z iloczynów KAPN odpowiednich zmian wartości parametrów m, k i d z tabel 3.3 i 3.4, przypisuje się 6 wielowartościowych drzew logicznych [53]. Na rysunku 3.15 przedstawiono optymalne wielowartościowe drzewo logiczne (po redukcji dopuszczalnych pełnych wiązek z góry na dół) z tabeli 3.3, a na rysunku 3.16 z tabeli 3.4. Na optymalnych drzewach logicznych wyznaczono prawdziwą rangę ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych od najważniejszego na dole do najmniej ważnego na górze.



Rys. 3.15. Optymalne drzewo logiczne dla Tab. 3.3 ($t_w < 300 t_o$, $\frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 2,4$) [53]



Rys. 3.16. Optymalne drzewo logiczne dla Tab. 3.4 ($t_w < 1000 t_o$, $\frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 3,6$) [53]

Dla ograniczenia **I** ($t_w < 300t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 2,4$) oraz dla ograniczenia **II** ($t_w < 1000t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 3,6$), najważniejszym parametrem jest średnica zaworu d , sklasyfikowana w korzeniach wielowartościowych drzew logicznych z rysunków 3.15 oraz 3.16.

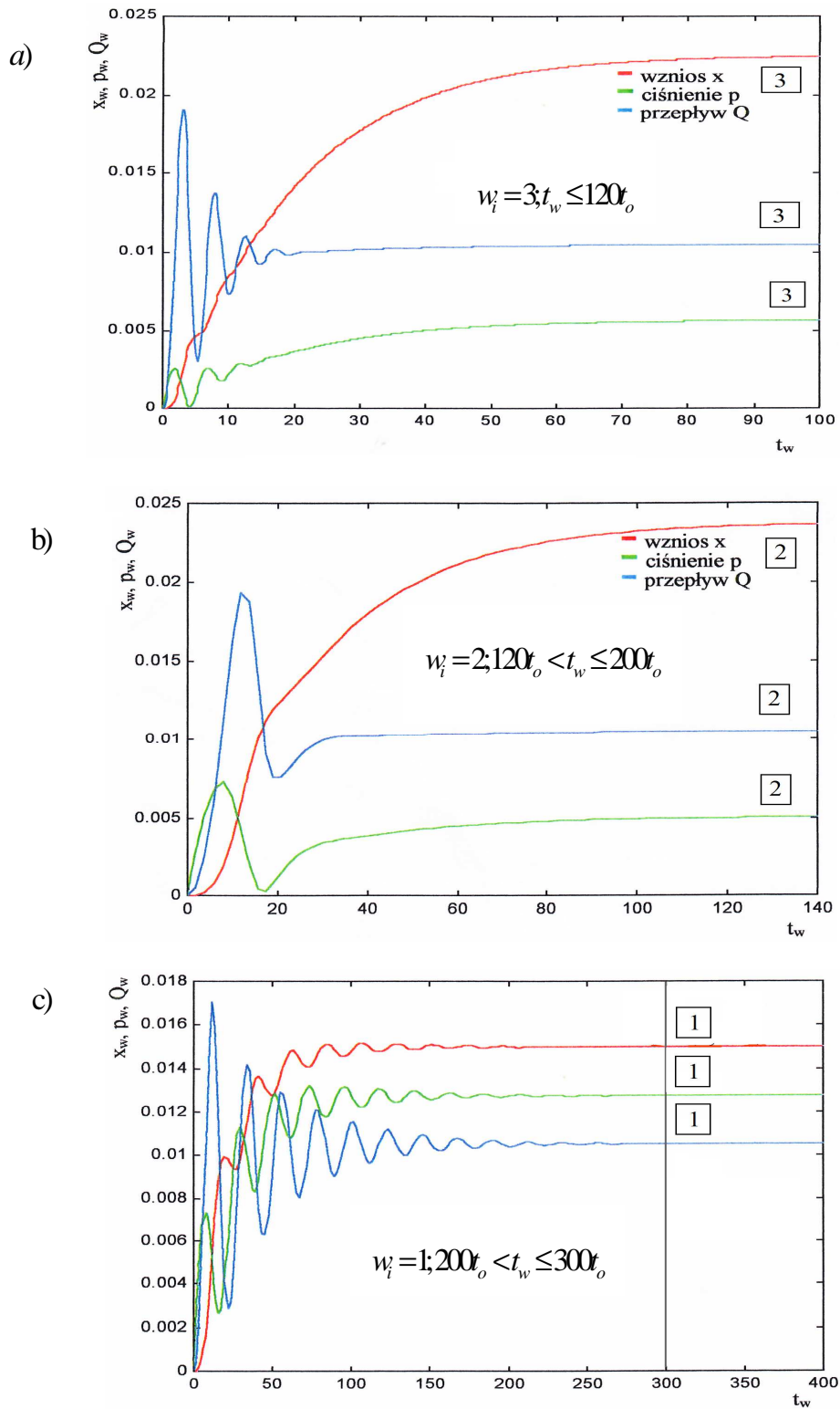
3.3.2.1. ZASTOSOWANIE WIELOWARTOŚCIOWYCH DRZEW LOGICZNYCH Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

Dane zmiany wartości parametrów m , k i d , związane są ze spełnieniem założonych ograniczeń $t_w < 300t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 2,4$ w Tab. 3.4 oraz $t_w < 1000t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 3,6$ w Tab. 3.5 przez wszystkie funkcje: x , Q oraz p . Jednak w wyniku poszczególnych zmian kodowych parametrów m , k i d zachowanie się funkcji x , Q oraz p jest lepsze lub gorsze, dlatego przed iloczynem kanonicznym parametrów decyzyjnych m , k i d (Tab. 3.4 i Tab. 3.5) wprowadza się współczynnik wagowy w_i , przy czym liczba wagowa jest tym większa, im czas stabilizacji funkcji x , Q oraz p jest krótszy, tzn. $w_i < w_j$, gdy $t_i > t_j$.

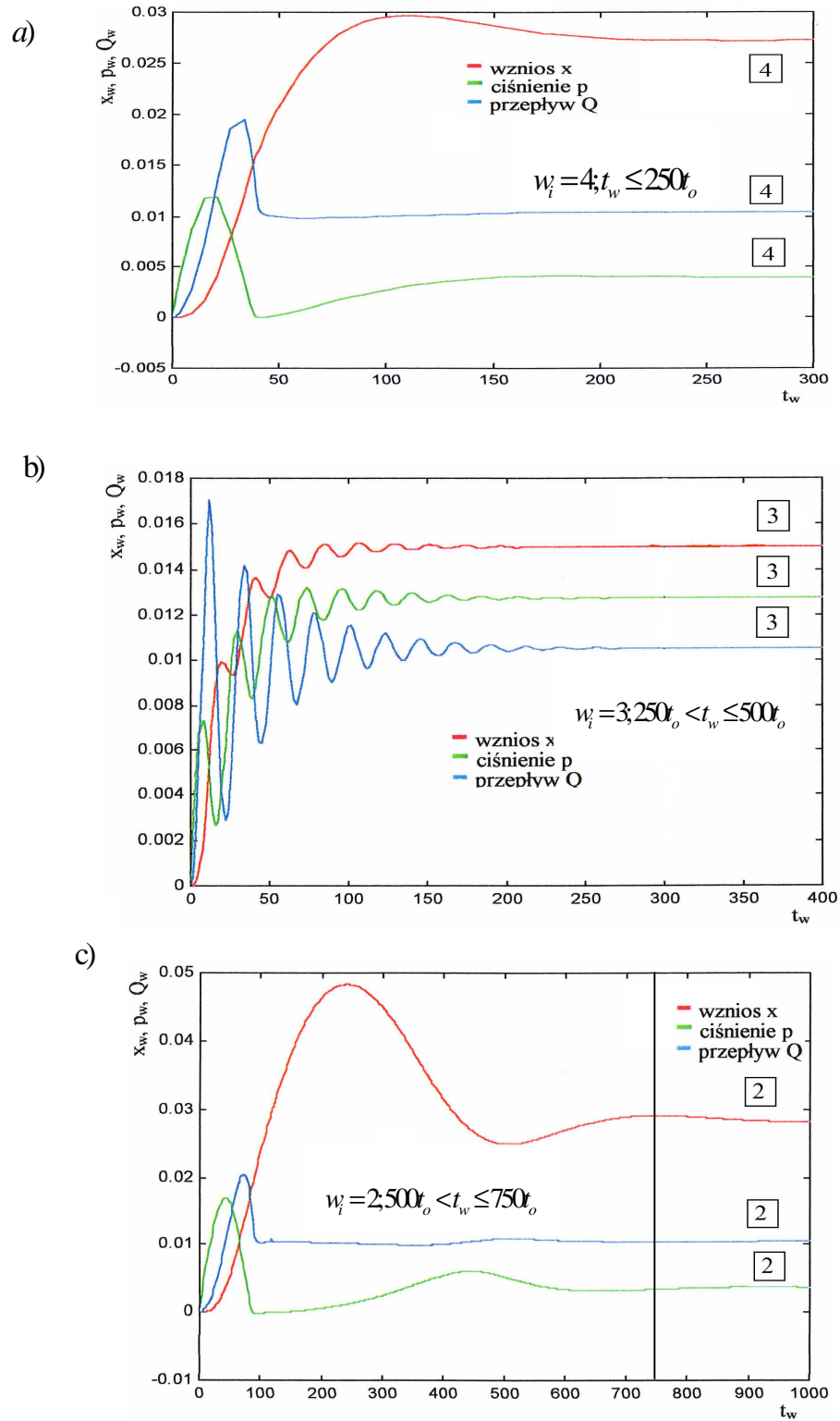
W przypadku ograniczenia **I**: Czas stabilizacji $t_w < 300t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 2,4$, przyjęto następujące wartości współczynników wagowych: $w_i=3$ gdy $t_w \leq 120t_o$; $w_i=2$ gdy $120t_o < t_w \leq 200t_o$; $w_i=1$ gdy $200t_o < t_w \leq 300t_o$.

W przypadku ograniczenia **II**: Czas stabilizacji $t_w < 1000t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 3,6$, wartości współczynników wagowych wynoszą: $w_i=4$ gdy $t_w \leq 250t_o$, $w_i=3$ gdy $250t_o < t_w \leq 500t_o$; $w_i=2$ gdy $500t_o < t_w \leq 750t_o$; $w_i=1$ gdy $750t_o < t_w \leq 1000t_o$.

Na rys. 3.17 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji x , Q , p ograniczenia $t_w < 300t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 2,4$ i współczynników wagowych $w_i=3$, $w_i=2$, $w_i=1$, natomiast rysunek 3.18 przedstawia przebiegi funkcji x , Q , p w przypadku ograniczenia $t_w < 1000t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 3,6$ i wartości współczynników $w_i=4$, $w_i=3$, $w_i=2$.



Rys. 3.17. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p i ograniczenia $t_w < 300t_o$; $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab}}} < 2,4$ oraz kodowych zmian parametrów m , k i d i współczynników wagowych w_i : a) 002, $w_i = 3$; b) 011, $w_i = 2$; c) 031, $w_i = 1$.



Rys. 3. 18. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p i ograniczenia $t_w < 1000t_o$; $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 3,6$ oraz kodowe zmiany parametrów m , k i d i współczynników wagowych w_i : a) 101, $w_i = 4$; b) 031, $w_i = 3$; c) 412, $w_i = 2$

Zmiany kodowe parametrów konstrukcyjnych m , k i d z uwzględnieniem wielowartościowych współczynników wagowych i ograniczenia **I** przedstawiono w tabeli 3.5, natomiast uwzględniając ograniczenie **II**-w tabeli 3.6.

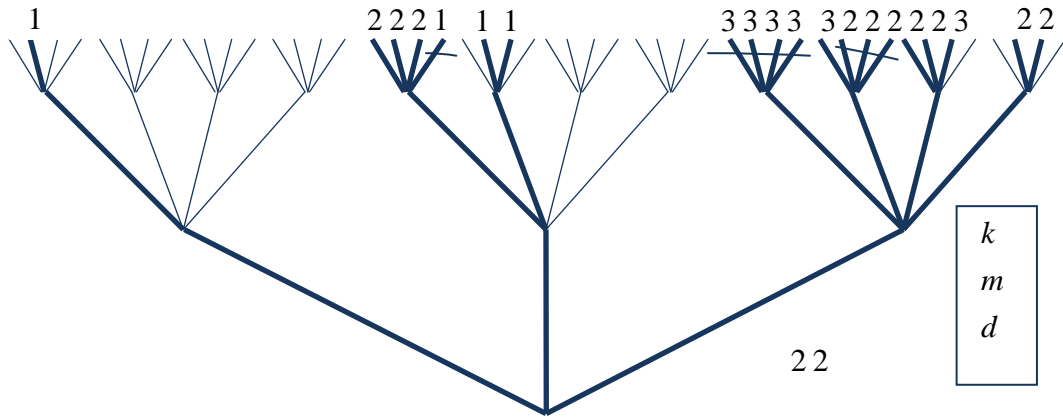
Tab. 3.6. KAPN danych w_i oraz zmian wartości parametrów m , k i d oraz ($t_w < 300 t_o$, $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab}}} < 2,4$)

w_i	M	K	d	w_i	m	k	d
3	2	2	2	3	0	2	2
2	2	1	2	3	0	3	2
1	1	2	1	2	0	1	1
2	1	2	2	3	0	1	2
1	1	1	1	2	0	0	1
2	1	1	2	3	0	0	2
2	1	3	2	1	3	2	2
2	2	0	2	1	3	1	2
3	1	0	2	1	0	3	1
2	0	2	1	1	0	1	0

Tab. 3.7. KAPN danych w_i oraz zmian wartości parametrów m , k i d ($t_w < 1000 t_o$, $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab}}} < 3,6$)

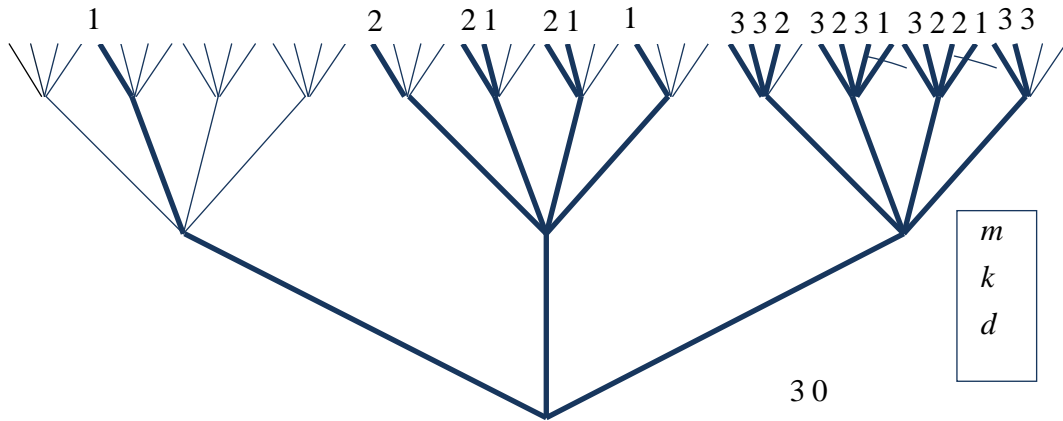
w_i	m	K	d	w_i	m	K	d
4	2	2	2	3	0	3	1
4	2	1	2	3	0	1	0
4	1	2	1	3	2	3	2
4	1	2	2	3	3	0	2
4	1	1	1	3	0	2	0
4	1	1	2	2	2	2	1
4	1	3	2	2	3	3	2
4	2	0	2	2	2	1	1
4	1	0	2	2	2	0	1
4	0	2	1	4	1	0	1
4	0	2	2	2	4	2	2
4	0	3	2	2	4	1	2
4	0	1	1	3	0	0	0
4	0	1	2	1	1	1	0
4	0	0	1	1	1	0	0
4	0	0	2	1	4	3	2
3	3	2	2	1	4	0	2
3	2	2	2	1	0	3	0
4	3	1	2	1	2	4	2
				3	0	3	1

Na rysunkach 3.19- 3.24 przedstawiono wielowartościowe drzewa logiczne, ze współczynnikami wagowymi z tabeli 3.6, natomiast na rysunkach 3.25- 3.30 wielowartościowe drzewa logiczne z tabeli 3.7.



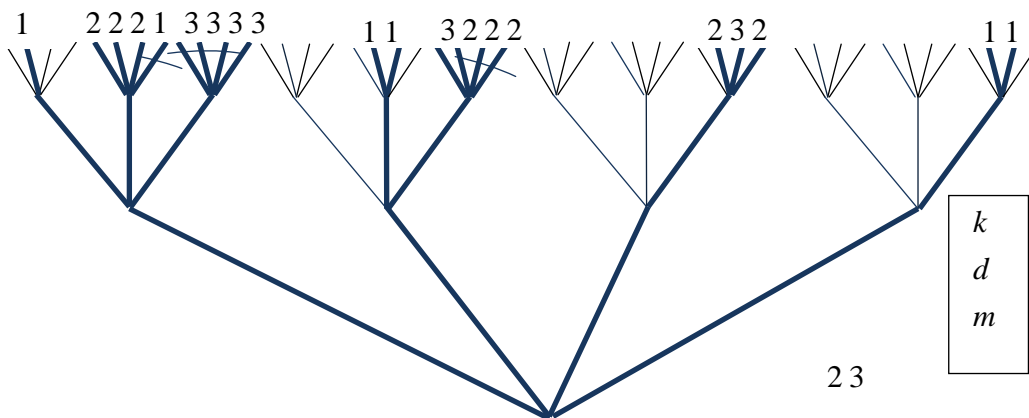
Rys. 3.19. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- d, m, k z Tab. 3.6

$$\left(t_w < 300t_o, \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4 \right)$$



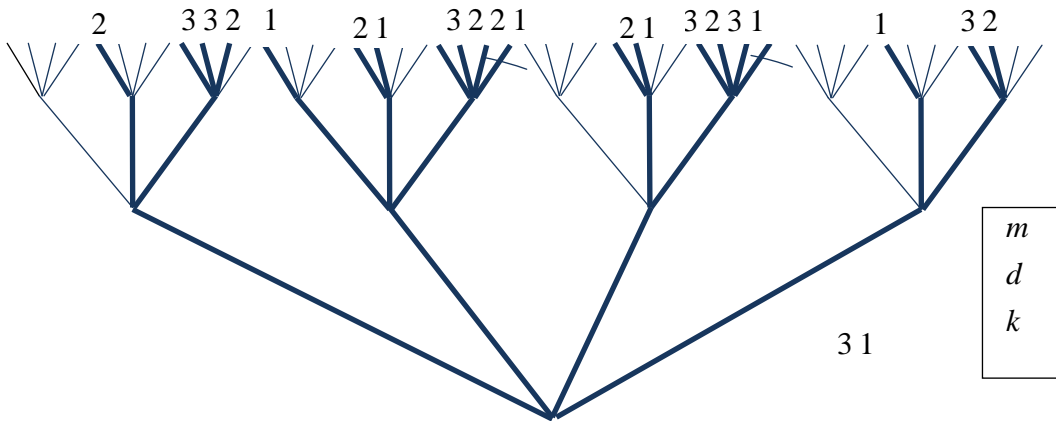
Rys. 3.20. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów - d, k, m z Tab. 3.6

$$\left(t_w < 300t_o, \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4 \right)$$



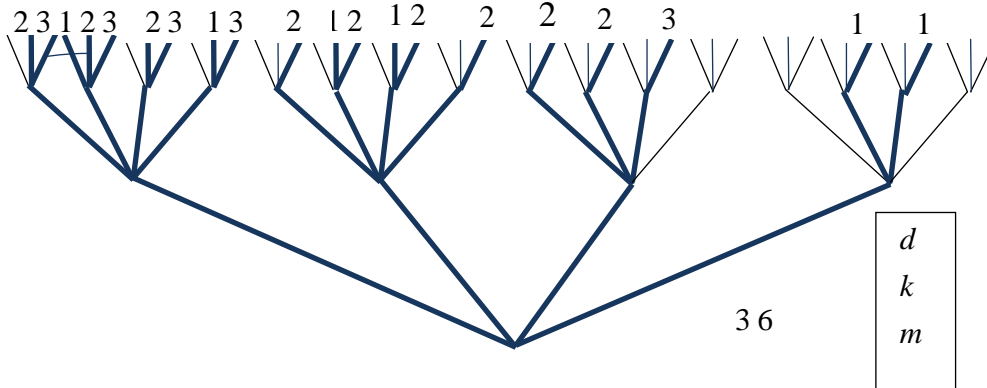
Rys. 3.21. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- m, d, k z Tab. 3.6

$$\left(t_w < 300t_o, \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4 \right)$$



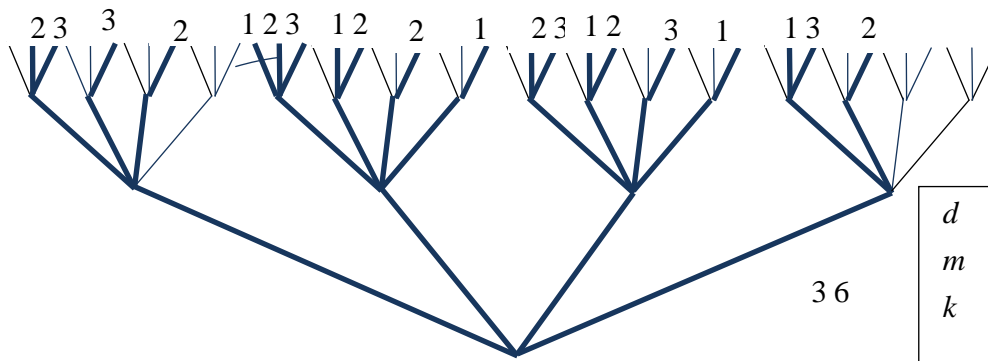
Rys. 3.22. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- k, d, m z Tab. 3.6

$$\left(t_w < 300t_o, \frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 2,4 \right)$$



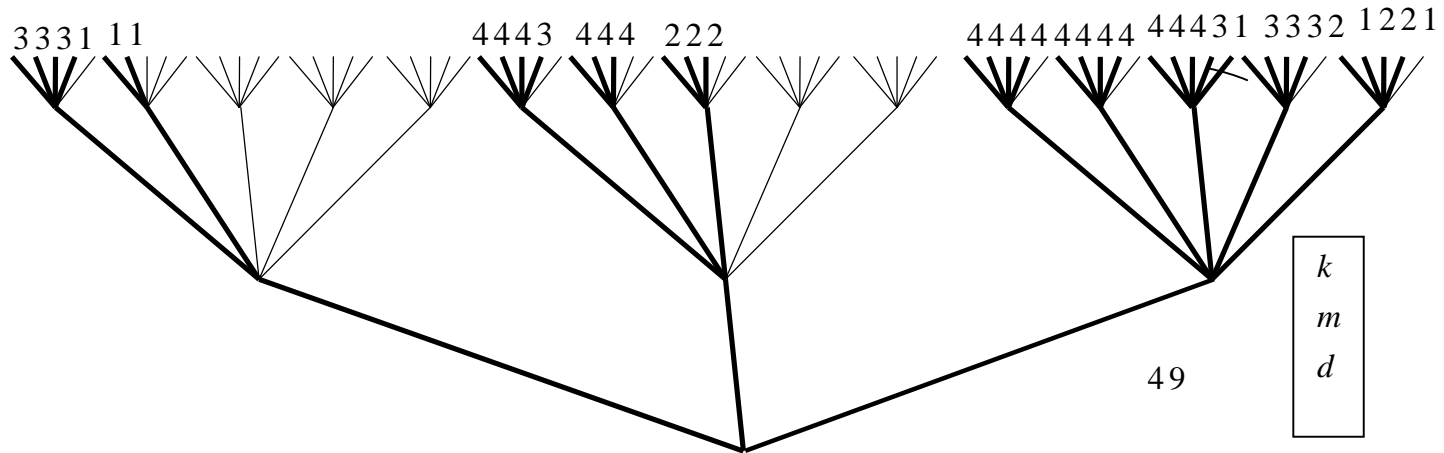
Rys. 3.23. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- m, k, d z Tab. 3.6

$$\left(t_w < 300t_o, \frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 2,4 \right)$$

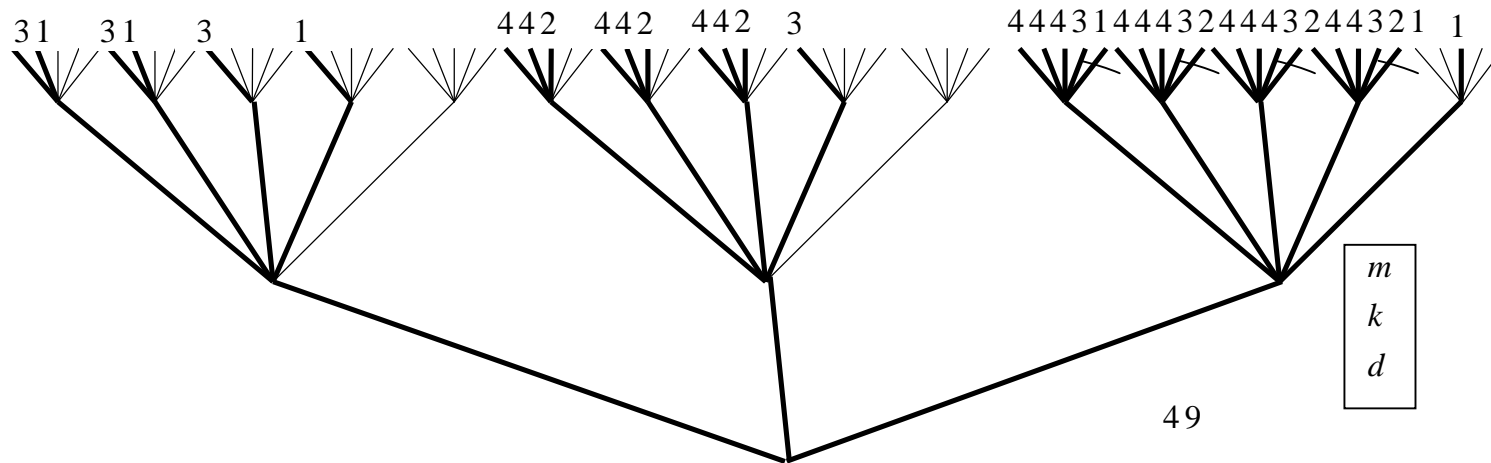


Rys. 3.24. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- k, m, d z Tab. 3.6

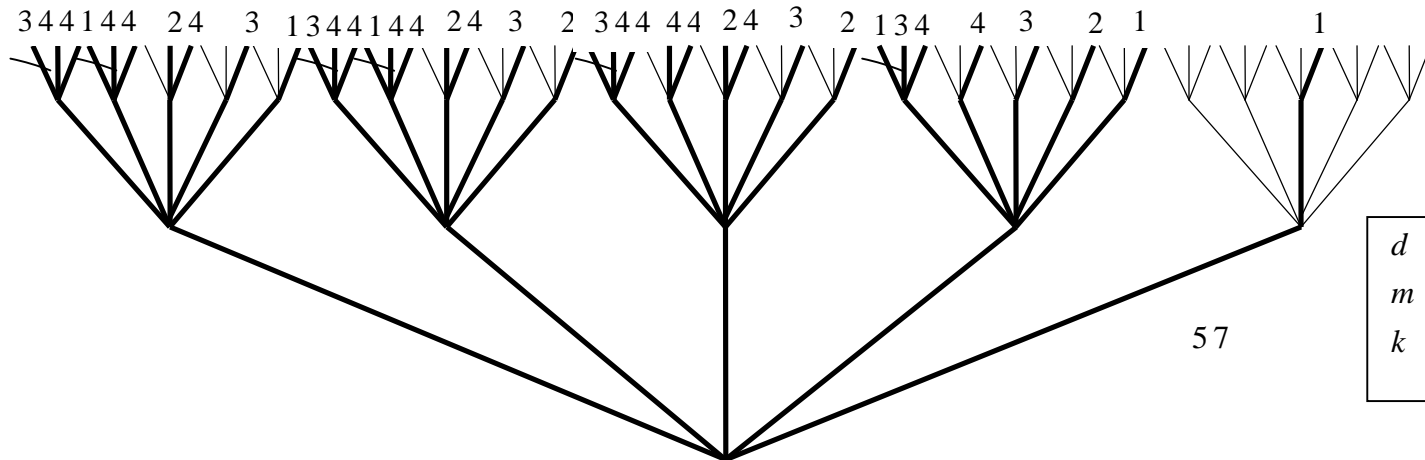
$$\left(t_w < 300t_o, \frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 2,4 \right)$$



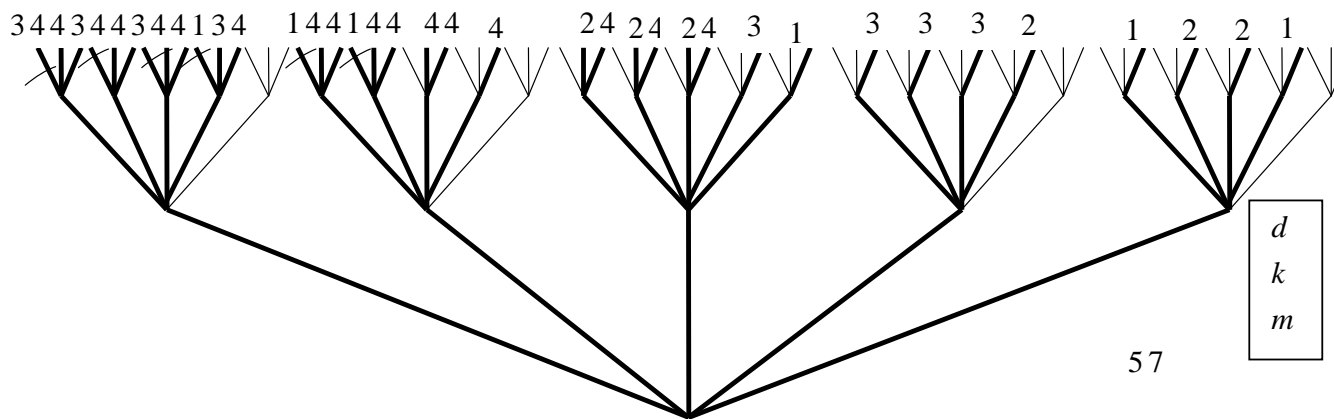
Rys. 3.25. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- d, m, k z Tab. 3.7 $\left(t_w < 1000t_o, \frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 3,6 \right)$



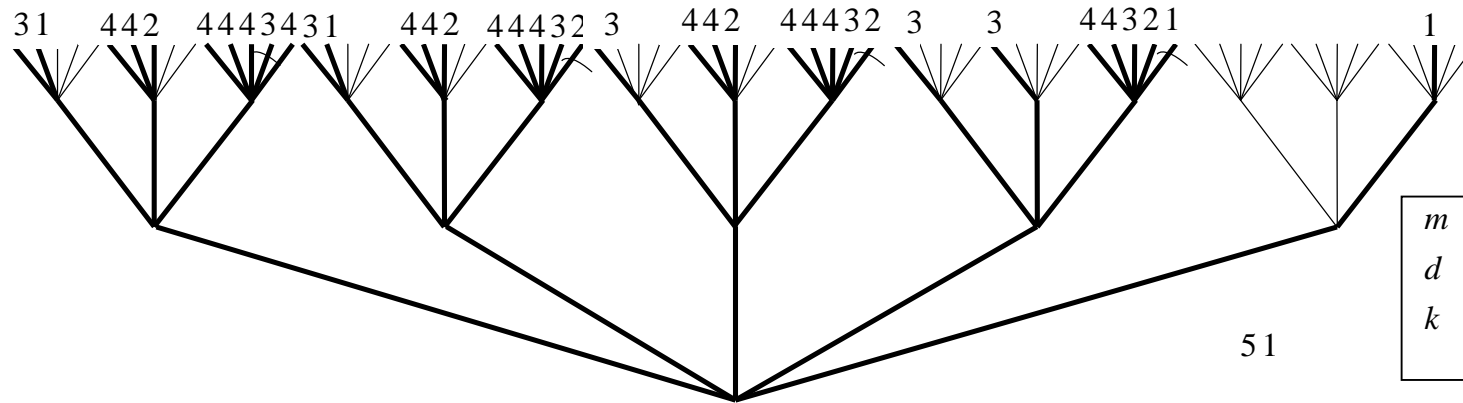
Rys. 3.26. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów- k, m, d z Tab. 3.7 $\left(t_w < 1000t_o, \frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 3,6 \right)$



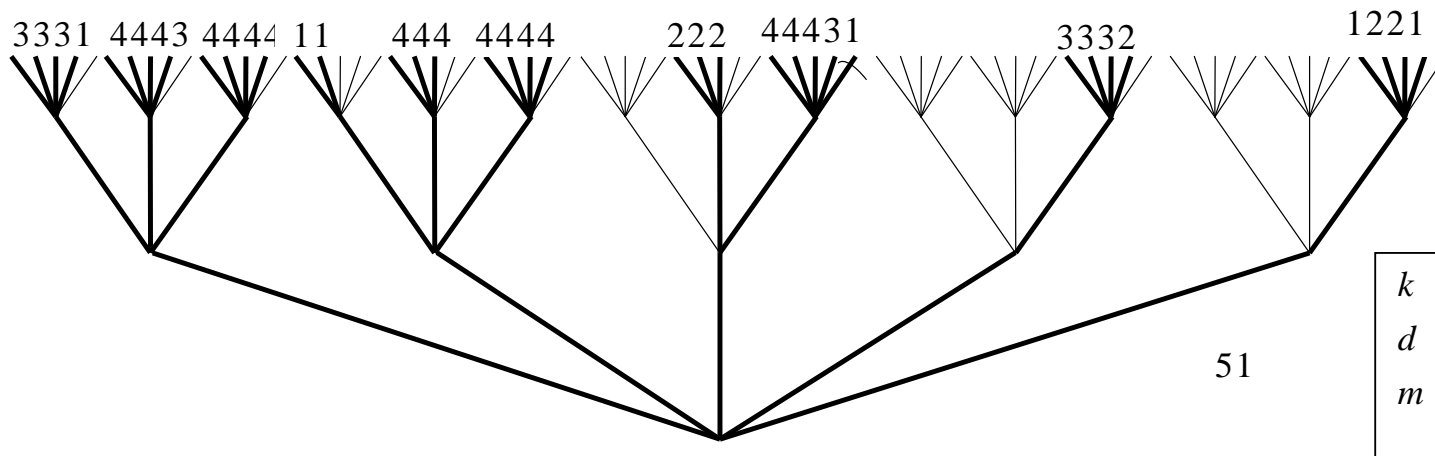
Rys. 3.27. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów - k , m , d z Tab. 3.7 $\left(t_w < 1000t_o, \frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 3,6 \right)$



Rys. 3.28. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów - m , k , d z Tab. 3.7 $\left(t_w < 1000t_o, \frac{W_{\max}}{W_{stab.}} < 3,6 \right)$



Rys. 3.29. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów - k, d, m z Tab. 3.7 $\left(t_w < 1000t_o, \frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 3,6 \right)$



Rys. 3.30. Wielowartościowe drzewo logiczne parametrów - m, k, d z Tab. 3.7 $\left(t_w < 1000t_o, \frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 3,6 \right)$

Zapis minimalizacji wielowartościowych drzew decyzyjnych z rysunków 3.19-3.24, można przedstawić następująco:

$$\begin{cases} f(d^3, m^4, k^4) = 1(001) + 2(100) + 2(101) + 2(102) + 1(10-) + 1(111) + 1(112) + \\ + 3(20-) + 2(21-) + 3(210) + 2(220) + 2(221) + 3(222) + 2(231) + 2(232) \\ \\ f(d^3, k^4, m^4) = 1(010) + 2(100) + 2(110) + 1(111) + 2(120) + 1(121) + 1(130) + \\ + 3(200) + 3(201) + 2(202) + 3(200) + 3(201) + 2(202) + 3(210) + 2(211) + \\ + 3(212) + 1(21-) + 3(220) + 2(221) + 2(222) + 1(22-) + 3(230) + 3(231) \\ \\ f(m^3, d^4, k^4) = 1(001) + 2(010) + 2(011) + 2(012) + 1(01-) + 3(02-) + 1(111) + \\ + 1(112) + 3(120) + 2(12-) + 2(221) + 3(222) + 2(223) + 1(321) + 1(322) \\ \\ f(k^4, d^3, m^4) = 2(010) + 3(020) + 3(021) + 2(022) + 1(100) + 2(110) + 1(111) + \\ + 3(120) + 2(121) + 2(122) + 1(12-) + 2(210) + 2(211) + 3(220) + 2(221) + 3(222) + \\ + 1(22-) + 1(310) + 1(310) + 3(320) + 2(221) \\ \\ f(m^4, k^4, d^3) = 2(001) + 3(002) + 1(01-) + 2(011) + 3(012) + 2(021) + 3(022) + \\ + 1(031) + 3(032) + 2(102) + 1(111) + 2(112) + 1(121) + 2(122) + 2(132) + 2(202) + \\ + 2(212) + 3(222) + 1(312) + 1(322) \\ \\ f(k^4, m^4, d^3) = 2(001) + 3(002) + 3(012) + 2(022) + 1(10-) + 2(101) + 3(102) + \\ + 1(111) + 2(112) + 2(122) + 1(132) + 2(201) + 3(202) + 1(211) + 2(212) + 3(222) + \\ + 1(232) + 1(301) + 3(302) + 2(312) \end{cases}$$

Zapis minimalizacji wielowartościowych drzew logicznych z rysunków 3.25-3.30:

$$\begin{cases} f(d^3, m^5, k^5) = 3(000) + 3(001) + 3(002) + 3(003) + 1(010) + 1(011) + 4(100) + 4(101) \\ + 4(102) + 3(103) + 4(110) + 4(111) + 4(112) + 2(120) + 2(121) + 2(122) + 4(200) + \\ + 4(201) + 4(202) + 4(203) + 4(210) + 4(211) + 4(212) + 4(213) + 4(220) + 4(221) + \\ + 4(222) + 3(223) + 1(22-) + 3(230) + 3(231) + 3(232) + 2(233) + 1(240) + 2(241) + \\ + 2(242) + 1(243) \\ \\ f(d^3, k^5, m^5) = 3(000) + 1(001) + 3(010) + 1(011) + 3(020) + 1(030) + 4(100) + 4(101) + \\ + 2(102) + 4(110) + 4(111) + 2(112) + 4(120) + 4(121) + 2(122) + 3(130) + 4(200) + 4(201) + \\ + 4(202) + 3(203) + 1(20-) + 4(210) + 4(211) + 4(212) + 3(213) + 2(21-) + 4(220) + \\ + 4(221) + 4(222) + 3(223) + 2(22-) + 4(230) + 4(231) + 3(232) + 2(233) + 1(23-) + 1(242) \\ \\ f(k^5, m^5, d^3) = 3(00-) + 4(001) + 4(002) + 1(01-) + 4(011) + 4(012) + 2(021) + 4(022) + \\ + 3(032) + 1(042) + 3(10-) + 4(101) + 4(102) + 1(11-) + 4(111) + 4(112) + 2(121) + 4(122) + \\ + 3(132) + 2(042) + 3(20-) + 4(201) + 4(202) + 4(211) + 4(212) + 2(221) + 4(222) + 3(232) + \\ + 2(242) + 1(30-) + 3(301) + 4(302) + 4(312) + 3(322) + 2(322) + 1(342) + 1(422) \\ \\ f(m^5, k^5, d^3) = 3(00-) + 4(001) + 4(002) + 3(01-) + 4(011) + 4(012) + 3(02-) + 4(021) \\ + 4(022) + 1(03-) + 3(031) + 4(032) + 1(10-) + 4(101) + 4(102) + 1(11-) + 4(111) + 4(112) + \\ + 4(121) + 4(122) + 4(132) + 2(201) + 4(202) + 2(211) + 4(212) + 2(221) + 4(222) + 3(232) + \\ + 1(242) + 3(302) + 3(312) + 3(322) + 2(332) + 1(402) + 2(412) + 2(422) + 1(432) \\ \\ f(k^5, d^3, m^5) = 3(000) + 1(001) + 4(010) + 4(011) + 2(012) + 4(020) + 4(021) + 4(022) + \\ + 4(024) + 3(02-) + 3(100) + 1(101) + 4(110) + 4(111) + 2(112) + 4(120) + 4(121) + 4(122) + \\ + 3(123) + 2(12-) + 3(200) + 4(210) + 4(211) + 2(212) + 4(220) + 4(221) + 4(222) + 3(223) + \\ + 2(22-) + 3(300) + 3(310) + 4(320) + 4(321) + 3(322) + 2(323) + 1(32-) + 1(422) \\ \\ f(m^5, d^3, k^5) = 3(000) + 3(001) + 3(002) + 1(003) + 4(010) + 4(011) + 4(012) + 3(013) + \\ + 4(020) + 4(021) + 4(022) + 4(023) + 1(100) + 1(101) + 4(110) + 4(111) + 4(112) + 4(120) + \\ + 4(121) + 4(122) + 4(123) + 2(210) + 2(211) + 2(212) + 4(220) + 4(221) + 4(222) + 3(223) + \\ + 1(22-) + 3(320) + 3(321) + 3(322) + 2(323) + 1(420) + 2(421) + 2(422) + 1(423) \end{cases}$$

W wielowartościowych drzewach logicznych z wagowymi współczynnikami rangę ważności parametrów konstrukcyjnych m , k i d wyznacza się tak jak w wielowartościowych drzewach logicznych bez współczynników wagowych [53]. W przypadku warunku kryterialnego ograniczenia **I**: ($t_w < 300t_o$; $\frac{W_{max}}{W_{stab.}} < 2,4$) istnieje jedno optymalne drzewo logiczne przedstawione na rysunku 3.19., natomiast przy warunku kryterialnym ograniczenia **II** ($t_w < 1000t_o$; $\frac{W_{max}}{W_{stab.}} < 3,6$) otrzymuje się dwa optymalne drzewa logiczne (rys. 3.25 i 3.26). Uwzględniając współczynniki wagowe w procesie optymalizacji dyskretnej, możliwe jest dokładniejsze odzwierciedlenie modelu fizycznego analizowanego układu technicznego w jego model matematyczny.

3.3.2.2. ZASTOSOWANIE UKŁADÓW WIELOWARTOŚCIOWYCH RÓWNAŃ LOGICZNYCH Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

W procesie optymalizacji przy odmiennych zmianach wartości parametrów można zaobserwować różne zachowanie się funkcji zależnych od czasu. W zaworze przelewowym te same zmiany wartości parametrów konstrukcyjnych m , k i d , powodują różne (lepsze lub gorsze) zachowania się funkcji x , Q oraz p . Dodatkowo, przy danych zmianach kodowych parametrów m , k i d , tylko jedna funkcja może spełniać warunek kryterialny. Dlatego, każdej funkcji oddzielnie przydzielane są współczynniki wagowe w_i przy iloczynnie zmiennych kanonicznych zależnie od czasu t stabilizacji. Rozwiązując układ wielowartościowych równań logicznych, otrzymano warianty realizowalne, jako rozwiązania prawdziwe dla wszystkich funkcji zależnych od czasu.

Obserwując zachowanie się funkcji x , Q oraz p w czasie stabilizacji $t_w < 200t_o$ (warunek rygorystyczny), przy iloczynach zmian kodowych parametrów m , k i d przyjęto wartości współczynników wagowych:

- $w_i=4, t_w \leq 50t_o$;
- $w_i=3, 50t_o < t_w \leq 100t_o$;
- $w_i=2, 100t_o < t_w \leq 150t_o$;
- $w_i=1, 150t_o < t_w \leq 200t_o$.

Zwiększając czas stabilizacji do $t_w < 800t_o$ (liberalne warunki pracy) założono:

- $w_i=4, t_w \leq 200t_o$;
- $w_i=3, 200t_o < t_w \leq 400t_o$;
- $w_i=2, 400t_o < t_w \leq 600t_o$;
- $w_i=1, 600t_o < t_w \leq 800t_o$.

Zapisom kodowym w iloczynach kanonicznych przypisuje się zmiany wartości (kombinacjom) arytmetycznych parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych m , k i d , przy czym: 0- duże zmniejszenie, 1- małe zmniejszenie, 2- bez zmian, 3- zwiększenie, 4- duże zwiększenie (dla m i k) oraz: 0- małe zmniejszenie, 1- bez zmian, 2- zwiększenie (dla d). Na przykład kombinacja zmian **122** oznacza małe zmniejszenie masy grzybka m , pozostawienie bez zmian stałej sprężyny k oraz

zwiększenie średnicy d . Z kolei kombinacja **402** oznacza duże zwiększenie masy grzybka m , duże zmniejszenie stałej sprężyny k oraz zwiększenie średnicy d w odniesieniu do przyjętych wartości arytmetycznych w początkowym etapie projektowania. W zależności od przyjętych kombinacji zmian kodowych parametrów m, k, i, d w iloczynach kanonicznych, następuje różne zachowanie się funkcji zależnych od czasu: x - wzniosu grzybka, Q - natężenia przepływu oraz ciśnienia p . Jeśli przy danych kombinacjach zmian parametrów m, k, i, d , funkcje zależne od czasu x, Q, p stabilizują się w określonym czasie, tzn. spełniają warunek ograniczający, to prawdziwe wytyczne projektowania określone są poprzez takie zmiany kodowe. Jednak przy tych samych kombinacjach i zmianach kodowych parametrów m, k, i, d niektóre funkcje mogą szybciej się stabilizować, a niektóre w czasie późniejszym. Współczynnik wagowy w_i przy oznaczeniach kodowych zależy od czasu stabilizacji t_i , przy czym $t_i < t_j$ gdy $t_i > t_j$. W zbiorze funkcji danego układu maszynowego, podatność każdej funkcji na zmiany parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, wyznaczana jest poprzez wielowartościowy współczynnik wagowy.

Na rysunkach 3.31- 3.41 przedstawiono przebiegi funkcji x, Q oraz p , przy odpowiednich zmianach kombinacji kodowych m, k, i, d , które podpisano pod każdym z rysunków. Przebiegi funkcji x, Q oraz p analizowano dla warunku kryterialnego $t_w < 200t_o$ (warunek rygorystyczny) oraz warunku $t_w < 800t_o$ (warunek liberalny). Każdej funkcji oddzielnie przypisuje się współczynnik wagowy przed iloczynem kanonicznym zmian kodowych m, k, i, d . Przy czym, wartość współczynnika wagowego, z punktu widzenia warunku ograniczającego $t_w < 200t_o$, umieszczono w symbolu , natomiast przy warunku ograniczającym $t_w < 800t_o$ -w symbolu . Dodatkowo za pomocą strzałek symbolicznie pokazano miejsce stabilne każdej z funkcji.

Na przykład wg rysunku 3.31 funkcji zależnej od czasu x, Q, p odpowiednie iloczyny kombinacji zmian kodowych posiadają następujące współczynniki wagowe:

- przy ograniczeniu $t_w < 200t_o$:

$$x: 2 \cdot (222) + 1 \cdot (212) + 1 \cdot (121) ;$$

$$Q: 2 \cdot (222) + 3 \cdot (212) ;$$

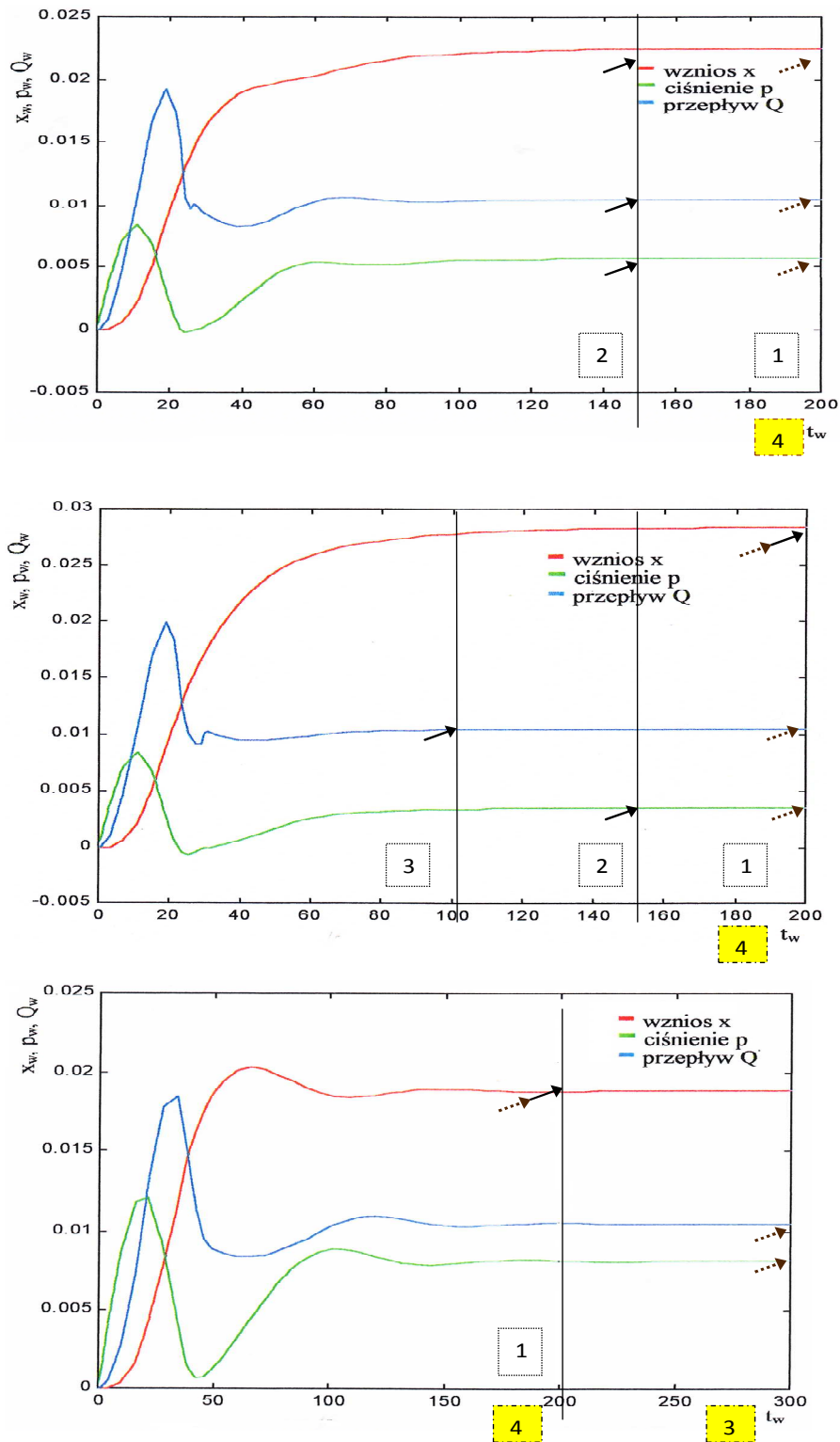
$$p: 2 \cdot (222) + 2 \cdot (212) ;$$

- przy ograniczeniu $t_w < 800t_o$:

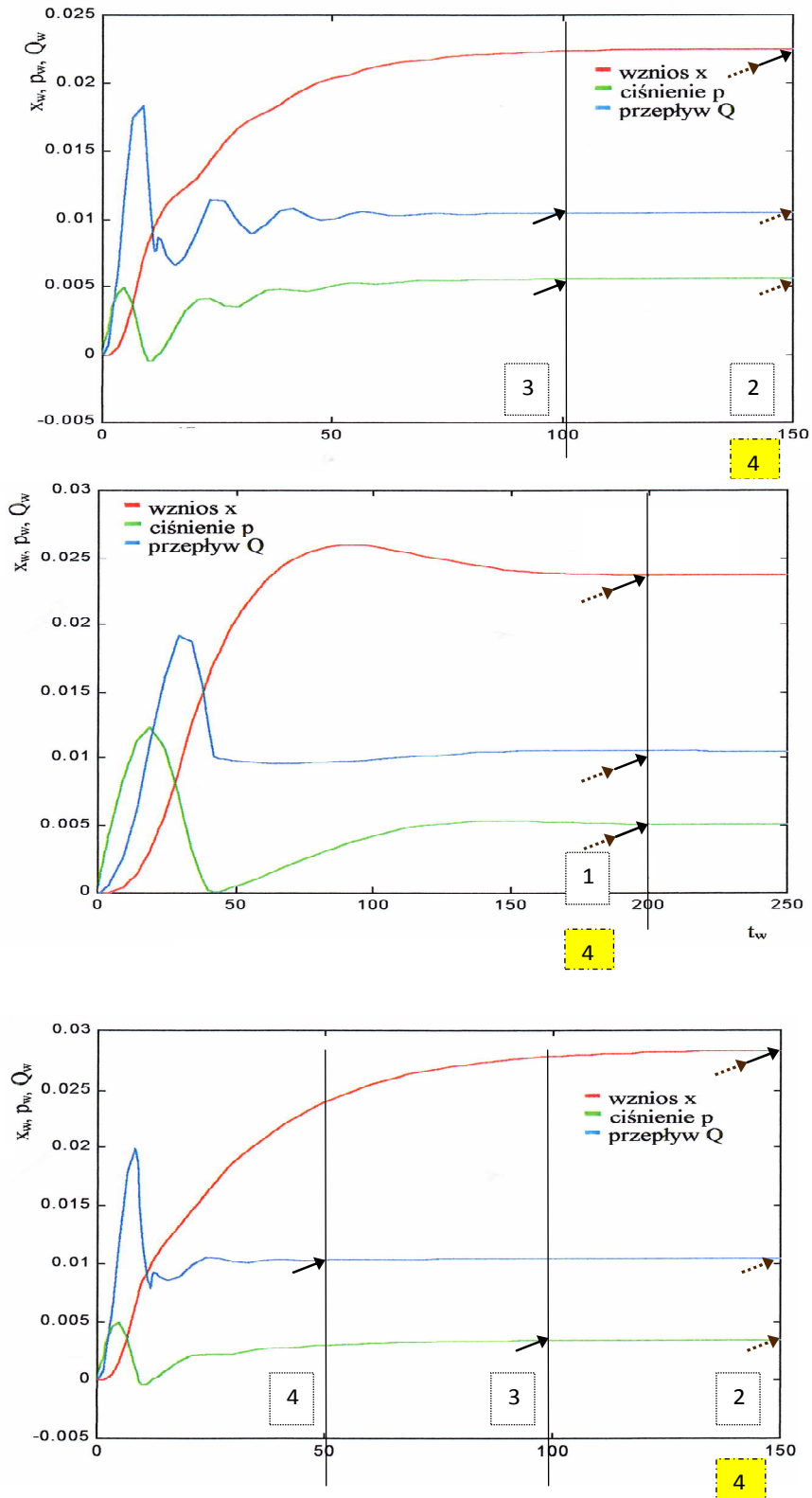
$$x: 4 \cdot (222) + 4 \cdot (212) + 4 \cdot (121) ;$$

$$Q: 4 \cdot (222) + 4 \cdot (212) + 3 \cdot (212) ;$$

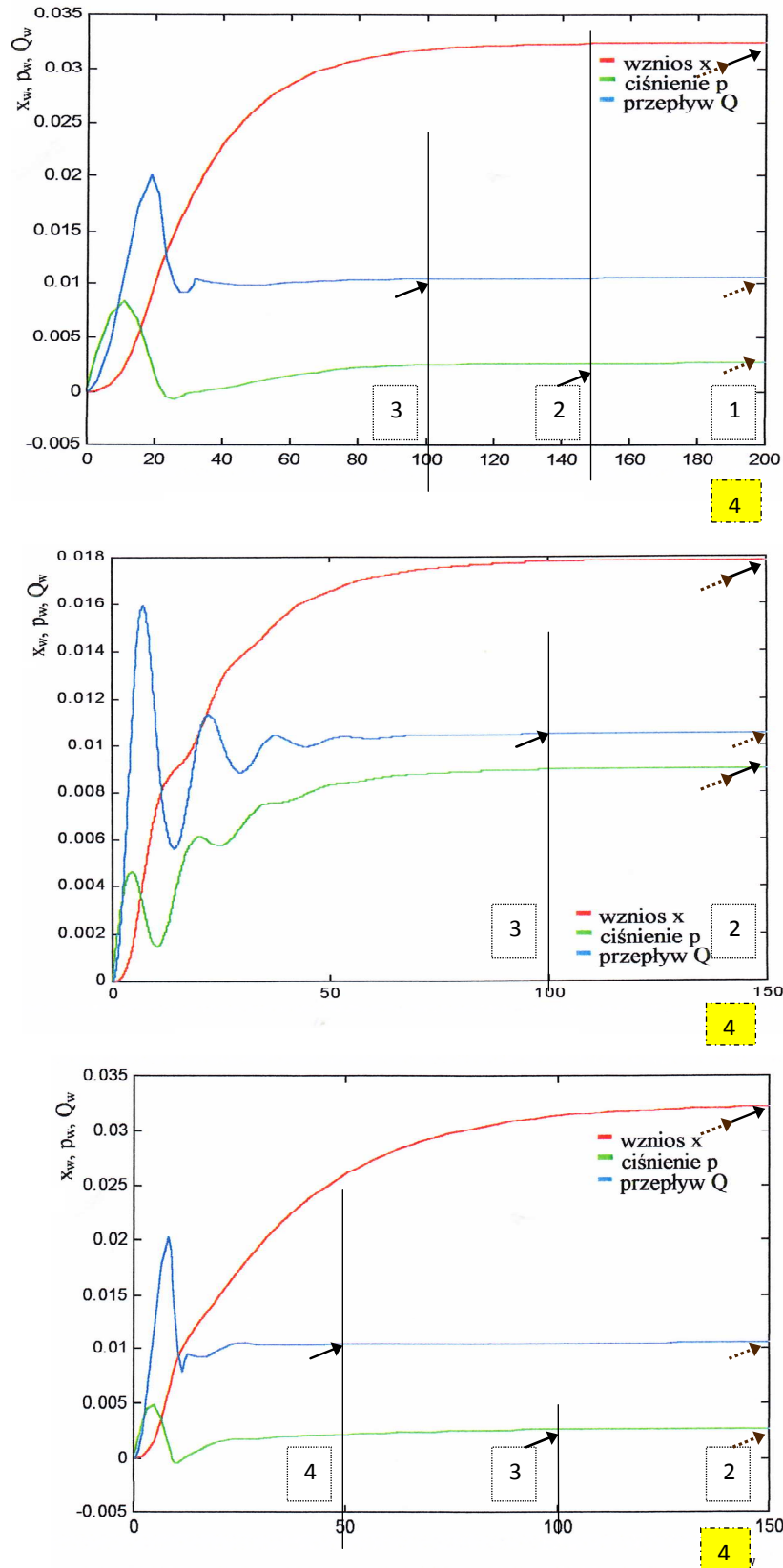
$$p: 4 \cdot (222) + 4 \cdot (212) + 3 \cdot (212) .$$



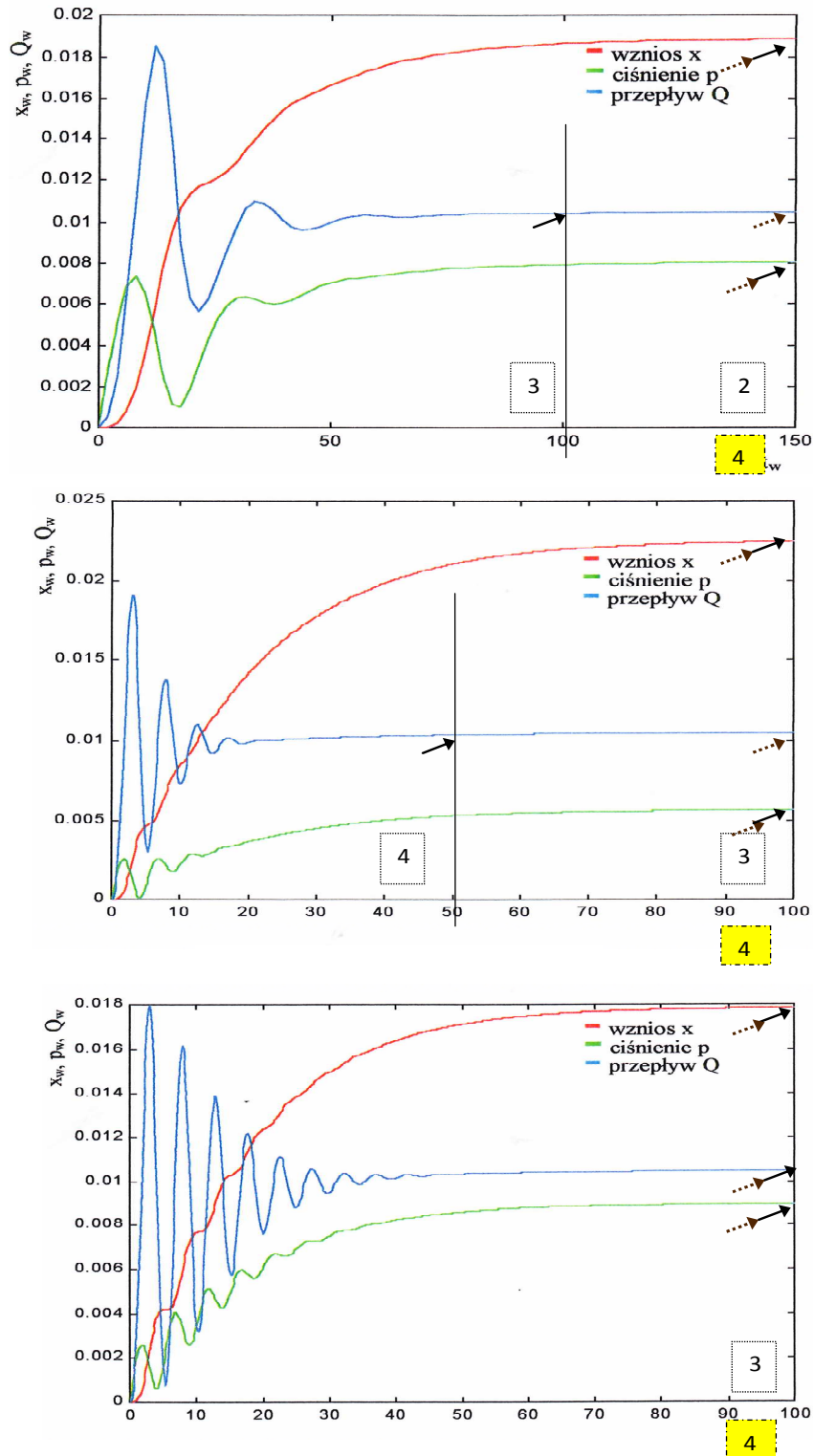
Rys. 3.31. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ $\square \rightarrow$ oraz $t_w < 800 t_0$ $\square \rightarrow$ kodowych zmian parametrów m, k i d : 222; 212, 121



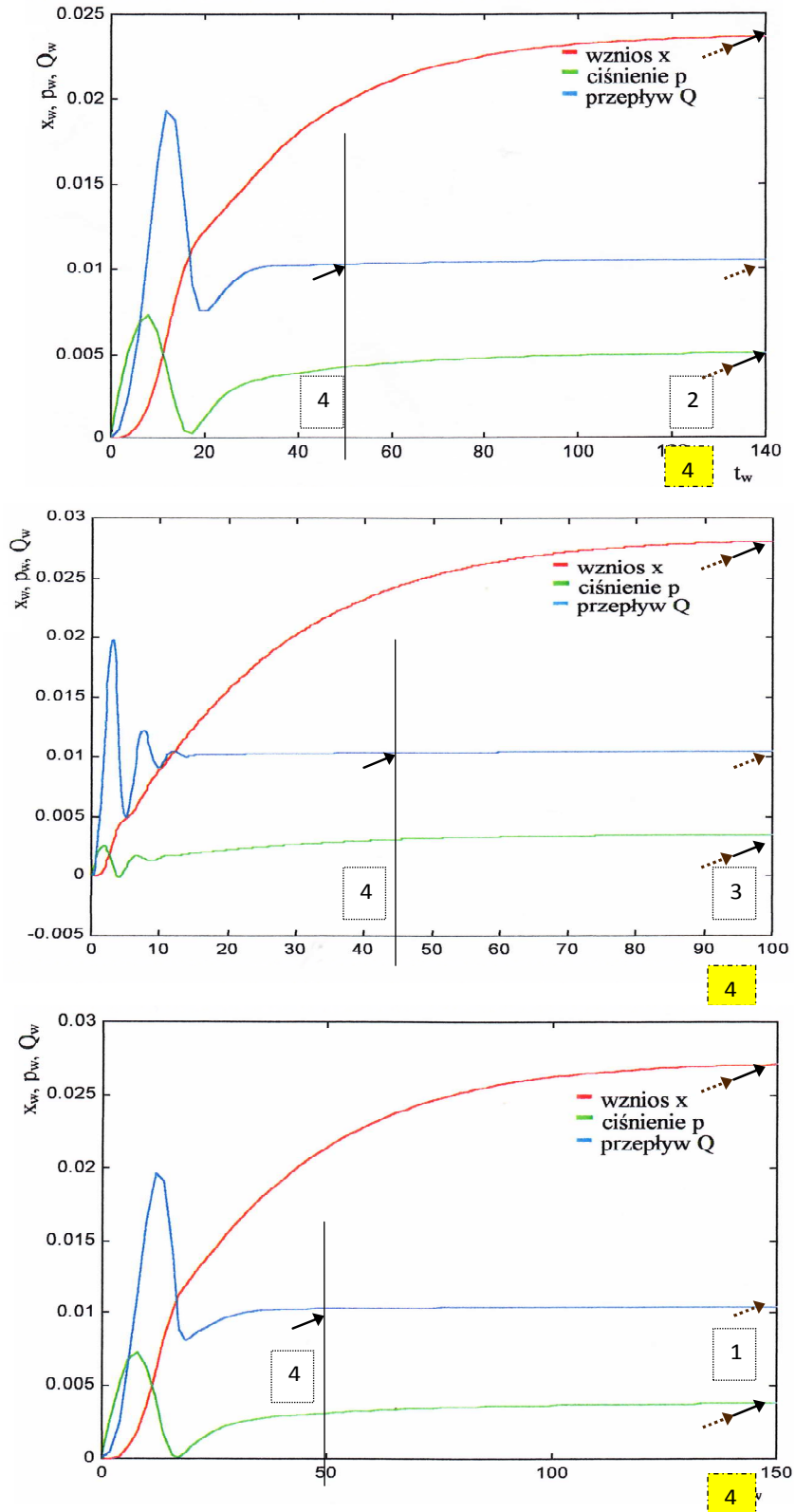
Rys. 3.32. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \dashrightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \dashrightarrow kodowych zmian parametrów m, k i d : 122, 111, 112



Rys. 3.33. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \dashrightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \dashrightarrow kodowych zmian parametrów m, k i d : 132; 202, 102

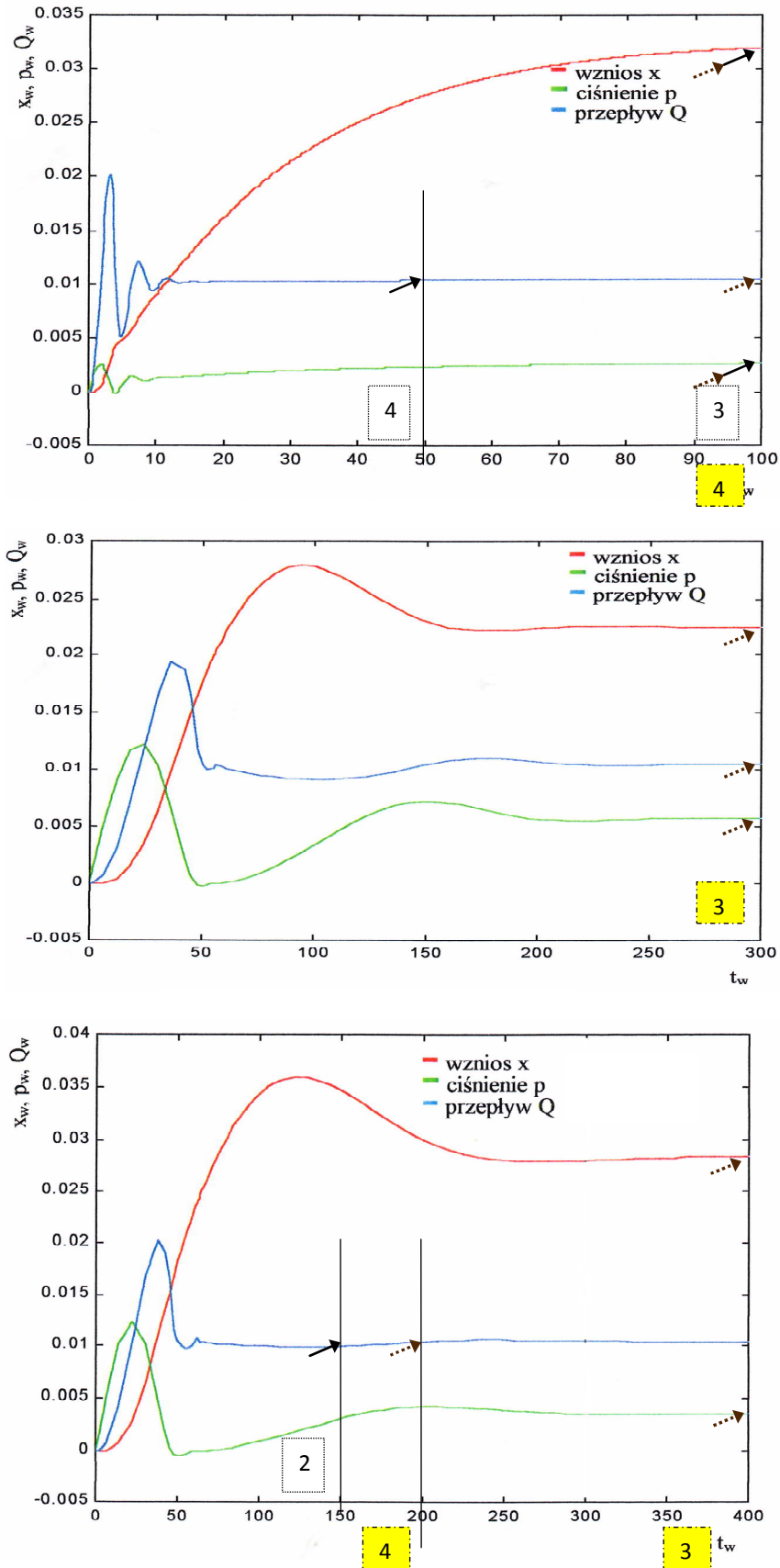


Rys. 3.34. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \dashrightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \dashrightarrow kodowych zmian parametrów m, k i d : **021; 022, 032**



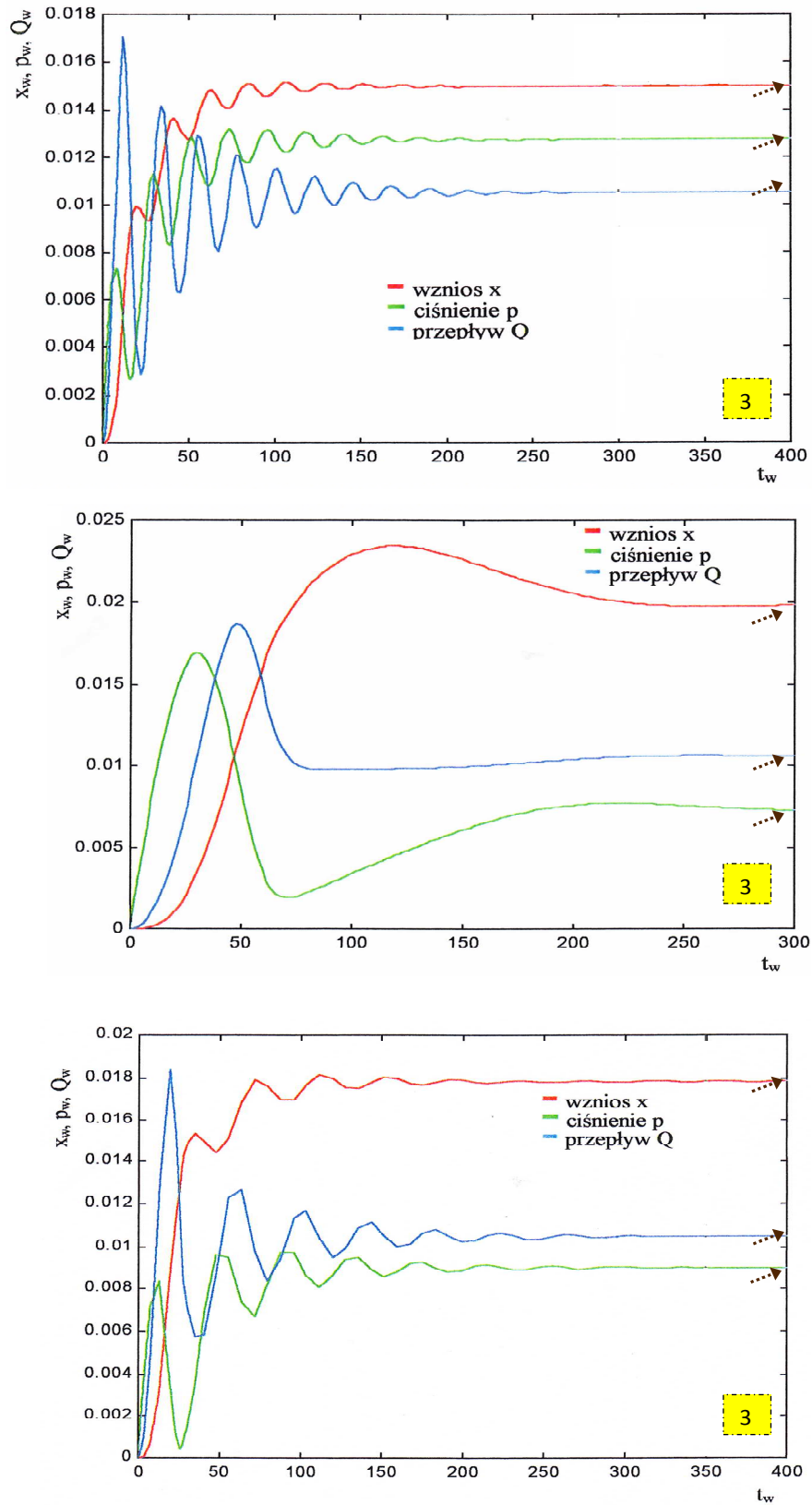
Rys. 3.35. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \dashrightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \dashrightarrow

kodowych zmian parametrów m , k i d : **011; 012, 001**

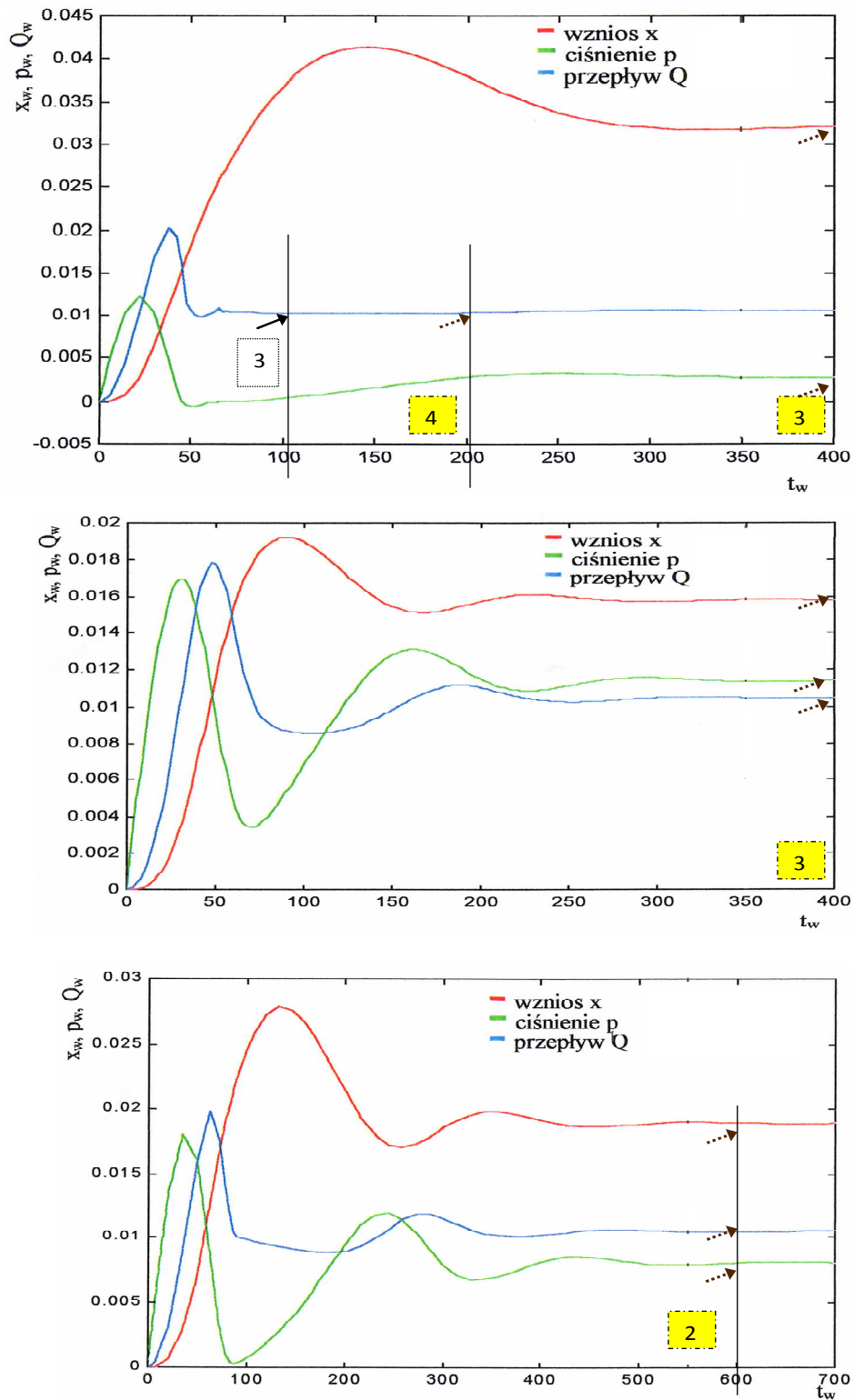


Rys. 3.36. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \dashrightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \dashrightarrow

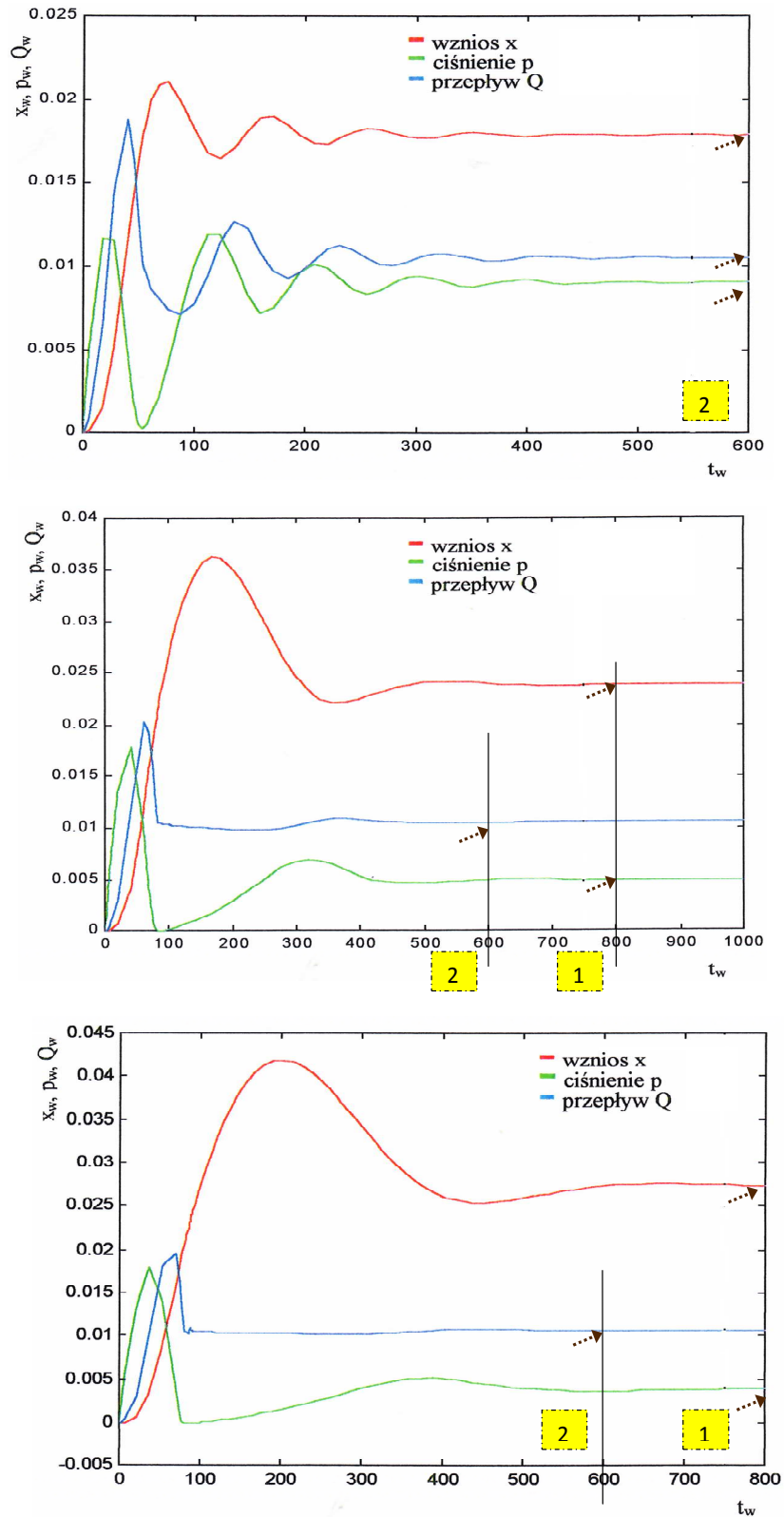
kodowych zmian parametrów m, k i d : 002; 322, 312



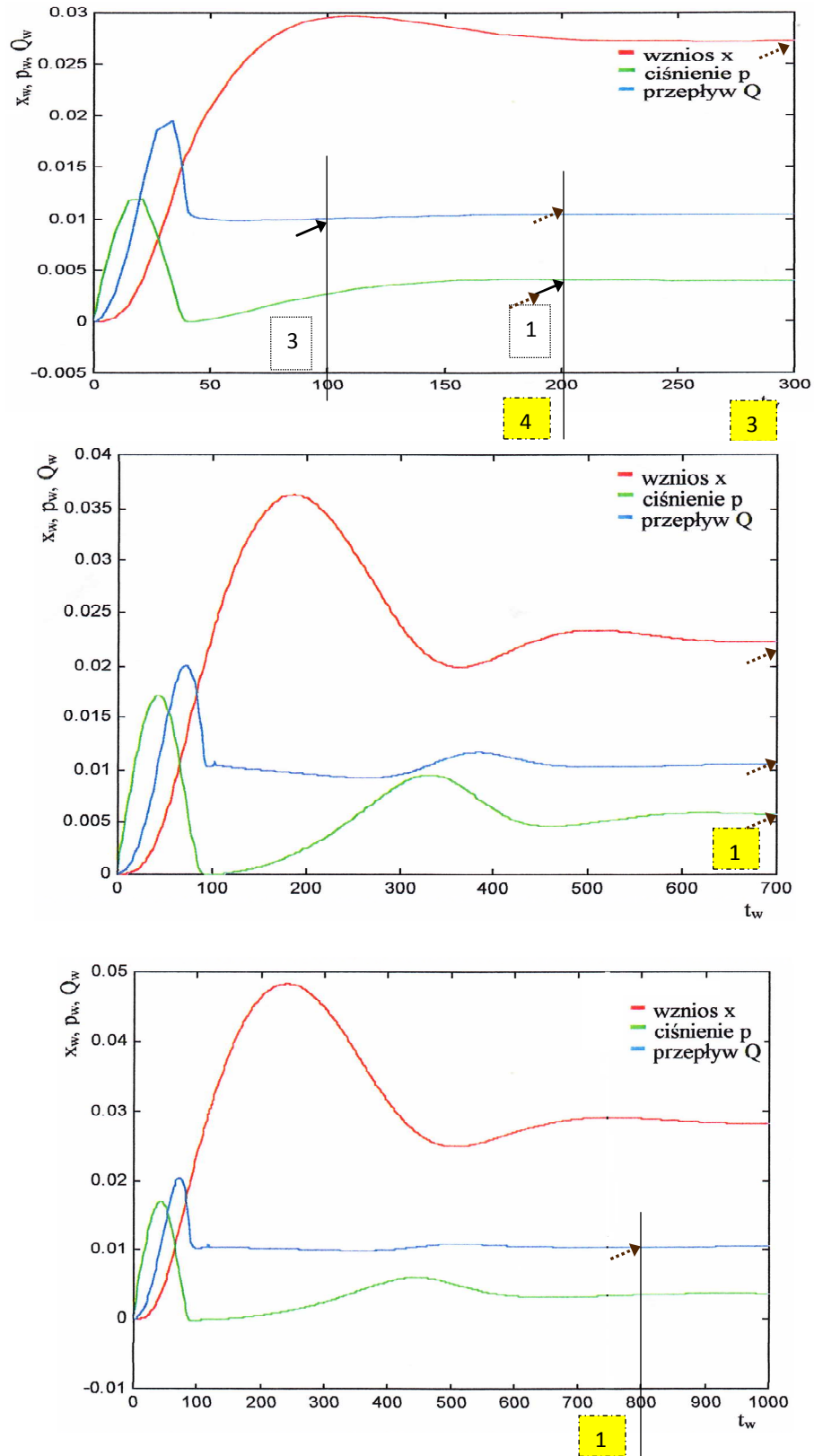
Rys. 3.37. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ $\square \rightarrow$ oraz $t_w < 800 t_0$ $\blacksquare \dots \rightarrow$ kodowych zmian parametrów m, k i d : 031; 010; 232



Rys. 3.38. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ $\square \rightarrow$ oraz $t_w < 800 t_0$ $\square \rightarrow$ kodowych zmian parametrów m, k i d : **300; 020, 221**

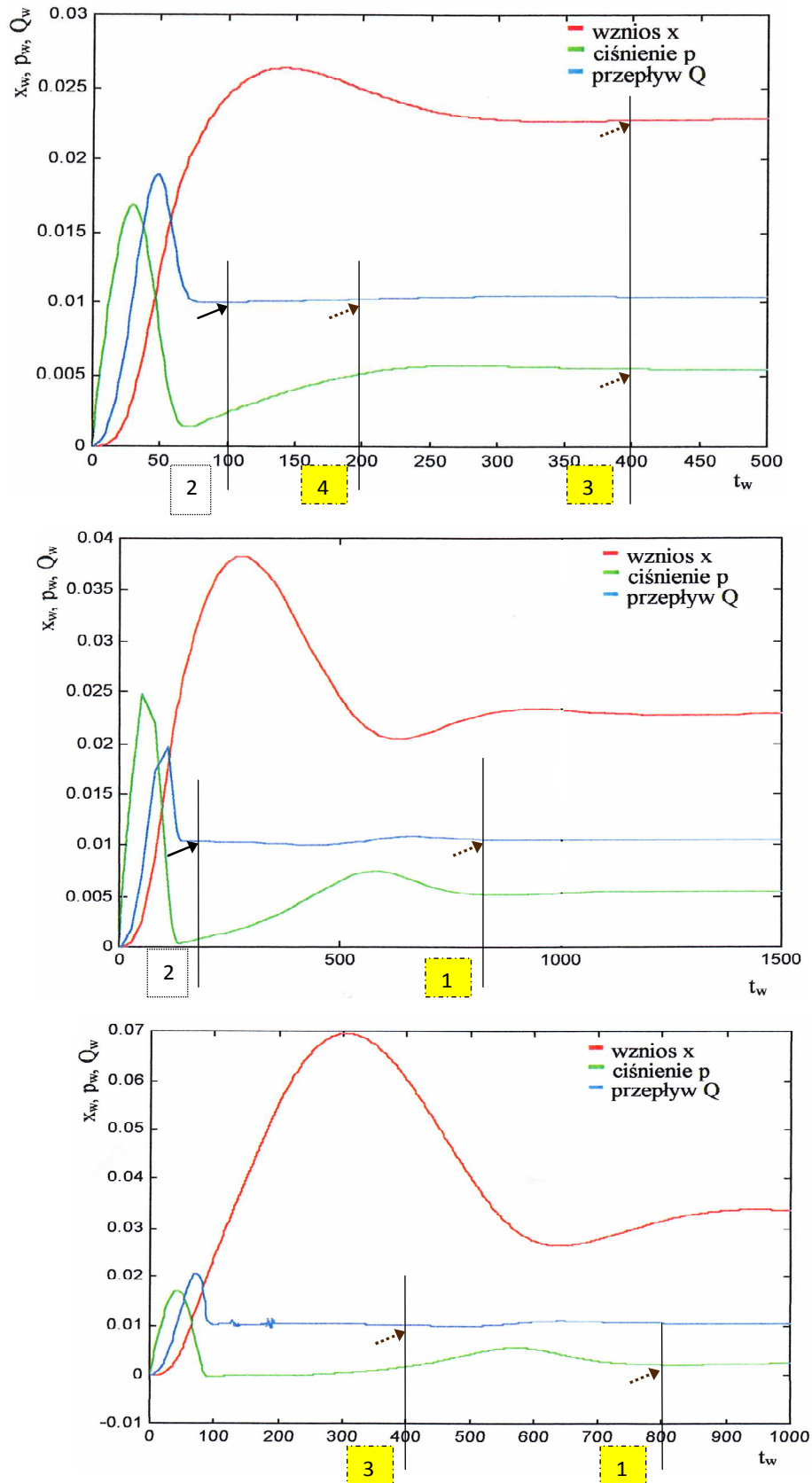


Rys. 3.39. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \rightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \square kodowych zmian parametrów m, k i d : **332; 211, 201**



Rys. 3.40. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \rightarrow oraz $t_w < 800 t_0$ \rightarrow

kodowych zmian parametrów m, k i d : **101; 422, 412**



Rys. 3.41. Przebiegi czasowe funkcji x , Q , p z oznaczonym czasem stabilizacji i współczynnikami wagowymi przy ograniczeniach $t_w < 200 t_0$ \dashrightarrow oraz $t_w < 800$ \dashrightarrow

kodowych zmian parametrów m, k i d : **000; 100, 402**

W działaniu zaworu przelewowego otrzymano z modelowania (Rys. 3.31-3.41) układ trzech wielowartościowych równań logicznych wielkości wyjściowych x , Q , p odpowiednio dla warunku ograniczającego:

$$a) t_w < 200t_o$$

$$Y_{t_w < 200t_o} = \begin{cases} x = 2 \cdot 222 + 1 \cdot 212 + 1 \cdot 121 + 2 \cdot 122 + 1 \cdot 111 + 2 \cdot 112 + 1 \cdot 132 + 2 \cdot 202 + 2 \cdot 102 + \\ + 2 \cdot 021 + 3 \cdot 022 + 3 \cdot 032 + 2 \cdot 011 + 3 \cdot 012 + 1 \cdot 001 + 3 \cdot 002 \\ Q = 2 \cdot 222 + 3 \cdot 212 + 3 \cdot 122 + 1 \cdot 111 + 4 \cdot 112 + 3 \cdot 132 + 3 \cdot 202 + 4 \cdot 102 + 3 \cdot 021 + 4 \cdot 022 + \\ + 3 \cdot 032 + 4 \cdot 011 + 4 \cdot 012 + 4 \cdot 001 + 4 \cdot 002 + 2 \cdot 312 + 3 \cdot 300 + 3 \cdot 101 + 2 \cdot 000 + 2 \cdot 100 \\ p = 2 \cdot 222 + 2 \cdot 212 + 3 \cdot 122 + 1 \cdot 111 + 3 \cdot 112 + 2 \cdot 132 + 2 \cdot 202 + 3 \cdot 102 + \\ + 2 \cdot 021 + 3 \cdot 022 + 3 \cdot 032 + 2 \cdot 011 + 3 \cdot 012 + 1 \cdot 001 + 3 \cdot 002 + 1 \cdot 101 \end{cases}$$

$$b) t_w < 800t_o$$

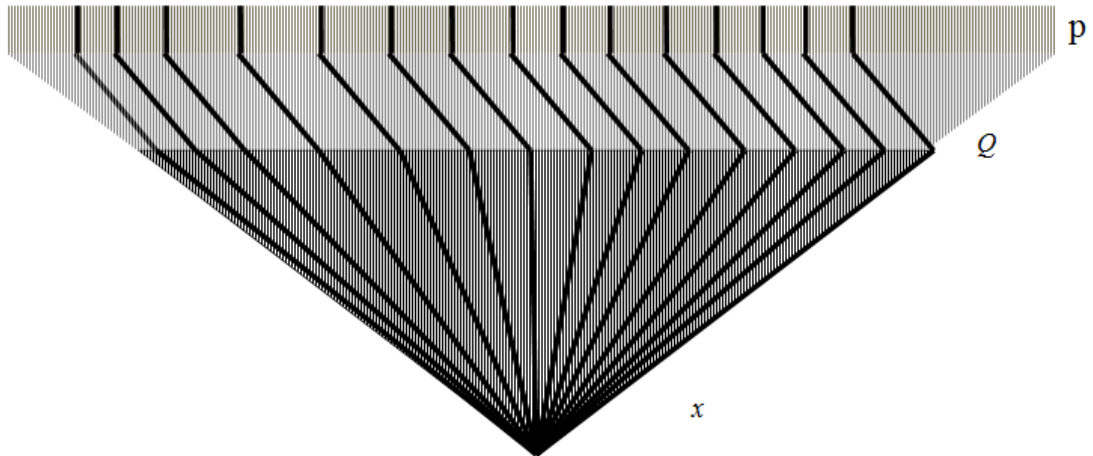
$$Y_{t_w < 800t_o} = \begin{cases} x = 4 \cdot 222 + 4 \cdot 212 + 4 \cdot 121 + 4 \cdot 122 + 4 \cdot 111 + 4 \cdot 112 + 4 \cdot 132 + \\ + 4 \cdot 202 + 4 \cdot 102 + 4 \cdot 021 + 4 \cdot 022 + 4 \cdot 032 + 4 \cdot 011 + 4 \cdot 012 + 4 \cdot 001 + \\ + 4 \cdot 002 + 3 \cdot 322 + 3 \cdot 312 + 3 \cdot 031 + 3 \cdot 010 + 3 \cdot 232 + 3 \cdot 300 + 3 \cdot 020 + \\ + 2 \cdot 221 + 2 \cdot 332 + 1 \cdot 211 + 1 \cdot 201 + 3 \cdot 101 + 1 \cdot 422 + 3 \cdot 000 \\ Q = 4 \cdot 222 + 4 \cdot 212 + 3 \cdot 121 + 4 \cdot 122 + 4 \cdot 111 + 4 \cdot 112 + 4 \cdot 132 + \\ + 4 \cdot 202 + 4 \cdot 102 + 4 \cdot 021 + 4 \cdot 022 + 4 \cdot 032 + 4 \cdot 011 + 4 \cdot 012 + 4 \cdot 001 + \\ + 4 \cdot 002 + 3 \cdot 322 + 3 \cdot 312 + 3 \cdot 031 + 3 \cdot 010 + 3 \cdot 232 + 3 \cdot 300 + 3 \cdot 020 + \\ + 2 \cdot 221 + 2 \cdot 332 + 1 \cdot 211 + 1 \cdot 201 + 4 \cdot 101 + 1 \cdot 422 + 3 \cdot 000 + 1 \cdot 402 \\ p = 4 \cdot 222 + 4 \cdot 212 + 3 \cdot 121 + 4 \cdot 122 + 4 \cdot 111 + 4 \cdot 112 + 4 \cdot 132 + \\ + 4 \cdot 202 + 4 \cdot 102 + 4 \cdot 021 + 4 \cdot 022 + 4 \cdot 032 + 4 \cdot 011 + 4 \cdot 012 + 4 \cdot 001 + \\ + 4 \cdot 002 + 3 \cdot 322 + 4 \cdot 312 + 3 \cdot 031 + 3 \cdot 010 + 3 \cdot 232 + 4 \cdot 300 + 3 \cdot 020 + \\ + 2 \cdot 221 + 2 \cdot 332 + 2 \cdot 211 + 2 \cdot 201 + 4 \cdot 101 + 1 \cdot 422 + 1 \cdot 412 + 4 \cdot 000 + 1 \cdot 100 + 3 \cdot 402 \end{cases}$$

Rozwiązaniem układu równań $Y_{t_w < 200t_o}$ jest 5120 ($16(x) \cdot 20(Q) \cdot 16(p)$) wariantów teoretycznych rozwiązań. Rozwiązanie prawdziwe dla układu $Y_{t_w < 200t_o}$ przyjmuje następującą postać:

$$\begin{aligned} f(x, Q, p)^{t_w < 200t_o} &= 2 \cdot 222 + 1 \cdot 212 + 2 \cdot 122 + 1 \cdot 111 + 2 \cdot 112 + 1 \cdot 132 + 2 \cdot 202 + \\ &+ 2 \cdot 102 + 2 \cdot 021 + 3 \cdot 022 + 3 \cdot 032 + 2 \cdot 011 + 3 \cdot 012 + 1 \cdot 001 + 3 \cdot 002 \\ &= 1 \cdot (001) + 3 \cdot (0-2) + 2 \cdot (011) + 2 \cdot (021) + 1 \cdot (1-2) + 2 \cdot (122) + \\ &+ 2 \cdot (112) + 2 \cdot (102) + (1 \cdot 111) + 2 \cdot (202) + 1 \cdot (212) + 2 \cdot (222) \end{aligned}$$

Na rysunku 3.42 schematycznie przedstawiono drzewo morfologiczne układu $Y_{t_w < 200t_o}$ z wariantami realizowalnymi zmian kodowych parametrów konstrukcyjnych m , k i d .

2-222 1-212 2-122 1-111 2-112 1-132 2-202 2-102 2-021 3-022 3-032 2-011 3-012 1-001 3-002



Rys. 3.42. Schemat drzewa morfologicznego dla układu $Y_{t_w < 200 t_o}$

W przypadku warunku ograniczającego $t_w < 800 t_o$, istnieje $30690 (30(x) \cdot 33(Q) \cdot 31(p))$ wariantów teoretycznych rozwiązań. Rozwiązania realizowalne są następującej postaci:

$$\begin{aligned}
 f(x, Q, p)^{t_w < 800 t_o} &= 4 \cdot 222 + 4 \cdot 212 + 3 \cdot 121 + 4 \cdot 122 + 4 \cdot 111 + 4 \cdot 112 + 4 \cdot 132 + \\
 &\quad + 4 \cdot 202 + 4 \cdot 102 + 4 \cdot 021 + 4 \cdot 022 + 4 \cdot 032 + 4 \cdot 011 + 4 \cdot 012 + \\
 &\quad + 4 \cdot 001 + 4 \cdot 002 + 3 \cdot 322 + 3 \cdot 312 + 3 \cdot 031 + 3 \cdot 010 + 3 \cdot 232 + 3 \cdot 300 + \\
 &\quad + 3 \cdot 020 + 2 \cdot 221 + 2 \cdot 332 + 1 \cdot 211 + 1 \cdot 201 + 3 \cdot 101 + 1 \cdot 422 + 3 \cdot 000 \\
 &= 3(00-) + 4(001) + 4(002) + 3(01-) + 4(011) + 4(012) + 3(02-) + \\
 &\quad + 4(021) + 4(022) + 3(0-1) + 4(001) + 4(011) + 4(021) + 4(0-2) + \\
 &\quad + 4(1-2) + 1(-22) + 3(322) + 4(222) + 4(122) + 4(022) + 4(032) + \\
 &\quad + 3(101) + 4(111) + 3(121) + 1(201) + 1(211) + 4(212) + 2(221) + \\
 &\quad + 3(232) + 3(300) + 3(312) + 2(332)
 \end{aligned}$$

Gdyby przyjąć w przebiegu funkcji x , Q oraz p bardzo rygorystyczny warunek kryterialny: czas stabilizacji $t_w < 100 t_o$ oraz wartości współczynników wagowych :

- $w_i = 4, t_w \leq 25 t_o$;
- $w_i = 3, 25 t_o < t_w \leq 50 t_o$;
- $w_i = 2, 50 t_o < t_w \leq 75 t_o$;
- $w_i = 1, 75 t_o < t_w \leq 100 t_o$.

to wagowy wielowartościowy układ równań dla x , Q oraz p jest następujący:

$$Y_{t_w < 100 t_o} = \begin{cases} x = 1 \cdot 022 + 1 \cdot 032 + 1 \cdot 012 + 1 \cdot 002 \\ Q = 1 \cdot 222 + 1 \cdot 212 + 1 \cdot 122 + 3 \cdot 112 + 2 \cdot 132 + 1 \cdot 202 + 3 \cdot 102 + 1 \cdot 021 + 3 \cdot 022 + 1 \cdot 032 + \\ \quad + 3 \cdot 011 + 4 \cdot 012 + 4 \cdot 001 + 4 \cdot 002 + 1 \cdot 312 + 1 \cdot 300 + 1 \cdot 101 + 1 \cdot 000 + 1 \cdot 100, \\ p = 1 \cdot 122 + 1 \cdot 112 + 1 \cdot 102 + 1 \cdot 022 + 1 \cdot 032 + 1 \cdot 012 + 1 \cdot 002. \end{cases}$$

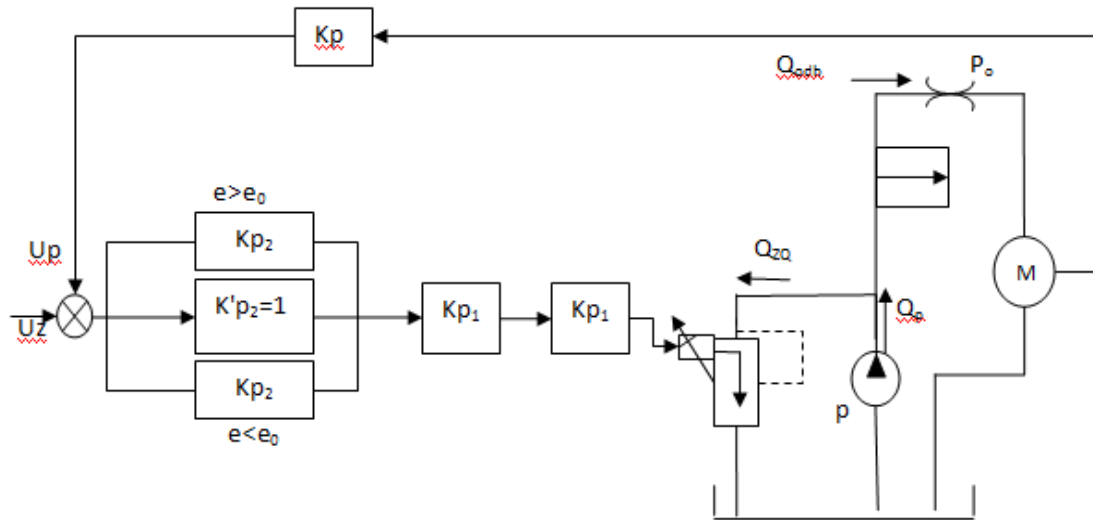
Rozwiązanie realizowalne przyjmuje następującą postać:

$$f(x, Q, p)^{t_w < 100 t_o} = 1 \cdot 022 + 1 \cdot 032 + 1 \cdot 012 + 1 \cdot 002 = 1 \cdot (0-2).$$

Rozwiązaniem układu wagowych wielowartościowych równań logicznych są warianty realizowalne zmian kodowych parametrów m , k i d wszystkich funkcji x , Q oraz p zależnych od czasu t . Zachowuje się jednocześnie indywidualne właściwości każdej z funkcji.

3.3.3. HYDRAULICZNY ZAWÓR PROPORCJONALNY

Na rysunku 3.43 przedstawiono układ napędowy z zaworem proporcjonalnym z odbiornikiem.



Rys. 3.43. Schemat układu napędowego [199]

Odbiornikiem w analizowanym układzie jest zawór dławiący, którego charakterystykę w pracy [200] opisano następująco:

$$\begin{aligned} p \leq 1 \text{ MPa} : Q_{odb} &= 1,2446666 \cdot 10^{-10} p, \\ 1 \text{ MPa} \leq p \leq 6 \text{ MPa} : Q_{odb} &= 0,3533333 \cdot 10^{-10} p + 0,8913333 \cdot 10^{-4}, \\ p \leq 6 \text{ MPa} : Q_{odb} &= 0,2425893 \cdot 10^{-10} p + 14,55 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

W celu opisu przepływu przez zawór proporcjonalny, konieczne jest uwzględnienie wartości współczynnika strat w funkcji przemieszczenia elementu ruchomego. Rzeczywisty przebieg jest zbliżony do rozwiązania równania różniczkowego drugiego rzędu ze zmiennym współczynnikiem tłumienia. Zależność tą opisano w postaci:

$$\Delta < 0$$

$$,k_{vx} = 0,82 \left[1 - \exp\left(-b \cdot 10^3 \cdot \frac{x}{2}\right) \cos\left(10^3 \sqrt{-\Delta}\right) \right], \quad (3.12)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} b &= 5 + \frac{5 \cdot 10^7}{p}, \\ \Delta &= b^2 - 100\pi^2 \end{aligned}$$

$$\Delta > 0$$

$$k_{vx} = 0,82[1 - \exp(-b - \sqrt{-\Delta})10^3 \frac{x}{2}]. \quad (3.13)$$

W stopniu sterującym wykorzystano przebieg przedstawiony w [201, 200]

Przyjęto:

$$\Delta y < 0$$

$$k_{vy} = 0,75[1 - \exp(-b_y \cdot 10^3 \cdot \frac{y}{2}) \cos(10^3 y \sqrt{-y\Delta})], \quad (3.14)$$

$$\Delta y > 0$$

$$k_{vy} = 0,78[1 - \exp(-b_y - \sqrt{-\Delta}) \cos(10^3 y \sqrt{-y\Delta})], \quad (3.15)$$

gdzie:

$$b_y = 40 + \frac{1,5 \cdot 10^8}{p_y + 10^5},$$

$$\Delta y = b_y^2 - 100\pi^2.$$

Siłę generowaną przez przetwornik elektromagnetyczny zastosowany w zaworze, opisano w następującej postaci:

$$\begin{aligned} F_m &= 73,619631(i - 0,045), \\ di &= \frac{1}{T_m} \left(\frac{U}{18} - i \right) dt, \end{aligned} \quad (3.16)$$

gdzie:

$$T_m = 15ms \text{ gdy } i \text{ rośnie } \left(\frac{U}{18} - i > 0 \right)$$

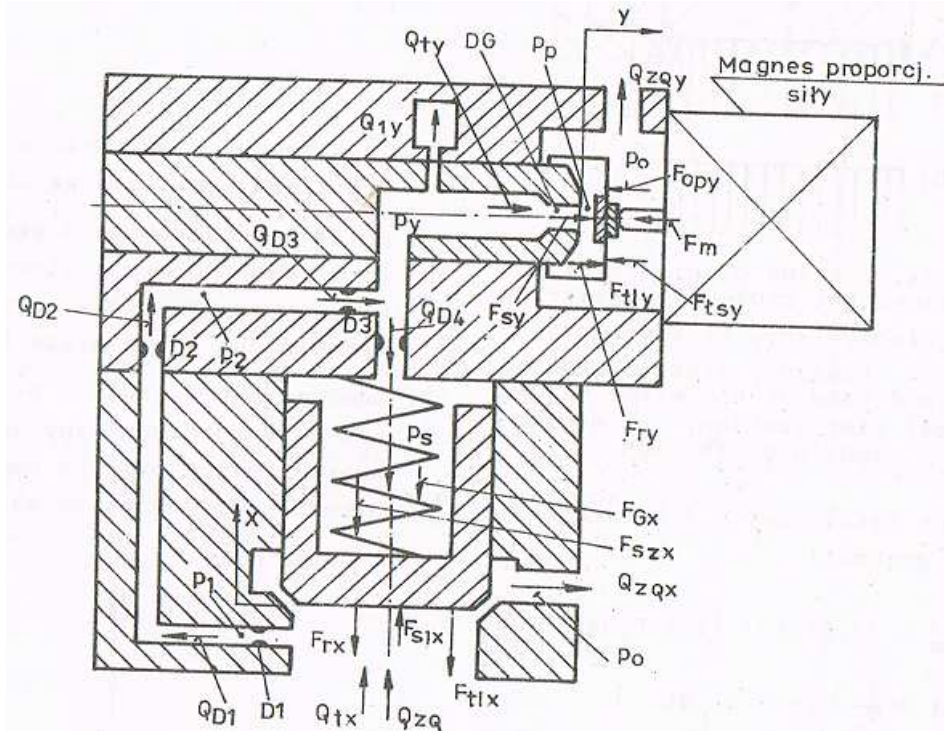
$$T_m = 7,5ms \text{ gdy } i \text{ maleje } \left(\frac{U}{18} - i < 0 \right)$$

3.3.4. MODEL MATEMATYCZNY HYDRAULICZNEGO ZAWORU PROPORCJONALNEGO

Bilans przepływu w układzie napędowym zgodnie z pracą [199] zapisać można jako:

$$Q_p = Q_{zQ} + Q_1 + Q_{odb} \quad (3.17)$$

Szczegółowo model matematyczny, prezentowanego zaworu hydraulicznego, opisano w opracowaniu [199]. Na rysunku 3.44 przedstawiono schemat analizowanego zaworu hydraulicznego.



Rys. 3.44. Schemat zaworu proporcjonalnego [199]

Nateżenie przepływu

Bilans przepływu przez stopień główny zaworu:

$$Q_{zQ} = Q_{zQx} + Q_{D1} + Q_{ix}. \quad (3.18)$$

Przepływ przez dyszę:

$$Q_{D1} = Q_{D2} = Q_{D3}, \quad (3.19)$$

$$Q_{DG} = Q_{zQY} + Q_{iy}. \quad (3.20)$$

Bilans przepływu przez stopień sterujący:

$$Q_{D3} = Q_{iy} + Q_{zQY} + Q_{iy} - Q_{ix}, \quad (3.21)$$

Poza tym, wyróżnia się natężenie przepływu w stopniu głównym:

$$Q_{ix} = \frac{V_x}{B} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{4,33735 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^9} \frac{dp}{dt} = 3,098107 \cdot 10^{-12} \frac{dp}{dt}, \quad (3.22)$$

w stopniu sterującym:

$$Q_{iy} = \frac{V_y}{B} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{1,2 \cdot 10^{-6}}{1,4 \cdot 10^9} \frac{dp}{dt} = 0,857 \cdot 10^{-15} \frac{dp_y}{dt}, \quad (3.23)$$

Nateżenie przepływu przez zawór:

$$Q_z = \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot k(k_{vx}) \sqrt{p - p_0}, \quad (3.24)$$

-przez stopień główny:

$$Q_{zQx} = \sqrt{\frac{2}{892}} \cdot \pi \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 30^\circ (k_{vx} \cdot x) \sqrt{p}, \quad (3.25)$$

$$Q_{zQx} = 1,6355097 \cdot 10^{-3} (k_{vx} \cdot x) \sqrt{p}, \quad (3.26)$$

- przez stopień sterujący:

$$Q_{zQy} = \sqrt{\frac{2}{892}} \cdot \pi \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} (k_{vy} \cdot x) \sqrt{p_y}, \quad (3.27)$$

$$Q_{zQy} = 0,2676292 \cdot 10^{-3} (k_{vy} \cdot y) \sqrt{p}. \quad (3.28)$$

Ostatecznie natężenia przepływu:

-przez dyszę D_1 :

$$Q_{D1} = a_1(p - p_1) = 0,2370513 \cdot 10^{-10} (p - p_y). \quad (3.29)$$

-przez dyszę D_3 :

$$Q_{D3} = a_3(p_2 - p_y) = 0,2370486 \cdot 10^{-10} (p - p_y). \quad (3.30)$$

Siły występujące w zaworze

obciążenia dynamiczne:

$$F_d = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (3.31)$$

w stopniu głównym:

$$F_{dx} = \left[0,0675 + \frac{1}{3} (0,008 + 0,00439) \right] \frac{d^2 x}{dt^2} = 0,70631 \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (3.32)$$

w stopniu sterującym:

$$F_{dy} = 0,03 \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (3.33)$$

Tarcie lepkie:

$$F_{t1} = \frac{A_{st} \cdot \mu}{L_0} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (3.34)$$

- siły w stopniu głównym:

$$F_{t1x} = \frac{\pi \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 10,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,06265}{5 \cdot 10^{-6}} = 9,0885102 \frac{dx}{dt}, \quad (3.35)$$

- siły w stopniu sterującym:

$$F_{t1y} = \frac{32 \cdot 10^{-6} \cdot 0,06265}{12 \cdot 10^{-6}} \frac{dy}{dt} = 0,1670666 \frac{dy}{dt}, \quad (3.36)$$

Siły reakcji hydromechanicznej:

- stopnia głównego:

$$F_{rx} = 2k_x \cos \theta (k_{vx} x) p = 2 \cdot \pi \cdot 22 \cdot 10^{-5} \cdot \sin 30^\circ \cdot 1 \cdot \cos 35^\circ (k_{vx} x) p \quad (3.37)$$

$$F_{rx} = 56,59033 \cdot 10^{-6} \cdot (k_{vx} x) p \quad (3.38)$$

- pary dysza-przysłona wg pracy [200]

$$F_{ry} = \frac{16A_y (k_{vy} y)^2}{d_{DG}^2} P_p, \quad (3.39)$$

$$F_{ry} = \frac{16 \cdot \pi / 4 (1,65 \cdot 10^{-3})}{(1,5 \cdot 10^{-3})^2} (k_{vy} y)^2 = 15,1976 (k_{vy} y)^2 P_p. \quad (3.40)$$

Równania dynamiczne sił zaworu proporcjonalnego zostały opisane w dowolnej chwili stanu przejściowego po wprowadzeniu wymuszeniu skokowego:

Stopnia głównego:

$$F_{dx} = -F_{t1x} - F_{rx} - F_{s2x} - F_{Gx} + F_{s1x} - F_{s2x}. \quad (3.41)$$

Stopnia sterującego:

$$F_{dy} = -F_{t1y} - F_{ry} - F_{sy} - F_{isy} + F_{opy} - F_m. \quad (3.42)$$

Równanie pętli sprzężenia zwrotnego:

gdy: $U_z - U_p - e_0 < 0$,

$$\frac{du}{dt} = K_M \left[K_{p1} (U_z - U_p) + K_{p2} (U_z - U_p - e_0) \right], \quad (3.43)$$

gdy: $U_z - U_p + e_0 > 0$,

$$\frac{du}{dt} = K_M \left[K_{p1} (U_z - U_p) + K_{p2} (U_z - U_p + e_0) \right], \quad (3.44)$$

jeśli żaden z tych warunków nie jest spełniony, tzn.:

$$-e_0 < U_z - U_p < e_0,$$

to :

$$\frac{du}{dt} = K_M K_{p1} (U_z - U_p).$$

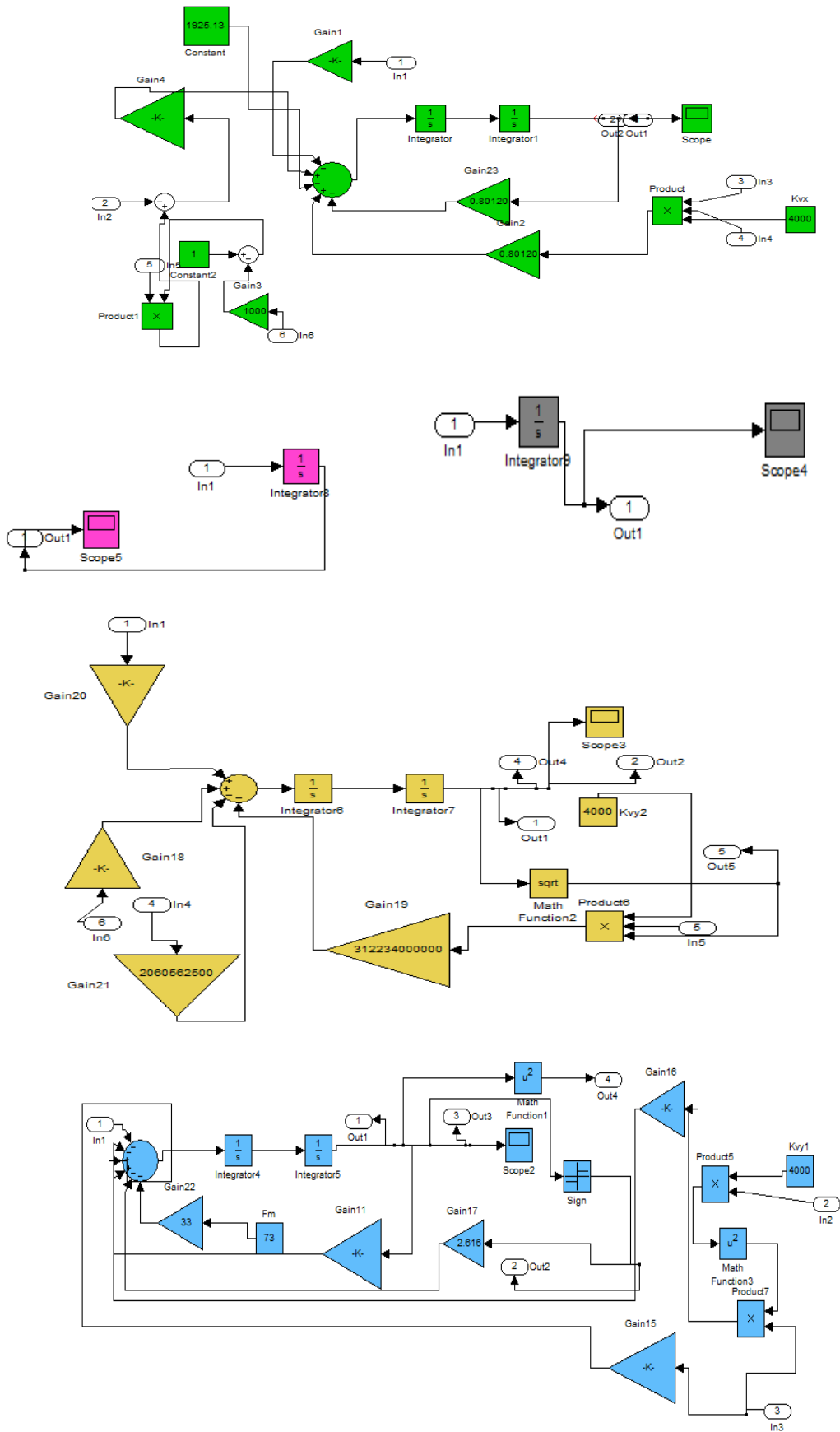
Równania wyjściowe do symulacji komputerowej:

Równania wyjściowe do przeprowadzenia symulacji działania części hydraulicznej wg pracy [199] są następującej postaci:

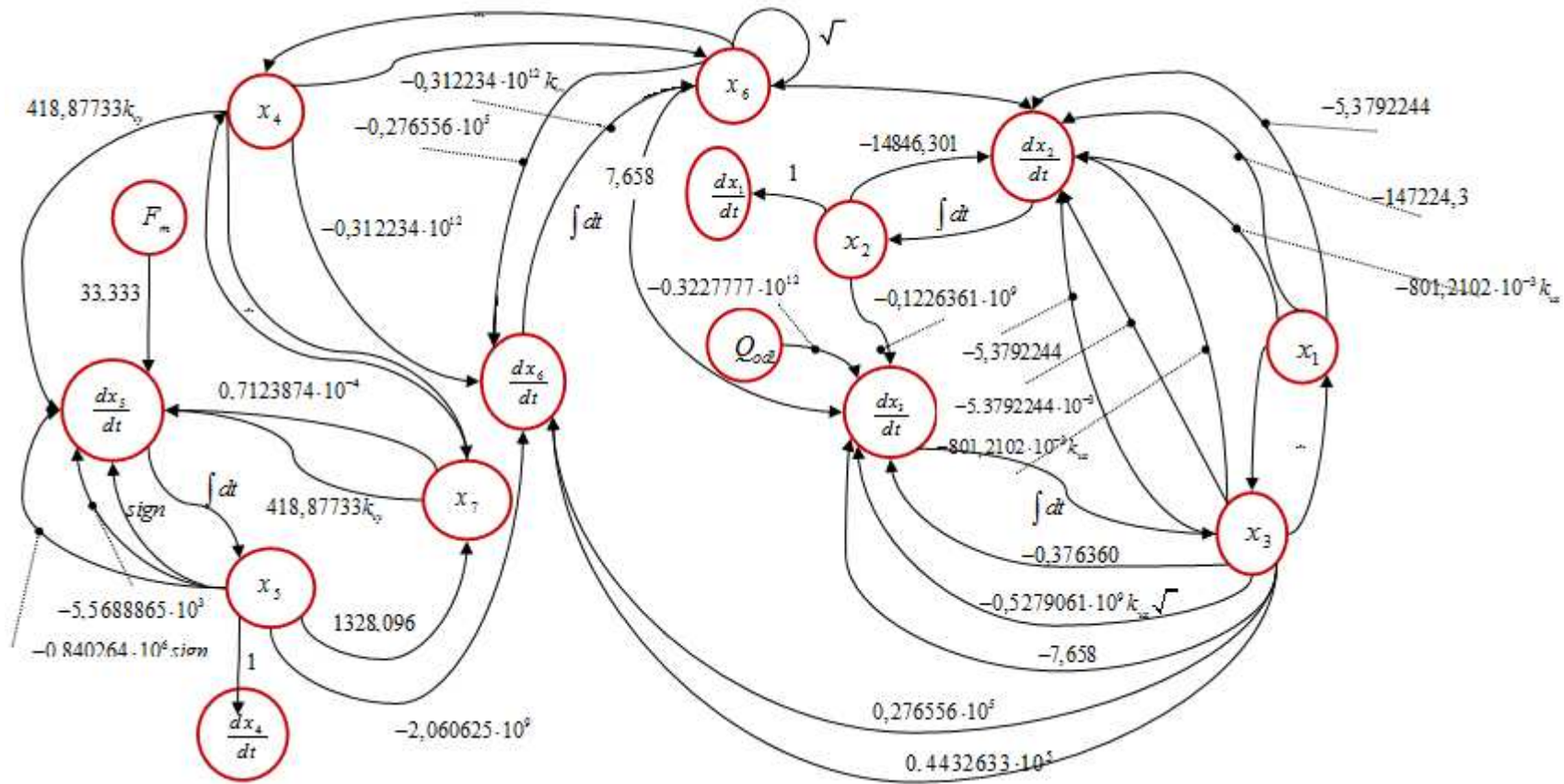
$$\left\{ \begin{array}{l} 1: \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ 2: \frac{dx_2}{dt} = -14846,301x_2 - 801,2102 \cdot 10^{-3} (k_{ix} x_1) x_3 - 147224,3x_1 - 1925,135 + 5,3792244 \cdot 10^{-3} [(1-10^3 x_1) x_3 - x_6], \\ 3: \frac{dx_3}{dt} = 0,2851216 \cdot 10^9 (1 - 1,32 \cdot 10^{-9} x_3) - 0,5279061 \cdot 10^9 (k_{ix} x_1) \sqrt{x_3} - 0,1226361 \cdot 10^9 x_2 - 7,65(x_3 - x_6) + \\ \quad - 0,3227777 \cdot 10^{12} Q_{\alpha b}, \\ 4: \frac{dx_4}{dt} = x_5, \\ 5: \frac{dx_5}{dt} = -5,5688865 \cdot 10^3 x_5 - 0,840264 \cdot 10^6 x_5^2 \operatorname{sign} x_5 + 0,7123874 \cdot 10^{-4} x_7 + 418,87733 (k_{iy} x_4)^2 x_7 + \\ \quad - 2,616 \operatorname{sign} x_5 - 33,33333 F_m, \\ 6: \frac{dx_6}{dt} = 0,276556 \cdot 10^5 (x_3 - x_6) - 0,312234 \cdot 10^{12} (k_{iy} x_4) \sqrt{x_6} + 0,4432633 \cdot 10^{12} x_3 - 2,060625 \cdot 10^9 x_5, \\ 7: x_7 = x_6 - 0,2025169 \cdot 10^6 (k_{iy} x_4) \sqrt{x_6} - 1328,096 x_5. \end{array} \right.$$

Równania wyjściowe do symulacji (1-7) zamodelowano w programie Matlab firmy MathWork (Rys. 3.45).

Równania wyjściowe działania części hydraulicznej opisano także grafem zależności przepływu sygnałów, przedstawionym na rysunku 3.46.



Rys. 3.45. Model graficzny równań w programie Matlab



Rys. 3.46. Graf przepływu sygnałów równań wyjściowych dla części hydraulicznej

Warunki początkowe równań różniczkowych wyznacza, się wprowadzając $\frac{dx_i}{dt} = 0$

Symulacji dokonano w pakiecie Matlab/Simulink

$$\begin{cases} -801,2102 \cdot 10^{-3} (k_{vx}, x_1) x_3 - 147224,3 x_1 - 1925,135 + 5,3792244 \cdot 10^{-3} [(1 - 10^3 x_1) x_3 - x_6] = 0, \\ 0,2851216 \cdot 10^9 (1 - 1,32 \cdot 10^{-9} x_3) - 0,5279061 \cdot 10^9 (k_{vx}, x_1) \sqrt{x_3} - 7,65(x_3 - x_6) - 0,3227777 \cdot 10^{12} Q_{odb} = 0, \\ 0,7123874 \cdot 10^{-4} x_7 + 418,87733 (k_{vy}, x_4)^2 x_7 - 33,33333 F_m = 0, \\ 0,276556 \cdot 10^5 (x_3 - x_6) - 0,312234 \cdot 10^{12} (k_{vy}, x_4) \sqrt{x_6} = 0, \\ x_7 = x_6 - 0,2025169 \cdot 10^6 (k_{vy}, x_4) \sqrt{x_6}. \end{cases}$$

Przyjmując

$$U_z = U_p = 1V,$$

Wyznacza się:

$$U_z = U_p = 1V,$$

$$Q_{odb} = 12 / 6 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

3.3.5. RANGA WAŻNOŚCI PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH I/LUB EKSPLOATACYJNYCH HYDRAULICZNEGO ZAWORU PROPORCJONALNEGO

W procesie optymalizacji zmienianymi parametrami zaworu proporcjonalnego jest wzmocnienie regulatora $K_{p1} \cdot K_{p2}$ (jako zmienna kompleksowa), natężenie przepływu odbiornika Q_{odb} (zależne od wymuszenia skokowego napięcia sterującego U_z) oraz siła magnetyczna F_m - przy obserwacji natężenia przepływu Q oraz ciśnienia p .

3.3.5.1. ZASTOSOWANIE WIELOWARTOŚCIOWYCH DRZEW LOGICZNYCH Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

Do analizy wybrano wartości arytmetyczne badanych parametrów, które zakodowano przez autora pracy logicznymi zmiennymi decyzyjnymi:

$$(K_{p1} \cdot K_{p2}) = 30 \sim 0; (K_{p1} \cdot K_{p2}) = 40 \sim 1; (K_{p1} \cdot K_{p2}) = 50 \sim 2; (K_{p1} \cdot K_{p2}) = 60 \sim 3.$$

$$F_m = 1,96 [N] \sim 0; F_m = 2,96 [N] \sim 1; F_m = 3,96 [N] \sim 2; F_m = 4,96 [N] \sim 3;$$

$$Q_{rz} = 36 \rightarrow 24 \quad [dm^3 / min] \quad \sim \quad 0; \quad Q_{rz} = 24 \rightarrow 12 \quad [dm^3 / min] \sim 1;$$

$$Q_{rz} = 36 \rightarrow 12 [dm^3 / min] \sim 2.$$

W działaniu zaworu przelewowego autor wprowadził ograniczenia na parametry konstrukcyjne Q oraz p z punktu widzenia czasu stabilizacji t_w : $t_w < 0,48t_o$. Następnie przeprowadzono obliczenia dynamiczne zaworu, w wyniku których w ograniczeniu t_w : $t_w < 0,48t_o$ selekcję przeszły 23 wykresy. Zmiany kodowe parametrów konstrukcyjnych K_{p1} , K_{p2} , Q_{rz} , F_m przedstawiono w tabeli 3.8.

Tab. 3.8. KAPN dla danych kodowych parametrów $K_{p1}K_{p2}$, Q_{rz} , F_m

F_m	$K_{p1}K_{p2}$	Q_{rz}
2	1	2
2	3	2
2	2	1
2	2	2
1	2	1
3	0	2
1	0	2
0	2	1
0	2	2
0	2	0
0	3	1
0	3	2
0	1	1
0	1	2
0	1	0
0	0	1
0	0	2
1	2	2
1	1	1
1	1	2
1	3	2
3	2	2
3	1	2
3	3	2
2	0	2

Następnie w zmianach kodowych parametrów konstrukcyjnych $K_{p1}K_{p2}$, Q_{rz} , F_m podobnie jak w przypadku zaworu przelewowego wprowadza się wielowartościowe współczynniki wagowe w_i , przy czym liczba wagowa jest tym większa, im funkcje Q oraz p szybciej osiągają stan stabilny, $w_i < w_j$, gdy $t_i > t_j$.

W ograniczeniu $t_w < 0,48t_o$ przyjęto następujące wartości współczynników wagowych:

- $w_i = 3$, $t_w \leq 0,16t_o$;
- $w_i = 2$, $0,16t_o < t_w \leq 0,32t_o$;
- $w_i = 1$, $0,32t_o < t_w \leq 0,48t_o$.



W tabeli 3.9 przedstawiono zmiany kodowe parametrów konstrukcyjnych $K_{p1}K_{p2}$, Q_{rz} , F_m z uwzględnieniem wielowartościowych współczynników wagowych oraz ograniczenia $t_w < 0,48t_o$.

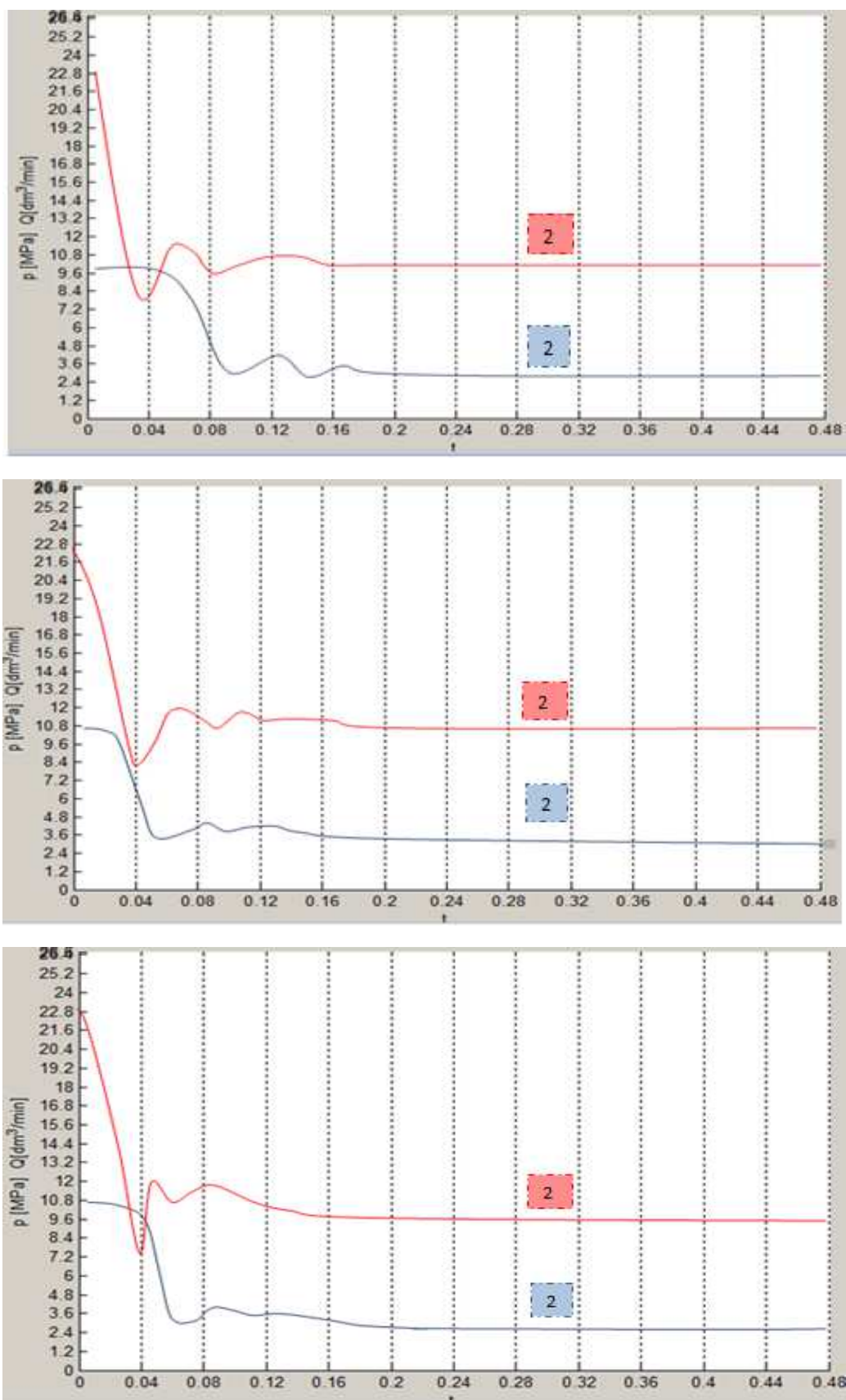
Tab. 3.9. KAPN danych kodowych parametrów $K_{p1}K_{p2}$, Q_{rz} , F_m z uwzględnieniem współczynników wagowych w_i

w_i	F_m	$K_{p1}K_{p2}$	Q_{rz}
2	2	1	2
2	2	3	2
2	2	2	1
2	2	2	2
2	1	2	1
3	3	0	2
1	1	0	2
2	0	2	1
1	0	2	2
2	0	2	0
3	0	3	1
2	0	3	2
3	0	1	1
1	0	1	2
3	0	1	0
2	0	0	1
1	0	0	2
1	1	2	2
2	1	1	2
1	1	3	2
1	3	2	2
1	3	1	2
3	3	3	2

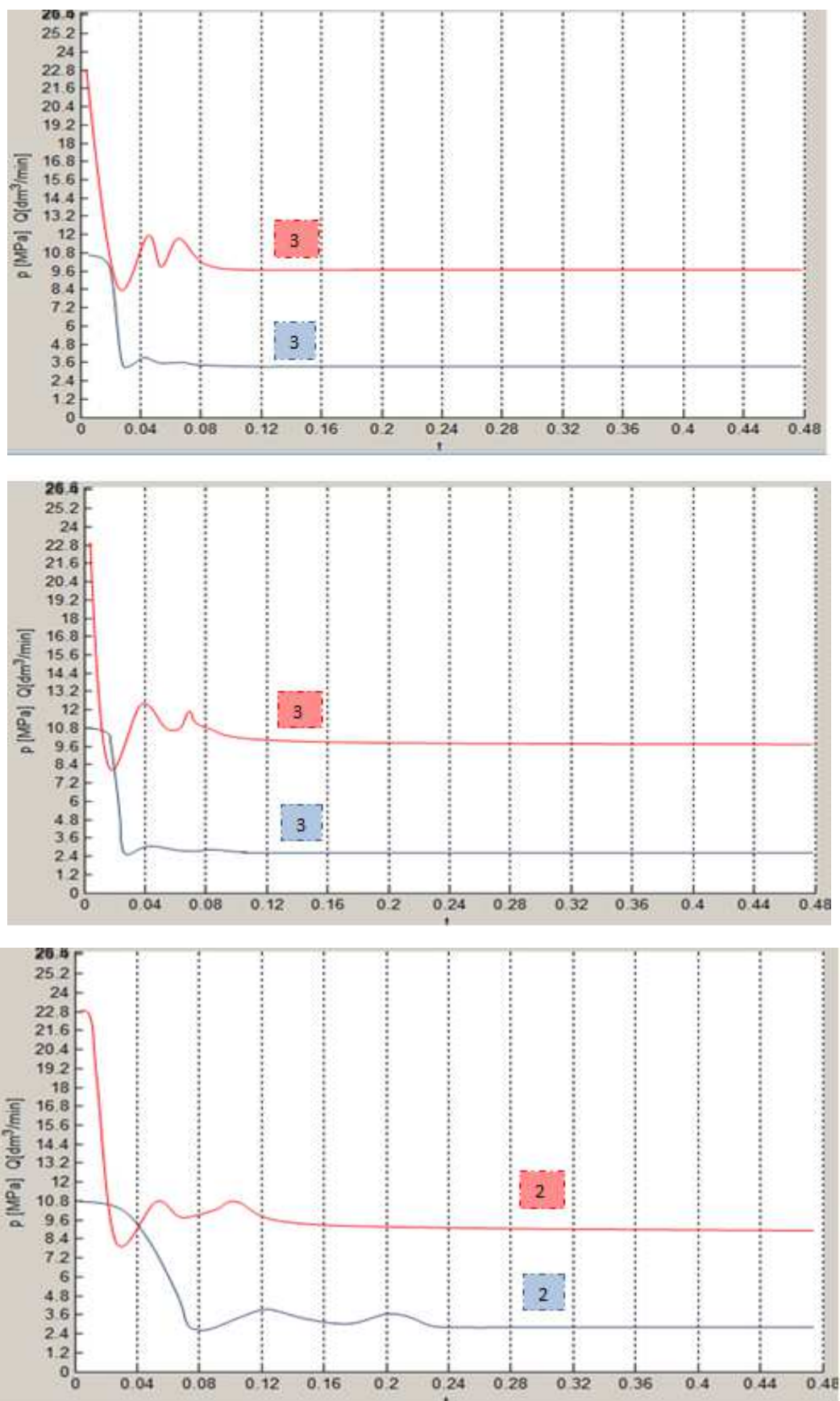
Należy zaznaczyć, że w tabeli 3.9, wartość współczynnika wagowego przy zmianach kodowych parametrów konstrukcyjnych $K_{p1}K_{p2}$, Q_{rz} , F_m jest minimalna, spośród współczynników określonych osobno w funkcji Q oraz p . W przypadku gdy jedna z funkcji stabilizuje się szybciej od drugiej, wtedy iloczynowi kanonicznemu dla tych samych zmian kodowych parametrów $K_{p1}K_{p2}$, Q_{rz} , F_m należy przypisać mniejszy współczynnik wagowy.

W układzie wielowartościowych funkcji logicznych ze współczynnikami wagowymi, przypisuje się osobno współczynniki wagowe dla każdej z funkcji [77].

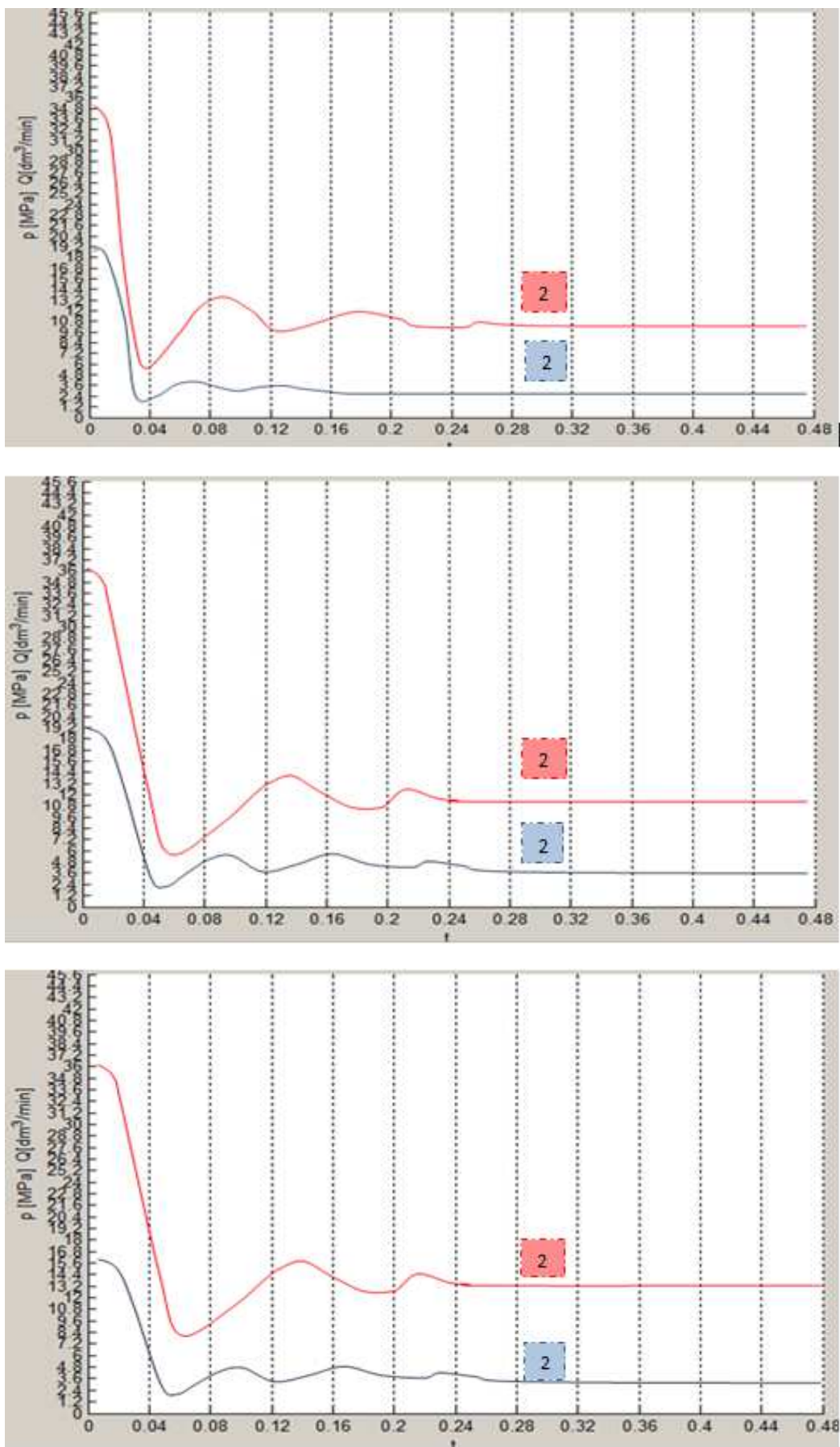
Na rysunkach 3.47- 3.54, przedstawiono opracowane przez autora przebiegi czasowe funkcji Q oraz p , z zaznaczonymi przedziałami współczynników wagowych w_i : p  oraz Q .



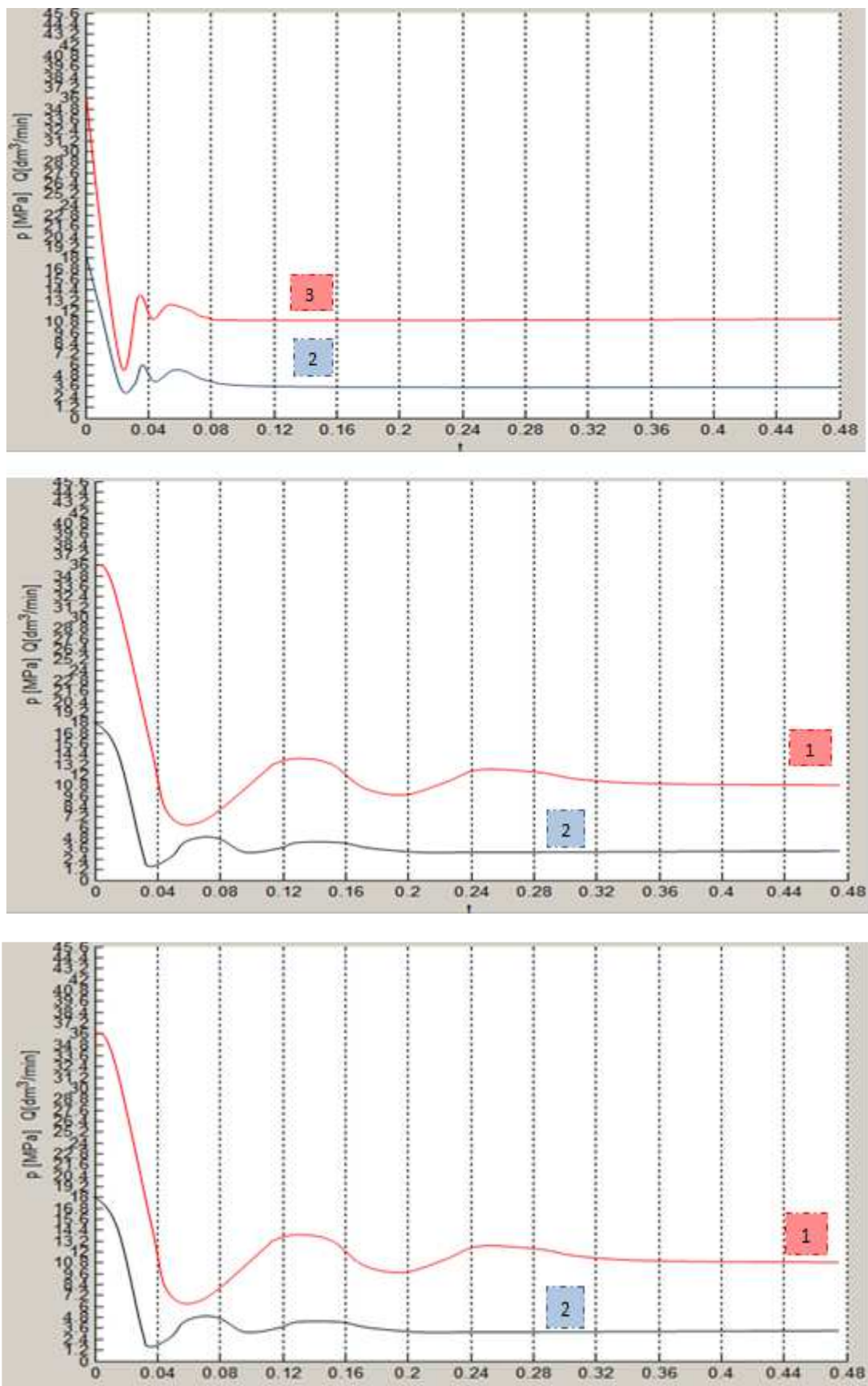
Rys. 3.47. Przebiegi czasowe Q, p kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
 $2(212), 2(211), 2(210)$



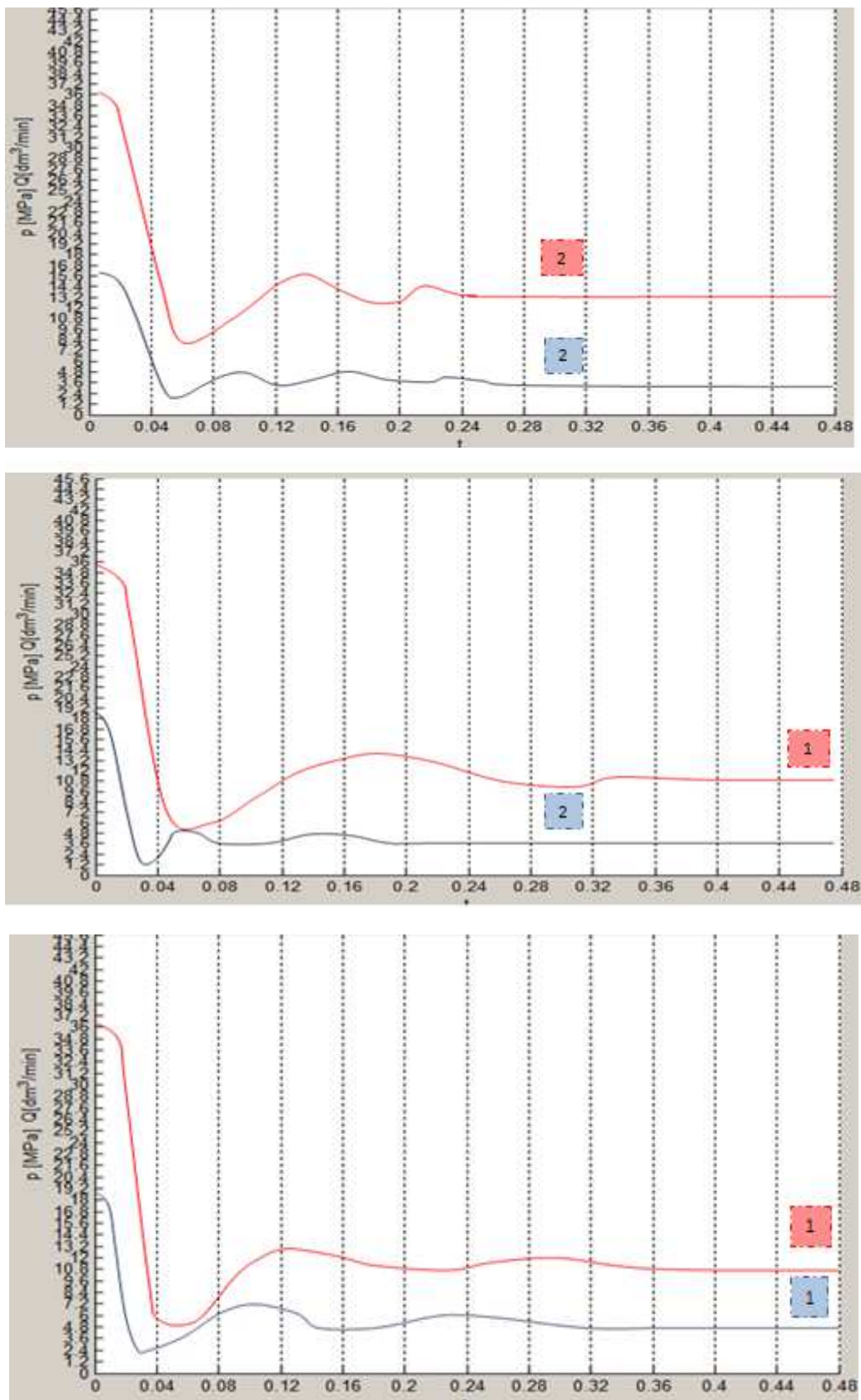
Rys. 3.48. Przebiegi czasowe Q, p kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
 3(310), 3(110), 2(010)



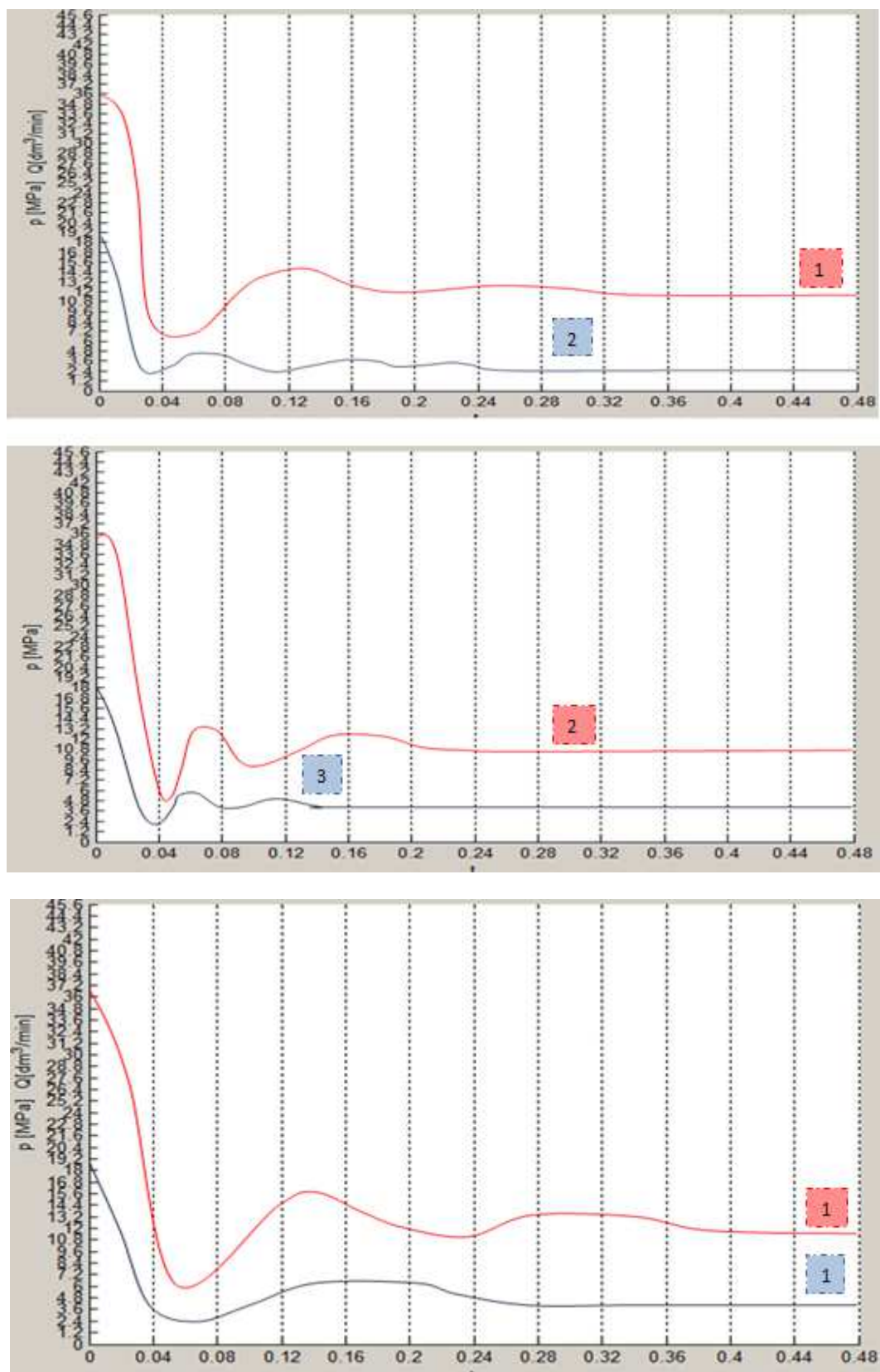
Rys. 3.49. Przebiegi czasowe Q, p kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
 $2(122), 2(322), 2(222)$



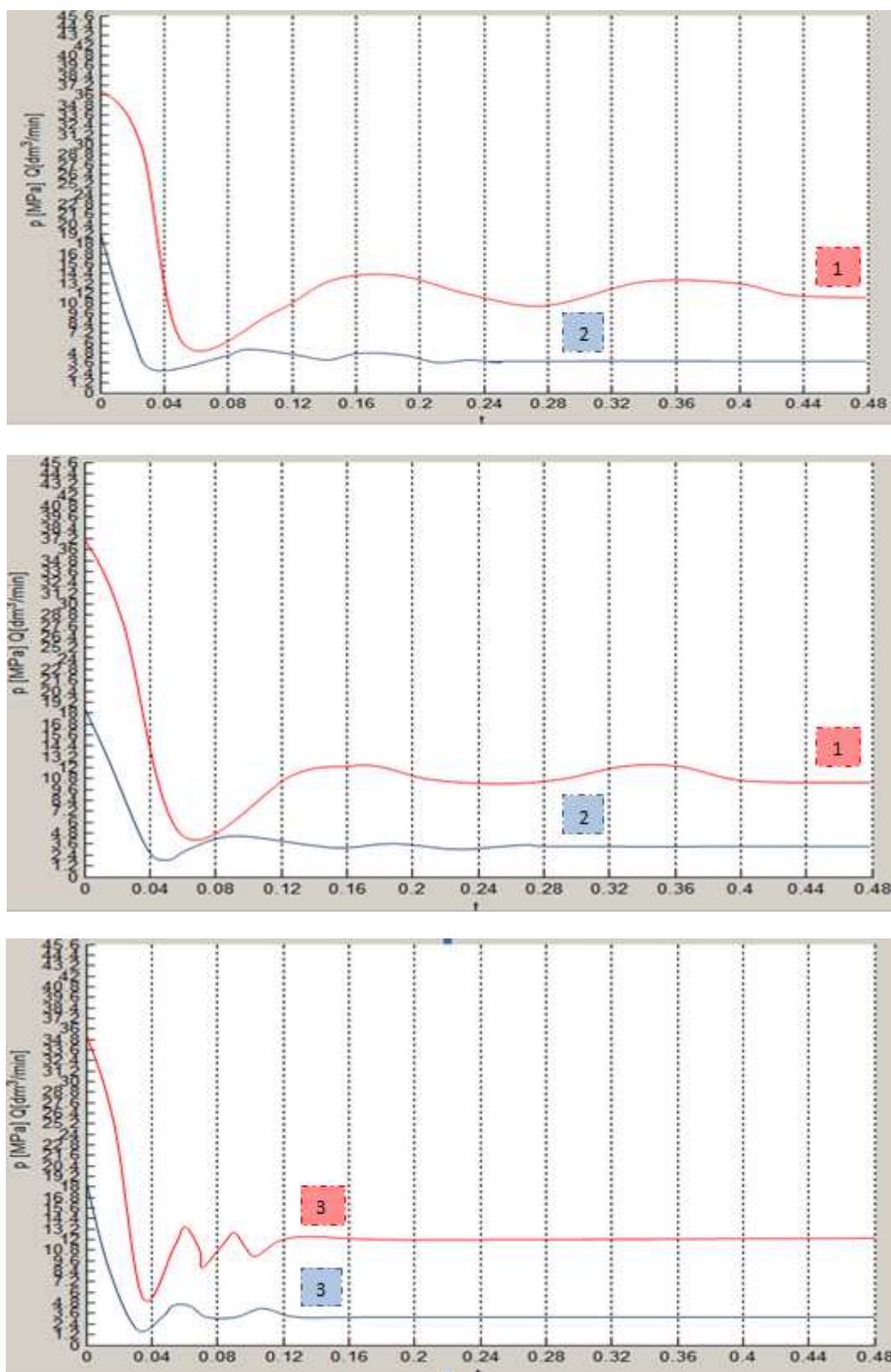
Rys. 3.50. Przebiegi czasowe Q, p dla kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
 3(023), 1(021), 1(220)



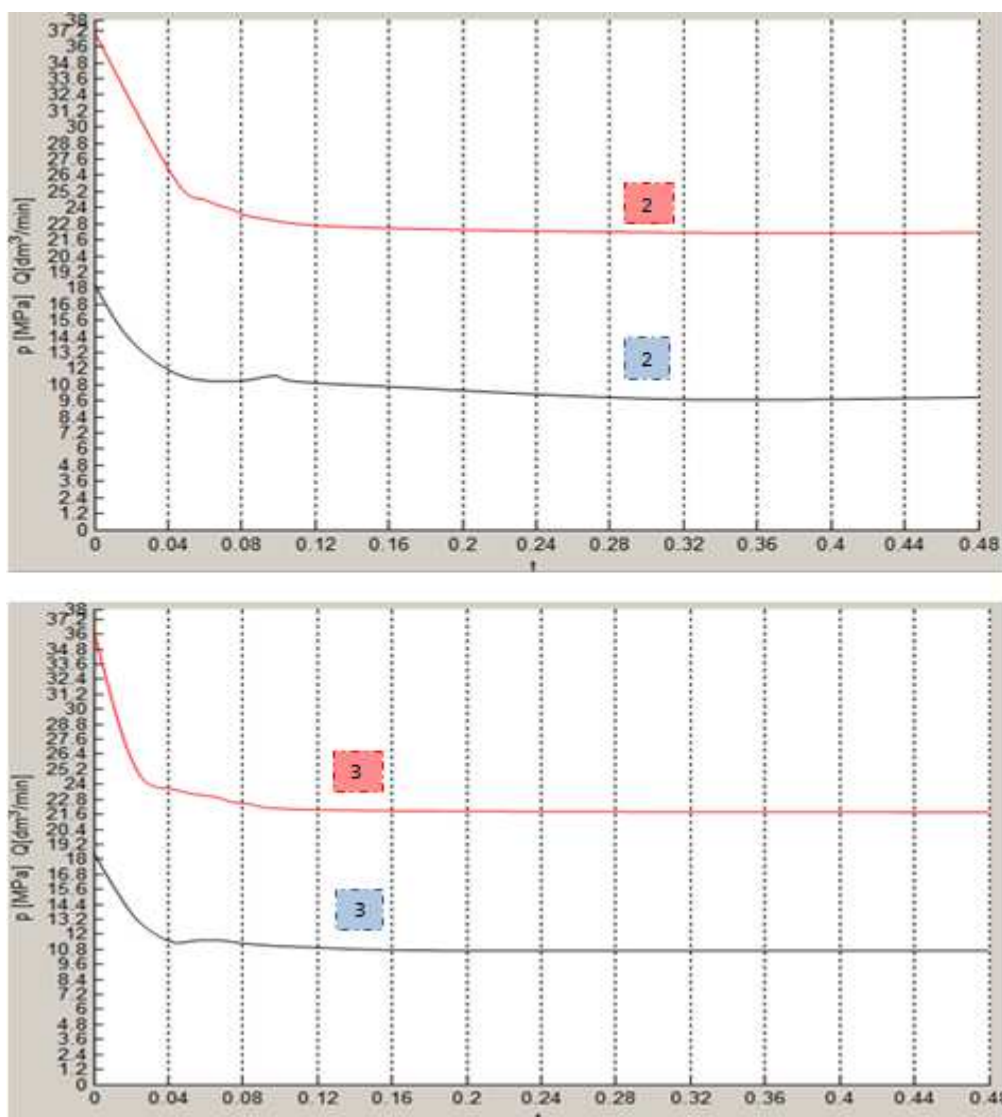
Rys. 3.51. Przebiegi czasowe Q, p kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
2(320), 1(120), 1(020)



Rys. 3.52. Przebiegi czasowe Q, p kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
1(221), 2(121), 1(321)

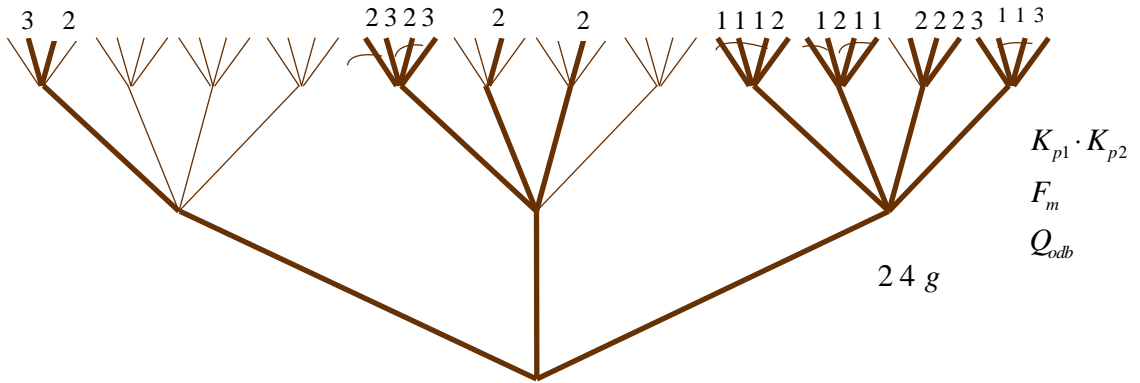


Rys. 3.53. Przebiegi czasowe Q , p kodowych zmian parametrów F_m , $K_{p1} \cdot K_{p2}$, Q_{rz}
 1(223), 1(123), 3(323)

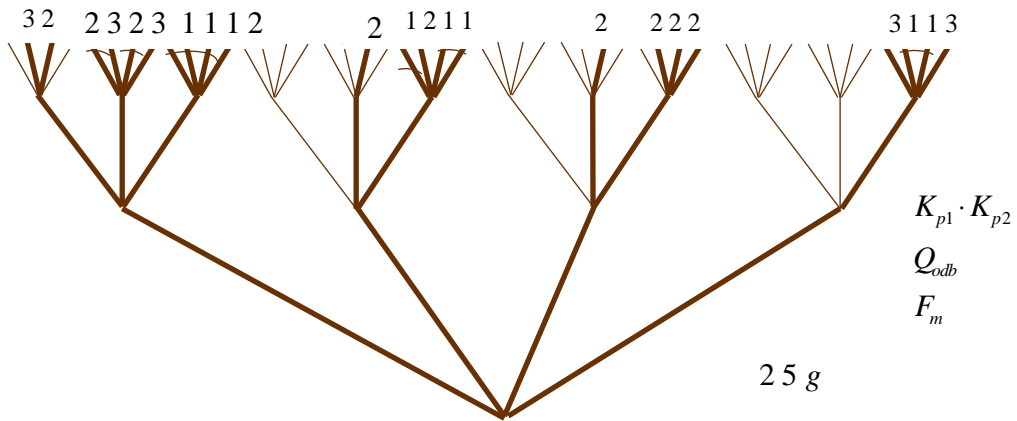


Rys. 3.54. Przebiegi czasowe Q, p kodowych zmian parametrów $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{rz}$
3(200), 3(100)

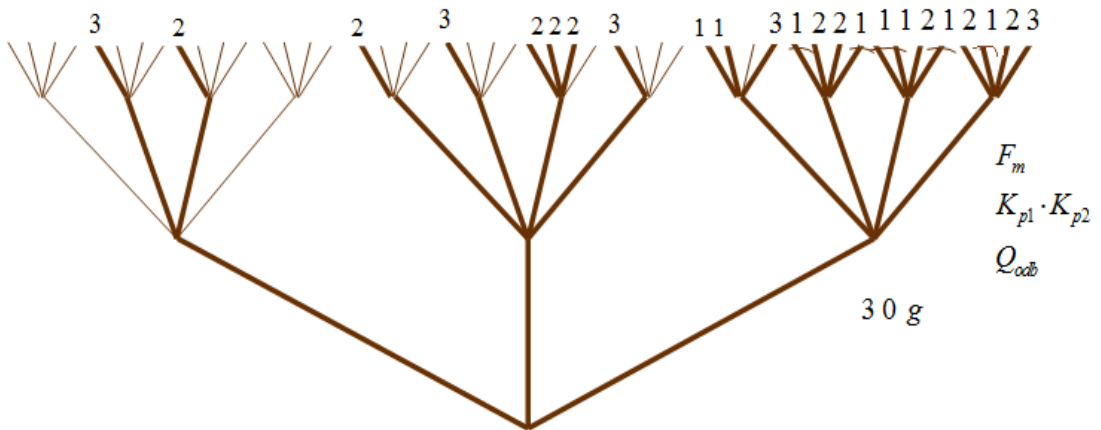
Wielowartościowe drzewa logiczne ze współczynnikami wagowymi z tabeli 3.9, przedstawiono na rysunkach 3.55- 3.60.



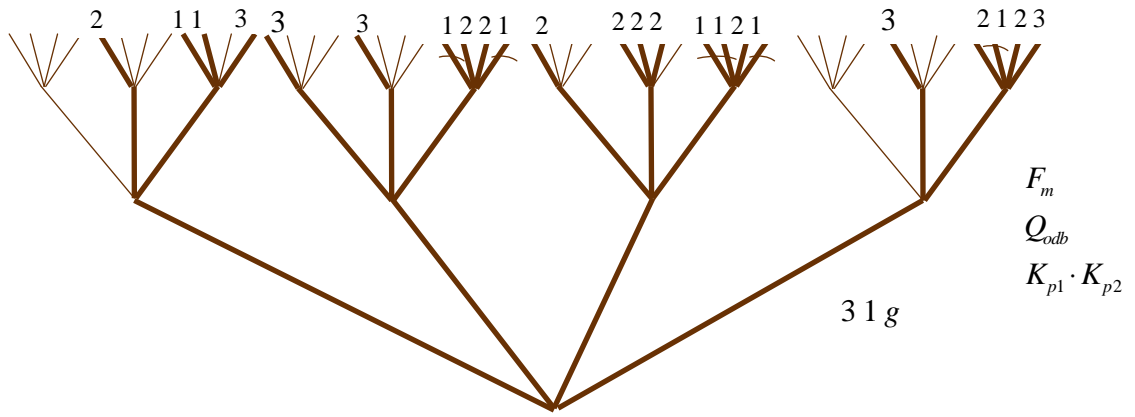
Rys. 3.55. Wielowartościowe drzewo logiczne - Q_{odb} , F_m , $K_{p1} \cdot K_{p2}$ Tab. 3.8



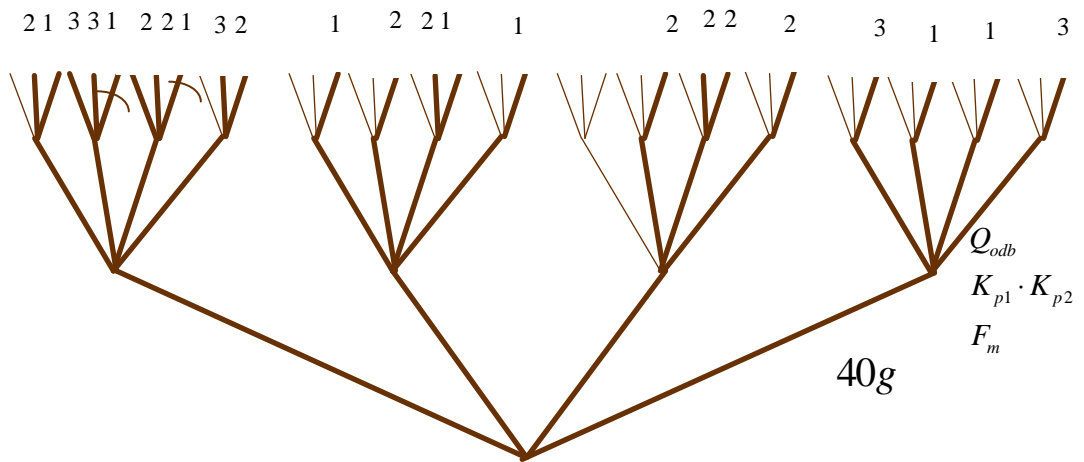
Rys. 3.56. Wielowartościowe drzewo logiczne - F_m , Q_{odb} , $K_{p1} \cdot K_{p2}$ Tab. 3.8



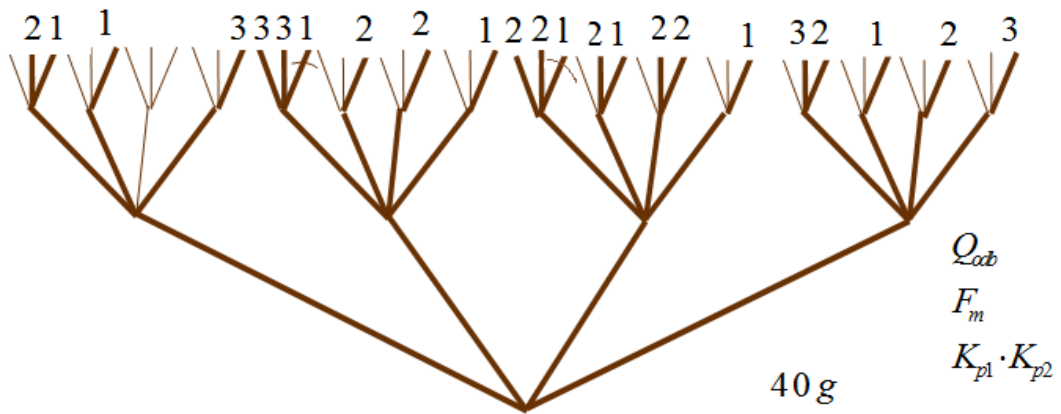
Rys. 3.57. Wielowartościowe drzewo logiczne - Q_{odb} , $K_{p1} \cdot K_{p2}$, F_m Tab. 3.8



Rys. 3.58. Wielowartościowe drzewo logiczne - $K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{odb}, F_m$ Tab. 3.8



Rys. 3.59. Wielowartościowe drzewo logiczne - $F_m, K_{p1} \cdot K_{p2}, Q_{odb}$, Tab. 3.8



Rys. 3.60. Wielowartościowe drzewo logiczne - $K_{p1} \cdot K_{p2}, F_m, Q_{odb}$, Tab. 3.8

Dla warunku kryterialnego ograniczenia $t_w < 0,48t_o$ istnieje jedno optymalne wielowartościowe drzewo logiczne przedstawione na rysunku 3.55. Dla hydraulicznego zaworu proporcjonalnego najważniejszym parametrem jest natężenie przepływu odbiornika Q_{odb} (zależne od wymuszenia skokowego napięcia sterującego U_z).

3.4. ANALIZA DECYZYJNA WYTYCZNYCH PROJEKTOWANIA BADANEGO UKŁADU W WARUNKACH NIEPEWNOŚCI

3.4.1. ROZŁĄCZNA ANALIZA LOGICZNA WYTYCZNYCH PROJEKTOWANIA NA PRZYKŁADZIE ZAWORU PRZELEWOWEGO

Działanie układu można rozpatrywać w aspekcie stabilności pojedynczych elementów, analizując pojedyncze funkcje zależne od czasu. Dlatego wprowadza się w modelowaniu układów maszynowych rozłączną analizę logiczną wytycznych projektowania [73].

Dodatkowo [53, 209] wprowadza się ograniczenia na parametry konstrukcyjne m , k i d , z punktu widzenia czasu stabilizacji t_w oraz stosunku wartości maksymalnej

funkcji do jej wartości po ustabilizowaniu $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} : t_w < 550t_o ; \frac{W_{\max}}{W_{\text{stab.}}} < 2,4$ przy

jednoczesnych przebiegach czasowych realizacji wzniosu x , ciśnienia p oraz natężenia przepływu Q . Otrzymuje się wówczas 25 wykresów ze zmianami kodowymi parametrów konstrukcyjnych m , k i d , zgodnie z tabelą 3.10 [73]. W tabeli 3.11 przedstawiono nieredukowalną alternatywną postać normalną NAPN funkcji logicznej z tabeli 3.10.

Tab. 3.10. KAPN i SAPN danych zmian wartości parametrów m , k i d

m	k	d	m	k	d	m	k	d
0	0	1	1	2	1	0	1	—
0	0	2	1	2	2	0	2	—
0	1	0	1	3	2	0	—	1
0	1	1	2	0	2	1	1	1
0	1	2	2	1	2	1	2	1
0	2	0	2	2	1	2	2	1
0	2	1	2	2	2	0	—	2
0	2	2	2	3	2	1	—	2
0	3	1	3	0	2	2	—	2
0	3	2	3	1	2	3	—	2
1	0	2	3	2	2			
1	1	1	3	3	2			
1	1	2						

Tab. 3.11. NAPN funkcji z Tab. 3.10

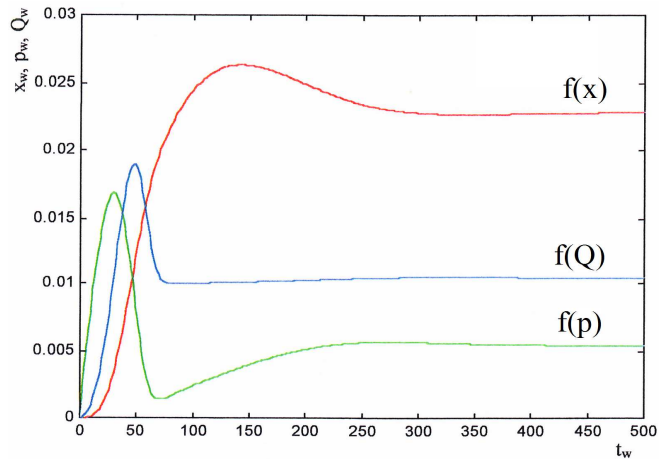
m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	
k	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	0	1	1	2	2	3	0	1	2	2	3	0	1	2	3	
d	1	2	0	1	2	0	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	
01-			*	*	*																					
02-						*	*	*																		
0-1	*			*			*		*																	
111												*														
121													*													
221																			*							
0-2		*			*			*		*																
1-2											*		*		*	*										
2-2																	*	*		*	*					
3-2																							*	*	*	*

Po zastosowaniu algorytmu Quine'a- McCluskeya [156] otrzymuje się NAPN i MAPN danej funkcji: $\{01- \wedge 02- \wedge 0-1 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 221 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 3-2\}$ [73]. Przykładowe wykresy przebiegu funkcji x , Q oraz p odpowiadające kodowym zmianom parametrów m, k, d (111) i (031, przedstawiono na rysunkach 3.61, 3.62.

Zmieniając wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych działanie całościowego układu może być niestabilne, przy stabilności pojedynczych parametrów. Właściwości każdej funkcji f_i ze zbioru funkcji f_n mogą być różne w zależności od czasu t , zatem prawidłowe jest przeprowadzenie rozłącznej analizy logicznej [73].

Zwiększając czas obserwacji do $t_w = 1000t_o$ przy $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$ niektóre przebiegi czasowe (wznios x , ciśnienie p lub natężenie przepływu Q) w dalszym ciągu spełniają warunek kryterialny: $t_w < 550t_o$; $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$ przy odpowiednich zmianach kodowych parametrów m, k i d .

Na rysunku 3.61 przedstawiono przebieg czasowy, gdzie tylko wielkość Q (przy zmianach kodowych $m=0, k=0, d=0$), spełnia warunek kryterialny.



Rys. 3.61. Charakterystyka pracy zaworu zmian kodowych 000 (tylko wielkość Q spełnia warunek kryterialny I)

Tabela 3.12 zawiera iloczyny kanoniczne opisujące zmiany kodowe parametrów, zapewniające spełnienie warunku $t_w < 550t_o$; $\frac{w_{max}}{w_{stab.}} < 2,4$ oddzielnie przez funkcję: x , p oraz Q w czasie obserwacji $t_w = 1000t_o$. W tabeli 3.13 przedstawiono SAPN funkcji $f(x)$, $f(Q)$ i $f(p)$ z tabeli 3.12, natomiast w tabelach 3.13- 3.15 NAPN funkcji $f(x)$, $f(Q)$ i $f(p)$ z tabeli 3.13.

Tab. 3.12. KAPN funkcji $f(x)$, $f(Q)$ i $f(p)$ danych zmian wartości parametrów m, k i d

$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$											
m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d
0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	2	1	0	0	1	1	1	2
0	0	1	1	2	1	0	0	1	1	2	2	0	0	2	1	2	1
0	0	2	1	2	2	0	0	2	1	3	2	0	1	0	1	2	2
0	1	0	1	3	2	0	1	0	2	0	1	0	1	1	1	3	2
0	1	1	2	0	2	0	1	1	2	1	1	0	1	2	2	0	2
0	1	2	2	1	2	0	1	2	2	0	2	0	2	0	2	1	2
0	2	0	2	2	1	0	2	0	2	1	2	0	2	1	2	2	1
0	2	1	2	2	2	0	2	1	2	2	1	0	2	2	2	2	2
0	2	2	2	3	2	0	2	2	2	2	2	0	3	1	2	3	2
0	3	1	3	0	2	0	3	1	2	3	2	0	3	2	3	0	2
0	3	2	3	1	2	0	3	2	3	0	2	1	0	1	3	1	2
1	0	2	3	2	2	1	0	0	3	1	2	1	0	2	3	2	2
1	1	1	3	3	2	1	0	1	3	2	2	1	1	1	3	3	2
						1	0	2	3	3	2						
						1	1	1	4	0	2						
						1	1	2	4	1	2						
									4	2	2						

Tab. 3.13. SAPN funkcji $f(x)$, $f(Q)$ i $f(p)$ Tabeli 3.11

$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$		
m	k	d	m	k	d	m	k	d
0	0	—	0	0	—	0	1	—
0	1	—	0	1	—	0	2	—
0	2	—	0	2	—	0	—	1
0	—	1	1	0	—	1	0	1
1	1	1	0	—	1	1	1	1
1	2	1	1	1	1	1	2	1
2	2	1	1	2	1	2	2	1
0	—	2	2	0	1	0	—	2
1	—	2	2	1	1	1	—	2
2	—	2	2	2	1	2	—	2
3	—	2	0	—	2	3	—	2
			1	—	2			
			2	—	2			
			3	—	2			
			—	0	2			
			—	2	2			
			—	1	2			

Tab. 3.14. NAPN funkcji $f(x)$ z Tab. 3.13

m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
k	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	0	1	1	2	2	3	0	1	2	2	3	0	1	2	3
d	0	1	2	0	1	2	0	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
00-	*	*	*																							
01-				*	*	*																				
02-							*	*	*																	
0-1		*			*			*	*																	
111													*													
121															*											
221																					*					
0-2			*		*			*	*																	
1-2												*	*		*	*										
2-2																	*	*		*	*					
3-2																							*	*	*	*

Po zastosowaniu algorytmu Quine'a - McCluskeya otrzymuje się MAPN funkcji $f(x)$: $\{00- \wedge 01- \wedge 02- \wedge 0-1 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 221 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 3-2\}$ [73].

Tab. 3.15. NAPN funkcji $f(p)$ z Tab. 3.12

m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	
k	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	0	0	1	1	2	2	3	0	1	2	2	3	0	1	2	3		
d	1	2	0	1	2	0	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	
01-			*	*	*																							
02-						*	*	*																				
0-1	*			*			*		*																			
101											*																	
111													*															
121														*														
221																						*						
0-2		*			*			*		*																		
1-2											*		*		*	*												
2-2																		*	*			*	*					
3-2																								*	*	*	*	

Po zastosowaniu algorytmu Quine'a - McCluskeya otrzymuje się MAPN funkcji $f(p)$: $\{01- \wedge 02- \wedge 0-1 \wedge 101 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 221 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 3-2\}$ [73].

Tab. 3.16. NAPN funkcji $f(Q)$ z Tab. 3.12

m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	
k	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	0	0	0	1	1	2	2	3	0	0	1	1	2	2	3	0	1	2	3	0	1	2	
d	0	1	2	0	1	2	0	1	2	1	2	0	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2		
m	k	d																																
00-	*	*	*																															
01-				*	*	*																												
02-						*	*	*																										
10-										*	*	*																						
0-1		*			*			*																										
111												*																						
121														*																				
201																		*																
211																			*															
221																						*												
0-2		*			*			*		*																								
1-2											*		*		*	*																		
2-2																		*		*		*	*											
3-2																										*	*	*	*					
-02		*									*							*				*				*					*			
-22						*							*								*			*			*			*			*	
-12					*						*							*				*			*		*			*			*	

Po zastosowaniu algorytmu Quine'a - McCluskeya otrzymuje się MAPN funkcji $f(Q)$:

$$\{00- \wedge 01- \wedge 02- \wedge 10- \wedge 0-1 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 201 \wedge 211 \wedge 221 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 3-2 \wedge -02 \wedge -12 \wedge -22\}[73].$$

W rozłącznej analizie wytycznych projektowania możliwe jest, szczegółowe zbadanie właściwości pojedynczych funkcji oraz ich wpływu na badanie rangi ważności parametrów konstrukcyjnych. Przy rygorystycznych warunkach działania zaworu otrzymuje się funkcję MAPN złożoną z 10 implikantów. Zwiększając czas obserwacji – powiększa się liczba iloczynów kanonicznych (jako wariantów realizowalnych) zmian kodowych m , k i d .

Liczba prawdziwych rozwiązań, każdej z funkcji ($f(p)$, $f(Q)$, $f(x)$), zależy od jej wpływu na zmiany warunków pracy. Czas stabilny później osiągniany jest przez funkcje o dużej podatności na zmiany parametrów konstrukcyjnych. Mała destabilizacja występuje w przypadku funkcji mniej podatnych na zmiany wytycznych projektowych. W rozpatrywanym przykładzie funkcja $f(Q)$ spełnia początkowe warunki kryterialne $t_w < 550t_o$; $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4$ przy większej liczbie zmian kodowych parametrów konstrukcyjnych m , k i d po zwiększeniu czasu obserwacji do $t_w = 1000t_o$.

W przypadku funkcji $f(p)$ i $f(x)$, warunki ograniczające po zwiększeniu czasu obserwacji do $t_w = 1000t_o$, spełniono tylko w przypadku pojedynczych iloczynów kanonicznych, jako prawdziwych wytycznych projektowania.

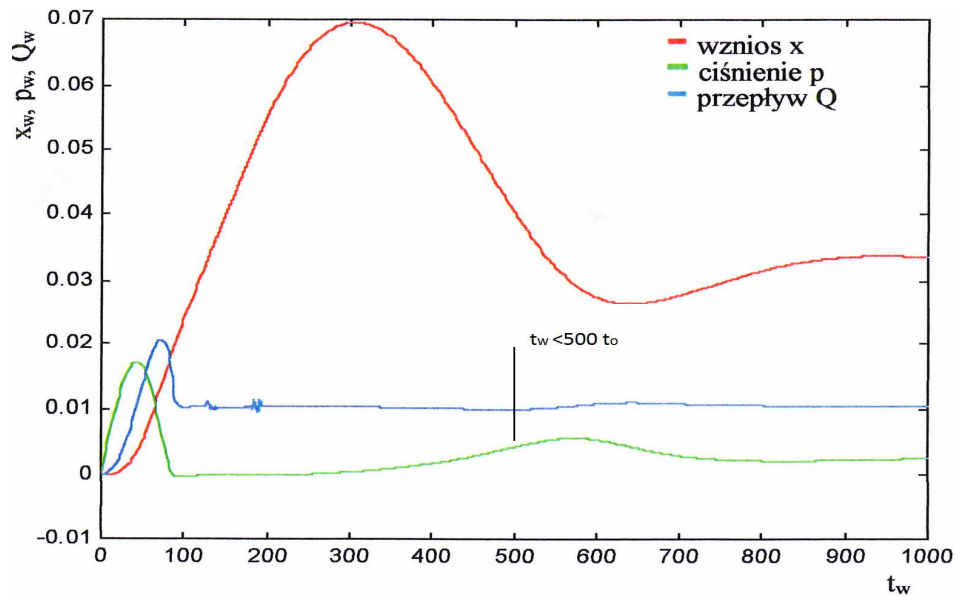
3.4.2. ANALIZA LOGICZNA WYTYCZNYCH PROJEKTOWANIA ZAWORU PRZELEWOWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM NIEPEWNOŚCI

Jeśli istnieje pewność spełnienia warunku kryterialnego tylko przez niektóre funkcje f_i ze zbioru funkcji f_n danego układu, to w optymalizacji uwzględnia się warunki niepewności [55].

Wprowadzając warunek kryterialny: **a)** $t_w < 1000t_o$; $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 3,6$ niektóre przebiegi czasowe (wznios x , ciśnienie p lub natężenie przepływu Q) są prawdziwe jednocześnie dla warunku kryterialnego: **b)** $t_w < 550t_o$; $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4$ (Tab. 3.11 rozdz. 3.4.1)- dla tych samych zmian kodowych parametrów m , k i d .

Na rysunku 3.62 przedstawiono przebiegi czasowe wielkości x , p i Q (przy zmianach kodowych $m=4$, $k=0$, $d=2$), gdzie wielkości p i x spełniają warunek kryterialny a) $t_w < 1000 t_o$, $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 3,6$, a tylko wielkość Q - warunek kryterialny b)

$$t_w < 500 t_o, \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4.$$



Rys. 3.62. Charakterystyka pracy zaworu dla zmian kodowych 402 (tylko wielkość Q spełnia warunek kryterialny $t_w < 500 t_o, \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 3,6$)

Z kolei na rysunku 3.63, warunek kryterialny **a)** spełniły tylko wielkości x i Q (ponieważ $\frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} > 2,4$ dla p), przy zmianach kodowych $m=0, k=0, d=0$.

Gdy warunek kryterialny nie jest spełniony przez wszystkie funkcje, to iloczyn kanoniczny zmian wartości kodowych parametrów nazywa się niepewnym i umieszcza w nawiasie „()” [55].

Pewne i niepewne kanoniczne iloczyny biorą udział w operacji sklejania.

W tabeli 3.16 przedstawiono pewne iloczyny kanoniczne przy kryterium ograniczającym **a)** $t_w < 500 t_o, \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 2,4$ oraz niepewne iloczyny kanoniczne (211), (201), (101), (422), (412), (000), (100), (402) opisujące zmiany kodowe, przy których w dalszym ciągu istnieje spełnienie warunku **a)** tylko przez pojedyncze przebiegi czasowe x, p lub Q , po zmianie na kryterium **b)** $t_w < 1000 t_o; \frac{w_{\max}}{w_{\text{stab.}}} < 3,6$.

Tab. 3.16. KAPN pewnych i niepewnych danych zmian wartości parametrów m, k i d

m	k	d	m	k	d
0	0	1	2	1	2
0	0	2	2	2	1
0	1	0	2	2	2
0	1	1	2	3	2
0	1	2	3	0	2
0	2	0	3	1	2
0	2	1	3	2	2
0	2	2	3	3	2
0	3	1	(2	1	1)
0	3	2	(2	0	1)
1	0	2	(1	0	1)
1	1	1	(4	2	2)
1	1	2	(4	1	2)
1	2	1	(0	0	0)
1	2	2	(1	0	0)
1	3	2	(4	0	2)
2	0	2			

W tabeli 3.17 przedstawiono SAPN funkcji z tabeli 3.16.

Tab. 3.17 SAPN funkcji z tabeli 3.16

m	k	d
0	0	—
0	1	—
0	2	—
1	0	—
0	—	1
1	1	1
1	2	1
2	0	1
2	1	1
2	2	1
0	—	2
1	—	2
2	—	2
3	—	2
—	0	2
—	2	2
—	1	2

Tab. 3.18. NAPN funkcji z tabeli 3.17

m	k	d	m	0	0	0	1	0	1	1	2	2	2	0	1	2	3	-	-	-
			k	0	1	2	0	-	1	2	0	1	2	-	-	-	-	0	2	1
			d	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
0	0	1	*					*												
0	0	2	*											*				*		
0	1	0		*																
0	1	1		*				*												
0	1	2		*										*						*
0	2	0			*															
0	2	1			*															
0	2	2			*									*						*
0	3	1						*												
0	3	2												*						
1	0	2					*								*			*		
1	1	1							*											
1	1	2													*					*
1	2	1								*										
1	2	2													*					*
1	3	2													*					
2	0	2														*		*		
2	1	2														*				*
2	2	1										*								
2	2	2														*				*
2	3	2														*				
3	0	2															*	*		
3	1	2															*			*
3	2	2															*			
3	3	2															*		*	
(2	1	1)																		
(2	0	1)																		
(1	0	1)																		
(4	2	2)																		
(4	1	2)																		
(0	0	0)																		
(1	0	0)																		
(2	0	2)																		

Po zastosowaniu algorytmu Quine’a- McCluskeya otrzymuje się MAPN danej funkcji logicznej z tabeli 3.18: $\{01-\wedge 02- \wedge 0-1 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 221 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 3-2\}$ [55].

Przy tworzeniu SAPN funkcji logicznej uwzględnia się niepewne iloczyny kanoniczne (211), (201), (101), (422), (412), (000), (100), (402), nie są natomiast one analizowane przy wyszukiwaniu implikantów pierwszych danej funkcji. W związku z

czym istnieją puste kolumny w iloczynach kanonicznych: 201 i 211 w tabeli 3.18 (NAPN danej funkcji). Zatem w zapisach iloczynów elementarnych: 00-; 10-; -02; -22; -12 (wcześniej sklejających się w SAPN funkcji z tabeli 3.17), z kreską na jednym miejscu dzięki niepewnym iloczynom kanonicznym, nie uwzględnia się w kolumnach (tabela 3.18) wszystkich możliwych gwiazdek (*). Uwzględniając niepewne zmiany kodowe, uzyskano większą liczbę iloczynów elementarnych w SAPN funkcji logicznej (Tab.3.17), jednak postać MAPN wielowartościowej funkcji z tabeli 3.18 jest równoważna MAPN z tabeli 3.10.

Właściwości każdej funkcji f_i ze zbioru funkcji f_n mogą być różne w zależności od czasu t , dlatego przy uwzględnianiu niepewności konieczne jest przeprowadzanie rozłącznej analizy logicznej wytycznych projektowania.

3.4.3. ROZŁĄCZNA ANALIZA LOGICZNA WYTYCZNYCH PROJEKTOWANIA ZAWORU PRZELEWOWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM NIEPEWNOŚCI

Gdyby zmniejszyć czas stabilizacji do $t_w < 200t_o$ przy stosunku wartości maksymalnej funkcji do jej wartości po ustabilizowaniu: $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$, dla x, p, Q , to zmiany kodowe parametrów konstrukcyjnych m, k i d przedstawiono w tabeli 3.19 [71].

Tab. 3.19. KAPN, SAPN i NAPN dla danych zmian wartości parametrów m, k i d .

m	k	d	m	k	d	m	k	d	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	2	2	3	0	1	1	2	2	3	0	1	2			
0	0	2	1	1	2	0	1	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
0	1	1	1	2	1	0	2	1																			
0	1	2	1	2	2	1	1	1			*																
0	2	1	1	3	2	1	—	2				*															
0	2	2	2	0	2	0	—	2								*											
0	3	2	2	1	2	1	2	1							*	*	*	*									
1	0	2	2	2	2	2	0	2		*		*	*	*													
						2	1	2											*								
						2	2	2																	*		
																											*

Przy zwiększeniu czasu obserwacji do $t_w = 1000t_o$ przy $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$, wyróżnia się oddzielną grupę prawdziwych iloczynów kanonicznych odpowiadających zmianom kodowych parametrów m, k i d , przy których przebiegi czasowe wzniosu x , ciśnienia p lub natężenia przepływu Q w dalszym ciągu spełniają warunek kryterialny: $t_w < 200t_o ; \frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$ [71].

Proces minimalizacji każdej z funkcji przeprowadza się osobno [71, 73].

Tabela 3.20 zawiera pewne iloczyny kanoniczne z tabeli 3.19 oraz niepewne iloczyny kanoniczne rozłącznych przebiegów czasowych x , p oraz Q .

Tab. 3.20. KAPN funkcji $f(x)$, $f(Q)$ i $f(p)$ danych zmian wartości parametrów m , k i d

$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$			$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$						
m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	
0	0	1	1	1	1	(0	0	0)	1	1	2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
0	0	2	1	1	2	0	0	1	1	2	1	0	0	2	1	1	2	1	1	2	
0	1	1	1	2	1	0	0	2	1	2	2	0	1	1	1	2	1	1	2	1	
0	1	2	1	2	2	(0	1	0)	1	3	2	0	1	2	1	2	2	1	2	2	
0	2	1	1	3	2	0	1	1	(2	0	1)	0	2	1	1	3	2	1	3	2	
0	2	2	2	0	2	0	1	2	2	0	2	0	2	2	2	0	2	2	0	2	
0	3	2	2	1	2	0	2	1	2	1	2	0	3	2	2	1	2	2	1	2	
1	0	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2	2	
						0	3	2	(3	0	2)										
						(1	0	0)	(3	1	2)										
						(1	0	1)	(4	0	2)										
						1	0	2	(4	1	2)										
						1	1	1													

Pewne i niepewne kanoniczne iloczyny odpowiednich funkcji biorą udział w operacji sklejania SAPN, nie są natomiast uwzględniane przy tworzeniu NAPN i MAPN danej funkcji [71]. W tabeli 3.21 przedstawiono SAPN funkcji $f(p)$, $f(Q)$ i $f(x)$ danych zmian parametrów m , k i d z tabeli 3.20.

Tab. 3.21. SAPN funkcji $f(x)$, $f(Q)$ i $f(p)$ danych zmian wartości parametrów m , k i d .

$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$		
m	k	d	m	k	d	m	k	d
0	0	1	0	0	—	0	0	1
0	1	1	0	1	—	0	1	1
0	2	1	1	0	—	0	2	1
1	1	1	0	2	1	1	1	1
1	—	2	1	—	2	1	—	2
0	—	2	0	—	2	0	—	2
1	2	1	1	1	1	1	2	1
2	0	2	1	2	1	2	0	2
2	1	2	2	0	1	2	1	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2
			—	0	2			
			—	1	2			

Tab 3.22. NAPN funkcji $f(Q)$ z tabeli 3.20

M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	4	4
K	0	0	0	1	1	1	2	2	3	0	0	0	1	1	2	2	3	0	0	1	2	0	1	0	1
D	0	1	2	0	1	2	1	2	2	0	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
00-	*	*																							
01-				*	*																				
10-											*														
021						*																			
1-2											*	*	*	*											
0-2		*			*	*	*	*																	
111											*														
121												*													
201													*												
222																					*				
-02		*									*							*							
-12				*								*						*							

Po zastosowaniu algorytmu Quine'a - McCluskeya, otrzymuje się SAPN funkcji $f(Q)$: $\{00- \wedge 01- \wedge 10- \wedge 021 \wedge 1-2 \wedge 0-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 222 \wedge -02 \wedge -12\}$ oraz NAPN i MAPN: $\{00- \wedge 01- \wedge 021 \wedge 1-2 \wedge 0-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 222 \wedge -02 \wedge -12\}$ [71].

Nie zwiększyła się liczba niepewnych iloczynów kanonicznych przebiegów czasowych $f(p)$ i $f(x)$ (tab. 3.20), NAPN i MAPN tych funkcji pozostaje bez zmian:

$$\{001 \wedge 011 \wedge 021 \wedge 111 \wedge 1-2 \wedge 0-2 \wedge 121 \wedge 202 \wedge 212 \wedge 222\}.$$

W przypadku, gdy czas stabilizacji $t_w < 300t_o$ przy $\frac{w_{\max}}{w_{stab}} < 2,4$ (jednoczesnych przebiegów czasowych realizacji wzniosu x , ciśnienia p oraz natężenia przepływu Q), wówczas otrzymuje się 20 wykresów prawdziwych [53, 55]. Zwiększając czas obserwacji do $t_w = 550t_o$ przy $\frac{w_{\max}}{w_{stab}} < 2,4$, w każdej z funkcji ($f(p)$, $f(Q)$, $f(x)$) zwiększa się zbiór realizowalnych iloczynów kanonicznych (wytycznych projektowania) o jeden niepewny iloczyn kanoniczny. W tabeli 3.23 przedstawiono zbiór pewnych i niepewnych iloczynów kanonicznych przebiegów czasowych $f(p)$, $f(Q)$ i $f(x)$.

Tab. 3.23. KAPN funkcji $f(x), f(Q)$ i $f(p)$ danych zmian wartości parametrów m, k i d

$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$			$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$		
m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d	m	k	d
0	0	1	1	1	2	0	0	1	1	1	2	0	0	1	1	1	2
0	0	2	1	2	1	0	0	2	1	2	1	0	0	2	1	2	1
0	1	0	1	2	2	0	1	0	1	2	2	0	1	0	1	2	2
0	1	1	1	3	2	0	1	1	1	3	2	0	1	1	1	3	2
0	1	2	2	0	2	0	1	2	2	0	2	0	1	2	2	0	2
0	2	1	2	1	2	0	2	1	2	1	2	0	2	1	2	1	2
0	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2
0	3	1	(2	3	2)	0	3	1	(3	0	2)	0	3	1	(2	3	2)
0	3	2	3	2	2	0	3	2	3	2	2	0	3	2	3	2	2
1	0	2	3	1	2	1	0	2	3	1	2	1	0	2	3	1	2
1	1	1				1	1	1				1	1	1			

W tabeli 3.24 przedstawiono SAPN funkcji $f(p), f(Q)$ i $f(x)$ danych zmian parametrów m, k i d z tabeli 3.22.

Tab. 3.24. SAPN funkcji $f(x), f(Q)$ i $f(p)$ danych zmian wartości parametrów m, k i d .

$f(x)$			$f(Q)$			$f(p)$		
m	k	d	m	k	d	m	k	d
0	1	—	0	1	—	0	1	—
0	—	1	0	—	1	0	—	1
0	—	2	0	—	2	0	—	2
1	—	2	1	—	2	1	—	2
2	—	2	1	1	1	2	—	2
1	1	1	1	2	1	1	1	1
1	2	1	—	1	2	1	2	1
—	1	2	—	2	2	—	1	2
—	2	2	—	0	2	—	2	2

Tab. 3.25. NAPN funkcji $f(Q)$ z tabeli 3.24.

m	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
k	0	0	1	1	1	2	2	3	3	0	1	1	2	2	3	0	1	2	2	1	0
d	1	2	0	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
01-			*	*	*																
0-1	*			*		*	*														
0-2	*			*		*	*														
1-2									*		*		*	*							
111										*											
121												*									
-12				*							*				*			*		*	
-22						*							*			*	*				
-02	*								*						*						

Stosując algorytm Quine'a- McCluskeya w przypadku:

- funkcji $f(Q)$, otrzymano NAPN i MAPN: $\{01- \wedge 0-1 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge -12 \wedge -22 \wedge -02\}$ zgodnie z tabelą 3.25.
- funkcji $f(x)$ i $f(p)$: NAPN i MAPN: $\{01- \wedge 0-1 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge -12 \wedge -22\}$ zgodnie z tabelą 3.26.

Tab. 3.26. NAPN funkcji $f(x)$ i $f(p)$ z tabeli 3.24.

m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3
k	0	0	1	1	1	2	2	3	3	0	1	1	2	2	3	0	1	2	3	2	1
d	1	2	0	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
01-			*	*	*																
0-1	*			*		*	*														
0-2		*			*	*	*														
1-2									*	*	*	*									
2-2															*	*	*				
111										*											
121											*										
-12				*						*					*						*
-22						*						*				*				*	*

Jeśli w tabeli 3.23 uwzględnić tylko prawdziwe iloczyny kanoniczne, które są pewne (bez nawiasów), wówczas po operacji sklejania i pochłaniania elementarnego wszystkich funkcji ($f(p)$, $f(Q)$, $f(x)$) uzyskuje się tylko jedną NAPN i MAPN: $\{0-1 \wedge 0-2 \wedge 01- \wedge 1-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 202 \wedge -12 \wedge -22\}$.

Wartości kodowe parametrów konstrukcyjnych określone przez niepewne iloczyny kanoniczne oceniają, czy dany parametr eksploatacyjny może spełniać kryterialne warunki pracy (zachowanie danej funkcji nie jest w pełni określone). W analizowanym przykładzie pracy zaworu przelewowego przy warunku kryterialnym:

$$t_w < 200t_o; \frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4, \text{ istnieje 10 najważniejszych wytycznych projektowania}$$

$\{001 \wedge 011 \wedge 021 \wedge 111 \wedge 1-2 \wedge 0-2 \wedge 121 \wedge 202 \wedge 212 \wedge 222\}$. Zmiana czasu obserwacji do $t_w = 1000t_o$ przy $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$ zwiększa liczbę niepewnych iloczynów

kanonicznych tylko w przypadku funkcji $f(Q)$. W ostateczności otrzymuje się także 10 najważniejszych wytycznych projektowania $\{00- \wedge 01- \wedge 021 \wedge 1-2 \wedge 0-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 222 \wedge -02 \wedge -12\}$. W warunku kryterialnym $t_w < 300t_o$ przy $\frac{W_{\max}}{W_{\text{stab}}} < 2,4$ istnieją

najważniejsze wytyczne projektowania: $\{0-1 \wedge 0-2 \wedge 01- \wedge 1-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge 202 \wedge -12 \wedge -22\}$. Po uwzględnieniu kanonicznych iloczynów niepewnych i rozłącznej analizy logicznej, istnieją najważniejsze wytyczne projektowania w przypadku funkcji $f(Q)$: $\{01- \wedge 0-1 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge -12 \wedge -22 \wedge -02\}$ oraz funkcji $f(x)$ i $f(p)$: $\{01- \wedge 0-1 \wedge 0-2 \wedge 1-2 \wedge 2-2 \wedge 111 \wedge 121 \wedge -12 \wedge -22\}$. Rozłączna analiza logiczna wytycznych projektowania umożliwia, dokładniejsze badanie złożonej dynamiki systemów przepływowych, charakteryzującej się zmiennością właściwości i związków

badanych funkcji f_n .

ROZDZIAŁ 4

DRZEWA DECYZYJNE W UCZENIU MASZYNOWYM

W wyniku rozwoju technik informatycznych, zwiększa się liczba i możliwości stosowanych w praktyce metod optymalizacyjnych oraz systemów wspomaganie decyzji. W procesie decyzyjnym w głównej mierze korzysta się z odpowiednich metod i technik decyzyjnych, prowadzących do rozwiązania danego problemu decyzyjnego wskazując najważniejsze możliwe warianty działania. W całościowym procesie innowacyjnym uwzględnia się nie tylko końcowy rezultat określonego zadania technicznego, ale również szereg decyzji, poprzedzającej jego powstanie. Istnieje szeroki zakres badań dotyczących opracowań metodyki wspomaganie procesów podejmowania decyzji i sterowania w systemach o różnej skali złożoności. Wykorzystanie odpowiedniego narzędzia, opisującego proces decyzyjny, jest niezbędne zarówno w tworzeniu wiedzy o potrzebach przedsiębiorstwa jak i w określeniu wytycznych konstrukcyjnych dla projektanta. W przypadku drzew indukcyjnych, związanych z regułową reprezentacją wiedzy w uczeniu maszynowym, zbiór analizowanych danych najczęściej reprezentowany jest w postaci tablic informacyjnych lub zapisu w logice pierwszego rzędu. Gdyby z kolei proces projektowania na etapie doboru wartości liczbowych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych w modelu matematycznym przetłumaczyć na graf zależności, wtedy drzewa rozgrywające parametrycznie mogą odgrywać rolę algorytmów opisujących kolejność zmian wartości liczbowych i sprawdzanie otrzymanych wyników.

W rozdziale w wybranych przykładach konstrukcyjnych wygenerowano indukcyjne drzewa decyzyjne systemu DeTreeX. Następnie zastosowano wielowartościowe drzewa logiczne. Porównano proces klasyfikacji i predykcji oraz ocenę rangi ważności zmiennych decyzyjnych przy użyciu obu struktur graficznych.

4.1. POZYSKIWANIE WIEDZY W UCZENIU MASZYNOWYM

Pozyskiwanie wiedzy (ang. *knowledge acquisition*) jest ściśle związane z uczeniem maszynowym, i rozumiane jest jako pozyskiwanie informacji symbolicznej z efektywnym wykorzystaniem wiedzy. W przypadku odkrywania wiedzy z danych, informacja dotycząca zachowania się danych zmiennych decyzyjnych pełni funkcję przykładów [37]. Proces budowy reprezentacji wiedzy o klasyfikowaniu, np. w postaci reguł lub drzew decyzyjnych, uwzględnia także fazę testowania, gdzie reguły weryfikowane są na zbiorze przykładów testowych. Często zbiór analizowanych danych (przykładów uczących) zapisywany jest w logice pierwszego rzędu [168, 191]. Funkcje odwzorowujące przykłady na odpowiedni zbiór pojęć mogą być poszukiwane wieloma metodami m in. [9, 142, 207].

Istnieje duża liczba dotychczasowych badań, dotyczących uczenia maszynowego i odkrywania wiedzy, tworzenia i eksperymentalnej oceny

pojedynczych uczących się algorytmów [38, 97, 118, 203, 206]. W czasie ostatnich lat wzrosło zainteresowanie tworzeniem nowych systemów klasyfikujących. Idea taka polega na integracji wielu pojedynczych algorytmów uczenia się, w celu otrzymania lepszej trafności klasyfikacji, aniżeli użycie oddzielnie pojedynczych klasyfikatorów.

Według badań eksperymentalnych na obiektach technicznych dostępnych w literaturze nie ma jednego typu metod klasyfikacji informacji i metod wspomagania decyzji. W pracach [147, 148] zaprezentowano teorię zbiorów przybliżonych, o wysokiej skuteczności klasyfikacyjnej, do analizy stanu technicznego łożysk. Z kolei praca [216] dotyczy oceny stanu technicznego autobusów określonego typu. Decyzja o dalszym eksploataowaniu pojazdu, podejmowana jest na podstawie wyników okresowych przeglądów. Inne prace przedstawiają zastosowanie metod klasyfikacji do analizy danych finansowych [182, 192].

W rozważanych problemach technicznych jedną z metod klasyfikacji informacji i wspomagania decyzji jest metoda indukcyjnego generowania reguł za pomocą drzew decyzyjnych. W indukcji do ustalenia najbardziej znaczącego atrybutu, wykorzystywana jest miara entropii. Indukcyjne drzewa decyzyjne mogą być porównane w procesie klasyfikacji, predykcji i wyznaczania rangi ważności zmiennych decyzyjnych z wielowartościowymi drzewami logicznymi [51, 74].

W szerszym znaczeniu można wykazać, że indukcyjne drzewa decyzyjne są szczególnym przypadkiem zmodyfikowanych struktur drzewiastych. Takie podejście zaprezentowano w pracach [51, 74].

4.1.1. INDUKCYJNE DRZEWA DECYZYJNE

Jednym z przykładów pozyskiwania wiedzy w sposób indukcyjny jest generowanie reguł za pomocą drzew decyzyjnych [205]. W generowaniu indukcyjnych drzew decyzyjnych, przeprowadza się serie testów wykonanych w określonej kolejności, gdzie próbki danych w wyniku każdego kolejnego testu, rozdzielane są na podgrupy o większej „czystości”, tzn. zawierające coraz więcej próbek z danej tylko klasy. Kryterium umożliwiającym wybór atrybutu stosowanego do rozbudowy drzewa jest entropia, jako pewna miara informacji zawartej w zjawisku, które w przypadkowy sposób może przyjmować n -stany. Oznacza więc także wartość średnią ilości informacji, niezbędnej do zapewnienia faktu, że danemu zjawisku przyporządkowany będzie jeden spośród n dostępnych stanów.

$$E = \sum_{i=0}^{n-1} (-p_i \log_2 p_i), \quad (4.1)$$

gdzie:

p_i - jest prawdopodobieństwem pojawienia się i -tego elementu zbioru

W problemach indukcji drzew decyzyjnych entropia wyznacza najbardziej znaczący atrybut.

Informacja w zbiorze przykładów uczących jest równa:

$$I(E) = - \sum_{i=1}^{|E|} \frac{|E_i|}{|E|} \cdot \log_2 \left(\frac{|E_i|}{|E|} \right), \quad (4.2)$$

gdzie:

- E - zbiór przykładów uczących
- $|E_i|$ - liczba przykładów i -tego obiektu,
- $|E|$ - liczba przykładów w zbiorze uczącym E .

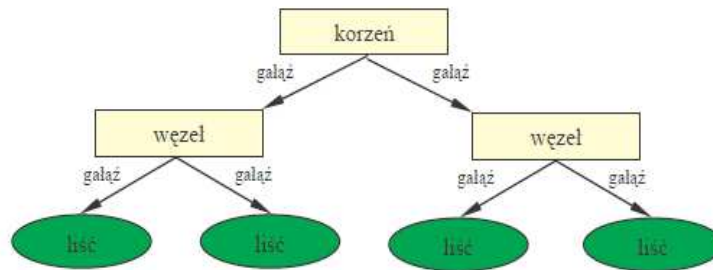
Oczekiwana wartość informacji, po podziale zbioru przykładów E na podzbiory $E^{(m)}, m=1, \dots, |V_a|$, w których atrybut a ma wartość v_m , określona jest jako [203, 204, 205]:

$$I(E, a) = \sum_{m=1, K, |V_a|, E^{(m)}=\emptyset} \frac{|E^{(m)}|}{|E|} \cdot I(E^{(m)}), \quad (4.3)$$

gdzie:

- $|E^{(m)}|$ - liczba przykładów po podziale zbioru E względem wartości m danego atrybutu,
- $|E|$ - liczba przykładów w zbiorze uczącym E .

Indukcyjne drzewo określa rangę ważności atrybutu od najważniejszego umieszczonego w korzeniu, poprzez zaklasyfikowanie dowolnego przykładu. [204]. Graficzną prezentację struktury drzewa decyzyjnego przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Graficzna prezentacja struktury drzewa decyzyjnego

Przy wyborze testu zależy nam na ogół na tym, aby uzyskać proste drzewo. Najczęściej stosowane kryterium wyboru testu ma charakter teorii informacji. Zgodnie z nim wybiera się test, którego zastosowanie dla aktualnego zbioru przykładów daje największy przyrost informacji. Nieformalnie, oznacza to preferowanie takiego testu, który wyznacza podział zbioru przykładów E na podzbiory jak najbardziej jednolite pod względem wartości decyzji.

Obserwując konkretne implementacje algorytmów tworzenia drzew decyzyjnych można podzielić funkcje „oceniające” na trzy podstawowe grupy:

1. Funkcje mierzące różnicę między zbiorem E (przykładów), a zbiorami, na jakie dzieli się ten zbiór wg wartości ocenianego atrybutu ze względu na rozkład częstości klas-decyzji.
2. Funkcje mierzące różnicę między poszczególnymi podzbiorymi zbioru E (utworzonymi na podstawie wartości „oceniającego” atrybutu), ze względu na rozkład częstości klas-decyzji.
3. Funkcje mierzące statystyczną niezależność między rozkładem klas-decyzji, a podziałem E na podzbiory.

4.1.2. ANALIZA PORÓWNAWCZA OPTYMALNYCH LOGICZNYCH DRZEW
DECYZYJNYCH I INDUKCYJNYCH DRZEW SYSTEMU DETREEX W
WYZNACZANIU RANGI WAŻNOŚCI PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH
I/LUB EKSPLOATACYJNYCH DANYCH UKŁADÓW

4.1.2.1. RANGA WAŻNOŚCI PARAMETRÓW ZAWORU PRZELEWOWEGO

W działaniu zaworu przelewowego analizowano trzy zależności wiążące ograniczenia na parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne, dotyczące czasu stabilizacji funkcji oraz stosunku wartości maksymalnej funkcji do jej wartości, po ustabilizowaniu [53, 74]: **1.** $t_w < 200t_o$, $\frac{w_{max}}{w_{stab}} < 2,4$; **2.** $t_w < 750t_o$, $\frac{w_{max}}{w_{stab}} < 3,6$ **3.**

$t_w < 300t_o$, $\frac{w_{max}}{w_{stab}} < 2,4$. W tabelach 4.1-4.3 przedstawiono zmiany kodowe parametrów konstrukcyjnych m , k i d , przy których spełnione są odpowiednie ograniczenia funkcji zależnych od czasu [74].

Tab. 4.1. Wartości logiczne ustalonych parametrów ograniczenia 1

M	k	d	m	k	D	m	k	d
2	2	2	1	1	2	0	3	2
2	1	2	1	3	2	0	1	1
1	2	1	2	0	2	0	1	2
1	2	2	0	2	1	0	0	1
1	1	1	0	2	2	0	0	2

Tab. 4.2. Wartości logiczne ustalonych parametrów ograniczenia 2

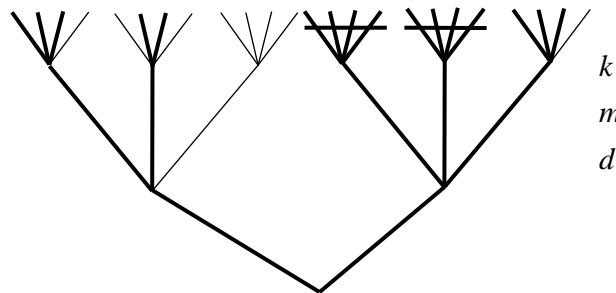
m	k	d	m	k	d	m	k	d
2	2	1	3	2	2	0	2	1
2	2	2	3	1	2	0	2	2
2	1	1	3	3	2	0	2	0
2	1	2	2	0	1	0	3	1
2	3	2	2	0	2	0	3	2
1	2	1	3	0	2	0	1	1
1	2	2	1	0	1	0	1	2
1	1	1	1	0	2	0	1	0
1	1	2	4	2	2	0	0	1
1	3	2	4	1	2	0	0	2
3	2	2	3	2	2	0	0	0
3	1	2	3	1	2	0	2	1
3	3	2	3	3	2	0	2	2
2	0	1	2	0	1	0	2	0
2	0	2	2	0	2	0	3	1
3	0	2	3	0	2	0	3	2
1	0	1	1	0	1	0	1	1
1	0	2	1	0	2	0	1	2
4	2	2	4	2	2	0	1	0

4	1	2	4	1	2	0	0	1
			0	2	1	0	0	2

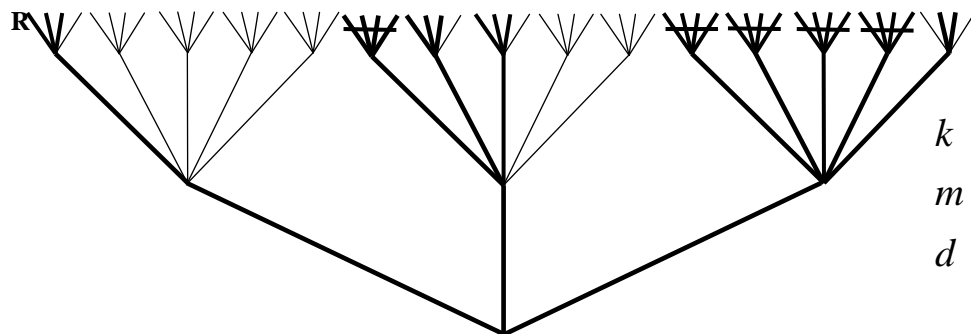
Tab. 4.3. Wartości logiczne ustalonych parametrów dla ograniczenia 3

<i>m</i>	<i>k</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	<i>k</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	<i>k</i>	<i>d</i>
2	2	2	1	3	2	0	3	1
2	1	2	3	2	2	0	3	2
1	2	1	3	1	2	0	1	1
1	2	2	2	0	2	0	1	2
1	1	1	1	0	2	0	1	0
1	1	2	0	2	1	0	0	1
			0	2	2	0	0	2

Na rysunkach 4.2-4.4 przedstawiono optymalne wielowartościowe drzewa logiczne z rangą ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych od najważniejszego na dole do najmniej ważnego na górze.

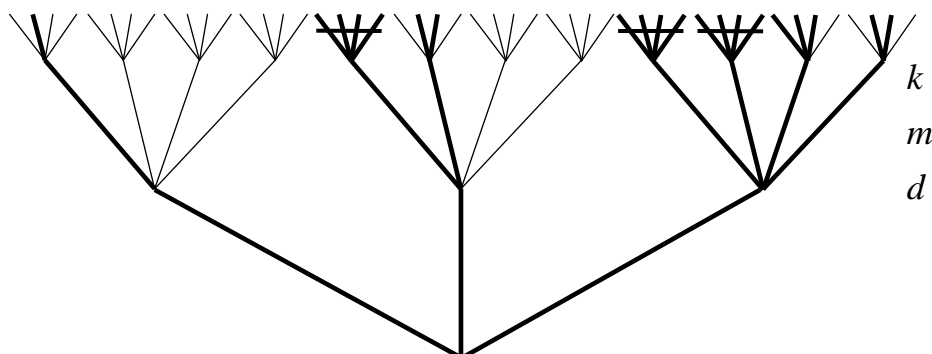


Rys. 4.2. Optymalne wielowartościowe drzewo decyzyjne Tab. 4.1



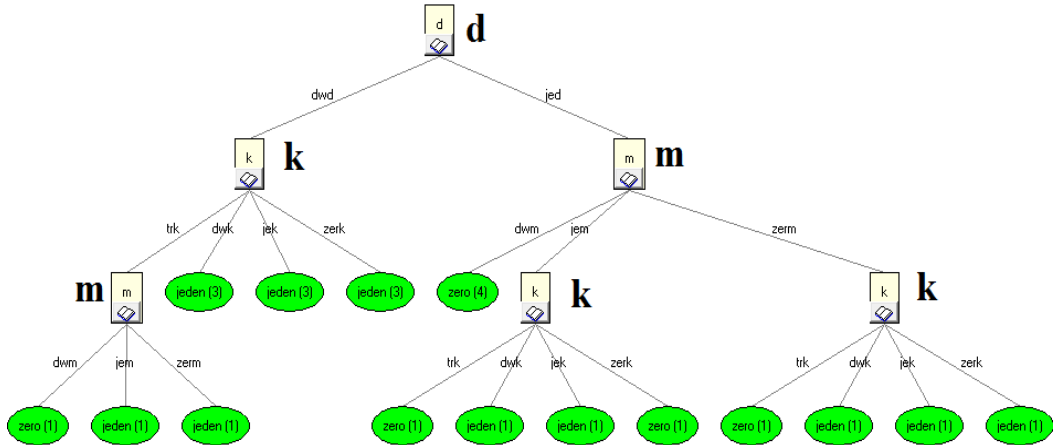
R

Rys. 4.3. Optymalne wielowartościowe drzewo decyzyjne Tab. 4.2

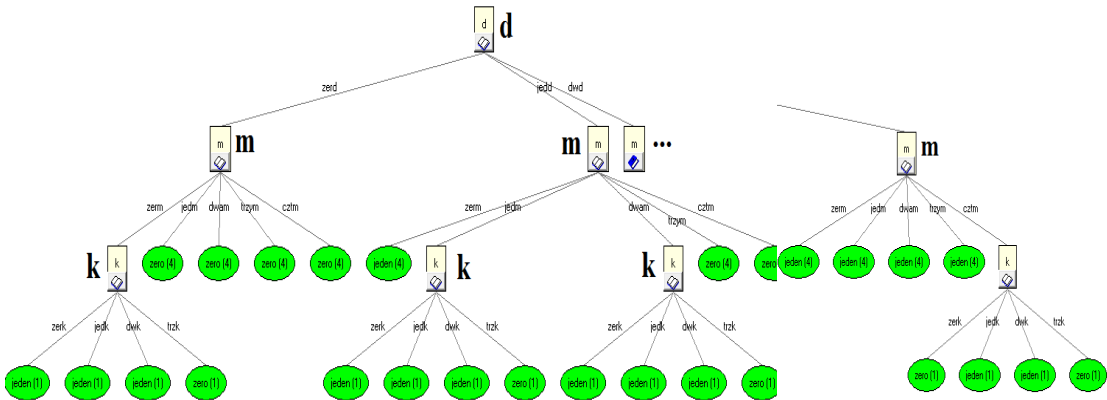


Rys. 4.4. Optymalne wielowartościowe drzewo decyzyjne Tab. 4.3

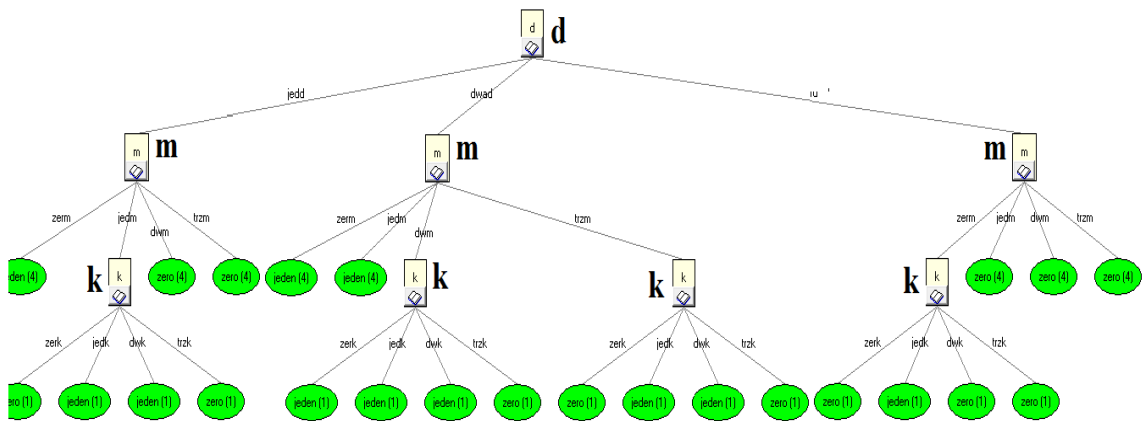
Najważniejszym parametrem jest średnica d , natomiast najmniej ważnym stała sprężyna k . Następnie wygenerowano indukcyjne drzewa decyzyjne za pomocą modułu DeTree, [204, 224]. Atrybutami wejściowymi są parametry: m, k, d , atrybutem wyjściowym natomiast jest funkcja kryterialna $f(m,k,d)$. Na rysunku 4.5 przedstawiono indukcyjne drzewo decyzyjne.



Rys. 4.5. Indukcyjne drzewo decyzyjne Tab.4.1



Rys. 4.6. Indukcyjne drzewo decyzyjne Tab.4.2

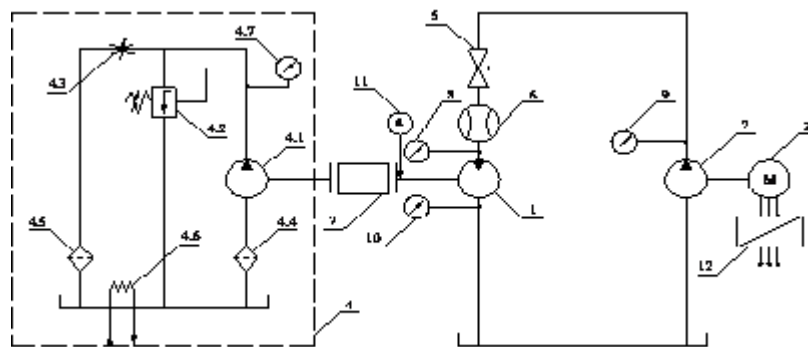


Rys. 4.7. Indukcyjne drzewo decyzyjne Tab.4.3

Ranga ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych zaworu przelewowego, oceniona przez indukcyjne drzewa decyzyjne jest prawidłowa. Najważniejszym parametrem jest średnica d , natomiast najmniej ważnym – stała sprężyny k . Indukcyjne drzewa decyzyjne z tablicy 4.2 oraz tablicy 4.3 (Rys. 4.6 i 4.7) podobnie jak drzewa logiczne, posiadają tylko jeden parametr decyzyjny na pojedynczym piętrze. W przypadku drzewa indukcyjnego z rysunku 4.5 dane piętro jest opisane dwoma parametrami m i k , jednakże ocena rangi ważności parametrów nie jest zaburzona.

4.1.2.2. RANGA WAŻNOŚCI PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH POMPY WIROWO-ŚMIGŁOWEJ

W przypadku badań eksperymentalnych pompy wirowej śmigłowej charakterystycznymi wielkościami fizycznymi, które wyznaczono na stanowisku, były: przepływ turbiny Q , spadek H , moc N , sprawność η i prędkość obrotowa n [134, 162, 215]. Schemat stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Stanowisko pomiarowe pompy wirowo-śmigłowej
1- turbina wodna śmigłowa, 2- pompa zasilająca, 3- silnik elektryczny, 4- pompa zasilająca układu hamowania, 5- zawór regulacyjny, 6- przepływomierz, 7- momentomierz, 8, 9, 10- manometry, 11- miernik prędkości obrotowej, 12- przetwornica częstotliwości [134]

Stwierdzono, że najwyższe sprawności, niezależnie od prędkości obrotowej, uzyskano przy kącie ustawienia łopatek wirnika $\varphi = 13^\circ$ [162, 215].

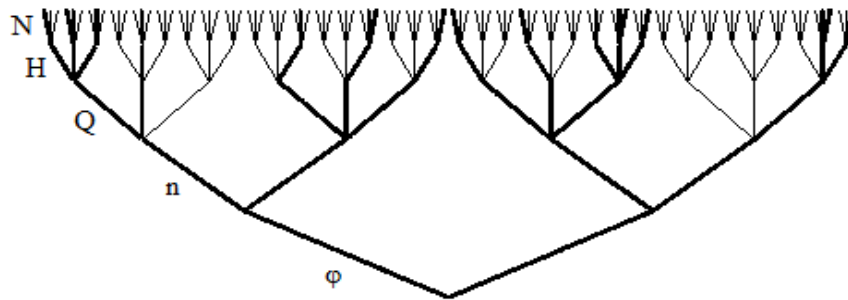
W dotychczasowych opracowaniach literaturowych, przedstawionej śmigłowej turbiny doświadczalnej, wyznaczono φ i n za najważniejsze parametry w procesie projektowania. Metodę wielowartościowych drzew logicznych, z różnym kodowaniem zmian arytmetycznych parametrów, stosowano już wielokrotnie [134, 162, 215]. Uwzględniając dane interpolowane zakresy przedziałów poszczególnych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych można opisać zmiennymi logicznymi w następujący sposób:

$\varphi = 10, 13 - 0;$	$n = 800, 900, 1000, 1100 - 0;$	
$\varphi = 17, 21 - 1;$	$n = 1200, 1300, 1400 - 1;$	
$Q \in (3; 5,62] - 0;$	$H \in (4; 6,2] - 0;$	$N \in (1; 3,5] - 0;$
$Q \in (5,62; 6,66] - 1;$	$H \in (6,2; 7,6] - 1;$	$N \in (3,5; 4,6] - 1;$
$Q \in (6,66; 8] - 2;$	$H \in (7,6; 10] - 2;$	$N \in (4,6; 7] - 2.$

Tabela 4.4 przedstawia dyskretyzację takich przedziałów. Zdanych przedziałów otrzymano optymalne wielowartościowe drzewa logiczne o kolejności pięter $\varphi nQH N$ i $n\varphi QHN$. Oznacza to, że najważniejszymi parametrami są φ i n . Parametry Q, H, N są związane interakcyjnie, a zatem nie są one dosłownie zmiennymi niezależnymi i dlatego powinny być jedną zmienną zastępczą. Na rysunku 4.9 przedstawiono wielowartościowe drzewo logiczne o kolejności pięter $\varphi nQH N$ [134, 162].

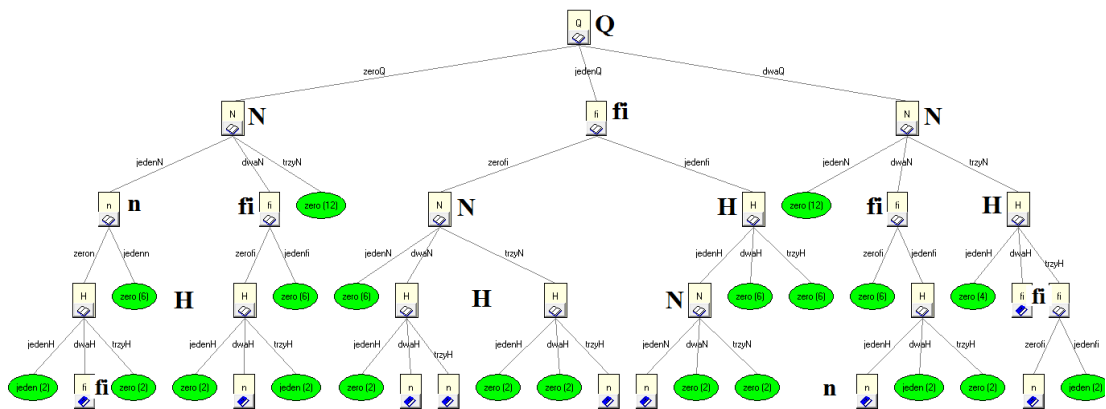
Tab. 4.4 Kodowy zapis parametrów znamionowych śmigłowej turbiny

Φ	N	Q	H	N	Φ	n	Q	H	N
0	0	0	0	0	0	1	1	2	1
0	0	0	1	0	1	0	2	1	1
1	0	0	0	0	0	1	1	2	2
0	0	0	1	1	1	0	2	1	2
1	0	1	0	0	1	1	2	1	1
0	0	1	1	1	0	1	2	2	2
0	0	0	2	1	1	0	2	2	2
0	1	0	2	1	1	1	2	1	2
1	0	2	0	1	1	1	2	2	2



Rys. 4.9. Wielowartościowe drzewa logiczne o układach: $\varphi nQH N$

Następnie dla danych przedziałów wygenerowano indukcyjne drzewo decyzyjne [74]:



Rys. 4.10. Indukcyjne drzewo decyzyjne Tab.4.4

W literaturze istnieją przypadki obliczeń z kodowaniem dwuwartościowym (parametrów: φ, n, Q, H, N) na podstawie standaryzacji. Jednak z powodu subiektywnego wyznaczania przedziałów i potem kodowania, często nie otrzymuje się

prawidłowej rangi ważności, na podstawie drzew logicznych z minimalną liczbą gałęzi prawdziwych. Dlatego zwiększa się wartość logiczną parametrów mniej istotnych [134]. Gdyby zakresy przedziałów poszczególnych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych opisać w następujący sposób [134]:

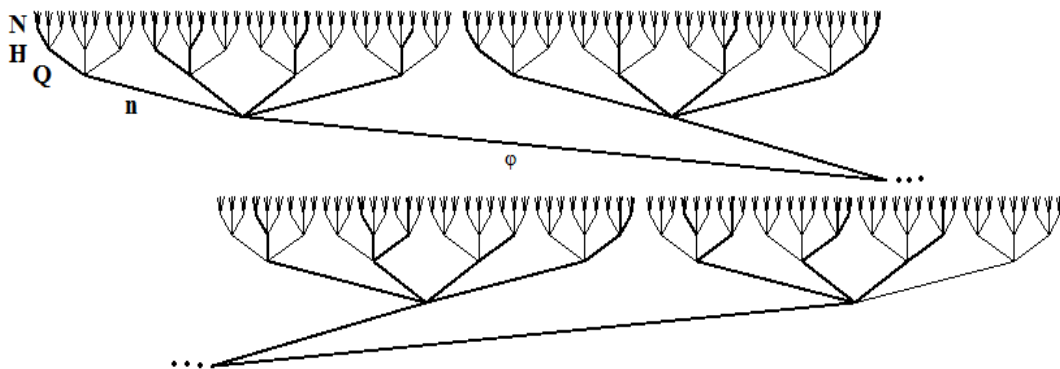
$\varphi \in (-1,18; -0,508] - 0;$	$n \in (-1,41; -0,660] - 0;$	
$\varphi \in (-0,508; 0,171] - 1;$	$n \in (-0,660; 0,097] - 1;$	
$\varphi \in (0,171; 0,850] - 2;$	$n \in (0,097; 0,854] - 2;$	
$\varphi \in (0,850; 1,529] - 3;$	$n \in (0,854; 1,612] - 3;$	
$Q \in (-2,04; -0,834] - 0;$	$H \in (-1,76; -0,587] - 0;$	$N \in (-1,89; -0,556] - 0;$
$Q \in (-0,834; 0,376] - 1;$	$H \in (-0,587; 0,587] - 1;$	$N \in (-0,556; 0,782] - 1;$
$Q \in (0,376; 1,586] - 2;$	$H \in (0,587; 1,763] - 2;$	$N \in (0,782; 2,122] - 2.$

to otrzymuje się tabelę 4.5 oraz wielowartościowe drzewa logiczne $\varphi nQH N$, $n\varphiQH N$, $\varphi nHQ N$, $n\varphiHQ N$ [134].

Tab. 4.5 Zwiększony kodowy zapis parametrów znamionowych śmigłowej turbiny

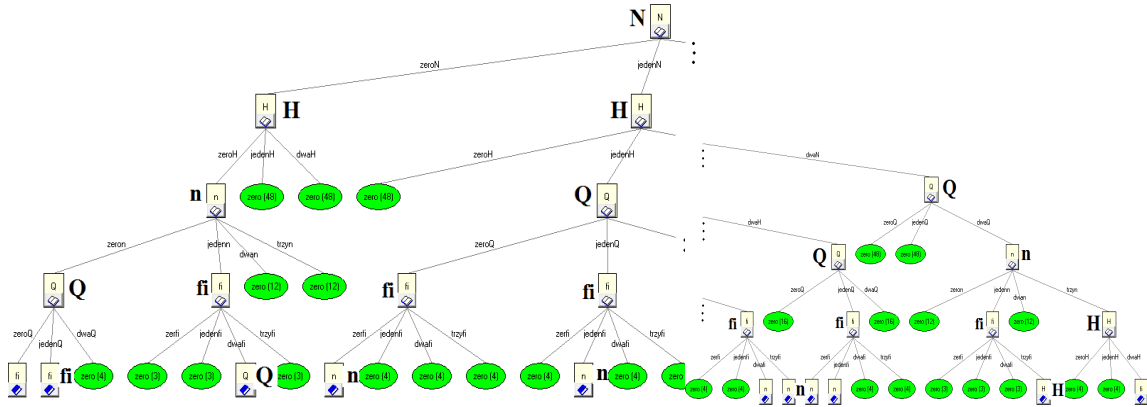
φ	N	Q	H	N	φ	n	Q	H	N
0	0	0	0	0	2	1	2	1	1
1	0	0	0	0	0	3	1	2	1
0	1	0	1	1	3	0	2	1	1
2	0	1	0	0	2	2	2	1	1
2	1	1	0	0	2	3	2	1	1
3	0	1	0	0	3	1	2	1	2
1	1	1	1	1	3	2	2	1	1
0	1	1	2	1	1	3	2	2	2
0	2	1	2	1	3	1	2	2	2
1	2	1	2	1	2	3	2	2	2

Na rysunku 4.11 przedstawiono wielowartościowe drzewa logiczne o kolejności pięter $\varphi nQH N$ [134].



Rys. 4.11. Wielowartościowe drzewo logiczne o układzie: $\varphi nQH N$

Indukcyjne drzewo decyzyjne danych zakresów przedziałów poszczególnych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych z tabeli 4.5 przedstawiono na rysunku 4.12.

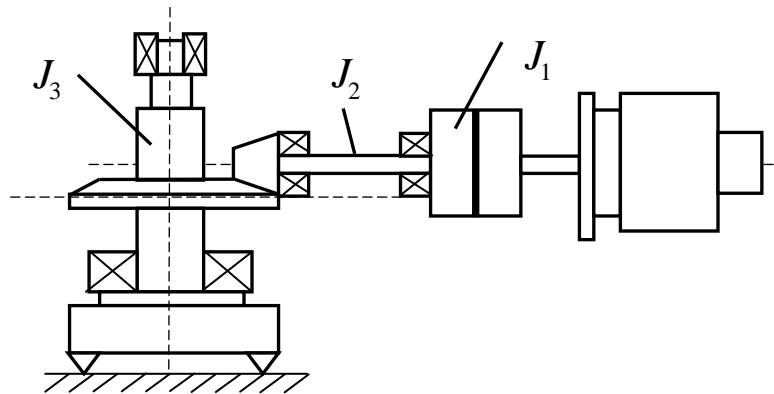


Rys. 4.12. Indukcyjne drzewo decyzyjne Tab. 4.5

Ocenę rangi ważności parametrów n, Q, H, N z użyciem indukcyjnych drzew decyzyjnych określono nie prawidłowo. Indukcyjne drzewa decyzyjne z Tab.4.4 oraz Tab.4.5 sklasyfikowały parametry φ oraz n w koronach drzew, podczas gdy wielowartościowe drzewa logiczne - w korzeniu, jako ważniejsze od Q, H, N . Podobnie parametry φ, n były ocenione, jako najważniejsze w dostępnej literaturze [215].

4.1.2.3. RANGA WAŻNOŚCI PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH GŁOWICY FREZARKI

Na rysunku 4.13 przedstawiono schemat napędu głowicy frezarki, składającej się z silnika asynchronicznego, sprzęgła podatnego S, przekładni stożkowej o przełożeniu i oraz wrzeciona głowicy [51, 184].



Rys. 4.13. Schemat głowicy frezarki

Zredukowane momenty bezwładności na wał sprzęgła:

$$I_1 = J_1 = 20[\text{kg} \cdot \text{m}^2], \tag{4.4}$$

$$I_2 = J_1 + J_3 \cdot i^3 = 10 + 160 \frac{1}{16} = 20[\text{kg} \cdot \text{m}^2]. \tag{4.5}$$

Wymuszenia:

$$v = \frac{\pi n_1 i}{30} z = \frac{\pi 950}{30} \frac{1}{4} 9 = 224 \left[\frac{1}{s} \right], \tag{4.6}$$

gdzie:

n_1 - obroty silnika w procesie skrawania,
 z - liczba ostrzy głowicy.

Współczynnik wzrostu amplitudy:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + 4\gamma^2\beta^2}} \leq 1, \quad (4.7)$$

gdzie:

$$\beta^2 \geq 0 \vee \beta^2 \geq 2(1-2\gamma^2). \quad (4.8)$$

Pomijając tłumienie w sprzęgle (na korzyść pewności), otrzymano:

$$v^2 \geq 2\omega_0^2 = 2c \frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2} \quad (4.9)$$

skąd:

$$c \leq \frac{v^2 I_1 I_2}{2(I_1 + I_2)} = 251 \cdot 10^3 [Nm] \quad (4.10)$$

Przyjmując sztywność sprzęgła jako warunek kryterialny, obliczenia przeprowadzono przy różnych wartościach parametrów n_1, J_1, J_2 oraz J_3 . Do analizy wybrano odpowiednie wartości arytmetyczne badanych parametrów, które zakodowano potem logicznymi zmiennymi decyzyjnymi, jako kodowe wytyczne logicznych drzew decyzyjnych [51, 74]:

$$n_1 = 900 [\text{obr}/\text{min}] \sim 0; \quad n_1 = 880 \left[\frac{\text{obr}}{\text{min}} \right] \sim 1;$$

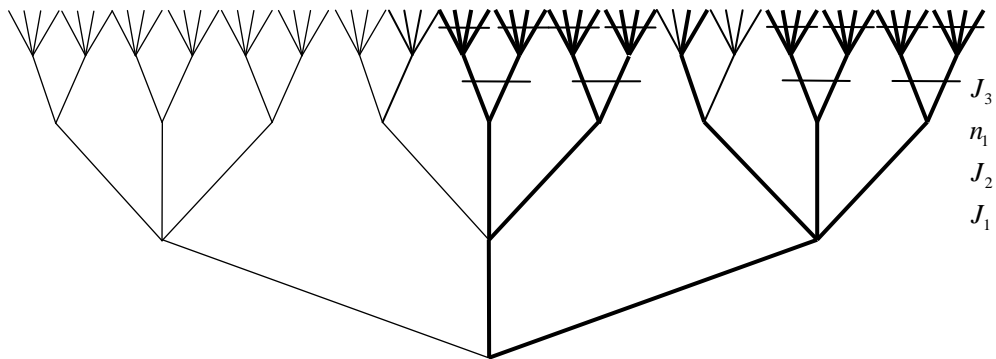
$$J_1 = 15 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 0; \quad J_1 = 20 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 1; \quad J_1 = 25 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 2;$$

$$J_2 = 10 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 0; \quad J_2 = 20 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 1; \quad J_2 = 30 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 2;$$

$$J_3 = 150 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 0; \quad J_3 = 160 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 1; \quad J_3 = 170 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 2; \quad J_3 = 180 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \sim 3.$$

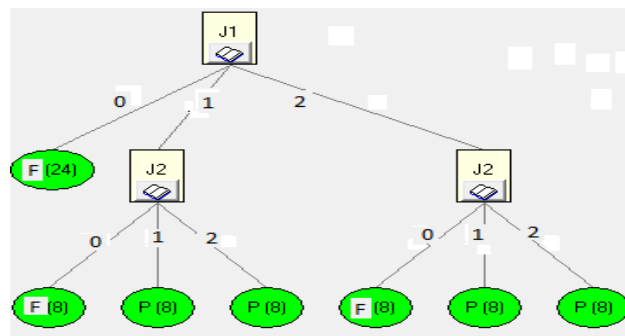
Podstawą wyodrębnienia wariantów prawdziwych jest nierówność (4.10). Jeżeli spełniona została nierówność, to funkcji $f(n_1, J_1, J_2, J_3)$ przyjmuje wartość: 1, w przeciwnym razie przyjmuje wartość: 0 [51]

W wyniku analizy [51] otrzymano 24 wielowartościowe drzewa logiczne. Po redukcji dopuszczalnych pełnych wiązek z góry na dół, otrzymano jedno optymalne wielowartościowe drzewo logiczne z prawdziwą rangą ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, od korzenia do korony drzewa (Rys. 4.14). Optymalne drzewo to MZAPN danej funkcji logicznej.



Rys. 4.14. Optymalne wielowartościowe drzewo logiczne z układem piętrowym J_1, J_2, n_1, J_3

Indukcyjne drzewo decyzyjne, wygenerowane za pomocą pakietu DeTree, przedstawiono na rysunku 4.15.



Rys. 4.15.. Indukcyjne drzewo decyzyjne J_1, J_2, n_1, J_3

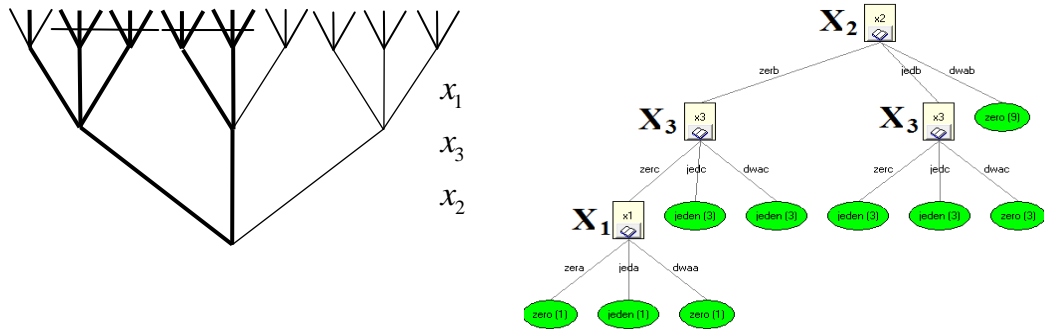
Na podstawie indukcyjnego drzewa decyzyjnego z rysunku 4.15 można odczytać rangę ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych głowicy frezarki zgodnie z wielowartościowym drzewem decyzyjnym z rysunku 4.14. Parametry o największej randze ważności to: J_1 (moment bezwładności sprzęgła asynchronicznego) oraz J_2 (moment wału wrzeciona). Najważniejszymi parametrami okazały się momenty bezwładności sprzęgła asynchronicznego J_1 oraz wału wrzeciona J_2 .

4.1.2.4. INDUKCYJNE DRZEWA DECYZYJNE DLA DANYCH KAPN FUNKCJI LOGICZNYCH

W danych KAPN funkcji logicznych, które mogą opisywać kodowanie zmian wartości arytmetycznych parametrów konstrukcyjnych układów maszynowych, zbudowano optymalne wielowartościowe drzewa logiczne (Tab. 4.6). Następnie wygenerowano drzewa decyzyjne za pomocą pakietu DeTree (Rys. 4.16).

Tab. 4.6 KAPN danej funkcji logicznej $F1(X1, X2, X3)$

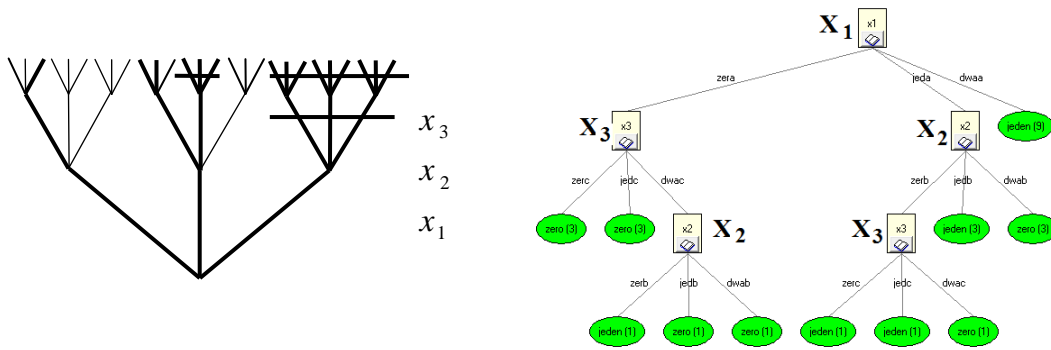
X1	X2	X3	F1(X1, X2, X3)	X1	X2	X3	F1(X1, X2, X3)
0	0	0	0	1	1	2	0
0	0	1	1	1	2	0	0
0	0	2	1	1	2	1	0
0	1	0	1	1	2	2	0
0	1	1	1	2	0	0	0
0	1	2	0	2	0	1	1
0	2	0	0	2	0	2	1
0	2	1	0	2	1	0	1
0	2	2	0	2	1	1	1
1	0	0	1	2	1	2	0
1	0	1	1	2	2	0	0
1	0	2	1	2	2	1	0
1	1	0	1	2	2	2	0
1	1	1	1				



Rys. 4.16. Optymalne wielowartościowe drzewo logiczne oraz indukcyjne drzewo decyzyjne Tab.4.6

Tab. 4.7. KAPN danej funkcji logicznej $F2(X1, X2, X3)$

X1	X2	X3	F2(X1, X2, X3)	X1	X2	X3	F2(X1, X2, X3)
0	0	0	0	1	1	2	1
0	0	1	0	1	2	0	0
0	0	2	1	1	2	1	0
0	1	0	0	1	2	2	0
0	1	1	0	2	0	0	1
0	1	2	0	2	0	1	1
0	2	0	0	2	0	2	1
0	2	1	0	2	1	0	1
0	2	2	0	2	1	1	1
1	0	0	1	2	1	2	1
1	0	1	1	2	2	0	1
1	0	2	0	2	2	1	1
1	1	0	1	2	2	2	1
1	1	1	1				



Rys. 4.17. Optymalne wielowartościowe drzewo logiczne oraz indukcyjne drzewo decyzyjne Tab.4.7

W danych funkcjach logicznych KAPN F1 i F2 z Tab.4.6 i Tab. 4.7 ranga ważności zmiennych decyzyjnych w ocenie indukcyjnych drzew decyzyjnych jest analogiczna jak w przypadku wielowartościowych optymalnych drzew logicznych (Rys. 4.17).

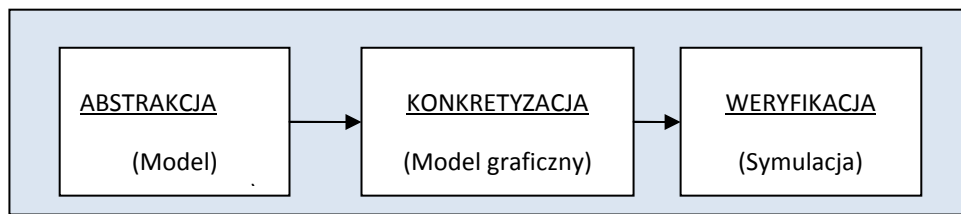
4.1.2.5. ANALIZA PORÓWNAWCZA LOGICZNYCH DRZEW DECYZYJNYCH I DRZEW DECYZYJNYCH PAKIETU DETREEX

Jeśli istnieje przybliżona liczba obiektów oznaczonych jako „prawdziwe” i „nieprawdziwe”, to ranga ważności zmiennych decyzyjnych w ocenie indukcyjnych drzew jest identyczna jak w przypadku wielowartościowych drzew logicznych. Taka sytuacja istnieje podczas analizy rangi ważności parametrów konstrukcyjnych zaworu przelewowego oraz w danych KAPN funkcjach logicznych (Tab. 4.6 i Tab. 4.7). Sytuacja jest przeciwna wtedy, kiedy analiza dotyczy małej lub bardzo małej liczby realizowalnych wytycznych projektowania w stosunku do rozwiązań teoretycznych. Przykładem jest wyznaczenie rangi ważności parametrów φ , n w pompie wirowo-śmigłowej. W analizie przedstawionej m.in. w pracach [51, 74] identyfikuje się indukcyjne drzewa decyzyjne ze zmodyfikowanymi drzewami logicznymi, z wieloma zmiennymi logicznymi na pojedynczym piętrze drzewa. Istnieje możliwość dalszej analizy zastosowań indukcyjnych drzew decyzyjnych do optymalizacji układów maszynowych, jako graficznych struktur decyzyjnych. W szczególności konieczne jest uwzględnienie współczynników wagowych w fazie testowania podczas indukcyjnego generowania reguł odpowiednich atrybutów.

ROZDZIAŁ 5

STRUKTURY GRAFOWE W OPTYMALIZACJI
UKŁADÓW MASZYNOWYCH

Wśród narzędzi wspomaganie decyzji można wyróżnić tablice i drzewa decyzyjne, dendryty, klasyfikatory drzewiaste, a także grafy. Narzędzia te zalicza się do tzw. grafowych metod wspomaganie i podejmowania decyzji. Często zbiór decyzji (i relacji między nimi) zapisywany jest w sposób graficzny z modelu matematycznego, który jest główną płaszczyzną realizacji procesu decyzyjnego z jakiej decydującego może skorzystać w celu rozwiązania dowolnego problemu. W przypadku wspomaganie podejmowania decyzji w optymalizacji układów mechanicznych (jako systemów), wymagane jest zamodelowanie całościowego procesu. Składa się ona z *abstrakcji* (model matematyczny), *konkretyzacji* (model graficzny, model komputerowy) oraz *weryfikacji* (badania symulacyjne) (Rys. 5.1.).



Rys. 5.1. Schemat modelowania procesu dla systemu wspomaganie decyzji wybranego modelu

Model matematyczny jako układ równań algebraiczno-różniczkowo-całkujących, zostaje zapisany graficznie, jako powiązania (relacje) będące dowolnymi ustalonymi w sensie wartości arytmetycznych zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi. W badanych obiektach (np. układ mechaniczny) wyróżnia się bardzo dużo licznych sprzężeń zwrotnych pomiędzy poszczególnymi elementami wewnętrznej budowy. Dlatego na etapie konkretyzacji konieczne jest stosowanie odpowiedniego modelu graficznego, gdzie opisywane są zachodzące wewnątrz badanego obiektu związki przyczynowo- skutkowe.

Grupy danych pomiarowych dostarczane są przez stanowisko pomiarowe. Dyskretyzacja zakresów przedziałów poszczególnych danych pomiarowych prowadzi do kodowego zapisu parametrów konstrukcyjno- eksploatacyjnych. Wielowartościowe drzewa logiczne wyznaczają rangę ważności parametrów konstrukcyjno- eksploatacyjnych, odgrywających rolę logicznych zmiennych decyzyjnych.

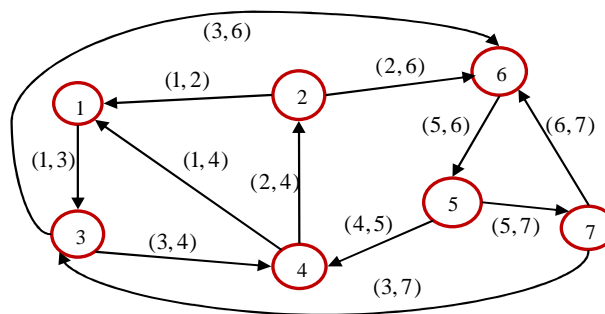
Główną tematyką rozdziału 5 jest omówienie zastosowań metod grafowych w analizie własności układów maszynowych. W rozdziale przedstawiono autorską metodę opisu grafów i drzew parametrycznych w optymalizacji układów maszynowych. Dotychczas grafy i drzewa rozgrywające parametrycznie były stosowane m. in. w teorii automatów z zachowaniem celowym.

5.1. GRAFY

Każde dyskretne zadanie optymalizacyjne można rozwiązać przez przejście wszystkich możliwości (wszystkich elementów przestrzeni stanów). Model danego systemu, np.: układu maszynowego opisywany jest przez przestrzeń stanów. Tworzone są schematy, które w danym zakresie problemowym są reprezentacją pewnej klasy zjawisk, w celu stworzenia podstawy do badań i (lub) komunikacji. W ogólnym sensie jest to opis myślowy (wewnętrzny) lub postaciowy (diagramy, wzory matematyczne, relacje itp.), na ogół zredukowany do najistotniejszych cech o charakterze symbolicznym. W zagadnieniach technicznych mówi się o modelach rzeczywistych, opisujących rzeczywistą budowę obiektu konkretnego. Można przytoczyć definicję Regnier [177, 181]: "Zauważając, z jednej strony, że obiekt abstrakcyjny jest całkowicie opisywany przez jego definicje, a obiekt konkretny nie jest nigdy opisany w sposób wyczerpujący, można powiedzieć: obiekt abstrakcyjny jest modelem obiektu konkretnego, jeśli definicja tego pierwszego jest brana za reprezentację tego drugiego. Model rzeczywisty zatem to taki, który opisuje rzeczywistą budowę obiektu konkretnego".

Do modelowania poszczególnych podukładów analizowanego systemu (układu maszynowego) znakomicie nadaje się klasyczne pojęcie relacji, określającej istnienie lub brak związku między dwoma elementami (obiektami). Każdą z relacji można interpretować jako własność, którą ma lub nie ma 'para' wariantów a' i a . Przez słowo 'para' trzeba rozumieć fakt, że dwa rozważane warianty nie zależą od porządku, w którym je podano. Jednym ze sposobów przedstawienia modelu obiektu jest graf. Za pomocą grafu można opisywać (modelować) wszelkiego rodzaju obiekty rzeczywiste (obiekty fizyczne, zjawiska, procesy, itp.), które posiadają pewne cechy (wierzchołki grafu) i pewne relacje między cechami (łuki grafu).

Na rysunku 5.2 przedstawiono przykładowy graf skierowany (ang. directed graph lub digraph).



Rys. 5.2 Przykładowy graf skierowany

W grafie skierowanym z rysunku 5.2 rozróżnia się zbiór wierzchołków:

$$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$$

oraz zbiór krawędzi reprezentowany przez uporządkowane pary wierzchołków, pomiędzy którymi jest rozpięta dana krawędź:

$$E = \left\{ (2 \rightarrow 1), (1 \rightarrow 3), (4 \rightarrow 1), (4 \rightarrow 2), (2 \rightarrow 6), (3 \rightarrow 4), (3 \rightarrow 6), (3 \rightarrow 7), (5 \rightarrow 4), (6 \rightarrow 5), (5 \rightarrow 7), (7 \rightarrow 6) \right\}$$

Zależności grafowe mogą opisywać poszukiwanie drogi pomiędzy miastami, połączeń kolejowych, połączeń drogowych między skrzyżowaniami, system pozycjonowania GPS. W lingwistyce tworzone są zależności między słowami w zdaniu (syntaktyka) oraz między ich znaczeniem (semantyka), co dalej ma zastosowanie w rozpoznawaniu mowy, w interakcji między maszyną a człowiekiem.

Dział matematyki i informatyki, zajmujący się badaniem własności grafów-Teoria Grafów, w dalszym ciągu rozwija algorytmy wyznaczające właściwości grafów. Algorytmy te stosuje się do rozwiązywania wielu zadań praktycznych. W zależności od właściwości i budowy rozróżnia się różne rodzaje grafów, np.:

- grafy skierowane (zwane również digrafami) to grafy w których krawędzie są uporządkowanymi parami wierzchołków,
- grafy ważone, gdzie dodatkowo każdej krawędzi przypisana jest waga,
- hipergrafy, czyli rozszerzone grafy, gdzie krawędzie mogą być zbiorami więcej niż dwóch wierzchołków.

Grafy znalazły szerokie zastosowanie w socjologii [4], biologii [115, 125], fizyce, chemii [154], energetyce [2, 112], matematyce [86, 88, 120], w modelowaniu układów maszynowych [13, 32, 47, 92, 93, 94, 186, 196, 210, 217].

Specyficznym rodzajem grafów spójnych bez cykli są *drzewa*. Wiele przykładów drzew dostarczają struktury logiczne, np.: wielowartościowe drzewa logiczne, ankiety, dendryty wielochodowe gry, (...). Drzewa mają taką właściwość, że zaczynają się w korzeniu, od którego budowane są kolejne gałęzie. Stosowanie drzew w optymalizacji układów maszynowych jest w pełni użyteczne w sferze koncepcji, ponieważ pozwala na wybory (zmienianie) wartości arytmetycznych odpowiednich parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych danego układu maszynowego i ocenę pracy układu w nowych warunkach. W dowolnym etapie optymalizacji można sporządzić drzewo, wybierając optymalne decyzje. Następnie można dołączyć do drzewa wierzchołki, które reprezentują optymalne odpowiedzi układu na zmiany wartości arytmetycznych parametrów konstrukcyjnych i tak dalej. Jeśli ograniczy się liczbę wierzchołków na każdym poziomie decyzji do tych, które reprezentują prawdziwe wytyczne konstrukcyjne (realizowalne), to można skonstruować graf, rozbudowany dość 'głęboko' w pewnym kierunku. W takim postępowaniu uzyskiwana jest aproksymacja sposobu myślenia np.: dobrego projektanta. Innego przykładu drzewa dostarcza procedura klasyfikacji. Schematy klasyfikacji są bardzo użyteczne nie tylko w technice, ale także w innych dziedzinach, szczególnie w zakresie np.: biologii doświadczalnej.

5.2. GRAFY JAKO MODELE UKŁADÓW MECHANICZNYCH

W przypadku układów zbudowanych z dużej liczby podukładów, analityczne rozwiązywanie równań różniczkowych jest zazwyczaj pracochłonne lub może być istotnie utrudnione. Korzysta się wówczas z metod sieciowych, nazywanych w literaturze metodami nieklasycznymi. Poprzez wysoki stopień zalgorytmizowania metod sieciowych, ułatwiona jest ich implementacja w komputerowych systemach

obliczeniowych. Z drugiej strony w sposób graficzny - w postaci grafów przedstawiają strukturę modelowego układu.

Metody grafów i liczb strukturalnych od dawna mają zastosowanie w mechanice [13, 186,32, 196, 210, 211, 217]. W kraju i za granicą ukazało się wiele prac dotyczących teorii grafów, jako narzędzi w badaniu dynamiki układów, zarówno w zakresie analizy, jak również i syntezy złożonych układów mechanicznych. Metody grafowe są łatwe w algebraizacji, dlatego wraz z rozwojem komputerów i sztucznej inteligencji rozwinęły się w bardzo szybkim tempie.

W metodach grafowych stosowane są takie klasy grafów, jak grafy biegunowe, grafy przepływowe, grafy hybrydowe, grafy wiązań oraz hipergrafy i liczby strukturalne [13, 24, 27, 32, 34, 196]. Wybór odpowiedniej klasy grafów, wykorzystywanych w procesie modelowania, zależy od modelowanego układu oraz od przyjętego modelu w odniesieniu do tego układu [197]. Przykładowe zastosowania różnych rodzajów grafów w badaniu układów maszynowych, w zakresie analizy jak i syntezy można znaleźć w m. in. pracach [12, 25, 25, 24, 27,21, 29, 29, 22, 23, 22, 26, 30, 28, 32, 34, 40, 47, 94, 93, 92, 95, 151,155, 186, 195, 197, 196, 210, 211, 217].

W pracy [95, 217] przedstawiono metody teorii grafów, stosowane do modelowania przekładni planetarnych. Analizę kinematycznej przekładni planetarnej przeprowadzono na podstawie grafu liniowego przekładni tzw. grafu Hsu, który został zmodernizowany przez autorów pracy. Zastosowane metody pozwalają inżynierowi głębiej zrozumieć budowę i zasadę działania przekładni. W pracach [197, 196, 186] przedstawiono zastosowanie grafów hybrydowych, łączących w sobie cechy grafów biegunowych i przepływowych. Badanie przestrzenne modeli układów drgających, czyli układów z liniowymi sprzężeniami dynamicznymi, niejednorodnych geometrycznie i strukturalnie, poddanych jednoczesnemu działaniu zbiorów wymuszeń biegunowych, możliwe jest z wykorzystaniem grafów hybrydowych. Do charakterystycznych cech tych grafów można zaliczyć prostą algebraizację i algorytmizację obliczeń. Za pomocą grafu hybrydowego w pracy [197] analizowano model fenomenologiczny dyskretno- ciągłego układu mechanicznego. W ośrodku gliwickim rozważano drgające układy belkowe, dyskretnie i dyskretno - ciągłe układy mechaniczne metodą liczb strukturalnych, które modelowano grafami różnych kategorii [12, 25, 30, 28]. Z kolei ciąгло-dyskretnie drgające skrętnie i giętnie układy mechatroniczne były przedmiotem prac [25, 22, 23], gdzie w celu wyznaczenia charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych zastosowano przybliżoną metodę analizy częstotliwościowo-modalnej - Galerkina. Z kolei w pracy [26] badano ciąg modeli systemu: operator-suwnica w postaci zbioru dyskretnych układów mechanicznych, które utworzono z elementów inercyjnych oraz elementów sprężystych. W otrzymanym modelu matematycznym (analiza) dobrano parametry układu mechanicznego (synteza i projektowanie) w celu uzyskania żądanych własności dynamicznych.

Kolejną grupę grafów stanowią grafy wiązań - Bond Graphs Method. Za początek tej metody można przyjąć publikację Henrego M. Pyntera profesora Politechniki z Massachusetts - USA), która to ukazała się w 1961. Następnie zagadnienia podjęli się D. Karnopp oraz Rosenberg. Modelowanie tą metodą przeprowadzane jest w dwóch etapach: konstrukcji modelu graficznego w postaci

grafu wiązań oraz konstrukcji modelu przyczynowo-skutkowego w postaci równań stanu [19, 119]. Model graficzny zbudowany za pomocą grafów wiązań, odzwierciedlono w przejrzystej postaci dynamicznej struktury obiektu i może być w prosty sposób modyfikowany.

Grafy przepływu mocy (grafy wiązań) i ich związek z modelowaniem układu przedstawiono m.in. w [34, 151, 47]. W przykładowej pracy [47] przedstawiono zastosowanie metody grafów wiązań do modelowania pracy zespołu prądotwórczego w siłowni okrętowej. Ponadto istnieją specjalne grafy strumieniowe, np.: w inżynierii chemicznej i procesowej.

W odróżnieniu od grafów, struktury dendrytowo- drzewiaste nie mają cykli, ale może istnieć różna liczba wierzchołków początkowych. Dlatego odmienne podejście może być przeprowadzone jako przetłumaczenie skierowanego grafu zależności na drzewo parametryczne.

5.3. GRAFY ZALEŻNOŚCI I STRUKTURY ROZGRYWAJĄCE PARAMETRYCZNIE

Podczas zmian wartości liczbowych zmiennych wejściowych w modelu matematycznym otrzymuje się zmiany wartości zmiennych wyjściowych. Aby otrzymać inne planowane zachowanie się układu (elementu), można uzyskać na wiele sposobów zmiany wartości liczbowych zmiennych wejściowych. W procesie optymalizacji zadawane są dodatkowo pytania: które parametry zmieniać? jak zmieniać - zwiększyć?, bez zmiany?, zmniejszyć? w jakiej kolejności? itd. Takie koncyrowanie subiektywizuje (według danego projektanta) zmieniane wartości liczbowe parametrów konstrukcyjnych w modelu matematycznym. Poprzez wprowadzenie obiektywności w modelu uwzględniono główne czynniki niedoskonałości, niepewności i nieokreśloności pozostające w związku z budowanym modelem, przyjętymi założeniami oraz określeniem ich wpływu [178, 180, 181]. Specjalista od modelowania (konstruktor) nie zawsze unika tego typu błędzenia po omacku, nawet wtedy, gdy posługuje się sprawdzoną metodologią. Wyodrębnienie klasy zjawisk danego zakresu problemowego implikuje mnóstwo opcji, na które przy określaniu właściwości danego układu lub określaniu funkcji kryterialnej ma wpływ przede wszystkim doświadczenie. Oczywiście, spraw obiektywnych nie rozwiązuje nawet CAD z wykorzystaniem Matlab-a i dlatego należy wykonać "strukturalizację myśli projektanta", aby kolejność zmian i kontroli przebiegała według własności modelu matematycznego i fizycznego. W takiej sytuacji subiektywne postępowanie projektanta w procesie projektowania zależy praktycznie tylko od początkowego wierzchołka rozkładu grafu zależności. Dlatego ostatecznie można otrzymać różne drzewa z cyklami i drzewa parametryczne, z różnymi początkowymi wierzchołkami rozkładu, jako odpowiednie zbiory wytycznych projektowania.

Takie podejście jest odmienne wobec dotychczasowych opracowań literaturowych na temat automatów rozgrywających parametrycznie i ich zastosowań, związanych z systemami sterowania, systemami operacyjnymi, reprezentacją wiedzy na poziomie języka naturalnego, programowaniem zachowania się systemu cybernetycznego itd.

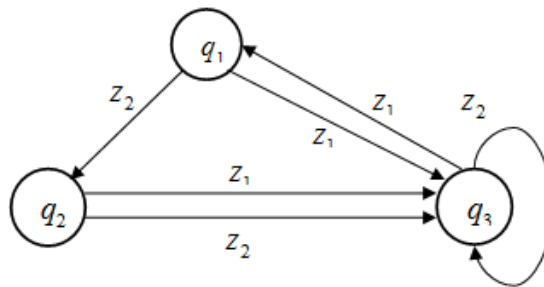
W dotychczasowych opracowaniach literaturowych metod graficznych i automatów rozgrywających parametrycznie uwzględniono:

- bazy wiedzy z użyciem grafów,
- działania automatu skończonego na podstawie wyrażeń symbolicznych,
- dendryty reprezentujące grę prognozującą,
- ścieżki w dendrycie gry opisującej prognozę rozwoju systemu w przyszłości z określeniem tzw. semaforów.

W takim stanie dotychczasowych opracowań literaturowych uwzględniono dawne skierowane grafy przepływu sygnałów, w który rozkład od dowolnego wierzchołka w pierwszym etapie prowadził do struktury drzewiastej z cyklami, a potem do ogólnej struktury drzewiastej rozgrywającej parametrycznie. W pracy wprowadzono uogólnienia i modyfikacje w celu zastosowań grafów i drzew rozgrywających parametrycznie w analizie modeli matematycznych układów maszynowych.

5.3.1. GRAF ZALEŻNOŚCI ROZGRYWAJĄCY PARAMETRYCZNIE

Skierowany graf definiuje się uporządkowaną parą zbiorów. W pierwszym z nich zawarto wierzchołki grafu, a w drugim krawędzie grafu, czyli uporządkowanej pary wierzchołków. Na rysunku 5.3 przedstawiono przykładowy skierowany graf zależności rozgrywający parametrycznie.



Rys. 5.3. Skierowany graf zależności rozgrywający parametrycznie

Skierowany graf zależności z rysunku 5.3 składa się ze zbioru wierzchołków Q :

$$Q = \{q_1, q_2, q_3\},$$

oraz ze zbioru krawędzi Z , czyli uporządkowanej pary wierzchołków:

$$Z = \{z_1, z_2\}.$$

W wyniku rozkładu grafu od wybranego wierzchołka w pierwszym etapie uzyskiwana jest struktura drzewiasta z cyklami, a następnie ogólna struktura drzewiasta rozgrywającej parametrycznie. Każda z nich posiada właściwy zapis analityczny G_i^+ oraz G_i^{++} .

W grafie zależności (Rys. 5.3) może określić wyrażenie analityczne, reprezentujące ten graf, a więc będące jego modelem analitycznym [121, 122]. Odpowiednią postacią takiego modelu analitycznego jest ciąg utworzony z symboli opisujących wierzchołki i krawędzie grafu oraz z nawiasów, jako kolejnych pięter w drzewach.

Wyrażenie opisujące stopień podrzędności danego grafu składowego oznaczane jest parą nawiasów $(^k \dots)^k$, wewnątrz której zapisuje się wyrażenie, dotyczące danego grafu składowego. Przystępując do budowy wyrażenia analitycznego reprezentującego graf, najpierw należy ustalić wierzchołek początkowy grafu q_1 . Krawędzie tego wierzchołka - jak również i z innych wierzchołków - rozpatruje się w kolejności zgodnej z ruchem wskazówek zegara. Przyjmuje się oznaczenia:

- k - indeks opisujący dowolny nawias,
- c - indeks kolejności odczytywanych wierzchołków grafu,
- v - indeks kolejności odczytywanych krawędzi grafów.

Zwiększenie wartości indeksu k o jeden oznacza się jako $k+1 \rightarrow k$, zmniejszenie o jeden - jako $k-1 \rightarrow k$, nadanie k wartości zero - jako $0 \rightarrow k$. Po przyjęciu takich oznaczeń algorytm przejścia z grafu na wyrażenie analityczne można przedstawić w następujących punktach:

1. Przyjąć wartość początkową indeksowi nawiasów k , tj. indeksowi k nadać wartość zero, czyli $0 \rightarrow k$. Otworzyć nawias z indeksem $k=0$. Założyć wartość początkową $c=1$ indeksu kolejności odczytywanych wierzchołków grafu. Wstawić symbol q_{r_c} wierzchołka początkowego grafu.
2. Zwiększyć wartość indeksu nawiasów o jeden, tj. wykonać $k+1 \rightarrow k$. Otworzyć nawias z aktualną wartością indeksu k .
3. Założyć wartość początkową $v=1$ indeksu kolejności odczytywanych krawędzi. Zwiększyć o jeden wartość indeksu kolejności odczytywanych wierzchołków, tj. wykonać $c+1 \rightarrow c$. Przyjąć symbol pierwszej krawędzi wychodzącej z wierzchołka stojącego przed nawiasem otwierającym z indeksem k oraz symbol wierzchołka, do którego ta krawędź dochodzi, tj. napisać $z_{i_v} q_{r_c}$.
4. Sprawdzić, czy symbol q_{r_c} nie był już wykorzystany w zapisie wyrażenia (w poprzednich krokach); jeżeli nie- przystąpić do wykonania punktu 5; jeżeli tak- przystąpić do wykonania punktu 7.
5. Dodać jedną wartość do indeksu nawiasów, tj. wykonać $k+1 \rightarrow k$. Otworzyć nawias z aktualnym indeksem k .
6. Zwiększyć o jeden wartość indeksu kolejności wierzchołków, tj. wykonać $c+1 \rightarrow c$. Zwiększyć o jeden wartość indeksu kolejności krawędzi, tj. wykonać $v+1 \rightarrow v$. Napisać symbol z_{i_v} kolejnej, jeszcze nie rozpatrywanej, krawędzi wychodzącej z wierzchołka stojącego przed nawiasem z aktualnym indeksem k oraz symbol wierzchołka q_{r_c} . Powrócić do wykonania punktu 4.
7. Sprawdzić, czy wszystkie krawędzie wychodzące z wierzchołka, którego symbol stoi przed nawiasem z aktualnym indeksem k , już były wykorzystane w zapisie wyrażenia. Jeżeli nie - wykonać punkt 8; jeżeli tak - przystąpić do wykonania punktu 9 algorytmu.

8. Za ostatnią pozycją aktualnego zapisu wyrażenia postawić przecinek oraz powrócić do wykonania punktu 6.
9. Za ostatnią pozycją aktualnego zapisu postawić nawias zamykający o indeksie k .
10. Zmniejszyć wartość indeksu nawiasów o jeden, tj. wykonać $k - 1 \rightarrow k$.
11. Sprawdzić, czy aktualna wartość indeksów nawiasów osiągnęła wartość zero. Jeżeli nie - powrócić do wykonania punktu 7, jeżeli tak - napisać nawias zamykający z indeksem $k=0$, oznaczający zakończenie operacji przekształcenia grafu na wyrażenie analityczne.

Postępując zgodnie z powyższym algorytmem i przyjmując za wierzchołek początkowy q_1 , można przekształcić skierowany graf zależności przedstawiony na rysunku 5.3 na wyrażenie analityczne $G_{q_1}^+$, a jako wynik operacji otrzymuje się wyrażenie (5.1).

$$G_1^+ = ({}^0 q_1 ({}^1 z_1 q_3 ({}^2 z_1 q_1, z_2 q_3)^2, z_2 q_2 ({}^2 z_1 q_3, z_2 q_3)^2)^1)^0 \quad (5.1)$$

Z odpowiedniego wierzchołka końcowego można powrócić do wierzchołka wcześniejszego, a nawet początkowego, zatem istnieje konieczność przekształcenia wyrażenia (5.1) na wyrażenie, opisujące strukturę drzewiastą z cyklami, oznaczoną symbolem $G_{q_1}^{++}$. Przy przeprowadzeniu tego typu przekształcenia, korzysta się z trzech warunków [121, 122]:

Warunek 1

Wierzchołkami końcowymi na drzewie mogą być te elementy q_r , za którymi w wyrażeniu G_i^+ stoi przecinek lub nawias zamykający. Fakt, że za danym elementem q_r w wyrażeniu G_i^+ jest przecinek lub nawias zamykający, oznacza, że dany element q_r wystąpił już w wyrażeniu G_i^+ na pozycji wcześniejszej.

Warunek 2

Jeśli dany element q_r , za którym zapisano przecinek lub nawias zamykający, podlega wyrazowi oznaczonemu tym samym symbolem q_r , lecz występującemu na wcześniejszej pozycji ciągu G_i^+ , to dany element q_r jest wierzchołkiem końcowym struktury drzewiastej i oznaczono go dodatkowo indeksem górnym.

Warunek 3

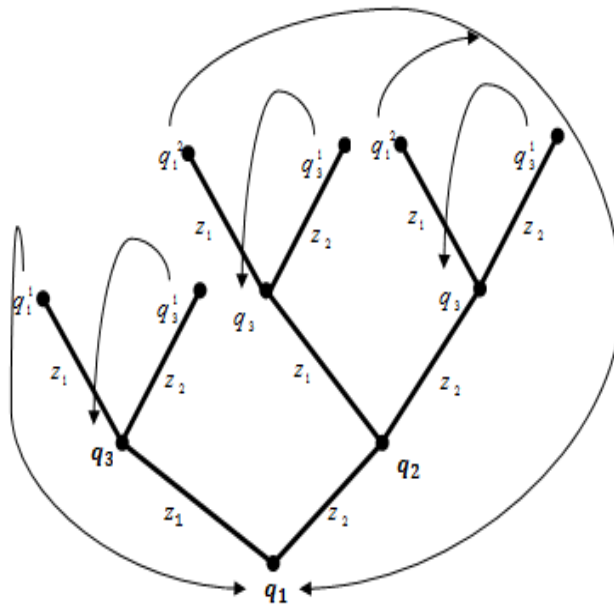
Jeśli dany element q_r , wymieniony w warunku 2, nie jest przypisany pod wyraz oznaczony w ciągu G_i^+ tym samym symbolem q_r , to element ten nie może być wierzchołkiem końcowym. W tym przypadku za rozpatrywanym elementem q , znajdującym się w członie $\dots ({}^k \dots q_r \dots)^k \dots$, zapisuje się człon $({}^{k+1} \dots)^{k+1}$, zawierający

wszystkie te elementy q_i , które podlegają pod dany element q_r . Względem elementów q_i , znajdujących się w dopisanym członie stosuje się w dalszym ciągu warunki 1, 2, 3, aż do momentu określenia elementów q_i , jako wierzchołków końcowych struktury drzewiastej.

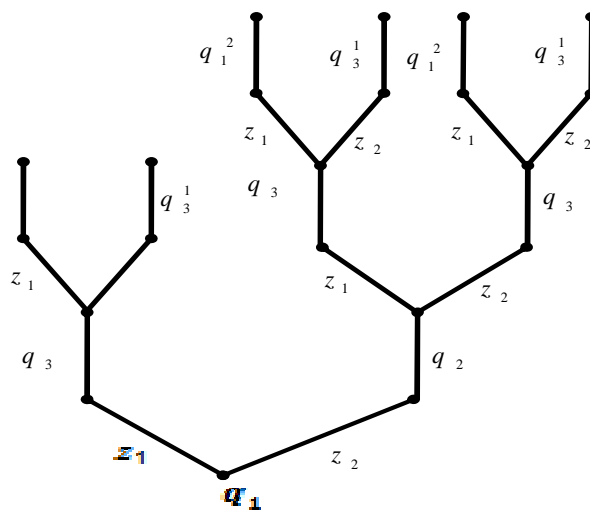
Przestrzegając powyższego przekształcenia ciągu $G_{q_1}^+$ o wyrażeniu (5.1), otrzymuje się ciąg $G_{q_1}^{++}$ opisany wyrażeniem (5.2).

$$G_{q_1}^{++} = ({}^0 q_1 ({}^1 z_1 q_3 ({}^2 z_1 q_1^1, z_2 q_3^1)^2, z_2 q_2 ({}^2 z_1 q_3 ({}^3 z_1 q_1^2, z_2 q_3^1)^3, z_2 q_3 ({}^3 z_1 q_1^2, z_2 q_3^1)^3)^2)^1)^0 \quad (5.2)$$

Na rysunku 5.4 przedstawiono strukturę drzewiastą z cyklami, natomiast na rysunku 5.5- drzewo parametryczne o wierzchołku początkowym q_1 .



Rys. 5.4. Struktura drzewiasta z cyklami z wierzchołkiem początkowym q_1



Rys. 5.5. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie z wierzchołkiem początkowym q_1

Struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie od każdego wierzchołka różnią się między sobą budową i własnościami. W odróżnieniu od tradycyjnych grafów zależności i klasyfikatorów drzewiastych, w grafie z drzewami rozgrywającymi parametrycznie istnieje związek rangi ważności wierzchołków (stanów) z wysokością struktury drzewiastej. W tradycyjnym grafie rozkładem względem różnych wierzchołków wyznaczana jest jedynie ranga ważności wierzchołków względem siebie według grupowania taksonomicznego:

- wierzchołki z dużą liczbą powiązań powinny być w ustalonej grupie,
- różne grupy względem siebie powinny być powiązane małą liczbą powiązań,
- rozkład od wierzchołka ważnego wyznacza małą liczbę grup o dużej liczności,
- rozkład od wierzchołka mało ważnego prowadzi do dużej liczby grup mało licznych.

Algorytmiczny sposób tworzenia drzew parametrycznych z modelu matematycznego układu o pierwotnym grafie zależności wyznacza optymalizacyjną metodę systematycznego poszukiwania. Celem struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie od każdego z wierzchołku grafu, jest usystematyzowanie procesu decyzyjnego i przestrzeni możliwych do uzyskania stanów analizowanego systemu. Ponadto, drzewa budowane od każdego wierzchołka różnią się własnościami. Dlatego w strukturach rozgrywających parametrycznie konieczne jest wprowadzenie współczynnika złożoności [56, 83, 84].

5.3.2. WSPÓŁCZYNNIKI ZŁOŻONOŚCI W UJECIU STRUKTUR ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

5.3.2.1. ZWYKŁY WSPÓŁCZYNNIK ZŁOŻONOŚCI STRUKTUR

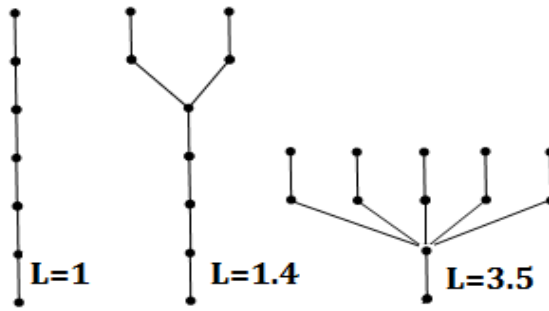
Drzewa parametryczne zbudowane od każdego wierzchołka początkowego różnią się między sobą własnościami. Stopień złożoności może być określony przez współczynnik złożoności $L(G_i^{++})$ [56, 83, 84].

$$L(G_i^{++}) = \sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i) + 1}, \quad (5.3)$$

gdzie:

- $L(G_i^{++})$ - współczynnik złożoności struktury G_i^{++} ,
- w_i - i -ty węzeł,
- $d(w_i) = \text{deg}(w_i)$ - stopień rozgałęzienia i -tego węzła,
- $h(w_i)$ - odległość i -tego węzła od korzenia,
- $W(L)$ - zbiór wszystkich węzłów,

Wartość współczynnika wzrasta wraz ze stopniem złożoności danej struktury. Rysunek 5.6 przedstawia przykładowe drzewa parametryczne o różnych wartościach współczynnika L .

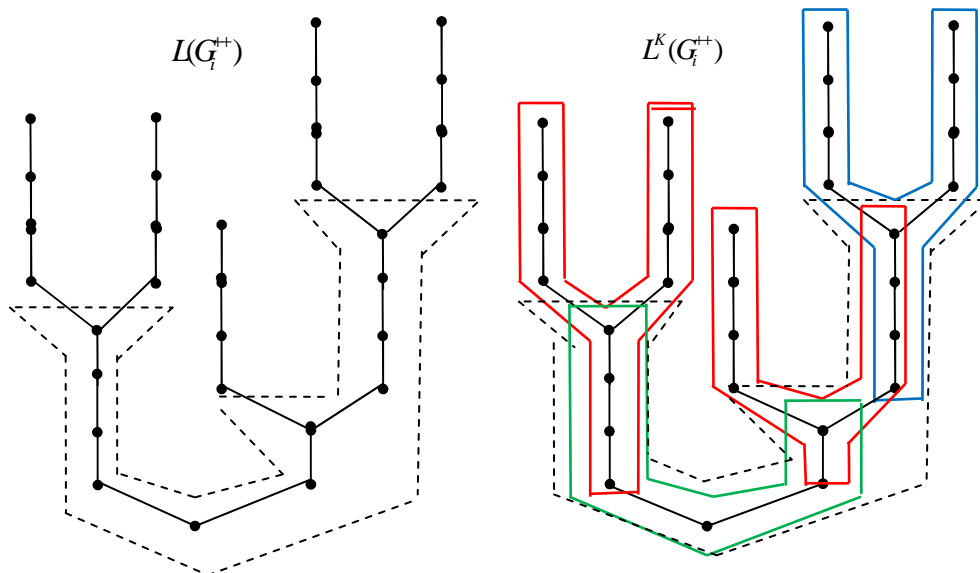


Rys. 5.6. Drzewa rozgrywające parametrycznie z różnymi wartościami współczynnika L .

Jednak ocena rozbudowy drzewa w ocenie współczynnika złożoności jest tylko przybliżona. W celu dokładnego rozróżnienia stopnia ważności struktur rozgrywających parametrycznie, otrzymanych w wyniku rozkładu grafu zależności od każdego z wierzchołków, wprowadza się kompleksowy współczynnik złożoności [69]. Poprzez uwzględnienie decyzji nie rozgałęziających się, możliwy jest dokładniejszy wybór najlepszej struktury w ocenie problemu decyzyjnego.

5.3.2.2. KOMPLEKSOWY WSPÓŁCZYNNIK ZŁOŻONOŚCI STRUKTURY

Zwykły współczynnik złożoności struktury opisuje strukturę w skali makro uwzględniając jedynie liczbę węzłów i rozgałęzień na strukturze. W kompleksowym współczynniku złożoności uwzględniono również stopień złożoności wszystkich liści wychodzących z każdego rozgałęziającego się węzła. Na rysunku 5.7 schematycznie przedstawiono sposób opisu drzewa rozgrywającego parametrycznie za pomocą kompleksowego i zwykłego współczynnika złożoności struktury [69, 83, 84].



Rys. 5.7. Schematyczny opis struktury rozgrywającej parametrycznie za pomocą współczynnika złożoności $L(G_i^{++})$ oraz kompleksowego współczynnika złożoności $L^K(G_i^{++})$

Kompleksowy współczynnik złożoności struktury określony jest jako $L^K(G_i^{++})$ [69]:

$$L^K(G_i^{++}) = \sum_{w_i \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{l \in L} \frac{1}{h_l}} \tag{5.4}$$

$L^K(G_i^{++})$ - kompleksowy współczynnik złożoności struktury G_i^{++} ,

w_i -*i*-ty węzeł;

$d(w_i) = \text{deg}(w_i)$ - stopień rozgałęzienia *i*-tego węzła;

$h(w_i)$ - odległość *i*-tego węzła od korzenia;

$W(L)$ - zbiór wszystkich węzłów,

L - liczba liści dla *i*-tego węzła rozgałęziającego się ($\text{deg}(w_i) \geq 2$),

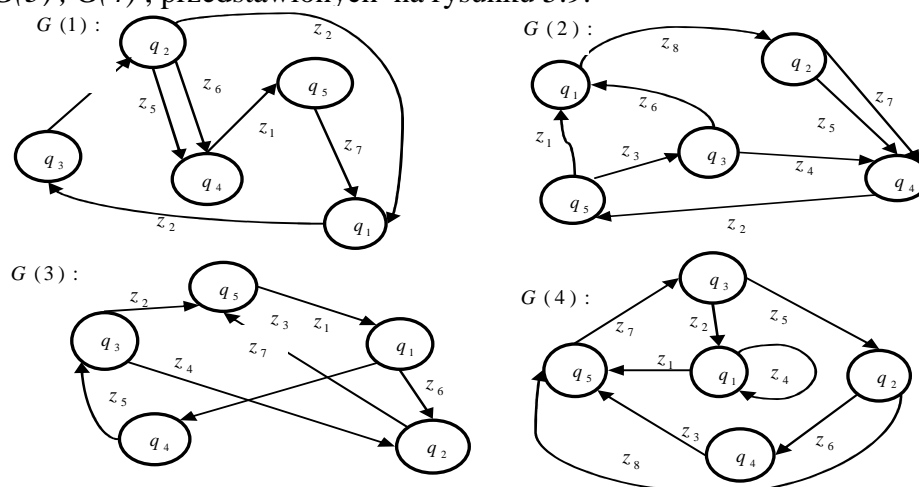
h_l - wysokość (złożoność) *i*-tego liścia.

Na rysunku 5.8 przedstawiono struktury rozgrywające parametrycznie z rysunku 5.6 z dodatkowo obliczonym kompleksowym współczynnikiem złożoności L^K .

Udoskonalony kompleksowy współczynnik złożoności struktury uwzględnia stopień złożoności wszystkich pojedynczych liści wychodzących z węzłów. Na wartość kompleksowego współczynnika złożoności struktury w dużej mierze wpływa stopień złożoności pojedynczych węzłów. Końcowe liście struktury powinny być możliwie jak najkrótsze oraz wychodzić z jak najmniejszej ilości rozgałęzień. Nadrzędnym celem jest, aby proces analizy danego układu/systemu był jak najkrótszy i posiadał minimalną liczbę stadiów decyzyjnych. W dowolnych badanych systemach (układach), wobec nowych zalecanych warunków pracy zmieniają swoje zachowanie niewiadome funkcje zależne od czasu. Dlatego obowiązuje zasada, że wierzchołki grafu określają funkcje zależne od czasu, natomiast krawędziami opisane są decyzje.

5.3.3. STRUKTURY DRZEWIASTE ROZGRYWAJĄCE PARAMETRYCZNIE

Analiza modelu matematycznego danego układu maszynowego lub przebiegu procesu produkcyjnego może być opisana za pomocą grafów rozgrywających parametrycznie o różnych przykładowych powiązaniach wierzchołkowych $G(1)$, $G(2)$, $G(3)$, $G(4)$, przedstawionych na rysunku 5.9.



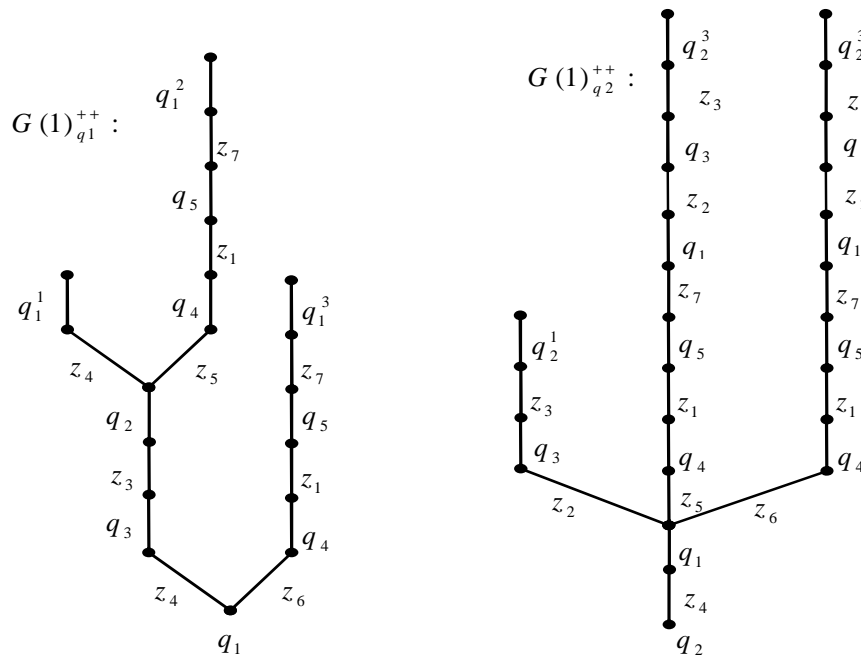
Rys. 5.9. Grafy rozgrywające parametrycznie $G(1)$, $G(2)$, $G(3)$, $G(4)$ z różnymi powiązaniami wierzchołkowymi.

W wyniku rozkładu grafów od wybranych wierzchołków w pierwszym etapie tworzone jest drzewo z cyklami, a następnie ogólne drzewo rozgrywające parametrycznie. Każde z drzew opisano właściwym zapisem analitycznym: początkowy $G(1)_i^+$, $G(2)_i^+$, $G(3)_i^+$, $G(4)_i^+$ oraz ostateczny: $G(1)_i^{++}$, $G(2)_i^{++}$, $G(3)_i^{++}$, $G(4)_i^{++}$ (gdzie i - początkowy wierzchołek rozkładu grafu).

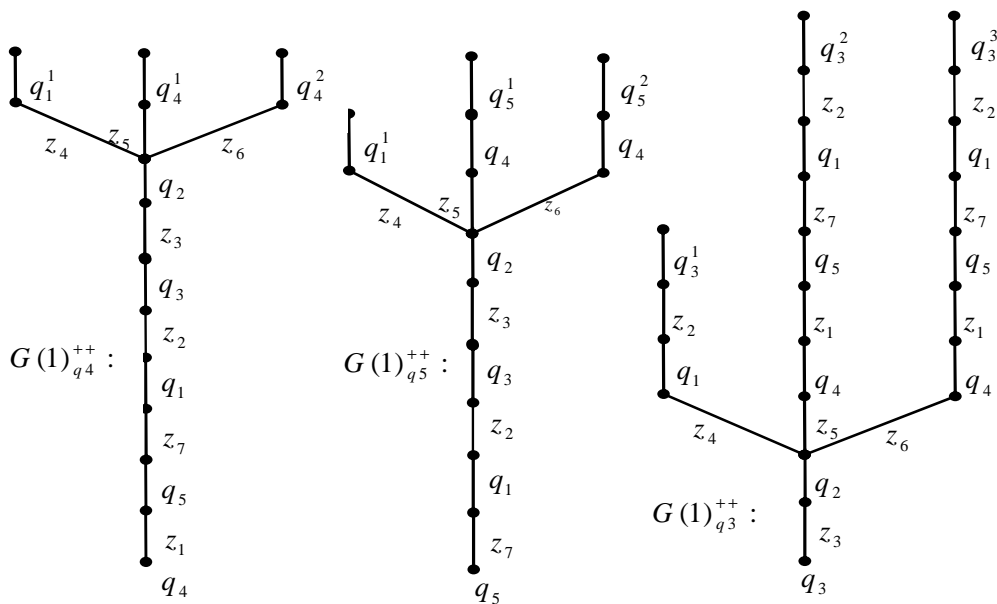
Rozkładając graf $G(1)$ od każdego z wierzchołków: q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 , otrzymano zbiór drzew rozgrywających parametrycznie:

$$D(1) = \{G(1)_{q_1}^{++}, G(1)_{q_2}^{++}, G(1)_{q_3}^{++}, G(1)_{q_4}^{++}, G(1)_{q_5}^{++}\}$$

Drzewa rozgrywające parametrycznie przedstawiono na rysunkach 5.10 i 5.11.



Rys. 5.10. Struktury rozgrywające parametrycznie $G(1)_{q_1}^{++}$ i $G(1)_{q_2}^{++}$



Rys. 5.11. Struktury rozgrywające parametrycznie $G(1)_{q_3}^{++}$, $G(1)_{q_4}^{++}$ i $G(1)_{q_5}^{++}$

Właściwe zapisy analityczne $G(1)_i^+$ oraz $G(1)_i^{++}$ struktur z rysunków 5.10 i 5.11:

$$G(1)_{q_1}^+ = ({}^0 q_1 ({}^1 z_2 q_3 ({}^2 z_3 q_2 ({}^3 z_4 q_1, z_5 q_4 ({}^4 z_1 q_5 ({}^5 z_7 q_1)^5)^4, z_6 q_4)^3)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_1}^{++} = ({}^0 q_1 ({}^1 z_2 q_3 ({}^2 z_3 q_2 ({}^3 z_4 q_1^1, z_5 q_4 ({}^4 z_1 q_5 ({}^5 z_7 q_1^2)^5)^4, z_6 q_4 ({}^4 z_1 q_5 ({}^5 z_7 q_1^3)^5)^4)^3)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_2}^+ = ({}^0 q_2 ({}^1 z_4 q_1 ({}^2 z_2 q_3 ({}^3 z_3 q_2)^3)^2, z_5 q_4 ({}^2 z_1 q_5 ({}^3 z_7 q_1 ({}^4 z_2 q_3 ({}^5 z_3 q_2^2)^5)^4)^3)^2, z_6 q_4)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_2}^{++} = ({}^0 q_2 ({}^1 z_4 q_1 ({}^2 z_2 q_3 ({}^3 z_3 q_2^1)^3)^2, z_5 q_4 ({}^2 z_1 q_5 ({}^3 z_7 q_1 ({}^4 z_2 q_3 ({}^5 z_3 q_2^2)^5)^4)^3)^2, z_6 q_4 ({}^2 z_1 q_5 ({}^3 z_7 q_1 ({}^4 z_2 q_3 ({}^5 z_3 q_2^3)^5)^4)^3)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_3}^{++} = ({}^0 q_3 ({}^1 z_3 q_2 ({}^2 z_4 q_1 ({}^3 z_2 q_3)^3, z_5 q_4 ({}^3 z_1 q_5 ({}^4 z_7 q_1)^4)^3, z_6 q_4)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_3}^{++} = ({}^0 q_3 ({}^1 z_3 q_2 ({}^2 z_4 q_1 ({}^3 z_2 q_3^1)^3, z_5 q_4 ({}^3 z_1 q_5 ({}^4 z_7 q_1 ({}^5 z_2 q_3^2)^5)^4)^3, z_6 q_4 ({}^3 z_1 q_5 ({}^4 z_7 q_1 ({}^5 z_2 q_3^3)^5)^4)^3)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_4}^{++} = ({}^0 q_4 ({}^1 z_1 q_5 ({}^2 z_7 q_1 ({}^3 z_2 q_3 ({}^4 z_3 q_2 ({}^5 z_4 q_1, z_5 q_4, z_6 q_4)^5)^4)^3)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_4}^{++} = ({}^0 q_4 ({}^1 z_1 q_5 ({}^2 z_7 q_1 ({}^3 z_2 q_3 ({}^4 z_3 q_2 ({}^5 z_4 q_1^1, z_5 q_4^1, z_6 q_4^2)^5)^4)^3)^2)^1)^0,$$

$$G(1)_{q_5}^{++} = ({}^0 q_5 ({}^1 z_7 q_1 ({}^2 z_2 q_3 ({}^3 z_3 q_2 ({}^4 z_4 q_1^1, z_5 q_4 ({}^5 z_1 q_5^1)^5, z_6 q_4 ({}^5 z_1 q_5^2)^5)^4)^3)^2)^1)^0,$$

Dla każdej ze struktur rozgrywających parametrycznie $G(1)_{q_1}^{++}$, $G(1)_{q_2}^{++}$, $G(1)_{q_3}^{++}$, $G(1)_{q_4}^{++}$ i

$G(1)_{q_5}^{++}$ obliczono współczynnik złożoności struktury wg wzoru (5.4):

$$L^K(G(1)_{q_1}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{1}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{6}} \right) + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{6}} \right) = 10,27,$$

$$L^K(G(1)_{q_2}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{1}{0+1} + 0 \right) + \left(\frac{3}{2+1} + \frac{3}{\frac{1}{4} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10}} \right) = 8,66,$$

$$L^K(G(1)_{q_3}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{1}{0+1} + 0 \right) + \left(\frac{3}{2+1} + \frac{3}{\frac{1}{4} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10}} \right) = 8,66,$$

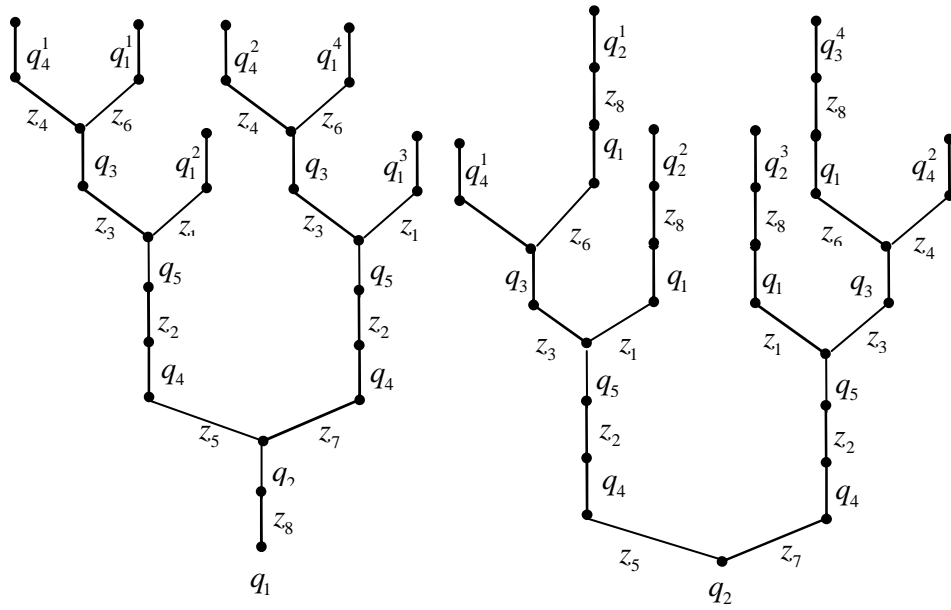
$$L^K(G(1)_{q_4}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{1}{0+1} + 0 \right) + \left(\frac{3}{8+1} + \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right) = 3,33,$$

$$L^K(G(1)_{q_5}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{1}{0+1} + 0 \right) + \left(\frac{3}{6+1} + \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} \right) = 4,01,$$

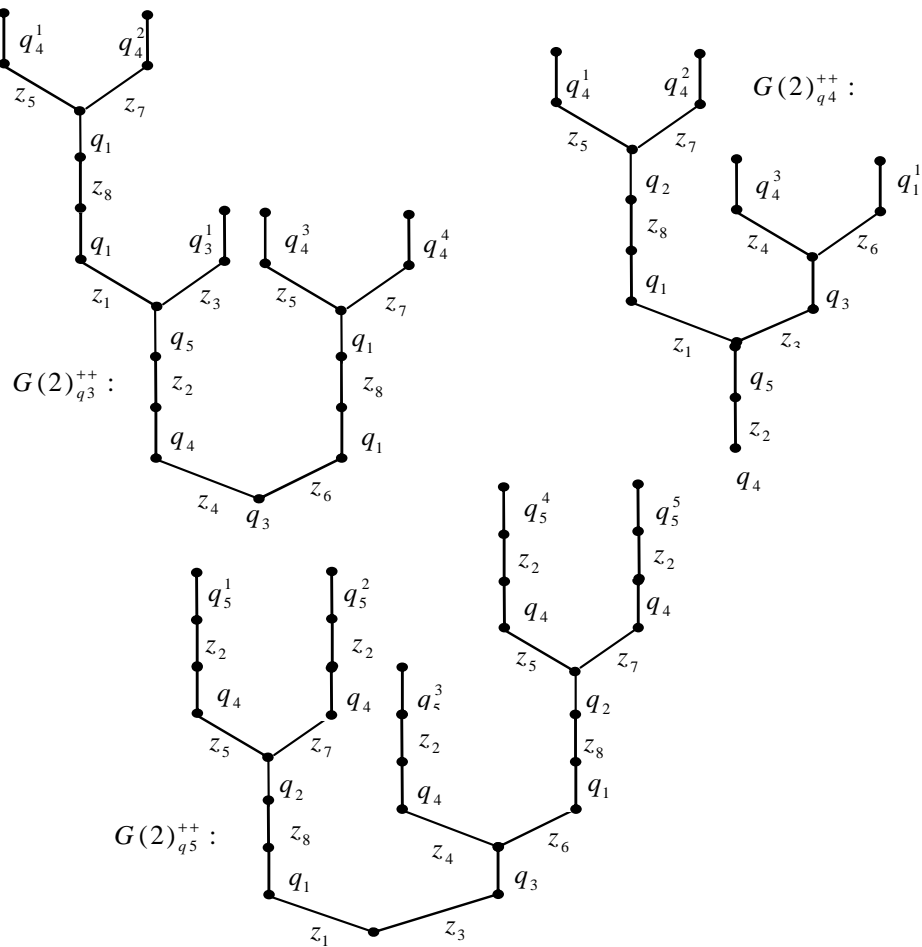
W przypadku grafu $G(2)$ otrzymuje się zbiór $D(2)$ struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie:

$$D(2) = \{G(2)_{q_1}^{++}, G(2)_{q_2}^{++}, G(2)_{q_3}^{++}, G(2)_{q_4}^{++}, G(2)_{q_5}^{++}\}.$$

Drzewa rozgrywające parametrycznie przedstawiono na rysunkach 5.12 i 5.13.



Rys. 5.12. Drzewa rozgrywające parametrycznie $G(2)_{q_1}^{++}$ i $G(2)_{q_2}^{++}$



Rys. 5.13. Drzewa rozgrywające parametrycznie $G(2)_{q_3}^{++}$, $G(2)_{q_4}^{++}$ i $G(2)_{q_5}^{++}$

Właściwe zapisy analityczne $G(2)_i^+$ oraz $G(2)_i^{++}$ dla struktur z rysunków 5.12 i 5.13:

$$\begin{aligned}
 G(2)_{q_1}^+ &= ({}^0 q_1 ({}^1 z_8 q_2 ({}^2 z_5 q_4 ({}^3 z_2 q_5 ({}^4 z_3 q_3 ({}^5 z_4 q_4, z_6 q_1)^5, z_1 q_1)^4)^3, z_7 q_4)^2)^1)^0, \\
 G(2)_{q_1}^{++} &= ({}^0 q_1 ({}^1 z_8 q_2 ({}^2 z_5 q_4 ({}^3 z_2 q_5 ({}^4 z_3 q_3 ({}^5 z_4 q_4^1, z_6 q_1^1)^5, z_1 q_1^2)^4)^3, z_7 q_4 ({}^3 z_2 q_5 \\
 &({}^4 z_1 q_1^3 z_3 q_3 ({}^5 z_4 q_4^2, z_6 q_1^4)^5)^4)^3)^1)^0, \\
 G(2)_{q_2}^+ &= ({}^0 q_2 ({}^1 z_5 q_4 ({}^2 z_2 q_5 ({}^3 z_1 q_1 ({}^4 z_8 q_2)^4, z_3 q_3 ({}^4 z_4 q_4, z_6 q_1)^4)^3)^2, z_7 q_4)^1)^0, \\
 G(2)_{q_2}^{++} &= ({}^0 q_2 ({}^1 z_5 q_4 ({}^2 z_2 q_5 ({}^3 z_1 q_1 ({}^4 z_8 q_2^1)^4, z_3 q_3 ({}^4 z_4 q_4^1, z_6 q_1 ({}^5 z_8 q_2^2)^5)^4)^3)^2, \\
 &z_7 q_4 ({}^2 z_2 q_5 ({}^3 z_1 q_1 ({}^4 z_8 q_2^3)^4, z_3 q_3 ({}^4 z_4 q_4^2, z_6 q_1 ({}^5 z_8 q_2^4)^5)^1)^0, \\
 G(2)_{q_3}^+ &= ({}^0 q_3 ({}^1 z_4 q_4 ({}^2 z_2 q_5 ({}^3 z_1 q_1 ({}^4 z_8 q_2 ({}^5 z_5 q_4, z_7 q_4)^5)^4, z_3 q_3)^3)^2, z_6 q_1)^1)^0, \\
 G(2)_{q_3}^{++} &= ({}^0 q_3 ({}^1 z_4 q_4 ({}^2 z_2 q_5 ({}^3 z_1 q_1 ({}^4 z_8 q_2 ({}^5 z_5 q_4^1, z_7 q_4^2)^5)^4, z_3 q_3^1)^3)^2, z_6 q_1 ({}^2 z_8 q_2 ({}^3 z_5 q_4^3, z_7 q_4^4)^3)^2)^1)^0, \\
 G(2)_{q_4}^+ &= ({}^0 q_4 ({}^1 z_2 q_5 ({}^2 z_1 q_1 ({}^3 z_8 q_2 ({}^4 z_5 q_4, z_7 q_4)^4)^3, z_3 q_3 ({}^3 z_4 q_4, z_6 q_1)^3)^2)^1)^0, \\
 G(2)_{q_4}^{++} &= ({}^0 q_4 ({}^1 z_2 q_5 ({}^2 z_1 q_1 ({}^3 z_8 q_2 ({}^4 z_5 q_4^1, z_7 q_4^2)^4)^3, z_3 q_3 ({}^3 z_4 q_4^3, z_6 q_1^3)^3)^2)^1)^0, \\
 G(2)_{q_5}^+ &= ({}^0 q_5 ({}^1 z_1 q_1 ({}^2 z_8 q_2 ({}^3 z_5 q_4 ({}^4 z_2 q_5)^4, z_7 q_4)^3)^2, z_3 q_3 ({}^3 z_4 q_4, z_6 q_1)^3)^2)^1)^0, \\
 G(2)_{q_5}^+ &= ({}^0 q_5 ({}^1 z_1 q_1 ({}^2 z_8 q_2 ({}^3 z_5 q_4 ({}^4 z_2 q_5^1)^4, z_7 q_4 ({}^4 z_2 q_5^2)^4)^3)^2, z_3 q_3 ({}^2 z_4 q_4 ({}^3 z_2 q_5^3)^3, \\
 &z_6 q_1 ({}^3 z_8 q_2 ({}^4 z_5 q_4 ({}^5 z_2 q_5^4)^5, z_7 q_4 ({}^5 z_2 q_5^5)^2)^1)^0
 \end{aligned}$$

Współczynnik złożoności drzew rozgrywających parametrycznie $G(2)_{q_1}^{++}$,

$G(2)_{q_2}^{++}$, $G(2)_{q_3}^{++}$, $G(2)_{q_4}^{++}$ i $G(2)_{q_5}^{++}$ obliczono wg wzoru (5.4):

$$L^K(G(2)_{q_1}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{1}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}} \right) + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right) + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right) +$$

$$\left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right) + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right) + \left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right) = 15,69,$$

$$L^K(G(2)_{q_2}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = 14,02,$$

$$L^K(G(2)_{q_3}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = 11,66,$$

$$L^K(G(2)_{q_4}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = 9,02,$$

$$L^K(G(2)_{q_5}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = 12,02,$$

Podobną analizę można przeprowadzić w przypadku grafów $G(3)$ i $G(4)$.

W grafach zależności rozgrywane parametrycznie analizowane są decyzje tzw. 'związane'. Wyniki uzyskane w kolejnych decyzjach zależą od decyzji początkowych, co umożliwia tworzenie modeli dynamicznych. Na drzewach rozgrywających parametrycznie od każdego z wierzchołku grafu opisano proces decyzyjny i przestrzeń możliwych do uzyskania stanów analizowanego systemu. W każdej otrzymanej strukturze rozgrywanej parametrycznie konieczne jest obliczenie kompleksowego współczynnika złożoności. W strukturach drzewiastych w ujęciu przyrostu entropii (informacji) jako heurystyki do wyboru parametru decyzyjnego, ważne jest występowanie rozgałęzień jak najdalej od korzenia struktury. Wówczas zachowuje się jak najdłuższy ciąg informacyjny i dopiero przy odgałęzieniu, wybór zmiennych decyzyjnych jest odpowiednio rozdzielony do nowych węzłów (poddrzew). Dlatego, wartość kompleksowych współczynników złożoności drzew, w których występują rozgałęzienia na najwyższych piętrach, jest najmniejsza. Wartość kompleksowego współczynnika złożoności struktury zależy od stopnia złożoności pojedynczych węzłów i pojedynczych rozgałęzień (końcowych liści), które powinny być możliwie jak najkrótsze. Nadrzędnym celem procesu analizy danego układu/systemu jest minimalna liczba stadiów decyzyjnych.

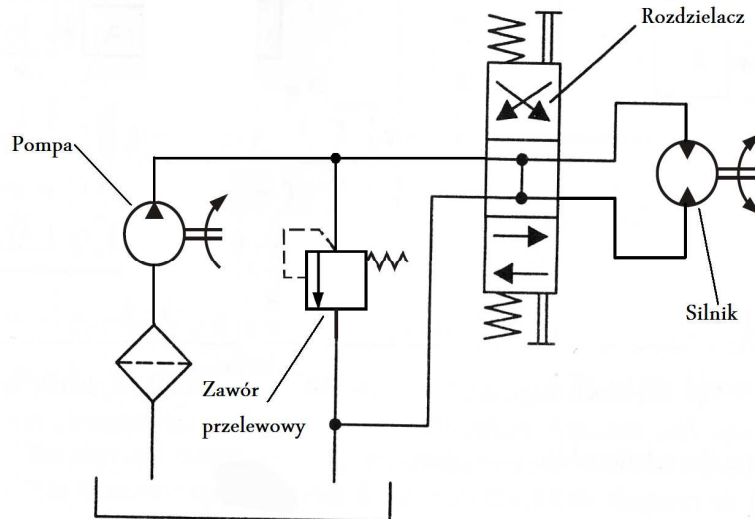
Gdyby zastosować graf zależności w opisie modelu matematycznego układu maszynowego, który opisano układem równań algebraiczno-różniczkowo-całkowych, wtedy wierzchołkami grafu oceniono funkcje zależne od czasu, natomiast decyzjami-parametry konstrukcyjne i /lub eksploatacyjne oraz przekształcenia analityczno-algebraiczne [68, 64, 71, 76, 63, 85, 54, 78, 61, 56, 60, 70, 80]. Aby daną strukturę układu zaprojektować na inne warunki pracy, należy zmienić wartości liczbowe parametrów konstrukcyjno- eksploatacyjnych. Wobec nowych zalecanych warunków pracy zmienią swoje zachowanie niewiadome funkcje zależne od czasu. Stosując kompleksowy współczynnik złożoności, uzyskano możliwość wyboru najlepszej struktury w optymalizacji dyskretnej.

5.4. ZASTOSOWANIE GRAFU ZALEŻNOŚCI I STRUKTUR ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE W BADANIU WŁASNOŚCI UKŁADU MASZYNOWEGO

Model matematyczny danego układu maszynowego opisano układem równań algebraiczno-różniczkowo-całkowych, ze znanymi wartościami liczbowymi parametrów konstrukcyjno- eksploatacyjnych i niewiadomymi funkcjami zależnymi od czasu. Aby dany układ zaprojektować na inne warunki działania, należy zmienić wartości liczbowe parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych sprawdzając jak niewiadome funkcje zależne od czasu zachowują się wobec zalecanych nowych warunków. Analizując równań hydrauliczne określono wzajemne powiązania wszystkich funkcji, zależnych od czasu. W wyniku zapisania i przeprowadzenia rozkładu grafu zależności tych funkcji, otrzymuje się w postaci graficznej grupy rozkładu kolejnych podukładów danego układu maszynowego oraz zbiór odpowiednich parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

Przykład 5.1

Na rysunku 5.14 [133], przedstawiono uproszczony schemat hydrauliczny układu z pompą zębatą, zaworem przelewowym, rozdzielaczem i silnikiem obciążonym dużym masowym momentem bezwładności, natomiast na rysunku 5.15 przedstawiono jego schemat blokowy.



Rys. 5.14. Schemat hydrauliczny układu

Model matematyczny układu z rysunku 5.14 ma postać:

1. Równanie natężenia przepływu z pompą

$$Q_S = Q_p - \frac{1}{R_{p0}} p_p - Q_{zp}, \text{ gdzie } \frac{1}{R_{p0}} = \frac{1}{R_{pp}} + \frac{1}{R_{pz}} + \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_s}, \quad (5.5)$$

oraz:

p_p - ciśnienie w linii tłocznej pompy,

Q_p - wydajność teoretyczna pompy,

Q_{zp} - natężenie przepływu przez zawór przelewowy,

Q_S - natężenie przepływu podawane do części odbiorczej układu,

R_{p0} - wypadkowa oporność przecieków wewnętrznych w układzie,

R_{pp} - oporność przecieków pompy określona ze sprawności wolumetrycznej,

R_{pz} - oporność przecieków zaworu przelewowego określona z nachylenia

charakterystyki statycznej zaworu dla ciśnień poniżej ciśnienia otwarcia ,

R_r - oporność przecieków rozdzielacza,

R_s - oporność przecieków silnika określona za sprawności wolumetrycznej.

2. Równanie zaworu przelewowego

$$Q_{zp} = 0 \text{ dla } p_p \leq p_0,$$

$$\frac{dQ_{zp}}{dt} = \frac{K}{T} p_p - \frac{1}{T} Q_{zp} \quad \text{dla } p_p > p_0, \quad (5.6)$$

T - stała czasowa zaworu przelewowego,

K - przewodność zaworu przelewowego (nachylenie charakterystyki statycznej w zakresie $p_p > p_0$)

3. Równanie strat ciśnienia na odcinku pompa – silnik

$$p_p = R_l Q_s + p_s \quad (5.7)$$

gdzie:

p_s - ciśnienie w komorze silnika,

Q_s - natężenie przepływu podawane do części odbiorczej układu na uzupełnienie strat wywołanych ściśliwością cieczy i niezbędne do zapewnienia silnikowi odpowiedniej prędkości obrotowej,

R_l - oporność instalacji hydraulicznej. Oporność instalacji uwzględnia straty ciśnienia w przewodach i na rozdzielaczu.

4. Równanie dopływu do silnika

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{1}{C} Q_s - \frac{D}{C} \omega, \quad (5.8)$$

gdzie:

ω - prędkość kątowna wału silnika,

D - chłonność jednostkowa silnika

C - pojemność układu

$$C = \frac{V}{B},$$

gdzie:

V - objętość cieczy w linii tłocznej układu,

B - zastępczy moduł ściśliwości cieczy uwzględniający również sprężystość ścianek przewodów,

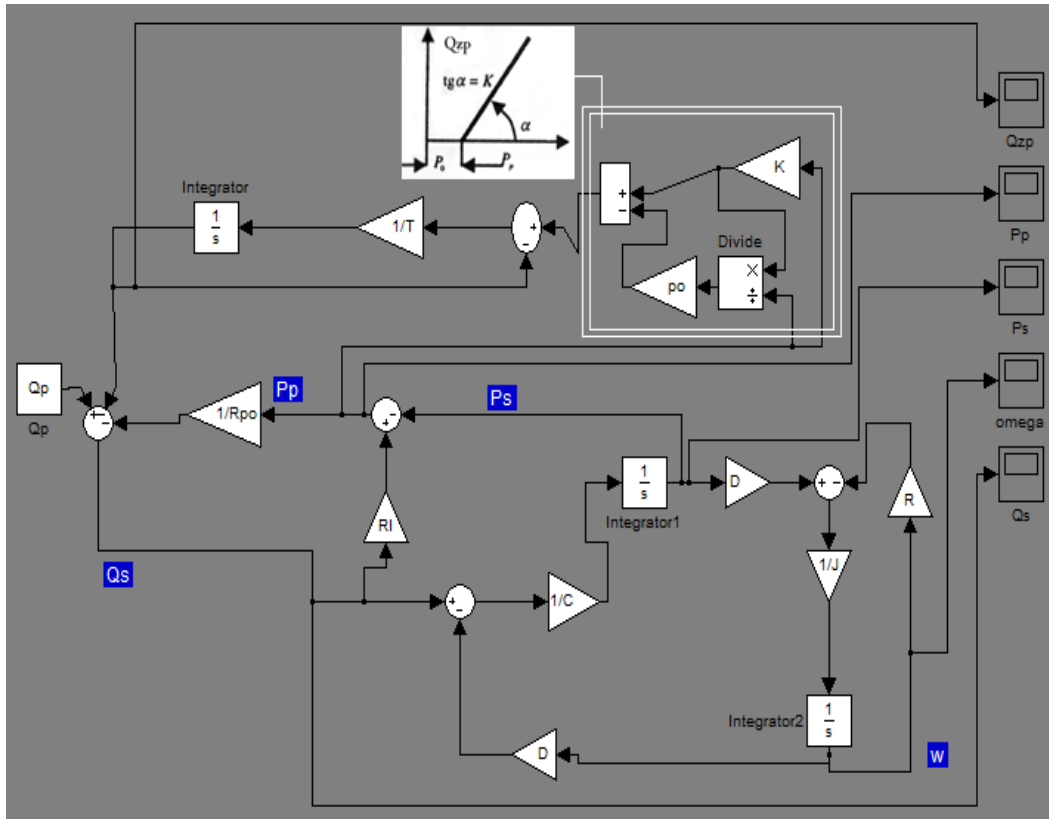
5. Równanie momentów silnika

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{D}{J} p_s - \frac{R}{J} \omega, \quad (5.9)$$

gdzie:

R - oporność mechaniczna w ruchu obrotowym silnika,

J - duży masowy moment bezwładności mas wirujących, obciążający silnik zębaty .



Rys. 5.15. Schemat blokowy układu

Obciążenie zewnętrzne w postaci momentu MS nie opisano dosłownie modelem matematycznym chociaż zależności Qp oraz ω zaznaczono informacyjnie jako k . W szczególności, jeśli nie jest obciążony silnik, tzn. nawet cały układ hydrauliczny, to ciśnienie zasilające należy porównać ze stratami hydrauliczno-mechanicznymi.

W opracowaniu wielkością k oznaczono sens informacyjny, w ogólnym przypadku analizy strukturalnej należy, natomiast uwzględnić przepływy informacji, masy i energii [90]:

$$M_s = \frac{V_s}{2\pi} p_s - \left(J \frac{d}{dt} + B \right) \omega_s, \tag{5.10}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{V_s} \left[Q_s - \left(C_h \frac{d}{dt} + K_w \right) p_s \right], \tag{5.11}$$

gdzie:

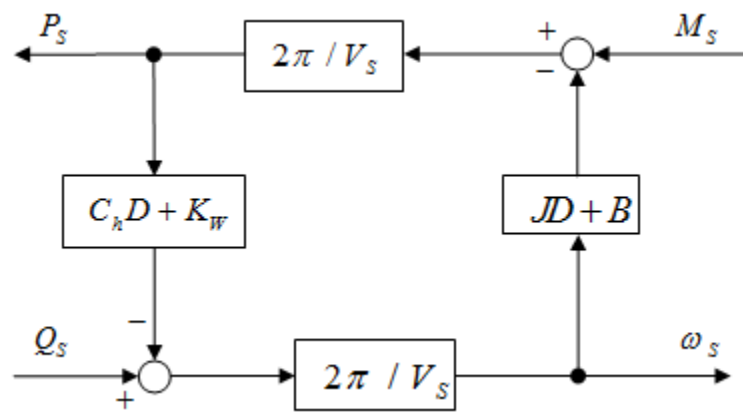
- V_s - objętość robocza silnika,
- J - moment bezwładności silnika,
- B - współczynnik tarcia lepkiego w silniku,
- C_h - pojemność hydrauliczna silnika,
- K_w - współczynnik przecieków w silniku,

Równania (5.10) i (5.11) można przekształcić do postaci (5.12) i (5.13).

$$\frac{d}{dt} p_s = \frac{1}{C_h} Q_s - \frac{V_s}{2\pi C_h} \omega - \frac{K_w}{C_h} p_s, \quad (5.12)$$

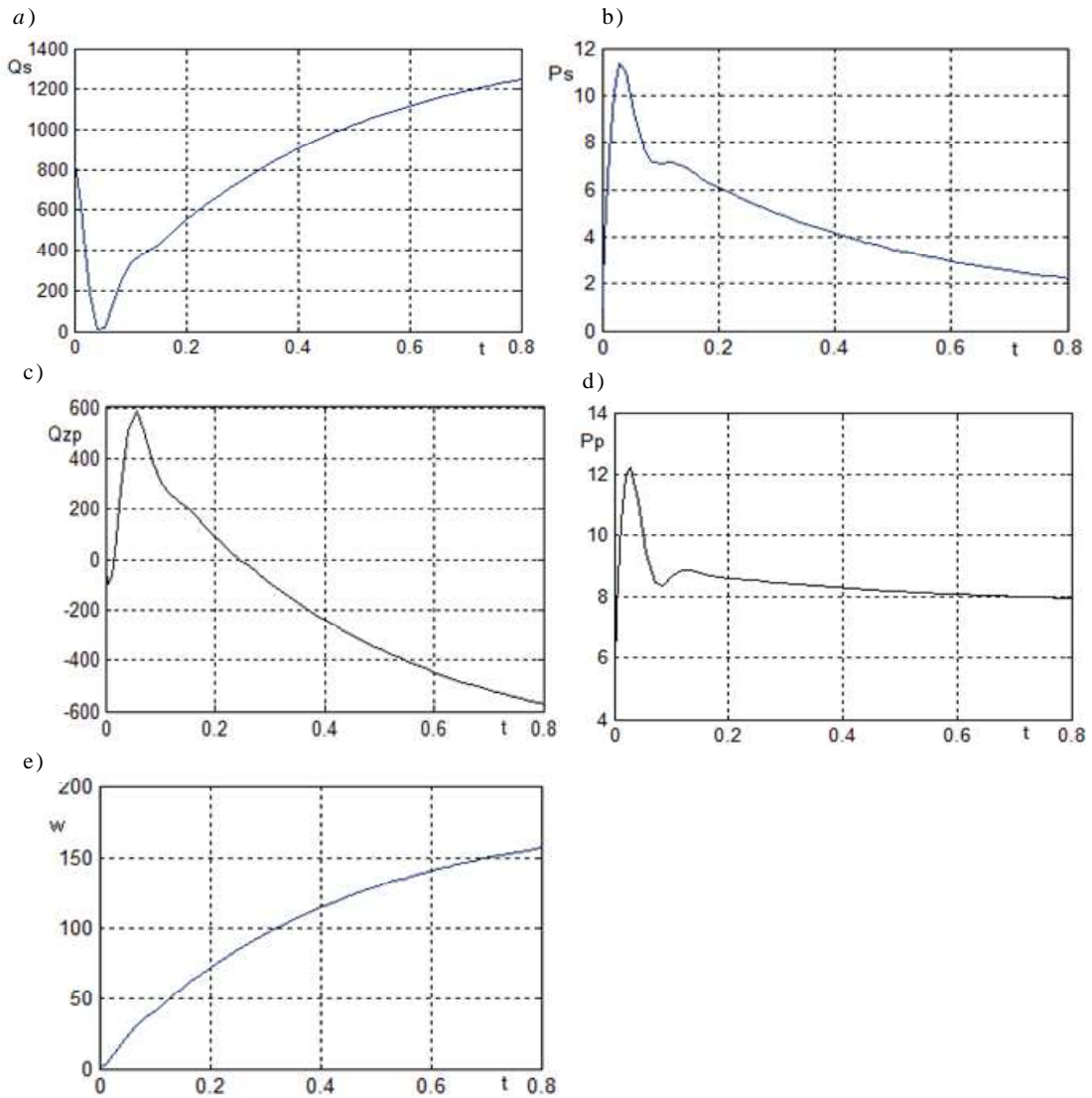
$$\frac{d}{dt} \omega_s + \frac{M_s}{J} = \frac{V_s}{2\pi} \frac{p_s}{J} - \frac{B}{J} \omega_s, \quad (5.13)$$

co jest zgodne z ogólnym modelem dynamicznym silnika [90] (Rys. 5.16).



Rys. 5.16. Ogólny model dynamiczny silnika

Na rysunku 5.17 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe następujących wartości liczbowych współczynników równań: $T=0,1$ s, $p_0=87,8 \frac{kG}{cm^2}$, $J=1,68$ kGcms, $D=8$ cm³, $1/C=6,95 \frac{kG}{cm^2}$, $B=0,6 \cdot 10^4 \frac{kG}{cm^2}$, $1/Rp_0=3,9 \frac{cm^5}{kgs}$, $K=75,8 \frac{cm^5}{kgs}$, $R=0,455$ kGcm / s, $Q_p=1075 \frac{cm^3}{s}$.



Rys. 5.17. Przebiegi czasowe: a) natężenia przepływu Q_s , b) ciśnienia P_s c) natężenia przepływu Q_{zp} , d) ciśnienia w linii tłoczenia pompy P_p , e) prędkości kątowej silnika ω

Niewiadome funkcje (parametry) P_p , P_s , Q_s , Q_{zp} , ω są obliczane m.in. na podstawie danego wejścia układu Q_p , a więc istnieje układ systemowy (Rys. 5.18).

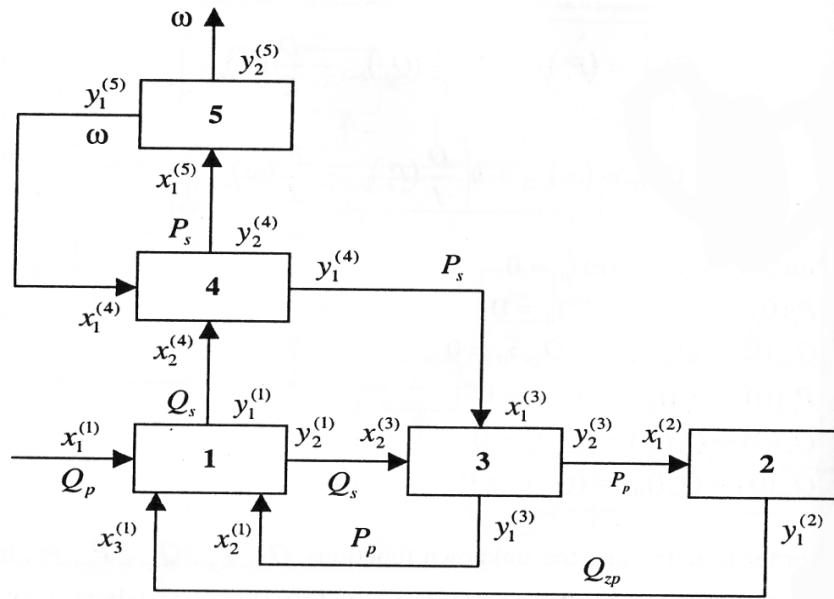
Wynikają stąd następujące zapisy grafu zależności:

1. Sygnały powstałe z danych sygnałów :

$$Q_{zp}(P_p); P_p(Q_s, P_s); P_s(Q_s, \omega); \omega(P_s); Q_s(Q_p, P_p, Q_{zp});$$

2. Sygnały tworzące dane sygnały:

$$Q_s(P_p, P_s); P_p(Q_{zp}, Q_s); Q_{zp}(Q_s); P_s(P_p, \omega); Q_p(Q_s); \omega(P_s).$$



Rys. 5.18. Struktura systemowa układu hydraulicznego.

Ogólnie można otrzymać rozwiązanie grafowe w ujęciu drzewiastym dla układu hydraulicznego z rysunku 5.14 przy uwzględnieniu parametrów konstrukcyjnych i następujących warunkowych zapisów zależności:

1. Sygnały powstałe z danych sygnałów:

$$Q_{zp}(P_p | K, T); P_p(P_s; Q_s | R_l); P_s(Q_s | C; \omega | C, D); \omega(P_s | D, J; R);$$

$$Q_s(Q_p; P_p | R_{p0}; Q_{zp});$$

2. Sygnały tworzone dane sygnały:

$$Q_s(P_p, R_l; P_s, C); P_p(Q_{zp}, K, T; Q_s, R_{p0}); Q_{zp}(Q_s); P_s(P_p; \omega, D, J);$$

$$Q_p(Q_s); \omega(P_s, D, C).$$

W tym przypadku ostatecznie otrzymano rozwiązanie grafowe (przy wierzchołku początkowym Q_p), które jest wieloznaczne (wielokrotne), z punktu widzenia kolejnego otrzymywania konkurencyjnych podgrup drugiego i czwartego rzędu, wg rozkładu tradycyjnego grafu zależności [42, 43].

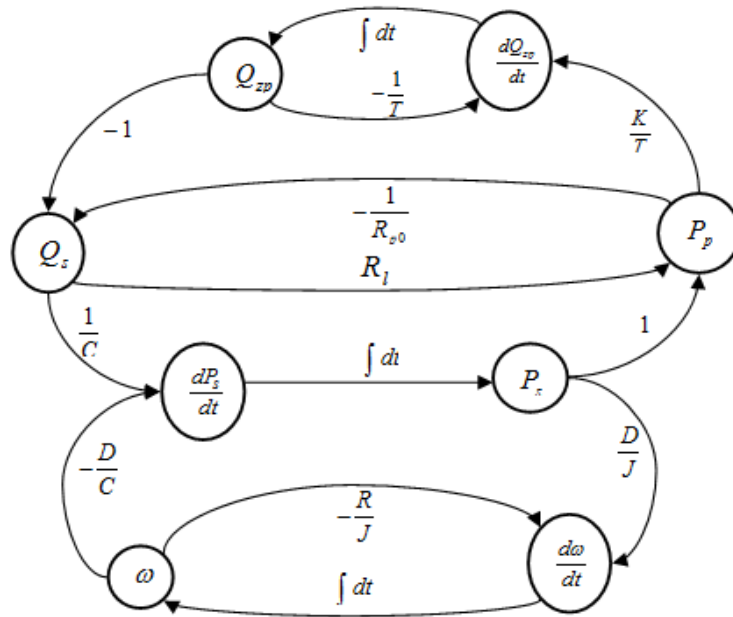
$$-({Q_p, Q_s, P_p, P_s, R_l, C}), --({T, Q_{zp}}, {K}), --({Q_{zp}}, {K}, {T}),$$

$$--({K, Q_{zp}}, {T}), ---{R_{p0}}, ----({\omega, J}, {D}), ----({\omega, D}, {J}) [42, 43].$$

5.4.1. SKIEROWANY GRAF PRZEPEŁYWU SYGNAŁÓW STRUKTUR ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

Analizując równań hydrauliczne określono wzajemne powiązania wszystkich funkcji zależnych od czasu. W wyniku zapisania i przeprowadzenia rozkładu grafu zależności tych funkcji, otrzymano grupy rozkładu o własnościach kolejnych podukładów danego układu maszynowego oraz zbiór odpowiednich parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Model matematyczny układu hydraulicznego może być zapisany jednoznacznie za pomocą grafu zależności struktur drzewiastych

rozgrywających parametrycznie (rysunek 5.19). Tego typu analizę przedstawiono m.in. w pracach [237, 64, 71, 76, 63, 85, 54, 68, 78, 61, 60]



Rys. 5.19. Skierowany graf zależności przepływu sygnałów

Skierowany graf zależności opisano zbiorem wierzchołków V z funkcjami zależnymi od czasu:

$$V = \left\{ Q_s, \frac{dP_s}{dt}, P_s, \frac{d\omega}{dt}, \omega, P_p, \frac{dQ_{zp}}{dt}, Q_{zp} \right\}, \tag{5.14}$$

oraz ze zbioru krawędzi A , czyli uporządkowanej pary wierzchołków, opisujących parametry konstrukcyjne i/lub eksploatacyjne oraz przekształcenia analityczno-algebraiczne:

$$A = \left\{ \frac{1}{C}, \int dt(P_s), \frac{D}{J}, \int dt(\omega), -\frac{R}{J}, -\frac{D}{C}, -1, -\frac{1}{R_{p0}}, R_l, \frac{K}{T}, \int dt(Q_{zp}), -\frac{1}{T} \right\} \tag{5.15}$$

W wyniku rozkładu grafu od wybranego wierzchołka w pierwszym etapie uzyskano drzewo z cyklami, a następnie ogólną strukturę rozgrywającą parametrycznie. Każdej ze struktur zdefiniowano właściwy zapis analityczny: G_i^+ oraz G_i^{++} , gdzie i oznacza wierzchołek, od którego dokonano rozkładu grafu. Wierzchołkami początkowymi opisano dane funkcje zależne od czasu, a nie jej pochodną (rozkład grafu od dwóch wierzchołków związanych z tą samą wielkością nie ma związku z właściwością struktury rozgrywającej parametrycznie, gdyż oba wierzchołki łączy pojedyncza krawędź-decyzja oznaczająca przekształcenie analityczne). Zatem zbiór V' wierzchołków od których jest możliwy rozkład grafu zależności:

$$V' = \{Q_s, P_s, \omega, P_p, Q_{zp}\} \quad (5.16)$$

Rozkładając graf od każdego z wierzchołków, otrzymano zbiór D struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie:

$$D = \{G_{Q_s}^{++}, G_{P_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_{zp}}^{++}\} \quad (5.17)$$

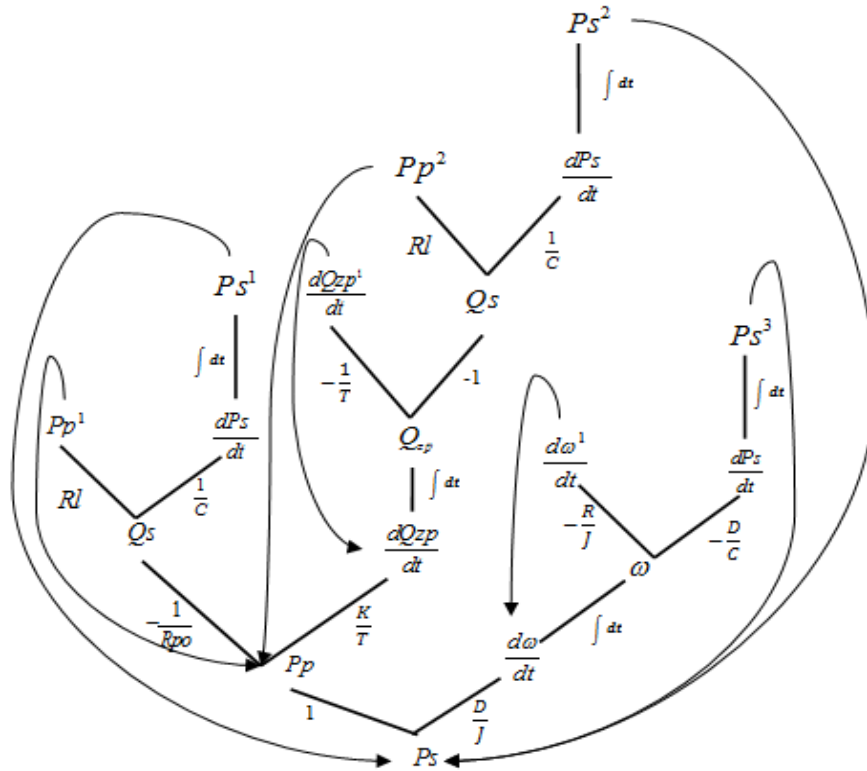
Rozkładając graf od ustalonego wierzchołka początkowego P_s otrzymano w pierwszej kolejności wyrażenie $G_{P_s}^+$ (5.18).

$$\left\{ \begin{aligned} G_{P_s}^+ &= ({}^0 P_s ({}^1 P_p ({}^2 - \frac{1}{R_{p_o}} Q_s ({}^3 R I P_p, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{dt} ({}^4 \int dt P_s)^4)^3, \\ &\frac{K}{T} \frac{d Q_{z p}}{dt} ({}^3 \int dt Q_{z p} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{d Q_{z p}}{dt}, -1 Q_s)^4)^3)^2, \frac{D}{J} \frac{d \omega}{dt} ({}^2 \int dt \omega ({}^3 - \frac{D}{C} \frac{d P_s}{dt}, -\frac{R}{J} \frac{d \omega}{dt})^3)^2)^1)^0 \end{aligned} \right. \quad (5.18)$$

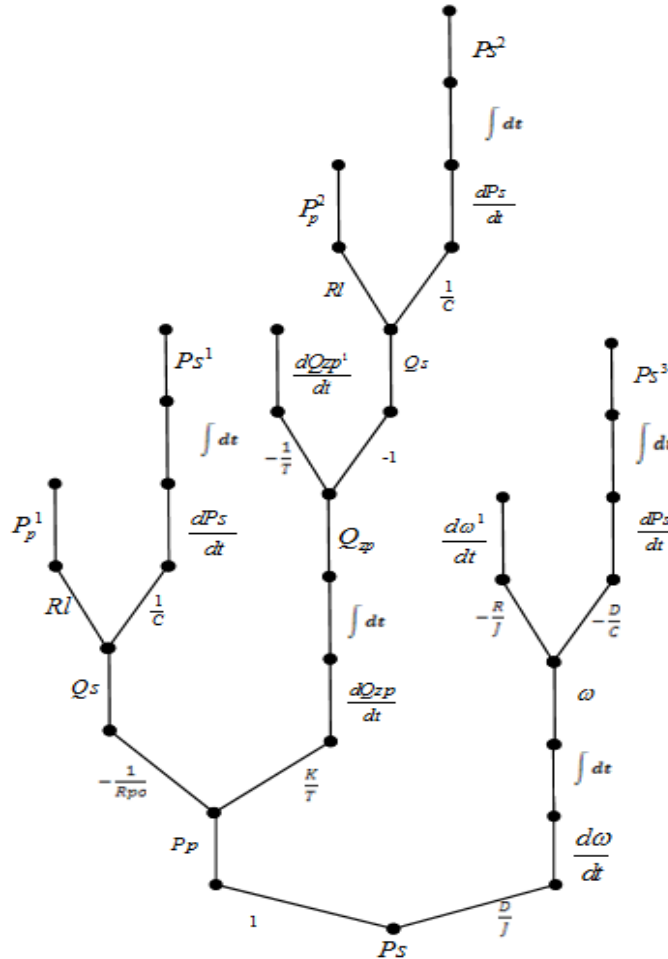
Z odpowiedniego wierzchołka końcowego można powrócić do wierzchołka wcześniejszego, a nawet początkowego, a zatem zgodnie z algorytmem, opisanym w rozdziale (5.3.1), otrzymuje się wyrażenie $G_{P_s}^{++}$ (2.9).

$$\left\{ \begin{aligned} G_{P_s}^{++} &= ({}^0 P_s ({}^1 P_p ({}^2 - \frac{1}{R_{p_o}} Q_s ({}^3 R I P_p^1, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{dt} ({}^4 \int dt P_s^1)^4)^3, \frac{K}{T} \frac{d Q_{z p}}{dt} \\ &({}^3 \int dt Q_{z p} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{d Q_{z p}^1}{dt}, -1 Q_s ({}^5 R I P_p^2, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{dt} ({}^6 \int dt P_s^2)^6)^5)^4)^3)^2, \\ &\frac{D}{J} \frac{d \omega}{dt} ({}^2 \int dt \omega ({}^3 - \frac{D}{C} \frac{d P_s}{dt} ({}^4 \int dt P_s^3)^4, -\frac{R}{J} \frac{d \omega^1}{dt})^3)^2)^1)^0 \end{aligned} \right. \quad (5.19)$$

Strukturę drzewiastą z cyklami o wyrażeniu (5.19) przedstawiono na rysunku 5.20. W następnym etapie, uzyskano strukturę drzewiastą rozgrywającą parametrycznie, którą przedstawiono na rysunku 5.21.



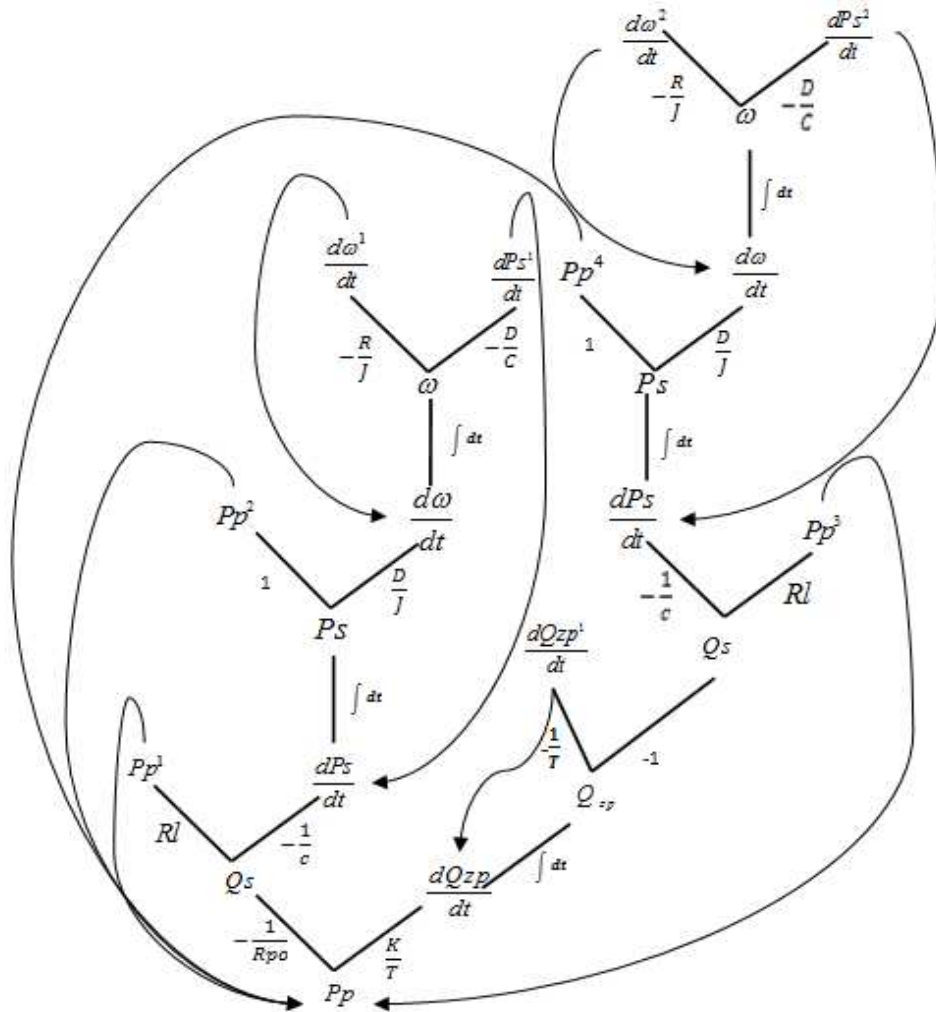
Rys. 5.20. Struktura drzewiasta z cyklami z wierzchołkiem początkowym P_s



Rys. 5.21. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego P_s

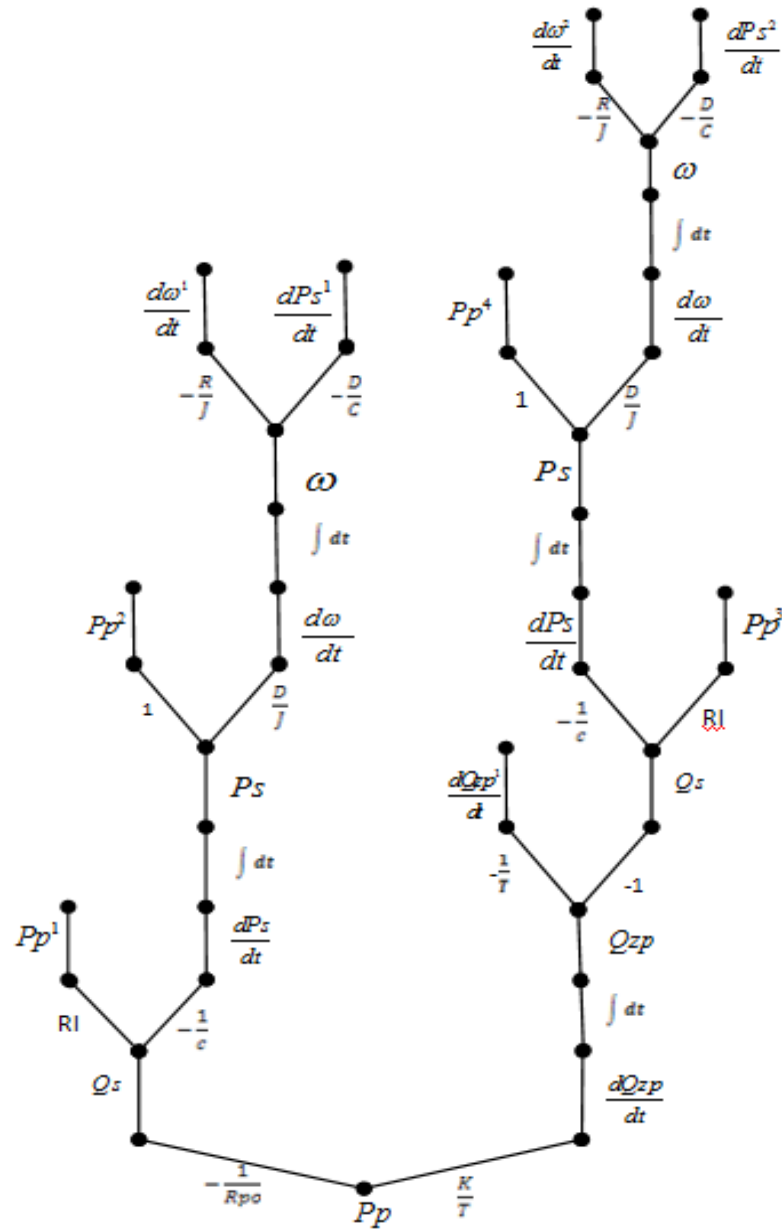
Z kolei rozkładając graf zależności od wierzchołka początkowego P_p , w pierwszej kolejności uzyskano wyrażenie (5.20), a następnie wyrażenie (5.21). Na rysunku 5.22 przedstawiono drzewo z cyklami, o wyrażeniu (5.20). W następnym etapie uzyskano strukturę rozgrywającą parametrycznie przedstawioną na rysunku 5.23.

$$G_{Pp}^+ = \left({}^0 Pp \left({}^1 - \frac{1}{Rpo} Qs \left({}^2 Rl Pp, -\frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} \left({}^3 \int dt Ps \left({}^4 1 Pp, \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} \left({}^5 \int dt \omega \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \left. \left. \left({}^6 - \frac{D}{C} \frac{dPs}{dt}, -\frac{R}{J} \frac{d\omega}{dt} \right)^6 \right)^5 \right)^4 \right)^3 \right)^2, \frac{K}{T} \frac{dQzp}{dt} \left({}^2 \int dt Qzp \left({}^3 - \frac{1}{T} \frac{dQzp}{dt}, -1 Qs \right)^3 \right)^2 \right)^1 \right)^0 \quad (5.2)$$



Rys. 5.22. Drzewo z cyklami i wierzchołkiem początkowym P_p

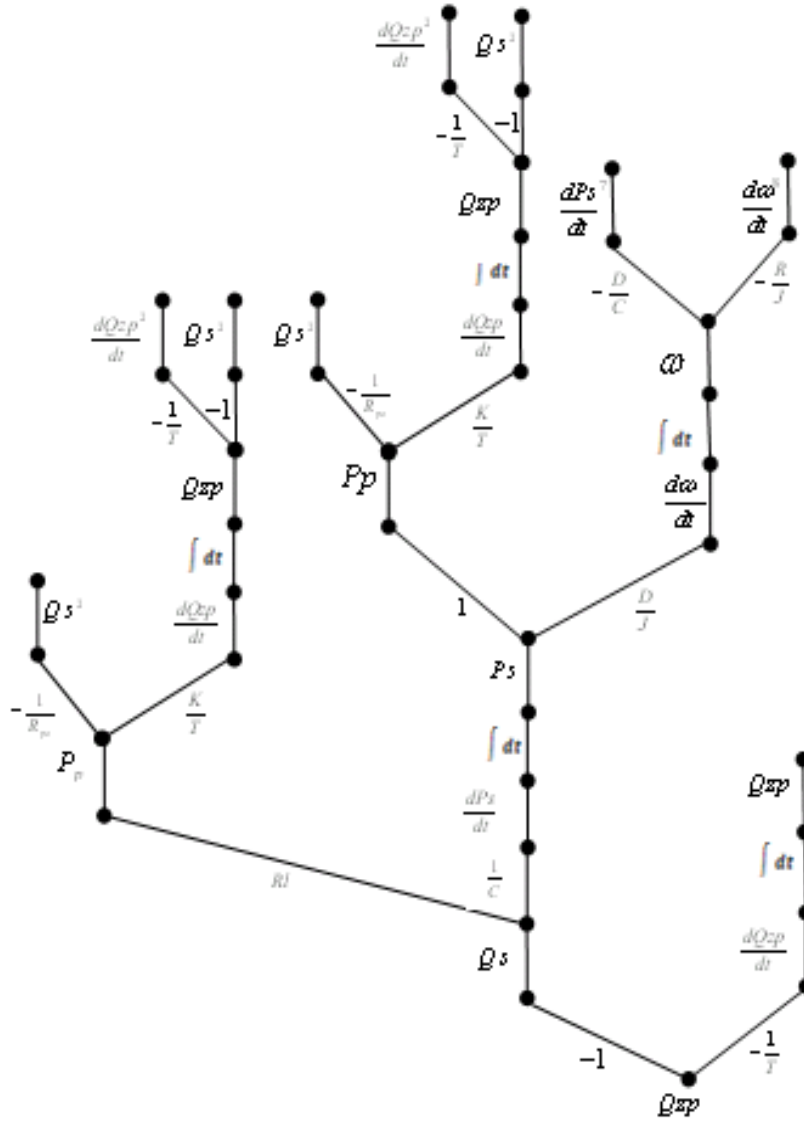
$$\left\{ G_{Pp}^{++} = \left({}^0 Pp \left({}^1 - \frac{1}{Rpo} Qs \left({}^2 Rl Pp^1, -\frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} \left({}^3 \int dt Ps \left({}^4 1 Pp^2, \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} \left({}^5 \int dt \omega \left({}^6 - \frac{D}{C} \frac{dPs^1}{dt}, -\frac{R}{J} \frac{d\omega^1}{dt} \right)^6 \right)^5 \right)^4 \right)^3 \right)^2, \frac{K}{T} \frac{dQzp}{dt} \left({}^2 \int dt Qzp \left({}^3 - \frac{1}{T} \frac{dQzp^1}{dt}, -1 Qs \left({}^4 Rl Pp^3, -\frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} \right)^4 \right)^3 \right)^2 \right)^1 \right)^0 \left({}^5 \int dt Ps \left({}^6 1 Pp^4, \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} \left({}^7 \int dt \omega \left({}^8 - \frac{D}{C} \frac{dPs^2}{dt}, -\frac{R}{J} \frac{d\omega^2}{dt} \right)^8 \right)^7 \right)^6 \right)^5 \right)^4 \right)^3 \right)^2 \right)^1 \right)^0 \quad (5.21)$$



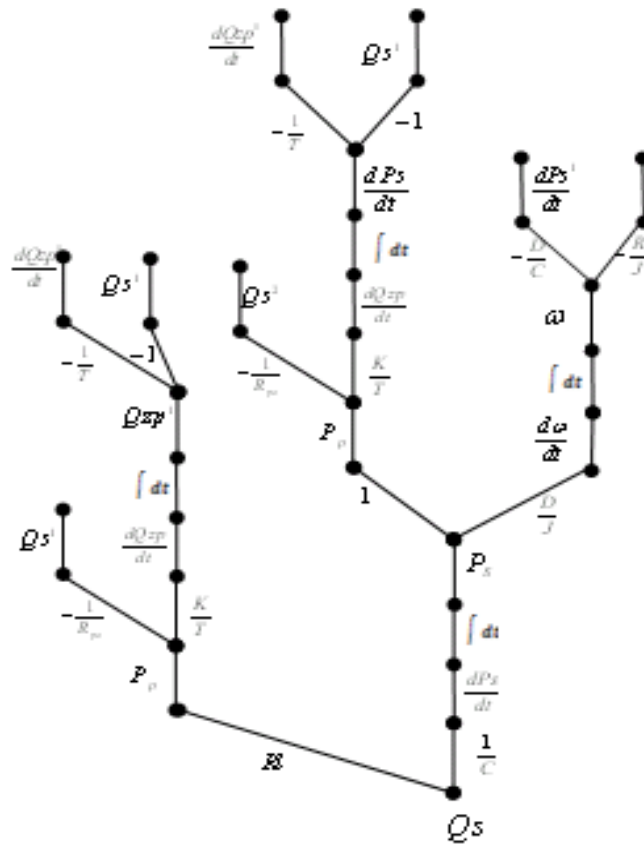
Rys. 5.23. Drzewo rozgrywające parametrycznie od wierzchołka początkowego P_p

Podobne postępowanie należy wykonać w przypadku pozostałych wierzchołków Q_{zp} , Q_s , ω .

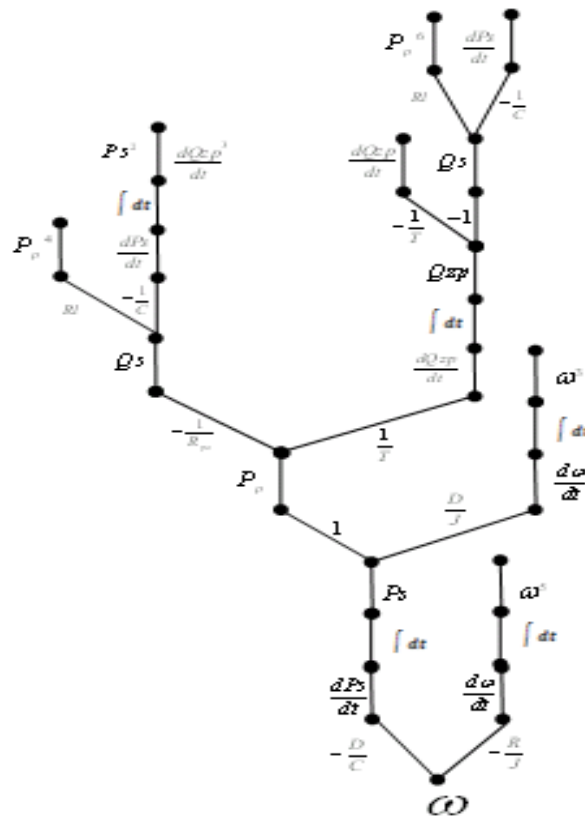
Struktury rozgrywające parametrycznie odpowiednio dla Q_{zp} , Q_s , ω przedstawiono na rysunkach 5.24, 5.25 i 5.26.



Rys. 5.24. Drzewo rozgrywające parametrycznie od wierzchołka początkowego Q_{zp}



Rys. 5.25. Drzewo rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego Q_s



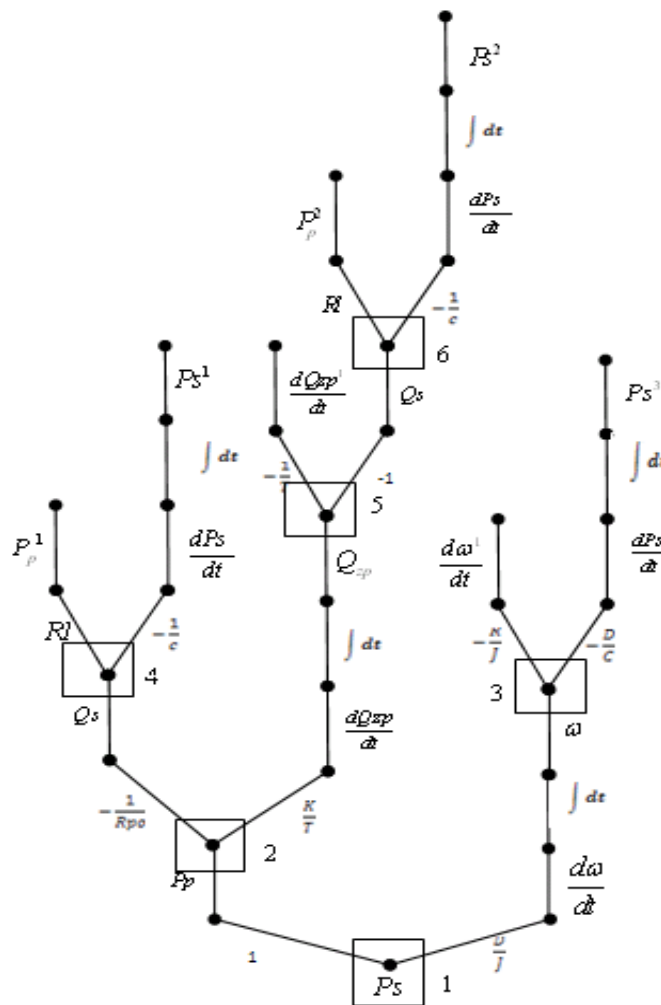
Rys. 5.26. Drzewo rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego ω

Następnie w każdej strukturze rozgrywającej parametrycznie z rysunków 5.21, 5.23, 5.24-5.26 oblicza się zwykły $L(G_i^{++})$ oraz kompleksowy współczynnik złożoności $L^K(G_i^{++})$.

Przykładowy graficzny schemat obliczeniowy współczynnika złożoności struktury G_{Ps}^{++} z rysunku 5.21 przedstawiono na rysunku 5.27. Współczynnik stopnia złożoności $L(G_{Ps}^{++})$ obliczany jest następująco:

$$L(G_{Ps}^{++}) = \sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} = \frac{2}{0+1} + \frac{2}{2+1} + \frac{2}{4+1} + \frac{2}{4+1} + \frac{2}{6+1} + \frac{2}{8+1} = 3,96$$

gdzie: $W(L) = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}$.



Rys. 5.27. Drzewo rozgrywające parametrycznie G_{Ps}^{++} z $L(G_{Ps}^{++}) = 3,96$

W pozostałych drzewach rozgrywających parametrycznie $G_{Q_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_{sp}}^{++}$ otrzymanych w wyniku rozkładu grafu zależności z rysunku 5.23, wartość współczynników to: $L(G_{P_p}^{++}) = 4,13$, $L(G_{P_p}^{++}) = 4,13$, $L(G_{\omega}^{++}) = 3,37$ oraz $L(G_{Q_s}^{++}) = 4,04$.

Najmniejsza wartość współczynnika złożoności to: $G_{\omega}^{++}: L(G_{\omega}^{++}) = 3,37$, największą natomiast wartość współczynnika złożoności określono w strukturach G_{Pp}^{++} oraz $G_{Qzp}^{++}: L(G_{Pp}^{++}) = L(G_{Qzp}^{++}) = 4,13$. Wartość współczynników złożoności uzależniona jest od budowy i właściwości systemowej układu (Rys. 5.18). Niewiadome funkcje: $P_p, P_s, Q_s, Q_{zp}, \omega$, będące wierzchołkami początkowymi w strukturach rozgrywających parametrycznie są obliczane na podstawie danego wejścia układu Q_p . Współczynnik złożoności jest najmniejszy w przypadku struktur rozgrywających parametrycznie od wierzchołków początkowych opisanych przez funkcje określone najbliżej wyjścia danego układu. Wpływ funkcji znajdujących się najbliżej wyjścia układu na pozostałe funkcje jest najmniejszy, co jest poprawnym zjawiskiem ze względu na model fizyczny.

Dokładne rozróżnienie stopnia ważności struktur rozgrywających parametrycznie uzyskuje się, obliczając kompleksowy współczynnik złożoności każdej ze struktur $G_{P_s}^{++}, G_{Q_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_{zp}}^{++}$ wg wzoru:

$$L^K(GH)_{P_p}^{++} = \left(\sum_{w_i \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{zp}} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{10+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_s} + \left(\frac{2}{14+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{\omega} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_s} + \left(\frac{2}{10+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{\omega} = 18,66,$$

$$L^K(GH)_{Q_{zp}}^{++} = \left(\sum_{w_i \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{zp}} + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{zp}} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_s} + \left(\frac{2}{10+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{\omega} + \left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{12+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{zp}} = 23,41,$$

$$L^K(GH)_{\omega}^{++} = \left(\sum_{w_i \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} \right)^{\omega} + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_s} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{10+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{zp}} + \left(\frac{2}{12+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} = 17,01,$$

$$L^K(G(H)_{Q_s}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{p_p}} + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_s} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{10+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{p_p}} + \left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{\omega} = 18,66$$

$$L^K(G(H)_{P_s}^{++}) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_s} + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{P_p} + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{6+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_{p_p}} + \left(\frac{2}{8+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{Q_s} + \left(\frac{2}{4+1} + \frac{2}{\frac{1}{4} + \frac{1}{2}} \right)^{\omega} = 19,38,$$

Kompleksowy współczynnik złożoności ocenia jakościowo strukturę poprzez uwzględnienie decyzji nie rozgałęziających się. Dodatkowo uwzględnia stopień złożoności węzłów nierozgałęziających się. Dlatego kompleksowy współczynnik złożoności dokładniej ocenia struktury rozgrywające parametrycznie pod kątem ich rangi ważności.

W strukturach $G_{P_s}^{++}, G_{Q_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_{p_p}}^{++}$ najniższą wartość kompleksowego współczynnika złożoności określono w przypadku struktury $G_{\omega}^{++} : L(G_{\omega}^{++}) = 17,01$, która także najlepiej została oceniona przez zwykły współczynnik złożoności ($L(G_{\omega}^{++}) = 3,37$). Z kolei najwyższą wartość kompleksowego współczynnika złożoności to: $L(G_{Q_{p_p}}^{++}) = 23,41$. Charakteryzuje się ona wyraźnie największą złożonością decyzyjną. Podczas gdy przy zwykłym współczynniku złożoności tak samo oceniono struktury $G_{Q_{p_p}}^{++}$ oraz $G_{P_p}^{++}$.

Na wartość kompleksowego współczynnika złożoności struktury w dużej mierze wpływa stopień złożoności pojedynczych węzłów. Końcowe liście struktury powinny być możliwie jak najkrótsze oraz wychodzić z węzłów o minimalnej liczbie rozgałęzień. Nadrzędnym celem jest, aby proces analizy danego układu/systemu był jak najkrótszy i posiadał minimalną liczbę stadiów decyzyjnych.

5.4.1.1. WIELOKROTNA NUMERACJA WIERZCHOŁKOWA

W wyrażeniu opisującym graf stopień podrzędności danego grafu składowego oznacza się parą nawiasów $(^k \dots)^k$, wewnątrz której zapisuje się wyrażenie, dotyczące danego grafu składowego. W czasie rozkładu grafu od każdego wierzchołka w zapisach analitycznych struktur G_i^+ oraz G_i^{++} , każdy element q_r ma zawsze podporządkowane podległe elementy q_i .

Zarówno elementy q_r jak i elementy q_i istnieją wiele razy w wyrażeniu G_i^{++} w nawiasach $(^k \dots)^k$ o różnych wartościach indeksu k , a więc na różnych piętrach drzewa rozgrywającego parametrycznie.

Na przykład, w wyrażeniu (5.18) wierzchołek występuje w nawiasie o numerze indeksu $k=2$ (wówczas wszystkie elementy wewnątrz nawiasu o numerze indeksu $k=3$ są podległe wierzchołkowi Q_s) oraz w nawiasie o numerze indeksu $k=4$. Oznacza to, że wierzchołek Q_s występuje na różnych piętrach struktury drzewiastej (Rys. 5.20 i Rys. 5.21) i sam zależy od różnych wierzchołków w nawiasie, w którym się znajduje. Mianowicie, gdy jest w nawiasie o numerze indeksu $k=2$ podporządkowany jest tylko wierzchołkom: P_s i P_p , a podczas gdy w nawiasie o numerze indeksu $k=4$ zależy od wierzchołków: P_s , P_p , $\frac{dQzp}{dt}$ oraz Q_{zp} . Dlatego konieczne jest wprowadzenie wielokrotnej numeracji wierzchołkowej, jednoznacznie podporządkowującej elementy w układzie [64].

Dlatego w wyrażeniach analitycznych G_i^+ oraz G_i^{++} , każdy wierzchołek q_i oznacza się jako $q_i^l{}_k$, gdzie k - indeks nawiasu i -tego wierzchołka, l - indekskrotność i -tego wierzchołka w k - tym nawiasie. Graf z wielokrotną numeracją wierzchołkową opisano wyrażeniami ${}^wG_i^+$ oraz ${}^wG_i^{++}$. W rozkładzie grafu zależności (Rys. 5.19) badanego układu hydraulicznego (Rys. 5.14) od wierzchołka początkowego Q_s z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej uzyskano wyrażenie analityczne ${}^wG_{Q_s}^+$

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^wG_{Q_s}^+ = ({}^0Q_{s_0}({}^1RIPp_1({}^2 - \frac{1}{Rpo}Q_{s_2}^1, \frac{K}{T} \frac{dQzp^1}{dt} ({}^3 \int dt Qzp_3^1 ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQzp^1}{dt} ({}^5 - 1Q_{s_4}^1)^4)^3)^2), \\ \frac{1}{C} \frac{dPs^1}{dt} ({}^2 \int dt Ps_2^1 ({}^3 1Pp_3^1, \frac{D}{J} \frac{d\omega^1}{dt} ({}^4 \int dt \omega_4^1 ({}^5 - \frac{D}{C} \frac{dPs^1}{dt} ({}^6 - \frac{R}{J} \frac{d\omega^1}{dt} ({}^7)^5)^4)^3)^2)^1)^0 \end{array} \right. \quad (5.22)$$

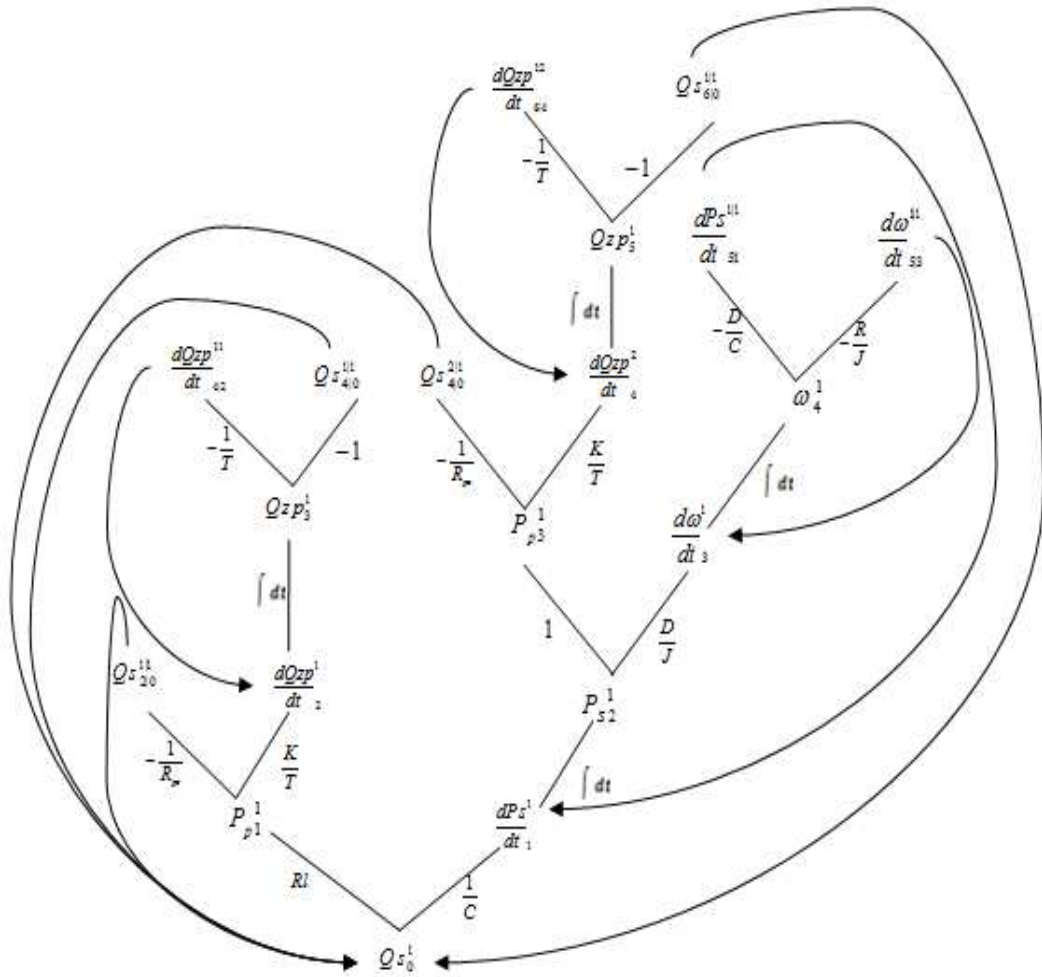
Szczególnym przypadkiem podporządkowania elementów w układzie jest to, że z wierzchołka końcowego można powrócić do wierzchołka wcześniejszego, a nawet początkowego (początek i koniec drogi w tym samym elemencie $q_i^l{}_k$).

Wówczas taki wierzchołek oznacza się jako $q_i^{ll'}{}_k$, gdzie: k' - oznacza indeks nawiasu, i - tego wierzchołka wcześniejszego, l' - indeks oznaczający krotność występowania i -tego wierzchołka wcześniejszego w k' - tym nawiasie; k - indeks nawiasu, i - tego wierzchołka; l - krotność występowania i -tego wierzchołka w k - tym nawiasie. Uwzględniając taki sposób numeracji po przekształceniu ciągu ${}^wG_{Q_s}^+$ otrzymano ciąg ${}^wG_{Q_s}^{++}$ opisany wyrażeniem (5.23)

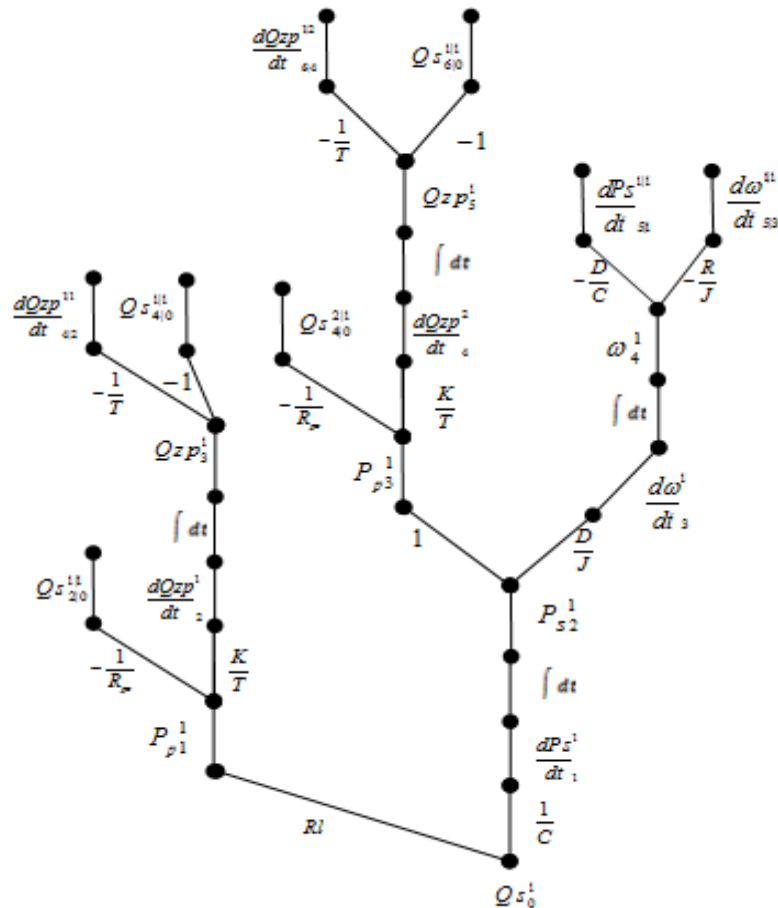
$$\left\{ \begin{array}{l} {}^wG_{Q_s}^{++} = ({}^0Q_{s_0}({}^1RIPp_1({}^2 - \frac{1}{Rpo}Q_{s_{210}}^{111}, \frac{K}{T} \frac{dQzp^1}{dt} ({}^3 \int dt Qzp_3^1 ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQzp^{111}}{dt} ({}^5 - 1Q_{s_{410}}^{111})^4)^3)^2), \\ \frac{1}{C} \frac{dPs^1}{dt} ({}^2 \int dt Ps_2^1 ({}^3 1Pp_3^1 ({}^4 - \frac{1}{Rpo}Q_{s_{410}}^{211}, \frac{K}{T} \frac{dQzp^2}{dt} ({}^5 \int dt Qzp_5^1 ({}^6 - \frac{1}{T} \frac{dQzp^{112}}{dt} ({}^7 - 1Q_{s_{610}}^{111})^6)^5)^4)^3)^2)^1)^0 \\ \frac{D}{J} \frac{d\omega^1}{dt} ({}^4 \int dt \omega_4^1 ({}^5 - \frac{D}{C} \frac{dPs^{111}}{dt} ({}^6 - \frac{R}{J} \frac{d\omega^{111}}{dt} ({}^7)^5)^4)^3)^2)^1)^0 \end{array} \right. \quad (5.23)$$

Strukturę drzewiastą z cyklami o wyrażeniu (5.23) przedstawiono na rysunku 5.28, natomiast strukturę drzewiastą rozgrywającą parametrycznie- na rysunku 5.29.

W ogólnym znaczeniu systemowym można wprowadzić inne kodowania wielokrotnej numeracji wierzchołkowej [64].



Rys. 5.28. Struktura drzewiasta z cyklami z wierzchołkiem początkowym Q_s z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej



Rys. 5.29. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego Q_s z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej

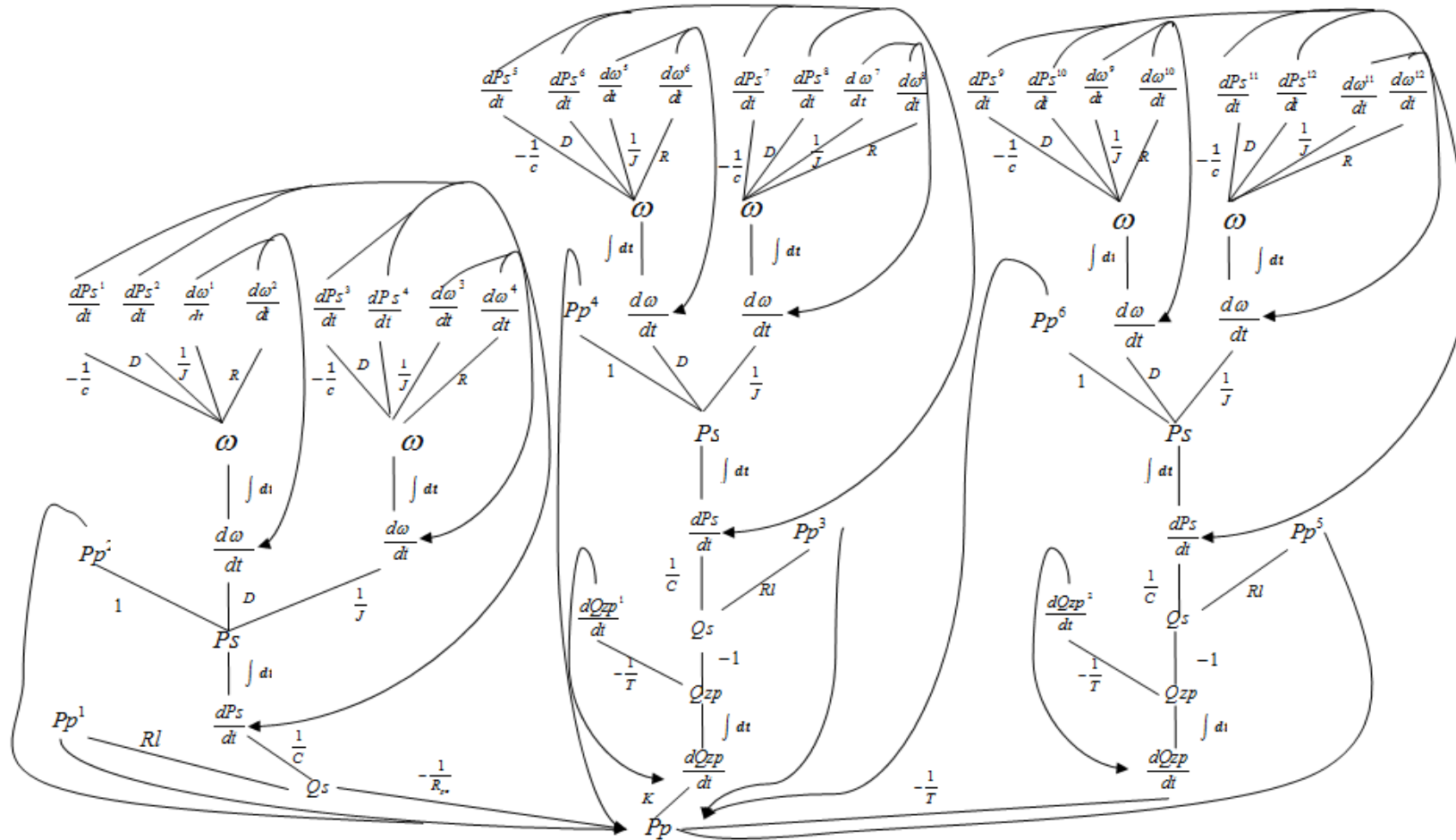
5.4.1.2. DEKOMPOZYCJA DECYZYJNA DLA DRZEW ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

We właściwej procedurze optymalizacyjnej, zasób i rodzaj informacji, uzyskany z modelu matematycznego analizowanego układu był jak największy. Zgodnie z tą myślą przeprowadza się rozkład grafu zależności od danego wierzchołka, uwzględniając wszystkie parametry konstrukcyjne i/lub eksploatacyjne, zapisane oddzielnie, a nie sposobem interakcyjnym [76]. Dane parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne mogą być matematycznie związane ze sobą w różny sposób, a więc konieczny jest szczegółowy rozkład grafu zależności, w celu określenia zmiennych decyzyjnych. Takie postępowanie określa obszar rozwiązań dopuszczalnych, a następnie wybór właściwej procedury optymalizacyjnej. Wprowadzoną dekompozycję decyzyjną uwzględnia się w opisie grafu: ${}_D G_i^+$ oraz ${}_D G_i^{++}$.

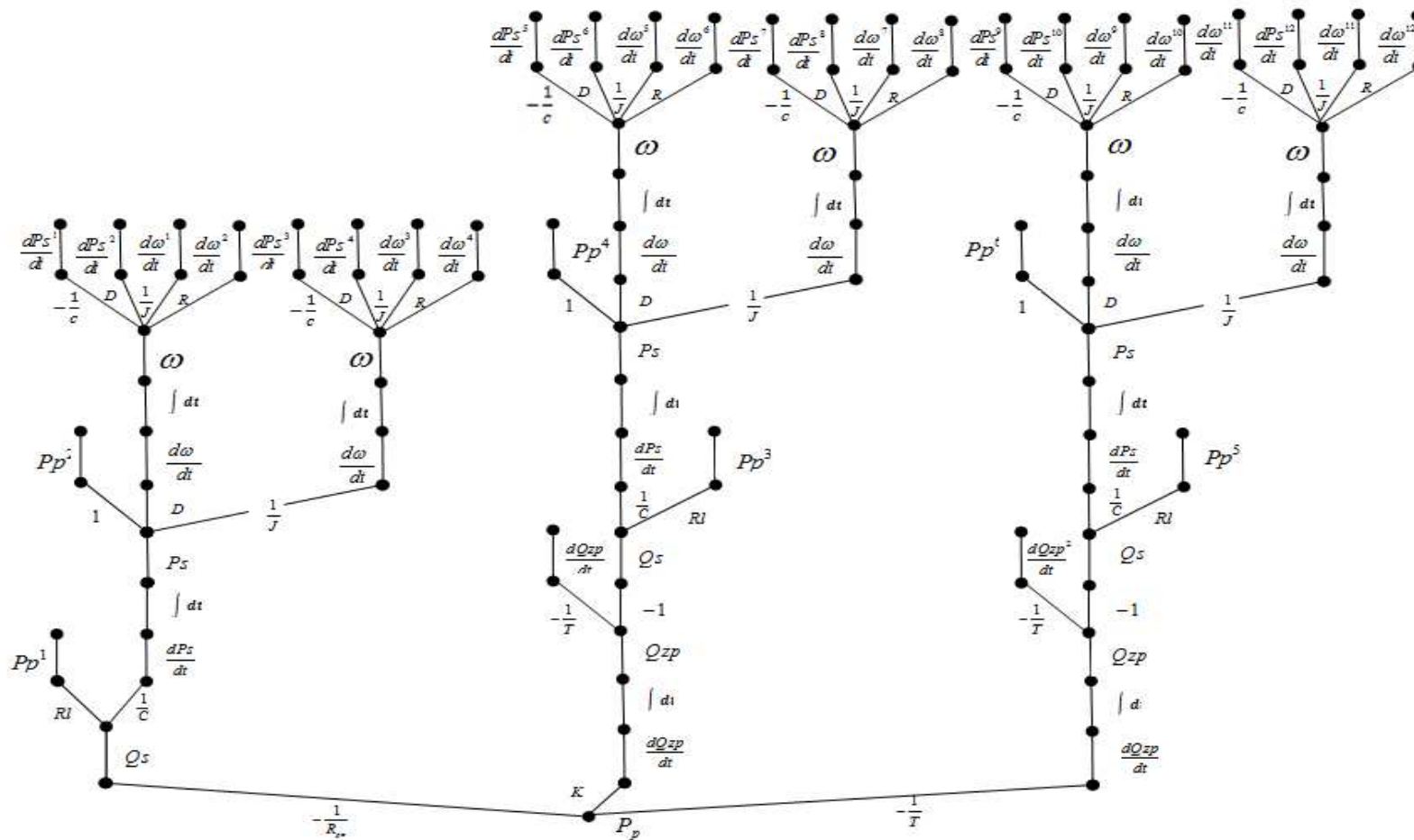
Uwzględnienie dekompozycji decyzyjnej w grafie zależności (Rys. 5.19) od wierzchołka początkowego P_p , prowadzi do struktury drzewiastej z cyklami oraz struktury drzewiastej rozgrywającej parametrycznie (Rys. 5.30 oraz Rys. 5.31), opisanych zależnościami (5.24), (5.25).

$$\left\{ \begin{aligned} {}_D G_{Pp}^+ = & ({}^0 Pp({}^1 - \frac{1}{Rpo} Qs({}^2 RlPp, \frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} ({}^3 \int dtPs({}^4 1Pp, D \frac{d\omega}{dt} ({}^5 \int dt\omega ({}^6 - \frac{1}{C} \frac{dPs}{dt}, D \frac{dPs}{dt} \\ & - \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt}, R \frac{d\omega}{dt})^6)^5), \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^5 \int dt\omega ({}^6 - \frac{1}{C} \frac{dPs}{dt}, D \frac{dPs}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt}, R \frac{d\omega}{dt})^6)^5)^4)^3)^2, \\ & K \frac{dQzp}{dt} ({}^2 \int dtQzp ({}^3 - \frac{1}{T} \frac{dQzp}{dt}, -Qs)^3)^2, \frac{1}{T} \frac{dQzp}{dt} ({}^2 \int dtQzp ({}^3 - \frac{1}{T} \frac{dQzp}{dt}, -Qs)^3)^2)^1)^0 \end{aligned} \right. \quad (5.24)$$

$$\left\{ \begin{aligned} {}_D G_{Pp}^{++} = & ({}^0 Pp({}^1 - \frac{1}{Rpo} Qs({}^2 RlPp^1, \frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} ({}^3 \int dtPs({}^4 1Pp^2, D \frac{d\omega}{dt} ({}^5 \int dt\omega ({}^6 - \frac{1}{C} \frac{dPs^1}{dt}, \\ & D \frac{dPs^2}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega^1}{dt}, R \frac{d\omega^2}{dt})^6)^5), \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^5 \int dt\omega ({}^6 - \frac{1}{C} \frac{dPs^3}{dt}, D \frac{dPs^4}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega^3}{dt}, \\ & R \frac{d\omega^4}{dt})^6)^5)^4)^3)^2, K \frac{dQzp}{dt} ({}^2 \int dtQzp ({}^3 - \frac{1}{T} \frac{dQzp^1}{dt}, -Qs({}^4 RlPp^3, \frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} ({}^5 \int dtPs \\ & ({}^6 1Pp^4, D \frac{d\omega}{dt} ({}^7 \int dt\omega ({}^8 - \frac{1}{C} \frac{dPs^5}{dt}, D \frac{dPs^6}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega^5}{dt}, R \frac{d\omega^6}{dt})^8)^7, \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^7 \int dt\omega \\ & ({}^8 - \frac{1}{C} \frac{dPs^7}{dt}, D \frac{dPs^8}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega^7}{dt}, R \frac{d\omega^8}{dt})^8)^7)^6)^5)^4)^3)^2, \frac{1}{T} \frac{dQzp}{dt} ({}^2 \int dtQzp ({}^3 - \frac{1}{T} \frac{dQzp^2}{dt}, \\ & -Qs({}^4 RlPp^5, \frac{1}{C} \frac{dPs}{dt} ({}^5 \int dtPs({}^6 1Pp^6, D \frac{d\omega}{dt} ({}^7 \int dt\omega ({}^8 - \frac{1}{C} \frac{dPs^9}{dt}, D \frac{dPs^{10}}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega^9}{dt}, \\ & R \frac{d\omega^{10}}{dt})^8)^7, \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^7 \int dt\omega ({}^8 - \frac{1}{C} \frac{dPs^{11}}{dt}, D \frac{dPs^{12}}{dt}, - \frac{1}{J} \frac{d\omega^{11}}{dt}, R \frac{d\omega^{12}}{dt})^8)^7)^6)^5)^4)^3)^2)^1)^0 \end{aligned} \right. \quad (5.25)$$



Rys. 5.30. Struktura drzewiasta z cyklami i wierzchołkiem początkowym Pp z uwzględnieniem dekompozycji decyzyjnej

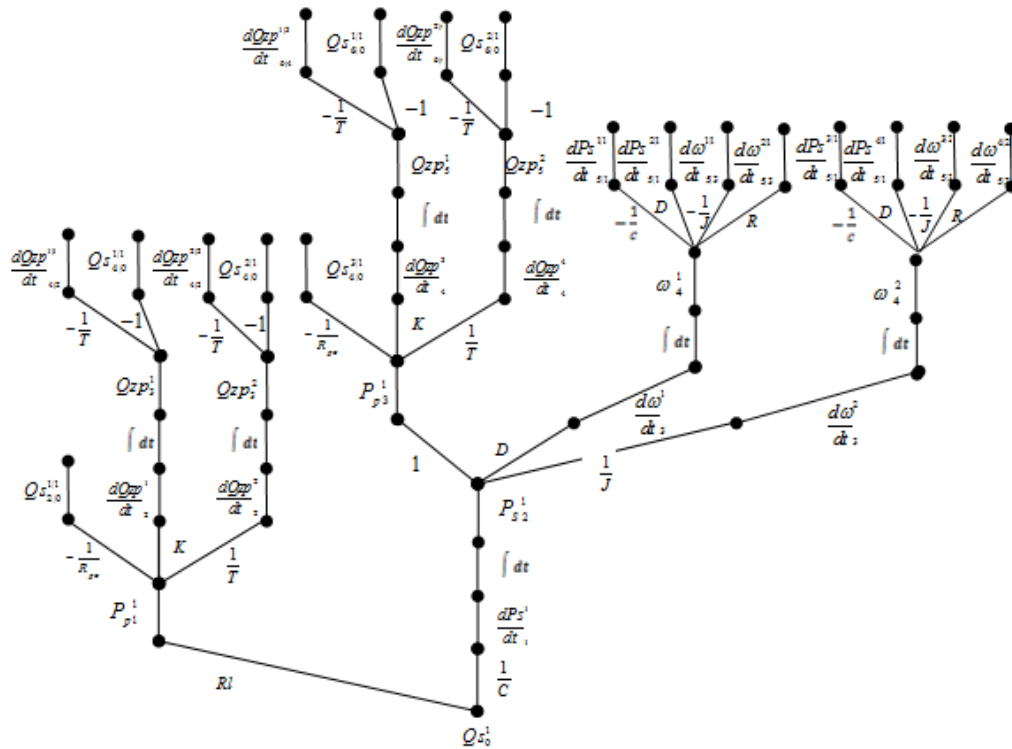


Rys. 5.31 Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego P_p z uwzględnieniem dekompozycji decyzyjnej

Uwzględnienie dekompozycji decyzyjnej oraz wielokrotnej numeracji wierzchołkowej, przy rozkładzie grafu zależności (Rys. 5.19), tym razem od wierzchołka początkowego Q_s , prowadzi do wyrażeń (5.26) i (5.27) oraz ostatecznie do drzewa rozgrywającego parametrycznie (Rys. 5.32) [76].

$$\left\{ \begin{aligned} {}^W G_{Q_s}^+ = & ({}^0 Q_{s0}^1 ({}^1 R I P P_1^1 ({}^2 \frac{1}{R_{po}} Q_{s2}^1, K \frac{dQ_{zp}^1}{dt_2} ({}^3 \int dt Q_{zp3}^1 ({}^4 \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^1}{dt_4}, -Q_{s4}^1)^4)^3, \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^2}{dt_2} \\ & ({}^3 \int dt Q_{zp3}^2 ({}^4 \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^2}{dt_4}, -Q_{s4}^2)^4)^3)^2, \frac{1}{C} \frac{dP_s^1}{dt_1} ({}^2 \int dt P_{s2}^1 ({}^3 I P P_3^1, D \frac{d\omega^1}{dt_3} ({}^4 \int dt \omega_4^1 ({}^5 \frac{1}{C} \frac{dP_s^1}{dt_5}, D \frac{dP_s^2}{dt_5}, \\ & \frac{1}{J} \frac{d\omega^1}{dt_5}, R \frac{d\omega^2}{dt_5})^4)^3)^2, \frac{1}{J} \frac{d\omega^2}{dt_3} ({}^4 \int dt \omega_4^2 ({}^5 \frac{1}{C} \frac{dP_s^3}{dt_5}, D \frac{dP_s^4}{dt_5}, \frac{1}{J} \frac{d\omega^3}{dt_5}, R \frac{d\omega^4}{dt_5})^4)^3)^2)^1)^0. \end{aligned} \right. \quad (5.26)$$

$$\left\{ \begin{aligned} {}^W G_{Q_s}^{++} = & ({}^0 Q_{s0}^1 ({}^1 R I P P_1^1 ({}^2 \frac{1}{R_{po}} Q_{s2|0}^{1|1}, K \frac{dQ_{zp}^1}{dt_2} ({}^3 \int dt Q_{zp3}^1 ({}^4 \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{1|1}}{dt_{4|2}}, -Q_{s4|0}^{1|1})^4)^3, \\ & \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^2}{dt_2} ({}^3 \int dt Q_{zp3}^2 ({}^4 \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{2|2}}{dt_{4|2}}, -Q_{s4|0}^{2|1})^4)^3)^2, \frac{1}{C} \frac{dP_s^1}{dt_1} ({}^2 \int dt P_{s2}^1 ({}^3 I P P_3^1 \\ & ({}^4 \frac{1}{R_{po}} Q_{s4|0}^{3|1}, K \frac{dQ_{zp}^3}{dt_4} ({}^5 \int dt Q_{zp5}^1 ({}^6 \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{1|3}}{dt_{6|4}}, -Q_{s6|0}^{1|1})^6)^5, \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^4}{dt_4} ({}^5 \int dt Q_{zp5}^2 \\ & ({}^6 \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{2|4}}{dt_{6|4}}, -Q_{s6|0}^{2|1})^6)^5)^4, D \frac{d\omega^1}{dt_3} ({}^4 \int dt \omega_4^1 ({}^5 \frac{1}{C} \frac{dP_s^{1|1}}{dt_{5|1}}, D \frac{dP_s^{2|1}}{dt_{5|1}}, -\frac{1}{J} \frac{d\omega^{1|1}}{dt_{5|3}}, \\ & R \frac{d\omega^{2|1}}{dt_{5|3}})^5)^4, \frac{1}{J} \frac{d\omega^2}{dt_3} ({}^4 \int dt \omega_4^2 ({}^5 \frac{1}{C} \frac{dP_s^{3|1}}{dt_{5|1}}, D \frac{dP_s^{4|1}}{dt_{5|1}}, -\frac{1}{J} \frac{d\omega^{3|2}}{dt_{5|3}}, R \frac{d\omega^{4|2}}{dt_{5|3}})^5)^4)^3)^2)^1)^0. \end{aligned} \right. \quad (5.27)$$



Rys. 5.32. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego Q_s , z uwzględnieniem dekompozycji decyzyjnej i wielokrotnej numeracji wierzchołkowej

Zastosowanie dekompozycji decyzyjnej w przypadku grafów i drzew rozgrywających parametrycznie nie zmienia typu i kształtu graficznego takich struktur. Są one bardziej złożone, ale z zachowaniem danych własności strukturalnych, wynikających z pierwotnego grafu zależności. Dlatego można lokalnie odróżnić rolę dekompozycji. Dzięki wprowadzonej dekompozycji decyzyjnej, projektant może zdecydować się jedynie na pojedyncze zmiany i obserwacje w kolejnych etapach [76].

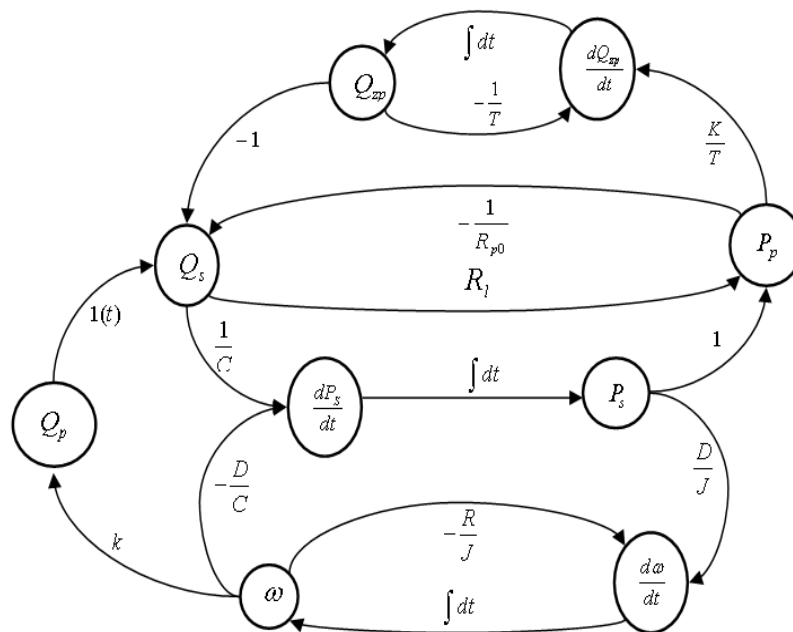
W wielokrotnej numeracji wierzchołkowej, dodatkowo rozpatruje i odróżnia takie same elementy, ale na różnych piętrach struktury drzewiastej, z zachowaniem ogólnego kształtu struktury graficznej, istniejącej nawet przed dekompozycją.

5.4.2. SKIEROWANY GRAF PRZEPLYWU SYGNAŁÓW Z ZAMKNIĘTĄ PĘTLĄ SPRĘŻENIA ZWROTNEGO W STRUKTURACH ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

W układzie otwartym sygnał przepływa tylko w jednym kierunku od wejścia do wyjścia. W układach maszynowych wyróżnia się liczne proste, skośne i złożone sprzężenia zwrotne. W sprzężeniu zwrotnym uzyskano wpływ wyników z bloku końcowego (w postaci charakterystyk czasowych wielkości zależnych od czasu) na selekcję i możliwość wykorzystania informacji merytorycznych napływających w bloku początkowym [54, 63].

Aby dany układ mógł być analizowany jako układ zamknięty, konieczne jest sprzężenie zwrotne, w którym sygnał wejściowy nie zależy jedynie od wewnętrznego stanu obiektu, ale także od aktualnej wartości sygnału wyjściowego. Dlatego konieczne jest wprowadzenie w zapisie grafu zależności (Rys. 5.19) dodatkowego wierzchołka początkowego Q_p , połączonego z wierzchołkiem końcowym ω powrotną decyzją przejścia k . Ostatecznie model matematyczny analizowanego układu hydraulicznego, może być jednoznacznie zapisany za pomocą skierowanego grafu zależności z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego przedstawionego na rysunku 5.37 [63].

W grafie zależności (Rys. 5.33), podobnie jak w grafie z rysunku 5.19, można określić wyrażenie analityczne, reprezentujące ten graf. Rozkład grafu zależności na strukturę drzewiastą z cyklami, a następnie na strukturę rozgrywającą parametrycznie, określa obszar rozwiązań dopuszczalnych i wybór właściwej procedury optymalizacyjnej.

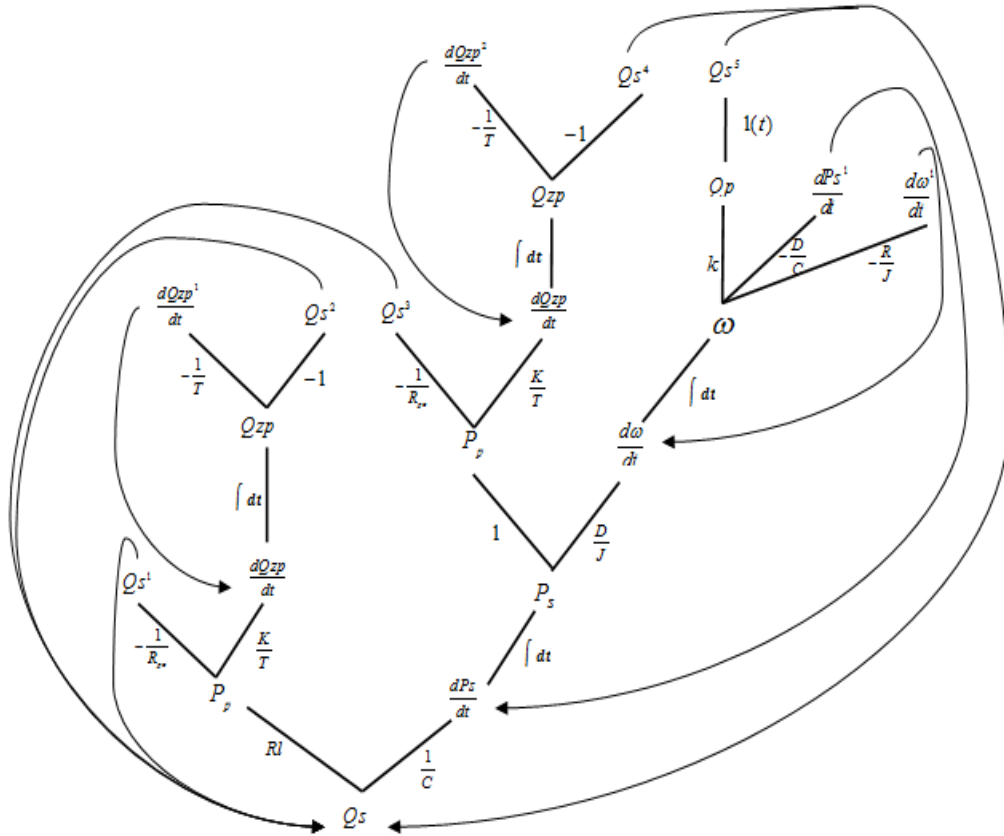


Rys. 5.33. Skierowany graf zależności przepływu sygnałów z dodatkowym wierzchołkiem początkowym

Na rysunku 5.34 przedstawiono rozkład grafu zależności przepływu sygnałów od ustalonego wierzchołka początkowego Q_s z uwzględnieniem Q_p .

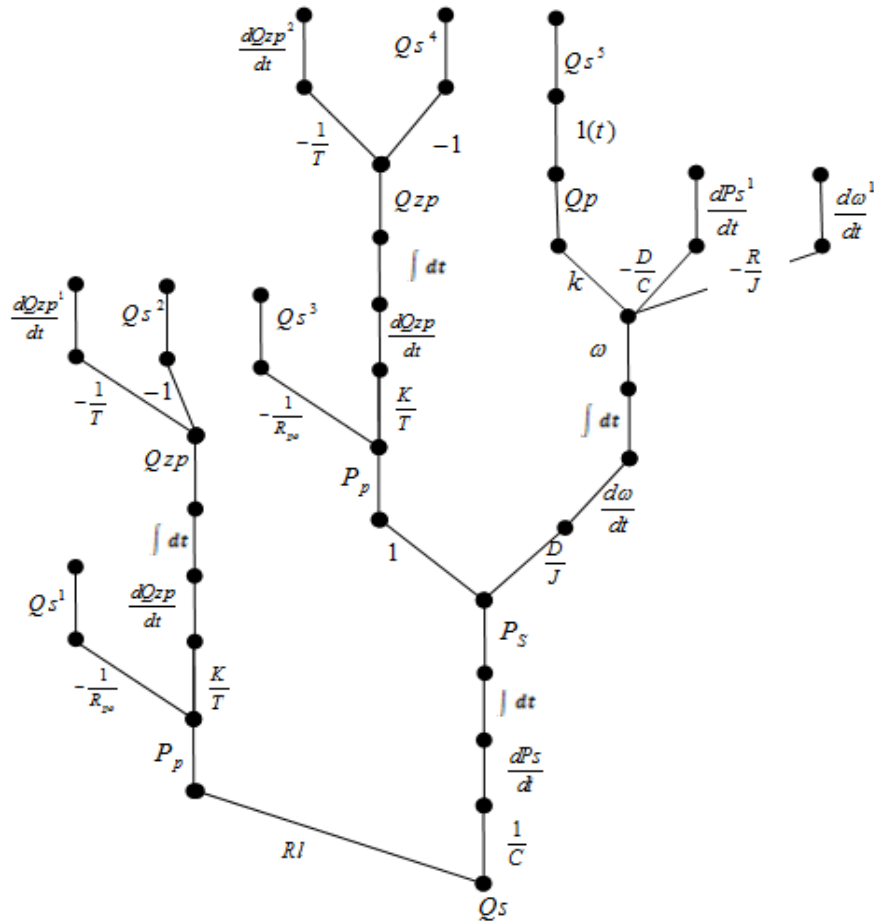
W pierwszym etapie otrzymuje się drzewo z cyklami (Rys. 5.34.), opisane wstępnie równaniem (5.28). W następnym etapie uzyskuje się drzewo rozgrywającą parametrycznie (5.29), przedstawione na rysunku 5.35.

$$\left\{ \begin{aligned} G_{Q_s^+} = & ({}^0 Q_s ({}^1 R I P P ({}^2 - \frac{1}{R_{po}} Q_s, \frac{K}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt} ({}^3 \int dt Q_{zp} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt}, \\ & - Q_s^4)^3)^2, \frac{1}{C} \frac{dP_s}{dt} ({}^2 \int dt P_s ({}^3 1 P P, \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^4 \int dt \omega ({}^5 k Q P ({}^6 1[t] Q_s)^6, \\ & - \frac{D}{C} \frac{dP_s}{dt}, - \frac{R}{J} \frac{d\omega}{dt})^5)^4)^3)^2)^1. \end{aligned} \right. \quad (5.28)$$



Rys. 5.34. Struktura drzewiasta z cyklami i wierzchołkiem początkowym Q_s z uwzględnieniem Q_p

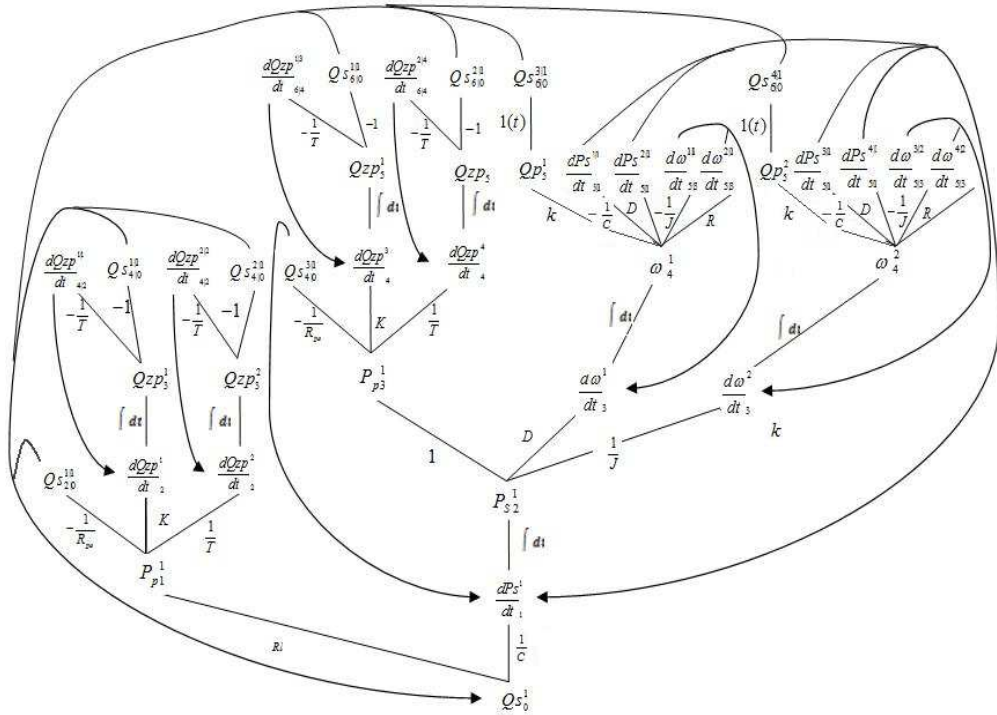
$$\left\{ \begin{aligned} G_{Q_s^{++}} = & ({}^0 Q_s ({}^1 R I P P ({}^2 - \frac{1}{R_{po}} Q_s^1, \frac{K}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt} ({}^3 \int dt Q_{zp} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt} \\ & - 1 Q_s^2)^4)^3)^2, \frac{1}{C} \frac{dP_s}{dt} ({}^2 \int dt P_s ({}^3 1 P P ({}^4 - \frac{1}{R_{po}} Q_s^3, \frac{K}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt} ({}^5 \int dt Q_{zp} ({}^6 \\ & - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt}, - 1 Q_s^4)^6)^5)^4, \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^4 \int dt \omega ({}^5 k Q P ({}^6 1[t] Q_s^5)^6, - \frac{D}{C} \frac{dP_s}{dt} \\ & - \frac{R}{J} \frac{d\omega}{dt})^5)^4)^3)^2)^1)^0. \end{aligned} \right. \quad (5.29)$$



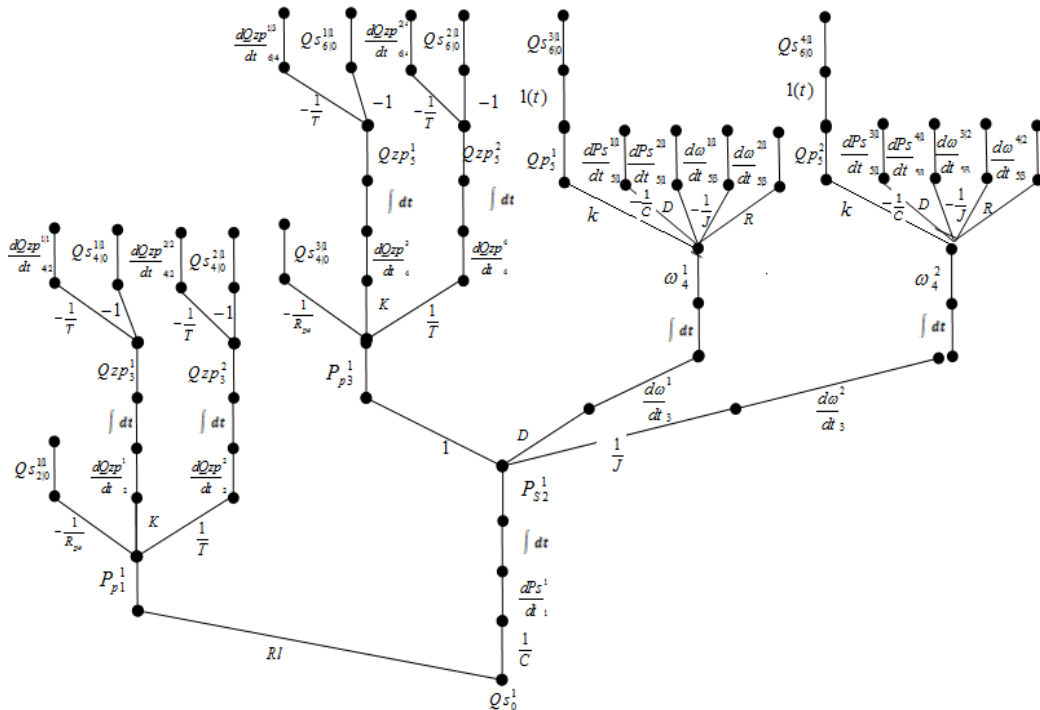
Rys. 5.35. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego Q_s z uwzględnieniem Q_p

Uwzględniając jednocześnie dekompozycję decyzyjną oraz wielokrotną numerację wierzchołkową, przy rozkładzie grafu zależności z rysunku 5.33, od wierzchołka początkowego Q_s , otrzymano strukturę drzewiastą z cyklami (Rys. 5.36) i rozgrywającą parametrycznie (Rys. 5.37). Rozkład taki jest opisany wyrażeniem

$$\left\{ \begin{aligned}
 & {}^W_D G_{Q_s}^{++} = ({}^0 Q_{s0} ({}^1 R I P p_1 ({}^2 - \frac{1}{R_{po}} Q_{s20}^{11}, K \frac{dQ_{zp}^1}{dt} ({}^3 \int dt Q_{zp3} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{11}}{dt}, -Q_{s40}^{11})^4)^3, \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^2}{dt} \\
 & ({}^3 \int dt Q_{zp3} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{21}}{dt}, -Q_{s40}^{21})^4)^3)^2, \frac{1}{C} \frac{dP_s^1}{dt} ({}^2 \int dt P_{s2} ({}^3 1 P p_3 ({}^4 - \frac{1}{R_{po}} Q_{s40}^{31}, K \frac{dQ_{zp}^3}{dt} \\
 & ({}^5 \int dt Q_{zp5} ({}^6 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{13}}{dt}, -Q_{s60}^{11})^6)^5, \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^4}{dt} ({}^5 \int dt Q_{zp5} ({}^6 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}^{24}}{dt}, -Q_{s60}^{21})^6)^5)^4, \\
 & D \frac{d\omega^1}{dt} ({}^4 \int dt \omega_4 ({}^5 k Q p_5 ({}^6 \mathbb{I}[t] Q_{s60}^{31})^6, -\frac{1}{C} \frac{dP_s^{11}}{dt}, D \frac{dP_s^{21}}{dt}, -\frac{1}{J} \frac{d\omega^{11}}{dt}, R \frac{d\omega^{21}}{dt})^5)^4, \\
 & \frac{1}{J} \frac{d\omega^2}{dt} ({}^4 \int dt \omega_4 ({}^5 \mathbb{I}[t] Q_{s60}^{41})^6, -\frac{1}{C} \frac{dP_s^{31}}{dt}, D \frac{dP_s^{41}}{dt}, -\frac{1}{J} \frac{d\omega^{32}}{dt}, R \frac{d\omega^{42}}{dt})^5)^3)^2)^1)^0.
 \end{aligned} \right. \quad (5.30)$$

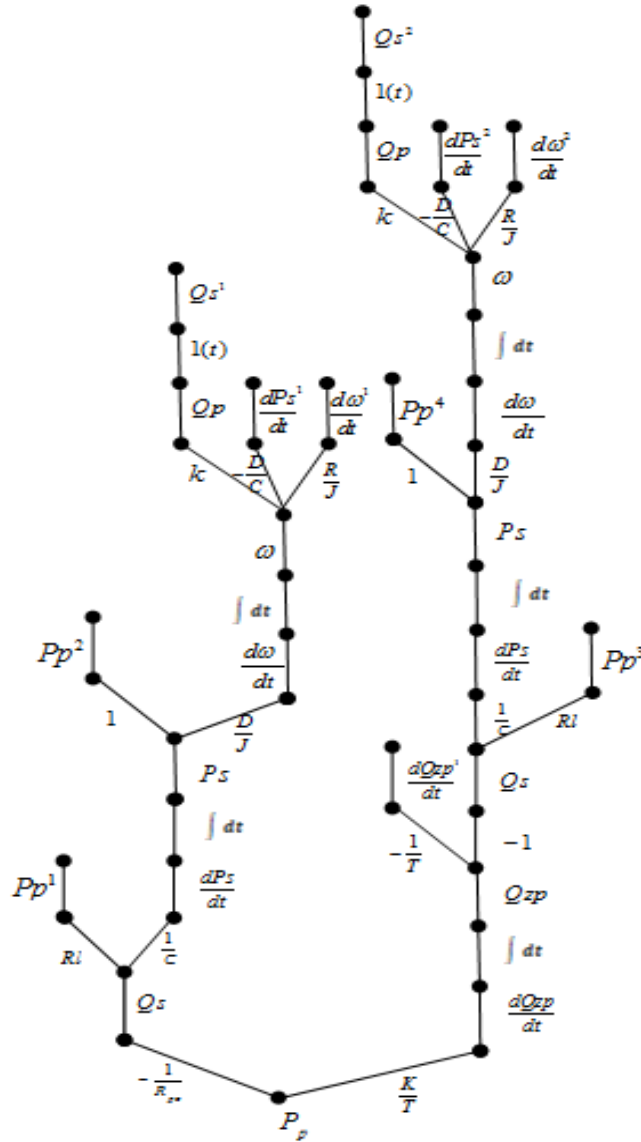


Rys. 5.36. Struktura drzewiasta z cyklami i wierzchołkiem początkowym Q_s z uwzględnieniem Q_p , numeracji wierzchołkowej i dekompozycji decyzyjnej



Rys. 5.37. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego Q_s z uwzględnieniem Q_p , numeracji wierzchołkowej i dekompozycji decyzyjnej

Gdyby przeprowadzić rozkład grafu zależności z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego (Rys. 5.33) od wierzchołka początkowego P_p , wtedy otrzymano by ostatecznie strukturę rozgrywającą parametrycznie (Rys. 5.38), opisaną wyrażeniem (5.31).

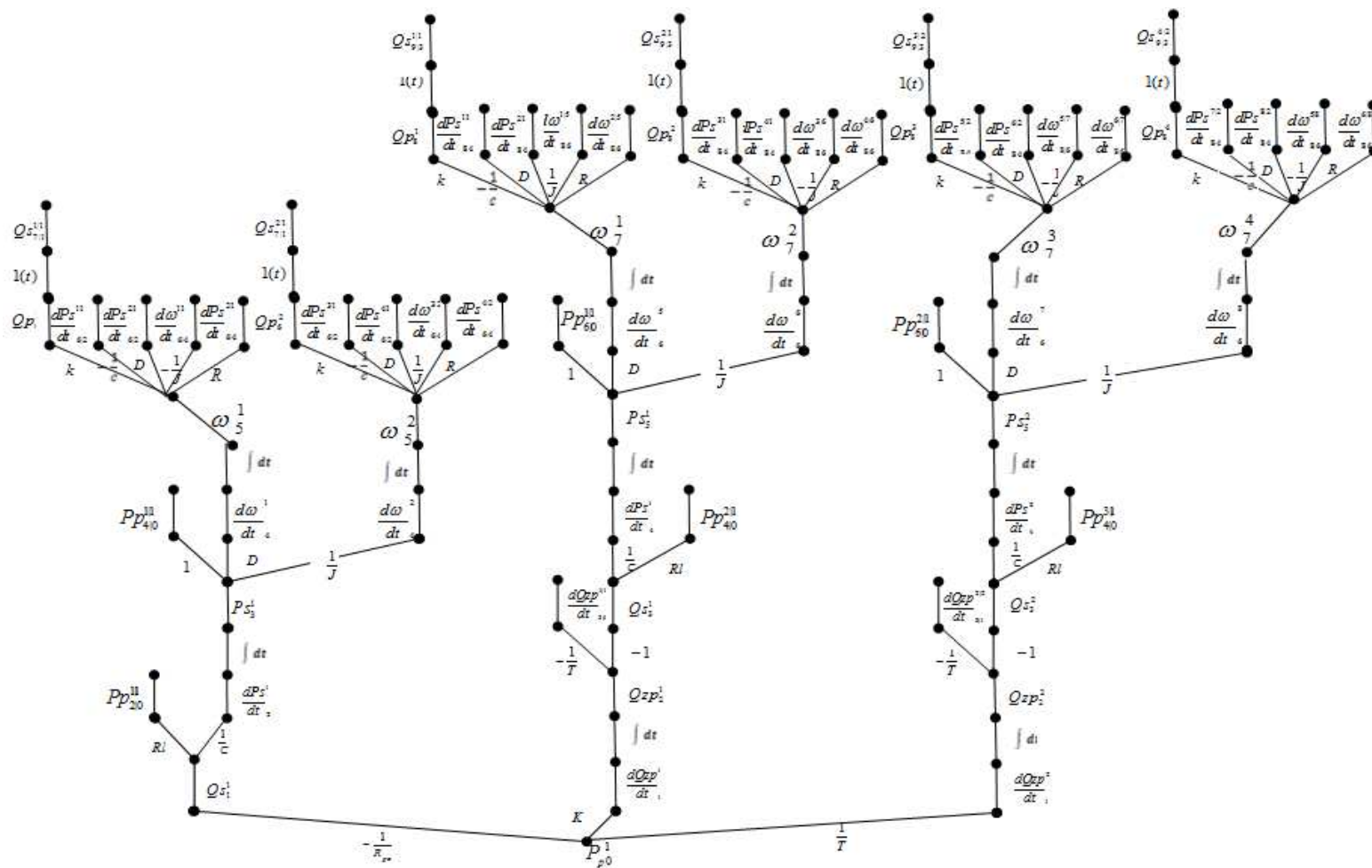


Rys. 5.38. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego P_p z uwzględnieniem Q_p

$$\begin{cases}
 G_{pp}^+ = ({}^0 P_p^1 ({}^1 - \frac{1}{R_p o} Q_s^1 ({}^2 R I P_p^1, \frac{1}{C} \frac{dP_s^1}{dt} ({}^3 \int dt P_s^3 ({}^4 1 P_p^1, D \frac{d\omega^1}{dt} ({}^5 \int dt \omega^5 ({}^6 k Q_p^1 ({}^7 1 [t] Q_s^1)^7, \\
 -\frac{1}{C} \frac{dP_s^1}{dt} ({}^6, D \frac{dP_s^2}{dt} ({}^6, -\frac{1}{J} \frac{d\omega^1}{dt} ({}^6, R \frac{d\omega^2}{dt} ({}^6)^5), \frac{1}{J} \frac{d\omega^2}{dt} ({}^5 \int dt \omega^2 ({}^6 k Q_p^2 ({}^7 1 [t] Q_s)^7, -\frac{1}{C} \frac{dP_s^3}{dt} ({}^6, \\
 D \frac{dP_s^4}{dt} ({}^6, -\frac{1}{J} \frac{d\omega^3}{dt} ({}^6, R \frac{d\omega^4}{dt} ({}^6)^5)^4)^3)^2, K \frac{dQ_z p^1}{dt} ({}^2 \int dt Q_z p^1 ({}^3 -\frac{1}{T} \frac{dQ_z p^1}{dt} ({}^3, -Q_s^3)^3)^2, \frac{1}{T} \frac{dQ_z p^2}{dt} ({}^2 \int dt Q_z p^2 ({}^3 -\frac{1}{T} \frac{dQ_z p^2}{dt} ({}^3, -Q_s^3)^3)^2)^0.
 \end{cases} \quad (5.31)$$

Jednocześnie uwzględniając dekompozycję decyzyjną oraz wielokrotną numerację wierzchołkową struktury z rysunku 5.38, otrzymano strukturę drzewiastą rozgrywającą parametrycznie (Rys. 5.39). Rozkład taki opisano wyrażeniem

$$\left\{ \begin{aligned}
 & {}_D^w G_{p_p}^{++} = ({}^0 P p^1 \frac{1}{R p o} Q s^2 R l P p^1, \frac{1}{C} \frac{d P s}{d t} (\int dt P s^4 l P p^2, D \frac{d \omega}{d t} (\int dt \alpha^6 k Q_p (\int l [t] Q s^1)^7, \frac{1}{C} \frac{d P s^1}{d t}, D \frac{d P s^2}{d t}, \\
 & \frac{1}{J} \frac{d \omega^1}{d t}, R \frac{d \omega^2}{d t})^5), \frac{1}{J} \frac{d \omega}{d t} (\int dt \alpha^6 k Q_p (\int l [t] Q s^2)^7, \frac{1}{C} \frac{d P s^3}{d t}, D \frac{d P s^4}{d t}, \frac{1}{J} \frac{d \omega^3}{d t}, R \frac{d \omega^4}{d t})^5)^4)^3)^2, K \frac{d Q p}{d t} \\
 & (\int dt Q p^3 \frac{1}{T} \frac{d Q p^1}{d t}, -Q s^4 R l P p^3, \frac{1}{C} \frac{d P s}{d t} (\int dt P s^6 l P p^4, D \frac{d \omega}{d t} (\int dt \alpha^8 k Q_p (\int l [t] Q s^3)^9, \frac{1}{C} \frac{d P s^5}{d t}, D \frac{d P s^6}{d t}, \\
 & \frac{1}{J} \frac{d \omega^5}{d t}, R \frac{d \omega^6}{d t})^8)^7, \frac{1}{J} \frac{d \omega}{d t} (\int dt \alpha^8 k Q_p (\int l [t] Q s^4)^9, \frac{1}{C} \frac{d P s^7}{d t}, D \frac{d P s^8}{d t}, \frac{1}{J} \frac{d \omega^7}{d t}, R \frac{d \omega^8}{d t})^8)^7)^6)^5)^4)^3)^2, \frac{1}{T} \frac{d Q p}{d t} \\
 & (\int dt Q p^3 \frac{1}{T} \frac{d Q p^2}{d t}, -Q s^4 R l P p^5, \frac{1}{C} \frac{d P s}{d t} (\int dt P s^6 l P p^6, D \frac{d \omega}{d t} (\int dt \alpha^8 k Q_p (\int l [t] Q s^5)^9, \frac{1}{C} \frac{d P s^9}{d t}, D \frac{d P s^{10}}{d t}, \\
 & \frac{1}{J} \frac{d \omega^9}{d t}, R \frac{d \omega^{10}}{d t})^8)^7, \frac{1}{J} \frac{d \omega}{d t} (\int dt \alpha^8 k Q_p (\int l [t] Q s^6)^9, \frac{1}{C} \frac{d P s^{11}}{d t}, D \frac{d P s^{12}}{d t}, \frac{1}{J} \frac{d \omega^{11}}{d t}, R \frac{d \omega^{12}}{d t})^8)^7)^6)^5)^4)^3)^2)^1)^0.
 \end{aligned} \right. \quad (5.32)$$



Rys. 5.39. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego P_p z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej oraz dodatkowego wierzchołka początkowego Q_p

W rozpatrywanym układzie hydraulicznym, po uwzględnieniu dodatkowego sprzężenia zwrotnego w sensie informacyjnym projektowania, układ (kształt) drzew rozgrywających parametrycznie nie ulega zmianie w sensie strukturalnym, a jedynie dodane są odpowiednie rozgałęzienia.

W przypadku opisu danego układu maszynowego za pomocą grafu zależności przepływu sygnałów istotną sprawą jest wyodrębnienie z grafu najważniejszych stanów determinowanych przez wierzchołki, a także najważniejszych decyzji determinowanych przez krawędzie. W tym celu buduje się kompleksowe drzewa parametryczne.

5.5. KOMPLEKSOWE DRZEWA ROZGRYWAJĄCE PARAMETRYCZNIE

Struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie od każdego wierzchołka początkowego różnią się między sobą kształtem i własnościami. Opisują proces decyzyjny i przestrzeń możliwych do uzyskania stanów pracy układu hydraulicznego po wcześniejszych zmianach parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Istotną rzeczą jest wyodrębnienie z grafu zależności najważniejszych stanów i decyzji determinowanych przez wierzchołki i krawędzie. W tym celu buduje się kompleksowe drzewa rozgrywające parametrycznie [68, 70].

Rozkładając graf zależności z rysunku 5.19, opisujący model matematyczny układu hydraulicznego (Rys. 5.14) od każdego z wierzchołków, otrzymano zbiór D struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie:

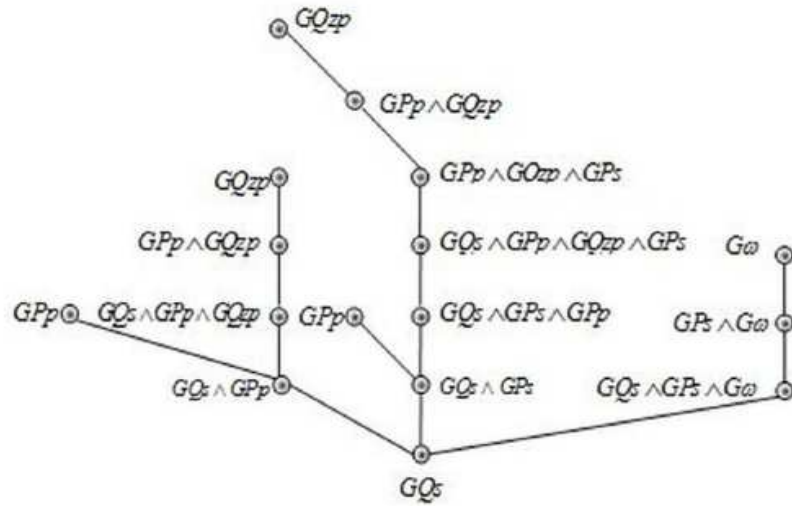
$$D = \{G_{Q_s}^{++}, G_{P_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_{zp}}^{++}\}. \quad (5.33)$$

W kompleksowej strukturze drzewiastej rozgrywającej parametrycznie nałożono wszystkie struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie, od każdego z wierzchołków, na strukturę rozgrywającą, od ustalonego wcześniej wierzchołka. W związku z tym w grafie zależności z rysunku 5.22 istnieje zbiór S struktur rozgrywających parametrycznie:

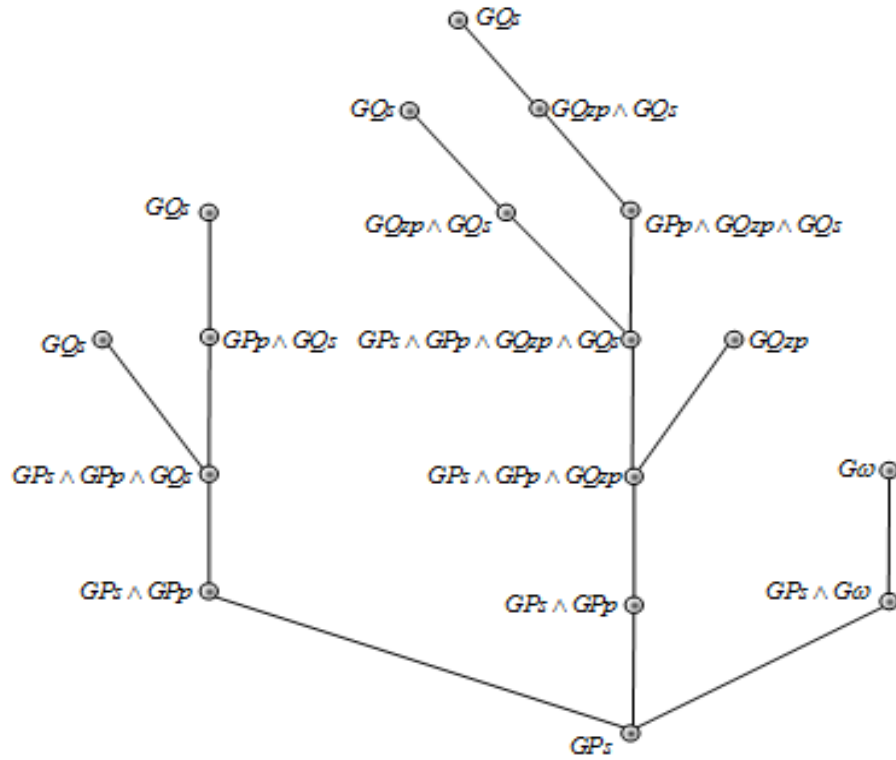
$$S = \{S_{G_{Q_s}}, S_{G_{P_s}}, S_{G_{\omega}}, S_{G_{P_p}}, S_{G_{Q_{zp}}}\}, \quad (5.34)$$

gdzie np.: $S_{G_{Q_s}}$ - to struktura kompleksowa z nałożonymi wszystkimi strukturami drzewiastymi rozgrywającymi parametrycznie ze zbioru D , na strukturę rozgrywającą parametrycznie od ustalonego wcześniej wierzchołka $G_{Q_s}^{++}$.

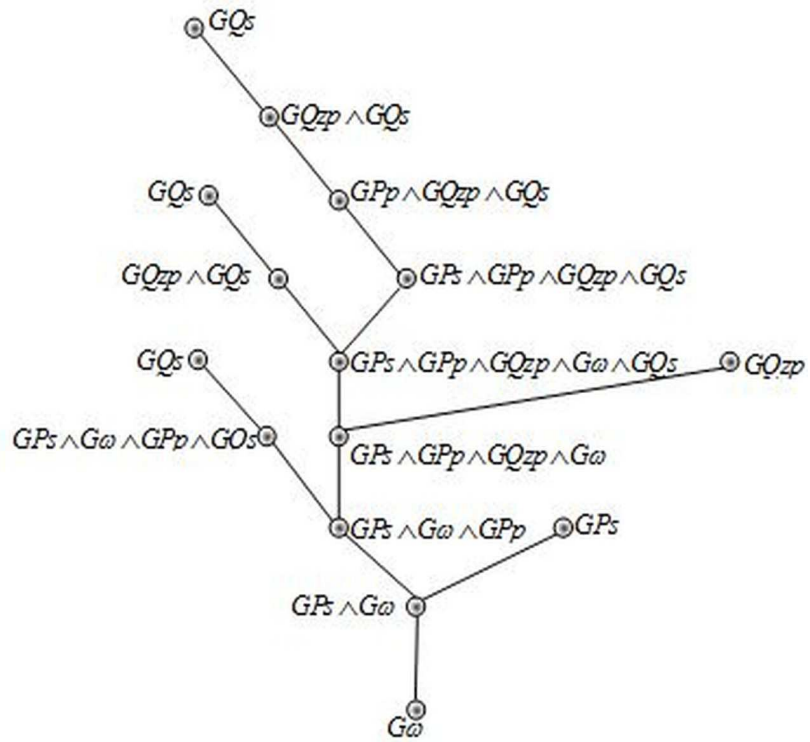
Kompleksowe struktury rozgrywające parametrycznie $S_{G_{Q_s}}, S_{G_{P_s}}, S_{G_{\omega}}, S_{G_{P_p}}$, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5.40 - 5.43.



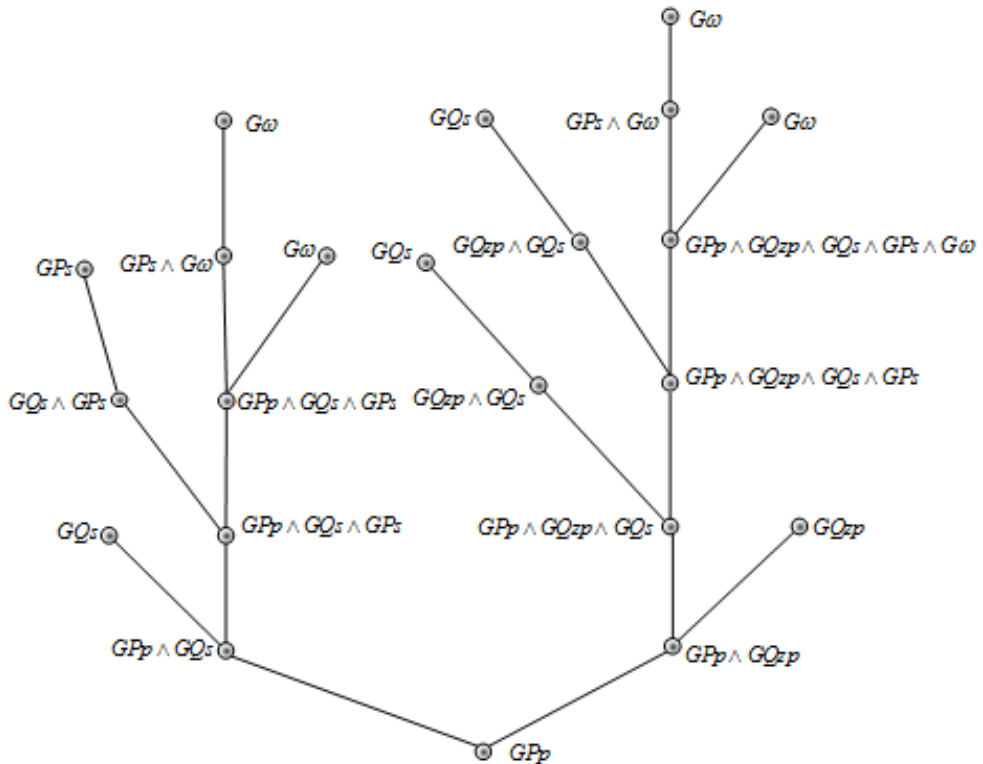
Rys. 5.40. Drzewo kompleksowe S_{GQ_s}



Rys. 5.41. Drzewo kompleksowe S_{GP_s}



Rys. 5.42. Drzewo kompleksowe $S_{G\omega}$



Rys. 5.43. Drzewo kompleksowe S_{GPp}

5.5.2.1. ZŁOŻONOŚĆ DECYZYJNA KOMPLEKSOWYCH STRUKTUR ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

Budowa kompleksowych struktur rozgrywających parametrycznie polega na operacji ‘szepiania’ danej struktury rozgrywającej parametrycznie nazywaną strukturą ‘bazową’. Kompleksową strukturę rozgrywającą parametrycznie uzyskuje się w wyniku operacji ‘zaszczepienia’ struktury bazowej.

Definicja 5.1

Szczepienie oznacza ‘złączenie’ na strukturze bazowej innej struktury rozgrywającej parametrycznie w wierzchołku początkowym danej struktury.

Definicja 5.2

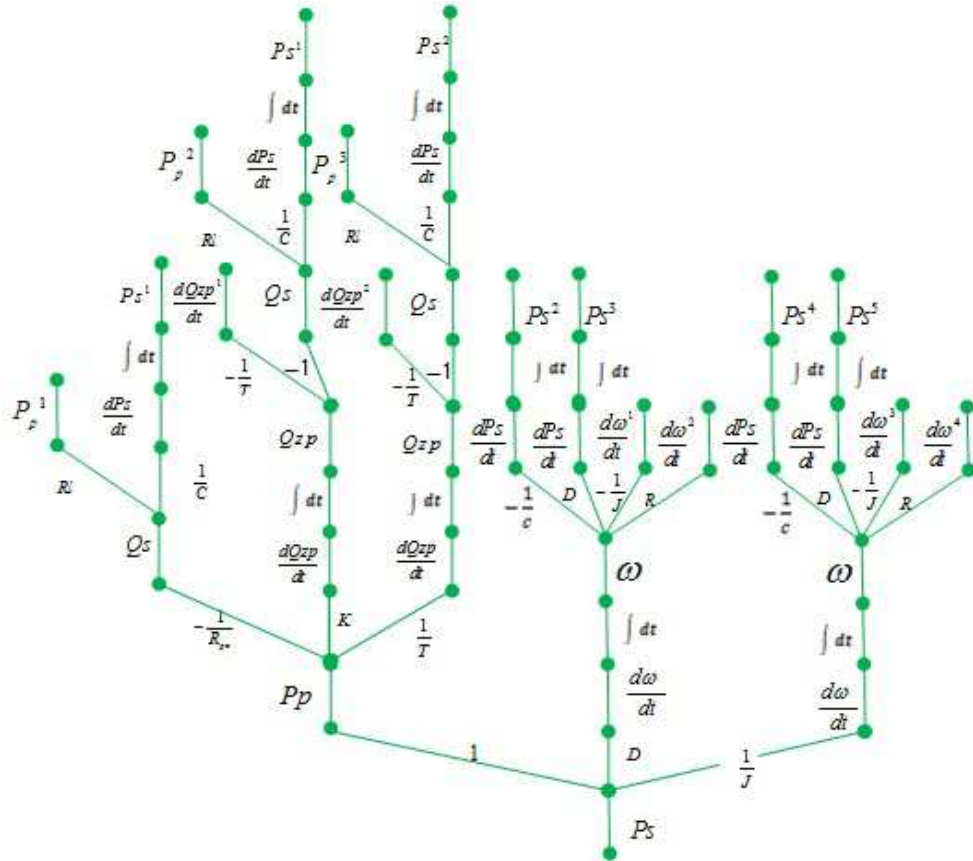
Zszczepienie struktury rozgrywającej parametrycznie oznacza ‘przyłączenie’ na strukturze bazowej wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie danego grafu w wierzchołkach początkowych danych struktur.

Uwaga 5.1

W operacji zszczepienia, struktury rozgrywające parametrycznie dla danego wierzchołka przyłącza się tylko raz na strukturze bazowej, przy czym struktury rozgrywające parametrycznie należy dołączać zaczynając od wierzchołka początkowego struktury bazowej. Ostatecznie uzyskuje się połączenie nakładkowe identycznych fragmentów w sensie graficznym, ale występujących w różnych takich strukturach, co prowadzi do tzw. struktury kompleksowej.

Kompleksowe drzewa z rysunków 5.40 i 5.43 przedstawiono w sposób uproszczony. W ogólnym przypadku należy przedstawić szczegółowo pojedyncze oznaczenia krawędzi, jako parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych badanego układu. Należy wówczas uwzględnić dekompozycję parametryczną parametrów decyzyjnych zapisanych oddzielnie, a nie w sposób interakcyjny [68].

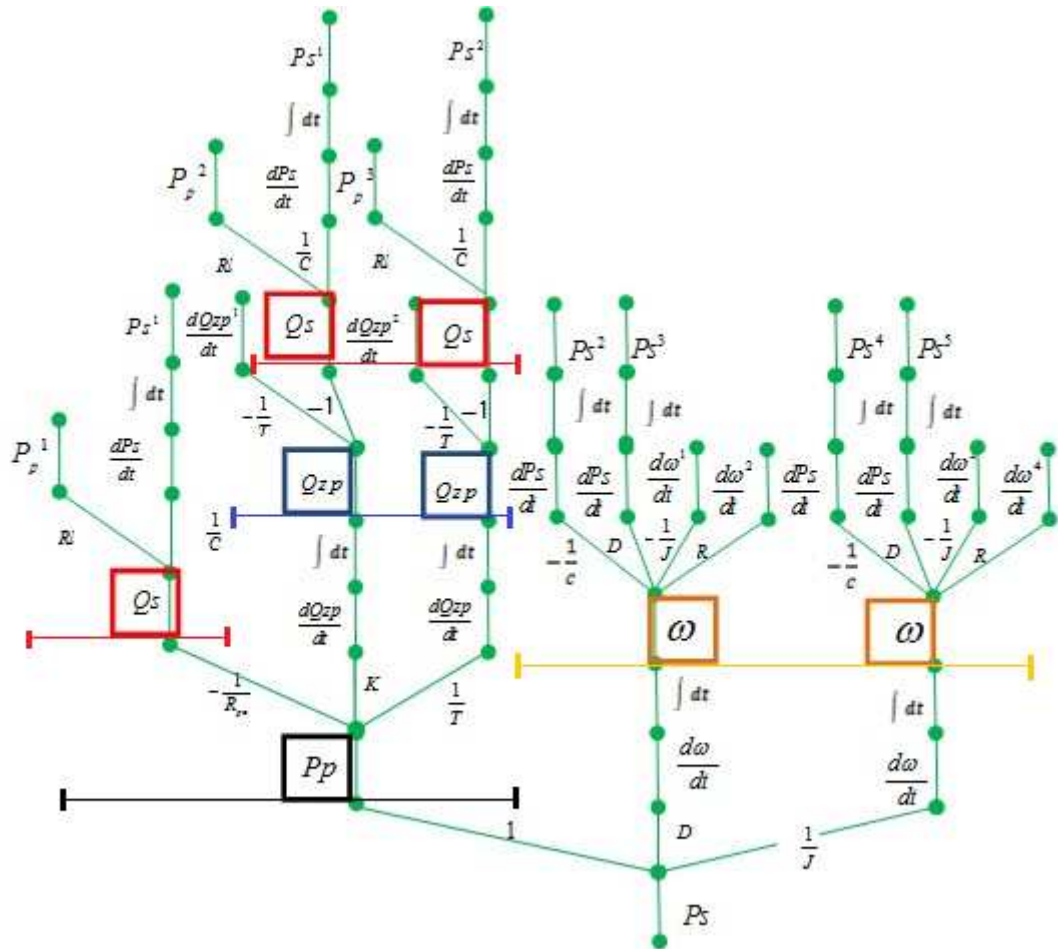
Na rysunku 5.44 przedstawiono strukturę $G_{p_s}^{++}$ z rysunku 5.27, uwzględniając decyzyjną dekompozycję.



Rys. 5.44. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie $G_{P_s}^{++}$ z uwzględnieniem dekompozycji decyzyjnej

Aby otrzymać szczegółową budowę kompleksowej struktury rozgrywającej $S_{G_{P_s}}$ z rysunku 5.41, należy zeszczepić „bazową” strukturę rozgrywającą parametrycznie $G_{P_s}^{++}$ z rysunku 5.44.

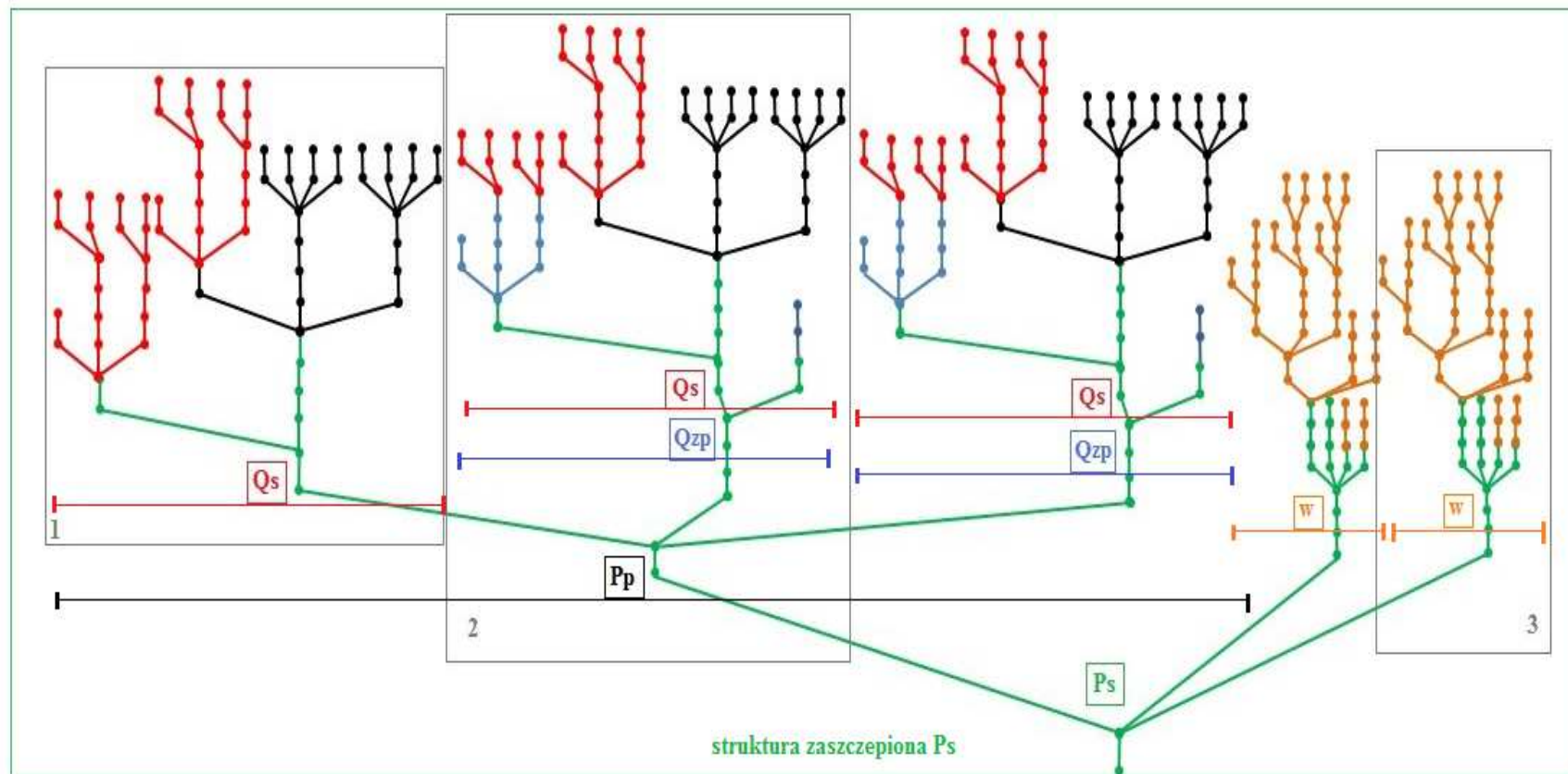
Na rysunku 5.45 zaznaczono miejsca szczepliń struktur rozgrywających parametrycznie odpowiednich wierzchołków początkowych.



Rys. 5.45. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie $G_{P_s}^{++}$ z zaznaczonymi miejscami szczepli pozostałych struktur rozgrywających parametrycznie:

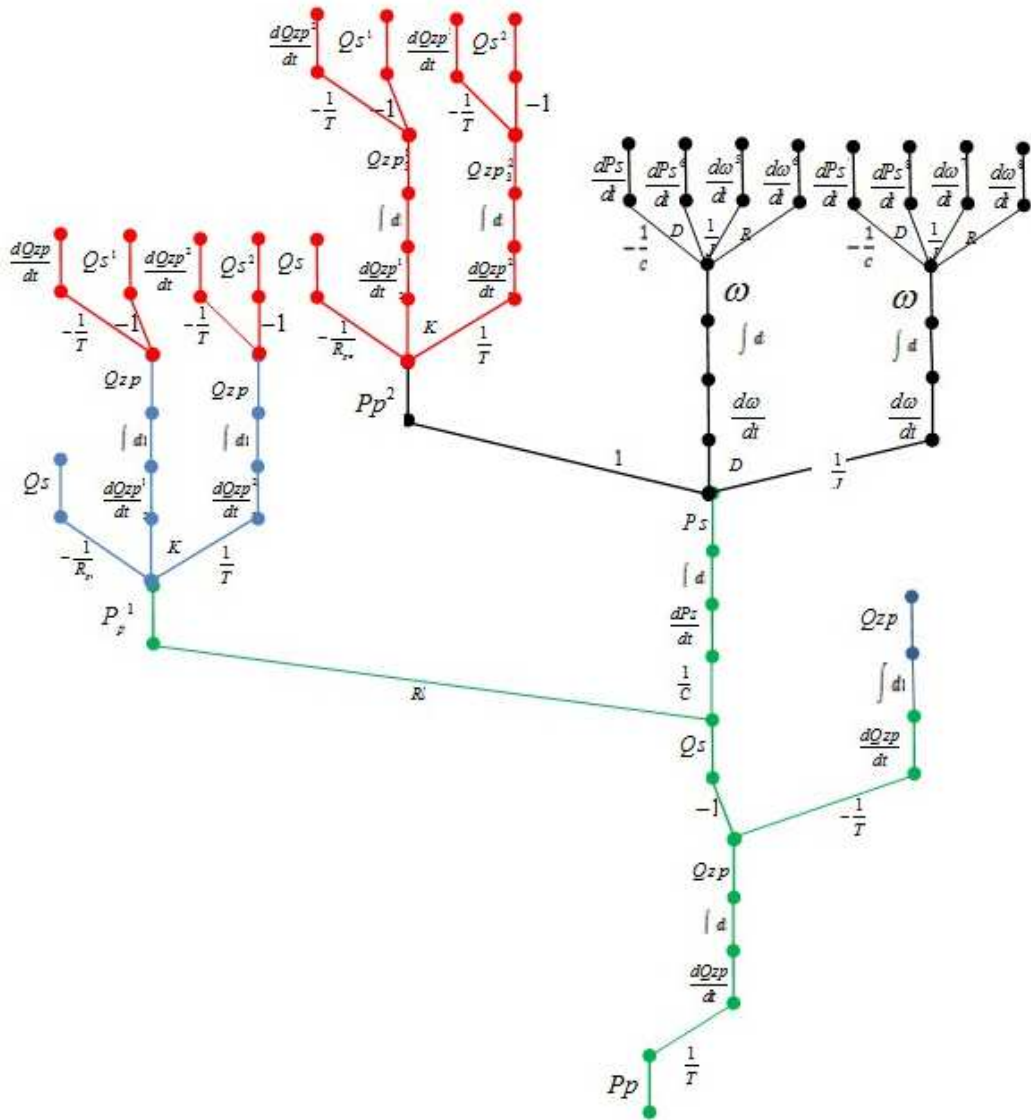
$$\blacksquare - G_{P_p}^{++}, \blacksquare - G_{Q_{zp}}^{++}, \blacksquare - G_{Q_s}^{++}, \blacksquare - G_{\omega}^{++}$$

Na rysunku 5.46 przedstawiono **szczepioną** kompleksową strukturę rozgrywającą parametrycznie $G_{P_s}^{++}$.

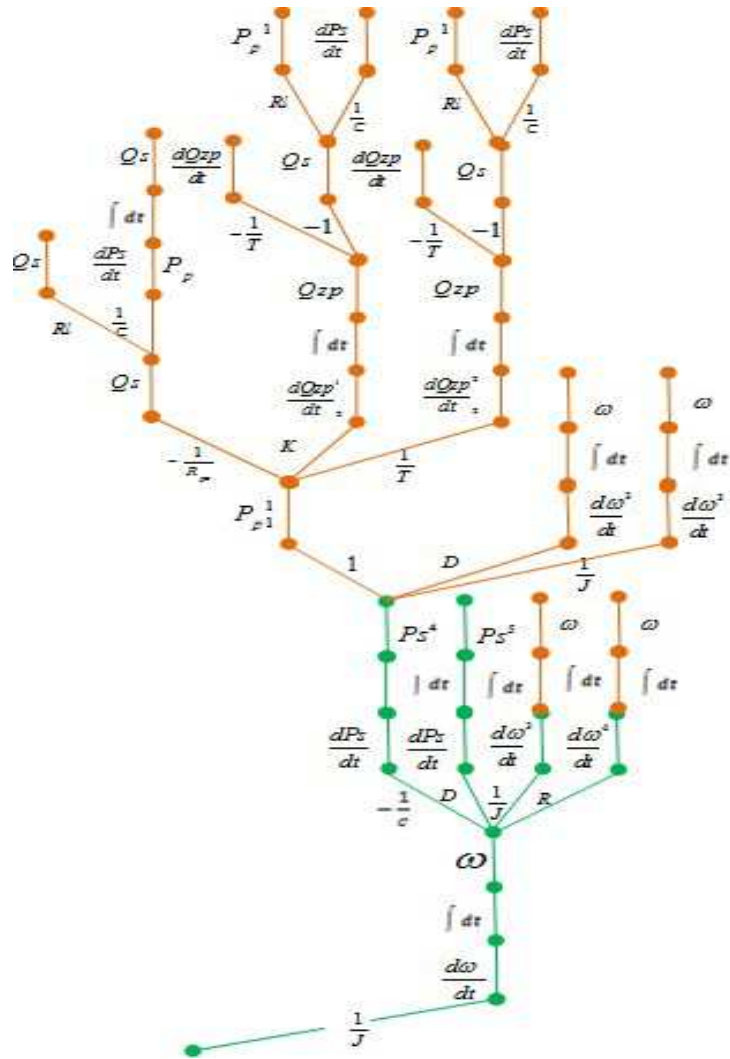


Rys. 5. 46. Zszczepiona struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie $G_{Ps^{++}}$ obrazująca całościową postać kompleksowej struktury rozgrywającej parametrycznie

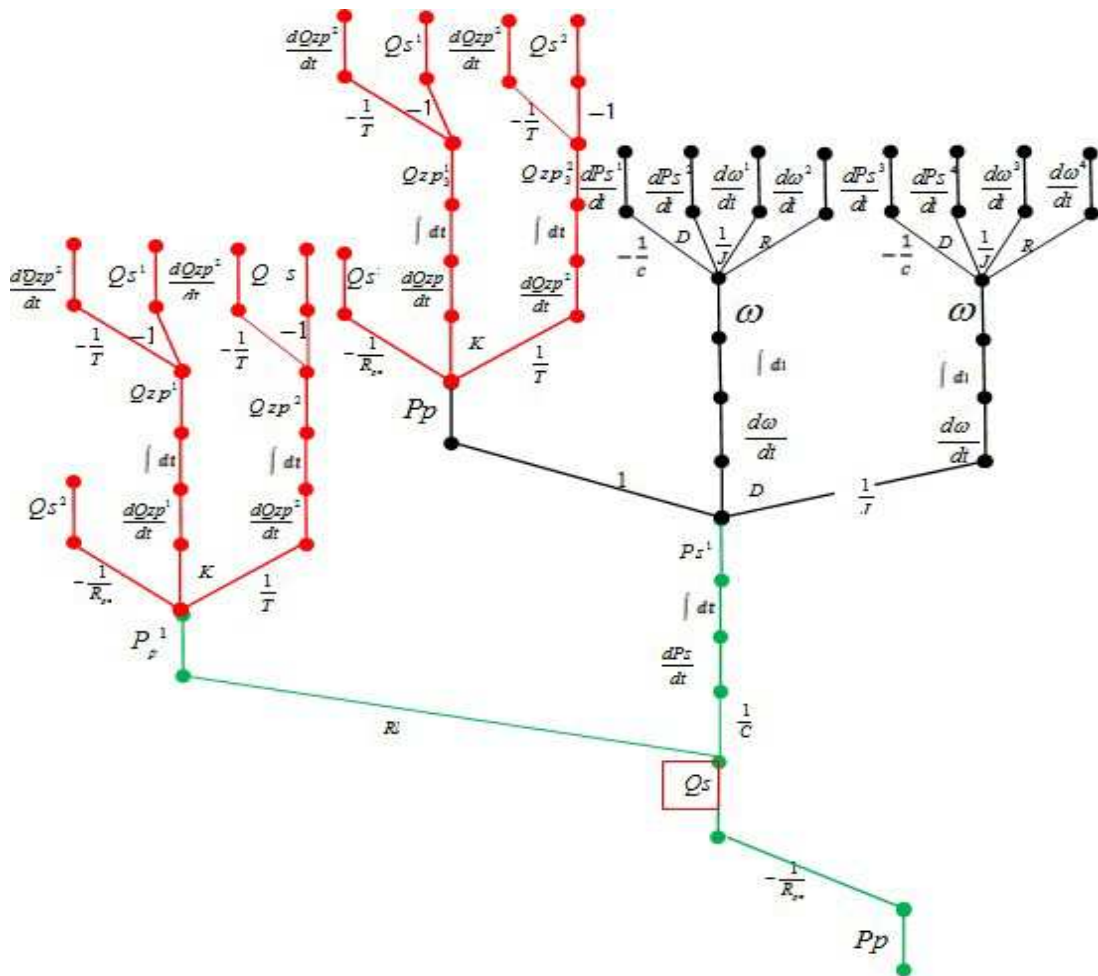
Na rysunkach 5.47- 5.49 przedstawiono szczegółową złożoność fragmentów 1, 2 i 3, zaznaczonych na całościowej kompleksowej strukturze rozgrywającej parametrycznie S_{GP_s} z rysunku 5.46. Fragmentami opisano decyzje, przekształcenia analityczno-algebraiczne i stany właściwe odpowiednich struktur.



Rys. 5.47. Złożoność decyzyjna fragmentu 2 kompleksowej struktury S_{GP_s} z rysunku 5.46



Rys. 5.48. Złożoność decyzyjna fragmentu 3 kompleksowej struktury S_{GP_s} z rysunku 5.46



Rys. 5.49. Złożoność decyzyjna fragmentu 1 kompleksowej struktury S_{GP_s}

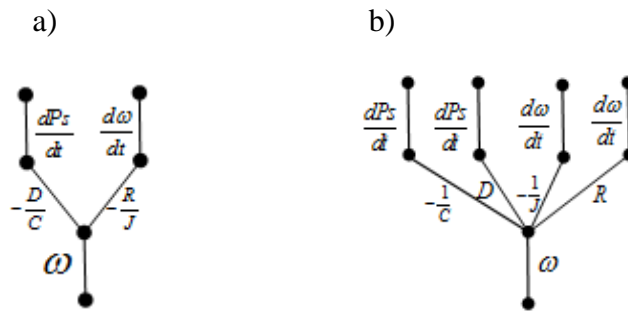
Węzłami na kompleksowych strukturach drzewiastych opisano decyzje, przekształcenia analityczno-algebraiczne i stany właściwe danej struktury rozgrywającej parametrycznie. Jeśli odpowiednie fragmenty struktur rozgrywających parametrycznie są identyczne, to w węźle oznaczono ich koniunkcję.

Węzeł na strukturze kompleksowej będący iloczynem wszystkich elementów ze zbioru D :

$$D = \{G_{Q_s}^{++}, G_{P_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_zp}^{++}\}$$

nazywa się -pełnym i oznaczany jest jako γ .

Na przykład, na strukturze kompleksowej S_{GP_p} z rysunku 5.43 opisano jeden taki węzeł iloczynem $GP_p \wedge GQ_zp \wedge GQ_s \wedge GP_s \wedge G\omega$. Odpowiada on wspólnej części wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie ze zbioru D , przedstawionej na rysunku 5.50.



5.50. Część wspólna wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie (z ewentualnym rozpisaniem na oddzielne parametry konstrukcyjno- eksploatacyjne)

Oznacza to analizę procesu decyzyjnego we wszystkich elementach struktur z rysunku 5.50, niezależnie od ustalonego wcześniej wierzchołka rozkładu grafu zależności z rysunku 5.19,

W kompleksowych strukturach rozgrywających parametrycznie może być n węzłów pełnych γ_n , dlatego istnieje rodzina B zbiorów pełnych węzłów ze wszystkich struktur zbioru S :

$$B \subseteq \left\{ \{ \gamma_1, \dots, \gamma_n \} : \gamma_1, \dots, \gamma_n \in G_{Q_s}^{++} \wedge G_{P_p}^{++} \wedge G_{P_s}^{++} \wedge G_{\omega}^{++} \wedge G_{Q_{zp}}^{++}, \gamma_1 \neq \gamma_2 \dots \neq \gamma_n \right\}.$$

5.6. TECHNIKA POWROTÓW (BACKTRACKING BT) W DRZEWACH ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

W celu wyszukania optymalnych zachowań się funkcji zależnych od czasu opisanych za pomocą wierzchołków w grafie zależności, możliwe jest zastosowanie algorytmu techniki powrotów [2, 185].

5.6.1. IDEA TECHNIKI POWROTÓW

W grafie zależności rozgrywającym parametrycznie określono przestrzeń stanów, przy czym stan jest sytuacją stanowiącą rozwiązanie problemu albo mogącą prowadzić do znalezienia optymalnej wartości funkcji oraz sposób przechodzenia z jednego stanu układu (elementu) w drugi. Aby rozwiązać problem, najpierw należy przeszukać przestrzeń stanów, przechodząc z jednego wierzchołka w drugi (zgodnie ze zwrotem krawędzi oraz zmieniając parametry konstrukcyjne i lub eksploatacyjne), aż zostanie znaleziona optymalna wartość funkcji, zależnej od czasu w wierzchołku grafu. W danym stanie (zachowanie się funkcji zależnej od czasu) może istnieć wiele dopuszczalnych ruchów, czyli dróg w grafie oraz zmian wartości parametrów konstrukcyjnych odpowiadającym krawędziom, można wybrać złe decyzje. Jeśli w grafie zależności, będzie wybrana zła droga oraz nieprawidłowe zmiany arytmetyczne parametrów konstrukcyjnych (nie osiągając poprawnego zachowania się funkcji zależnych od czasu), to należy cofnąć się do wcześniejszego wierzchołka i wybrać inną drogę. Na drzewie z cyklami, cofnięcie się do wcześniejszego etapu procesu przeszukiwania jest możliwe za pomocą cykli. Jeśli na danym etapie procesu

decyzyjnego nie istnieją cykle prowadzące do wcześniejszych wierzchołków, to należy wykorzystać technikę powrotów

W metodzie powrotów wszystkie drogi i odwiedzone stany w drzewie rozgrywającym parametrycznie zostają zapamiętane, co umożliwia cofnięcie decyzji. Naturalną techniką kodowania algorytmów opartych na decyzji jest rekurencja.

W algorytmie zdefiniowano: $\langle x_1, \dots, x_{n-1}, x_n \rangle$ - szukane rozwiązanie, czyli wartości arytmetyczne wybranych zmiennych decyzyjnych w danych wierzchołkach,

A_k - zbiór możliwych rozszerzeń rozwiązania częściowego $\langle x_1, \dots, x_{k-1} \rangle$,

F - funkcję przejścia w grafie, która dla danego rozwiązania częściowego $\langle x_1, \dots, x_i \rangle$

przyjmuje wartość 0- fałsz, gdy ciąg $\langle x_1, \dots, x_i \rangle$ nie daje się rozszerzyć do rozwiązania całkowitego, a 1 w przeciwnym wypadku. Funkcji F przyporządkowany jest algorytm rozkładu grafu od danego wierzchołka.

Przykład 5.1

W celu znalezienia optymalnych wartości wybranych zmiennych decyzyjnych na strukturze $G_{Ps}^+(Q_s)$ zdefiniowano:

P_s - wierzchołek początkowy;

X- macierz incydencji- tablica sąsiedztwa;

DOP- tablicę logiczną rejestrującą możliwość istnienia cykli w danej drodze DOP;

k- długość rozwiązania częściowego (droga na strukturze drzewiastej od wierzchołka początkowego do wierzchołka końcowego);

y- szukana wartość wybranego parametru decyzyjnego.

Dla struktury rozgrywającej parametrycznie:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{Ps}^+ = ({}^0 P_s ({}^1 P_p ({}^2 - \frac{1}{R_{po}} Q_s ({}^3 R_{lpp}, \frac{1}{C} \frac{dP_s}{dt} ({}^4 \int dt P_s)^4)^3), \\ \frac{K}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt} ({}^3 \int dt Q_{zp} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{dQ_{zp}}{dt}, -1 Q_s)^4)^3)^2, \frac{D}{J} \frac{d\omega}{dt} ({}^2 \int dt \omega ({}^3 - \frac{D}{C} \frac{dP_s}{dt}, -\frac{R}{J} \frac{d\omega}{dt})^3)^2)^1)^0 \end{array} \right.$$

Skrócony pseudokod działania algorytmu:

For $(i = 1; i \leq n; i++)$ to DOP $[i]=1$; and X $[1]=s$; DOP $[s]=0$;

$G_{Ps}^+(Q_s)$; i $G_{Ps}^+(k)$

$u = G[X[k-1]]$;

for każdy wierzchołek $y \in Adj(u)$

{ if $(k = n+1 \& \& y = s)$ „ X zawiera cykl powrotny”;

else (if DOP $[y]$)

{ X $[k]=y$;

DOP $[y]=0$;

$G_{Ps}^+(k+1)$

DOP $[y]=1$; }

W całościowym algorytmie należy uwzględnić tablicę zmian w wartości funkcji określonej przez wierzchołek (w przykładzie Q_s) oraz tablicę zmian wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych (wpływających na wartości funkcji w wierzchołku) przypisanym odpowiednim krawędziom w tablicy X.

5.7. WSPÓŁCZYNNIK ZŁOŻONOŚCI STRUKTURY W UJĘCIU WIELOWARTOŚCIOWYCH DRZEW LOGICZNYCH

Możliwe jest zastosowanie współczynnika złożoności L oraz kompleksowego współczynnika złożoności L^K w opisie wielowartościowych drzew logicznych. W zależności tej wyszukano optymalne wielowartościowe drzewo decyzyjne [58, 83, 84].

Przykład 5.2

W wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_1, x_2, x_3)$, zapisanej numerycznie w KAPN: 000, 001, 002, 110, 003, 102, 004, 013, 014, 023, 124, 103, istnieje 6 wielowartościowych drzew decyzyjnych (Rys.5.51), z odpowiednią kolejnością pięter decyzyjnych zmiennych.

W pracach [83, 84] w wielowartościowej funkcji logicznej obliczono współczynnik złożoności, bez uwzględnienia i z uwzględnieniem procesu minimalizacji.

Wartości kompleksowych współczynników złożoności, z odpowiednią kolejnością pięter decyzyjnych, bez uwzględnienia minimalizacji wynoszą odpowiednio:

$$L_{\min}^K(x_1, x_2, x_3) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^1 + \left(\frac{3}{1+1} + \frac{3}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^2 + \left(\frac{5}{2+1} + \frac{5}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^3 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^4 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^5 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^6 + \left(\frac{3}{1+1} + \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} \right)^7 = 14,48$$

oraz:

$$L^K(f(x_1, x_3, x_2)) = 14,92,$$

$$L^K(f(x_3, x_2, x_1)) = 20,28,$$

$$L^K(f(x_3, x_1, x_2)) = 21,2,$$

$$L^K(f(x_2, x_3, x_1)) = 21,24,$$

$$L^K(f(x_2, x_1, x_3)) = 14,3.$$

Uwzględniając minimalizacje dla drzew decyzyjnych z rysunku 5.51, wartości kompleksowych współczynników złożoności L^K obliczono:

$$L_{\min}^K(x_1, x_2, x_3) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^1 + \left(\frac{3}{1+1} + \frac{3}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^2 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^4 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^5 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^6 + \left(\frac{3}{1+1} + \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} \right)^7 = 10,59,$$

oraz:

$$L_{\min}^K(f(x_1, x_3, x_2)) = 11,82,$$

$$L_{\min}^K(f(x_3, x_2, x_1)) = 15,3,$$

$$L_{\min}^K(f(x_3, x_1, x_2)) = 17,2,$$

$$L_{\min}^K(f(x_2, x_3, x_1)) = 16,26,$$

$$L_{\min}^K(f(x_2, x_1, x_3)) = 11,64.$$

W wielowartościowym drzewie logicznym, przedstawionym na rysunku 5.51, o układzie pięter x_1, x_2, x_3 wyznaczono najmniejszy kompleksowy współczynnik złożoności:

$$L_{\min}^K(f(x_1, x_2, x_3)) = 10,59.$$

Przykład 5.3

W wielowartościowej funkcji logicznej $f(x_1, x_2, x_3)$, zapisanej numerycznie w KAPN: 001, 010, 011, 012, 100, 110, 112, istnieje 6 wielowartościowych drzew decyzyjnych (Rys.5.55), z odpowiednią kolejnością pięter decyzyjnych dla zmiennych

Wartości kompleksowych współczynników złożoności L^K w drzewach decyzyjnych z rysunku 5.52, bez uwzględnienia minimalizacji :

$$L^K(x_1, x_2, x_3) = \left(\sum_{w \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^1 + \left(\frac{3}{1+1} + \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} \right)^2 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^4 + \left(\frac{2}{2+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^5 + \left(\frac{2}{1+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{1}} \right)^3 = 11,66$$

oraz:

$$L^K(f(x_2, x_1, x_3)) = 11,66,$$

$$L^K(f(x_2, x_3, x_1)) = 11,65,$$

$$L^K(f(x_1, x_2, x_3)) = 11,66,$$

$$L^K(f(x_3, x_2, x_1)) = 12,28,$$

$$L^K(f(x_3, x_1, x_2)) = 12,28.$$

Wartości kompleksowych współczynników złożoności L^K drzew decyzyjnych z rysunku 5.52 z uwzględnieniem minimalizacji:

$$L_{\min}^K(x_1, x_2, x_3) = \left(\sum_{v \in W(L)} \frac{d(w_i)}{h(w_i)+1} + \frac{L}{\sum_{i \in L} h_i} \right) = \left(\frac{2}{0+1} + \frac{2}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} \right)^1 + \left(\frac{3}{1+1} + \frac{3}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + 1} \right)^2 + \left(\frac{2}{1+1} + \frac{2}{\frac{1}{2} + 1} \right)^3 = 8,33$$

oraz:

$$L_{\min}^K(f(x_2, x_1, x_3)) = 9,66,$$

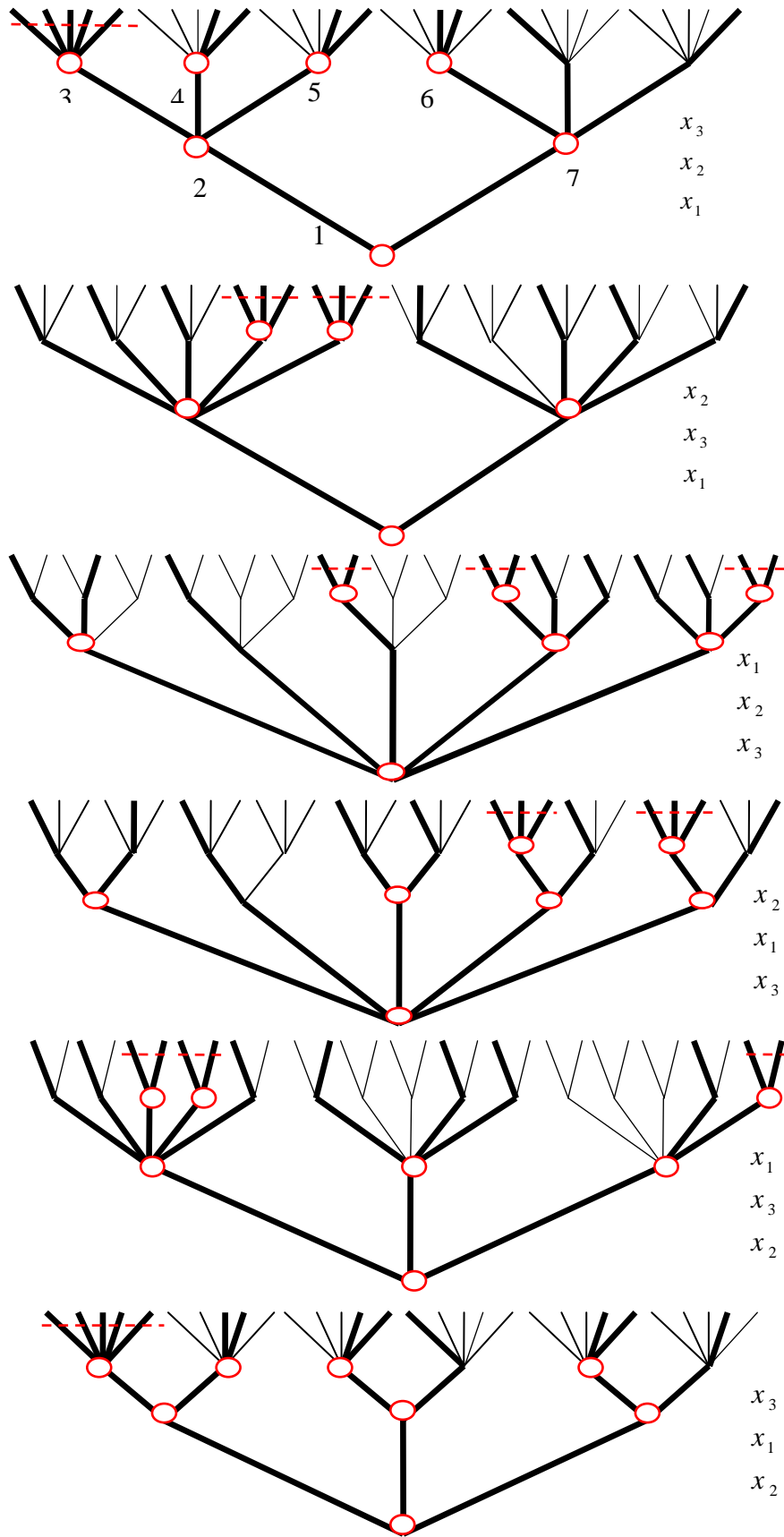
$$L_{\min}^K(f(x_2, x_3, x_1)) = 8,33,$$

$$L_{\min}^K(f(x_1, x_2, x_3)) = 9,66,$$

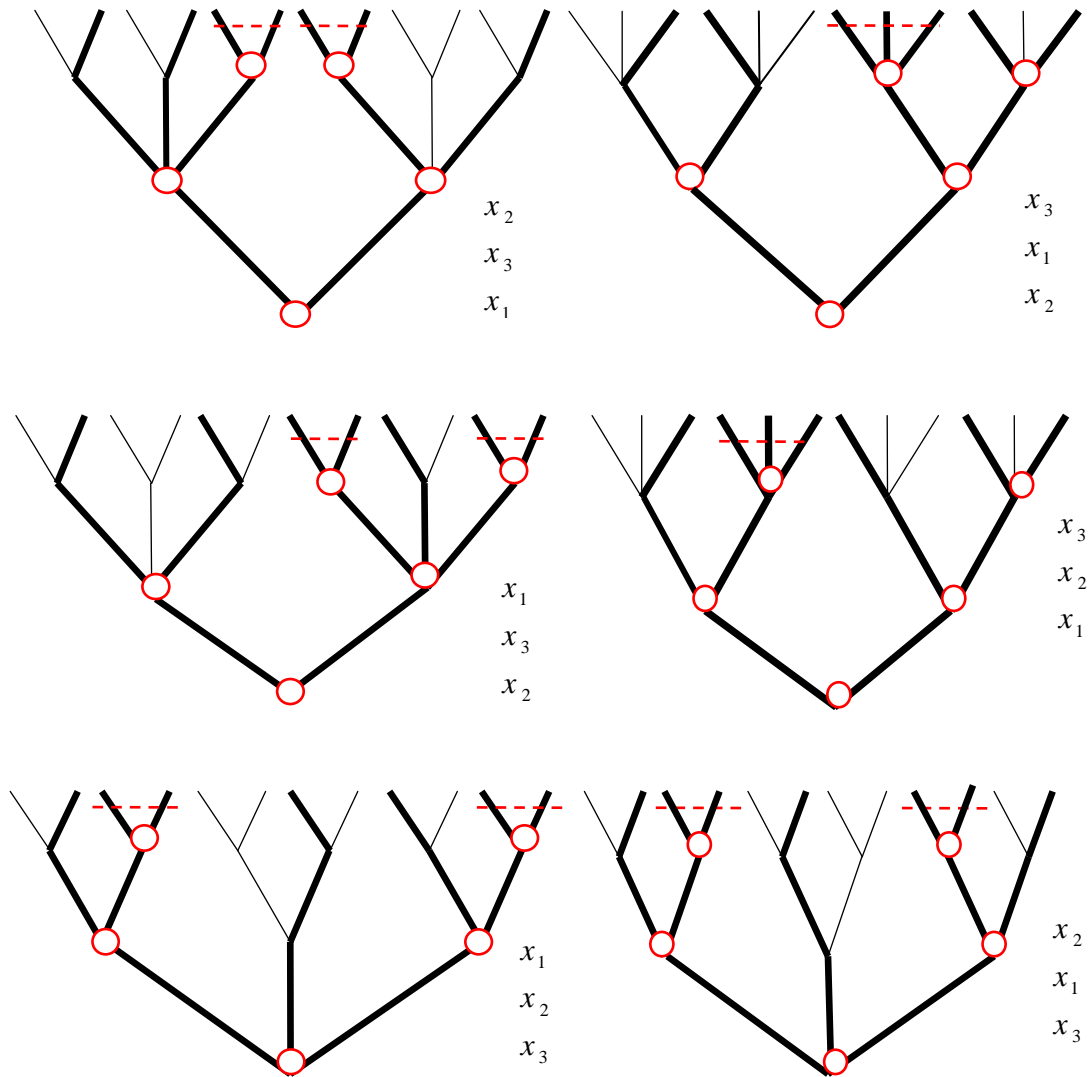
$$L_{\min}^K(f(x_3, x_2, x_1)) = 8,96,$$

$$L_{\min}^K(f(x_3, x_1, x_2)) = 8,96.$$

W wielowartościowych drzewach logicznych, po dokonaniu wszystkich możliwych odcięć, wyznaczono współczynnik złożoności. Wartością współczynnika złożoności (kształtu) określono optymalne oraz najgorsze wielowartościowe drzewo logiczne, oraz hierarchiczną ocenę drzew w zależności od liczby gałęzi prawdziwych. Kompleksowy współczynnik złożoności jest bardzo ważny z punktu widzenia zastosowania grafów i drzew rozgrywających parametrycznie, jako alternatywnej metody optymalizacji dyskretnej i rangi ważności zmiennych decyzyjnych, w stosunku do wielowartościowych logicznych drzew decyzyjnych.



Rys. 5.51. Kompleksowe współczynniki złożoności wielowartościowej funkcji logicznej z przykładu 5.2



Rys. 5.52. Kompleksowe współczynniki złożoności wielowartościowej funkcji logicznej z przykładu 5.3

Kompleksowy współczynnik złożoności jest bardzo ważny z punktu widzenia zastosowania grafów i drzew rozgrywających parametrycznie jako alternatywnej metody optymalizacji dyskretnej i rangi ważności zmiennych decyzyjnych w stosunku do wielowartościowych logicznych drzew decyzyjnych. Wartość współczynnika kształtu wyznacza optymalne oraz najgorsze wielowartościowe drzewo logiczne, oraz hierarchicznie ocenia drzewa w zależności od liczby gałęzi prawdziwych.

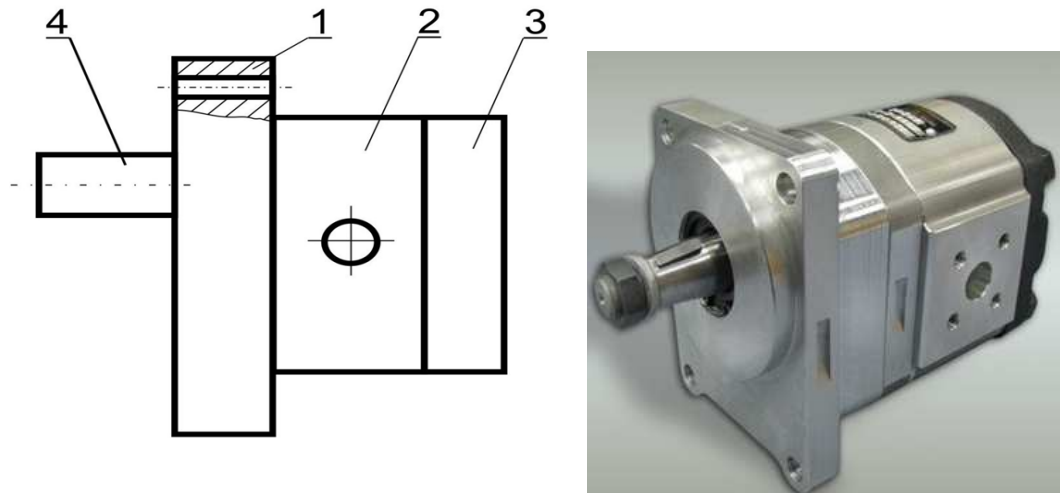
ROZDZIAŁ 6

**OPTIMALIZACJA DYSKRETNA POMPY ZĘBATEJ Z
PODCIĘTĄ STOPĄ ZĘBA**

Układy hydrauliczne są coraz częściej stosowane ze względu na możliwości przenoszenia dużej mocy przy stosunkowo wysokiej sprawności. Jednym z głównych elementów każdego układu są generatory energii strumienia cieczy. Najbardziej rozpowszechnione w przemyśle są pompy zębate o zazębieniu zewnętrznym. Ich udział oceniany jest na około 50%. Tak powszechne zastosowanie wynika z prostej i zwartej ich konstrukcji, niezawodności działania, wysokiej odporności na zanieczyszczenia czynnika roboczego, dużego współczynnika sprawności, małych gabarytów w porównaniu do innych jednostek pompujących oraz niskiego kosztu wytwarzania. Dodatkowo jednostki zębate mogą działać ze znacznymi prędkościami obrotowymi i pod tym względem przewyższają inne rodzaje pomp wyporowych. Wymienione zalety, a także wysokie ciśnienia robocze dochodzące do 30 MPa oraz sprawność całkowita dochodząca do 90% - wpływają na rozległe zastosowania w układach napędowych, sterowniczych lub smarowniczych maszyn i urządzeń. Pomimo wysokiej efektywności energetycznej w dalszym ciągu prace nad poprawą sprawności są prowadzone przez większość producentów i ośrodków naukowych. W procesie projektowania wykorzystywano różne algorytmy optymalizacji, np.: metodę systematycznego poszukiwania, metodę Monte Carlo, czy też metodę gradientową. W niniejszej pracy przedstawiono nowe podejście optymalizacji z uwzględnieniem wielowartościowych drzew logicznych. Wykorzystanie wymienionej metody zaprezentowano na przykładzie innowacyjnej jednostki zębatej z podciętą stopą zęba [126, 127, 152].

6. 1. OBIEKT BADAŃ

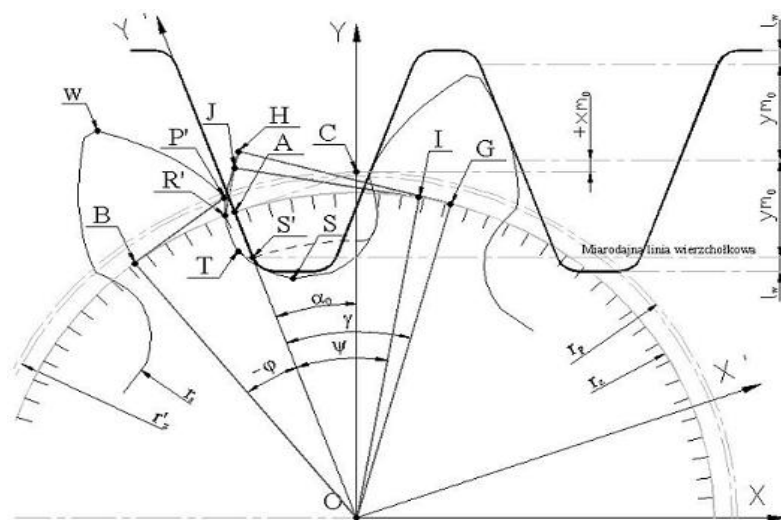
Zaprojektowaną i wykonaną jednostkę prototypową o konstrukcji trójplytowej, pokazano schematycznie na rys. 6.1. Płyta przednia – 1 wykorzystywana jest jako mocowanie pompy do zespołu napędowego. W płycie środkowej – 2 umieszczone są koła zębate, korpusy łożysk ślizgowych oraz otwory ssawne i tłoczne służące do podłączenia instalacji. Całą budowę zamyka płyta tylna – 3.



Rys. 6.1. Trójplytowa konstrukcja mikropompy zębatej o zazębieniu zewnętrznym.

1 – płyta przednia (mocująca), 2 – płyta środkowa (okularowa), 3– płyta tylna,
4– wałek napędowy

Badana jednostka prototypowa jest projektem własnym, wyprodukowanym przez Wytwórnę Pomp Hydraulicznych Sp. z o.o. mieszczącą się we Wrocławiu. Pompę eksperymentalną zaprojektowano z myślą o możliwościach technologicznych WPH S.A. W procesie innowacyjności zmodyfikowano profil ewolwenty w jej dolnej części, poprzez tzw. podcięcie stopy zęba. Modyfikacja może być wykonana za pomocą narzędzia skrawającego z tak zwaną protuberancją lub poprzez odpowiedni dobór korekcji zazębienia. W modelu ewolwentowego zarysu zęba (rys. 6.2) przyjęto, że w wyniku zaokrąglenia lub sfazowania krawędzi skrawającej miarodajna linia wierzchołkowa ulegnie przesunięciu, w kierunku promienia stopy narzędzia o wartość luzu wierzchołkowego lw . Uwzględniono również przesunięcie zarysu o wartość korekcji $+x \cdot m_0$.



Rys. 6.2. Podcięcie stopy narzędziem zębatką o zarysie trapezowym [152]

Podstawowe parametry zazębienia dla pompy o wydajności jednostkowej $q = 40 \text{ cm}^3$:

Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Liczba zębów	z	-	9
Moduł	m_o	[mm]	4.5
Kąt przyporu	α_o	[°]	20
Szerokość koła zębatego	b	[mm]	32.2

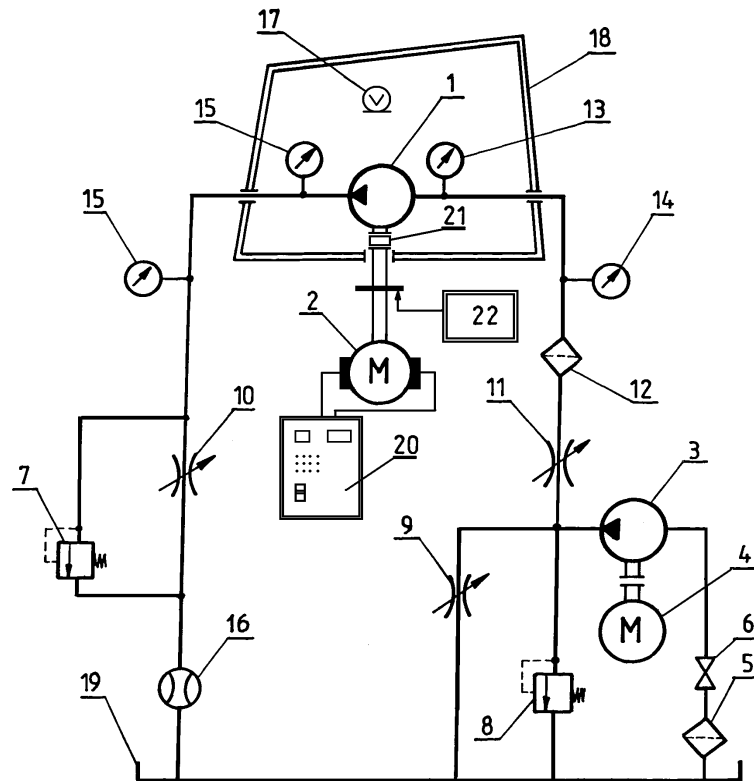
6. 2. STANOWISKO POMIAROWE

Charakterystyki statyczne oraz tłumienie obwodowe, występujące w pompie zębatej z podciętą stopą zęba, wyznaczono na stanowisku badawczym, przedstawionym na rysunku 6.3. W układzie tym badana pompa 1 napędzana jest silnikiem 2 prądu stałego o mocy 100 kW, współpracującym z terystorowym układem sterującym 20. Silnik prądu stałego *Pxob-94a* oraz terystorowy układ sterujący typu *DSI-0360/MN-503* umożliwiają płynną zmianę prędkości obrotowej pompy w zakresie od 0 do 2000 obr/min.

Pompa wstępnego ciśnienia 3 oraz pompa badana 1 są zabezpieczone zaworami bezpieczeństwa 7 i 8. Obciążenie badanej pompy 1 realizuje się za pomocą zaworu dławiącego 10. Wydajność rzeczywistą Q_{rz} pompy mierzono za pomocą przepływomierza turbinkowego 16 typu *PT-M1* z czujnikiem przepływu typu *PT15-100*, o zakresie pomiarowym 0-100 dm³/min. Na mikroamperomierzu *METEX* typ *M-3650B*, przeprowadzono rejestrację chwilowych natężeń przepływu. Moment M na wale pompy jest mierzony za pomocą czujnika momentu 21 typ *Mt1000*, o zakresie pomiarowym od 0 do 1 000 Nm oraz układu rejestrującego typu *Beta 2002*. Liczba obrotów n pompy jest kontrolowana na wałku silnika napędowego za pomocą układu pomiarowego, zbudowanego z fotokomórki i licznika cyfrowego 22. W tym celu na wałku silnika zamocowano tarczę z naciętymi otworami. Z jednej strony tarczy znajduje się źródło światła, a z drugiej fotokomórka, która w układzie elektronicznym zlicza ilość impulsów, zależnych od prędkości obrotowej wałka. Zestaw ten służy tylko do ustalenia żądanej prędkości silnika napędowego. Temperaturę t cieczy w zbiorniku mierzono zestawem termistorów, czujnik typu *PU 391/2* miernik typu *PU 381/1*.

Badania przeprowadzono po uruchomieniu próbnym stanowiska tzn. sprawdzono działanie pompy, zaworu bezpieczeństwa oraz wskazania wszystkich przyrządów pomiarowych. Pomiar rozpoczęto od nastawienia określonych prędkości obrotowych wałka, $n = 500, 800, 1000, 1500$ i 2000 obr/min. Obciążenie pompy realizowano przy $p_t = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 28$ i 30 MPa. Maksymalna wartość ciśnienia tłoczenia ograniczona była zakresem pomiarowym momentomierza 21. Badania

charakterystyk statycznych przeprowadzono przy stałej wartości temperatury czynnika roboczego tj. 50°C.



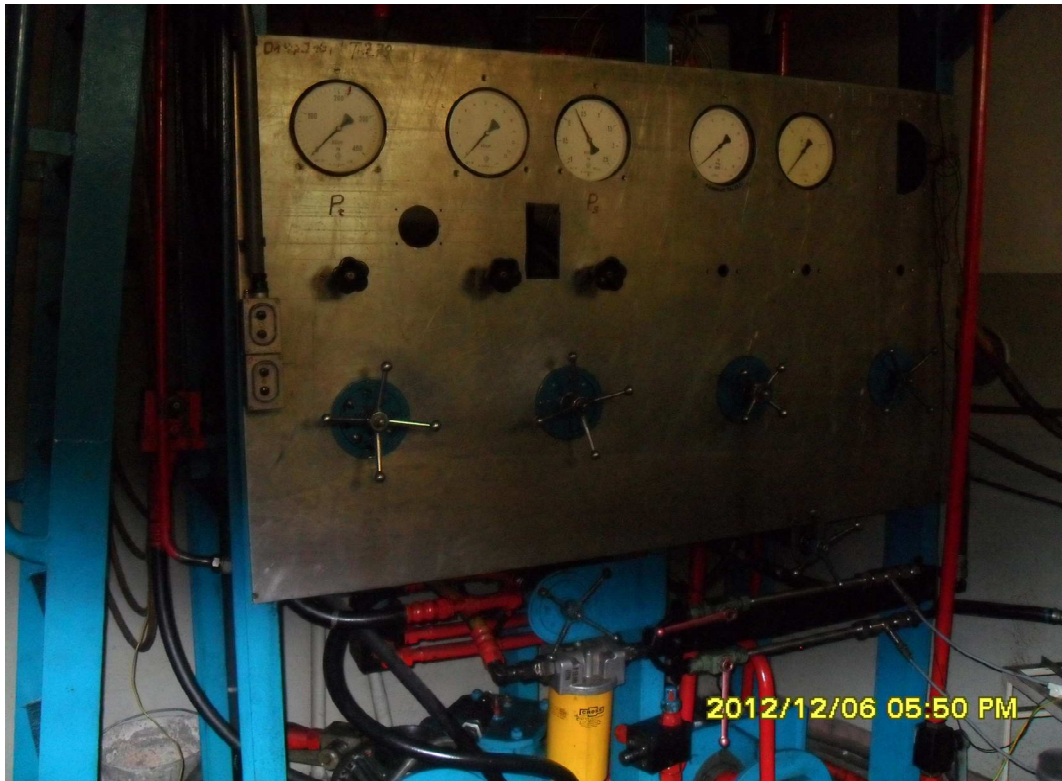
Rys. 6.3. Schemat stanowiska badawczego:

1-badana pompa, 2-silnik napędowy prądu stałego, 3-pompa zasilająca, 4-silnik prądu zmiennego, 5 filtr ssawny, 6-zawór odcinający, 7,8-zawory bezpieczeństwa, 9,10,11-zawory odcinające, 12-filtr zlewowy, 13,14-manowakuometr, 15-manometr, 16-przepływomierz z mikroamperomierzem, 17-mikrofony pomiarowe, 18-komora akustyczna, 19-zbiornik, 20-elektroniczny układ regulacji obrotów, 21-czujnik momentu z rejestratorem, 22-fotokomórka z licznikiem pomiarowym

Na rysunkach 6.4-6.8 przedstawiono zdjęcia stanowiska badawczego.



Rys. 6.4. Stanowisko badawcze: silnik napędowy prądu stałego, pompa zasilająca, silnik prądu zmiennego



Rys. 6.5. Stanowisko badawcze: zegary pomiarowe (manowakuometry, manometry)



Rys. 6.6. Stanowisko badawcze: skrzynka prądowa, komora akustyczna



Rys. 6.7. Stanowisko badawcze: pompa zębata z podciętą stopą zęba w komorze kaustycznej



Rys. 6.8. Stanowisko badawcze: komora akustyczna

6. 3. BADANIA HYDRAULICZNE POMPY ZĘBATEJ Z PODCIĘTĄ STOPĄ ZĘBA

Wyznaczając odpowiednie sprawności pompy zębatej jest możliwa oszczędność energii. Sprawność całkowitą pompy wyznacza stosunek mocy wyjściowej N_{wy} do mocy włożonej N_{we} lub iloczyn sprawności objętościowej i hydrauliczno-mechanicznej [127, 128, 152], czyli:

$$\eta_C = \frac{N_{wy}}{N_{we}} \cong \eta_v \eta_{hm}. \quad (6.1)$$

Całkowite straty objętościowe w pompie: niecałkowite wypełnienia komór roboczych okresie ssania, ściśliwość cieczy, odkształcenia elementów pompy oraz przecieki wewnętrzne, proporcjonalne do lepkości i gęstości cieczy.

Sprawność objętościowa pompy η_v jest stosunkiem wyporności rzeczywistej Q_r do wydajności teoretycznej Q_t , a zatem:

$$\frac{Q_r - \Delta Q}{Q_t} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_t}, \quad (6.2)$$

gdzie:

$$\Delta Q = Q_u + Q_p, \quad (6.3)$$

Straty objętościowe Q_u zależne od ciśnienia roboczego i mogą być określone jako:

$$Q_u = c_\mu \frac{qp}{2\pi\mu}. \quad (6.4)$$

Straty objętościowe Q_p zależą od gęstości cieczy i mogą być przedstawione w następującej postaci:

$$Q_p = c_r \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \sqrt[3]{q^2}. \quad (6.5)$$

Ostatecznie otrzymuje się następującą postać strat objętościowych w pompie:

$$\eta_v = 1 - \frac{c_\mu \frac{qp}{2\pi\mu} + c_r \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \sqrt[3]{q^2}}{Q_t}. \quad (6.6)$$

Podstawiając w miejsce Q ogólną zależność:

$$Q_t = qn,$$

Otrzymano wzór:

$$\eta_v = 1 - c_\mu \frac{p}{2\pi\mu \cdot n} - c_r \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \sqrt[3]{q^{-1}}, \quad (6.7)$$

gdzie:

c_μ - współczynnik, który jest funkcją rozmiarów i liczby szczelin zależy również od wydajności właściwej pompy,

p - ciśnienie robocze,

q - wydajność właściwa,

n - prędkość obrotowa,

μ - lepkość dynamiczna cieczy,

c_r - współczynnik zależny od rodzaju szczelin i ich rozmiaru oraz od wydajności właściwej pompy,

Sprawność hydrauliczno-mechaniczna pompy η_{hm} jest stosunkiem wartości momentu teoretycznego M_t do sumy momentu strat hydrauliczno-mechanicznych ΔM i momentu teoretycznego M_t [126]:

$$\eta_{hm} = \frac{M_t}{M_t + \Delta M}. \quad (6.8)$$

Moment strat hydrauliczno-mechanicznych ΔM jest równy sumie czterech momentów:

$$\Delta M = M_v + M_\rho + M_p + M_k. \quad (6.9)$$

Momentem M_v opisano straty, które są proporcjonalne do siły tarcia cieczy, a więc związany jest z lepkością dynamiczną cieczy oraz prędkością obrotową i wydajnością właściwą q :

$$M_v = c_v \mu n q. \quad (6.10)$$

Momentem strat M_ρ opisano straty, na które istotny wpływ ma gęstość cieczy, co można napisać następująco:

$$M_\rho = c_\rho \rho \frac{n^2}{4\pi} \sqrt[3]{q^5}. \quad (6.11)$$

Momentem M_p opisano straty mechaniczne, które są proporcjonalne do ciśnienia tłoczenia wg zależności:

$$M_p = c_p \frac{pq}{2\pi}. \quad (6.12)$$

Momentem M_k opisano sposób montażu i zastosowanych uszczelnień, niezależnie od ciśnienia tłoczenia i eksploatacji pompy.

Podstawiając odpowiednie wyrażenia na momenty strat ΔM oraz moment teoretyczny jako:

$$M_t = \frac{pq}{2\pi}, \quad (6.13)$$

Otrzymuje się:

$$\eta_{lm} = \frac{\frac{pq}{2\pi}}{\frac{pq}{2\pi} + c_v \mu n q + c_\rho \rho \frac{n^2}{4\pi} \sqrt[3]{q^5} + c_p \frac{pq}{2\pi}}, \quad (6.14)$$

i następnie:

$$\eta_{lm} = \frac{1}{1 + c_v 2\pi \frac{\mu \cdot n}{p} + c_\rho \frac{\rho \cdot n^2}{2p} \sqrt[3]{q^2} + c_p}, \quad (6.15)$$

gdzie:

c_p - współczynnik zależny głównie od rodzaju pompy,

c_ρ - współczynnik zależny głównie od jej wydajności właściwej,

c_v - współczynnik zależny od rodzaju pompy

Współczynnikiem c_μ określono zależność od wymiarów szczelin i rodzaju oraz wydajności właściwej pompy. Wartość współczynnika-zależnie od konstrukcji pompy- wynosi od $2 \cdot 10^{-8}$ do $40 \cdot 10^{-8}$.

Współczynnik c_r zmienia się w przypadku pomp zębatych: od $2 \cdot 10^{-4}$ do $30 \cdot 10^{-4}$.

Współczynnik konstrukcyjny c_v oszacowano w granicach od $0,2 \cdot 10^5$ do $1,6 \cdot 10^5$.

Współczynnik c_ρ dla pomp zębatych określono od 20 do 270.

Współczynnik c_p określono od 0,01-0,3.

Ostatecznie sprawność całkowitą można wyrazić następująco:

$$\eta_c = \frac{1 - c_\mu \frac{p}{2\pi\mu \cdot n} - c_r \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \sqrt[3]{q^{-1}}}{1 + c_v 2\pi \frac{\mu \cdot n}{p} + c_\rho \frac{\rho \cdot n^2}{2p} \sqrt[3]{q^2} + c_p}. \quad (6.16)$$

W opracowaniu jako funkcje kryterialne celu uznano : η_v , η_{lm} , η_v , natomiast parametry n , p_t , Q_{rz} przyjęto, jako zmienne decyzyjne. Taki sposób postępowania ma sens z punktu widzenia wykorzystania danej pompy zębatej w różnych układach oraz na wyznaczenie rozbieżności obliczeniowych, ze względu na różne algorytmy

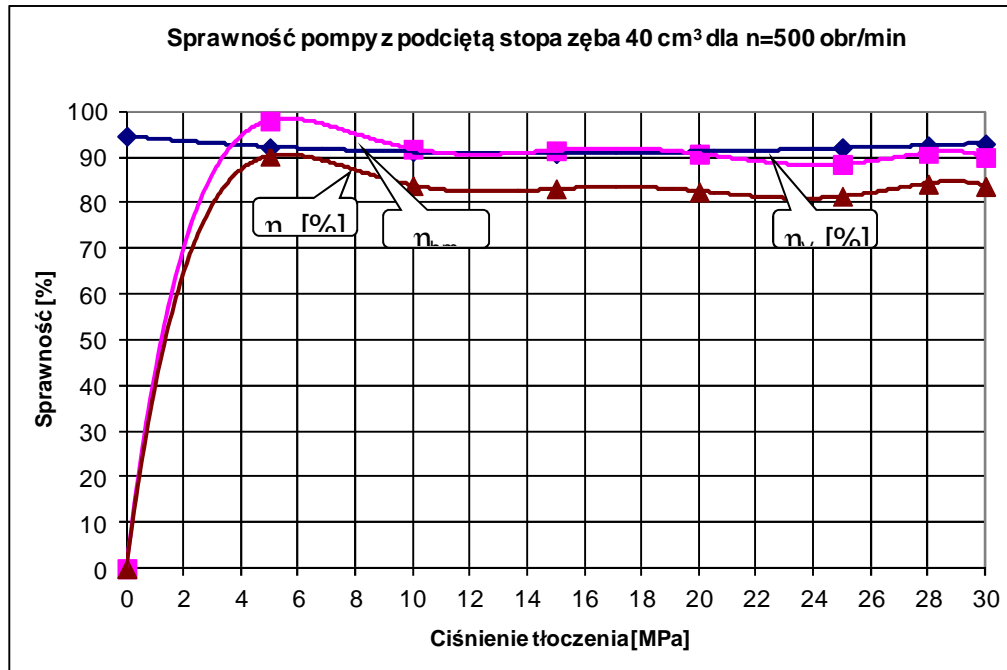
projektowania pompy zębatej [126, 127, 128] np.: wyznaczenie maksymalnej sprawności objętościowej przy założeniu dopuszczalnej hydrauliczno-mechanicznej, wyznaczenie maksymalnej sprawności całkowitej.

Badania pompy przeprowadzono po uruchomieniu próbnym stanowiska tzn. sprawdzono działanie pompy, zaworu bezpieczeństwa oraz wskazania wszystkich przyrządów pomiarowych [152]. Wyniki pomiarów charakterystyk statycznych eksperymentalnej pompy z podciętą stopą zęba przedstawiono tabeli 6.1.

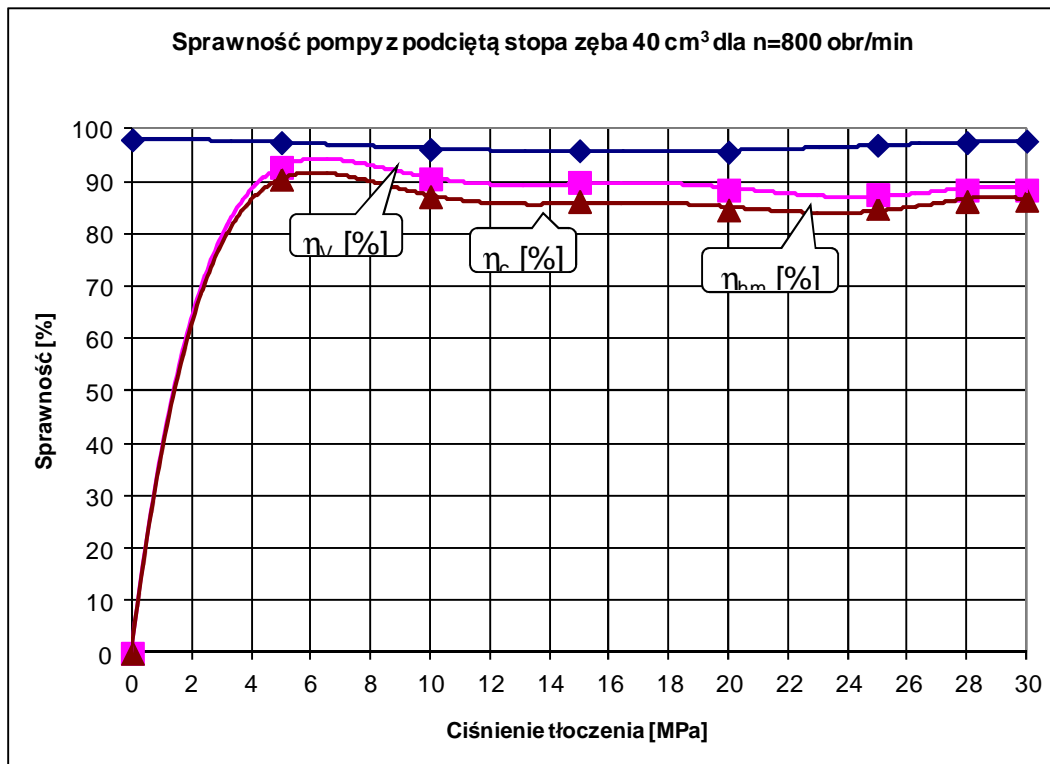
Tabela 6.1 Wyniki pomiarów hydraulicznych [152]

n [rpm]	p_t [Mpa]	Q_{rz} [l/min]	M [Nm]	N_h [kW]	N_m [kW]	η_v [%]	η_{hm} [%]	η_c [%]
500	≈ 0	21,1	2,0	0,00	0,10	94,6	0,0	0,0
	5	20,5	36,0	1,70	1,88	92,1	98,0	90,3
	10	20,3	77,0	3,38	4,03	91,3	91,8	83,8
	15	20,2	116,0	5,05	6,07	90,9	91,5	83,1
	20	20,2	156,0	6,73	8,17	90,9	90,7	82,4
	25	20,5	200,0	8,53	10,47	92,1	88,5	81,5
	28	20,6	218,0	9,60	11,41	92,5	90,9	84,1
	30	20,7	236,0	10,34	12,36	93,0	90,0	83,6
800	≈ 0	34,9	2,0	0,00	0,17	98,0	0,0	0,0
	5	34,7	38,0	2,88	3,18	97,5	92,8	90,5
	10	34,3	78,0	5,70	6,53	96,2	90,6	87,2
	15	34,2	118,0	8,53	9,89	96,0	89,9	86,3
	20	34,1	160,0	11,34	13,40	95,7	88,4	84,6
	25	34,5	202,0	14,38	16,92	97,0	87,6	85,0
	28	34,7	224,0	16,19	18,77	97,5	88,5	86,3
	30	34,8	240,0	17,39	20,11	97,8	88,5	86,5
1000	≈ 0	44,5	2,2	0,00	0,23	99,9	0,0	0,0
	5	44,1	38,0	3,66	3,98	99,1	92,8	92,0
	10	43,9	82,0	7,30	8,59	98,7	86,2	85,1
	15	43,4	124,0	10,83	12,99	97,4	85,6	83,4
	20	43,4	168,0	14,44	17,59	97,4	84,2	82,1
	25	43,4	208,0	18,05	21,78	97,4	85,1	82,9
	28	43,4	234,0	20,22	24,50	97,4	84,7	82,5
	30	43,3	249,0	21,62	26,08	97,2	85,3	82,9
1500	≈ 0	67,3	6,0	0,00	0,94	100,9*	0,0	0,0
	5	66,8	42,0	5,54	6,60	100,0	84,0	84,0
	10	66,5	84,0	11,06	13,19	99,6	84,1	83,8
	15	66,1	125,0	16,51	19,63	99,1	84,9	84,1
	20	65,5	172,0	21,80	27,02	98,1	82,3	80,7
	25	65,7	210,0	27,34	32,99	98,4	84,2	82,9
	28	65,6	235,0	30,58	36,91	98,2	84,3	82,8
	30	65,5	255,0	32,72	40,06	98,1	83,3	81,7
2000	≈ 0	89,3	8,0	0,00	1,68	100,3*	0,0	0,0
	5	89,0	47,0	7,39	9,84	100,0	75,0	75,0
	10	88,3	94,0	14,69	19,69	99,3	75,2	74,6
	15	88,0	138,0	21,96	28,90	98,8	76,9	76,0
	20	87,6	182,0	29,17	38,12	98,4	77,8	76,5
	25	88,0	214,0	36,62	44,82	98,8	82,7	81,7
	28	87,9	241,0	40,98	50,47	98,7	82,2	81,2
	30	87,8	259,0	43,86	54,24	98,6	82,0	80,9

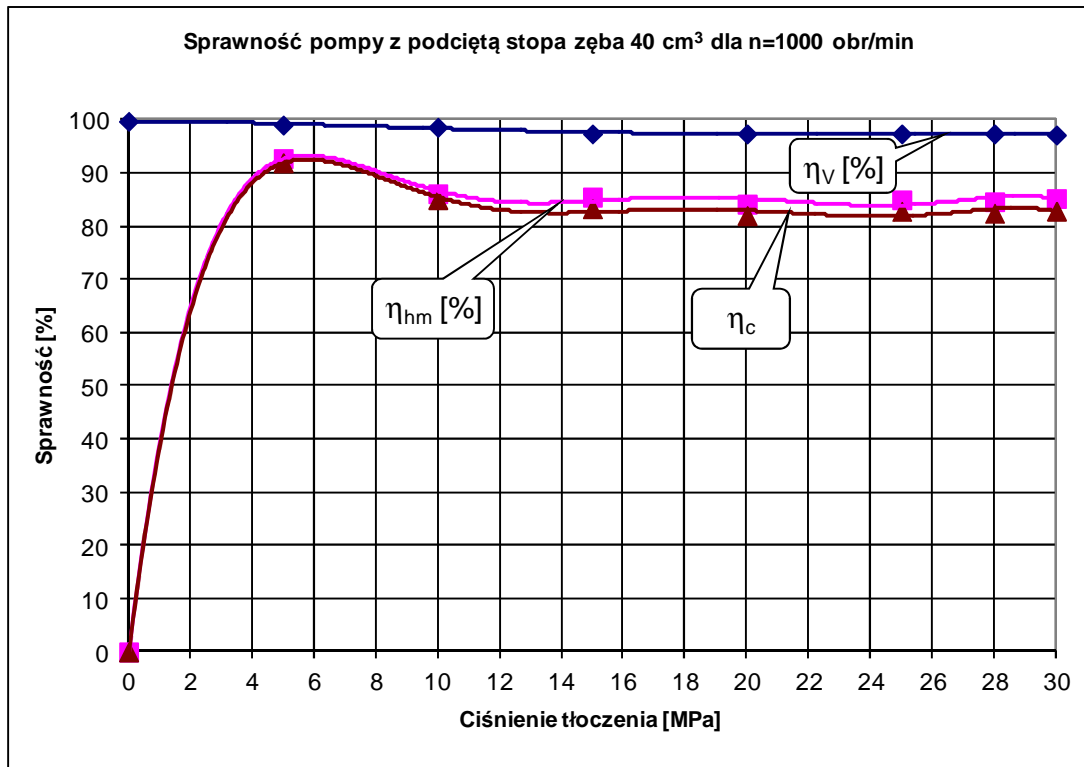
Na rysunkach 6.9 – 6.13 przedstawiono wykresy sprawności całkowitej, wolumetrycznej i hydrauliczno-mechanicznej przy prędkości n . Charakterystyki momentu i mocy umieszczono na rysunkach 6.14-6.18. Z kolei na rysunkach 6.19-6.21 przedstawiono sprawności porównawcze dla pompy [152].



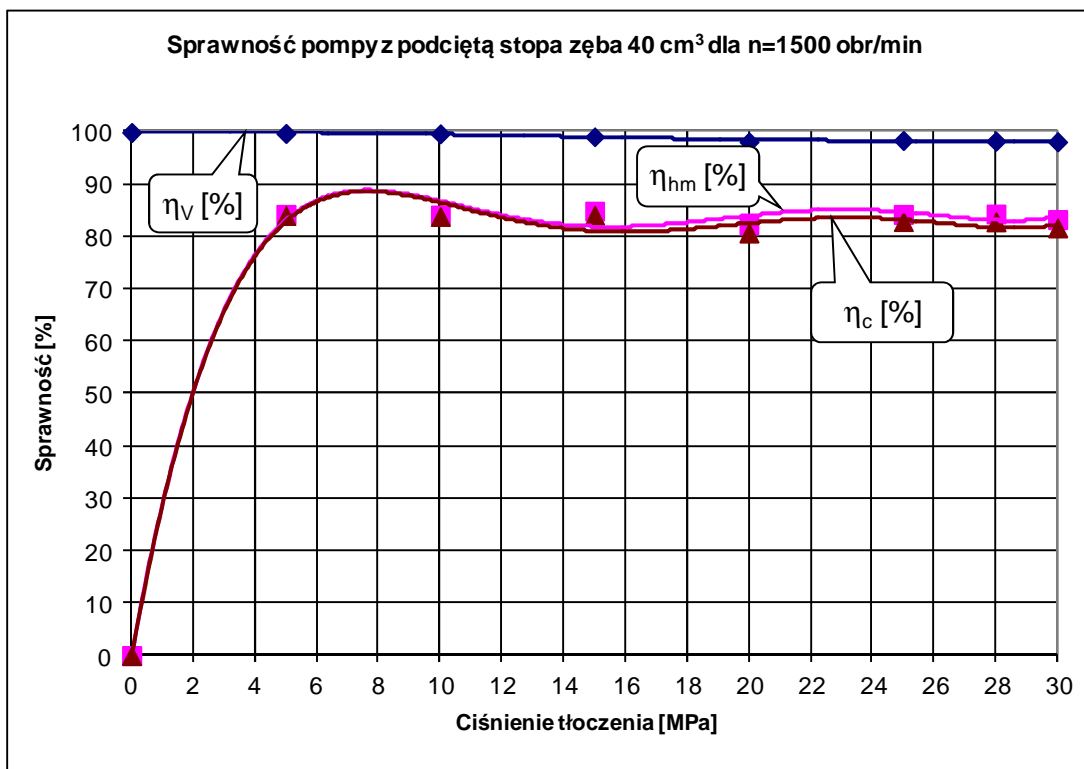
Rys. 6.9. Charakterystyka sprawności eksperymentalnej pompy przy $n = 500$ obr/min [152]



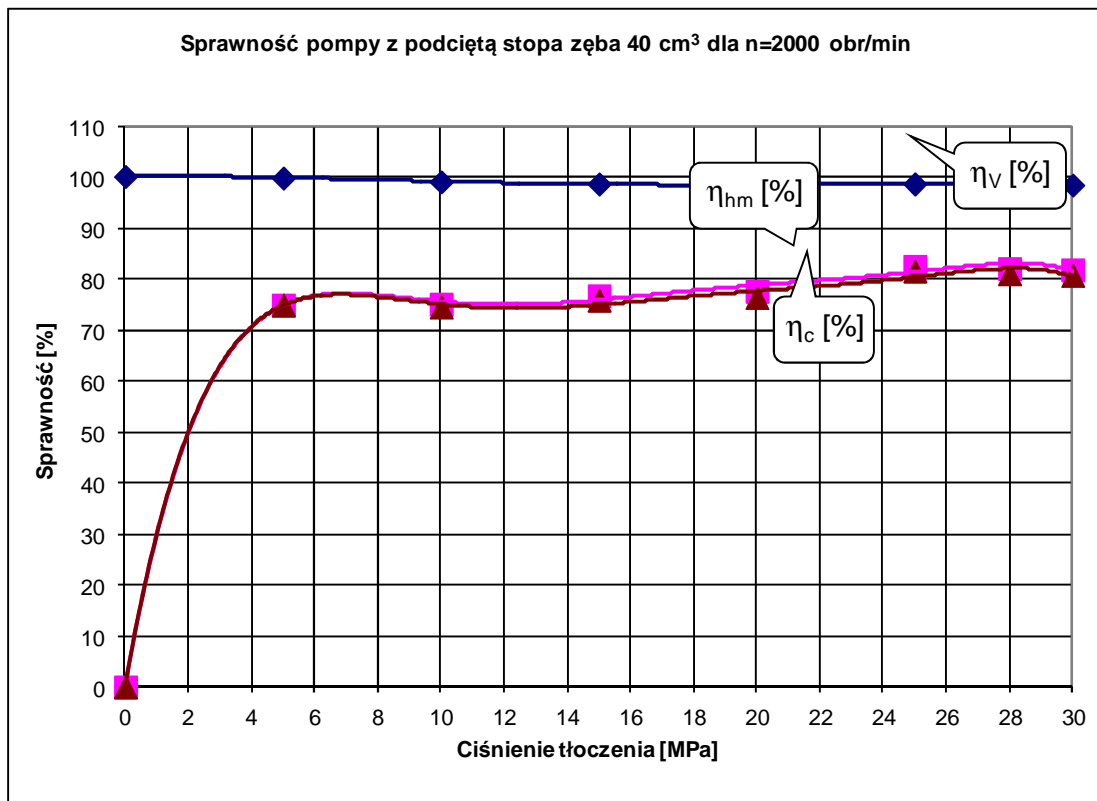
Rys. 6.10. Charakterystyka sprawności eksperymentalnej pompy przy $n = 800$ obr/min [152]



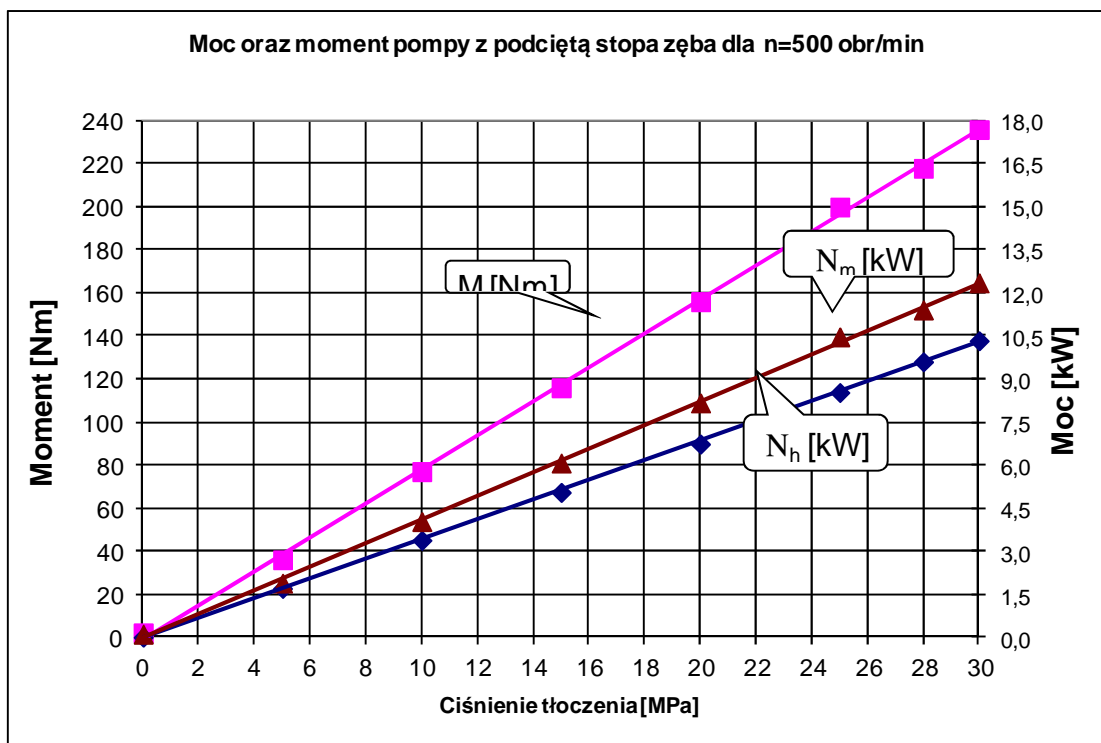
Rys. 6.11. Charakterystyka sprawność eksperymentalnej pompy przy $n = 1000$ obr/min [152]



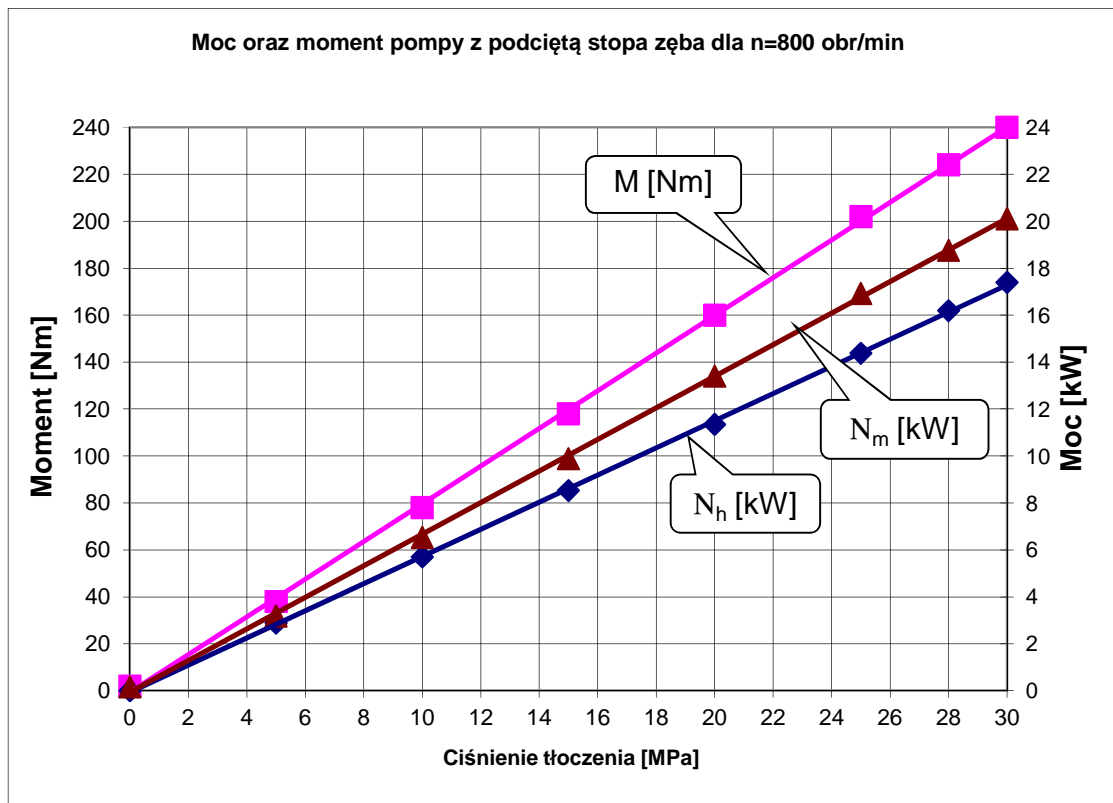
Rys. 6.12. Charakterystyka sprawność eksperymentalnej pompy przy $n = 1500$ obr/min [152]



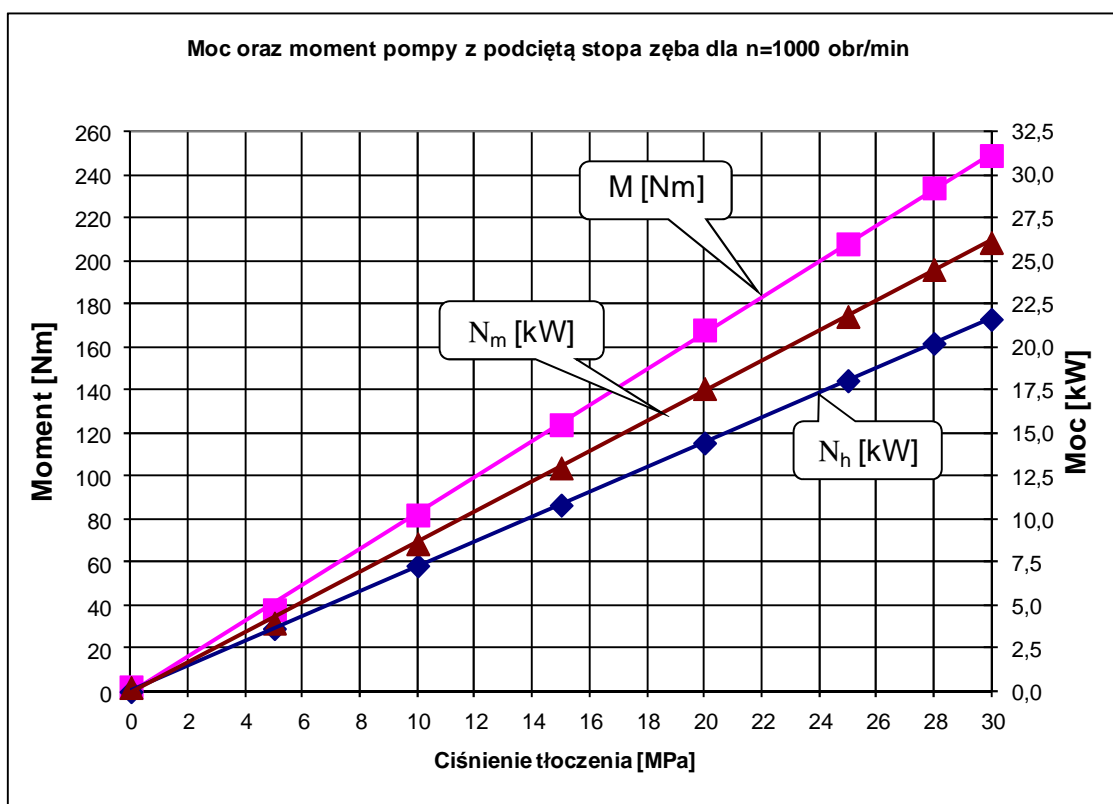
Rys. 6.13. Charakterystyka sprawność eksperymentalnej pompy przy $n = 2000$ obr/min [152]



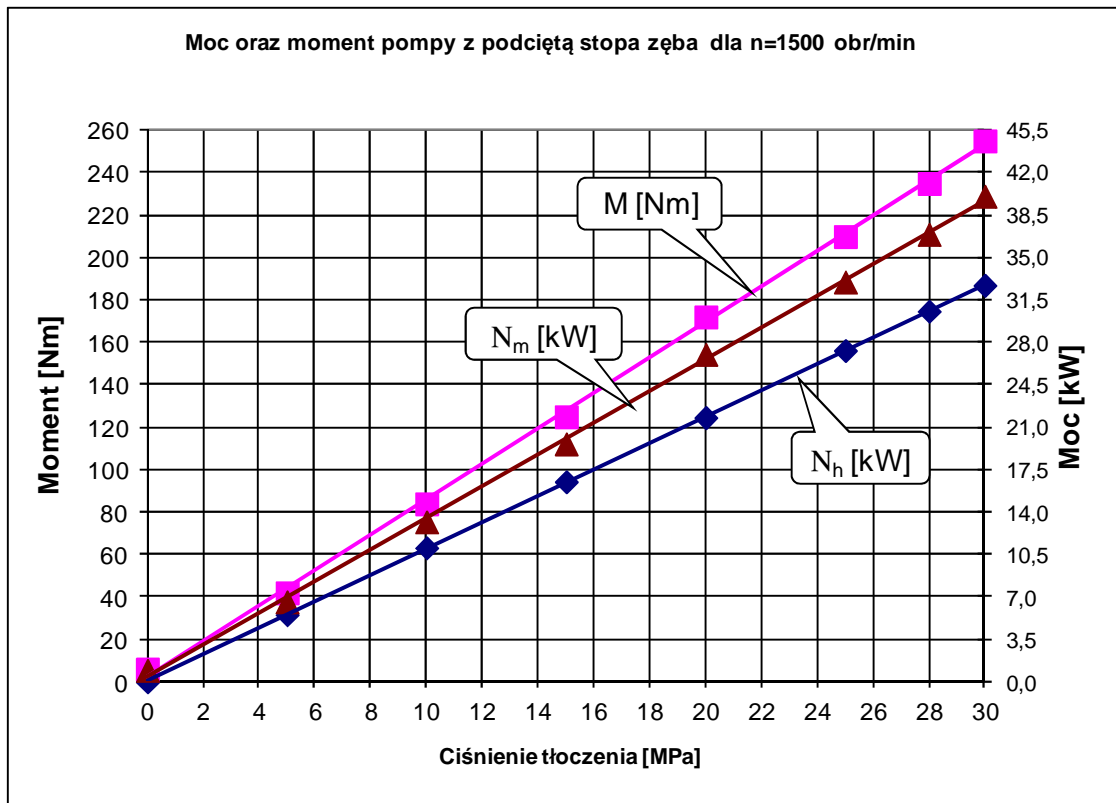
Rys. 6.14. Charakterystyka momentu oraz mocy eksperymentalnej pompy przy $n = 500$ obr/min [152]



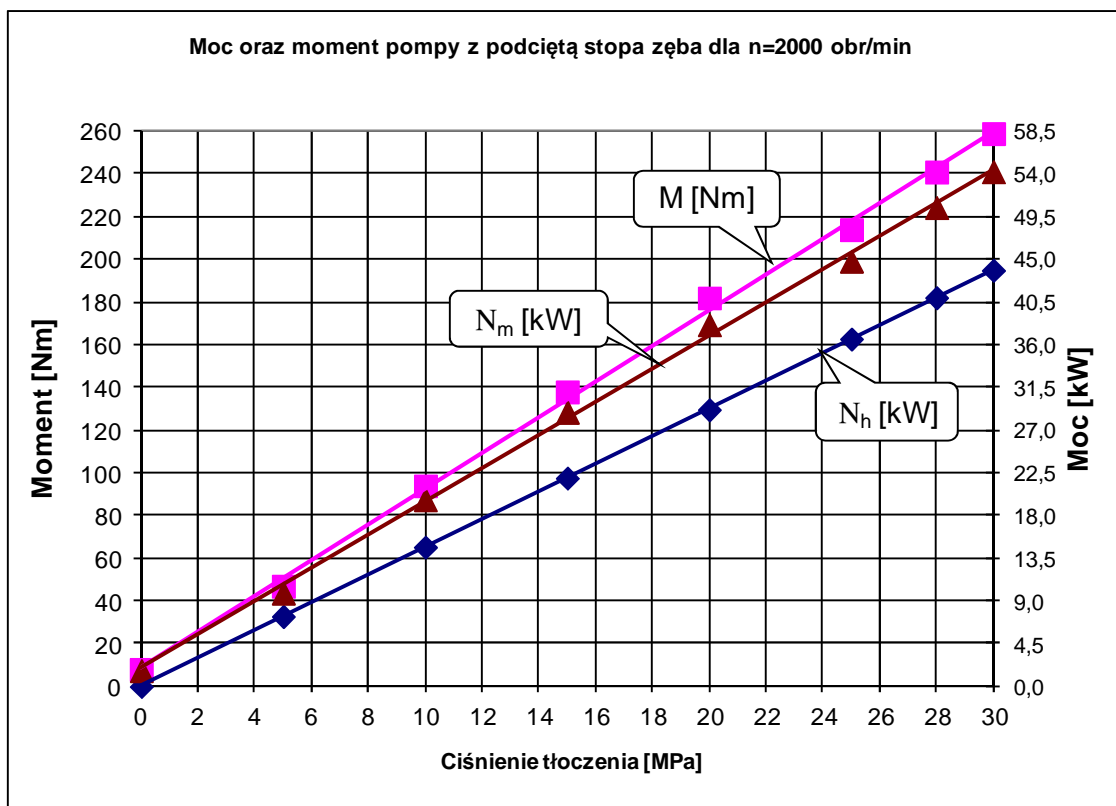
Rys. 6.15. Charakterystyka momentu oraz mocy eksperymentalnej pompy przy $n = 800$ obr/min [152].



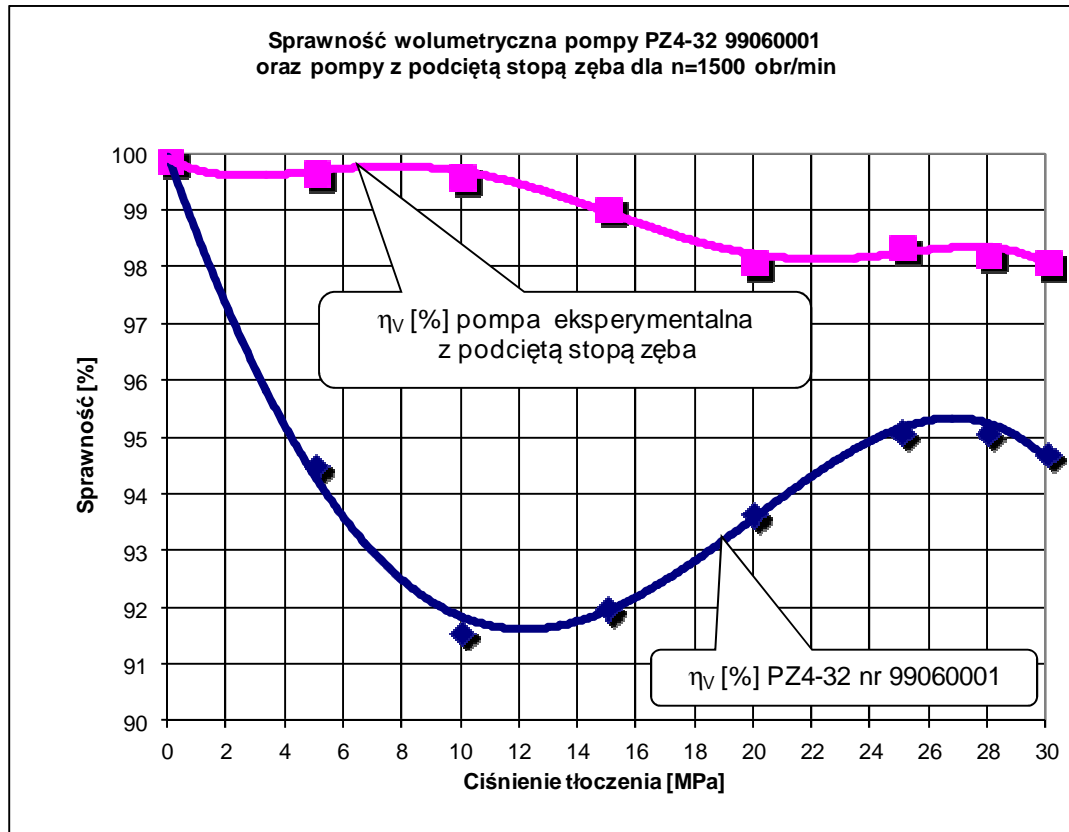
Rys. 6.16. Charakterystyka momentu oraz mocy eksperymentalnej pompy przy $n = 1000$ obr/min [152]



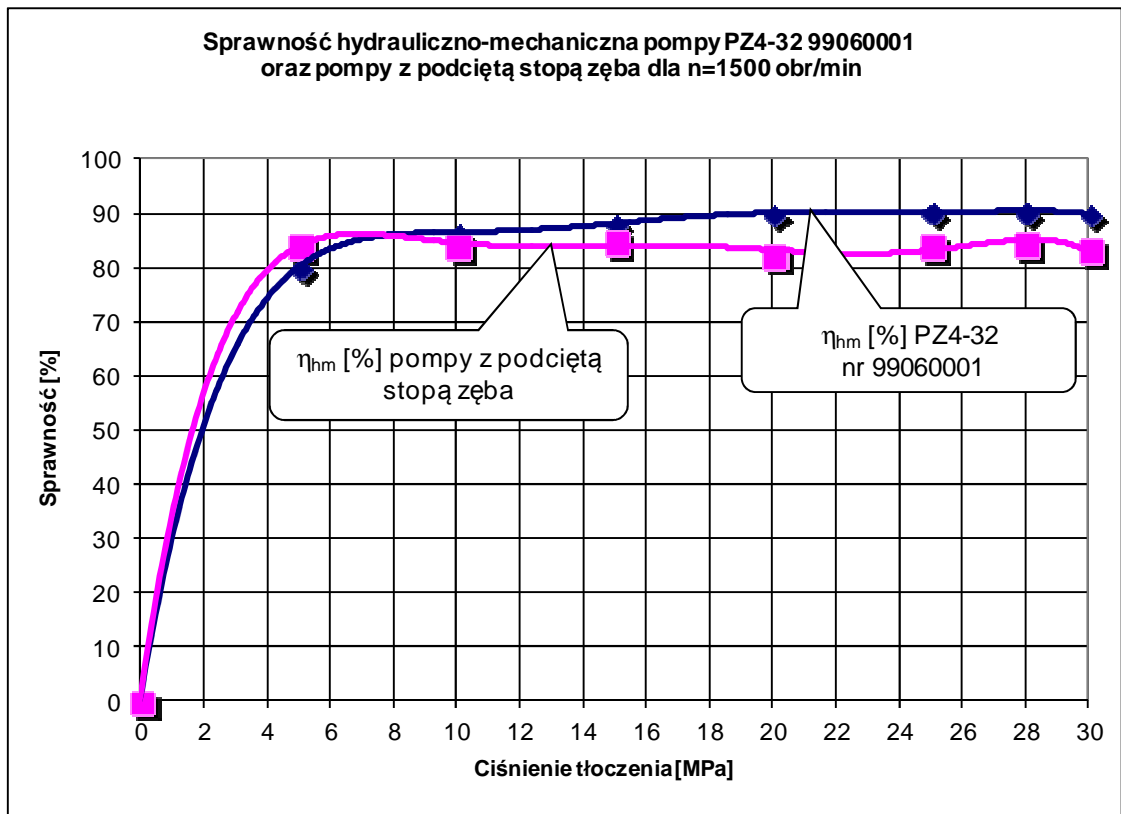
Rys. 6.17. Charakterystyka momentu oraz mocy eksperymentalnej pompy przy $n=1500$ obr/min [152]



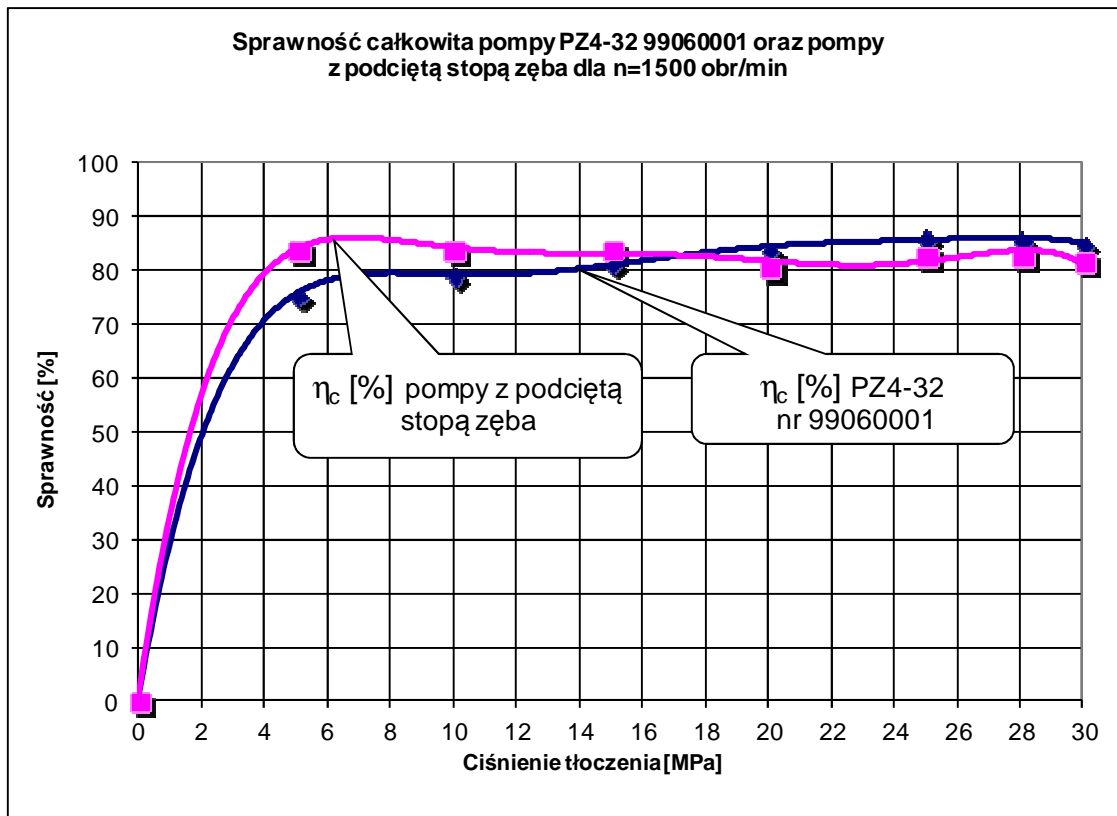
Rys. 6.18. Charakterystyka momentu oraz mocy eksperymentalnej pompy przy $n=2000$ obr/min [152]



Rys. 6.19. Porównanie sprawności objętościowej przy $n = 1500$ obr/min [152]



Rys. 6.20. Porównanie sprawności hydrauliczno-mechanicznej przy $n = 1500$ obr/min [152]



Rys. 6.21. Porównanie sprawności całkowitej przy $n = 1500$ obr/min [152]

W Optymalizacja pompy zębatej obliczono sprawność objętościową, hydrauliczno-mechaniczną oraz całkowitą. Zakładając, że funkcją celu jest sprawność całkowita pompy, a poszukiwanymi parametrami są wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, optymalizację można przeprowadzić zgodnie z opracowanym algorytmem, oddzielnie w przypadku parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, poszukując maksymalnej wartości sprawności. W pierwszym etapie badań zastosowano wielowartościowe logiczne drzewa decyzyjne do analizy rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych pompy zębatej, a następnie zastosowano kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne.

6. 4. OPTIMALIZACJA POMPY ZĘBATEJ Z PODCIĘTĄ STOPĄ ZĘBA

W optymalizacji pompy zębatej obliczono sprawność objętościową, hydrauliczno-mechaniczną oraz całkowitą. Optymalizacja sprawności pompy może więc przebiegać jako wielokryterialna bądź monokryterialna. Zakładając, że funkcją celu jest sprawność całkowita pompy, a poszukiwanymi parametrami są wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, optymalizację można przeprowadzić oddzielnie przy parametrach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, poszukując maksymalnej wartości sprawności [126, 127, 128, 152]. Maksymalna sprawność danej konstrukcji pompy uzyskiwana jest poprzez dobór parametrów eksploatacyjnych..

W pierwszym etapie badań zastosowano wielowartościowe logiczne drzewa decyzyjne do analizy rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych pompy zębatej [153]. Analizę rangi ważności parametrów konstrukcyjnych pompy zębatej przeprowadzono względem połączonych parametrów

$Q \wedge n$. Następnie zastosowano kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne w przypadku połączonych parametrów $p \wedge M$ oraz $Q \wedge n$. W analizie dodatkowo uwzględniono wielowartościowe współczynniki wagowe. Wśród optymalnych drzew logicznych, tzn. z najmniejszą liczbą gałęzi prawdziwych, istnieje wyróżnione drzewo optymalne, tzn. z najmniejszą wartością kompleksowego współczynnika złożoności. W szczególności kompleksowym współczynnikiem złożoności identycznie wyznaczono optymalne kompleksowe drzewa logiczne $Q \wedge n$ przy połączonych i rozdzielnych.

W drugim etapie, badania rangi ważności pompy zębatej z podciętą stopą zęba, zastosowano kompleksowy współczynnik złożoności struktur rozgrywających parametrycznie. Wykazano, że wśród optymalnych drzew logicznych, tzn. z najmniejszą liczbą gałęzi prawdziwych, istnieje wyróżnione drzewo optymalne, tzn. z najmniejszą wartością kompleksowego współczynnika złożoności. Kompleksowym współczynnikiem złożoności identycznie wyznaczono optymalne kompleksowe drzewa logiczne przy połączonych i rozdzielnych $Q \wedge n$ [153].

Dodatkowo zastosowano wagowy wielowartościowy układ równań logicznych, opisujących prawdziwe wytyczne konstrukcyjne (wartości) parametrów n , p_t , Q_{rz} zapewniających uzyskanie optymalnej wartości wszystkich funkcji $\eta_v, \eta_{lm}, \eta_c$ jednocześnie.

6.4.1. ZASTOSOWANIE WIELOWARTOŚCIOWYCH DRZEW LOGICZNYCH

Poszukując optymalnej wartości funkcji $\eta_v, \eta_{lm}, \eta_c$, przyjęto następujące wartości arytmetyczne zakresy zmian: $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{lm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$. Do analizy według tabeli 6.2 wybrano wartości arytmetyczne badanych parametrów, które zakodowano logicznymi zmiennymi decyzyjnymi w logicznych drzewach decyzyjnych [153]:

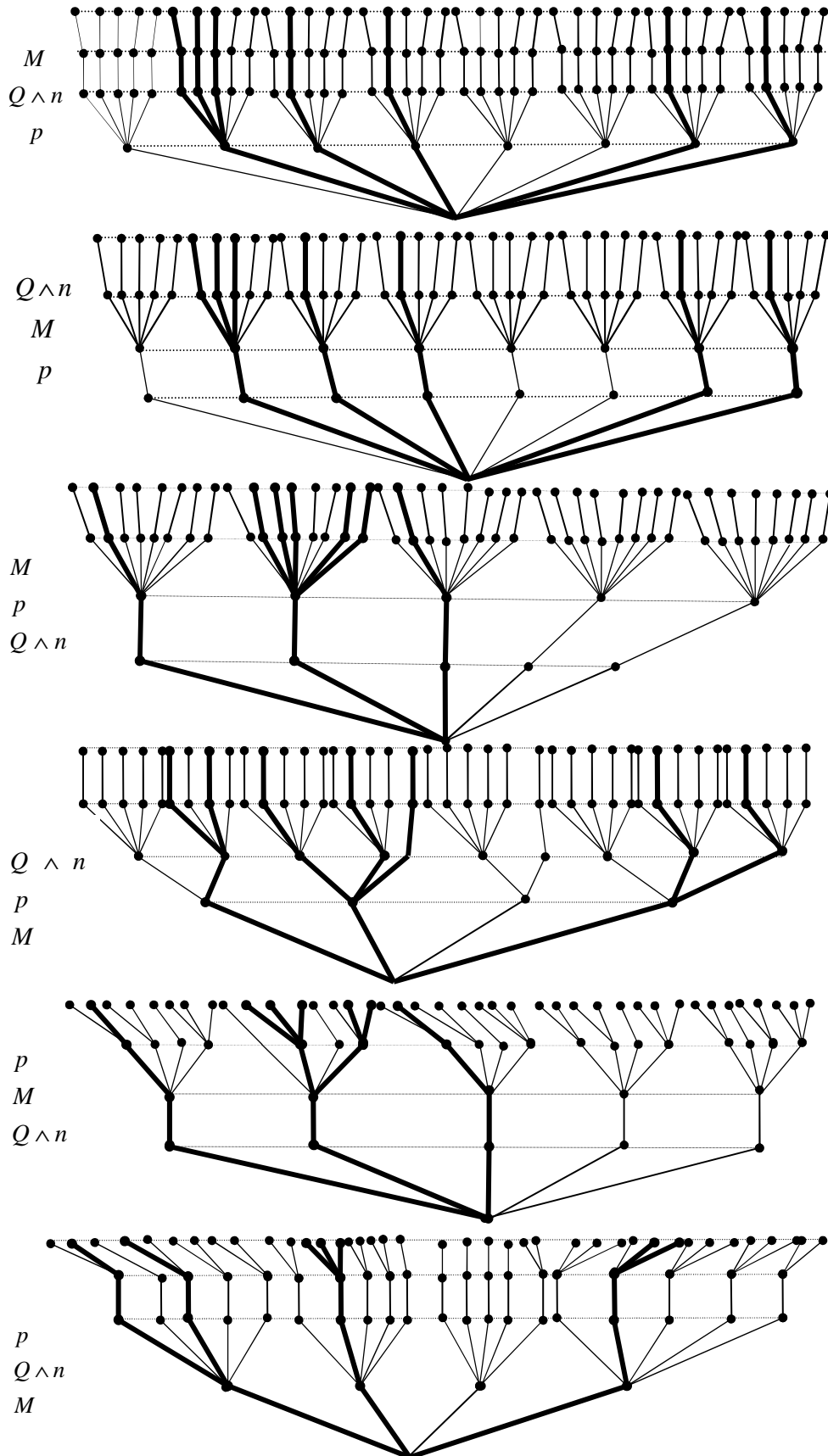
$$\begin{aligned} n = 500 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 0; \quad n = 800 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 1; \quad n = 1000 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 2; \quad n = 1500 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 3; \\ n = 2000 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 4; \quad p_t = 0 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 0; \quad p_t = 5 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 1; \quad p_t = 10 \left[\frac{obr}{\min} \right] \sim 2; \\ p_t = 15 \text{ [MPa]} \sim 3; \quad p_t = 20 \text{ [MPa]} \sim 4; \quad p_t = 25 \text{ [MPa]} \sim 5; \quad p_t = 28 \text{ [MPa]} \sim 6; \\ p_t = 30 \text{ [MPa]} \sim 7; \quad Q_{rz} \in \langle 20, 2; 21, 1 \rangle \left[\frac{l}{\min} \right] \sim 0; \quad Q_{rz} \in \langle 34, 2; 34, 9 \rangle \left[\frac{l}{\min} \right] \sim 1; \\ Q_{rz} \in \langle 43, 3; 44, 5 \rangle \left[\frac{l}{\min} \right] \sim 2; \quad Q_{rz} \in \langle 65, 5; 67, 3 \rangle \left[\frac{l}{\min} \right] \sim 3; \quad Q_{rz} \in \langle 87, 6; 89, 3 \rangle \left[\frac{l}{\min} \right] \sim 4; \\ M \in \langle 2, 0; 47, 0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 0; \quad M \in \langle 77, 0; 125, 0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 1; \quad M \in \langle 138, 0; 182, 0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 2; \\ M \in \langle 200, 0; 259, 0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 3; \quad \text{gdzie } M \in \langle 2, 0; 259, 0 \rangle \text{ [Nm]} \text{ oraz } M_i \sim 0, 1, 2, 3. \end{aligned}$$

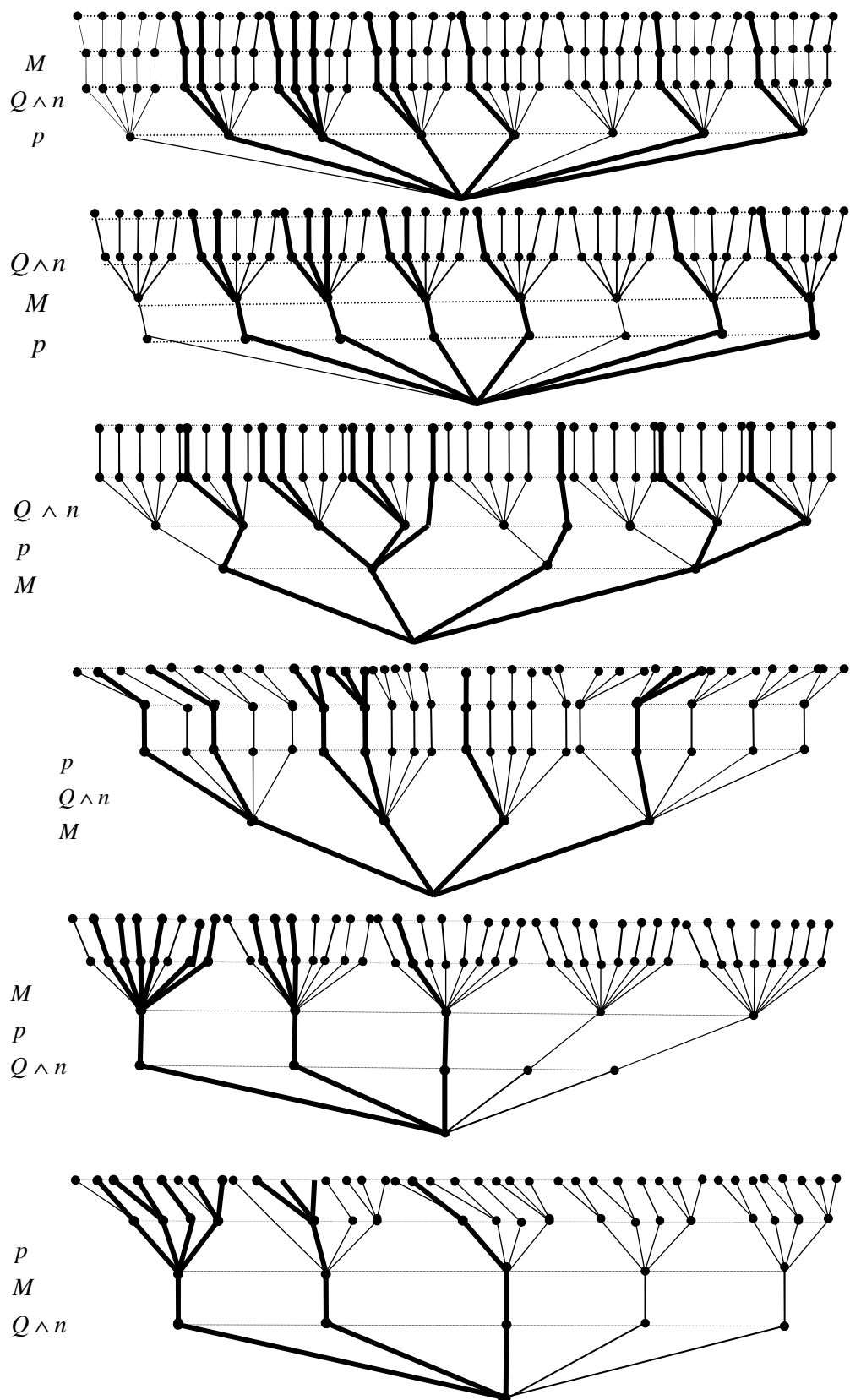
Jeśli w pompie zębatej, z podciętą stopą zęba, wszystkie ścieżki wielowartościowych drzew logicznych z rysunków 6.22-6.24 oznaczają zbiór wszystkich wariantów teoretycznych procesu optymalizacji odpowiednich sprawności η_c, η_{lm} i η_v , to należy wyodrębnić tylko warianty prawdziwe (ścieżki pogrubione).

Jeśli w drzewach logicznych z rysunków 6.22-6.24 będzie obliczana liczba gałęzi pogrubionych (prawdziwych) dla odpowiednich sprawności z możliwością zamiany pięter ze zmiennymi logicznymi, przypisanymi parametrom konstrukcyjnym Q , n , M and p , to tylko drzewami logicznymi z najmniejszą liczbą gałęzi prawdziwych opisano rangę ważności parametrów, od najważniejszego na dole do najmniej ważnego na górze. Optymalne drzewa logiczne przedstawiono na rysunkach 6.25-6.27 [153].

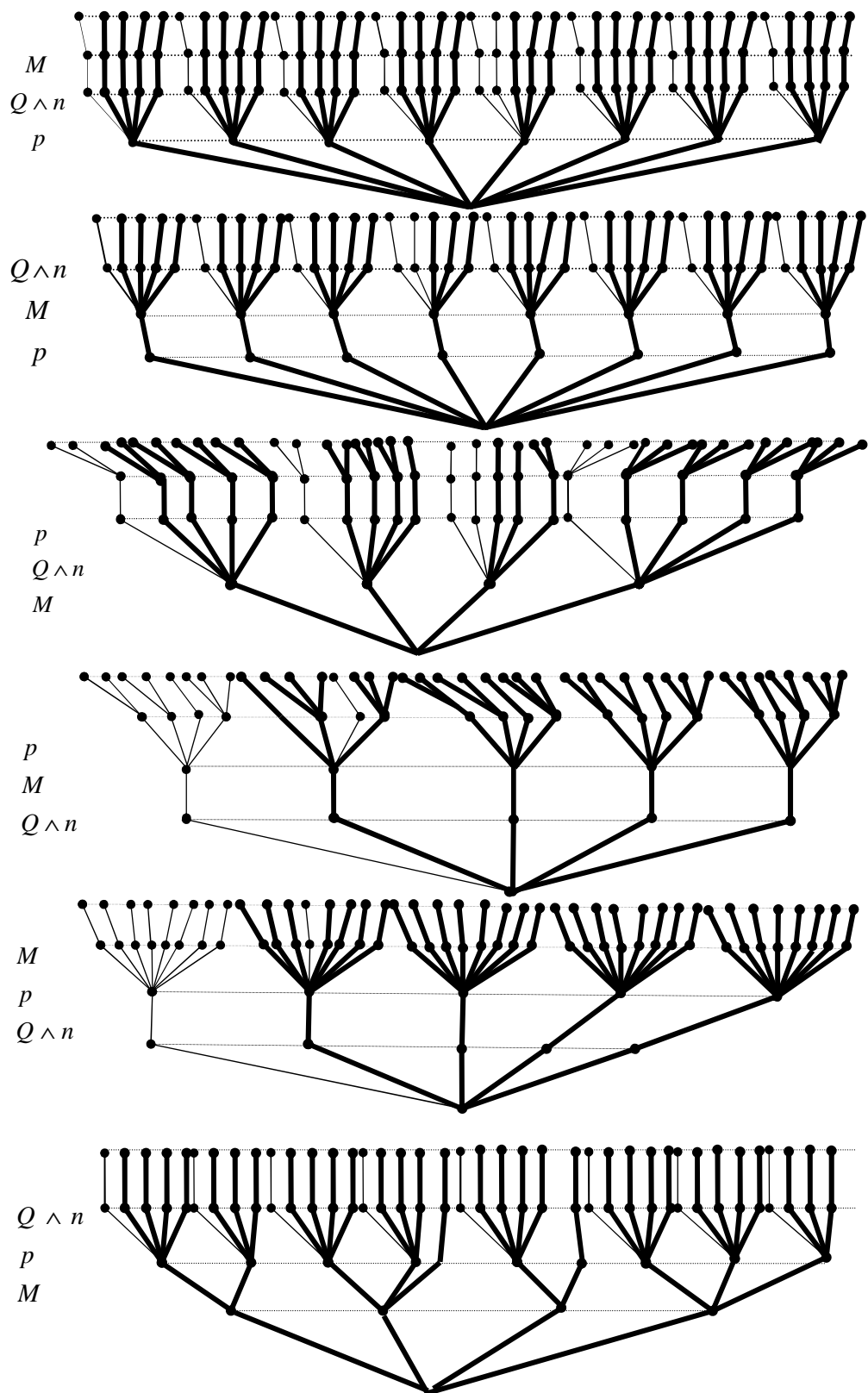
Tabela 6.2. Wartości arytmetyczne i logiczne ustalonych parametrów i funkcji celu [152, 153]

n [obr/min]	p_t [Mpa]	Q_{rz} [l/min]	M [Nm]	η_v [%]	η_{hm} [%]	η_c [%]
0	0	0	0	94,6	0,0	0,0
	1		0	92,1	98,0	90,3
	2		1	91,3	91,8	83,8
	3		1	90,9	91,5	83,1
	4		2	90,9	90,7	82,4
	5		3	92,1	88,5	81,5
	6		3	92,5	90,9	84,1
	7		3	93,0	90,0	83,6
1	0	1	0	98,0	0,0	0,0
	1		0	97,5	92,8	90,5
	2		1	96,2	90,6	87,2
	3		1	96,0	89,9	86,3
	4		2	95,7	88,4	84,6
	5		3	97,0	87,6	85,0
	6		3	97,5	88,5	86,3
	7		3	97,8	88,5	86,5
2	0	2	0	99,9	0,0	0,0
	1		0	99,1	92,8	92,0
	2		1	98,7	86,2	85,1
	3		1	97,4	85,6	83,4
	4		2	97,4	84,2	82,1
	5		3	97,4	85,1	82,9
	6		3	97,4	84,7	82,5
	7		3	97,2	85,3	82,9
3	0	3	0	100,9	0,0	0,0
	1		0	100,0	84,0	84,0
	2		1	99,6	84,1	83,8
	3		1	99,1	84,9	84,1
	4		2	98,1	82,3	80,7
	5		3	98,4	84,2	82,9
	6		3	98,2	84,3	82,8
	7		3	98,1	83,3	81,7
4	0	4	0	100,3	0,0	0,0
	1		0	100,0	75,0	75,0
	2		1	99,3	75,2	74,6
	3		2	98,8	76,9	76,0
	4		2	98,4	77,8	76,5
	5		3	98,8	82,7	81,7
	6		3	98,7	82,2	81,2
	7		3	98,6	82,0	80,9

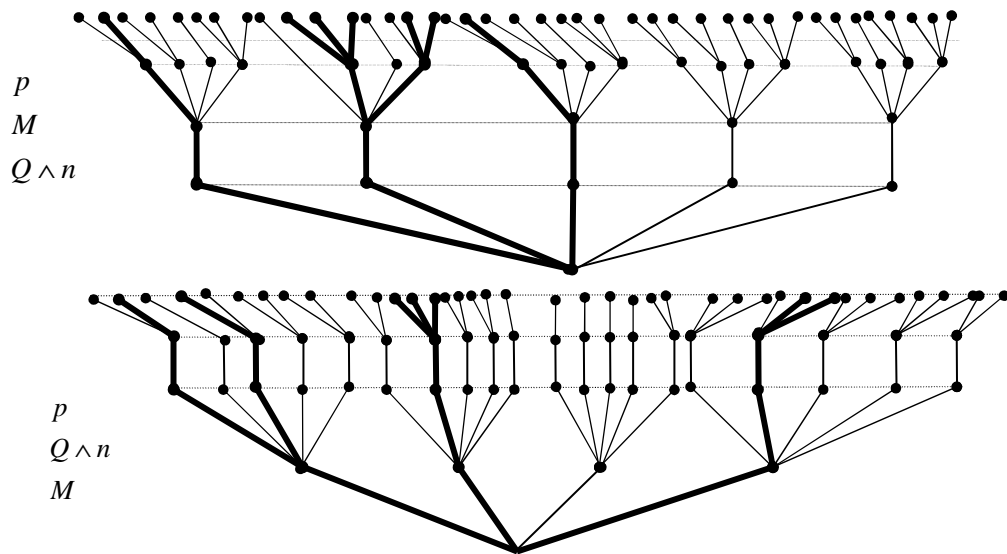
Rys. 6.22. Wielwartościowe drzewa logiczne sprawności η_c [153]



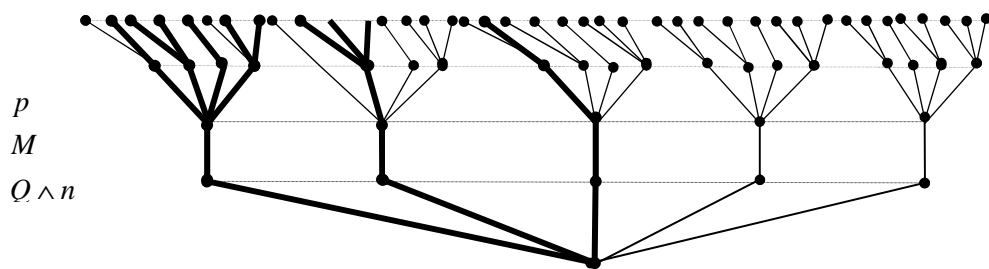
Rys. 6.23. Wielwartościowe drzewa logiczne sprawności η_{mn} [153]



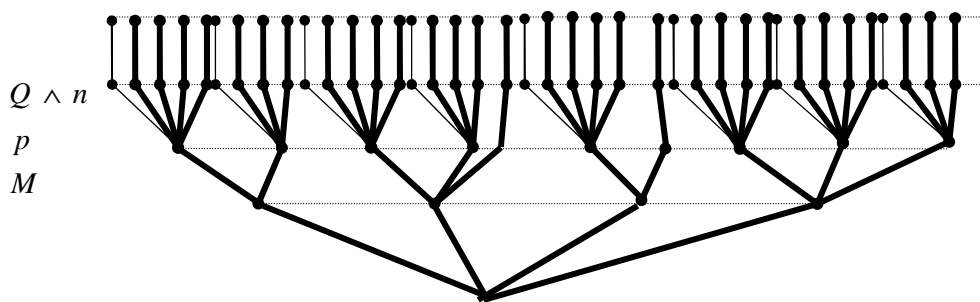
Rys. 6.24. Wielowartościowe drzewa logiczne sprawności η_v [153]



Rys. 6.25. Optymalne wielowartościowe drzewa logiczne sprawności η_c [153]



Rys. 6.26. Optymalne wielowartościowe drzewo logiczne sprawności η_{lm} [153]



Rys. 6.27. Optymalne wielowartościowe drzewo logiczne sprawności η_v [153]

Przy sprawności całkowitej η_c istnieją dwa optymalne wielowartościowe drzewa logiczne, które przedstawiono na rysunku 6.25. Najważniejsze parametry to n i Q_{z} - traktowane jako jedna zmienna zastępcza oraz moment M .

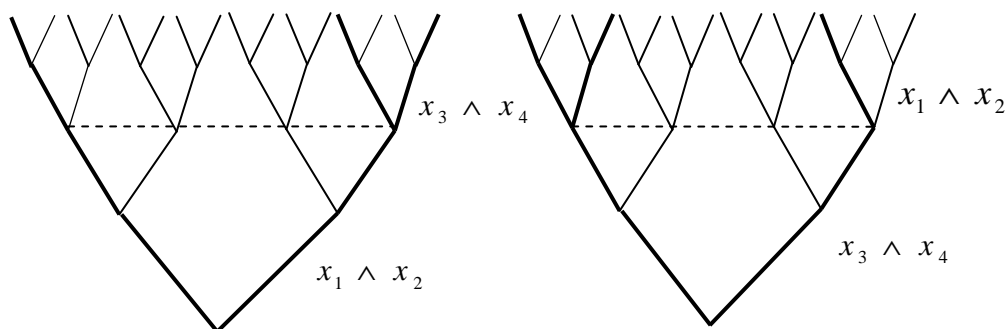
Przy sprawności mechanicznej η_{lm} i objętościowej η_v istnieją pojedyncze optymalne wielowartościowe drzewa logiczne, przedstawione kolejno na rysunkach 6.26 i 6.27. W przypadku sprawności mechanicznej η_{lm} najważniejszymi parametrami są n i Q_{z} , a przy sprawności objętościowej η_v - moment M . Z kolei najmniej ważnym

parametrem (znajdującym się w koronie drzewa) przy sprawności całkowitej η_c oraz sprawności mechanicznej η_{mm} jest ciśnienie tłoczenia p_t . Przy sprawności η_c η_{mm} piętra wyznaczono w kolejności $Q \wedge n - M - p$. W optymalnych logicznych drzewach decyzyjnych przy sprawności η_v wyznaczono w korzeniu parametr M , następnie p i w koronie drzewa $Q \wedge n$. Na drzewie dotyczącym sprawności η_v o kolejności pięter $M - Q \wedge n - p$ wykreślono o jedną gałązkę mniej wobec $M - p - Q \wedge n$, czyli o 2,2%.

6.4.2. ZASTOSOWANIE KOMPLEKSOWYCH WIELOWARTOŚCIOWYCH DRZEW LOGICZNYCH

W kompleksowych drzewach logicznych określono na jednym piętrze łącznie dwie lub więcej zmiennych decyzyjnych [65].

Na kompleksowych drzewach decyzyjnych z rysunku 6.28 istnieją dwa piętra, opisane przez implikację zmiennych $x_1 \wedge x_2$ oraz $x_2 \wedge x_3$.



Rys. 6.28. Kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne dla $x_1 \wedge x_2$ oraz $x_3 \wedge x_4$ [65]

Z zastosowaniem kompleksowego wielowartościowego drzewa logicznego określono taką samą rangę ważności przy co najmniej dwóch połączonych wspólnie parametrach decyzyjnych. Podczas optymalizacji układów maszynowych, w zbiorze kryterialnym bardzo często określono różne konkurencje i pozorne sprzeczności. W kompleksowych drzewach decyzyjnych połączono ze sobą parametry konstrukcyjne i/lub eksploatacyjne o podobnych właściwościach, a także o takiej samej przyjętej dyskretyzacji wartości przedziałów. Zmniejszono w ten sposób złożoność obliczeniową, w celu wyznaczenia najważniejszych podgrup w układzie. W przypadku łączenia zmiennych decyzyjnych o odrębnych właściwościach i funkcjach w układzie, uzyskano subanalizę badanego systemu [65].

W rozpatrywanym przykładzie analizę rangi ważności parametrów konstrukcyjnych pompy zębatej przeprowadzono dla połączonych parametrów $p \wedge M$ oraz $Q \wedge n$. W kompleksowych wielowartościowych drzewach logicznych przyjęto (według tabeli 6.3) następujące kodowanie wartości arytmetycznych badanych parametrów:

$$n = 500 [\text{rpm}] \sim 0; n = 800 [\text{rpm}] \sim 1; n = 1000 [\text{rpm}] \sim 2;$$

$$n = 1500 [\text{rpm}] \sim 3; n = 2000 [\text{rpm}] \sim 4;$$

$$p_t = 0 [\text{MPa}] \sim 0; p_t = 5 [\text{MPa}] \sim 1; p_t = 10 [\text{MPa}] \sim 2; p_t = 15 [\text{MPa}] \sim 3;$$

$$p_t = 20 [\text{MPa}] \sim 4; p_t = 25 [\text{MPa}] \sim 5; p_t = 28 [\text{MPa}] \sim 6; p_t = 30 [\text{MPa}] \sim 7;$$

$$Q_{rz} \in \langle 20, 2; 21, 1 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 0; Q_{rz} \in \langle 34, 2; 34, 9 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 1;$$

$$Q_{rz} \in \langle 43, 3; 44, 5 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 2; [l/\text{min}] \sim 3; Q_{rz} \in \langle 87, 6; 89, 3 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 4;$$

$$M \in \langle 2, 0; 8, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 0; M \in \langle 36, 0; 47, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 1; M \in \langle 77, 0; 94, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 2;$$

$$M \in \langle 116, 0; 138, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 3; M \in \langle 156, 0; 182, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 4; M \in \langle 200, 0; 214, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 5;$$

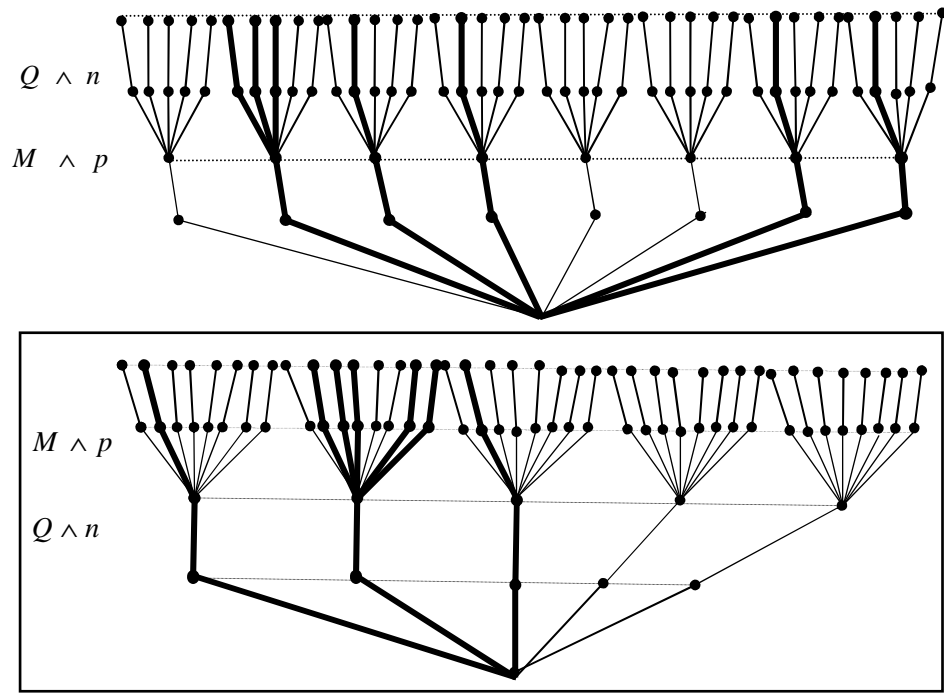
$$M \in \langle 210, 0; 241, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 6; M \in \langle 236, 0; 259, 0 \rangle [\text{Nm}] \sim 7.,$$

które zakodowano logicznymi zmiennymi decyzyjnymi w kompleksowych wielowartościowych logicznych drzewach decyzyjnych, przedstawionych na rysunkach 6.29.-6.31[65]. Podobnie jak w przypadku wielowartościowych drzew logicznych przyjęto wartości arytmetyczne zakresu zmian poszczególnych sprawności: $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$.

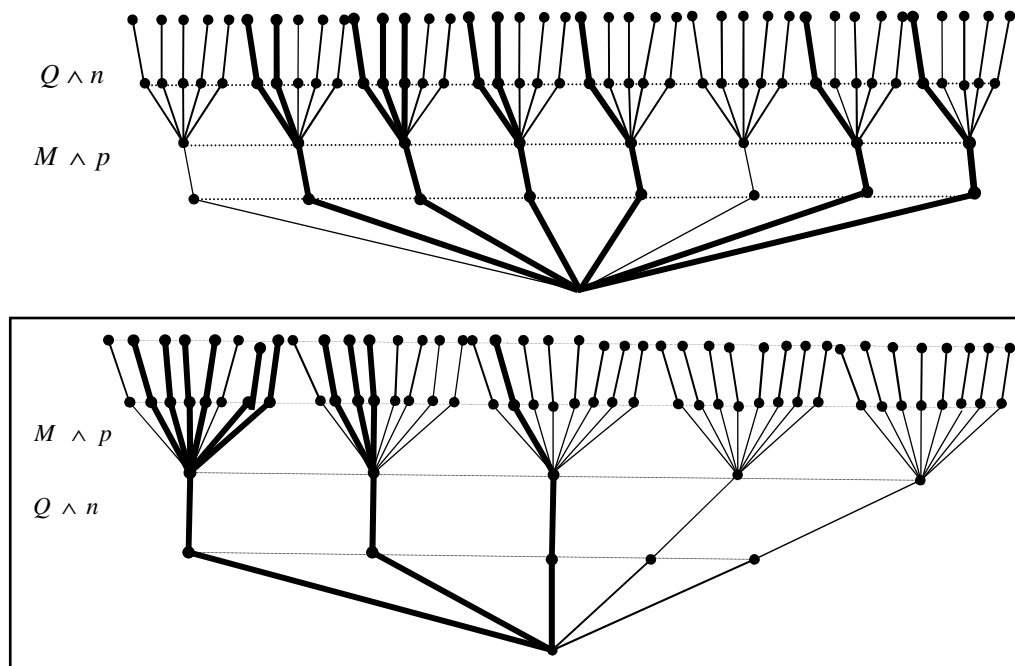
Tabela 6.3. Wartości arytmetyczne i logiczne ustalonych parametrów kompleksowych drzew decyzyjnych

n [rpm]	Q_{rz} [l/min]	p_t [Mpa]	M [Nm]	η_v [%]	η_{hm} [%]	η_c [%]
0	0	0	0	94,6	0,0	0,0
		1	1	92,1	98,0	90,3
		2	2	91,3	91,8	83,8
		3	3	90,9	91,5	83,1
		4	4	90,9	90,7	82,4
		5	5	92,1	88,5	81,5
		6	6	92,5	90,9	84,1
		7	7	93,0	90,0	83,6
1	1	0	0	98,0	0,0	0,0
		1	1	97,5	92,8	90,5
		2	2	96,2	90,6	87,2
		3	3	96,0	89,9	86,3
		4	4	95,7	88,4	84,6
		5	5	97,0	87,6	85,0
		6	6	97,5	88,5	86,3
		7	7	97,8	88,5	86,5
2	2	0	0	99,9	0,0	0,0
		1	1	99,1	92,8	92,0
		2	2	98,7	86,2	85,1
		3	3	97,4	85,6	83,4
		4	4	97,4	84,2	82,1
		5	5	97,4	85,1	82,9
		6	6	97,4	84,7	82,5
		7	7	97,2	85,3	82,9
3	3	0	0	100,9	0,0	0,0
		1	1	100,0	84,0	84,0
		2	2	99,6	84,1	83,8
		3	3	99,1	84,9	84,1
		4	4	98,1	82,3	80,7
		5	5	98,4	84,2	82,9
		6	6	98,2	84,3	82,8
		7	7	98,1	83,3	81,7
4	4	0	0	100,3	0,0	0,0
		1	1	100,0	75,0	75,0
		2	2	99,3	75,2	74,6
		3	3	98,8	76,9	76,0
		4	4	98,4	77,8	76,5
		5	5	98,8	82,7	81,7
		6	6	98,7	82,2	81,2
		7	7	98,6	82,0	80,9

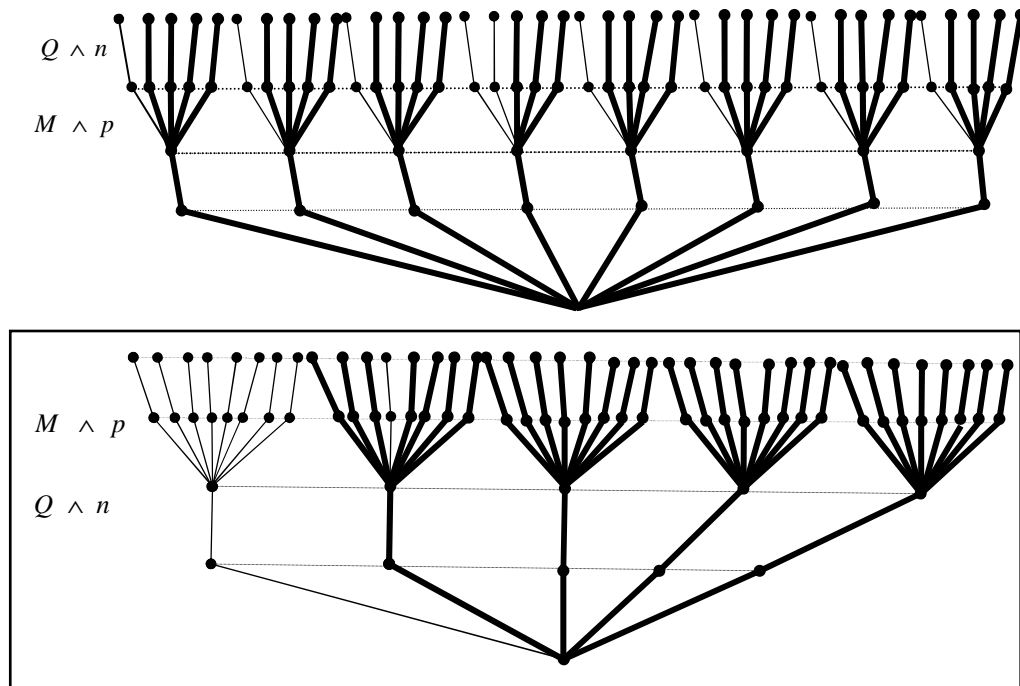
W kompleksowych optymalnych drzewach decyzyjnych z rysunków 6.29-6.31 w korzeniu kompleksową zmienną decyzyjną jest $Q \wedge n$. W przypadku analizy dla pojedynczych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych o randze ważności decydują głównie ich indywidualne właściwości.



Rys. 6.29. Kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne sprawności η_c , - Kompleksowe drzewo optymalne [65]



Rys. 6.30. Kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne sprawności η_{lm} , -Kompleksowe drzewo optymalne [65]



Rys. 6.31. Kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne sprawności η_v , - Kompleksowe drzewo optymalne [65]

Dobór parametrów eksploatacyjnych dla danej konstrukcji pompy decyduje o jej maksymalnej sprawności. Optymalizacja sprawności pompy może przebiegać jako wielokryterialna bądź monokryterialna i wymaga obliczenia sprawności objętościowej, hydrauliczno-mechanicznej oraz całkowitej. W analizie przedstawionej na drzewach z rysunków 6.29- 6.31 uznano za funkcje kryterialne celu: η_c , η_{hm} , η_v , natomiast parametry M , n , p_t , Q_z przyjęto za zmienne decyzyjne. Poszukując optymalnych wartości funkcji η_v , η_{hm} , η_c , przyjęto następujące wartości arytmetyczne zakresów zmian: $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$. Następnie wszystkie wielowartościowe drzewa decyzyjne z układem piętrowym parametrów M , p_t , $n \wedge Q_z$ opisano kompleksowym współczynnikiem złożoności.

6.4.3. ZASTOSOWANIE KOMPLEKSOWEGO WSPÓŁCZYNNIKA ZŁOŻONOŚCI ZE STRUKTUR ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE

Jak wykazano w rozdziale 5.5.4 możliwe jest zastosowanie współczynnika kompleksowego współczynnika złożoności L^K w opisie wielowartościowych drzew logicznych. Poszukując optymalnych wartości funkcji η_v , η_{hm} , η_c , przyjęto następujące wartości arytmetyczne zakresów zmian: $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$.

W pracy [58, 69] wszystkie wielowartościowe drzewa decyzyjne z układem piętrowym parametrów M , p_t , $n \wedge Q_z$ opisano kompleksowym współczynnikiem złożoności.

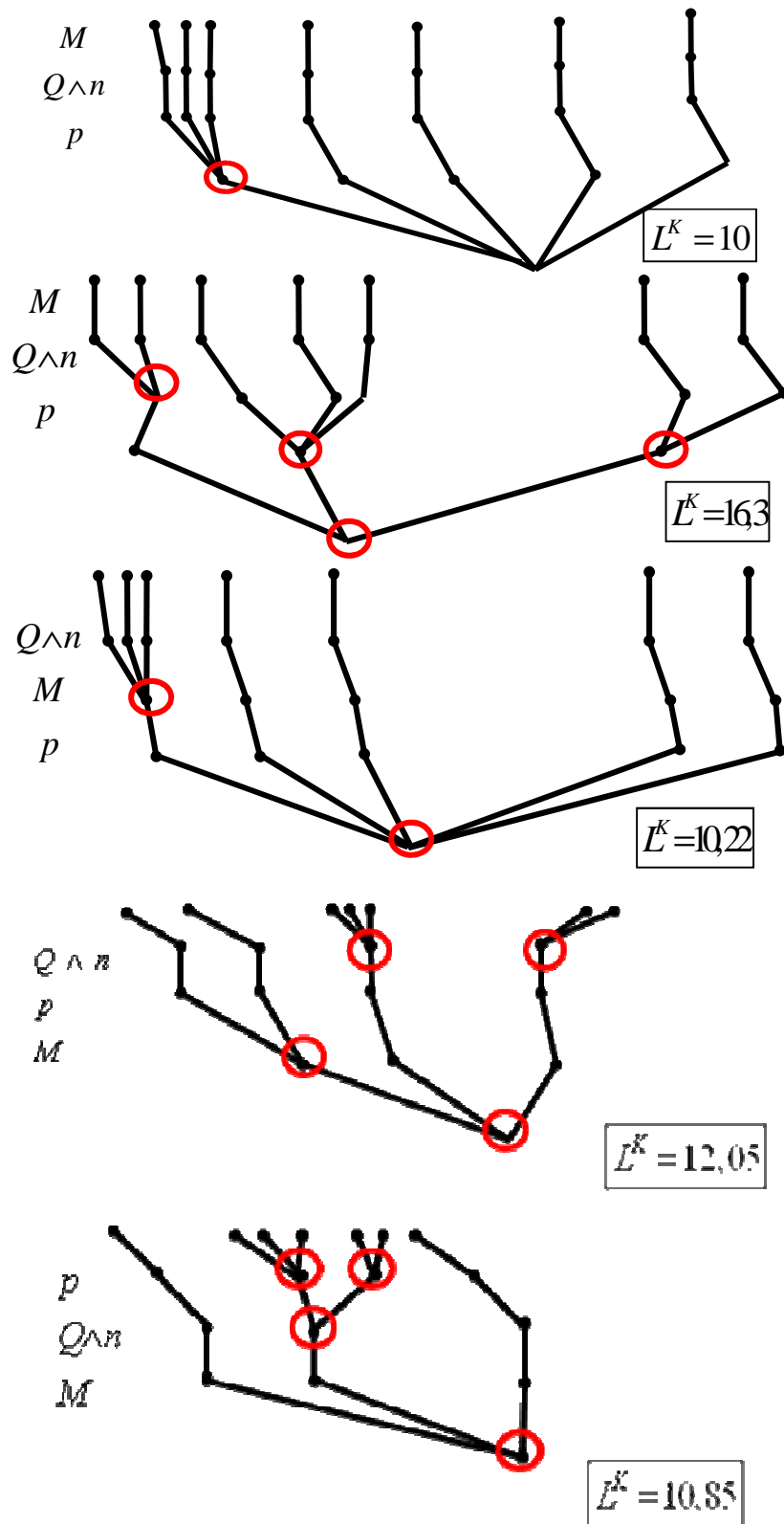
W poszczególnych sprawnościach określono następujące wartości kompleksowych współczynników złożoności:

$$\eta_c : L_{\eta_c}^K(p|Q \wedge n|M) = 10, L_{\eta_c}^K(p|M|Q \wedge n) = 10.22, L_{\eta_c}^K(Q \wedge n|p|M) = 9.66, L_{\eta_c}^K(M|p|Q \wedge n) = 16.3, \\ L_{\eta_c}^K(Q \wedge n|M|p) = 10.85, L_{\eta_c}^K(M|Q \wedge n|p) = 12.05;$$

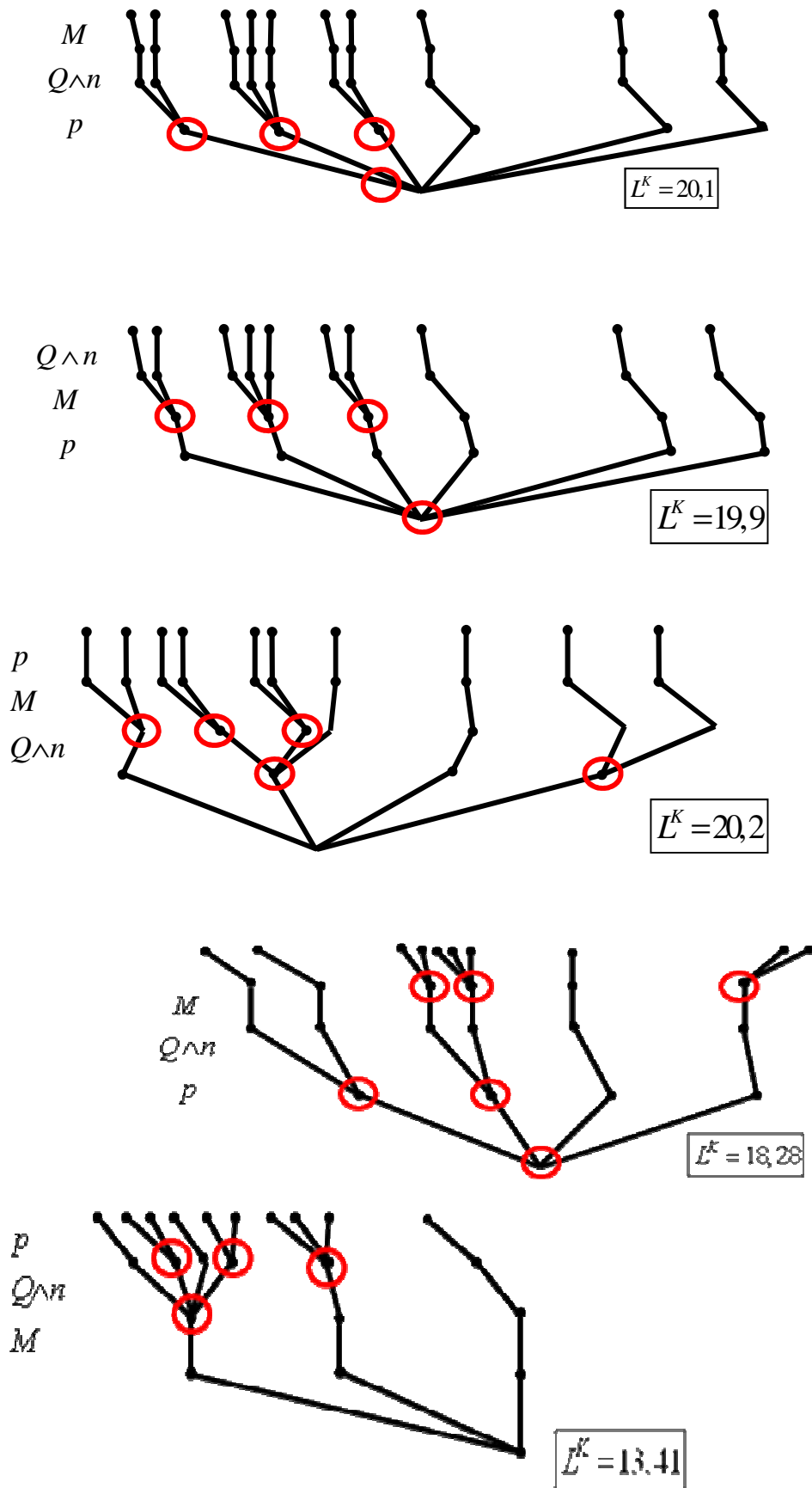
$$\eta_{lm} : L_{\eta_{lm}}^K(p|Q \wedge n|M) = 20.1, L_{\eta_{lm}}^K(p|M|Q \wedge n) = 19.9, L_{\eta_{lm}}^K(M|p|Q \wedge n) = 20.2, L_{\eta_{lm}}^K(M|Q \wedge n|p) = 18.28, \\ L_{\eta_{lm}}^K(Q \wedge n|p|M) = 12.15, L_{\eta_{lm}}^K(Q \wedge n|M|p) = 10.85;$$

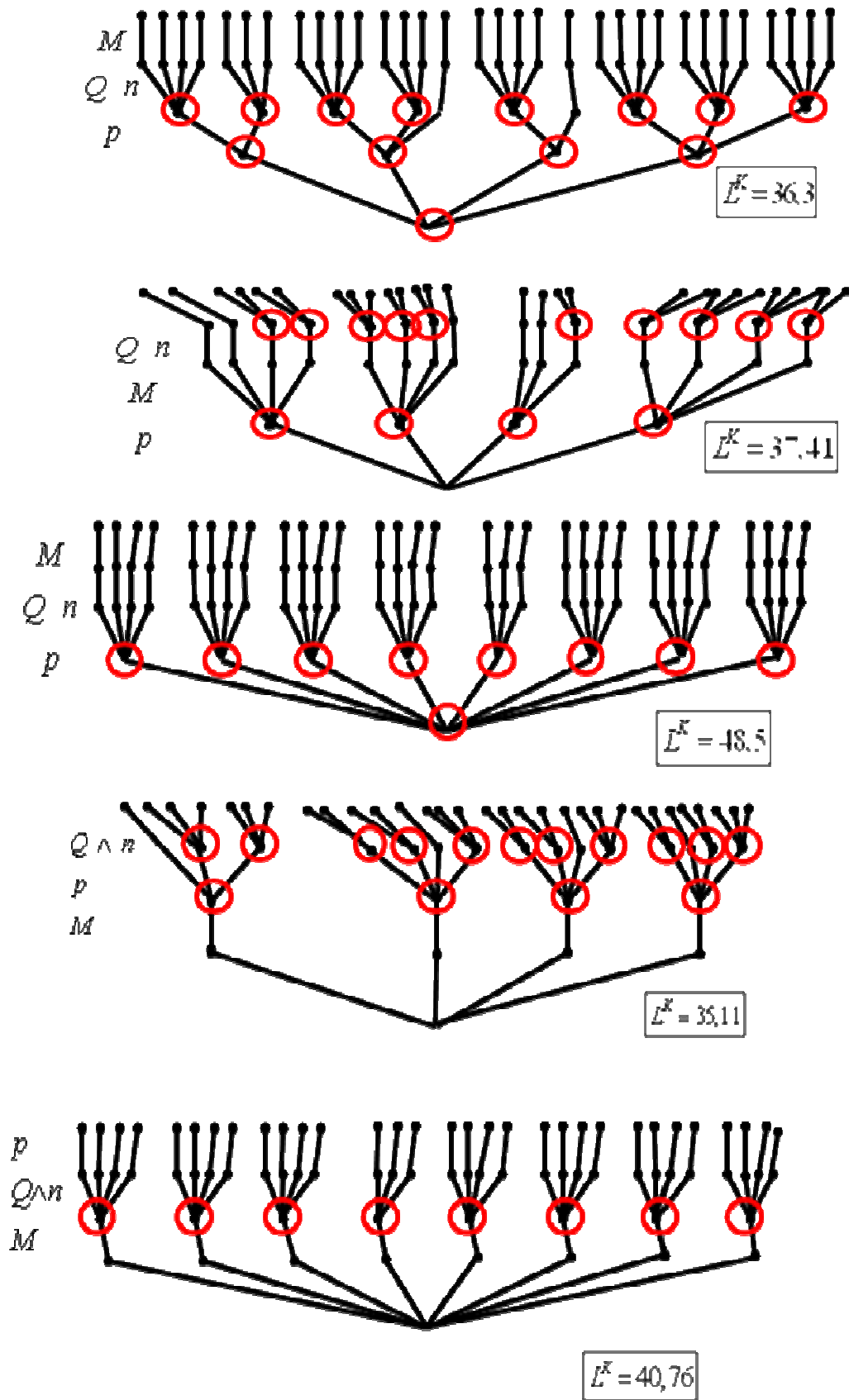
$$\eta_v : L_{\eta_v}^K(p|Q \wedge n|M) = 48.5, L_{\eta_v}^K(p|M|Q \wedge n) = 36.3, L_{\eta_v}^K(M|Q \wedge n|p) = 37.41, L_{\eta_v}^K(Q \wedge n|M|p) = 35.11, \\ L_{\eta_v}^K(Q \wedge n|p|M) = 24.31, L_{\eta_v}^K(M|p|Q \wedge n) = 40.76.$$

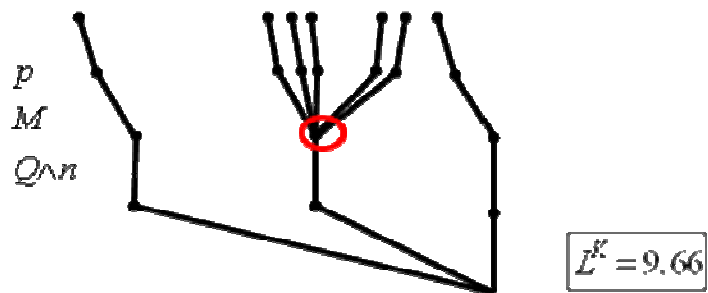
Drzewa opisane kompleksowym współczynnikiem złożoności poszczególnych sprawności przedstawiono na rysunkach 6.32-6.34. Z kolei optymalne drzewa opisane kompleksowym współczynnikiem złożoności dla poszczególnych sprawności na rysunkach 6.35-6.37.



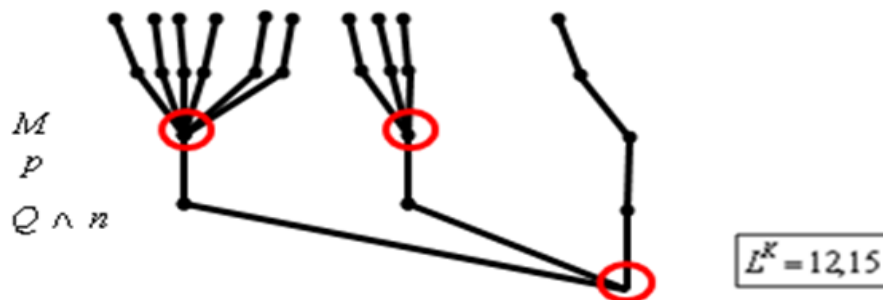
Rys. 6.32. Kompleksowy współczynnik złożoności struktur sprawności η_c

Rys. 6.33. Kompleksowy współczynnik złożoności struktur sprawności η_{hm}

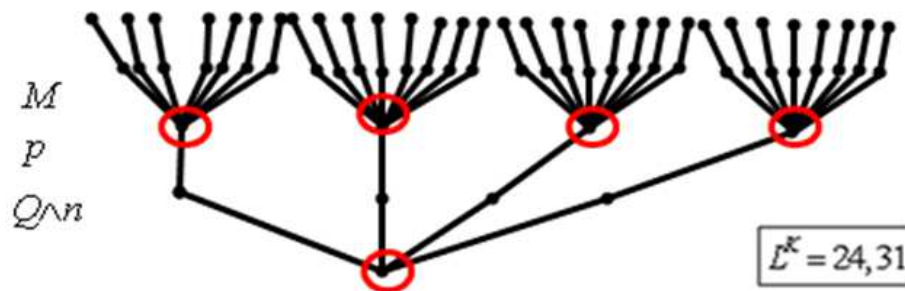
Rys. 6.34. Kompleksowy współczynnik złożoności struktur sprawności η_v



Rys. 6.35. Optymalny kompleksowy współczynnik złożoności struktury dla sprawności η_c



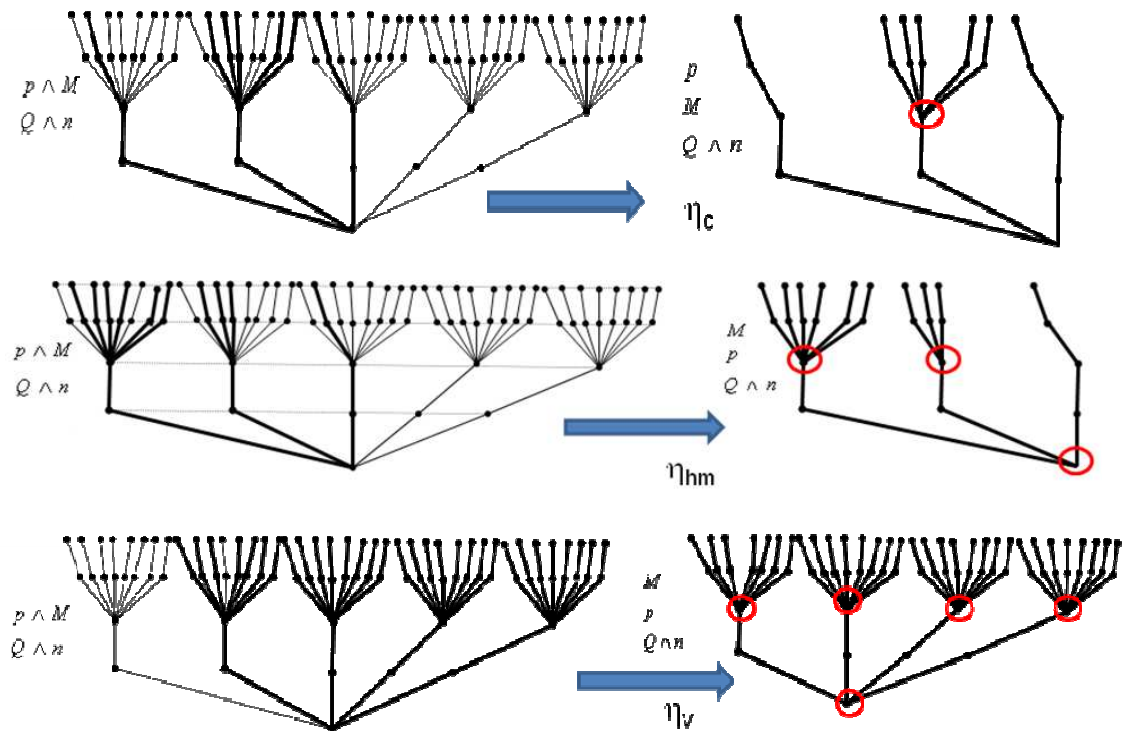
Rys. 6.36. Optymalny kompleksowy współczynnik złożoności struktury dla sprawności η_{hm}



Rys. 6.37. Optymalny kompleksowy współczynnik złożoności struktury sprawności η_v

Wśród optymalnych drzew logicznych, tzn. z najmniejszą liczbą gałęzi (wytycznych realizowalnych), istnieje wyróżnione drzewo optymalne, tzn. z najmniejszą wartością kompleksowego współczynnika złożoności.

W szczególności za pomocą kompleksowego współczynnika złożoności struktur poszczególnych sprawności z rysunków 6.35-6.37 identycznie wyznaczono optymalne kompleksowe drzewa logiczne $Q \cap n$ przy połączonych i rozdzielnych parametrach p i M z rysunków 6.29- 6.31, co pokazano na rysunku 6.38.



Rys. 6.38. Optymalne kompleksowe wielowartościowe drzewa decyzyjne i optymalne kompleksowe współczynniki złożoności struktur sprawności η_c , η_{hm} , η_v

Właściwość kompleksowego współczynnika złożoności, wielowartościowych optymalnych drzew logicznych, będzie wykorzystana w dalszych badaniach na opracowanie metody bezpośredniego wyznaczania optymalnego wielowartościowego drzewa logicznego z grafu zależności, opisującego dany układ maszynowy.

6.4.4 ZASTOSOWANIE UKŁADÓW WIELOWARTOŚCIOWYCH RÓWNAŃ LOGICZNYCH Z WAGOWYMI WSPÓŁCZYNNIKAMI

Przy odpowiednich zmianach kodowych parametrów konstrukcyjnych M , p , $n \wedge Q_z$ (Tab. 6.1 i 6.2) można oddzielnie przydzielać współczynniki wagowe w_i , w zależności od zakresów wartości arytmetycznych każdej ze sprawności η_c , η_{hm} i η_v . Rozwiązując układ wielowartościowych równań logicznych, otrzymano warianty realizowalne, jako rozwiązania prawdziwe jednocześnie dla wszystkich sprawności η_c , η_{hm} , η_v .

W poszczególnych zakresach wartości każdej ze sprawności przydzielono następujące wartości współczynników wagowych:

Sprawności η_v :

$$\eta_v \in \langle 96-96,6 \rangle \rightarrow w_i = 1; \eta_v \in \langle 96,6-97,2 \rangle \rightarrow w_i = 2; \eta_v \in \langle 97,2-97,8 \rangle \rightarrow w_i = 3; \eta_v \in \langle 97,8-98,4 \rangle \rightarrow w_i = 4; \\ \eta_v \in \langle 98,4-99 \rangle \rightarrow w_i = 5; \eta_v \in \langle 99-99,6 \rangle \rightarrow w_i = 6; \eta_v > 99,6 \rightarrow w_i = 7.$$

Sprawności η_{hm} :

$$\eta_{hm} \in \langle 89-90,2 \rangle \rightarrow w_i = 1; \eta_{hm} \in \langle 90,2-91,6 \rangle \rightarrow w_i = 2; \eta_{hm} \in \langle 91,6-92,84 \rangle \rightarrow w_i = 3; \\ \eta_{hm} \in \langle 92,8-94,1 \rangle \rightarrow w_i = 4; \eta_{hm} \in \langle 94,1-95,4 \rangle \rightarrow w_i = 5; \\ \eta_{hm} \in \langle 95,4-96,7 \rangle \rightarrow w_i = 6; \eta_{hm} \in \langle 96,7 \rangle \rightarrow w_i = 7.$$

Sprawności η_c :

$\eta_c \in < 86 - 86,86 > \rightarrow w_i = 1; \eta_c \in < 86,86 - 87,2 > \rightarrow w_i = 2; \eta_c \in < 87,2 - 88,1 > \rightarrow w_i = 3;$
 $\eta_c \in < 88,1 - 88,96 > \rightarrow w_i = 4; \eta_c \in < 88,96 - 89,82 > \rightarrow w_i = 5;$
 $\eta_c \in < 89,82 - 90,68 > \rightarrow w_i = 6; \eta_c \in > 90,7 \rightarrow w_i = 7.$

W Tabeli 6.4 przedstawiono dane zmiany kodowe parametrów M , p_t , $n \wedge Q_{rz}$ z Tabel 6.1 i 6.2, przypisane odpowiednim współczynnikom wagowym.

Tabela 6.4. Współczynniki wagowe $w_i(\eta_v)$, $w_i(\eta_{hm})$, $w_i(\eta_c)$ odpowiednich zmian kodowych i wartości sprawności

$n p_t Q_{rz} M$	$w_i(\eta_v)$	η_v [%]	$w_i(\eta_{hm})$	η_{hm} [%]	$w_i(\eta_c)$	η_c [%]
0100			7	98,0	6	90,3
0201			3	91,8		
0301			2	91,5		
0402			2	90,7		
0603			2	90,9		
0703			1	90,0		
1010	4	98,0				
1110	3	97,5	3	92,8	6	90,5
1211	1	96,2	2	90,6	2	87,2
1311	1	96,0	1	89,9	1	86,3
1513	2	97,0				
1613	3	97,5			1	86,3
1713	3	97,8			1	86,5
2020	7	99,9				
2120	6	99,1	3	92,8	7	92,0
2221	5	98,7				
2321	3	97,4				
2422	3	97,4				
2523	3	97,4				
2623	3	97,4				
2723	3	97,2				
3030	7	100,9				
3130	7	100,0				
3231	6	99,6				
3331	6	99,1				
3432	4	98,1				
3533	4	98,4				
3633	4	98,2				
3733	4	98,1				
4040	7	100,3				
4140	7	100,0				
4241	6	99,3				
4342	5	98,8				
4442	4	98,4				
4543	5	98,8				
4643	5	98,7				
4743	5	98,6				

W przypadku tabeli 6.4 można zapisać wielowartościowy układ 3 równań logicznych sprawności η_c , η_{hm} , η_v z wagowymi współczynnikami:

$$Y_{t_w < 0,48t_o} = \begin{cases} n_v = 4 \cdot 1010 + 3 \cdot 1110 + 1 \cdot 1211 + 1 \cdot 1311 + 2 \cdot 1513 + 3 \cdot 1613 + 3 \cdot 1713 + 7 \cdot 2020 \\ + 6 \cdot 2120 + 5 \cdot 2221 + 3 \cdot 2422 + 3 \cdot 2523 + 3 \cdot 2623 + 3 \cdot 2723 + 7 \cdot 3030 + 7 \cdot 3130 + 6 \cdot 3231 \\ + 6 \cdot 3331 + 4 \cdot 3432 + 4 \cdot 3533 + 4 \cdot 3633 + 4 \cdot 3733 + 7 \cdot 4040 + 4 \cdot 4140 + 6 \cdot 4241 + 5 \cdot 4342 \\ + 4 \cdot 4442 + 5 \cdot 4543 + 5 \cdot 4643 + 5 \cdot 4743, \\ n_{hm} = 7 \cdot 0100 + 3 \cdot 0201 + 2 \cdot 0301 + 2 \cdot 0402 + 2 \cdot 0603 + 1 \cdot 0703 + 3 \cdot 1110 + 2 \cdot 1211 + \\ + 3 \cdot 1311 + 3 \cdot 2120, \\ n_c = 6 \cdot 0100 + 6 \cdot 1110 + 2 \cdot 1211 + 1 \cdot 1613 + 1 \cdot 1713 + 7 \cdot 2120. \end{cases}$$

Z układu równań $Y_{t_w < 0,48t_o}$ istnieje 1800 wariantów teoretycznych rozwiązań. Po rozwiązaniu powyższego równania otrzymuje się rozwiązania prawdziwe jako warianty realizowalne w postaci:

$$f(n_v, n_{hm}, n_c)^{t_w < 0,48t_o} = 3 \cdot 1110 + 1 \cdot 1211 + 1 \cdot 1311 + 3 \cdot 2120.$$

Otrzymuje się zmiany kodowe parametrów konstrukcyjnych M , p_t , $n \wedge Q_{rz}$: 3·1110; 1·1211; 1·1311; 3·2120, którymi opisano optymalne wartości każdej ze sprawności η_c , η_{hm} , η_v .

Dalsze badania powinny koncentrować się na interakcji między zmiennymi decyzyjnymi w optymalizacji dyskretnej z pompą zębatą. Analiza powinna także koncentrować się na integracji algorytmicznej metody logicznych drzew decyzyjnych z multiplikatywnymi modelami regresji wielokrotnej. Należy także uwzględnić współczynniki wagowe w minimalizacji funkcji wielowartościowej drzew decyzyjnych.

ROZDZIAŁ 7

PODSUMOWANIE

Szukanie optymalnych rozwiązań jest procesem rozwijającym się w czasie i stanowiącym ciąg działań. Istotną cechą każdego procesu jest występowanie większej liczby możliwych dróg, z których konieczne jest wybranie tylko tych prawdziwych. Z każdym wybranym wariantem działania jest związany określony rezultat. W ocenie wyniku wybranego wariantu lub kilku wariantów podejmowana jest decyzja, który nowy wariant należałoby sprawdzić, aby znaleźć się bliżej celu.

Jednym z zagadnień przedstawionych w pracy jest zastosowanie równań logicznych w optymalizacji układów maszynowych. W pracy uogólniono algorytm Quine-a-McClusekya minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych z wielowartościowymi współczynnikami wagowymi. Dodatkowo omówiono procedurę kombinatorycznego rozwiązywania wagowych wielowartościowych układów równań logicznych opisujących wytyczne projektowania w ujęciu analizy morfologicznej z zachowaniem aksjomatów Rossera- Turguette'a. Wykazano, że w ogólnym przypadku minimalizacja funkcji logicznych z wagowymi współczynnikami, może być taka sama jak bez współczynników wagowych, jednak uzyskano lepsze odzwierciedlenie modeli fizycznych hydraulicznych układów przelewowych w ich modelach matematycznych. W dotychczasowych opracowaniach literaturowych nie uwzględniono różnych współczynników iloczynów logicznych, w procesach minimalizacji rozdzielnej i wspólnej układów wielowartościowych równań logicznych.

W kolejnym z rozdziałów dokonano analizy decyzyjnej wytycznych projektowania badanego zaworu przelewowego, w warunkach niepewności oraz uwzględniono- w modelowaniu układów przepływowych- rozłączną analizę logiczną wytycznych projektowania. Innym zagadnieniem, omawianym w pracy jest indukcyjne generowanie reguł za pomocą drzew indukcyjnych, jako jedna z metod klasyfikacji informacji i wspomaganie decyzji w układach technicznych. Za pomocą indukcyjnych drzew decyzyjnych z entropią, w wybranych modelach technicznych ustalono najbardziej znaczący atrybutu i porównano proces predykcji i klasyfikacji z wielowartościowymi drzewami logicznymi. Dodatkowo indukcyjne drzewa decyzyjne można identyfikować ze zmodyfikowanymi drzewami, jako modele wielu zmiennych logicznych na danym piętrze drzewa.

Jednym z najważniejszych zagadnień, przedstawionych w niniejszej rozprawie, jest zastosowanie grafów zależności i drzew rozgrywających parametrycznie w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych.

Graf zależności rozgrywający parametrycznie jest narzędziem, opisującym typowy schemat szukania: wariant, eksperyment i wybór zależny od wyników eksperymentów. W etapie budowania grafu zależności z modelu matematycznego, analizowanego układu, bardzo ważne jest określenie możliwych wariantów zmian parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych. Warianty decyzyjne przypisywane są łukom, jako relacje między wierzchołkami. Z kolei graf tworzy

zgrupowany system relacyjny preferencji. Zasada jest taka, że każdemu wariantowi przypisuje się wartości liczbowe w odpowiednim modelu fizycznym analizowanego układu. Zmiany każdego wariantu, wprowadzanego do grafu zależności, powinny mieć znaczenie w zachowaniu się układu maszynowego. Danym wariantom oznaczono niezależne składowe (decyzji globalnej) czyli rozpatrywano je niezależnie od każdego innego wariantu bez utraty roli punktu przyłożenia wspomaganie decyzji. Wariant po połączeniu z grafem zależy od swoich poprzedników, wpływając na następniki. Wierzchołkom grafu przypisywane są funkcje zależne od czasu. W grafie zależności, przyporządkowano każdemu z możliwych wariantów, spośród których wybiera się najlepszy, określoną liczbę, i wyznaczono funkcje celu, określoną na zbiorze możliwych wariantów. Obszar oznaczoności funkcji celu jest obszarem szukania. Przeszukując graf zależności, dąży się do znalezienia najlepszego wariantu, któremu przyporządkowano największą (lub najmniejszą) wartość funkcji celu – w optymalnym zachowaniu się układu maszynowego. Struktury rozgrywające parametrycznie, otrzymane w wyniku rozkładu grafu zależności od każdego z wierzchołków, algorytmizują tok obliczeń oraz dzielą całą przestrzeń przeszukiwania grafu na podgrupy. W odróżnieniu od tradycyjnych grafów zależności i klasyfikatorów drzewiastych, w grafach zależności, z drzewami rozgrywającymi parametrycznie, określono związek rangi ważności wierzchołków (stanów) z wysokością struktury drzewiastej. W tradycyjnych grafach oceniano jedynie rangę ważności wierzchołków względem siebie według grupowania taksonomicznego:

- ◆ ustalona grupa w przypadku wierzchołków związanych dużą liczbą powiązań,
- ◆ mała liczba powiązań w przypadku różnych grup względem siebie,
- ◆ mała liczba grup o dużej liczności, w przypadku rozkładu od wierzchołka ważnego

Zastosowanie dekompozycji decyzyjnej w grafach i drzewach rozgrywających parametrycznie nie zmienia typu i kształtu graficznego takich struktur. Są one bardziej złożone, ale z zachowaniem danych własności strukturalnych, wynikających z pierwotnego grafu zależności. Dlatego można lokalnie odróżnić rolę dekompozycji. Wprowadzona dekompozycja decyzyjna likwiduje interakcję parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych, gdyż projektant może zdecydować się jedynie na pojedyncze zmiany i obserwacje w kolejnych etapach. Dzięki wielokrotnej numeracji wierzchołkowej, umożliwiono rozpatrywanie i odróżnianie takich samych elementów, ale występujących na różnych piętrach struktury drzewiastej, co także zachowuje ogólny kształt struktury graficznej, istniejącej nawet przed dekompozycją. Wprowadzony dodatkowy wierzchołek czasowy w modelu fizycznym, którym opisano pętlę sprzężenia zwrotnego na grafie zależności. Wynika to z następujących faktów:

- ◆ dodatkowa decyzja jest wytyczną dla inżyniera - projektanta w przypadku, gdy chce zmienić sygnał wyjściowy na podstawie sygnału wejściowego,
- ◆ drzewo z cyklami i struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie zachowują identyczne kształty, jak przed wprowadzeniem dodatkowego

wierzchołka czasowego uwzględniając pojedyncze rozgałęzienia na odpowiednich piętrach.

Kompleksowe struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie mogą być zbudowane od dowolnych, ustalonych wcześniej wierzchołków początkowych, opisujących stany analizowanego układu. Złożoność decyzyjna takich struktur zależy od ustalonego wcześniej wierzchołka początkowego rozkładu. W szczególności na niektórych kompleksowych strukturach drzewiastych rozgrywających parametrycznie mogą istnieć węzły (wierzchołki), złożone ze wszystkich dopuszczalnych stanów układu, jako wspólna część wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie. W kompleksowych strukturach rozgrywających parametrycznie, będących końcowym, wynikiem rozkładu grafu zależności, przedstawiono bezpośrednie operacje szukania najlepszego wariantu w sposób całkowicie formalny. Wyznaczono ogólną strukturę i logikę procesu szukania.

Kompleksowe struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie mogą być zbudowane od dowolnych, ustalonych wcześniej wierzchołków początkowych, opisujących stany analizowanego układu zastosowanie w analizie właściwości dynamicznych układu hydraulicznego, składającego się z pompy zębatej, zaworu przelewowego, rozdzielacza i silnika obciążonego dużym masowym momentem bezwładności. W rozprawie przedstawiono tylko przykładowy obiekt badawczy. Istnieją opracowania autorskie, dotyczące zastosowań grafów i drzew rozgrywających parametrycznie w innych obiektach technicznych i układach maszynowych, których nie zaprezentowano w niniejszej pracy.

Ostatni rozdział poświęcono optymalizacji dyskretnej pompy zębatej z podciętą stopą zęba. Badania przeprowadzono w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. W optymalizacji pompy zębatej obliczono sprawność objętościową, hydrauliczno-mechaniczną oraz całkowitą. Zakładając, że funkcją celu jest sprawność całkowita pompy, a poszukiwanymi parametrami są wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, optymalizację można przeprowadzić zgodnie z opracowanym algorytmem, oddzielnie w przypadku parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, poszukując maksymalnej wartości sprawności. Metoda optymalizacji dyskretnej pompy zębatej, za pomocą wielowartościowych drzew logicznych, jest nowym podejściem do zagadnienia. W pierwszym etapie badań zastosowano wielowartościowe logiczne drzewa decyzyjne do analizy rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych pompy zębatej, a następnie zastosowano kompleksowe wielowartościowe drzewa logiczne. W drugim etapie badania rangi ważności pompy zębatej z podciętą stopą zęba zastosowano kompleksowy współczynnik złożoności struktur rozgrywających parametrycznie. Wykazano że wśród optymalnych drzew logicznych, tzn. z najmniejszą liczbą gałęzi prawdziwych, istnieje wyróżnione drzewo optymalne, tzn. z najmniejszą wartością kompleksowego współczynnika złożoności. Dodatkowo zastosowano wagowy wielowartościowy układ równań logicznych.

Oryginalnym wkładem niniejszej pracy w metodologię optymalizacji układów maszynowych, jest przede wszystkim opracowanie algorytmów optymalizacyjnych układów maszynowych, z jednoczesnym opisem wytycznych projektowania na

podstawie równań logicznych i grafów, w których zapewniono realizowalność techniczną. Praca uwzględnia:

- ◆ opracowanie algorytmu struktur grafowych, umożliwiających zmiany wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych według modelowania matematycznego w zagadnieniach optymalizacji układów maszynowych,
- ◆ opracowanie algorytmu Quine'a Mc-Cluskeya minimalizacji funkcji logicznych z wagowymi współczynnikami,
- ◆ opracowanie algorytmów dla wielowartościowych równań logicznych, umożliwiających otrzymanie najważniejszych wytycznych projektowania, w procesie optymalizacji układów maszynowych,
- ◆ przeprowadzenie obliczeń w celu potwierdzenia opracowanych algorytmów.

W literaturze polskiej jak i zagranicznej prezentowano wiele prac dotyczących zastosowania teorii grafów w badaniu dynamiki układów, zarówno w zakresie analizy, jak i również syntezy złożonych układów mechanicznych. I chociaż zasób graficznych metod optymalizacji dyskretnej jest znaczny, autor jako pierwszy zastosował tego typu narzędzie graficzne w opisie modeli matematycznych układów maszynowych. W przedstawionej pracy grafy i drzewa rozgrywające parametrycznie w analizie modeli matematycznych układów maszynowych dostosowano ze względu na:

- ◆ uniezależnienie się od subiektywizmu różnych inżynierów-projektantów;
- ◆ podobieństwa strukturalne układów otwartych i zamkniętych;
- ◆ dekompozycję złożonych zbiorów dowolnych ustalonych zmiennych wejściowych na pojedyncze zmienne decyzyjne na strukturze drzewiastej z cyklami i odpowiedniej strukturze drzewiastej rozgrywającej parametrycznie, bez względu na wybór wierzchołka początkowego;
- ◆ jednoznaczne określenie podporządkowania wierzchołków grafu ze względu na kolejność występowania (co prowadzi do wielokrotnej numeracji wierzchołkowej);
- ◆ uwzględnienie kompleksowych struktur drzewiastych z cyklami, od różnych wierzchołków początkowych, w uogólnioną strukturę kompleksową danego układu (elementu), która później prowadzi do wyodrębnienia części wspólnej (jako najważniejszej) wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie (z ewentualnym rozpisaniem na oddzielne zmienne wejściowe oznaczające parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne);
- ◆ zdefiniowanie współczynnika złożoności, a następnie kompleksowego współczynnika złożoności struktur rozgrywających parametrycznie. Kompleksowy współczynnik złożoności struktur pozwala na preliminarzy wybór najlepszej struktury w optymalizacji dyskretnej.

Wpływ rezultatów do dorobku naukowego mechaniki i badania maszyn, a także do eksploatacji maszyn można przedstawić w ujęciu metodologicznym w następujący sposób:

- ◆ w modelu decyzyjnym struktury grafowej pozbawiono subiektywnego podejmowania decyzji inżynieria- projektanta, w postaci zmiany wartości

wytycznych różnych parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, sposobem losowym w danych równaniach modelu matematycznego,

- ◆ za pomocą kompozycji drzew rozgrywających parametrycznie umożliwiono inżynierowi-projektantowi podejmowanie decyzji strukturalnych w identycznych sekwencjach parametrów konstrukcyjno/eksploatacyjnych, ale występujących na różnych częściach drzewa, wynikających z odmiennych wcześniejszych decyzji strukturalnych projektowania,
- ◆ równania logiczne opisujące alternatywne zbiory wytycznych projektowania będą umożliwiły znalezienie najważniejszych wytycznych projektowania w dowolnych, ustalonych parametrach konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, z jednoczesnym zapewnieniem spełnienia ograniczeń i ekstremalizacji kryteriów.

Dalsze kierunki rozwoju prezentowanych zagadnień i opracowań należałoby prowadzić w zakresie komputerowej implementacji opracowanych algorytmów. Najważniejsze w tym zakresie będą mi. in.:

1. Wybór optymalnego środowiska programistycznego z możliwością zainstalowania programu w salach laboratoryjnych.
2. Implementacja danych algorytmów:
 - ◆ algorytmu Quine-a-McClusekya minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych z wielowartościowymi współczynnikami wagowymi,
 - ◆ minimalizacji równań logicznych układów wielowartościowych z uwzględnieniem różnej wielowartościowości zmiennych decyzyjnych i różnych wielowartościowych współczynników logicznych z iloczynami logicznymi,
 - ◆ algorytmów struktur grafowych umożliwiających zmiany wartości parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych w zagadnieniach optymalizacji układów maszynowych,
 - ◆ algorytmów wielowartościowych równań logicznych.

W dalszym etapie konieczne jest także uwzględnienie współczynników wagowych, w fazie testowania podczas indukcyjnego generowania reguł dla odpowiednich atrybutów. Tego typu aplikacją będzie przeprowadzana analiza bardziej skomplikowanych układów tj. z dużą liczbą parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych oraz pojedynczych parametrów-atrybutów (lepsze odzwierciedlenie modelu fizycznych analizowanych układów w ich modele matematyczne).

W drzewach rozgrywających parametrycznie należy opracować algorytmy upraszczania (redukcji) jako odcinania identycznych sekwencji parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, z jednoczesnym zapewnieniem ciągłości procesu decyzyjnego. Dodatkowo należy skonkretyzować możliwość uzyskiwania

optymalnych drzew logicznych bezpośrednio z grafów zależności danego układu maszynowego. Istotnym kierunkiem dalszych działań, jest również wprowadzenie w opisie grafów zależności rozgrywających parametrycznie podziału na warianty rzeczywiste - wynikające z procesu optymalizacyjnego możliwego do zastosowania oraz realne - odpowiadające procesowi optymalizacji, którego zastosowanie jest w pełni możliwe.

BIBLIOGRAFIA

1. ADAMOWICZ Z., ZBIERSKI P.: Logic of mathematics. A modern course of classical logic, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., Pure and Applied Mathematics, New York, 1997.
2. AHO A.V., HOPCROFT J.E., ULLMAN J.D. : Algorytmy i struktury danych, Helion/Addison, Wesley 2003.
3. ALEXANDROW A., EVSTIFEEV V.: Graph-Analytic Modification of the Method of Upper Estimation (Method of Energetic Geometry), Key Engineering Materials, Vol. 291-292, pp. 637-642, 2005.
4. ANTAL T., KRAPIVSKY P.L., REDNER S.: Social balance on networks: The dynamics of friendship and enmity, Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 224, No. 1-2. (December 2006), pp. 130-136.
5. AWREJCEWICZ J.: Drgania deterministyczne układów dyskretnych. WNT, Warszawa 1996.
6. BASCIFTCI F., KAHRAMANLI S.: Fast computation of the prime implicants by exact direct-cover algorithm based on the new partial ordering operation rule, Advances in Engineering Software, Vol. 42, Issue 6, 2011, pp. 316-321.
7. BERGE C.: Graphs and hypergraphs. American Elsevier Publishing Co., Inc., New York/North Holland Publishing Co., Amsterdam- London 1973.
8. BERGE C.: Perfect graphs. Six Papers on Graph Theory. Calcutta: Indian Statistical Institute. pp. 1–21, 1963.
9. BERTHOLD M., HAND D.: Intelligent data analysis. An introduction, Berlin, Springer-Verlag, 1999.
10. BESLER A.: Analiza rangi ważności parametrów eksploatacyjnych dla sprawności całkowitej pomp zębatych z wykorzystaniem minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych; XX Konf. Podst. Konst. Masz., Polanica-Zdrój 2001; Polit. Opol., Opole 2001.
11. BESLER A., KOZIARSKA A., PARTYKA M. A.: Wybrane zagadnienia minimalizacji funkcji boolowskich w strukturalizacji procesów decyzyjnych, Studia i Monografie Z.129, Politechnika Opolska - Oficyna Wydawnicza, Opole, 2001.
12. BIAŁAS K., BUCHACZ A., DZITKOWSKI T.: Synteza drgających aktywnych układów mechanicznych z tłumieniem w ujęciu grafów biegunowych i liczb strukturalnych, Monografia nr 230, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
13. BISHOP R. E. D., GLADWELL G. M. L., MICHAELSON.: Macierzowa analiza drgań. WNT Warszawa 1972.
14. BISWAS N. N.: Computer Aided Minimization Procedure for Boolean functions. IEEE Trans, Comp. Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. CAD-5, no. 2, pp.303 -304 1986.
15. BITTENCOURT G.: Combining syntax and semantics through prime form representation, Journal of Logic and Computation 18, 2008, pp. 13-33.

16. BOOLE G.: The Calculus of Logic, Cambridge and Dublin Mathematical Journal III: 183–98.
17. BOOLE G.: An Investigation of The Laws of Thought, Mathematical Theories of Logic and Probabilities, 1854, London 1854.
18. BOUTE R.: Binary algebra and functional predicate calculus: A practical approach, University of Ghent, Belgium, 1999.
19. BREEDVELD, P. C., DAUPHIN-TANGUY, G.: Bond Graphs for Engineers, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992.
20. BRYANT R.E.: Graph-based algorithms for Boolean function manipulation, IEEE Transactions on Computers, vol. C-35, no 8, pp. 677-691.
21. BUCHACZ A.: Charakterystyki dynamiczne belek wyznaczone metodami przybliżonymi jako warunek syntezy drgających giętnie układów mechatronicznych w ujęciu hipergrafów, Zeszyty Naukowe WSOWL, Nr 1(159) 2011.
22. BUCHACZ A.: Characteristics of discrete-continuous flexibly vibrating mechatronic system, [in:] "Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering", International OCOSCO World Press, vol. 28, Issue 1, May 2008, pp. 43-46.
23. BUCHACZ A.: Dynamical flexibility of discrete-continuous vibrating mechatronic system, [in:] "Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering", International OCOSCO World Press, Vol. 28, Issue 2, January 2008, pp. 159-166.
24. BUCHACZ A.: Computer Aided Synthesis of Bar Systems Characterized by a Cascade Structure Represented by Graphs; 1st Inter. Confer. on Graphs and Mechanics, Ustroń 1993 (vol.1), Polit. Śląs., Gliwice 1993.
25. BUCHACZ A.: Modelling, synthesis and analysis of bar systems characterized by a cascade structure represented by graphs. [in:] "Mech. Mach. Theory", 30, 7, Pergamon 1995, pp. 986- 969.
26. BUCHACZ A.: Modyfikacja strukturalna systemu suwnica-operator nmetodą grafów i liczb strukturalnych, Problemy Maszyn Roboczych, Z. 19, str. 53-59, ISSN 1232-9304, 2002.
27. BUCHACZ A.: Projektowanie układów prętowych ze względu na zadane widmo częstości, Transp. Przemysł. Nr 2(32)- supl./2008.
28. BUCHACZ A.: The expansion of the synthesized structures of mechanical discrete systems represented by polar graphs, [in:] "Journal of Materials Processing Technology", Vol. 164-165, Complete Elsevier, (2005), pp.1277-1280.
29. BUCHACZ A., DYMAREK A., DZITKOWSKI T.: Realizacja fizyczna syntezy charakterystryki w ujęciu grafów. Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska 2001.
30. BUCHACZ A., DYMAREK A., DZITKOWSKI T.: Projektowanie i badanie wrażliwości układów ciągłych i dyskretno-ciągłych układów mechanicznych o żądanym widmie częstości w ujęciu grafów i liczb strukturalnych, Monografia nr 88, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.

31. BUCHACZ A. , ŻUREK K.: Grafy biegunowe jako aparat matematyczny w modelowaniu układów aktywnych ich analizy liczbami strukturalnymi. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Oficyna Wydawnicza PWr, Vol. 85, nr 25, str. 99-104, ISSN 0324-9646, 2002.
32. BUCHACZ A., red., ŚWIDER J. red. i inni.: Szkielety hipergrafów w modelowaniu, badaniu i pozycjonowaniu manipulatorów robotów oraz podzespołów maszyn. Monografia z.20, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
33. BUKOWSKI J.: Mechanika płynów, PWN, Warszawa 1959.
34. CELLIER, F.E.: Object-oriented Modeling of Mechatronics Systems in Modelica Using Wrapped Bond Graphs. –Proc. IEEE Intl. Conference on Mechatronics, Malaga, Spain 2009.
35. CEMPEL C.: Drgania mechaniczne- wprowadzenie, Politechnika Poznańska, 1982.
36. CESTNIK B.: Estimating probabilities: a crucial task in machine learning, w: Proc. ECAO 90, Stockholm, August, 1990.
37. CENDROWSKA J.: PRISM, an algorithm for inducing modular rules, Int. J. Man-Machine Studies, 1987, 27, s. 349-370.
38. CHAN P.K., STOLFO S.J.: A comparative evaluation of voting and meta-learning on partitioned data, w: Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning, San Francisco, 1995, s. 90-98.
39. CHOLEWA W., KAŹMIERCZAK J.: Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów, Skrypt nr 1904, Politechnika Śląska, Gliwice, 1995.
40. CHUDNOVSKY M.: Recognizing Berge graphs. *Combinatorica* 25 (2): 143–186, 2005.
41. CIOS K. J., PEDRYCZ W., ŚWINARSKI R.W.: Data mining methods for knowledge discovery, Dordrecht, Kluwer, 1999.
42. CONER L., PARTYKA M. A.: Application of dendritic classifiers and dependence graphs in CAD of decision processes with use of the machine systems as an example, 4th Confer. Neural Netw. and Their Applic., Zakopane 1999, Depart. of Comput. Engin., Techn. Univ. of Częstochowa, 1999.
43. CONER L., KOZIARSKA A., PARTYKA M.A.: Zastosowanie klasyfikatorów drzewiastych i grafów zależności o różnym stopniu szczegółowości w CAD procesów decyzyjnych na przykładzie układów maszynowych, Badania, Konstrukcja, Wytwarzanie, Eksploatacja Układów Hydraulicznych, Centrum Mechanizacji Górnictwa, KOMAG- Gliwice, 1999.
44. COUDERT O.: Doing two-level logic minimization 100 times faster, SODA '95: Proceedings of the sixth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, PA, USA 1995.

45. COUDERT O., MADRE J.: Implicit and incremental computation of primes and essential implicant primes of Boolean functions, In: 29th ACM/IEEE Design Automation Conference, 1992, pp. 36-39.
46. COUDERT O., MADRE J. C., FRAISSE H.: A new viewpoint on two-level logic minimization, DAC '93: Proceedings of the 30th international Design Automation Conference, ACM New York, NY, USA 1993.
47. CHYBOWSKI L., GRZEBIENIAK R., MATUSZAK Z.: Zastosowanie metody grafów wiązań do modelowania pracy zespołu prądowłórczego w siłowni okrętowej, Baltiechmasz - 2008, materiały konferencyjne, KGTU, Kaliningrad, Czerwiec 2008, pp. 187-195. [ISBN 978-5-94826-226-0].
48. DAGENAIS M. R., AGARWAL V. K., RUMIN N. C.: The McBOOLE logic minimizer, DAC '85: Proceedings of the 22nd ACM/IEEE Design Automation Conference, ACM New York, NY, USA 1985.
49. DE KLEER J.: An improved incremental algorithm for computing prime implicants, In: Proc. AAAI-1992, San Jose, CA, 1992, pp. 780-785.
50. DEPTUŁA A.: Analiza decyzyjna wytycznych projektowania w warunkach niepewności i zmniejszonej wartościowości w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych, VI Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej, Pokrzywna 2012; Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012.
51. DEPTUŁA A.: Analiza porównawcza optymalnych logicznych drzew decyzyjnych i indukcyjnych drzew systemu DeTreeX w optymalizacji dyskretnej układów maszynowych, Polskie Stowarzyszenie Zarządzanie Wiedzą, Seria Studia i Materiały, 2011.
52. DEPTUŁA A.: Analiza porównawcza optymalnych zmodyfikowanych drzew logicznych w ocenie odporności parametrów układu na zmiany warunków pracy, XXXVIII Konf. Zast. Mat., Zakopane 2009, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2009.
53. DEPTUŁA A.: Analiza rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych zaworu przelewowego z uwzględnieniem zmodyfikowanych drzew logicznych, Wydz. Mech. Polit. Opol., Opole 2009.
54. DEPTUŁA A.: Analiza właściwości dynamicznych układu hydraulicznego za pomocą grafów rozgrywających parametrycznie, Konferencja: Badanie, Konstrukcja, Wytwarzanie i Eksploatacja Układów Hydraulicznych-Cylinder 2010; Instytut Techniki Górniczej KOMAG Gliwice 2010.
55. DEPTUŁA A.: Decision analysis of designing guidelines in conditions of uncertainty in the analysis of dynamic properties of machine systems, XV Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane 2012, Pol. Towarz. Zarz. Prod. PTZP.
56. DEPTUŁA A.: Determination of game-tree structures complexity level in discrete optimization of machine systems. International Masaryk Conference for Ph. D. students and young researches, December 12-16, 2011. Hradec Kralove, Czech Republic.

57. DEPTUŁA A.: Logiczna ocena zmian parametrów konstrukcyjnych dla modelowania własności dynamicznych, XXXIX Konf. Zast. Mat., Zakopane 2010, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2010.
58. DEPTUŁA A.: Kompleksowy współczynnik złożoności dla struktur rozgrywających parametrycznie z grafu zależności przepływu sygnałów, XLII Konf. Zast. Mat., Zakopane 2013, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2013.
59. DEPTUŁA A.: Numeryczne problemy wyznaczania rangi ważności zmiennych decyzyjnych za pomocą indukcyjnych drzew decyzyjnych, V Sympozjum Naukowo - Techniczne EKSPLOLOG 2012, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych, Wrocław 2012.
60. DEPTUŁA A., ŁUSZCZYNA R., PARTYKA M. A.: Zastosowanie graficznych struktur decyzyjnych w metodologii projektowania i zarządzania na przykładzie CAD układów maszynowych, Studia i Monografie, Zeszyt nr 315, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012, ISBN 978-83-62736-68-3.
61. DEPTUŁA A., PARTYKA M.A.: Analiza rozwoju regionalnego przedsiębiorstw w zakresie mechatroniki, Konf. pt.: Ewaluacja rozwoju regionalnego w wymiarze społecznym, gospodarczym i środowiskowym; Wydz. Zarz. i Inż. Prod. Polit. Opol., Otmuchów 2009.
62. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Application of dependence graphs and game trees for decision decomposition for machine systems, JAMRIS- Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems- 2011.
63. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Application of game graphs in optimization of dynamic system structures, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2010, vol.15, No.3, pp. 647-656.
64. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Badanie własności dynamicznych układów maszynowych z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej dla drzew rozgrywających parametrycznie; Napędy i Sterowanie 3/2010.
65. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Discrete optimization of a gear pump after tooth undercutting by means of complex multi-valued logic trees. XVI Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane 2013, ;Pol. Towarz. Zarz. Prod. PTZP 2013.
66. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Funkcjonalna analiza porównawcza przedsiębiorstw według Katalogu Branżowego 2007 oraz 2008 Napędy i Sterowanie; Napędy i Sterowanie 5/2009.
67. DEPTUŁA A., PARTYKA M.A., GRABOWSKI C.: Numeryczne problemy wyznaczania gałęzi prawdziwych na logicznych drzewach decyzyjnych; XXXVIII Konf. Zast. Mat., Zakopane 2009, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2009.
68. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Kompleksowe struktury rozgrywające parametrycznie w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych, IV Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie; Zakopane 2011, Pol. Towarz. Zarz. Prod. PTZP, 2011.

69. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Kompleksowy współczynnik złożoności dla struktur rozgrywających parametrycznie w optymalizacji dyskretnej pompy zębatej z podciętą stopą zęba, XLII Konf. Zast. Mat., Zakopane 2013, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2013.
70. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Podobieństwa i różnice kompleksowych struktur rozgrywających parametrycznie w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych, Zeszyty Naukowe WSOWL, Nr 3 (165) 2012, Wrocław 2012
71. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Rozłączna analiza logiczna wytycznych projektowania z uwzględnieniem niepewności w modelowaniu układów maszynowych, Journal of Transdisciplinary Systems Science, 2012, vol.16, No.1, pp. 161-173, ISSN 1427-275X.
72. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Rozwiązywanie wagowych wielowartościowych równań logicznych opisujących wytyczne projektowania w optymalizacji dyskretnej układów maszynowych XLI Konf. Zast. Mat., Zakopane 2010, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2012.
73. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Separate logical analysis of design guidelines in the machine systems modelling, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2012, vol.17, No.3, pp. 779-790, ISSN 1425-1655.
74. DEPTUŁA A., PARTYKA M.A, TISZBIEREK A.: Analiza porównawcza funkcjonalności przedsiębiorstw według Katalogu Branżowego Napędy i Sterowanie z zakresu lat 2007 2012, Napędy i Sterowanie 2/2013.
75. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Zastosowanie grafów zależności i drzew rozgrywających parametrycznie w procesie innowacji na przykładzie układów maszynowych, XIII Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Zakopane 2010, Pol.Towarz.Zarz.Prod.PTZP.
76. DEPTUŁA A., PARTYKA M.A.: Zastosowanie grafów rozgrywających parametrycznie i dekompozycji w procesie optymalizacji dynamicznych struktur systemowych, Górnictwo Odkrywkowe 3/2010.
77. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Zastosowanie układów wielowartościowych równań logicznych z wagowymi iloczynami do oceny rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych systemów technicznych, XXXIX Konf. Zast. Mat., Zakopane 2010, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2010.
78. DEPTUŁA A., PARTYKA M. A, Znaczenie wierzchołków początkowych w rozkładach struktur kompleksowych i grafów rozgrywających parametrycznie w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych, XL Konf. Zast. Mat., Zakopane 2011, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2011.
79. DEPTUŁA A.: Równania logiczne z wagowymi współczynnikami i kompleksowe struktury rozgrywające parametrycznie w optymalizacji układów maszynowych; V Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej, Pokrzywna 2011; Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika z. 98 Nr kol. 341/2011, Opole 2011.

80. DEPTUŁA A.: Struktury rozgrywające parametrycznie jako narzędzie wspomaganie decyzji w procesie innowacji , Konferencja Zarządzanie operacyjne: teoria, praktyka i zastosowania, 14-15.03.2013, Wydział Zarządzania i Ekonomi-Politechnika Gdańska, Gdańsk 2013.
81. DEPTUŁA A.: Struktury rozgrywające parametrycznie w ujęciu semantycznym, XLII Konf. Zast. Mat., Zakopane 2013, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2013.
82. DEPTUŁA A., Wagowe równania logiczne wytycznych projektowania w optymalizacji dyskretnej układów maszynowych, XL Konf. Zast. Mat., Zakopane 2011, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2011.
83. DEPTUŁA A.: Współczynnik złożoności struktury dla minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych; XLI Konf. Zast. Mat., Zakopane 2012, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2012.
84. DEPTUŁA A.: Współczynnik złożoności struktury dla wielowartościowych logicznych drzew decyzyjnych XLI Konf. Zast. Mat., Zakopane 2012, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2012.
85. DEPTUŁA A.: Zastosowanie grafów zależności i łańcuchów Markowa w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych; IV Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej, Pokrzywna 2010; Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika z. 96 Nr kol. 334/2010, Opole 2010.
86. DHARWADKER A.: The Clique Algorithm,
<http://www.dharwadker.org/clique>, 2006.
87. DHARWADKER A.: The Independent Set Algorithm,
http://www.dharwadker.org/independent_set, 2006.
88. DHARWADKER A.: The Vertex Cover Algorithm,
http://www.dharwadker.org/independent_set, 2006.
89. DIETRYCH M. i in: Podstawy konstrukcji maszyn, WNT, Warszawa, 1995, tom 1.
90. DINDORF R.: Modelowanie i symulacja nieliniowych elementów i układów regulacji napędów płynowych, Monogr.-St.- Rozp. Nr 44, Wydaw. Polit. Świętok. z.44, Kielce 2004.
91. DWINGER P.: Introduction to Boolean algebras, Würzburg: Physica Verlag.
92. DREWNIAK J., ZAWIŚLAK S.: Graph methods in kinematical analysis of multi-speed epicyclic gears, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2012, vol. 17 (3), p. 791-798.
93. DREWNIAK J., ZAWIŚLAK S.: Kinematical and dynamical analysis of closed kinematical chains using graphs and profile equations, PAMM-Proceedings on: Anwendung Mechanik und Mathematik, Vol. 9, No. 1, 2009, 547-548.
94. DREWNIAK J., ZAWIŚLAK S.: Linear- graph and contour-graph- based models of planetary gears, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 48, 2, pp. 415-433, Warsaw 2010.
95. DREWNIAK J., ZAWIŚLAK S.: Metody teorii grafów do modelowania przekładni planetarnych. Czasopismo Techniczne. Mechanika, Politechnika Krakowska, 2010 z. 1-M, p. 13-21.
96. FLUENT 6.012. User's Guide, 2002.

97. FREUND Y.: Boosting a weak learning algorithms by majority, *Information and Computation*, 1995, 121 (2), s. 256-285.
98. FRIEDEL M., NIKOLAJEWA S., WILHELM T.: The decomposition tree for analyses of Boolean functions, *Mathematical Structures in Computer Science*, Vol. 18, Iss. 2, Cambridge: Apr 2008, p. 411.
99. GASPARSKI W.: *Projektowanie. Elementy wiedzy o projektowaniu*, WNT, Warszawa 1988.
100. GIERGIEL J.: *Identyfikacja układów mechanicznych*, PWN, Warszawa, 1990.
101. GIZA M., PARTYKA M.A.: Zastosowanie algorytmu Quine'a- Mc Cluskeya minimalizacji układu wielowartościowych funkcji logicznych dla procesów decyzyjnych zarządzania, IV Konfer. Komput. Zinteg. Zarz., Zakopane 2001, WNT, Warszawa, 2001.
102. GIZA M.: Rozwiązywanie złożonego problemu decyzyjnego- rozłączna minimalizacja układu, XXIX Konf. Zast. Matem. PAN, Zakopane 2000, Inst. Matem. PAN, Warszawa, 2000.
103. GOODRICH M. T: *Algorithm Design: Foundations, Analysis, and Internet Examples*, Wiley, ISBN 0-471-38365-1.
104. GRIES D., SCHNEIDER F. B.: *A logical approach to discrete math*, Springer-Verlag, 1993.
105. GUILLION M.: *Teoria i obliczanie układów hydraulicznych*, WNT Warszawa 1961.
106. GUPTA S. C.: A fast paced procedure for finding prime implicants of a Boolean function, *International Journal of Electronics*, No. 81, Vol. 51 Issue 5, p701, 1981, 9p.
107. GUETOVA M., HÖLLDOBLER S., STÖRR H. P.: Incremental fuzzy decision trees, *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 2479, KI 2002: *Advances in Artificial Intelligence*, 2002, pp. 149-180.
108. HAYES J.P. , *Digital Logic Design*, Addison Wesley, ISBN 0-201-15461-7.
109. HALMOS P., GIVANT S.: *Logic as algebra*, Mathematical Association of America, 1998.
110. HAN J., KAMBER M.: *Data mining: Concepts and techniques*, San Francisco, Morgan Kaufmann, 2000.
111. HEHNER E. C. R.: From Boolean algebra to unified algebra, *The Mathematical Intelligencer*, Volume 26, Number 2, 2004, pp. 3-19.
112. HONG P., XIAO J.: The Structural Dynamical Buckling Analysis for a Novel Vacuum Autoclave under the Extreme Operating Conditions, *Smart Materials and Intelligent Systems*, Vol. 143-144, 2010.
113. HONG S. J. , CAIN R. G., OSTAPKO D. L.: MINI: A Hueristic approach for Logic Minimization, *IBM J. Res. Dev.*, vol. 18, pp.443 -458 1974.
114. HONG S. J., MUROGA S.: Absolute Minimization of Completely Specified Switching Functions, *IEEE Trans. on Computers*, pp. 53-65, Vol. 40, 1991.
115. ITO T., CHIBA T., OZAWA R., YOSHIDA M., HATTORI M., SAKAKI Y. A.: Comprehensive two-hybrid analysis to explore the yeast protein interactome., *Proc Natl Acad Sci USA*. 2001;98(8):4569–4574.

116. JAKUBOWSKI J., SZTENCEL R.: Wstęp do teorii prawdopodobieństwa, SCRIPT, Warszawa 2001.
117. JAIN T.K, KUSHWAHA D. S., MISRA A. K.: Optimization of the Quine-McCluskey Method for the Minimization of the Boolean Expressions, International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, ICAS, 2008.
118. JELONEK J.: Generalization capability of homogeneous voting classifier based on partially replicated data, w: Proc. of the AAAI-96 Workshop on Integrating Multiple Learned Models for Improving and Scaling Machine Learning Algorithms, 1996, Portland, s. 47-52.
119. KARNOPP D. C., MARGOLIS D. L., ROSENBERG R. C.: System dynamics - Modeling and simulation of mechatronic systems, John Willey & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005, ISBN-13-978-0-471-70965-7.
120. KARP R.M.: Reducibility among combinatorial problems, Complexity of Computer Computations, Plenum Press, 1972.
121. KAZIMIERCZAK J.: System cybernetyczny, Wiedza Powszechna, Omega, Warszawa 1978.
122. KAZIMIERCZAK J.: Teoria gier w cybernetyce, Wiedza Powszechna, Omega, Warszawa 1973.
123. KEAN A., TSIKNIS G.: An incremental method for generating prime implicants/implicates, Journal of Symbolic Computation 9, 1990, pp. 185-206.
124. KESSLER J. H., McGUIRE R. K.: Total system performance assessment for waste disposal using a logic tree approach, Risk Analysis, Volume 19, Number 5, 1999, pp. 915-931.
125. KNISLEY D., HAYNES T.: Using a Neural Network to Identify Secondary RNA Structures Quantified by Graphical Invariants, Communications in Mathematical and in Computer Chemistry / MATCH, 60, pp. 277-290, 2008.
126. KOLLEK W., MAĆKIEWICZ J.: Teoria i obliczenia pomp zębatych. Kadłuby i układy napięte wstępnie. Wyd. Ossolineum, Wrocław 1999
127. KOLLEK W., OSIŃSKI P.: Modelling and design of gear pumps. Wydawnictwo PWR, Wrocław 2009.
128. KOLLEK W.: Gear pumps, their construction and exploitation. Wyd. Ossolineum, Wrocław 1996.
129. KOTNIS G.: Budowa i eksploatacja układów hydraulicznych w maszynach, W i HK „KaBe”, Krosno 2008.
130. KOZIARSKA A.: Optymalizacja strukturalna układów maszynowych z wykorzystaniem logicznych struktur drzewiastych i klasyfikatorowych; Rozprawa dokt., Wydz. Mech. Polit. Opol., Opole 2002.
131. KOZIARSKA A., PARTYKA M. A., STANIK-BESLER A.: Wybrane zagadnienia minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych w strukturalizacji procesów decyzyjnych, Politechnika Opolska - Oficyna Wydawnicza, Opole, 2005.
132. KUROWSKI W.: Modelowanie obiektów technicznych, Rękopis opracowania, Płock 2001.

133. LIPSKI J.: Napędy i sterowania hydrauliczne, WK i Ł, Warszawa 1981.
134. ŁUSZCZYNA R., PARTYKA M. A.: Standaryzacja danych pomiarowych w badaniach rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych układów maszynowych z wykorzystaniem logicznych drzew decyzyjnych, *Górnictwo Odkrywkowe* 4-5/2008.
135. MACFARLANE A.: Adaptation of the method of the logical spectrum to Boole'a problem. *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*, 39, 1890, p.27.
136. MACFARLANE A.: The logical spectrum, *Philosophical Magazine*, 19, 1885, p. 286.
137. MANQUINHO V. M., FLORES P. F., SILVA J. P. M., OLIVEIRA A. L.: Prime implicant computation using satisfiability algorithms, In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Newport Beach, USA, November 1997, pp. 232-239.
138. MARQUAND A.: On logical diagrams for n terms, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 12(75), 1881, pp. 266-270.
139. MATUSIEWICZ A., MURRAY N. V., ROSENTHAL E.: Prime implicate tries, *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 5607, *Automated Reasoning with Analytic Tableaux and Related Methods*, 2009, pp. 250-264.
140. McCLUSKEY E. J.: Minimization of Boolean functions, *Bell System Technical Journal* 35, 1956, pp. 1417-1444.
141. McGEER P. C., SANGHAVI J. V., BRAYTON R. K., SANGIOVANNI-VINCENTELLI A. L.: ESPRESSO-SIGNATURE: A new exact minimizer for logic functions, *DAC '93: Proceedings of the 30th international Design Automation Conference*, ACM, New York, NY, USA 1993.
142. MITCHELL T.: *Machine Learning*, Boston, Mac-Graw Hill, 1997.
143. MOLLER D, MOHNKE, WEBER M.: Detection of symmetry of Boolean functions represented by ROBDDs. In *Proc. International Conference on Computer-Aided Design* pages 680–684, October 1993.
144. MONK J. D.: *Cardinal invariants on Boolean algebras*, Basel: Birkhäuser Verlag, 1996.
145. MORRISON F.: *Sztuka modelowania układów dynamicznych*, WNT, Warszawa, 1996.
146. MURASUGI K.: *Graph Theory Applied to Chemistry, Knot Theory & Its Applications*, pp 284-299, Springer 2008.
147. NOWICKI R., SŁOWIŃSKI R., STEFANOWSKI J.: Rough sets analysis of diagnostic capacity of vibroacoustic symptoms, *Computers and Mathematics with Applications*, 1992, 24 (7), s. 109-123.
148. NOWICKI R., SŁOWIŃSKI R., STEFANOWSKI J.: Evaluation of vibroacoustic symptoms by 145 means of the rough sets theory, *Computers in Industry*, 1992, 20, s. 141-152.

149. KARNAUGH M.: The Map Method for Synthesis of Combinational Logic Circuits, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers part I 72 (9): 593–599.
150. OLFATI-SABER R., FAX A. J., MURRAY R. M.: Consensus and cooperation in networked multi-agent systems, Proc. IEEE, Vol. 95, no. 1, pp. 215-233, 2007.
151. ORLIKOWSKI C.: Symbolic Analysis of Bond Graphs by Application of Coate's Rule, 1st Inter. Confer. on Graphs and Mechanics, Ustroń 1993 (vol. 1), Polit. Śląs., Gliwice 1993.
152. OSIŃSKI P.: Wpływ podcięcia stopy zęba na właściwości hydrauliczne i akustyczne pomp zębatych. Raport PRE nr 14/2005, Politechnika Wroclawska. Wrocław 2005.
153. OSIŃSKI P., DEPTUŁA A., PARTYKA M. A.: Discrete optimization of a gear pump after tooth root undercutting by means of multi-valued logic trees, Archives of Civil and Mechanical Engineering. In Press, Corrected Proof, Available online 1 June 2013.
154. OVIDIU I., Graph Theory in Chemistry and Drug Design, Taylor & Francis Ltd United States, 2008.
155. PALCZAK E.: Modelowanie układów hydraulicznych za pomocą grafów Coatesa, Sterowanie i Napęd Hydrauliczny, Nr 3/93.
156. PARTYKA M. A.: Algorytm Quine'a-Mc Cluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych, Studia i Monografie Nr 109, Politechnika Opolska – Oficyna Wydawnicza, Opole, 1999.
157. PARTYKA M. A.: An application of structural Boolean decisions to the CAD of mechanical systems, AMSE Model. Simul. Contr., vol.17, No 4, 1988.
158. PARTYKA M. A.: Decision tables in composition and decomposition of fundamental operations in the innovation process, AMSE Rev., vol. 5, No 4, 1987.
159. PARTYKA M. A.: Formalizacja zależności między wielowartościowymi wyrażeniami i funkcjami logicznymi, Mater. XXIV Konfer. Hist. Logiki PAN, Uniw. Jagiell., Kraków 1978.
160. PARTYKA M. A.; Logika wielowartościowych procesów decyzyjnych; Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
161. PARTYKA M. A.: Logika systemów projektowania na przykładzie CAD układów maszynowych, St. i Monogr. Nr. 105, Ofic. Wydaw. Polit. Opol., Opole, 1999.
162. PARTYKA M. A.: Optymalizacja dyskretna pompy wirowej śmigłowej w ruchu turbinowym – zastosowanie wielowartościowych drzew logicznych, Nap. i Sterow., Nr 1/2004.
163. PARTYKA M. A.: The Quine-Mc Cluskey minimization algorithm of individual multiple – valued logical functions for structural classification of informations and its applications for fifth generation computer systems and artificial intelligence, Inter. Congr. Log. Collog., Paris, 1985, France, Jour. Symb. Logic, vol. 52, No. 1, 1987.

164. PARTYKA M. A.: The Quine-Mc Cluskey minimization algorithm of multiple – valued partial functions for systems engineering, Inter. Confer. Syst. Engin. 1984, University of Dayton, USA.
165. PAWŁOWSKI A.: Inicjacje – o sztuce, projektowaniu i kształceniu projektantów”, Wydział Form Przemysłowych, Akademia Sztuk Pięknych w Krakowie, Kraków 2001.
166. PERKOWSKI M., CHRZANOWSKA-JESKE M., YANG XU.: Lattice diagrams using Reed-Muller Logic, In: Proc. WG 10.5 Workshop on Applications of the. Reed- Muller Expansion in Circuit Design, Oxford, UK, 1997, pp. 85-102.
167. PETRÍK M.: Quine-McCluskey method for many-valued logical functions, Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, Volume 12, Number 4, 2008, pp. 393-402.
168. PIECZYŃSKI A.: Reprezentacja wiedzy w diagnostycznym systemie ekspertowym, Lu- buskie Towarzystwo Naukowe w Zielonej Górze, 2003.
169. PIJLS W., de BRUIN A.: Game tree algorithms and solution trees, Theoretical Computer Science Volume: 252, Issue: 1-2, February 6, 2001, pp. 197-215.
170. PIRRI F., PIZZUTI C.: Characterizing prime implicants as projective spaces, Lecture Notes in Computer Science, Volume 728, Advances in Artificial Intelligence, 1993, pp. 41-46.
171. RABINOWICZ A.N., Sistiemy upraw, awtom. masz., Izdat. Technika; Kijów 1973.
172. RADOMIR S.: From Boolean Logic to Switching Circuits and Automata: Towards Modern Information Technology. Springer. ISBN 978-3-642-11681-0.
173. RANDAL E., BRYANT.: Graph-based algorithms for Boolean function manipulation, IEEE Transactions on Computres, Vol. 8, 1986, pp. 677-691.
174. RAMESH A., BECKER G., MURRAY N. V.: Cnf and dnf considered harmful for computing prime implicants/implicates, Journal of Automated Reasoning 18(3), 1997, pp. 337-356.
175. RAMESH A., MURRAY N. V.: Non-clausal deductive techniques for computing prime implicants and prime implicates, Lecture Notes in Computer Science, Volume 698, Logic Programming and Automated Reasoning, 1993, pp. 277-288.
176. RASIOWA H.: Wstęp do matematyki współczesnej, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1973, seria: Biblioteka Matematyczna t. 30.
177. REGNIER A.: Les infortunes de la raison, Seuil, 1966.
178. ROY B.: Multicriteria Methodology for Decision Analysis, Kluwer Academic Publishers, 1996.
179. ROY B.: Robustness in Multi-criteria Decision Aiding, in Trends in Multiple Criteria Decision Analysis, (Matthias Ehrgott, José Rui Figueira, Salvatore Greco), Springer Science, Business Media, pages 87-121, 2010.

180. ROY B.: To better respond to the robustness concern in decision aiding: Four proposals based on a twofold observation, in *Handbook of Multicriteria Analysis*, (Constantin Zopounidis, Panos M. Pardalos), Springer, pages 3-24, 2010.
181. ROY B.: *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
182. RUBIN S., MICHAŁOWSKI W., SŁOWIŃSKI R.: Developing an emergency room diagnostic check list using rough sets – a case study of appendicitis, w: Anderson J., Katzper M.(red.), *Simulation in the Medical Sciences, Proc. of the 1996 Western Conference of the Society for Computer Simulation*, 1996, s. 19-24.
183. RYMON R.: An SE-tree-based prime implicant generation algorithm, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, Volume 11, Numbers 1-4, 1994, pp. 351-365.
184. RYŚ J., SKRZYSZOWSKI Z.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, Zbiór zadań cz.1-wydanie czwarte poprawione, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 1999.
185. SEDGEWICK R. : *Algorithms in C*, Addison Wesley 1990.
186. SĘKALA A., ŚWIDER J.: *Flow Graphs in Modeling and Analysis of Continuous Mechanical Systems*. Donetsk 2004.
187. SHENOY P. P.: *Game Trees For Decision Analysis, Theory and Decision* Volume: 44, Issue: 2, April 1998, pp. 149-171.
188. SHINY A. K., PUJARI A. K.: An efficient algorithm to generate prime implicants, *Journal of Automated Reasoning*, Volume 22, Number 2, 1999, pp. 149-170.
189. SIKORSKI R.: *Boolean Algebras*, Springer Verlag; *Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete*ok. Neue Folge. Band 25, 1969.
190. SIMPSON R. E.: *Introductory Electronics for Scientists and Engineers*, 2nd ed. Boston, MA: Allyn and Bacon, 1987.
191. STEFANOWSKI J.: *Algorytmy indukcji reguł decyzyjnych w odkrywaniu wiedzy*. Rozprawa habilitacyjna nr 361. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
192. STEFANOWSKI J., WILK S.: Minimizing business credit risk by means of approach integrating decision rules and case based learning, *Research Report*, Instytut Informatyki PP, RA-001/99, luty 1999; przyjęte do druku w *Journal of Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management* 2001.
193. STĘPNIEWSKI M.: *Pompy*. WNT Warszawa, 1984.
194. STRZEMECKI T.: Polynomial-time algorithm for generation of prime implicants, *Journal of Complexity* 8, 1992, pp. 37-63.
195. SUZUKI K, URATA E.: Improvement of Cavitation Resitive Property of a Water Hydraulic Relief Valve. *Proc. The Eighth SICFP*, 1, 2003, pp. 265-276
196. ŚWIDER J.: *Macierzowe grafy hybrydowe w opisie drgających, złożonych układów mechanicznych*. Zeszyty Naukowe Politechnik Śląskiej, *Mechanika* z.106/1991.

197. ŚWIDER J., SEKALA A.: Grafy hybrydowe w modelowaniu i analizie drgających układów mechanicznych o dyskretno-ciągłym rozkładzie parametrów ze sprzężeniami, *Przegląd Mechaniczny* 64 nr 5, s. 14-20, 2005.
198. TISON P.: Generalization of consensus theory and application to the minimization of Boolean functions, *IEEE Trans. Electron. Comput.*, Vol. EC- 16, pp. 446-456, 1967.
199. TOMASIAK E.: Analiza dynamiki układu z proporcjonalnym zaworem przelewowym, *Zeszyty Naukowe Politechnik Śląskiej*, z. 94, Gliwice 1989.
200. TOMASIAK E.: Optymalizacja pary sterującej zaworu proporcjonalnego przepływu, P-248346, 1984.
201. TOMASIAK E.: Sterowanie proporcjonalne przepływu z adaptacją ciśnienia. *SiNH*, nr 4, 1986.
202. QUINE W. V. O.: The problem of simplifying truth functions, *American Mathematical Monthly* 59, 1952, pp. 521-531.
203. Quinlan J.R.: Bagging, boosting and C4.5, w: *Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence*, 1996, s. 725-730.
204. QUINLAN J. R.: Induction of Decision Trees, *Machine learning* 1.
205. QUINLAN J.R., RIVEST R.L.: Inferring decision trees using the minimum description length principle, *Information and Computation*, 1989, 80, s. 227-248.
206. WEISS S.M., INUDRKYA N.: *Predictive Data Mining*, San Francisco, Morgan Kaufmann, 1999.
207. WEISS S.M., KULIKOWSKI C.A.: *Computer Systems That Learn: Classification and Prediction Methods from Statistics, Neural Nets, Machine Learning and Expert Systems*, Morgan Kaufmann, 1991.
208. WHITESITT E.: *Boolean algebra and its applications*. Courier Dover Publications. ISBN 978-0-486-68483-3. Suitable introduction for students in applied fields.
209. WIECZOREK P.: Wybrane zagadnienia optymalizacji konstrukcyjnej zaworów przelewowych z wykorzystaniem logicznych drzew decyzyjnych, *Wydz. Mech. Polit. Opol.*, Opole 2006.
210. WOJNAROWSKI J., BUCHACZ A., NOWAK A., ŚWIDER J.: Modelowanie drgań układów mechanicznych metodami grafów i liczb strukturalnych, *Skr. Nr 1266, Polit. Śląs.*, Gliwice 1986.
211. WOJNAROWSKI J.: Grafy i liczby strukturalne jako modele układów mechanicznych, *Inst. Podst. Konst. Masz. Polit. Śląs.*, Gliwice 1986.
212. VAUGHAN N. D., JOHNSTON D. N.: Numerical simulation of fluid flow in poppet valves, *Proc. Instn. Mech.Engrs.*, C413/0779 IMechE 1991, 119.
213. VEITCH W. E.: A Chart Method for Simplifying Truth Functions, *ACM Annual Conference/Annual Meeting: Proceedings of the 1952 ACM Annual Meeting (Pittsburg) (ACM, NY): pp. 127-133. doi:10.1145/609784.609801.*

214. YEOU-REN S., RUEY-SHIANG G.: The optimization of attribute selection in decision tree-based production control systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 28, Numbers 7-8, 2006, pp. 737-746.
215. YUAN Q. H., LI P. Y.: Using steady flow force for unstable valve design: modelling and experiments, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 127, No. 3, pp. 451-462, 2005.
216. ZARZYCKI M., RDUCH J.: Wyniki badań pompy wirowej śmigłowej w ruchu turbinowym, *Konfer. Nauk.-Techn. TRANSHYDRO 2001, Szklarska Poręba 2001*, Wydż. Mech., Wydż. Mech.-Energ. Polit. Wrocł., Wrocław, 2001.
217. ZAWIŚLAK S.: *The Graph-based Methodology as an Artificial Intelligence Aid for Mechanical Engineering Design*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, 2010, ISBN 8362292962.
218. ŻAK J., STEFANOWSKI J.: Determining maintenance activities of motor vehicles using rough sets approach, w: *Proc. of Euromaintenance'94 Conference, Amsterdam 1994*, s. 39-42.
219. ŻÓŁTOWSKI B.: *Badania dynamiki maszyn*, ATR, Bydgoszcz 2002.
220. <http://www.sciencehq.com/mathematics/boolean-algebra-2.html>.
221. <http://mathworld.wolfram.com/BooleanFunction.html>.
222. <http://www.mathworks.com/products/simhydraulics.html>.
223. <http://www.ponar-silesia.pl>.
224. http://www.kirupa.com/developer/actionsript/depth_breadth_search.html.
225. <http://www.aitech.com.pl>.
226. <http://www.dharwadker.org>.

