

# ELEKTRYKA z. 41

JÓZEF OBER

P. 3347 / 73

## NUMERYCZNA METODYKA OPISU DYNAMICZNYCH WŁASNOŚCI UKŁADÓW CIEPLNYCH BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

P O L I T E C H N I K A Ś L A Ś K A  
ZESZYT NAUKOWY Nr 391 – GLIWICE 1973

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**ZESZYTY NAUKOWE**

**Nr 391**

**JÓZEF OBER**



P.3347 / 173

**NUMERYCZNA METODYKA OPISU DYNAMICZNYCH WŁASNOŚCI  
UKŁADÓW CIEPLNYCH BŁOKÓW ENERGETYCZNYCH**

**PRACA HABILITACYJNA Nr 131**

---

**GLIWICE 1973**

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH  
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

*Iwo Pollo*

REDAKTOR DZIAŁU

*Zofia Cichowska*

SEKRETARZ REDAKCJI

*Helena Ogrodnik*

**Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej**  
Gliwice, ul. Kujawska 2

---

Nakł. 50+175 Ark. wyd. 3 Ark. druk. 3,94 Papier offsetowy kl. III, 70x1<sup>o</sup>. 80 g  
Oddano do druku 26. 7. 1973 Podpis. do druku 19. 9. 1973 Druk ukończ. we wrześniu 1973  
Zamówienie 1038 21. 2. 1973 M-23 Cena zł 5,-

---

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

PJ - 219 / 73

## SPIS TREŚCI

	Str.
1. WSTĘP .....	5
2. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH PRAC I KIERUNKI ROZWOJU MODELWANIA UKŁADÓW CIEPLNYCH .....	7
2.1. Rodzaje zmiennych stosowanych w modelowaniu układów cieplnych	8
2.2. Rodzaje stosowanych równań i modeli .....	8
2.2.1. Elementy o charakterze przepływowym .....	9
2.2.2. Elementy o charakterze pojemnościowym .....	12
2.2.3. Zagadnienie wymiany ciepła .....	13
2.4. Elementy opisywane statycznie .....	14
2.3. Modelowanie złożonych układów technologicznych .....	14
2.4. Metody obliczeniowe .....	16
2.4.1. Metody obliczeniowe charakterystyk czasowych na maszynach analogowych .....	16
2.4.2. Metody obliczeniowe charakterystyk czasowych na maszynach cyfrowych .....	17
2.4.3. Obliczanie charakterystyk częstotliwościowych .....	18
2.5. Wnioski i wymagania stawiane metodzie modelowania układów cieplnych .....	18
3. PRZEDSTAWIENIE NUMERYCZNEJ METODY MATEMATYCZNEGO MODELWANIA DYNAMIKI UKŁADÓW CIEPLNYCH .....	21
3.1. Założenia wstępne .....	21
3.2. Wybór zmiennych .....	22
3.3. Struktura podstawowa .....	23
3.3.1. Element podstawowy .....	24
3.3.2. Element pomocniczy .....	24
3.4. Wybór i realizacja metody obliczeniowej .....	25
4. REALIZACJA OPISU PRZY POMOCY STRUKTURY ELEMENTARNEJ .....	27
4.1. Urządzenia o charakterze przepływowym .....	27
4.1.1. Czynniki robocze jednofazowe .....	27
4.1.1.1. Element podstawowy .....	27
4.1.1.2. Element pomocniczy .....	32
4.1.1.3. Przykład liczbowy .....	36
4.1.2. Czynniki dwufazowe .....	37

	Str.
4.2. Urządzenia o charakterze pojemnościowym .....	40
4.2.1. Czynniki robocze jednofazowy .....	41
4.2.2. Czynniki robocze dwufazowy .....	42
4.3. Pozostałe urządzenia .....	44
4.3.1. Urządzenia opisane statycznie .....	44
4.3.2. Węzły strumienia roboczego .....	45
4.3.3. Funkcje specjalne .....	46
5. NUMERYCZNA METODA OBLICZENIOWA CHARAKTERYSTYK CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH. ....	48
5.1. Założenia metody .....	49
5.2. Schemat blokowy obliczeń .....	49
5.3. Program .....	53
5.4. Przykład zastosowania programu .....	56
6. WNIOSKI KOŃCOWE .....	58
7. SPIS LITERATURY .....	60

## 1. WSTĘP

Dynamiczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, rozwój myśli technicznej w zakresie budowy jednostek energetycznych oraz względy ekonomiczne prowadzą do budowy coraz większych i bardziej złożonych bloków energetycznych. Projektowane i budowane moce tych zespołów zmuszają do głębszego wnikania w dynamikę projektowanych układów. Statyczne metody obliczeń nie pozwalają utrzymać parametrów bloku w odpowiednich granicach a także nie analizują coraz szybciej i w większej liczbie zachodzących stanów nieustalonych.

Pierwszy okres badań nad dynamiką układów elektrowni przypada na koniec lat pięćdziesiątych i początek sześćdziesiątych. Stworzone zostały podstawy teoretyczne i wprowadzono maszyny analogowe do obliczeń. Dalszy rozwój tych badań został ograniczony brakiem zainteresowania ze strony praktyków i małą pojemnością maszyn analogowych.

Ostatnie lata przywróciły im należną rangę, o czym świadczy liczba wydawanych publikacji. Szczególnie intensywnie badania są prowadzone w dziedzinie matematycznego modelowania dynamiki układów elektrowni atomowych. Jest to uzasadnione potrzebami nowoczesności i złożonością problemów, jak również z ostrymi wymaganiami stawianymi przez przepisy odnośnie dokładności, niezawodności i bezpieczeństwa pracy. Zaobodziła potrzeba zajęcia się samym urządzeniem bez układów regulacji celem zapewnienia obiektowi najbardziej korzystnych własności dynamicznych łącznie z samoregulacją. Nowo budowane elektrownie konwencjonalne i atomowe dużych mocy wyposaża się w maszyny cyfrowe do sterowania procesem, opracowanie dla nich programu wymaga pełnej informacji o dynamice tych obiektów. Włączenie tych zagadnień do klasycznego problemu doboru struktury układów regulacji i ich optymalizacji ujawnia szeroki zakres oraz znaczenie dynamicznego modelowania układów.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie uniwersalnych metod modelowania dynamiki cieplnych układów bloków energetycznych. W punkcie 2 dokonano analizy istniejących prac, stosowanych metod modelowania i przeprowadzenia obliczeń. Dotychczasowe dostępne opracowania charakteryzowały się fragmentarycznością opisów, wyprowadzaniem zależności nie dających pełnego obrazu dynamiki układów. Łączyła się z tym różnorodność opisów, stosowanych zmiennych i różnorodność założeń. Hamowało to intensyfikację prowadzenia prac, zwiększało niepomiernie nakłady finansowe i wydłużało czas opracowania modeli.

Przedstawiona w niniejszym opracowaniu metodyka matematycznego modelowania dynamiki układów cieplnych zapewnia dzięki swej uniwersalności dużą efektywność prowadzenia prac, możliwość zatrudnienia średniego personelu technicznego, kompleksowe i wygodne wykorzystanie maszyny cyfrowej. Łatwość dopasowania modelu do rozwiązywanego problemu i dużą przejrzystość opisu.

Zestawienie wymagań odnośnie opisywanej metodyki jest podane w zakończeniu 2 rozdziału.

W pracy został ustalony optymalny wektor stanu, sformułowana jednolita struktura podstawowa opisu, sposób jego realizacji, opracowano numeryczną metodę obliczeń. Podano także przykłady zastosowań proponowanej metodyki. Zamieszczony w zakończeniu pracy program w ALGOLU 60 można łatwo przystosować do różnych modelowanych układów.

## 2. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH PRAC I KIERUNKI ROZWOJU MODELOWANIA UKŁADÓW CIEPLNYCH

W zakresie modelowania układów termodynamicznych istnieje bardzo duża różnorodność prac. Niniejsza analiza oparta jest na szczególnie oryginalnych pracach z dziedziny modelowania układów cieplnych elektrowni konwencjonalnych oraz elektrowni atomowych.

Istniejące prace w zakresie modelowania matematycznego prowadzone są w dwóch kierunkach. Część prac dotyczy modelowania matematycznego poszczególnych agregatów względnie pojedynczych obwodów regulacji (wytwornica pary, przegrzewacz itp.). W pracach tych autorzy dążą najczęściej do osiągnięcia jak największej dokładności modelu.

W celu zwiększenia dokładności modelu, oprócz ogólnie stosowanych równań bilansu masowego i energetycznego, korzysta się z równań empirycznych (np. wzorów dotyczących wymiany ciepła) oraz pewnych empirycznych współczynników. Do charakterystycznych prac z tego zakresu należą [4], [9], [11], [16], [20], [32].

Wprowadzanie coraz bardziej złożonych układów regulacji (np. dla bloku konwencjonalnego) stworzyło potrzebę kompleksowego badania tych układów i przyczyniło się do powstania drugiego kierunku prac dotyczącego modelowania całości układów. Pierwsza znana ogólnie praca Chiens [5] dotycząca kotła obejmowała: wytwornicę pary, podgrzewacz wody i przegrzewacz pary. Praca Daniela, Ennsa i Hottenstine'a [7] uwzględniła już kocioł, turbinę i urządzenia regeneracyjne wody obiegowej.

Współcześnie opublikowano szereg prac z tej dziedziny [6], [17], [19], [28], [34]. Różnią się one zakresem uwzględnianych urządzeń oraz przyjętymi założeniami upraszczającymi.

Do najbardziej interesujących prac z modelowania złożonych układów cieplnych należą prace dotyczące modelowania układów cieplnych elektrowni atomowych [8], [14], [18], [30].

Z uwagi na tak dużą ilość i różnorodność pozycji literaturowych niniejsza analiza nie będzie dotyczyła poszczególnych opracowań lub urządzeń technologicznych, lecz kompleksów zagadnień związanych z kolejnymi fazami prac matematycznego modelowania dynamiki układów cieplnych.



## 2.1. Rodzaje zmiennych stosowanych w modelowaniu układów cieplnych

W istniejących pracach występuje bardzo duża różnorodność zmiennych, która w poważnym stopniu uniemożliwia wykorzystanie prac i porównywanie otrzymanych przez autorów wyników. Dla pełnego obrazu stosowanych zmiennych przyjęty został [13] następujący ich podział: zmienne zewnętrzne oraz zmienne wewnętrzne. Do grupy zmiennych zewnętrznych należą np. prędkości i wszelkiego rodzaju współrzędne miejsca. Zmienne wewnętrzne dzielą się na grupę zmiennych ekstensywnych (przyjmują one wartość wielokrotności ilości np.: energia, entalpia, entropia itp.) oraz grupę zmiennych intensywnych jak: ciśnienie, temperatura, gęstość itp. Grupa zmiennych zewnętrznych wykazuje dużą jednorodność w przyjęciu prędkości i współrzędnej miejsca "X", natomiast grupa zmiennych ekstensywnych i intensywnych charakteryzuje się bardzo dużą różnorodnością przyjętych zmiennych. Przyczyn tego zjawiska należy szukać w pewnej przypadkowości przy wyborze zmiennych, a przede wszystkim kierowaniem się przez autorów przy ich wyborze wielkościami mierzonymi lub regulowanymi w układzie rzeczywistym.

Podejście takie, szczególnie przy opisie złożonych układów, prowadzi do niejasności w opisie, trudności obliczeniowych związanych z opanowaniem dużej ilości zmiennych oraz poważnego nakładu pracy przy obliczaniu wariantu wymagającego zmiany modelu. Należy również podkreślić brak możliwości pełnego porównania wyników dotyczących tego samego urządzenia przy zmianach wynikających w modelu ze zmiany struktury urządzenia lub układów regulacji.

Można również zauważyć, iż większość prac mimo pozorów odmienności, np. przez przyjęcie do opisu wymiennika ciepła, entalpii lub temperatury czynnika, reprezentuje te same właściwości dynamiczne opisywanych układów.

Stwierdza się natomiast brak prac mających na celu klasyfikację zmiennych, ustalenie optymalnej ilości i rodzaju stosowanych zmiennych dla opisu układów cieplnych. Problem doboru zmiennych zostanie przedstawiony w niniejszej pracy w punkcie 3.

## 2.2. Rodzaje stosowanych równań i modeli

Przedstawienie w tym miejscu nawet najbardziej tylko oryginalnych prac dotyczących poszczególnych urządzeń cieplnych bloków energetycznych jest z powodu objętości pracy ograniczone. Jednak na podstawie istniejących prac można dokonać podziału układu cieplnego na urządzenia o charakterze przepływowym i pojemnościowym.

Przy takim podziale zagadnienie wymiany ciepła przedstawione będzie oddzielnie.

### 2.2.1. Elementy o charakterze przepływowym

Do elementów przepływowych zalicza się wszystkie rurociągi z przepływającym czynnikiem, a więc: podgrzewacze wody, przegrzewacze pary, skraplacze, kanały chłodzące rdzenie reaktora, wytwornice pary itp.

Ogólnie, element przepływowy może być opisany równaniem bilansu wg Haase [13]

$$\frac{\partial Z_v}{\partial t} = - \operatorname{div} \vec{I}_Z + g(Z) \quad (2.1)$$

$$Z_v = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{Z}{V}$$

$$V \rightarrow 0,$$

gdzie

- $Z$  - dowolna zmienna,
- $Z_v$  - gęstość dowolnej zmiennej
- $V$  - objętość,
- $\vec{I}_Z$  - wektor strumienia zmiennej, na jednostkę powierzchni,
- $g(Z)$  - funkcja określająca ilość wytworzonej lub unicestwionej zmiennej  $Z$ ,

oraz równaniem sił działających na strumień

$$\dot{m} \frac{\partial u}{\partial x} = \sum F, \quad (2.2)$$

gdzie

- $u$  - prędkość przepływu w kierunku osi  $x$
- $\dot{m}$  - strumień masy
- $F$  - siły działające na strumień na jednostkę długości.

Równania (2.1) i (2.2) dla strumienia jednofazowego czynnika przewodzącego do układu trzech równań cząstkowych: równania zachowania masy, równania równowagi sił oraz równania zachowania energii.

Przy opisie wszelkiego rodzaju wymienników ciepła układ równań zostaje poszerzony o równanie cząstkowe wymiany ciepła między otoczeniem a metalową powierzchnią wymiennika i czynnikiem roboczym. Ponadto dochodzi równanie przeniesienia termodynamicznego w samym czynniku roboczym. Tak szeroko rozbudowany układ równań wyjściowych dla opisu elementów przepływowych znajduje zastosowanie tylko w niewielu pracach [12], [17], [22].

Najczęściej przyjmowany jest układ równań składający się z równania bilansu energii czynnika roboczego oraz równania akumulacji ciepła w metalu elementu przepływowego [1].

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + W \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\alpha U}{C_m \lambda} (T_m - T_1) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\alpha U}{C_m \rho_m F_m} (T_m - T_1) + \frac{\alpha_o U_o}{C_m \rho_m \lambda_m} (T_o - T_m), \quad (2.4)$$

gdzie

- $T_1, T_m, T_o$  - temperatura czynnika, metalu, otoczenia
- $W$  - prędkość przepływu czynnika
- $\alpha, \alpha_o$  - współczynniki wnikania ciepła od metalu do czynnika i od otoczenia do metalu
- $U, U_o$  - obwód rury od strony czynnika i od strony otoczenia
- $\lambda, \lambda_m$  - pole przekroju przepływu czynnika, pole przekroju metalu rury
- $\rho, \rho_m$  - gęstość czynnika i gęstość metalu
- $c, c_m$  - ciepło właściwe czynnika przy stałym ciśnieniu i ciepło właściwe metalu.

Poszczególne prace przyjmujące takie założenia różnią się jedynie uproszczeniami jak: rodzajem rozkładu pola temperatur, stałością ciśnienia ilością przyjętych odcinków opisujących oraz metodami obliczeniowymi. Metody obliczeniowe omówione zostaną zbiorczo w punkcie 2.4.

Następny krok upraszczający to przejście z opisu przy pomocy stałych rozłożonych do opisu traktującego element przepływowi jako obiekt o stałych skupionych. Przyjęcie takiego uproszczenia jest możliwe tylko przy globalnym modelowaniu całego układu i uprzednim przeprowadzeniu odpowiednich badań dokładności.

Badania przedstawione przez Ennsa [9] zezwalają na takie założenie upraszczające w stosunku do przegrzewaocy pary.

W najdalej idących uproszczeniach zastępuje się element przepływowi elementem czasu martwego wynikającego z czasu transportu czynnika w danym elemencie przepływowym. Uproszczenie to bardzo chętnie stosowane do opisu rurociągów łączących poszczególne urządzenia, w większości przypadków nie budzi żadnych zastrzeżeń. Jedynie zastąpienie rurociągów w obiegach elektrycznych atomowych czasem martwym wprowadzone w wielu pracach jest bardzo dyskusyjne. W rurociągach tych przepływają z dużymi prędkościami olbrzymie ilości czynnika roboczego, których przyspieszanie lub opóźnianie ma decydujący wpływ na dynamikę obiegu. Znalazło to odbicie np. w pracy [22], w której opis rurociągów dokonany został za pomocą pełnego układu równań

różniczkowych cząstkowych: równania zachowania masy, równania równowagi sił oraz równania zachowania energii.

W niektórych pracach elementy przepływowo nie występują w jawnej postaci. Dla przykładu rury opadowe i ekrany w pracach [28], [31] opisane są razem z walozakiem stałymi skupionymi, co jest bardzo dużym uproszczeniem jeśli uwzględnić fakt, że działanie obiegu naturalnego opiera się właśnie na różnicach występujących w rurach opadowych i ekranach.

Rury opadowe i ekrany zostały wydzielone jako samodzielne elementy w pracach [4], [19] i opisane znanymi już równaniami bilansów masy i energii oraz równaniem równowagi sił. Równania opisujące przyjęto jako równania różniczkowe zwyczajne.

Z tych samych równań w zapisie różniczkowo cząstkowym korzystają autorzy pracy [17], wprowadzając przy rozwiązaniu równań podział rur opadowych i ekranów na poszczególne odcinki.

Osobne zagadnienie stanowi element przepływowy z czynnikiem dwufazowym np. ekrany w kotle. Najogólniej przypadek ten może być opisany dwoma układami znanych równań cząstkowych. Każdy z tych układów odpowiada jednej z opisywanych faz czynnika roboczego.

Przyjęcie stanu równowagi termodynamicznej między fazami czynnika sprężadza opis do jednego układu równań cząstkowych. Założenie to w wypadku opisu ekranów musi być rozszerzone przyjęciem odpowiedniego stosunku prędkości pary i wody. Przy takich założeniach równanie różniczkowe bilansu energii dla przepływu dwufazowego przyjmuje postać:

$$\frac{\partial}{\partial t} [X \rho_p h_p - (1 - X) \rho_w h_w] + W \frac{\partial}{\partial x} [X \rho_p h_p \vartheta + (1 - X) \rho_w h_w] - c \frac{\partial p}{\partial t} - w c \frac{\partial p}{\partial x} = \dot{Q}. \quad (2.5)$$

#### Oznaczenia

- X - zawartość pary
- $\rho_p, \rho_w$  - gęstość pary i wody
- $h_p, h_w$  - entalpia pary i wody
- W - prędkość przepływu wody
- $\vartheta$  - stosunek prędkości pary do prędkości wody
- $\dot{Q}$  - całkowity strumień ciepła
- p - ciśnienie
- c - stała.

Analogicznie do powyższego równania można napisać równanie zachowania masy i równowagi sił. Podejście to reprezentują prace [12], [22], [34].

Interesujący wkład w opis dwufazowego przepływu obciążonego w czasie rzeczywistym posiada praca [21] przedstawiająca porównawczo wyniki obli-

czeń przyjętych modeli wytwornicy pary w elektrowni atomowej na neutronach prędkich. Bardzo ciekawe wyniki obliczeń i badań eksperymentalnych wielkości statycznych przepływu dwufazowego zawarte w pracy [20] mogą w istotnym zakresie poszerzyć dotychczas stosowany opis dynamiczny tych zagadnień.

## 2.2.2. Elementy o charakterze pojemnościowym

Do elementów o charakterze pojemnościowym zaliczamy urządzenia, w których nie można jednoznacznie określić czasu i kierunku przepływu czynnika co umożliwia rezygnację w opisie ze współrzędnej "x" i przejście na układ zwyczajnych równań różniczkowych. Typowymi urządzeniami o charakterze pojemnościowym są wszelkiego rodzaju zbiorniki z czynnikiem jedno i dwufazowym jak: komory zbiorcze, waleczak, stabilizator ciśnienia w elektrowniach atomowych itp.

Korzystając z ogólnego równania bilansu (2.1) można wyprowadzić równania bilansów dla waleczaka jako obiektu o stałych skupionych. Równanie bilansu masowego waleczaka:

$$\dot{m}_w - \dot{m}_D = \frac{d}{dt} (V' \rho' + V'' \rho''). \quad (2.6)$$

Równanie bilansu cieplnego wytwornicy pary

$$\dot{m}_w h_w + \dot{Q}_w - \dot{m}_D h = \frac{d}{dt} (V' \rho' h + V'' \rho'' h'' + C_M M_M T_M), \quad (2.7)$$

gdzie

- $\dot{m}_w, \dot{m}_D$  - strumień wody zasilającej i strumień pary z kotła
- $V', V''$  - objętość wody i pary w wytwornicy w stanie nasyconia,
- $\rho', \rho''$  - gęstość wody i pary w stanie nasyconia,
- $h_w, h', h''$  - entalpia wody i pary w stanie nasyconia,
- $C_M, M_M, T_M$  - ciepło właściwe, masa metalu i temperatura metalu w wytwornicy pary.

Powyższy model został sformułowany przez Szunską [31] i ze względu na swoją prostotę znajduje on zastosowanie w większości znanych prac.

Niektórzy autorzy np. Chorowski [6] uzupełniają równania Szunskiej wzorami uwzględniającymi zawartość pary w wodzie i w ten sposób uzyskują większą zgodność modelu matematycznego z rzeczywistym układem.

Z dużej ilości zastosowanych w powyższych równaniach założeń upraszczających najbardziej jest przyjęcie stanu równowagi termodynamicznej w waleczaku między parą a wodą, które pozwala nam traktować zawartość zbiornika jako ciecz jednorodną. Założenie to w dużym stopniu upraszcza opis i jego zastosowanie.

Przyjmując brak równowagi między parą i wodą wymagany układ równań składa się z czterech równań bilansu (bilansu masy i bilansu energii osobno dla każdej z faz). Przyjęcie tak dużego stopnia złożoności równań jest szczególnie wskazane dla opisu zjawisk zachodzących przy zmianach ciśnienia w walożaku.

W pracy [34] podano, że przy zmianach ciśnienia zależnie od przyjętego stanu termodynamicznego wody i pary, szybkość masowa wypływu pary może się różnić prawie pięciokrotnie. Opracowanie nie zawiera jednak żadnych wytycznych odnośnie rozwiązania tego zagadnienia.

Problem ten został podjęty przez Nahavandiego w opracowaniu dotyczącym stabilizatora ciśnienia elektrowni atomowych ciśnieniowych [23].

Przedstawione zostały cztery przypadki, w których wypełnienie stabilizatora znajdowało się poza stanem równowagi termodynamicznej.

### 2.2.3. Zagadnienie wymiany ciepła

Proces wymiany ciepła zarówno w komorach paleniskowych, wymiennikach ciepła i w reaktorach atomowych dla stanu ustalonego opisano z zadawalającą dla praktyki projektowej dokładnością. Obliczenia statyczne komór paleniskowych przeprowadza się metodami Wolenberga i Gurwioza [28]. Obie metody uwzględniają tylko ciepło przekazane przez promieniowanie i nie są przystosowane do obliczeń dynamicznych. Próbę takiego przystosowania podano w opracowaniu Chorowskiego [6], oraz [10].

Podczas obliczeń dynamicznych pomija się pojemność cieplną spalin, która jest znacznie mniejsza od pojemności cieplnej powierzchni ogrzewalnych, przez które przepływa woda lub para.

Wymianę ciepła między strumieniem opływającym a metalem rury wymiennika w przegrzewaczach pary i podgrzewaczach wody zarówno po stronie pary, wody i spalin ujmuje się przeważnie [19] wzorem w postaci

$$\dot{Q} = \text{stała } \dot{m}^x \Delta t. \quad (2.8)$$

$\dot{Q}$  oznacza wartość strumienia ciepła przekazywanego między opływającym strumieniem  $\dot{m}$  a metalem wymiennika przy danej różnicy temperatur  $\Delta t$ .

Wykładnik potęgowy "x" zależy od rodzaju strumienia. Przykładowo dla wymiany ciepła między strumieniem spalin a ścianką metalową  $x = 0,6$  natomiast dla wymiany między metalem a parą  $x = 0,8$ .

Zagadnienie wymiany ciepła w reaktorach atomowych zostało wszechstronnie opisane i zbadane [33]. W opracowaniach do celów matematycznego modelowania przyjmuje się najczęściej model reaktora ze stałymi skupionymi [29], [15]. Nowe prace zakładają opis rdzenia równaniami różniczkowymi cząstkowymi [2], [8], [18], [30].

Zgodnie z podanymi powyżej rodzajami opisu reaktora rozkład temperatury w paliwie jest obliczany w zależności od strumienia neutronów. Podczas

oddawania ciepła do czynnika chłodzącego lub moderatora uwzględnia się pojemność cieplną paliwa i przewodzenie ciepła w całym elemencie paliwowym. Przejęcie ciepła przez chłodziwo zależy od jego temperatury i prędkości przepływu w rdzeniu reaktora.

Osobne zagadnienie przy wymianie ciepła stanowi rozkład czasowy temperatury w ściankach: rur, wymienników ciepła, zbiorników itp. Elementy cienkościennie ze swoją znikomą pojemnością cieplną i małą stałą czasową przewodzenia ciepła nie wymagają bliższych badań. W przeciwieństwie do nich w elementach o dużej pojemności cieplnej i o stałych czasowych około 1000 [s] jak: wałozak, turbina i pozostałe elementy grubościennie wskazane jest uwzględnienie w opisie przepływu ciepła oraz oddziaływania tych elementów na dynamikę otoczenia.

#### 2.2.4. Elementy opisywane statycznie

Niezależnie od urządzeń o wyraźnym charakterze przepływowym i pojemnościowym w układach cieplnych występują urządzenia z bardzo krótkim czasem przepływu czynnika roboczego i nieznaczną akumulacją masy lub akumulacją energii. Urządzenia takie, przy opisie całego układu z dominującymi elementami przepływowymi albo pojemnościowymi, można sprowadzić do elementów czysto statycznych. Do urządzeń tych należą: pompy, wentylatory, zawory, komory spalania, turbina itp.

Równania statyczne stosowane w większości prac są równaniami teoretycznymi lub empirycznymi i posiadają stosunkowo złożoną postać matematyczną. W celu ich uproszczenia wskazane jest ujęcie szczególnie złożonych równań w formie tabelarycznej.

#### 2.3. Modelowanie złożonych układów technologicznych

W zagadnieniu matematycznego modelowania dynamiki złożonych układów technologicznych produkcji energii elektrycznej dominują w literaturze dwa podejścia: zestawienie bardzo dokładnego modelu całości z dostępnymi w literaturze modeli matematycznych poszczególnych agregatów lub zestawienie ogólnego modelu na podstawie przyjętych własności dynamicznych pojedynczych urządzeń w oparciu o pomiary na urządzeniach rzeczywistych.

Drugi sposób postępowania nie będzie bliżej omawiany, ponieważ nie zapewnia on najoczęściej wymaganej obecnie dokładności modelowania i może być stosowany tylko dla istniejących już układów.

Budowa kompleksowego modelu, na podstawie modeli cząstkowych reprezentowanych bogato w literaturze dla poszczególnych urządzeń, wiąże się z dużymi trudnościami natury formalnej i organizacyjnej. Mimo pozornego ułatwienia wynikającego z oparcia się o istniejące modele sposób ten wymaga bardzo dużego nakładu pracy na przyswojenie metod postępowania każdego z

autorów i osiągnięte na tej podstawie wyniki nie odpowiadają często nakładom włożonej pracy.

W celu połączenia modeli cząstkowych w model całego urządzenia konieczne jest przeprowadzenie następujących prac:

- ujednoczenie stosowanych zmiennych i założeń upraszczających
- rozszerzenia modeli cząstkowych w wypadku braku niektórych zmiennych, lub zbyt małej dokładności
- zbadanie oddziaływań zwrotnych pomiędzy sąsiadującymi elementami w modelowanym układzie.

Otrzymany tą drogą model charakteryzuje się mało elastyczną strukturą. Zmiana tematyki problemów rozwiązywanych na modelu zmusza najczęściej do każdorazowej gruntownej przebudowy całego modelu. Przeprowadzenie tych prac wymaga wysoko wykwalifikowanego personelu.

Pozostałe trudności omówiono w punkcie 2.1.

W związku z dużymi nakładami na modelowanie matematyczne należy rozważyć również ekonomiczny aspekt prowadzenia tych prac. Korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania metod dynamicznego modelowania matematycznego dla celów: projektowania, regulacji itp. są w większości przypadków bezsporne. Pozostaje tylko zwrócić uwagę na ekonomikę prowadzenia prac i stosowanych metod.

Należy rozróżnić nakłady związane z opracowaniem modelu oraz nakłady potrzebne każdorazowo na dopasowanie modelu do rozwiązywanego zadania.

Wysokość nakładów na opracowanie modelu dla różnych metod przy tej samej dokładności wydaje się być jednakowa. Istnieje możliwość poważnego zmniejszenia kosztów przez odpowiednią budowę modelu, jednolite zmienne i uniwersalne elementy opisujące oraz przez zastosowanie maszyn ocyfrowych do wstępnych obliczeń wartości stałych.

Na wielkość nakładów przeznaczonych na dopasowanie modelu dla poszczególnych problemów decydujący wpływ posiadają: przyjęta struktura modelu, stosowane zmienne i metoda przeprowadzania obliczeń.

W niekorzystnych przypadkach nakłady te mogą okazać się równe nakładom pierwszej grupy, dlatego przy opracowaniu modelu należy zwrócić szczególną uwagę na jego uniwersalność.

Całkowite nakłady na uniwersalny model danego układu cieplnego mogą się okazać wprawdzie wyższe od nakładów na model przeznaczony do rozwiązywania wąsko sformułowanego zadania, są jednak w pełni uzasadnione biorąc pod uwagę możliwy zakres prowadzonych prac (optymalizacja dynamiczna samego obiektu w różnych stanach pracy, optymalizacja struktury i nastaw układu regulacji itp.).

Uniwersalny model zapewnia nie tylko możliwość przeprowadzenia kompleksowych badań modelowych, lecz również pełną porównywalność otrzymanych wyników dla poszczególnych wariantów rozwiązań obiektu i jego układów regulacji.



## 2.4. Metody obliczeniowe

Zadaniem metod obliczeniowych jest rozwiązywanie układów równań w celu uzyskania odpowiednich informacji o własnościach statycznych i dynamicznych modelowanego układu cieplnego.

W literaturze istnieje cały szereg różnorodnych metod obliczeniowych, które przy rozpatrywaniu układu równań opisujących w ogólnej postaci jako układ równań różniczkowych cząstkowych można następująco podzielić:

- metody całkujące w sposób ciągły po osi czasu i dyskretyzujące oś miejsca "x"
- metody całkujące w sposób ciągły oś "x" i dyskretyzujące czas
- dyskretyzacja czasu i osi "x"
- transformacja czasu, a następnie dyskretyzacja osi "x" i transformowana zmiennej
- podwójna transformacja, a następnie dyskretyzacja obu transformowanych zmiennych.

Podane grupy metod realizowane są na różnego typu maszynach liczących.

### 2.4.1. Metody obliczeniowe charakterystyk czasowych na maszynach analogowych

Dzięki swojej przejrzystości i łatwości interpretacji metody obliczeniowe charakterystyk czasowych na maszynach analogowych znalazły szczególne szerokie zastosowanie. Maszyny analogowe realizują ciągłe całkowanie po czasie i dyskretyzację po osi miejsca "x".

Technika analogowa zapewnia dużą szybkość obliczeń przebiegów czasowych. Ponadto zezwala na modelowanie pewnych układów nieliniowych oraz umożliwia połączenie obiektu zamodelowanego na maszynie z układem rzeczywistym, np. regulatorem.

Zasadniczą wadą techniki analogowej jest ograniczenie rzędu obliczanych równań, wynikające z niestabilności zbyt rozbudowanych układów (max. 400 wzmacniaczy operacyjnych). Fakt ten zmusza przy modelowaniu złożonych układów bloku energetycznego do poważnych uproszczeń i zmniejszenia zakresu odwzorowania. Oprogramowanie wymaga dużego nakładu pracy, np.: obliczenia wartości nastaw, korekt tych nastaw dla kilkuset potencjometrów, wykonanie połączeń itp. W celu zmniejszenia prac obliczeniowych nastaw potencjometrów ułożono odpowiednie programy na maszynę cyfrową, np. APACHER [3].

## 2.4.2. Metody obliczeniowe charakterystyk czasowych na maszynach cyfrowych

Obliczanie charakterystyk czasowych na maszynach cyfrowych wymaga dyskretyzacji obu zmiennych niezależnych: czasu i miejsca. Podczas obliczeń musi być spełniony warunek dla przyrostów czasu i osi "x".

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{W} \quad (2.9)$$

$W$  - oznacza sumę prędkości przepływu i prędkości dźwięku w danym ożynniku.

Spełnienie tego warunku wymaga niekiedy drobnej dyskretyzacji obu zmiennych co prowadzi do długich czasów obliczeń i potrzeby stosowania bardzo szybkich maszyn.

Podczas obliczania występuje zjawisko akumulowania się błędów spowodowane tym, że każdą następną wartość funkcji oblicza się z wartości poprzednich.

Zjawisko akumulowania błędu jest szczególnie niebezpieczne przy obliczaniu układów z wewnętrznymi sprzężeniami, dla których stosunkowo szybko może wystąpić niestabilność obliczeniowa. Dogodną formę zapisu równań dla oprogramowania maszyny cyfrowej stanowi zapis równaniami stanu przedstawionymi w formie macierzowej [8], [19], których rozwiązanie można przeprowadzić np. metodą Runge-Kutta.

Dla bardzo dużych układów pewnym ograniczeniem jest niemożliwe otrzymanie w technice cyfrowej wyników obliczeń w czasie rzeczywistym. Większość powszechnie dostępnych maszyn to maszyny o małej pamięci i niedużych prędkościach obliczeń, stąd może wynikać również pewne ograniczenie rzędu rozwiązywanych równań modelu matematycznego.

Maszyny cyfrowe mogą być wykorzystane również do: wstępnego opracowania danych, obliczenia stałych i przedstawienia ich w dogodnej postaci do dalszych obliczeń.

Oprogramowanie maszyn cyfrowych i uruchomienie programu sprawia w wielu wypadkach mniej trudności niż oprogramowanie maszyny analogowej, stąd też gwałtowny rozwój języków symulujących działanie maszyny analogowej na maszynach cyfrowej jak PACTOLUS, BOCS lub krajowy CEMMA.

W porównaniu z maszynami analogowymi prostsze i tańsze jest przechowywanie programu (karty lub taśmy) i ponowne uruchamianie gotowych programów. Z punktu widzenia kosztów użytkowania zastosowanie maszyn cyfrowych, w porównaniu z maszynami analogowymi, staje się z każdym dniem atrakcyjniejsze.

Dalsze możliwości zmniejszenia kosztów i ułatwień w zakresie modelowania otwierają maszyny hybrydowe. Maszyny te łączą w sobie zalety maszyn analogowych i cyfrowych. Obliczenia mogą być przeprowadzane przy dyskretyzacji jednej ze zmiennych na maszynie cyfrowej, natomiast druga zmienna

realizowana jest w sposób ciągły na maszynie analogowej. W zasadzie istnieje dowolność w przyjęciu dyskretyzowanej zmiennej, jednak łatwiejsza interpretacja warunków początkowych wskazuje na dyskretyzację osi "x". Czas obliczeń równorzędných układów równań na maszynach hybrydowych mogą być kilkakrotnie krótsze w porównaniu z czasami obliczeń na maszynach cyfrowych.

Ceny maszyn hybrydowych i koszty ich eksploatacji są jednak dużo wyższe od konwencjonalnych maszyn analogowych lub cyfrowych.

#### 2.4.3. Metody obliczeniowe charakterystyk częstotliwościowych

W wielu pracach [1], [11], [15], [17], [27], [32] z dziedziny modelowania matematycznego można coraz częściej zaobserwować stosowanie obliczeń charakterystyk częstotliwościowych. Obliczenia przeprowadza się po uprzednim wykonaniu pojedynczej lub podwójnej transformacji Laplace'a przy dyskretyzacji osi "x" i częstotliwości.

Obliczenia przy dyskretyzacji częstotliwości w miejsce czasu są łatwiejsze i nie prowadzą do niestabilności obliczeniowej, ponieważ podczas obliczania nie występuje zjawisko akumulowania się błędów obliczeniowych.

Każda wartość amplitudy i fazy dla kolejnych częstotliwości obliczana jest oddzielnie bez korzystania z wartości zmiennych dla poprzedzającej częstotliwości. Umożliwia to swobodny dobór wartości dyskretnych częstotliwości i zapewnia uzyskanie dowolnej dokładności obliczeń dla każdego zakresu częstotliwości.

Zastosowanie maszyny hybrydowej w dużym stopniu upraszcza i skracaa tok obliczeń [1]. Na maszynie analogowej zamodelowane są dwa układy dla części rzeczywistej i urojonej po osi zmiennej "x", natomiast maszyna cyfrowa przejmuje dyskretyzację częstotliwości. Układ taki zapewnia dużą szybkość liczenia i prostotę w programowaniu.

Na zakończenie należy podkreślić, że charakterystyki częstotliwościowe są wygodniejsze dla przeprowadzenia analizy obiektu, szczególnie w zagadnieniach dotyczących stabilności badanego układu. Odpowiednie programy na maszynie cyfrową zapewniają szybkie obliczenie charakterystyki czasowej na podstawie posiadanej charakterystyki częstotliwościowej [32].

#### 2.5. Wnioski i wymagania stawiane metodzie modelowania układów cieplnych

Przeprowadzona analiza matematycznego modelowania dynamiki układów cieplnych w elektrowniach prowadzi do następujących wniosków:

- W ostatnim okresie poważnie wzrosła ilość prac z dziedziny modelowania matematycznego. Szczególnie intensywny rozwój można zaobserwować w modelowaniu układów elektrowni atomowych.

- Modele cieplnej części bloku uzyskuje się przez połączenie istniejących modeli poszczególnych urządzeń. Otrzymany tą drogą model posiada bardzo sztywną strukturę, która powoduje, że może być on stosowany jedynie do rozwiązywania problemu, dla którego został wykonany. Zmiana tematyki rozwiązywanych zagadnień wymaga najczęściej każdorazowo przebudowy całego modelu, co ze względu na wielkość układu wymaga dużego nakładu pracy.
- W opublikowanych pracach istnieje duża dowolność w wyborze wektora stanu oraz w przyjmowanych założeniach upraszczających. Zjawiska te w poważnym stopniu uniemożliwiają pełne wykorzystanie prac i porównanie otrzymanych przez autorów wyników.
- Większość równań i założeń dla opisu czynnika jednofazowego jest ogólnie znana i stosowana, natomiast opis czynnika dwufazowego wymaga dalszego opracowania.
- Brakuje opracowań mających na celu stworzenie jednolitego i uniwersalnego modelu dla układów cieplnych umożliwiającego rozwiązywanie różnych problemów.
- Wcześniejsze prace nad modelem matematycznym nastawione były na posługiwanie się techniką analogową, nowsze prace opierają się prawie wyłącznie na technice cyfrowej. Wśród metod obliczeniowych dominują metody obliczające charakterystyki czasowe badanych układów. Należy jednak zwrócić większą uwagę na zalety metod obliczających charakterystyki częstotliwościowe. W dalszej perspektywie korzystnym będzie zastosowanie do celów obliczeniowych maszyn hybrydowych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy i powyższych wniosków można spropozować szereg ogólnych wymagań stawianych metodzie matematycznego modelowania dynamiki układów cieplnych:

- Model musi być tak zbudowany aby umożliwiał wszechstronne zastosowanie go do różnych klas zagadnień jak: badania strukturalne i technologiczne zagadnień optymalizacyjnych i projektowych nowych układów regulacyjnych itp.
- Przeprowadzenie tych prac nie powinno pociągać żadnych istotnych zmian w modelu podstawowym.
- Postulatu wszechstronności modelu nie należy utożsamiać z bardzo skomplikowanym i rozbudowanym modelem jak i uniwersalność z uproszczeniem opisu.
- Wymagana jest duża elastyczność modelu to znaczy łatwość jego powiększania (zwiększania dokładności) jak i zmniejszania (uproszczenia) części modelu, lub jego całości w zależności od rozwiązywanego zadania i możliwości obliczeniowych.
- Podczas opracowania modelu należy przeprowadzić ujednoclenie i optymalizację: wektora stanu, struktury modelu, postaci równań opisujących oraz założeń upraszczających.

- Struktura i budowa modelu powinna być dopasowana do możliwości i charakteru pracy maszyny cyfrowej. Wskazana jest duża uniwersalność i prostota programu obliczeniowego.
- Ogólnie pożądana jest duża przejrzystość i wysoka efektywność metody modelowania, którą zapewni: wykorzystanie maszyny cyfrowej do przeprowadzenia obliczeń wstępnych, skrócenie czasu obliczeń, możliwość zatrudnienia średniego personelu technicznego itp.

### 3. PRZEDSTAWIENIE NUMERYCZNEJ METODY MATEMATYCZNEGO MODELOWANIA DYNAMIKI UKŁADÓW CIEPLNYCH

Podane w punkcie 2.5 wymagania stawiane metodzie modelowania układów cieplnych posiadają bardzo szeroki zakres, którego spełnienie zmusza do całkowitej zmiany tradycyjnego, przedstawionego w punkcie 2.3, podejścia do modelowania złożonych układów.

Niniejszy rozdział przedstawia ogólne założenia i strukturę metody. Szczegóły realizacyjne opisu i programy zawarte są w następnych punktach 4 i 5.

#### 3.1. Założenia wstępne

Najistotniejszą cechą tej metody jest traktowanie opisywanego układu jako jednej całości bez wprowadzania podziału na poszczególne urządzenia i zestawienia modeli cząstkowych. W związku z tym nie poszukuje się jak dotychczas pierwiastków, które dzielą badany układ na części, lecz tych które łączą go w całość technologiczną.

Najważniejszymi pierwiastkami łączącymi układ są strumienie czynnika roboczego poddawanego przemianom technologicznym oraz strumienie ciepła.

Opis strumieni roboczych odbywa się przy pomocy jednolitych elementów podstawowych, które połączone zgodnie z przebiegiem strumienia przez poszczególne urządzenia tworzą rodzaj szkieletu informatycznego modelu.

Urządzenia znajdujące się w strumieniach roboczych jak: pompy, zawory itp. posiadają formalny zapis matematyczny odpowiadający elementom podstawowym.

Opis własności konstrukcyjnych i technologicznych z otoczenia strumienia roboczego przejmują ujednoczone w zapisie matematycznym elementy pomocnicze. Połączenia między elementami podstawowymi i elementami pomocniczymi wykonane są jedynie za pomocą głównych zmiennych stanu.

Element podstawowy wraz z elementem pomocniczym tworzą strukturę podstawową, która stanowi komórkę składową całego modelu opisywanego układu. Oznacza to, że wszystkie urządzenia układu cieplnego takie jak: przegrzewacze pary, pompy, podgrzewacze wody, walczak, zawory itp., będą opisane jednolitą formułą zwaną strukturą podstawową.

### 3.2. Wybór zmiennych

Przedstawione w punkcie 2.1 grupy zmiennych można podzielić na zmienne główne i pomocnicze. Zagadnienie wyboru zmiennych dotyczy przede wszystkim głównych zmiennych, natomiast grupa zmiennych pomocniczych przedstawia zbiór dowolnych zmiennych, wprowadzanych zależnie od potrzeb. Mogą być nimi temperatura, gęstość czynnika roboczego, strumień neutronów itp.

Główne zmienne stanu muszą dostarczyć pełną informację o stanie czynnika roboczego w dowolnym miejscu modelowanego układu. Proponuje się następujące główne zmienne stanu:

- $\dot{m}$  - strumień masy
- $p$  - ciśnienie
- $s$  - entropia.

Przy opisie dwufazowego czynnika roboczego można wprowadzić dodatkową zmienną główną "X" reprezentującą koncentrację jednej z faz.

Wybór zmiennych  $\dot{m}$  i  $p$  nie wymaga bliższych wyjaśnień, ponieważ zmienne te są ogólnie stosowane i wynikają bezpośrednio z równania zachowania masy i równowagi sił.

W dotychczasowych pracach zmienną termodynamiczną były temperatura lub entalpia. Wprowadzenie zaś entropii zapewniło prostsze w budowie równania bilansu energii, które przechodzi w równanie bilansu entropii.

Równanie bilansu entropii nie jest bezpośrednio zależne od pozostałych równań bilansu masy i równowagi sił. Ułatwia to matematyczne operowanie równaniami.

Równanie bilansu energii przy pomocy entalpii wiąże się przez ciśnienie z pozostałymi dwoma równaniami. Rozwiązanie takiego układu równań zmusza do przyjęcia stałości ciśnienia dającego znaczny błąd w określeniu szybkości przepływu czynnika roboczego.

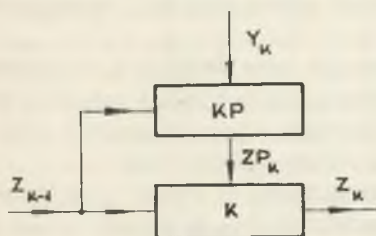
Bilans entropii prowadzi do prostszego w budowie równania bilansu oraz zapewnia możliwość ujęcia zjawisk nieodwracalnych w procesie technologicznym. Bilans entropii pozwala także wnikać w makrostrukturę czynnika roboczego [13], co jest szczególnie ważne w opisie urządzeń technologicznych, w których zachodzą przemiany jonowe i różnego rodzaju reakcje chemiczne.

Bliższe informacje o entropii jako zmiennej stanu dla opisu układów cieplnych bloku energetycznego zamieszczone są w pracy [26]. Entropia jako zmienna stanu występuje w pracach [24], [34].

### 3.3. Struktura podstawowa

W dotychczasowych pracach nie można zaobserwować wprowadzenia pojęcia ujednoczonych struktur do opisu poszczególnych urządzeń. Wychodząc z założeń do analizy w punkcie 2 staje się możliwe przyjęcie jednolitych struktur podstawowych dla opisu urządzeń o charakterze przepływowym, pojemnościowym, lub dla elementów statycznych.

Ze względów organizacyjnych metody i dogodności numerycznej metody obliczeniowej staje się korzystnym przyjęcie tylko jednej struktury podstawowej umożliwiającej pełną obustronną wymianę informacji między czynnikiem roboczym a jego otoczeniem. Ponadto struktura podstawowa winna być elastyczną zapewniającą swobodny opis urządzeń o różnym charakterze i posiadać przejrzystość budowy i łatwość posługiwania się nią.



Rys. 1. Struktura podstawowa  
K - element podstawowy, KP - element pomocniczy

Powyższe rozważania prowadzą do następującego sformułowania struktury podstawowej przedstawionej na rys. 1. Wektor zmiennych stanu składa się z głównych zmiennych, czyli  $\dot{m}$ ,  $p$ ,  $s$ . Dla czynnika dwufazowego zostaje wprowadzona dodatkowa zmienna główna "X" podająca koncentrację jednej z faz.

$$Z = \begin{bmatrix} \dot{m} \\ p \\ s \\ X \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Przyjęta struktura podstawowa zapewnia pełną wymianę informacji przy pomocy zmiennych głównych między elementem podstawowym i pomocniczym, czyli między czynnikiem roboczym a jego otoczeniem.

Wektor zmiennych stanu " $Y_K$ " reprezentowany jest przez dowolne zmienne pomocnicze jakimi mogą być temperatura, liczba obrotów, moment, napięcie itp.

Wynika z tego, że struktura podstawowa opisuje czynnik roboczy wraz z otoczeniem, przy czym czynnik roboczy na wejściu i na wyjściu z urządzenia reprezentowany jest przez główne zmienne, a otoczenie przez zmienne pomocnicze. Dzięki uniwersalności formuły, opisywane urządzenie, np. przegrzewacz pary, można przedstawić przy pomocy tylko jednej struktury elementarnej lub kilku szeregowych połączeń zależnie od wymaganej dokładności odwzorowania.

Zastosowanie ujednoczonych głównych zmiennych stanu zapewnia swobodę w połączeniu struktur podstawowych w model matematyczny całości układu. Połączenie struktur podstawowych za pomocą głównych zmiennych stanu musi być zgodne z kierunkiem przepływu strumienia roboczego czynnika w procesie technologicznym.



### 3.3.1. Element podstawowy

Element podstawowy "K" opisuje stan czynnika roboczego określonego jednoznacznie przez główne zmienne na wejściu i na wyjściu rozpatrywanego urządzenia.

Równanie macierzowe elementu podstawowego ma postać

$$Z_K = [A] Z_{K-1} + [B] ZP_K. \quad (3.2)$$

[A] i [B] są to macierze, których elementy stanowią funkcje wynikające z równań opisujących czynnik roboczy. Zachowanie się czynnika opisują ogólnie równania (2.1) i (2.2), które dla urządzenia o charakterze przepływowym prowadzą do układu trzech równań różniczkowych cząstkowych: bilansu masy, entropii i równowagi sił. Natomiast dla urządzenia o charakterze pojemnościowym otrzymuje się układ dwóch równań różniczkowych zwyczajnych bilansu masy i entropii.

Elementy opisywane statycznie znajdujące się bezpośrednio w strumieniu czynnika roboczego jak: zawory i pompy opisuje się w postaci równania macierzowego (3.2). Nadmieniamy, że opis dynamiki części napędowej pomp i zaworów przyjmuje w strukturze podstawowej element pomocniczy.

Składowymi wektora "ZP<sub>K</sub>" są główne zmienne  $\dot{m}$ , p, s, które umożliwiają pełny opis oddziaływania otoczenia na czynnik roboczy. W zależności od rodzaju wpływu otoczenia mogą one reprezentować doprowadzone do czynnika roboczego ciepło, energię mechaniczną w pompach lub także dodatkowy strumień masy.

### 3.3.2. Element pomocniczy

Element pomocniczy "KP" opisuje stan otoczenia czynnika roboczego. Stan otoczenia zgodnie z rys. 1 uzależniony jest od stanu samego czynnika roboczego i od zmiennych pomocniczych "Y<sub>K</sub>". Otoczenie oddziałuje na czynnik roboczy wektorem "ZP<sub>K</sub>".

Zależność tą ujmuje równanie macierzowe

$$ZP_K = [C] Z_{K-1} + [D] Y_K. \quad (3.3)$$

Elementy macierzy [C] i [D] są funkcjami wyprowadzonymi z równań opisujących dynamikę otoczenia. Równania te można najogólniej podzielić na dwie klasy równań: na równania pochodzące z bilansu masy i energii oraz równania pochodzące z zakresu mechaniki, elektrotechniki i fizyki jądrowej.

Wektor "Y<sub>K</sub>" informuje o oddziaływaniach czynników zewnętrznych na strukturę podstawową. Źródłem wpływu czynników zewnętrznych mogą być sąsiednie struktury podstawowe, praca układów regulacji i sterowania. Elementy macierzy [C] i [D] w porównaniu z elementami macierzy [A] i [B] elementu podstawowego wykazują większą różnorodność.

### 3.4. Wybór i realizacja metody obliczeniowej

Na podstawie przeprowadzonej w punkcie 2.4 analizy metod obliczeniowych i ze względu na złożoność układów cieplnych pozostaje jedynie do celów obliczeniowych maszyna cyfrowa. Pozwala ona obliczać charakterystyki czasowe i charakterystyki częstotliwościowe. Omówiona poprzednio metoda modelowania i struktura podstawowa mogą być wykorzystane równorzędnie dla obydwu metod obliczeniowych. W zasadzie metody obliczeń charakterystyk czasowych i częstotliwościowych są równorzędne. Niemniej metoda charakterystyk częstotliwościowych ze względu na wielkość modelowanych układów wydaje się być korzystniejsza. Przejawia się to szczególnie przy modelowaniu układów technologicznych posiadających wewnętrzne sprzężenia zwrotne.

Podczas obliczeń charakterystyk czasowych należy spełnić szereg wymagań odnośnie przyrostów czasu i osi miejsca. Spełnienie takich wymagań pociąga za sobą drobną dyskretyzację obu zmiennych prowadząc tym samym do długich czasów obliczeń. Występujące podczas obliczeń zjawisko akumulacji błędów zwiększa jeszcze bardziej wymagania odnośnie dyskretyzacji w celu uniknięcia niestabilności obliczeniowej. Przy obliczaniu charakterystyk częstotliwościowych każda wartość amplitudy i fazy zostaje wyliczona oddzielnie bez korzystania z wartości zmiennych dla poprzedzającej częstotliwości. Taki tok obliczeń zabezpiecza je przed niestabilnością obliczeniową. Dzięki temu jest możliwy również swobodny dobór dyskretnych wartości częstotliwości.

Wyżej przytoczone okoliczności predestynują metodę charakterystyk częstotliwościowych.

Dla przeprowadzenia obliczeń charakterystyk częstotliwościowych dokonuje się w równaniach opisowych pojedynczej transformacji Laplace'a oraz podstawienia  $s = j\omega$ . W związku z tym współczynniki macierzy w elementach podstawowym i pomocnym są funkcjami zespolonymi o postaci

$$a = X(\omega) + jY(\omega) . \quad (3.4)$$

W wypadku niemożliwości przeprowadzenia obliczeń na liczbach zespolonych (trudności językowe maszyny cyfrowej) trzeba rozbić równanie macierzowe, na część rzeczywistą i urojoną. Oznacza to powstanie dwóch struktur podstawowych dla części rzeczywistej i urojonej.

W celu zamodelowania całości układu łączymy struktury podstawowe kolejno numerując je zgodnie z kierunkiem przepływu strumienia roboczego. W tej samej kolejności maszyna cyfrowa realizuje obliczenia, których rezultatem są charakterystyki częstotliwościowe. Jeden tok obliczeń umożliwia wyrowadzenie z maszyny cyfrowej dowolnych charakterystyk częstotliwościowych dla poszczególnych miejsc układu. Dokładność obliczeniowa punktów charakterystyk częstotliwościowych jest zależna od przyjętego w programie przedziału dokładności. Program umożliwia dobieranie potrzebnych punktów stosownie do zakresu częstotliwości. Za pomocą wektora zmiennego  $Y_K^n$  mogą

być wprowadzone z zewnątrz na modelowany układ wymuszenia jak wszelkiego rodzaju zakłócenia, oddziaływania regulatorów, zmiany obciążenia itp.

Tak więc omawiana metoda zezwala dowolnie ingerować w badany układ. Dzięki przejrzystości programu można także sprawnie wymieniać lub zmieniać poszczególne struktury podstawowe lub ich składowe elementy. Bliższe dane o metodzie obliczeniowej i programie są przedstawione w punkcie 5.

#### 4. REALIZACJA OPISU PRZY POMOCY STRUKTURY PODSTAWOWEJ

Budowa i równania struktury podstawowej zostały przedstawione w punkcie 3.3. Założeniem niniejszego rozdziału jest przedstawienie sposobu opracowania i przeprowadzenia opisu przy pomocy struktury podstawowej. Ze względu na znaczną ilość i różnorodność urządzeń cieplnych będą wybrane charakterystyczne grupy tych urządzeń, których uzasadnienie podano w punkcie 2. Nadmieniamy się, że celem niniejszego rozdziału nie jest opracowanie gotowych do bezpośredniego zastosowania struktur podstawowych lecz jedynie wykazanie dużej przydatności i możliwości proponowanej metody.

##### 4.1. Urządzenia o charakterze przepływowym

Do urządzeń przepływowych zaliczamy takie urządzenia, w których strumień czynnika roboczego pokonuje dłuższą drogę. Stosownie do żądanej dokładności odwzorowania dzieli się tą drogę na elementarne odcinki opisane elementami podstawowymi. Każdemu elementowi podstawowemu jest przyporządkowany element pomocniczy. Dalsze rozważania będą dotyczyły przykładowo jednego zestawu elementu podstawowego z elementem pomocniczym.

##### 4.1.1. Czynniki jednofazowy

Przedstawienie struktury podstawowej dla jednofazowego czynnika roboczego obejmuje proste i złożone przypadki. Dla rozpatrywanych przypadków element podstawowy pozostanie niezmienny. Wszelkie zmiany odwzorowywanego urządzenia będą zawarte w różnych elementach pomocniczych.

##### 4.1.1.1. Element podstawowy

Równania elementu podstawowego wyprowadza się z równania ogólnego bilansu (2.1) oraz równowagi sił (2.2). Równanie (2.1) prowadzi do równania bilansu masy i entropii strumienia o kołowym przekroju.

Równanie bilansu masy ma postać

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0, \quad (4.1)$$

gdzie

$\rho$  - gęstość

$A$  - powierzchnia przekroju strumienia.

Równanie bilansu entropii dla elementu objętości strumienia wyraża się

$$\Delta Q \frac{\partial s}{\partial t} = - \operatorname{div} \vec{J}_s + g(s) . \quad (4.2)$$

Wektor  $\vec{J}_s$  podaje szybkość lokalnej zmiany gęstości entropii powstałej na skutek wymiany strumienia masy lub ciepła między rozpatrywanym elementem objętości a otoczeniem. Jego definicja jest następująca:

$$\vec{J}_s = \Delta Q \vec{s} + \frac{\dot{q} 2 \pi r}{T} \partial x \quad (4.3)$$

- w - prędkość przepływu
- T - temperatura w °K
- r - promień strumienia
- $\dot{q}$  - strumień doprowadzanego ciepła.

$g(s)$  zawiera wytworzoną lokalnie entropię w rozpatrywanym elemencie objętości na skutek przebiegających nieodwracalnie procesów. Przyrost entropii spowodowanej spadkiem ciśnienia wskutek tarcia wyraża zależność

$$g(s) = \frac{1}{T} \Delta p_v w , \quad (4.4)$$

gdzie  $p_v$  - strata ciśnienia na całej długości rozpatrywanego strumienia wskutek tarcia.

Po podstawieniu, rozwiązaniu i przyjęciu  $w = \frac{\dot{m}}{\Delta Q}$  otrzymujemy ostateczną postać równania cząstkowego bilansu entropii

$$T Q \left( \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{\Delta Q} \frac{\partial s}{\partial x} \right) = \frac{2}{r} \dot{q} + p_v \dot{m} . \quad (4.5)$$

W równaniu (2.2)  $\dot{m} \frac{\partial w}{\partial x} = \sum F$

oznacza: F - siły działające na jednostkę długości strumienia.

Dla strumienia o długości  $\partial x$  siły są równe:

- $F_p$  - siły ciśnienia  $\Delta p$
- $F_H$  - siła hydrostatyczna  $g \cdot \rho \cdot A \cdot \partial x \sin \alpha$
- $\alpha$  - kąt nachylenia strumienia względem poziomu
- g - przyspieszenie ziemskie
- $F_a$  - siła przyspieszająca -  $\Delta Q \partial x \frac{\partial w}{\partial t}$
- $F_T$  - siły tarcia  $\Delta p_v$ .

Po podstawieniu wartości do równania (4.6) i przyjęciu  $w = \frac{h}{\lambda Q}$  równanie ma postać

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{h \partial h}{\lambda Q \partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \lambda Q g \sin \alpha + A p_V = 0 \quad (4.6)$$

Do podanych równań (4.1), (4.4), (4.6) można dołączyć równania opisujące przemiany termodynamiczne w samym czynniku roboczym. Jest to szczególnie ważne dla gazowych czynników roboczych, dla których można podać równanie stanu gazu

$$p = RTQ \quad (4.7)$$

R jest stałą gazową.

Dalszym etapem prac jest przekształcenie powyższych równań (4.1), (4.5) i (4.6) w celu otrzymania równania macierzowego (3.2) dla elementu podstawowego.

Pierwszym przekształceniem będzie przejście z różniczkowej w ogólnej postaci  $\frac{\partial Y}{\partial x}$  na przyrost różnicowy  $\frac{Y_K - Y_{K-1}}{\Delta x}$ . Następnie przeprowadza się linearyzację równań podstawiając w miejsce funkcji czasu  $Y(t) = Y^0 + \Delta Y(t)$ . Wielkości drugiego rzędu  $\Delta y_1$ ,  $\Delta y_2$  ze względu na małą wartość pomija się.

Po przeprowadzeniu transformacji Laplace'a, przyjmując uproszczony zapis  $\mathcal{L}\left\{\frac{\Delta Y}{Y^0}(t)\right\} = Y(s) = Y$ , otrzymujemy układ równań

$$T_M Q_K s = m_{K-1} - m_K \quad (4.8)$$

$$T_J m_K s = J_1 p_{K-1} - I_2 p_K + (J_1 - J_2 - J_H) Q_K + (J_3 + J_T) m_{K-1} - (J_3 + J_T) m_K \quad (4.9)$$

$$T_S S_K s = K_q + (K_T - K_2) m_K + K_1 m_{K-1} + K_1 S_{K-1} - K_2 S_K \quad (4.10)$$

Opis przemian termodynamicznych w czynniku roboczym przedstawia ogólnie równanie

$$Q_K = \alpha p_K + \beta s_K \quad (4.11)$$

Współczynniki w równaniach podane zostaną zbiorczo dla równania macierzowego elementu podstawowego.

Ze względu na składowe wektora "ZP<sub>K</sub>" strumień doprowadzanego ciepła "q<sub>K</sub>" wyrażony zostaje tutaj jako strumień doprowadzanej entropii "s<sub>P<sub>K</sub></sub>". Rozwiązanie układu równań (4.8), (4.9), (4.10) i (4.11) względem wartości

$\dot{m}_K$ ,  $P_K$  i  $s_K$  prowadzi w zapisie macierzowym do równania elementu podstawowego dla jednofazowego strumienia czynnika roboczego.

Równanie macierzowe elementu podstawowego dla rozpatrywanego strumienia czynnika roboczego ma postać

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_K \\ P_K \\ s_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_{K-1} \\ P_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_K \\ P_K \\ s_K \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Pojedynce elementy macierzy są bezwymiarowe i równają się:

$$a_{11} = \frac{AK_1 - (K_2 + T_s s) B}{A(K_2 - K_T)} \quad a_{21} = \frac{A(K_2 - K_T - K_1) + B[(K_2 + T_s s) - \beta(K_2 - K_T) T_M s]}{A(K_2 - K_T) T_M \alpha s}$$

$$a_{12} = \frac{-(K_2 + T_s s) C}{A(K_2 - K_T)} \quad a_{22} = \frac{C[(K_2 + T_s s) - \beta(K_2 - K_T) T_M s]}{A(K_2 - K_T) \alpha T_M s}$$

$$a_{13} = \frac{AK_1 - (K_2 + T_s s) D}{A(K_2 - K_T)} \quad a_{23} = \frac{AK_1 - D[(K_2 + T_s s) + (K_2 - K_T) \beta T_M s]}{A(K_2 - K_T) \alpha T_M s}$$

$$a_{31} = \frac{E}{A} \quad b_{11} = b_{12} = b_{21} = b_{22} = b_{31} = b_{32} = 0$$

$$a_{32} = \frac{C}{A} \quad b_{13} = \frac{AK_0 - (K_2 + T_s s) E}{A(K_2 - K_T)}$$

$$a_{33} = \frac{D}{A} \quad b_{23} = \frac{AK_0 - E[(K_2 + T_s s) + (K_2 - K_T) \beta T_M s]}{A(K_2 - K_T) \alpha T_M s}$$

$$b_{33} = \frac{E}{A}$$

$$A = K_2(J_2 - J_0 \alpha) + \left\{ [(K_2 - K_T)(J_2 - 2J_0 \alpha) \beta - K_2(J_3 + J_T) \alpha] T_M + (J_2 - J_0 \alpha) T_s \right\} s - (J_3 + J_T) T_M T_s \alpha s^2 - \alpha T_s T_J T_M s^3$$

$$B = (J_2 - J_0 \alpha)(K_2 - K_T - K_1) - [(J_T + J_3)(K_2 - K_T) - (J_3 + J_T) K_1] \alpha T_M s + K_1 T_M T_J \alpha s^2$$

$$C = (K_2 - K_T) J_1 T_M \alpha s$$

$$D = K_1 (J_2 - J_0 \alpha) - K_1 (J_3 + J_T) T_M \alpha s - K_1 T_M T_J \alpha s^2$$

$$E = K_q (J_2 - J_0 \alpha) - K_q (J_3 + J_T) T_M \alpha s - K_q T_M T_J \alpha s^2$$

Występujące w elementach macierzy współczynniki mają postać

$$J_1 = 9,81 \frac{A_K^2}{K} Q_K P_K^{-1} \quad \left(\frac{kg^2}{s^2}\right)$$

$$J_2 = 9,81 \frac{A_K^2}{K} Q_K P_K \quad \left(\frac{kg^2}{s^2}\right)$$

$$J_3 = 2 M_K^2 \quad \left(\frac{kg^2}{s^2}\right)$$

$$J_H = 2 \frac{A_K^2}{K} Q_K^2 g \Delta x_K \sin \alpha_K \quad \left(\frac{kg^2}{s^2}\right)$$

$$J_0 = J_1 - J_2 - J_H$$

$$J_T = A_P^2 \quad \left(\frac{kg^2}{s^2}\right)$$

$$T_J = A_K Q_K M_K \Delta x_K \quad \left(\frac{kg^2}{s^2}\right)$$

$$T_M = A_K Q_K \frac{\Delta x_K}{M_K} \quad (s)$$

$$T_g = A_K Q_K \Delta x_K s_K \quad \left(\frac{KJ}{O_K}\right)$$

$$K_1 = M_K s_{K-1} \quad \left(\frac{KJ}{O_K s}\right)$$

$$K_2 = M_K s_K \quad \left(\frac{KJ}{O_K s}\right)$$



$$K_Q = \frac{2}{\pi} A_K \Delta x s P_K \quad \left( \frac{KJ}{OK \cdot s} \right)$$

$$K_T = \frac{3 M_K D_V \Delta x}{C_K T_K} \quad \left( \frac{KJ}{OK \cdot s} \right)$$

$$\alpha = \frac{P_K}{Q_K} \left( \frac{\partial Q}{\partial P} \right) (-), \quad \beta = \frac{T_K}{Q_K} \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right) (-).$$

Wartości zmiennych zawarte we wzorach są wielkościami dla stanu ustalonego. Podane równanie końcowe (4.12) jest głównym równaniem opisującym element podstawowy dla urządzeń o charakterze przepływowym. W zależności od rodzaju czynnika roboczego oddziaływania otoczenia, poszczególne współczynniki macierzy mogą być rozszerzone to znaczy w miejsce zer lub jedynek wprowadza się zależności funkcyjne.

Przedstawione transmitancje mogą ulec również znacznemu uproszczeniu przy opisie czynników roboczych posiadających małą ściśliwość lub rozszerzalność cieplną. Zakres uproszczeń należy każdorazowo określić podczas przeprowadzania obliczeń współczynników.

Powtarzalność jednolitych wzorów na współczynniki macierzy dla wszystkich elementów podstawowych urządzeń przepływowych umożliwia wygodne przeprowadzenie wstępnych obliczeń tychże na maszynie cyfrowej.

#### 4.1.1.2. Element pomocniczy

Najprostszym przykładem urządzenia przepływowego jest odcinek nieogrzewanej cienkościennej rury. Dla tego przypadku opis jest bardzo prosty, ponieważ w strukturze podstawowej współczynniki w macierzach [B], [C] i [D] są wszystkie równe zero. Bardziej ciekawym przykładem jest opis grubościennego i dobrze zaizolowanego rurociągu. Dla tego przykładu przedstawione w poprzednim punkcie równanie macierzowe (4.12) dla elementu podstawowego nie ulega zmianie. Równanie dla elementu pomocniczego wyprowadza się następująco. Zakumulowane ciepło w płaszczu rury przy założeniu stałości temperatury czynnika po "x" wyraża się wzorem

$$W_R \frac{dT_R}{dt} = 2\pi r_K \Delta x_K \dot{q}_K. \quad (4.13)$$

Wymieniany strumień ciepła między płaszczem rury a czynnikiem roboczym równa się

$$\dot{q}_K = \alpha_K (T_{K-1}) [T_R - T_o (P_{K-1}, s_{K-1})], \quad (4.14)$$

gdzie

- $r$  - promień rury
- $T_R$  - temperatura płaszcza rury
- $T_o$  - temperatura czynnika
- $\alpha_k$  - współczynnik przenikania ciepła
- $W_R$  - pojemność cieplna.

Wartość pojemności cieplnej  $W_R$  rury nie wynika bezpośrednio z iloczynu ciepła właściwego materiału i masy, lecz dla jej ustalenia trzeba przeprowadzić badania rozkładu temperatury w ścianie w zależności od czasu, który odpowiada rzędowi wielkości stałych czasowych przepływu. Badania takie redukują najczęściej masę grubościennego płaszcza do 30%-40% [25]. Po linearyzacji i transformacji Laplace'a otrzymujemy w uproszczonym zapisie następujące równania:

$$\dot{q}_K = -W T_R s \quad (4.15)$$

$$\dot{q}_K = W_1 m_{K-1} + W_2 T_R - W_3 p_{K-1} - W_4 s_{K-1} \quad (4.16)$$

Równanie macierzowe zgodnie z równaniem (3.2) elementu pomocniczego  $p_K$  wprowadzeniu wektora  $sP_K$  ma postać

$$\begin{bmatrix} mP_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{K-1} \\ p_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + [D] [Y_K] \quad (4.17)$$

Pojedyncze elementy macierzy są bezwymiarowe i równają się:

$$c_{11} = c_{12} = c_{13} = 0$$

$$c_{21} = c_{22} = c_{23} = 0$$

$$c_{31} = \frac{W_1 W s}{W_2 + W s}$$

$$C_{32} = \frac{W_3 W_S}{W_2 + W_S}$$

$$C_{33} = \frac{W_4 W_S}{W_2 + W_S},$$

gdzie:

$$W = \frac{W_R T_R}{2\pi r_K \Delta X_K q_K} \quad (s) \quad W_1 = \frac{\dot{m}_{K-1} (T_R - T_C)}{\dot{q}_K} \cdot \left( \frac{\partial \alpha}{\partial m} \right)$$

$$W_2 = \frac{\alpha_K T_R}{\dot{q}_K} \quad (-) \quad W_3 = \frac{\alpha_K P_{K-1}}{\dot{q}_K} \cdot \left( \frac{\partial T_q}{\partial P} \right) \quad (-)$$

$$W_4 = \frac{\alpha_K S_{K-1}}{\dot{q}_K} \cdot \left( \frac{\partial T_q}{\partial S} \right) \quad (-).$$

Wielkości występujące w powyższych wzorach są wartościami dla stanu ustalonego. W równaniu (4.17) wektor zmiennych "Y<sub>K</sub>" i współczynniki macierzy [D] w związku z izolacją rurociągu równe są zero.

Następny przykład zajmuje się przypadkiem, kiedy między strumieniem roboczym jego płaszczyzną a otoczeniem są wymieniane strumienie ciepła. Wymianę ciepła między strumieniem roboczym a płaszczyzną przedstawia równanie (4.14), a akumulację ciepła w płaszczyźnie opisuje równanie:

$$W_R \frac{d T_R}{dt} = - 2\pi r_K \Delta X_K \dot{q}_K + \dot{Q}_K, \quad (4.18)$$

gdzie

$\dot{Q}_K$  - ciepło doprowadzone z zewnątrz do płaszczyzny rury.

Równanie dla doprowadzonej ilości ciepła " $\dot{Q}_K$ " zależy od rodzaju urządzenia, które opisujemy i tak w przypadku elementu pomocniczego dla reaktora, równanie to będzie iloczynem funkcji strumienia neutronów i funkcji opóźnienia wynikającej z przewodności w elementach paliwowych. Dla wymienników ciepła jak przegrzewacze pary, podgrzewacze wody itp. stosuje się równanie

$$\dot{Q}_K = \alpha_n (\dot{m}_{n-1}) [T_n (P_{n-1}, S_{n-1}) - T_R] \cdot \quad (4.19)$$

Indeks "n" oznacza odpowiednio wartości po wtórnej stronie wymiennika ciepła.

W celu uogólnienia rozważania przyjmuje się zmienną dowolną "Y<sub>K</sub>" jako równą "Q̇<sub>K</sub>". Po linearyzacji i transformacji Laplace'a równanie macierzowe elementu pomocniczego ma postać

$$\begin{bmatrix} mP_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} m_{K-1} \\ P_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Q_K \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Współczynniki macierzy [C] są zgodne z podanymi współczynnikami dla poprzednio rozpatrywanego przypadku.

$$d_{11} = d_{12} = d_{13} = 0$$

$$d_{21} = d_{22} = d_{23} = 0$$

$$d_{31} = d_{32} = 0$$

$$d_{33} = \frac{W_5 W s}{W_2 + W s},$$

gdzie

$$W_5 = \frac{\dot{Q}_K}{q_K \cdot 2\pi r_K \Delta x_K}.$$

Jeżeli uwzględnić zjawisko przewodzenia ciepła w elementach doprowadzających ciepło, to współczynnik "d<sub>33</sub>" należy dodatkowo pomnożyć przez funkcję opóźnienia pierwszego rzędu.

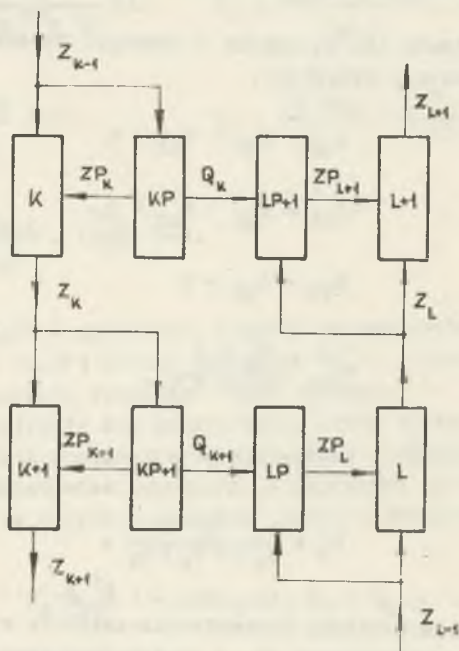
W celu wprowadzenia funkcyjnej zależności strumienia cieplnego "Q̇<sub>K</sub>" od innych zmiennych mnożymy lub wymieniamy współczynniki istniejącej macierzy [D] ze współczynnikami macierzy wynikającymi z równań na wartość strumienia. Wektor zmiennych pomocniczych "Y<sub>K</sub>" będzie się składał z nowych zmiennych stanu.

Przedstawiony element pomocniczy wraz z elementem podstawowym są częścią składową segmentu opisu przeciwprądowego wymiennika ciepła. Schemat takiego segmentu przedstawia rys. 2.

Elementy oznaczone na rys. 2 literą "L" są odpowiednio elementami podstawowymi i pomocniczymi opisującymi płynący w przeciwprądzie do strumienia "K" strumień czynnika roboczego "L", na przykład spaliny w przegrzewaczu pary.

Omówione dotychczas elementy pomocnicze dotyczą oddziaływania otoczenia na strumień czynnika roboczego przy pomocy strumienia ciepła. Oddziaływanie takie jest charakterystyczne dla większości układów cieplnych występujących w blokach energetycznych.

Budowa elementu pomocniczego zapewnia również możliwość uwzględnienia pozostałych oddziaływań przez doprowadzenie lub odprowadzenie energii w postaci mechanicznej, zmian ciśnienia, wprowadzania strumieni dodatkowych czynników itp. W wypadku doprowadzania energii mechanicznej równanie elementu pomocniczego wyprowadza się na podstawie równań bilansu momentów na wałach maszyn przepływowych jak: sprężarki, pompy, turbina itp.



Rys. 2. Struktura opisu przeciwprądowego wymiennika ciepła

#### 4.1.1.3. Przykład liczbowy

Prostym przykładem dla pokazania wielkości liczbowych współczynników macierzy są rury opadowe kotła OP-650k.

Rury opadowe są rurociągami nieogrzewanymi posiadającymi znikomą akumulację ciepła w płaszczu. W związku z tym współczynniki macierzy [B], [C] i [D] w równaniach (3.2) i (3.3) są równe zero.

Natomiast współczynniki macierzy [A] mają postać

$$a_{11} = \frac{5,11 - 2,98 s - 0,014 s^2 - 0,15 s^3}{5,11 - 2,96 s - 0,039 s^2 - 0,15 s^3}$$

$$a_{12} = \frac{-2,84 \text{ s} - 33,1 \text{ s}^2}{5,11 - 2,98 \text{ s} - 0,039 \text{ s}^2 - 0,15 \text{ s}^3}$$

$$a_{13} = \frac{5,4 \text{ s} - 0,004 \text{ s}^2 - 0,054 \text{ s}^3}{0,51 - 0,29 \text{ s} - 0,004 \text{ s}^2 - 0,015 \text{ s}^3}$$

$$a_{21} = \frac{5,08 - 2,96 \text{ s} - 0,04 \text{ s}^2 - 0,15 \text{ s}^3 + 1,75 \text{ s}^4}{2,86 \text{ s} - 1,66 \text{ s}^2 - 0,002 \text{ s}^3 - 0,008 \text{ s}^4}$$

$$a_{22} = \frac{62,4 \text{ s} + 347,4 \text{ s}^2}{2,86 \text{ s} - 1,66 \text{ s}^2 - 0,002 \text{ s}^3 - 0,008 \text{ s}^4}$$

$$a_{23} = \frac{5,11 - 2,98 \text{ s} - 6,30 \text{ s}^2 - 0,15 \text{ s}^3}{2,86 \text{ s} - 1,66 \text{ s}^2 - 0,002 \text{ s}^3 - 0,008 \text{ s}^4}$$

$$a_{31} = \frac{3,4 \text{ s}^2}{1288 - 710 \text{ s} - 9,4 \text{ s}^2 - 36,9 \text{ s}^3}$$

$$a_{32} = \frac{6,77 \text{ s}}{12,88 - 7,1 \text{ s} - 0,09 \text{ s}^2 - 0,37 \text{ s}^3}$$

$$a_{33} = \frac{1,229}{1,2 - 0,71 \text{ s}}$$

Przedstawione współczynniki są bezwymiarowe i dotyczą pęczka sześciu rur opadowych o długości 37 m sprowadzonego do rury zastępczej.

#### 4.1.2. Czynniki dwufazowy

Pod pojęciem czynnika dwufazowego założono mieszaninę wody i pary spotykaną w ekranach, wytwornicach pary itp. Opisane w poprzednim rozdziale równania elementu pomocniczego pozostają bez zmian. Dynamika opisu dwufazowego strumienia ocyznika roboczego do tej pory nie została w literaturze jednoznacznie opracowana. W związku z tym proponuje się dla opisu tegoż strumienia dwa sposoby ujęcia tego zagadnienia. Pierwszy nie odbiega od klasycznych metod opisu (punkt 2) i polega na przyjęciu dodatkowego równania ujmującego zmianę koncentracji "X" pary w zależności od doprowadzanej ilości ciepła.

Pozostałe równania podane w punkcie 4.1.1.1 pozostają bez zmian. Równanie zmiany zawartości pary w czynniku ma postać

$$X_K = X_{K-1} + \frac{1}{h} \frac{\dot{Q}_K}{\dot{m}_{K-1}}, \quad (4.21)$$

gdzie

$h$  - ciepło parowanie

$\dot{Q}_K$  - całkowity strumień doprowadzonego ciepła.

Ujęcie to prowadzi dla opisu ekranu kotła OP650k do następujących równań elementu podstawowego i pomocniczego

$$\begin{bmatrix} mP_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} m_{K-1} \\ p_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + [D] [Q_K] \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} m_K \\ p_K \\ s_K \\ X_K \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} m_{K-1} \\ p_{K-1} \\ s_{K-1} \\ X_{K-1} \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} mP_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Bezwymiarowe elementy macierzy w równaniach przyjmują wartość

$$a_{11} = \frac{24,86 + 205,1 s}{25,53 + 209,06 s}$$

$$a_{12} = \frac{-2,447 s + 8,004 s^2}{25,53 + 209,06 s - 0,0027 s^2}$$

$$a_{13} = \frac{0,1 - 121,4 s}{25,53 + 209,06 s - 0,0027 s^2}$$

$$a_{14} = 0$$

$$a_{21} = \frac{33,8 + 219,45 s - 356,89 s^2 - 1,29 s^3 + 0,825 s^4}{146,8 s + 801,7 s^2 - 0,026 s^3 - 0,025 s^4}$$

$$a_{22} = \frac{-41,75 s^2 + 257,7 s^3}{146,8 s + 80,17 s^2 - 0,0026 s^3}$$

$$a_{23} = \frac{25,19 + 411,3 \text{ s} + 264,3 \text{ s}^2}{14,68 \text{ s} + 8,017 \text{ s}^2} \quad a_{24} = 0$$

$$a_{31} = \frac{0,076 \text{ s}}{5,73 + 47,16 \text{ s}}$$

$$a_{32} = \frac{5,52 \text{ s}}{57,5 + 471,6 \text{ s}}$$

$$a_{33} = \frac{5,56 - 0,00018 \text{ s}}{5,56 + 47,16 \text{ s} - 0,00061 \text{ s}^2} \quad a_{34} = 0$$

$$a_{41} = -0,25$$

$$a_{42} = a_{43} = 0$$

$$a_{44} = 0,75$$

$$b_{11} = b_{12} = b_{21} = b_{22} = b_{31} = b_{32} = b_{41} = b_{43} = 0$$

$$b_{13} = \frac{4,928 \text{ s} + 0,0003 \text{ s}^2}{25,53 + 209,06 \text{ s} - 0,0027 \text{ s}^2}$$

$$b_{23} = \frac{41,2 \text{ s} + 0,0039 \text{ s}^2}{14,68 \text{ s} + 80,17 \text{ s}^2}$$

$$b_{33} = \frac{2,844}{57,5 + 471,6 \text{ s}}$$

$$b_{43} = 1,673$$

$$c_{11} = c_{12} = c_{13} = 0$$

$$c_{21} = c_{22} = c_{33} = 0$$

$$c_{31} = \frac{18,94 \text{ s}}{1 + 107 \text{ s}}$$

$$c_{32} = \frac{0,69 \text{ s}}{1 + 107 \text{ s}}$$

$$c_{33} = \frac{3,46 \text{ s}}{1 + 107 \text{ s}}$$

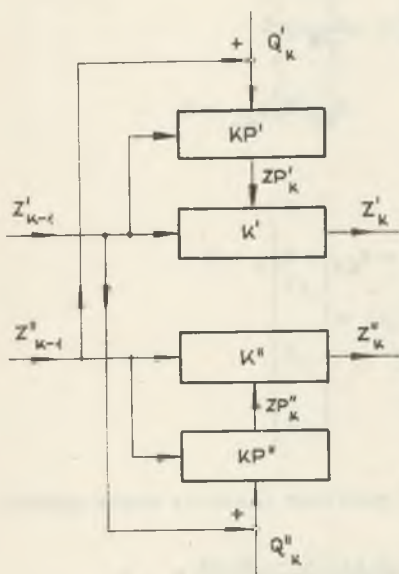


$$d_{11} = d_{12} = d_{13} = d_{21} = d_{22} = d_{23} = d_{31} = d_{32} = 0$$

$$d_{33} = \frac{1,666 \text{ s}}{1 + 107 \text{ s}}$$

Przedstawione współczynniki macierzy odnoszą się do segmentu ekranów o długości 6,4 m znajdującego się na wysokości 17,8 m od zbiornika dolnego.

W celu ogólnego ujęcia zjawisk występujących w strumieniu dwufazowym proponuje się schemat informatyczny opisu przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Struktura segmentu opisującego przepływ dwufazowy

Schemat opisu strumienia dwufazowego składa się z dwóch struktur podstawowych, struktury górnej (na rysunku) opisującej wodę oraz dolnej struktury z opisem pary. Podana struktura segmentu zapewnia pełną wymianę informacją między otoczeniem a poszczególne fazy oraz fazami między sobą.  $\dot{Q}_K^i$  i  $\dot{Q}_K^m$  ciepło doprowadzane do każdej z faz.

Z rysunku wynika, że wektor "Y<sub>K</sub>", dla cząstki wodnej posiada składowe  $\dot{Q}_K^i$  oraz  $Z'_{k-1}$ . Dzięki doprowadzeniu składowych wektora  $Z_{k-1}$  do elementu pomocniczego "KP" jest możliwe uwzględnienie zjawisk wymiany ciepła między parą i wodą oraz uwzględnienie wpływu ciśnienia elementarnej pary na wodę i jej prędkość przepływu. Jak wspomniano na początku rozdziału, zagadnienie to w tym ujęciu wymaga dalszych badań.

#### 4.2. Urządzenia o charakterze pojemnościowym

Do klasycznych urządzeń o charakterze pojemnościowym należą wszelkiego rodzaju zbiorniki jak: walczak, stabilizator ciśnienia, komory itp. Opis tych urządzeń odbywa się najczęściej przy pomocy stałych skupionych, co prowadzi w przypadku niniejszej metody do opisu przy pomocy jednej struktury podstawowej. W dokładniejszych rozważaniach zbiorniki mogą być podzielone na strefy, które zależą od rozkładu czynnika w zbiorniku, od oddziaływań zewnętrznych i sposobu doprowadzenia ciepła itp.

Każda ze stref opisana jest wtedy jedną strukturą podstawową. Wobec tego dla opisu złożonych urządzeń pojemnościowych, to jest z dużą ilością wejść lub wyjść liczba użytych struktur podstawowych może być znaczna

#### 4.2.1. Czynniki roboczy jednofazowy

Zbiorniki wypełnione czynnikiem jednofazowym należą do najprostszyc układów pojemnościowych. Ich opis można przeprowadzić przy pomocy jednej struktury podstawowej, jeżeli zbiornik posiada po jednym wejściu i wyjściu. Opis elementu podstawowego przeprowadza się przy pomocy ogólnego równania bilansu (2.1), które prowadzi do układu dwóch równań różniczkowych zwyczajnych bilansu masy i entropii.

$$\frac{dm_K}{dt} = \dot{m}_{K-1} - \dot{m}P_K$$

$$\frac{d(m_K s_K)}{dt} = \dot{m}_{K-1} s_{K-1} - \dot{m}P_K s_{P_K} \quad (4.24)$$

Wielkości oznaczone przez " $P_K$ " opisują odprowadzany strumień czynnika. Dla dużych prędkości wpływu i wypływu czynnika roboczego ze zbiornika należy uwzględnić równania bilansu ciśnienia

$$P_K = P_{K-1} - \xi \frac{w_{K-1}^2}{2} \rho_{K-1}$$

$$P_K = pP_K - \xi \frac{wP_K^2}{2} \rho P_K, \quad (4.25)$$

gdzie

$\xi$  - współczynnik oporów miejscowych  
 $w$  - prędkość przepływu.

Zmiany gęstości czynnika roboczego w zbiorniku określa równanie (4.11). Po przeprowadzeniu opisanych uprzednio przekształceń i rozwiązaniu układu powyższych równań otrzymuje się równanie elementu podstawowego.

$$\begin{bmatrix} m_K \\ P_K \\ s_K \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} m_{K-1} \\ P_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \dot{m}P_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

W równaniu tym współczynniki macierzy  $[A]$  i  $[B]$  mają następującą postać

$$a_{11} = \frac{\dot{m}_{K-1}}{\dot{m}_K s} \quad a_{12} = a_{13} = 0$$

$$a_{21} = \frac{-\dot{s}_{K-1} \dot{m}_{K-1}^2}{2 \Delta P_{K-1} Q_{K-1} P_K} \quad a_{22} = \frac{P_{K-1}}{2 P_K} \quad a_{23} = 0$$

$$a_{31} = \frac{\dot{m}_{K-1} (s_{K-1} - s_K)}{\dot{m}_K s_K s} \quad a_{32} = 0$$

$$a_{33} = \frac{\dot{m}_{K-1} s_{K-1}}{\dot{m}_K s_K s}$$

$$b_{11} = -\frac{\dot{m}_{K-1}}{\dot{m}_K} \quad b_{12} = b_{13} = 0$$

$$b_{21} = \frac{\dot{s}_{P_K} \dot{m}_{P_K}^2}{2 \Delta P_K Q_{P_K} P_K} \quad b_{22} = \frac{P_{P_K}}{2 P_K} \quad b_{23} = 0$$

$$b_{31} = \frac{-\dot{m}_{P_K} (s_{P_K} - s_{P_K})}{\dot{m}_K s_K s} \quad b_{32} = 0 \quad b_{33} = \frac{-\dot{m}_{P_K} s_{P_K}}{\dot{m}_K s_K s}$$

Zawarte w elementach wartości są wielkościami dla stanu ustalonego.

Równania dla elementu pomocniczego mają ten sam charakter co elementy pomocnicze dla struktury podstawowej opisującej urządzenie przepływowe i nie będą bliżej omawiane.

Dla odwzorowania elementów pojemnościowych posiadających większą ilość wejść i wyjść potrzebne są dodatkowe struktury podstawowe, których zadaniem jest sumowanie doprowadzanych i odprowadzanych strumieni.

Równanie macierzowe struktury sumującej strumienie przedstawione zostanie w p. 4.3.2. Schemat połączeń struktur podstawowych dla takiego układu można znaleźć na rys. 4, dotyczącym opisu walozaka.

#### 4.2.2. Czynniki roboczy dwufazowy

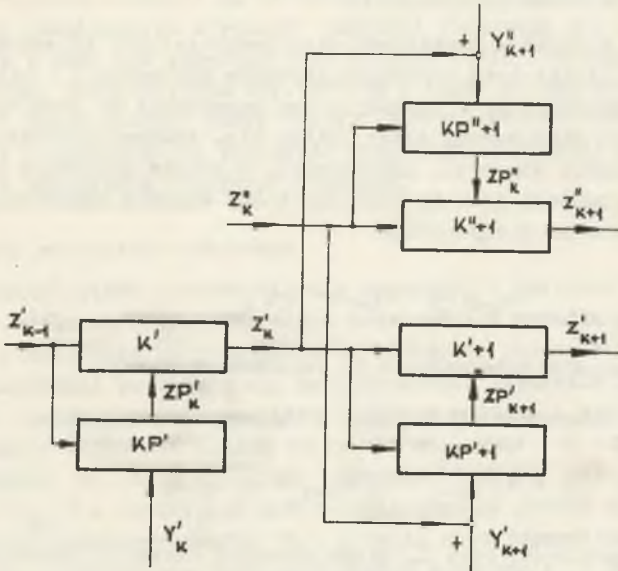
Schemat połączeń struktur podstawowych dla złożonych urządzeń pojemnościowych z dwufazowym wypełnieniem może posiadać bardzo różnorodną budowę, w zależności od modelowanego układu.

Przykładowo zostanie rozpatrzony model jednego, z najbardziej złożonych urządzeń pojemnościowych, jakim jest walozak. Dla pełnego informatycznego opisu walozaka proponuje się następujący schemat połączeń struktur podstawowych przedstawiony na rys. 4.

Poszczególne wektory na rys. 4 oznaczają:

$z'_{K-1}$  - wektor zmiennych stanu wody powracającej w mieszaninie parowo-wodnej z ekranu

- $Y'_k$  - wektor zmiennych stanu wody zasilającej walozak
- $Z'_k$  - wektor zmiennych stanu pary powracającej z ekranu
- $Z''_{k+1}$  - wektor zmiennych stanu pary w walozaku
- $Z''_{k+1}$  - wektor zmiennych stanu wody w walozaku.



Rys. 4. Struktura opisu walozaka

Wektor  $Y''_k$  reprezentuje odprowadzany strumień pary, oddziaływania z zewnątrz spowodowane zmienną ciśnienia pary od strony turbiny oraz oddziaływania pochodzące od wypełnienia wodnego walozaka. Podobnie wektor  $Y'_{k+1}$  ujmuje odprowadzany do rur opadowy strumień wody i oddziaływanie wypełnienia parowego na część wodną.

Zadaniem struktury podstawowej "K" jest sumowanie doprowadzonych strumieni wody zasilającej i z ekranów. Struktura podstawowa do sumowania strumieni będzie omówiona w następnym punkcie. Struktury  $K'+1$  oraz  $K''+1$  opisujące wypełnienia walozaka można potraktować jako zbiornik z wypełnieniem jednofazowym. Zagadnienie to zostało omówione w poprzednim punkcie.

Podany przykład wskazuje na elastyczność w modelowaniu złożonych układów pojemnościowych przy wykorzystaniu struktury podstawowej. Schemat połączeń struktur ustala się w zależności od budowy urządzenia, oddziaływań zewnętrznych i rodzaju wypełnienia.

### 4.3. Pozostałe urządzenia

W zakończeniu opisów realizacji modelowania przy pomocy struktury podstawowej omówione zostaną pozostałe urządzenia nie posiadające charakteru przepływowego lub pojemnościowego. Ponadto omówi się zagadnienie sumowania i dzielenia strumienia roboczego oraz funkcje specjalne.

#### 4.3.1. Urządzenia opisane statycznie

Urządzenie bez wyraźnego charakteru przepływowego lub pojemnościowego znamionuje bardzo krótki czas przepływu czynnika roboczego i nieznaną akumulacją masy lub energii. W związku z tym urządzenia te mogą być opisane statycznie. Są nimi zawory pompy, klapy itp. Poniżej zostanie podany opis pompy przy pomocy struktury podstawowej. W pompie przyjmuje się przepływający czynnik roboczy jako nieściśliwy i bez wzrostu temperatury. Równanie mocy pompy ma wtedy postać

$$\dot{m}_{K-1}(P_K - P_{K-1}) = L_K \varrho_K \quad (4.27)$$

$L_K$  - moc mechaniczna przekazywana do czynnika roboczego.

Po linearyzacji i transformacji Laplace'a uzyskuje się równanie

$$R p_K = R_1 p_{K-1} + R_2 \dot{m}_{K-1} + R_3 L_K \quad (4.28)$$

Po wyrażeniu doprowadzonej mocy  $L_K$  przez strumień entropii otrzymuje się równanie macierzowe dla elementu podstawowego.

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_K \\ p_K \\ s_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{R_2}{R} & \frac{R_1}{R} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_{K-1} \\ p_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_3}{R} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m} p_K \\ p p_K \\ s p_K \end{bmatrix},$$

gdzie

$$R = \dot{m}_{K-1} p_K \quad \frac{\text{kg}^2}{\text{ms}}$$

$$R_1 = \dot{m}_{K-1} p_{K-1} \quad \frac{\text{kg}^2}{\text{ms}}$$

$$R_2 = \dot{m}_{K-1} (P_{K-1} - P_K) \quad \frac{\text{kg}^2}{\text{ms}^2}$$

$$R_3 = Q_K L_K \quad \frac{\text{kg}}{\text{ms}}.$$

Podane we wzorach wartości są wielkościami stanu ustalonego. Doprowadzony do elementu podstawowego strumień entropii obliczany jest w elemencie pomocniczym i może być wyrażony jako funkcja takich zmiennych jak liczba obrotów pompy, napięcie, prąd itp. Wynika z tego, że dynamikę napędu elektrycznego i mechanicznego pompy opisuje element pomocniczy.

Podobnie rozpatruje się pozostałe urządzenia tej grupy występujące bezpośrednio w strumieniu czynnika roboczego.

#### 4.3.2. Węzły strumienia roboczego

Pod pojęciem węzła przedstawia się sumowanie i dzielenie strumienia roboczego. W węźle nie występuje żadna pojemność. W wypadku sumowania się strumieni w zbiorniku miejsce łączenia strumieni przenosi się przed zbiornik i analogicznie postępuje się przy wypływie. Zbiornik rozpatruje się wtedy jako urządzenie pojemnościowe o jednym wejściu i wyjściu. W miejscach łączenia większych ilości strumieni sumowanie ich odbywa się kaskadowo to znaczy, że każda struktura podstawowa sumuje dwa strumienie.

Wektor " $Z_{K-1}$ " w strukturze podstawowej określa główny strumień czynnika roboczego, natomiast wektor " $Y_K$ " opisuje stan doprowadzonego strumienia "G". " $Z_K$ " przedstawia stan połączonego strumienia. W prostym przypadku sumowania podobnych pod względem stanu termodynamicznego strumieni można przyjąć następujące równania bilansu:

$$\dot{m} = \dot{m}_{K-1} + \dot{m}_G \quad (4.30)$$

$$\dot{m}_K s_K = \dot{m}_{K-1} s_{K-1} + \dot{m}_G s_G + \Delta s. \quad (4.31)$$

Po wykonaniu omawianych już przekształceń otrzymujemy równanie macierzowe dla elementu pomocniczego i podstawowego

$$\begin{bmatrix} mP_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{K-1} \\ p_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mG \\ pG \\ sG \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_K \\ p_K \\ s_K \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \dot{m}_{K-1} \\ p_{K-1} \\ s_{K-1} \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \dot{m}P_K \\ pP_K \\ sP_K \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

gdzie

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{\dot{m}_{K-1}}{\dot{m}_K} & a_{12} &= a_{13} = 0 \\ a_{21} &= 0 & a_{22} &= 1 \quad a_{23} = 0 \\ a_{31} &= \frac{\dot{m}_{K-1} (s_{K-1} - s_K)}{\dot{m}_K s_K}, & a_{32} &= 0 \quad a_{33} = \frac{\dot{m}_{K-1} s_{K-1}}{\dot{m}_K s_K} \\ b_{11} &= \frac{\dot{m}P_K}{\dot{m}_K} & b_{12} &= b_{13} = b_{21} = 0, \\ b_{22} &= 1, \quad b_{23} = 0, & b_{31} &= \frac{\dot{m}P_K (sP_K - s_K)}{\dot{m}_K s_K}, \\ b_{32} &= 0, & b_{33} &= \frac{\dot{m}P_K sP_K}{\dot{m}_K s_K}. \end{aligned}$$

Zawarte we wzorach wielkości odnoszą się do stanu ustalonego. Bardziej złożoną postać równań (4.30), (4.31) otrzymuje się, gdy stany sumowanych strumieni różnią się znacznie parametrami jak ciśnienie, temperatura, prędkość. Uwzględnić wtedy trzeba zjawiska rozprężania czynnika, wzrostu entropii na skutek mieszania się czynników różno-temperaturowych, zjawisko powstawania tak zwanego filmu np. we wtryskiwaczach schładzających parę. Wszystkie przytoczone zjawiska dają się ująć w sposób informatyczny strukturą podstawową.

#### 4.3.3. Funkcje specjalne

Oprócz wymienionych zadań struktura podstawowa pozwala również realizować funkcje specjalne jak czas martwy i nieliniowości rodzaju statycznego. Odzworowanie czasu martwego przy przeprowadzaniu obliczeń w zakresie częstotliwości nie nastrocza poważniejszych trudności.

Równanie elementu czasu martwego w dziedzinie zespolonej ma postać

$$G = e^{-sT} . \quad (4.34)$$

Przeprowadzenie opisu typowego elementu martwego, jakim jest np. taśmo-ciąg lub rurociąg, wymaga zastąpienia współczynników znajdujących się na przekątnej macierzy  $(a_{11}, a_{22}, a_{33})$  przez wzór (4.34). Równanie macierzowe elementu podstawowego powoduje odpowiednie zgodne z wartością czasu martwego "T" przesunięcie fazowe charakterystyki. Wartość amplitudy w tym przypadku nie ulega zmianie.

Zagadnienie statycznej nieliniowości ze względu na dużą różnorodność charakterystyk, dowolność miejsca ich wystąpienia jest bardzo złożonym problemem i nie będzie bliżej omawiane. W celu uwzględnienia tych nieliniowości proponuje się poniższy ogólny tok postępowania. Realizację nieliniowości przejmuje struktura podstawowa, a dokładniej jej element pomocniczy. Współczynniki macierzy [C] lub [D] równania elementu pomocniczego mają wtedy postać funkcji nieliniowej  $F = f(Z_{K-1}, Y_K)$ . Obliczony równaniem elementu pomocniczego wektor "ZP<sub>K</sub>" po wprowadzeniu do równania elementu podstawowego wpływa, zależnie od swojej wielkości, na korektę wyjściowego wektora stanu "Z<sub>K</sub>", współczynniki w macierzy [A] i [B] mogą być poznanymi już liniowymi zależnościami dla układów przepływowych lub w wypadku realizacji samej nieliniowości współczynniki znajdujące się po przekątnej równają się jedności.

Otrzymane charakterystyki częstotliwości przy uwzględnieniu elementów nieliniowych są wtedy funkcjami opisującymi.



## 5. NUMERYCZNA METODA OBLICZENIOWA CHARAKTERYSTYK CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH

W rozdziale 3.4 podano szereg ogólnych założeń numerycznej metody obliczeniowej charakterystyk częstotliwościowych. Celem niniejszego rozdziału jest sprycyzowanie toku obliczeń i podanie programu na maszynę cyfrową. Jednolitość struktury podstawowej umożliwia prostą i przejrzystą budowę programu obliczeniowego. Model całości opisywanego układu powstaje przez połączenie struktur podstawowych odwzorowujących kolejne urządzenia, przez które przepływa czynnik roboczy. Połączenie struktur podstawowych, zgodnie z kierunkiem przepływu czynnika roboczego, tworzy rodzaj szkieletu modelu. Układ ten może być w najogólniejszym przypadku układem zamkniętym na wzór układu regulacji. Wszelkiego rodzaju sprzężenia wewnętrzne są realizowane za pomocą wektorów zmiennych pomocniczych "Y<sub>K</sub>".

Zgodnie ze znanym wzorem z teorii regulacji dla dodatniego sprzężenia zwrotnego transmitancja całego układu dana jest przez równanie

$$G = \frac{G_1}{1 - G_1 G_2}, \quad (5.1)$$

gdzie

$G_1$  - transmitancja toru głównego

$G_2$  - transmitancja toru sprzężenia zwrotnego.

Przeprowadzanie obliczeń tym prostym wzorem nie spełnia postawionych w punkcie 2.5 wymagań odnośnie uniwersalności i szybkości obliczeń. Obliczenia żądanej charakterystyki częstotliwościowej wymaga każdorazowo ustalenia transmitancji  $G_1$  i  $G_2$ , co jest związane z dużym nakładem pracy. Oczywiście nie można też jednocześnie (w jednym toku obliczeń) ustalić wszystkich interesujących transmitancji. Obrana metoda obliczeń musi zapewnić wiele stopni swobody w zastosowaniu i wykazywać łatwość w numerycznym opracowaniu.

## 5.1. Założenia metody

Proponowana metoda obliczeń pozornie wydaje się być obszerniejszą niż obliczenie transmitancji za pomocą wzoru (5.1). Stosowanie jej jest w pełni uzasadnione, ponieważ dostarcza ona w jednym toku obliczeń wszystkie możliwe charakterystyki częstotliwościowe dla zadanych wielkości wejścia.

Zmienną wejściową jest wektor zmiennych " $Y_K$ ", który jako wielkość zespolona ma postać

$$Y_K = Y_K^{Re} + j Y_K^{Im} . \quad (5.2)$$

Miejsce przyłożenia wektora zmiennej wejściowej (wymuszenia) do układu jest dowolne i odbywa się przy pomocy zmiennej pomocniczej " $Y_K$ ". Obliczenia należy rozpocząć od struktury podstawowej, w której na element pomocniczy oddziałuje zmienna wejściowa będąca zmienną pomocniczą " $Y_K$ ".

Następnie obliczamy równaniem macierzowym elementu pomocniczego wektor zmiennych " $ZP_K$ ". Kolejnym krokiem jest obliczenie wektora zmiennych " $Z_K$ ", przy czym wektor " $Z_{K-1}$ " jest równy zero. Obliczony wektor " $Z_K$ " stanowi wielkość wejściową dla elementu podstawowego i pomocniczego struktury podstawowej " $K + 1$ ". W dalszym toku obliczeń przeprowadzamy działania na kolejnych strukturach podstawowych do momentu uzyskania stanu stacjonarnego obliczeń przy zadanych wymuszeniu i dla założonej częstotliwości.

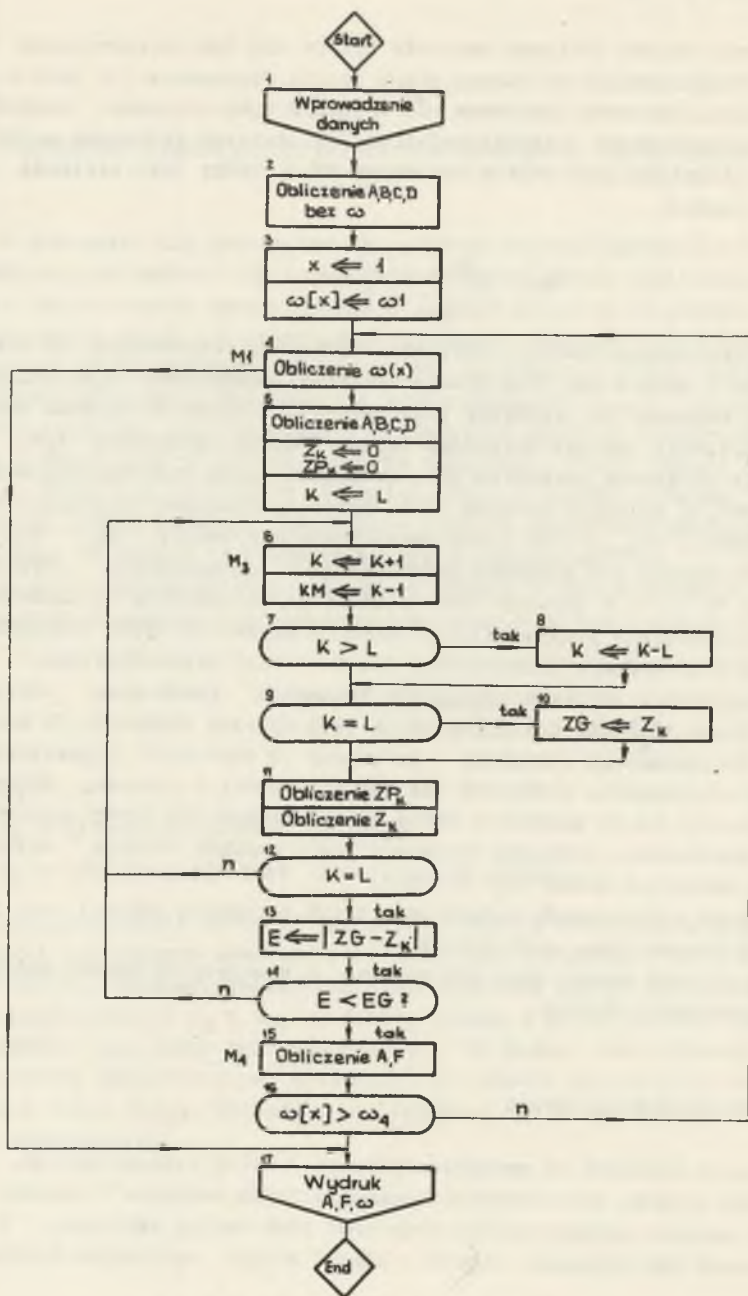
Stan stacjonarny obliczeń ustala się za pomocą porównania wektorów zmiennych stanu " $Z_K$ " dla kolejnych cykli iteracyjnych obliczeń. Po uzyskaniu stanu stacjonarnego obliczeń, to znaczy po uzyskaniu odpowiedniego przedziału dokładności, podwyższa się częstotliwość i ponownie przeprowadza obliczenia aż do uzyskania stanu stacjonarnego dla nowej częstotliwości. Po zakończeniu obliczeń dysponuje się w pamięci maszyny cyfrowej wszystkimi wektorami stanu " $Z_K$ " i " $ZP_K$ ".

Przy pomocy podprogramów możemy przelozżyć otrzymane wektory na inne zmienne jak temperatura, gęstości itp.

Powyżej opisana metoda daje się w łatwy i przejrzysty sposób zaprogramować na maszynie cyfrowej.

## 5.2. Schemat blokowy obliczeń

Organizacja obliczeń na maszynie cyfrowej, według podanej metody, zależy w dużym stopniu od możliwości konwersacyjnych maszyny. W związku z tym podany poniżej schemat należy traktować jako ogólną wytyczną, którą można stosować dla będących obecnie w użyciu maszyn cyfrowych. Maszyny o



Rys. 5. Schemat blokowy obliczeń

rozwiniętej konwersacji upraszczają i poszerzają zakres niniejszej metody. Ogólnie przy ustalaniu schematu blokowego obliczeń należy uwzględnić następujące wymagania:

- uniwersalność i możliwość łatwego dopasowania do modelowanych zagadnień
- proste i przejrzyste programowanie
- swobodny wybór wielkości wejściowych i wyjściowych
- dowolności w określeniu dokładności obliczeń, zakresów częstotliwości i wartości granicznych.

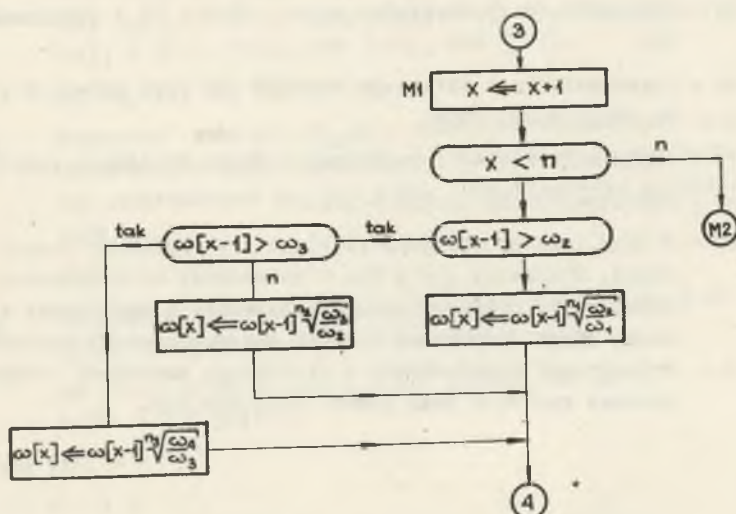
Schemat blokowy programu przedstawiony na rys. 5 składa się z ponumerowanych bloków, które będą krótko scharakteryzowane.

Blok 1 - Wprowadzenie wszystkich danych konstrukcyjnych, technologicznych, częstotliwości, przedziału dokładności, wielkości wejściowych i wyjściowych itp.

Blok 2 - Podprogramy do obliczania współczynników macierzy [A], [B], [C], [D]. Opracowanie podprogramów jest ekonomicznie uzasadnione dla większych układów (powyżej 20 struktur podstawowych). Jednolitość elementów podstawowych i pomocniczych ułatwia opracowanie odpowiednich grup podprogramów.

Blok 3 - Wprowadzenie licznika x i przyrównanie go do jedności oraz wykonanie podstawienia  $\omega[x] := \omega_1$ .

Blok 4 - Obliczanie częstotliwości. Przydanie znaku M1. Rozwinięcie schematu bloku 4 przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy obliczeń częstotliwości

Wielkość  $n_1$  podaje liczbę punktów częstotliwości w zakresie  $\omega_1$  do  $\omega_2$ .

Wielkość  $n_2$  ilość punktów w zakresie od  $\omega_2$  do  $\omega_3$

Wielkość  $n_3$  ilość punktów w zakresie od  $\omega_3$  do  $\omega_4$ .

Przyjęcie takiej reguły obliczania częstotliwości umożliwia podczas obliczeń wygodną zmianę zakresów częstotliwości i dokładności poszczególnych przedziałów.

Blok 5 - Obliczenia współczynników macierzy  $[A] [B] [C] [D]$  dla danej częstotliwości. Przyjęcie wszystkich wektorów stanu  $"Z_K"$  i  $"ZP_K"$  równych zero. Wprowadzenie licznika K i przyjęcie jego wartości równej "L".

Blok 6 - Wykonanie operacji na liczniku  $K := K + 1$  oraz wprowadzenie licznika  $KM := K-1$ . Przydanie znaku M3.

Blok 7 - Sprawdzenie czy K jest większe od L.

Blok 8 - Wykonanie operacji na liczniku  $K := K-L$ .

Blok 7 i 8 zapewniają, że licznik K może być podniesiony tylko do  $K = L$  i następnie powtarza obliczenie od  $K = 1$ . Ponadto licznik KM nie może być równy zero.

Blok 9 - Sprawdzenie czy  $K = L$ .

Blok 10 - Dla  $K = L$  blok przenosi wektor  $"Z_K"$  na wydzielone miejsce w pamięci oznaczone wektorem "ZG".

Blok 11 - Obliczenie wielkości  $"ZP_K"$  oraz wektora  $"Z_K"$ .

Blok 12 - Sprawdzenie czy  $K = L$ .

Blok 13 - Wylczenie modułu różnicy między "ZG" i  $"Z_K"$  oznaczonego przez "E".

Blok 14 - Sprawdzenie czy obliczona wartość "E" jest mniejsza od przedziału dokładności "EG".

Blok 15 - Obliczenie wartości amplitudy i fazy. Przydanie znaku M4.

Blok 16 - Sprawdzenie czy  $\omega [X] > \omega_4$ .

Blok 17 - Wydruk wyników obliczeń wspólnie dla amplitudy fazy i częstotliwości. Przydanie znaku M2. W zależności od stosowanej maszyny odpowiednie podprogramy druku zapewniają praktyczny w zastosowaniu obraz wydruku. Obliczone charakterystyki częstotliwościowe mogą być wyprowadzone w niektórych maszynach bezpośrednio w postaci wykresów przy pomocy monitora x-y.

### 5.3. Program

Zgodnie ze schematem blokowym opracowano program w języku ALGOL 60. Program ten ma postać ogólną, musi być każdorazowo dopasowany do modelowanego układu i zastosowanej maszyny cyfrowej. W celu zapewnienia wglądu w tok obliczeń przewidziano w programie szybką drukarkę wywoływaną słowem STANDART. Drukarka podaje wartości częstotliwości oraz przynależną wartość "E". Ponadto przewidziano kontrolę, która zapewnia wydruk fazy w zakresie od  $0^{\circ}$  do  $-360^{\circ}$  oraz zabezpiecza przed przekroczeniem stanu licznika maszyny.

Równania macierzowe dla elementu podstawowego i pomocniczego podane w programie zostały rozpisane na część rzeczywistą i część urojoną, ponieważ Algol 60 nie zapewnia możliwości bezpośrednich obliczeń na liczbach zespolonych. W zapisie równań została zachowana postać macierzowa.

Ze względu na ogólny charakter programu, podprogramy do obliczeń współczynników macierzy [A], [B], [C] i [D] nie stanowią części składowej niniejszego opracowania.

Pozostałe uwagi zawarte są bezpośrednio w programie po symbolu "comment".

Program obliczeń charakterystyk częstotliwościowych w języku ALGOL 60.

begin

integer X, K, KM, L, n1, n2, n3, n, w, m, F ;

real u1, u2, u3, u4, EG ;

array u [1 : n], ZPR [1 : L, 1 : 3], ZPI [1 : L, 1 : 3], YR [1:L, 1:3], YI [1:L, 1:3], ZR [1:L, 1:3], ZI [1:L, 1:3], AR [1:L, 1:3, 1:3], AI [1:L, 1:3, 1:3], BR [1:L, 1:3, 1:3], DR [1:L, 1:3, 1:3], DI [1:L, 1:3, 1:3], RE [1:w], IM [1:w], A [1:n, 1:w], F [1:n, 1:w], ZGR [1:3], ZGI [1:3];

read u1, z2, u3, u4, n, n1, n2, n3, w, L, EG;

comment wczytanie wektorów  $Y_k$  jako wielkości wejściowych całego systemu oraz uwzględnienie oddziaływania od pozostałych struktur podstawowych np.  $Y_k = Z_{k+3}$  przyjęto trzy składowe wektora  $Y_k$ ;

read Y [1:L, 1:3];

comment wczytanie składowych wektorów wyjściowych RE [1:w] i IM [1:w], w ilość charakterystyk wyjściowych;

read RE [1:w] := ZR [K, 1:3] := ZPR [K, 1:3], IM [1:w] := ZI [K, 1:3] := ZPI [K, 1:3];

X := 1; u [X] := u1 ;

M1: X := X + 1 ;

if X = L then go to M2 ;

begin

if u [X] < u2 then u[X] := u[X-1] x 2.7182<sup>†</sup>(ln(u2/u1)/n1)  
else if u [X] u3 then u [X] := u [X-1] x 2.7182<sup>†</sup>(ln(u3/u2)/n2)  
else u [X] := u [X-1] x 2.7182<sup>†</sup>(ln(u4/u3)/n3) ;

end

standart u [X] ;

comment w tym miejscu programu należy podać wszystkie współczynniki macierzy [A], [B], [C], [D], poniżej przykład dla K=3;

AR [3, 1, 2] := 1 + 32xu [X]<sup>†</sup>2)/(2 + 24 xu [X] 2+64x u [X]<sup>†</sup>4);

for K := 1 step 1 until L do

for m:=1 step 1 until 3 do

ZR [K,m]:=-ZI [K,m] := ZPR [K,m] := ZPI [K,m] :=0.0;

K := L;

M3 : K: = K+1;

KM := K-1;

if K > L then K:=-K-L;

if K = L then

begin

for m: = 1 step 1 until 3 do

begin

ZGR [m] := ZR [K,m];

ZGI [m] := ZI [K,m];

end

end

for m:=1 step 1 until 3 do

for p:= 1 step 1 until 3 do

begin

ZPR [K,m] := CR [K,m,p] x ZR [KM,p] + DR [K,m,p] x YR [K,p] -  
CI [K,m,p] x ZI [KM,p] - DI [K,m,p] x YI [K,p];

ZPI [K,m] := CR [K,m,p] x ZI [KM,p] + DR [K,m,p] x YI [K,p] +  
CI [K,m,p] x ZR [KM,p] + DI [K,m,p] x YR [K,p];

ZR [K,m] := AR [K,m,p] x ZR [KM,p] + BR [K,m,p] x ZPR [K,p] -  
AI [K,m,p] x ZI [KM,p] - BI [K,m,p] x ZPI [K,p];

ZI [K,m] := AR [K,m,p] x ZI [KM,p] + BR [K,m,p] x ZPI [K,p] +

AI [K,m,p] x ZR [KM,p] + BI [K,m,p] x ZPR [K,p];

```

end
if K  $\neq$  L then go to M3;
  for m: = 1 step 1 until 3 do
    E: = abs (ZR [K,m] - ZGR [m]) + abs (ZI [K,m] - ZGI [m]) ;
  standart E ;
  if E > EG then go to M3 ;
  for p: = 1 step 1 until w do
    begin
      comment przyporządkowanie składowych wektorów ZR [K,1:3],
      ZPR [K,1:3] ZI [K,1:3], ZPI [K,1:3], wektorem wyj-
      ściowym.
    
```

przykład:

```
RE [3] = ZR [4,1];
```

```
IM [3] = ZI [4,1] ;
```

end

```
m := 0 ;
```

```
M4: m := m + 1 ;
```

```
if abs RE [m] < 10-8 then
```

```
A [X,m] := F [X,m] := 0.0;
```

else

begin

```
A [X,m] := 4.34 x ln (RE [m]2 + IM [m]2);
```

```
F [X,m] := 57.3 arotan (IM [m]/Re [m]) ;
```

end

```
if RE [m] < 0.0 then F [X,m] := F [X,m] - 180.0
```

```
  else if IM [m] > 0.0 then F [X,m] := F [X,m] - 360.0 ;
```

```
if m w then go to M4 ;
```

```
if u [X] < u4 then go to M1 ;
```

```
M2 : for X: = 1 step 1 until n do
```

```
  for n : = 1 step 1 until w do
```

begin

```
  pisz u [X], A [X,m], F [X,m];
```

```
  comment program druku charakterystyczny dla danej maszyny;
```

end

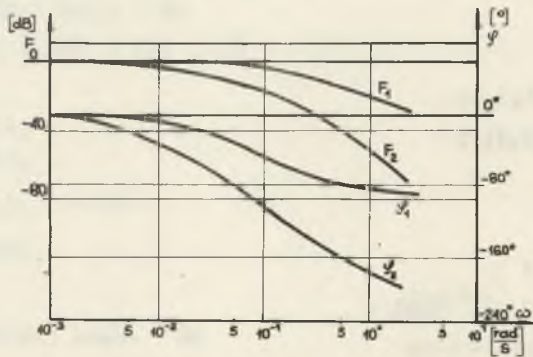
end



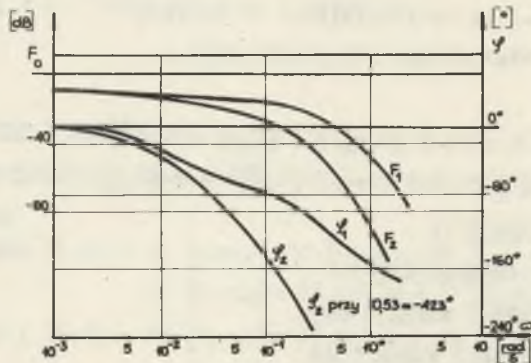
#### 5.4. Przykład zastosowania programu

Na bazie podanego w Algolu 60 programu opracowany został [27] program obliczeń w TAM-ALGOLU obłegu pierwotnego elektrowni atomowej ciśnieniowej Rheinsberg. Obliczenia przeprowadzono na maszynie cyfrowej Minsk 22. Przedział dokładności stosowany w czasie obliczeń wynosił  $\epsilon = 0,001$ . Ilość cykli iteracyjnych obliczeń wahała się zależnie od częstotliwości od 10-20 cykli.

Niektóre z obliczonych charakterystyk częstotliwościowych są przedstawione na rys. 7 i 8. Wielkością wejściową było ciepło wytworzone w rdzeniu reaktora.



Rys. 7. Charakterystyki częstotliwościowe ciepła odprowadzonego: w reaktorze (1), w wytwornicy pary (2)



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa entropii na wyjściu z reaktora (1) na wejściu reaktora (2)

Rysunek 7 przedstawia charakterystykę częstotliwościową dla ciepła odprowadzonego w reaktorze (1) i dla ciepła oddanego do obiegu wtórnego w wylotnicy pary (2).

Rysunek 8 obrazuje charakterystykę częstotliwości dla entropii na wyjściu (1) i na wejściu (2) czynnika chłodzącego z reaktora.

Przebieg charakterystyk na wykresach jest typowy dla tego rodzaju urządzeń i odpowiada danym z literatury. Charakterystyki częstotliwościowe mogą być przeliczone na charakterystyki czasowe przy pomocy odpowiednich podprogramów [32].

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Z przedstawionych w punktach 4 i 5 przykładów realizacji opisu układów cieplnych oraz podanego programu dla maszyny cyfrowej wynika, że opracowana numeryczna metodyka modelowania dynamiki układów cieplnych bloków energetycznych spełnia wymagania punktu 2 niniejszego opracowania. Dzięki przeprowadzonej analizie i dokładnemu określeniu założeń odnośnie metody modelowania było możliwe sformułowanie uniwersalnej metody modelowania.

Uniwersalność metody osiągnięto przez zastosowanie optymalnego wektora zmiennych stanu, jednolitej struktury podstawowej i numerycznej metody obliczeniowej. Proponowana metoda może znaleźć zastosowanie w modelowaniu wszystkich złożonych układów cieplnych wraz z układami regulacji w elektrowniach konwencjonalnych i atomowych. Metodę można rozszerzyć na zagadnienie modelowania pozostałych układów cieplnych oraz układów wykazujących ciągły charakter procesu technologicznego jak obiekty chemiczne, przemyśl spożywczy itp. W ramach modelowanego układu można dowolnie zmieniać samą strukturę odwzorowywanego obiektu, układ regulacji oraz rodzaj rozwiązywanych problemów. Wprowadzenie tych zmian nie pociąga za sobą większych nakładów pracy. Uniwersalność metody potwierdza fakt, że podczas jednego cyklu obliczeń można uzyskać pełną informację o badanym układzie, to znaczy dowolną ilość interesujących charakterystyk częstotliwościowych.

Omawiana metoda modelowania składa się z kolejnych logicznych etapów, których celem jest możliwie dokładne odwzorowanie obiektu. Nadaje to metodzie dużą przejrzystość i łatwość posługiwania się nią. Przejrzystość metody widoczna jest nie tylko w trakcie opracowania, ale także podczas jego praktycznego wykorzystania zapewniając jednoznaczne otrzymanieżądanego wektora stanu. Przejrzystość jest szczególnie ważna w zagadnieniu numerycznego odwzorowania modelu na maszynie cyfrowej. Jednolitość wektora i struktury podstawowej, to znaczy ograniczenie liczby rodzajów zmiennych i strukturalnych powiązań, umożliwia organizacyjne opracowanie opisu na MC złożonych układów cieplnych. Organizacyjna przejrzystość programu i obliczeń umożliwia szybkie odszukanieżądanego miejsca w programie (w modelowanym układzie) przeprowadzenie odpowiednich zmian i wyprowadzenie potrzebnych informacji. Opracowany program daje się łatwo przystosować do spotkanych w praktyce problemów.

Zależnie od dokładności posiadanych danych o wielkościach statycznych metoda umożliwia przez zmianę liczby zastosowanych struktur podstawowych uzyskać pożądaną dokładność odwzorowania. Jednocześnie zmiana liczby sto-

sowanych struktur podstawowych zezwala na dowolną rozbudowę lub redukcję opisu w zależności od rozwiązywanego problemu i pojemności maszyny cyfrowej.

Metoda gwarantuje także zmienną dokładność prowadzonych obliczeń przez dobór wartości przyrostu częstotliwości i przedziału dokładności.

Dzięki wprowadzaniu jednolitych struktur podstawowych i powtarzalności ich sformułowań można osiągnąć wysoką ekonomiczność i intensywność prowadzonych prac nad zbudowaniem modelu. Z kolei możliwość zastosowania opracowanego modelu do rozwiązywania kompleksowych problemów jest istotną zaletą przedstawionej metody. Każdorazowe rozwiązanie danego zagadnienia prowadzi do niskich nakładów i zapewnia krótki cykl realizacji. Dzięki temu można rozpatrywać nieograniczoną ilość wariantów optymalizacyjnych i strukturalnych badanego układu.

Przy pracach nad budową i następnie przy posługiwaniu się modelem jest możliwe angażowanie w większym stopniu niż normalnie średniego personelu technicznego.

Reasumując powyższe wnioski metoda charakteryzuje się uniwersalnością przejrzystością, dokładnością, ekonomią, łatwością zastosowania i powinna znaleźć szerokie zastosowanie przy prowadzeniu kompleksowych badań modelowych.

Aktualnie metoda numerycznego modelowania dynamiki układów cieplnych jest wprowadzona przy modelowaniu kotła konwencjonalnego w ramach współpracy Politechniki Śląskiej z CBKK w Tarnowskich Górach i układu cieplnego elektrowni atomowej w JASE we Wrocławiu.

## LITERATURA

1. Albrecht P.: Zur Lösung Linearer partieller Differentialgleichungen mittels moderner Rechenanlagen, Elektron. Rechenanlagen 10/1968/ H.G.
2. Atary J., Shah M.: Modelling and analytical control system Design of a complete nuclear power plant prototype VIFAC Paris 1972 S. 6.1.
3. Annino I.S., Del Bigio G.P.: APACHE Analog Programmierung und Cheeking Programmers Manual, Eurato - CCR, Ispra C.E.T.I.S.
4. Berlemont V., Debelle J., Foureau A., Vazquez R., Waba J.: Modele mathematique d'une chaudiere a ballon.
5. Chien E., Liny L.: Dynamische Analyse eines Kessels Trans. ASME, Band 80, Seite 1809 - 1819, November 1958.
6. Chorowski B., Piksa A.: Opracowanie teoretyczne z podaniem jednolitych metod obliczeń dynamiki kotłów. Protokół Nr 12/68. Maszynopis opracowany na zlecenie CBKK Tarnowskie Góry.
7. Daniels J.H., Enns M., Hottenstine R.D.: Dynamic Representation of a Large Boiler-Turbine Unit - An Asme Publication - Paper Number, GI-SA-69.
8. Eigner H.: Dynamics of small perturbation... V IFAC Paris 1972 S. 6.4.
9. Enns M.: Comparison of Dynamic Models of a Superheater. Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer - November 1962. Str. 375-385.
10. Ferenc M., Ober J.: Stan rozwoju modelowania matematycznego dynamicznego układu cieplnego elektrowni parowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Energetyka".
11. Feretic D.: Dynamic analysis of counterflow and parallelflow heat exchanger, Atomkernenergie (ATKE) Bd. 16/1970; Lfg. 91.
12. Gawrilow P.A., Sielibierstwo B.N.: K woprosu dynamiki jediernych energetooskieskich ustanowok U.D.K. 621.039.55.
13. Haase R.: Thermodynamik der Irreversiblen Prozesse. Dr Dietrich Steinkopf Verlag Darmstadt 1963.
14. Hintergräber M.: Analogrechneruntersuchungen über das Zeitverhalten eines Dampferzeugers mit Zwangsdurchlauf für Gasgekühlte Reaktoren, 5<sup>th</sup> International analogue computation meetings.
15. Höld A., Stahl D.: Analytisches Modell zur Beschreibung des Frequenzgang und Stabilitätsverhaltens eines Leichtwassermoderierten Druckwasserreaktors, Atomkernenergie (ATKE) Bd. 17 (1971) Lfg 3.
16. Iserman R.: Mathematical Models for the Dynamic Behaviour of Steam Heated Exchangers, IFAC Warszawa 1969 s. 47.
17. Itoh K., Fujii M., Ohne H., Sagora K.: Comparison of Dynamics Natural Circulation Boiler and Forced Circulation Boiler, IV Kongres IFAC Warszawa 1969 s. 47.
18. Jasehek H., Neuenhahn P.: Analytisches Modell zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Druckwasserreaktoren mit Selbstdruckhaltung, Atomkernenergie (ATKE) Bd. 16/1970/Lfg 2.
19. Kwan H., Anderson J.M.: A mathematical model of a 200 MW boiler. J. Control 1970 vol. 12. No 6 s. 977-998.
20. Ledinegg M.: Die Zweiphasenströmung, Mitteilungen der VGB 50. Heft 3 Juni 1970.

21. Mason P., Price P.H.: The design of an economical real time simulator of a two phase heat exchanger, 5<sup>th</sup> International analogue computation meetings.
22. Nahavandi A.N., Hallen R.: A space - Dependent Dynamik Analysis of Boiling Water Reaktor Systems, Nuclear Sciences and Engineering 20. 1964.
23. Nahavandi A.H., Makkenohery S.: An improved pressurizer model with bubble rise and con-den-sate drop dynamics, Nuclear engineering and design 12 (1970) 135-147. North-Holland Publishing Company.
24. Ober J. Beitrag zur Systembeschreibung vom Kreisläufen in Kernkraftwerken. Dissertation TH Magdeburg 1971.
25. Ober J.:Dynamische Beschreibung des Verdampfungssystems des 350 t/h KW Lübbenau. Bericht der Abt T. 2.5 des Institutes für Kraftwerke, 1967.
26. Ober J.: Entropie als Zustandsvariable bei der Beschreibung von Kraftwerksprozessen. IFK - Information Vetschau Heft 58/1972.
27. Ober J.: Theoretische Berechnung der Frequenzgänge des Primärkreislaufes des Kernkraftwerk Rheinsberg IFK-Information Vetschau Heft 61/1972.
28. Rakowski J., Waglowski S., Duda M.: Opracowanie modelu matematycznego kotła OP-230. Opracowanie Instytutu Energetyki nr 5004, Warszawa 1965.
29. Reinhart A.: On the equation system for the transient analysis for the ringen nuclear power plant, Atomkernenergie (ATKE) Bd. 16/1970) 'Lfg. 2.
30. Stark K.: Optimal feedback control of a pressurized water reaktor, V IFAC Paris 1972 S. 6.4.
31. Szumskaja L.S.: Osnownyje regulirujemyje parametry barabannyh kotłůw pri niestacionarnych rezimach. Zbiór artykułůw - Gosenergeizdat 1961.
32. Tensfeld C.: Das Übergangsverhalten von Gegenstrom -Wärmeaustauschern Atomkernenergie (ATKE) 14 Jg. (1969) H. 4.
33. Wayne Chase L., Heidel M.Ch., Heidmann E.P.: Heat - Transport Systems Steam - Electric Plant Fast Reaktor Technology Plant Design The M.I.T Press 1966.
34. Electricite de France: Service des Etudes et Recherches Nucleaires, Themiques et Hydrauliques Departement Mecanique Theorique. Mai 1967.

## S t r e s z o z e n i e

Praca opisuje uniwersalną numeryczną metodę modelowania dynamiki układów cieplnych konwencjonalnych i atomowych blokach energetycznych.

Ustala optymalny wektor stanu opisu czynnika roboczego, następnie formułuje jednolitą strukturę podstawową umożliwiającą opis spotykanych w energetyce układów cieplnych. Podaje także sposób realizacji opisu i przykłady zastosowania metody.

Zamieszczony w zakończeniu pracy program można łatwo dopasować do modelowanego układu. Niniejsza metodyka daje dużą przejrzystość w modelowaniu, ułatwia obliczenia oraz znacznie zintensyfikuje prowadzenie prac.

## S u m m a r y

The work presents an universal numerical method of the dynamic behaviour modelling of the heat transfer systems in conventional and nuclear electrical plants. The method establishes an optimal space state vector for working mediums state description, then formulate an uniform basic structure which enables the description of the most heat transfer systems existing in electrical plants. Examples are given how to use the method. In the last part of the work an ALGOL 60-language program is given, which can be easily used for modelling purposes of particular systems. The above method is built from logical steps and is practical and efficient in application.

## С о д е р ж а н и е

В работе представлен универсальный численный метод моделирования динамического поведения тепловых систем конвенциональных и атомных электростанций. Метод устанавливает оптимальный вектор состояния для описания рабочей жидкости, затем метод формулирует одну основную структуру, которая дает возможное описание тепловых систем, существующих в энергетике.

В работе представлены примеры практического использования метода. Представленная в заключении работы программа на языке ALGOL может быть непосредственно приспособлена к решению конкретной проблемы.

Указанный метод построен логически и он мощный и эффективен в решении практических задач моделирования динамического поведения тепловых систем.



## ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

ukazują się w następujących seriach:

- A. AUTOMATYKA
- B. BUDOWNICTWO
- Ch. CHEMIA
- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICtwo
- H. HUTNICTWO
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA
- JO. JĘZYKI OBCE
- MF. MATEMATYKA-FIZYKA
- M. MECHANIKA
- NS. NAUKI SPOŁECZNE
- O. ORGANIZACJA

Dotychczas ukazały się zeszyty  
serii E.

Elektryka z. 1, 1954 r., s. 76, zł 9,10	Elektryka z. 20, 1966 r., s. 184, zł 13,—
Elektryka z. 2, 1956 r., s. 82, zł 11,—	Elektryka z. 21, 1966 r., s. 263, zł 16,—
Elektryka z. 3, 1956 r., s. 102, zł 14,50	Elektryka z. 22, 1967 r., s. 114, zł 7,—
Elektryka z. 4, 1957 r., s. 113, zł 21,75	Elektryka z. 23, 1968 r., s. 113, zł 7,—
Elektryka z. 5, 1959 r., s. 152, zł 20,—	Elektryka z. 24, 1969 r., s. 184, zł 10,—
Elektryka z. 6, 1960 r., s. 131, zł 23,45	Elektryka z. 25, 1969 r., s. 134, zł 8,—
Elektryka z. 7, 1961 r., s. 42, zł 3,40	Elektryka z. 26, 1969 r., s. 82, zł 5,—
Elektryka z. 8, 1961 r., s. 147, zł 11,30	Elektryka z. 27, 1970 r., s. 341, zł 19,—
Elektryka z. 9, 1961 r., s. 128, zł 26,25	Elektryka z. 28, 1970 r., s. 303, zł 16,50
Elektryka z. 10, 1961 r., s. 52, zł 3,90	Elektryka z. 29, 1971 r., s. 150, zł 8,50
Elektryka z. 11, 1961 r., s. 128, zł 22,80	Elektryka z. 30, 1971 r., s. 110, zł 7,50
Elektryka z. 12, 1962 r., s. 162, zł 12,20	Elektryka z. 31, 1971 r., s. 380, zł 23,50
Elektryka z. 13, 1962 r., s. 127, zł 9,80	Elektryka z. 32, 1972 r., s. 111, zł 8,—
Elektryka z. 14, 1963 r., s. 157, zł 9,40	Elektryka z. 33, 1972 r., s. 146, zł 10,—
Elektryka z. 15, 1963 r., s. 58, zł 3,50	Elektryka z. 34, 1972 r., s. 58, zł 5,—
Elektryka z. 16, 1963 r., s. 219, zł 11,40	Elektryka z. 35, 1972 r., s. 150, zł 10,—
Elektryka z. 17, 1964 r., s. 272, zł 15,60	Elektryka z. 36, 1973 r., s. 136, zł 8,—
Elektryka z. 18, 1964 r., s. 161, zł 8,30	Elektryka z. 37, 1973 r., s. 299, zł 21,—
Elektryka z. 19, 1964 r., s. 119, zł 6,50	Elektryka z. 39, 1973 r., s. 376, zł 25,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA  
Politechniki Śląskiej

P 3347 | 73