

Andrzej MILLER

Politechnika Warszawska

## KONCEPCJA KOMPLEKSOWEGO MODELU DYNAMIKI TURBINY

**Streszczenie.** Podano wymagania stawiane modelowi kompleksowemu dynamiki turbiny. Przedstawiono szeroki zakres zastosowań modelu w praktyce. Omówiono strukturę modelu kompleksowego i jej podstawowe moduły.

### 1. Wstęp

Ze względów bezpieczeństwa wynika potrzeba znacznie dokładniejszej niż w przypadku elektrowni konwencjonalnych znajomości właściwości dynamicznych urządzeń i zespołów elektrowni jądrowej, w tym turbiny i urządzeń bezpośrednio z nią związanych, tj. turbozespołu. Niezbędne jest tu określenie charakterystyk dynamicznych turbozespołów na drodze obliczeniowej, co wymaga rozwinięcia nowych metod i uwzględnienia specyficznych cech tych zespołów maszyn i urządzeń. Potrzebne jest tu opracowanie odpowiednich, nieliniowych modeli matematycznych i właściwych metod ich realizacji na maszynach cyfrowych (EMC) czy hybrydowych.

Przez wyznaczanie charakterystyk statycznych i dynamicznych turbozespołu rozumiane jest tu określenie osiąggów i parametrów cieplno-przepływowych w turbozespole i jego elementach (turbina parowa, układ regeneracji, zespół wymienników ciepłowniczych - jeśli występuje, układ rozruchowy i układ obejść turbiny, separator - przegrzewacz pary, skraplacz) przy praktycznie dowolnych, ogólnie rozumianych zmianach warunków pracy i działaniu różnych zakłóceń, zadawanych tak statycznie jak i dynamicznie. System modeli matematycznych dla określania takich charakterystyk turbozespołu nazwano umownie modelem kompleksowym.

### 2. Przeznaczenie i zastosowanie systemu

Rozpatrywany system modeli matematycznych i związany z ich realizacją system programów na EMC przeznaczony jest do wykorzystania zasadniczo w instytucjach projektujących, budujących i eksploatujących rozważone turbozespoły. Rys. 1 ilustruje schematycznie szeroki zakres możliwych zasto-

sowań systemu. Jako przykład wybrano tu turbinę, jednak zestawienie to dotyczy zasadniczo również i turbozespołu oraz jego elementów innych niż turbina.

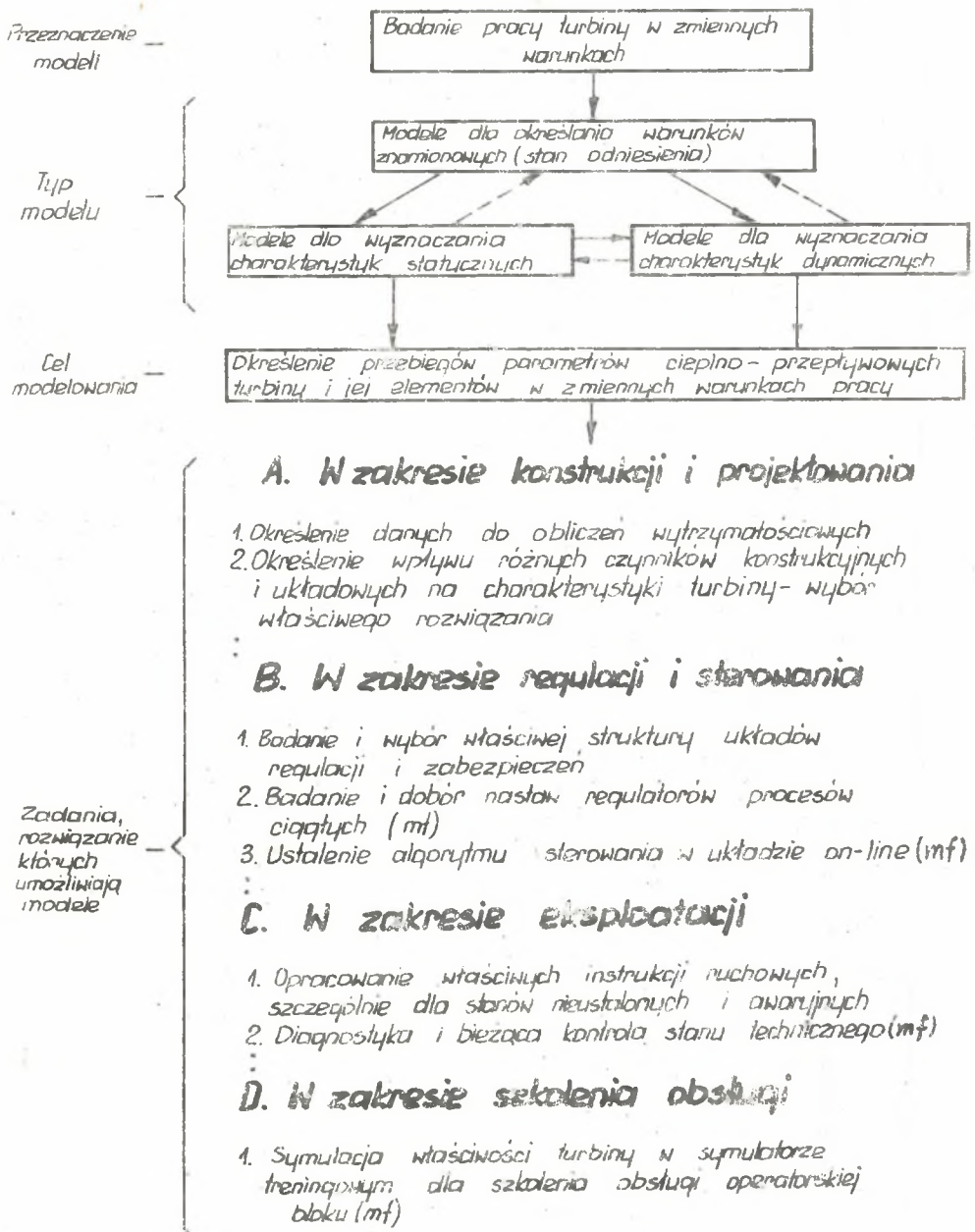
Wyróżniono tu trzy typy modeli matematycznych: dla określenia warunków znamionowych oraz dla wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych. Warunki znamionowe są tu zwykle przyjmowane jako stan odniesienia. Linie ciągle ilustrują typowe powiązania między modelami. Linie przerywane odpowiadają ogólniejszej sytuacji, kiedy warunki znamionowe wybierane są przy uwzględnieniu wymagań związanych z pracą w zmiennych warunkach np. w przypadku turbozespołów i turbin ciepłowniczych. Modele dla określenia warunków znamionowych nie są tu rozpatrywane (odpowiednie informacje znaleźć można np. w pracy [1]), a wykorzystywane dalej informacje odnośnie warunków znamionowych i konstrukcji traktowane są jako dane. Modele dla wyznaczenia charakterystyk statycznych dane są zwykle w postaci układu nieliniowych równań i nierówności algebraicznych, natomiast modele w zakresie charakterystyk dynamicznych - w postaci układu równań różniczkowych, zwykle zwyczajnych, nieliniowych oraz nieliniowych równań i nierówności algebraicznych.

Modele te umożliwiają mają określenie przebiegów parametrów cieplno-przepływowych (w tym wydłużeń cieplnych kadłubów, wirników i wydłużeń względnych, naprężeń w elementach kryterialnych oraz siły osiowej w turbinie) w turbozespołe i jego elementach przy praktycznie dowolnych, ogólnie rozumianych zmianach warunków pracy, w tym w trakcie rozruchów i odstawiania, przy pracy ze zmiennym obciążeniem oraz przy rozmaitych zakłóceniach ruchowych i wybranych zakłóceniach awaryjnych.

Znajomość tych przebiegów pozwala z kolei na rozwiązanie szeregu zadań praktycznych, których przykłady zestawiono na rys. 1. Widać więc, że zastosowania rozpatrywanego systemu modeli i programów mają zarówno charakter poznawczy w zakresie badania pracy turbozespołów w zmiennych warunkach jak i stosowany, dotyczący konstrukcji i projektowania, regulacji i sterowania, eksploatacji czy nawet szkolenia obsługi. Symbol (mf) w zestawieniu na rys. 1 oznacza modelowanie matematyczno-fizyczne, w przypadku którego model matematyczny współpracuje z konkretnym urządzeniem. Przedstawione na rys. 1 przykładowe zestawienie zawiera zarówno takie zadania, które całkowicie rozwiązywane są przez omawiane modele oraz inne, w których rozpatrywane modele i wyniki uzyskane przy ich pomocy stanowią jeden z elementów branych pod uwagę w rozważaniach.

### 3. Koncepcja i zasady budowy modelu kompleksowego

Opracowanie rozpatrywanego modelu kompleksowego jest trudnym zadaniem nie tylko ze względu na to, że zagadnienia pracy turbozespołów w zmiennych warunkach należą do najslabiej poznanych, o nieuporządkowanych czę-



Rys. 1

sto metodach obliczeniowych. Poszukiwanemu systemowi modeli i programów stawia się z jednej strony do rozwiązania różnorodne zadania praktyczne (rys. 1), z drugiej zaś zadania te rozwiązywane być powinny zasadniczo bez ograniczeń rodzaju zmian warunków pracy, co narzuca szereg, częściowo przeciwnych, bardziej szczegółowych wymagań, które powinien spełniać model kompleksowy.

Analizy różnych możliwości budowy modelu kompleksowego [2] wykazały w związku z tym, że obie narzucające się koncepcje opracowania jednego, uniwersalnego modelu dla wszystkich zadań i typów zmian warunków pracy lub przygotowania oddzielnych modeli dla każdego zadania i rodzaju zmian warunków pracy nie mogą być przyjęte.

Wydaje się natomiast, że poszukiwany model i program powinien mieć budowę modułową, przy czym poszczególne moduły powinny być możliwie uniwersalne, dające się wykorzystać w różnych przypadkach. Przy tym model i program miałyby zmienną strukturę, zależnie od typu rozwiązywanego zadania. Struktury te byłyby zestawione ze zunifikowanych elementów (modułów). Budowa modułowa i zmienna struktura modelu i programu umożliwiają też etapowe opracowanie poszczególnych elementów. Zakresy prac w poszczególnych etapach można tak dobrać, aby otrzymywane modele i programy stanowiły już z jednej strony związane szeregi zagadnień z zakresu zastosowań, z drugiej zaś były jednocześnie elementami (modułami) docelowego modelu i programu, opracowanego w ostatnim etapie. Umożliwia to bardziej racjonalne wykorzystanie nakładów i efektów pracy badawczej.

Przeprowadzone analizy wykazały też, [2], że poszczególne struktury modelu kompleksowego określone są głównie rodzajem procesów fizycznych, zachodzących w badanych urządzeniach, tj. typem zmian warunków pracy turbozespołu, przy czym rodzaj wykonywanego zadania (rys. 1) ma tu drugorzędne znaczenie.

Z tego punktu widzenia wyróżnić tu należy 4 grupy procesów zmian warunków pracy turbozespołu, zależnie od typu zjawisk fizycznych decydujących o jego przebiegu oraz elementów turbozespołu określających przebieg modelowanego procesu. Analiza głównych cech tych grup pozwala wyróżnić potrzebne moduły modelu kompleksowego.

I grupa - obejmuje procesy zachodzące w trakcie uruchamiania i odstawiania turbozespołu, w zakresie od obciążenia około 20%-30% obciążenia maksymalnego do stanu zimnego turbiny (skrajnie). Procesy te odznaczają się najmniejszą z rozważanych dynamiką zmian parametrów, a czas ich trwania jest rzędu dziesiątków minut. Wobec małych natężeń przepływu i wskazanej powolności całego procesu zagadnienia dynamiki przepływu mają tu małe znaczenie i przepływ może być traktowany jako ciąg stanów ustalonych. Podstawowe znaczenie mają tu procesy wymiany i akumulacji ciepła w metalu turbiny oraz zmiany stanu skupienia wody decydujące o racjonalnym przebiegu procesów i warunkujące czas ich trwania.

II grupa - dotyczy procesów związanych z ustaloną pracą turbozespołu w warunkach zmienionych w stosunku do znamionowych w zakresie obciążeń większych niż wskazane w I grupie procesów. Zjawiska przepływowe mają tu wobec dużych i bardzo dużych natężeń przepływu znaczenie decydujące o przebiegu procesów. Natomiast wymiana ciepła między metalem a czynnikiem roboczym ma znaczenie drugorzędne, stanowiąc zjawisko uboczne. Naprężenia i wydłużenia termiczne są w związku z tym tylko sprawdzone w ramach kontroli ograniczeń. Przebieg procesu określony jest w ramach turbiny i układu regeneracji.

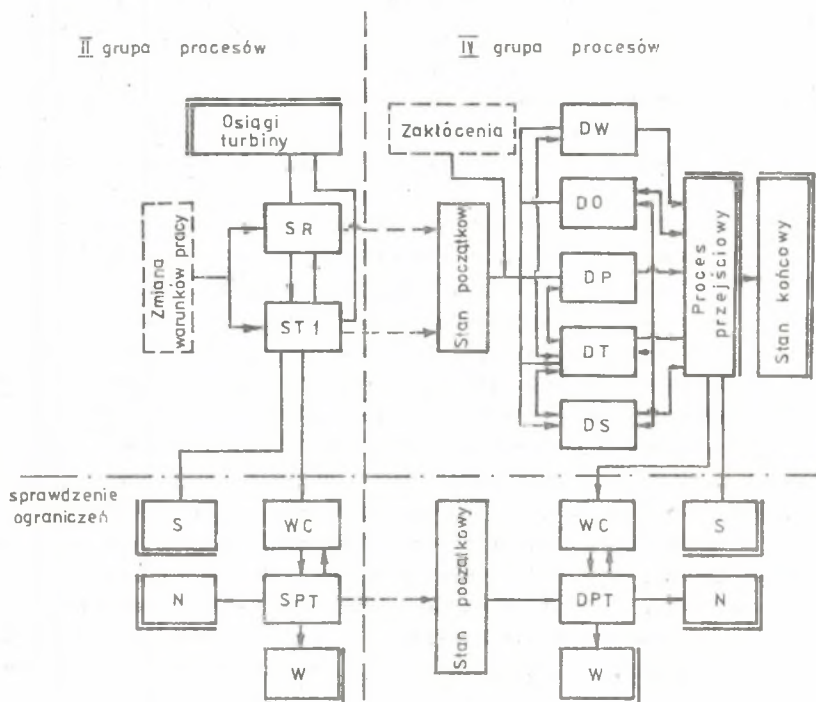
III grupa - związana jest z procesami zachodzącymi w trakcie kontrolowanych zmian obciążenia w zakresie obciążeń jak w II grupie procesów oraz pod wpływem zakłóceń ruchowych wolno zmiennych w czasie. Procesy te zachodzą stosunkowo wolno, przy małej dynamice zmian parametrów. W związku z tym wobec małych stałych czasowych maszyn wirnikowych procesy w nich zachodzące mogą być traktowane quasi-statycznie przy użyciu opisu matematycznego jak w II grupie procesów. Zjawiska akumulacji zachodzą tu intensywnie we wszystkich lub części elementów turbozespołu, których działanie związane jest z wymianą ciepła i masy, co muszą uwzględniać modele tych urządzeń. Przebieg procesu określony jest zasadniczo w ramach turbiny i układu regeneracji.

IV grupa - obejmuje procesy zachodzące pod wpływem znacznych, szybkozmiennych zakłóceń, pojawiających się przy obciążeniu turbiny jak w przypadku II i III grupy procesów. Zakłócenia te wynikają z działania układów regulacji i zabezpieczeń turbozespołu, bądź działania urządzeń współpracujących z turbiną. Uwzględnia się tu też wybrane sytuacje awaryjne. Procesy tej grupy charakteryzują się największą z rozpatrywanych dynamiką zmian parametrów oraz najkrótszym, bardzo intensywnym przebiegiem. Czas ich trwania jest zwykle rzędu kilku do kilkudziesięciu sekund. Zjawiska przepływowe mają tu znaczenie decydujące i muszą być rozpatrywane dynamicznie. Wymiana ciepła między czynnikiem a metalem, jakkolwiek intensywna, nie ma na ogół większego wpływu na przebieg procesu. Podobnie jednak jak w przypadku procesów III grupy, jest ona istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji. W różnych typach procesów IV grupy biorą udział następujące elementy turbozespołu: turbina, system obejść turbiny, separator - przegrzewacz, skraplacz oraz, w ograniczonym stopniu, wymienniki regeneracyjne.

#### 4. Struktura modelu kompleksowego

Na podstawie wskazanego podziału procesów zmian warunków pracy turbozespołu na grupy określić można główne moduły, które powinny być wyróżnione, jak się wydaje, w modelu kompleksowym. Są to następujące moduły: St1 - model statyczny procesów przepływowych w turbinie w zakresie obciążeń wię-

kszych niż 20-30% obciążenia maksymalnego; ST2 - model statyczny procesów przepływowych w turbinie w zakresie obciążeń mniejszych niż w przypadku modułu ST1; DT - model dynamiki procesów przepływowych w turbinie; WC - model wymiany ciepła między czynnikiem roboczym a metalem; SPT - model dla określania ustalonych pól temperatur w elementach kryterialnych; DPT - model dla określania niestabilnych pól temperatur w elementach kryterialnych; N - model dla określania naprężeń w elementach kryterialnych; W - model dla określania wydłużeń linii kadłubów i wirników oraz wydłużeń względnych; S - model dla określania obciążenia łożyska oporowego turbiny; SR - model statyczny układu regeneracji; DP model dynamiki separatora - przegrzewacza; DS - model dynamiki skraplacza; DO - model dynamiki układu obejść turbiny; DW - model dynamiki regeneracyjnego wymiennika ciepła.



Rys. 2. Struktura modelu kompleksowego w przypadku badania II oraz IV grupy procesów (objaśnienie oznaczeń w tekście)

Na rys. 2 przedstawiono strukturę modelu kompleksowego, zestawionego z powyższych modułów, w przypadku badania II (lewa część rysunku) oraz IV grupy procesów. W przypadku II grupy model składa się z 7 zasadniczych modułów, przy czym wszystkie one mają charakter statyczny. Osiągi turbozespołu określają w tym przypadku tylko dwa moduły: ST1 oraz SR. Pozostałe

moduły służą do sprawdzania ograniczeń. Ta część modelu kompleksowego została oddzielona linią przerywaną. Najbardziej złożoną strukturę ma model kompleksowy przy badaniu procesów IV grupy. Występuje tu 14 zasadniczych modułów (rys. 2). Wyjściowy stan występujący tuż przed rozpoczęciem badanego przebiegu dynamicznego określony jest przy pomocy 4 modułów statycznych, stanowiących w istocie model kompleksowy dla II grupy procesów, co nadaje temu modelowi szczególne znaczenie. Pozostałe moduły, poza modelami dla określania naprężeń i wydłużeń termicznych oraz siły osiowej (wielkości te są wyliczone w każdym kroku czasowym), mają charakter dynamiczny. Linią przerywaną oddzielono tę część modelu kompleksowego, która służy do sprawdzania ograniczeń.

Struktura modelu kompleksowego w przypadku badania III grupy procesów jest zasadniczo taka sama jak w przypadku IV grupy (rys. 2). Znacznie mniejsze stałe czasowe maszyn wirnikowych w stosunku do innych elementów turbosespołu pozwalają na wykorzystanie w tym przypadku modeli statycznych. Tak więc moduł DT (rys. 2) zostaje zastąpiony modulem ST1, a moduł D0 nie występuje. Ponadto w szeregu przypadków istnieje możliwość zastąpienia części dynamicznych modeli wymienników modelami statycznymi, zależnie od rodzaju rozpatrywanego procesu.

Struktura systemu programów na EMC jest zwykle zbliżona do struktury systemu modelu, stąd nie jest tu oddzielnie omawiana.

Przeprowadzone analizy wykazały, że istnieje potrzeba i możliwość opracowania dodatkowych integralnych modułów dla bezpośredniego, szybkiego określania wydłużeń cieplnych i naprężeń w elementach kryterialnych z pominięciem modułów WC, SPT oraz DPT. Zastosować tu można podejście typu "czarna skrzynka" przy wykorzystaniu metod identyfikacji [4], co powinno zapewnić w szeregu przypadków wystarczającą, jak się wydaje, dokładność uzyskiwanych wyników. Modułów tych dla uproszczenia nie zaznaczono na rys. 2.

Dotychczasowe prace nad realizacją omawianego modelu kompleksowego koncentrowały się na modułach związanych głównie ze strukturami modelu w przypadku badania II, III oraz IV grupy procesów. W tym też zakresie uzyskano wyniki pozwalające na rozwiązywanie szeregu z wymienionych zadań praktycznych. Przewiduje się sukcesywne publikowanie informacji o postępie prac i wynikach, podobnie jak w przypadku zagadnień statyki turbosespołu [3].

#### LITERATURA

- [1] Gardzilewicz A., Krzeczkowski S.: Koncepcja algorytmu wiodącego systemu programów dla komputeryzacji obliczeń turbin parowych. Opracowanie IMP PAN, Gdańsk 1976, niepublikowane.
- [2] Miller A., Lewandowski J., Grunwald B. i inni: Model kompleksowy dynamiki turbiny dla elektrowni jądrowej. Etap I, część I i II. Etap II część I, II, III. Opracowanie ITC PW, Warszawa 1975, 1977 niepublikowane.

- [3] Miller A., Lewandowski J., Grunwald B.: The mathematical model of condensing turbine for saturated steam installed in a nuclear power station. Prace IMP PAN. Z. 70/72 - 1976.
- [4] Miller A.: Modelowanie pracy turbin parowych i sprężarek wirnikowych dla celów sterowania procesami technologicznymi. Prace Naukowe, PW, Mechanika nr 37/1976.

#### КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТУРБИНЫ

##### Р е з ю м е

Приводятся требования, предъявляемые к комплексной модели динамики турбины для атомной электростанции. Представлен объем применений модели на практике. Описывается структура комплексной модели и её основные модули.

#### A COMPLEX MODEL OF A TURBINE DYNAMICS

##### S u m m a r y

The paper deals with requirements which a complex model of a turbine dynamics for a nuclear power station must meet. A wide range of the model's applications in practice has been described along with a discussion of its structure and essential moduli.