

II. MODELOWANIE STANU DYNAMICZNEGO MASZYN

1. WSTĘP

Funkcjonowanie maszyn, urządzeń, instalacji, a w ogólności obiektów mechanicznych nieodłącznie jest związane z przekazywaniem różnorodnych oddziaływań siłowych. W większości przypadków oddziaływania te można podzielić na część statyczną, stałą w czasie, która zapewnia projektowane położenie bądź projektowany ruch oraz część dynamiczną - na ogół o charakterze oscylacyjnym.

Analizując zachowanie się obiektów mechanicznych pod wpływem oddziaływań można przyjąć, że stan naprężeniowy, położenie równowagi, średni ruch na torze itp. jako wynik działania części statycznej jest znany i nie stanowi problemu.

Problemem zatem będzie tu zrozumienie, przewidywanie i poprawianie zachowania się obiektu pod wpływem części dynamicznej oddziaływań, czyli analiza dynamiczna obiektu. Czy jednak w obliczu coraz większego skomplikowania konstrukcyjnego i funkcjonalnego obiektów mechanicznych (np. pojazd kosmiczny) wyniki takiej analizy dynamicznej mogą być wiarygodne? Otóż, niejednokrotnie stwierdzono teoretycznie i praktycznie, że zachowanie się (reakcja) dynamiczne skomplikowanych obiektów mechanicznych złożone jest z reakcji elementarnych, (zachowanie się układu elementarnego), które można poznać i przestudiować każdą oddzielnie.

Sposób syntezy reakcji elementarnych w reakcję złożonego obiektu mechanicznego jest niejednokrotnie skomplikowany, lecz jednoznaczny. Może on być poznany za pomocą wnikliwie stosowanych względnie prostych metod analitycznych. Z tego właśnie wynika zdolność do analizy dynamicznej skomplikowanych obiektów mechanicznych złożonych z wielu podukładów i zaufanie, że będą one zachowywać się tak jak przewidują wyniki badań stanowiskowych.

2. POWSTAWANIE OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

Dynamika jest działem mechaniki zajmującym się ruchem ciał w ujęciu makroskopowym z uwzględnieniem przyczyn powodujących ruch. Dynamika maszyn jest więc nauką o drganiach konstrukcji maszyn, geometrycznie niezmiennych, o zachowawczej postaci równowagi. Celem dynamiki maszyn jest określenie odpowiedzi konstrukcji (przemieszczeń, naprężeń) poddanej działaniu dowolnego obciążenia dynamicznego. Obciążenie dynamiczne jest obciążeniem, którego wartość, kierunek, zwrot lub miejsce przyłożenia są zmienne w czasie [5,9,13,22,25,51].

Do głównych problemów występujących już na etapie projektowania maszyn należy wymienić następujące:

- wyznaczenie statycznych i dynamicznych obciążeń działających na poszczególne węzły i elementy maszyny;
- ustalenie rozkładu naprężeń w wybranych obszarach obliczanej konstrukcji,
- wybór najbardziej obciążonych elementów oraz oszacowanie ich wytrzymałości i trwałości (niezawodności działania).

Najtrudniejszym przedsięwzięciem zatem, jest wyznaczenie przebiegu, charakteru zmian i wartości ekstremalnych obciążeń dynamicznych w projektowanej konstrukcji. Od dokładności wyznaczenia stanu tych obciążeń zależeć będzie poprawność prowadzonych obliczeń projektowych, a w ich rezultacie niezawodna praca, a także walory eksploatacyjne i koszt wytwarzania maszyny.

Pierwszym krokiem podczas analizy dynamiki jest zwykle wyznaczenie częstości drgań własnych elementów i układów maszyny (tzw. widmo drgań maszyny lub zespołu). Zwykle obserwuje się, że drgania swobodne z tymi częstościami w maszynie podlegają szybkiemu wytlumieniu. Jednak zawsze zachodzi obawa o narastanie drgań, gdy zewnętrzne

oddziaływania (deterministyczne lub losowe) w swojej strukturze będą zawierać także wymuszenia o częstotliwościach zbliżonych do częstości drgań własnych maszyny.

Najbardziej niebezpieczne stany obciążeń dynamicznych i związane z tym ekstremalne wartości naprężeń powstają w obszarze drgań rezonansowych z najniższymi częstościami własnymi maszyny. Wysokie obciążenia dynamiczne mogą powstawać np. podczas szybkiej (skokowej) zmiany warunków pracy maszyny, jej układu napędowego czy najazdu na przeszkodę terenową. Istotnym źródłem wzbudzenia drgań maszyny są silniki spalinowe i oddziaływania zewnętrzne na osprzęt roboczy oraz na układ jezdny. Zwykle zachodzące przy tym zmiany stanu obciążenia węzłów maszyny mają charakter procesów przejściowych o gasnącej amplitudzie.

Ważnym etapem pracy maszyny jest zmiana prędkości ruchu postępowego lub obrotowego jej elementów oraz łączenie i rozłączanie sprzęgieł. Zachodzące przy tym procesy przejściowe zwykle mają postać nieperiodycznych wahań stanu obciążenia. Charakter tych wahań jest bardzo zróżnicowany. W przebiegach procesów przejściowych widoczne są zwykle znaczne zmiany amplitud obciążenia, a proces wygaszania wahań tych obciążeń często trwa znacznie dłużej niż czynności je wywołujące.

Są sytuacje, w których chwilowe zmiany stanu obciążenia prowadzą do znaczącego narastania drgań i zjawisk rezonansowych. Jeśli podczas pracy maszyny niektóre jej parametry zmieniają się w sposób okresowy (np. w rezultacie powtarzania czynności roboczych, pracy zaworów lub rozdzielaczy), to w układzie dynamicznym maszyny istnieje możliwość wzbudzenia tzw. drgań parametrycznych. Znanym i ważnym ogniwem maszyny są wały napędowe z przegubami krzyżakowymi. Ich praca jest stałym źródłem zmiennych obciążeń dynamicznych, które mogą wywoływać drgania parametryczne. Podobnie zmienne naciski i tarcie między zębami kół zębatych (np. w rezultacie drobnych niedokładności ich wykonania lub powtarzalności kontaktów tych samych par zębów) są ważnym czynnikiem powstawania parametrycznych drgań giętnych wałów skrzyń przekładniowych i reduktorów. Obserwowane przy tym silne wzmocnienie drgań (rezonans parametryczny) jest spowodowane zbliżaniem się częstotliwości zmiany parametrów układu do częstości własnej lub prędkości obrotowej elementów wirujących. Energia na podtrzymanie tych drgań wynika z sił wewnętrznych układu (np. sił sprężystości).

Praktycznie we wszystkich przypadkach obracające się elementy maszyn są źródłem okresowych wymuszeń (oddziaływań dynamicznych) o częstotliwościach wynikających z krotności prędkości obrotowej. Oczywiście, zwiększanie się tych drgań (narastanie amplitud drgań mechanicznych czy poziomu hałasu) będzie zależęć od właściwości całego układu dynamicznego maszyny. Wystąpienie zgodności częstotliwości tych wymuszeń z częstościami własnymi maszyny może prowadzić do znaczącego narastania drgań. Wywołane nimi stany obciążeń dynamicznych są często przyczyną uszkodzenia lub zniszczenia elementów.

W systemach automatycznej regulacji oraz układach mechanicznych pracujących w obecności znacznych sił tarcia suchego, mogą pojawić się drgania samowzbudne. Są one niekiedy ważną przyczyną wysokich obciążeń dynamicznych w układach napędowych np. ze sprzęgłami ciernymi. Drgania giętno - skrętne obracających się wałków, zwykle związane z hydrodynamicznymi procesami w łożyskowaniu, często są głównym powodem znacznego ograniczenia prędkości obrotowych elementów napędowych maszyn.

Jednym z istotnych czynników dynamicznego oddziaływania na maszynę jest praca silnika spalinowego. Oddziaływania te wynikają z nierównomierności przebiegu momentu obrotowego silnika, a także procesów jego rozruchu i zatrzymywania.

Podczas jazdy maszyny obserwuje się oddziaływania dynamiczne, związane ze współpracą układu jezdnego z nierównym podłożem. Wzajemne oddziaływanie pomiędzy poruszającą się maszyną a podłożem wpływa nie tylko na drgania układu jezdnego, ale także

układu napędowego i nadwozia. Widoczny jest wpływ zmiany nachylenia i rodzaju podłoża oraz jego stanu na ogólny poziom obciążeń dynamicznych maszyny.

Z najbardziej uznanych przedsięwzięć, prowadzonych w celu zmniejszenia obciążeń dynamicznych, warto wymienić następujące:

- modyfikacja parametrów i charakterystyk konstrukcyjnych, prowadząca do ograniczenia możliwości wzbudzenia drgań rezonansowych lub przesunięcia częstotliwości tych drgań poza obszary normalnych warunków pracy maszyny (przedział prędkości jazdy, prędkości obrotowej silnika itp.);
- wprowadzanie do układów napędowych elastycznych sprzęgieł przeciążeniowych i odpowiednio dobranych tłumików, których zadaniem jest zmniejszenie amplitud drgań oraz rozproszenie ich energii.

Warto tu podkreślić, że zmniejszenie obciążeń dynamicznych i poziomu drgań oraz hałasu w układach napędowych i sterowania maszyn, a tym samym zwiększenie ich trwałości oraz niezawodności można osiągnąć dzięki zastosowaniu hydraulicznych zespołów napędowych, wprowadzeniu amortyzatorów hydraulicznych, tłumików drgań oraz dynamicznych eliminatorów drgań. Dobór ich charakterystyk najczęściej jest oparty na wynikach analizy dynamiki maszyny oraz zachodzących w niej procesów.

Podczas wyznaczania obciążeń dynamicznych mogą być stosowane metody fizycznego i matematycznego modelowania. Metody modelowania fizycznego są wykorzystywane podczas badań prototypów maszyn i ich zespołów na stanowiskach laboratoryjnych oraz podczas specjalnie przygotowanych testów poligonowych. Badania laboratoryjne pozwalają na znaczne skrócenie czasu w stosunku do badań poligonowych. Łatwiej też wówczas zachować powtarzalność warunków badań. Jednak każda z tych metod jest bardzo kosztowna i czasochłonna [8,14,40,51].

Wszystkie wyżej opisane przedsięwzięcia należy wykonać na etapie prac projektowych i budowy prototypów. Jeśli nie doprowadzą one do znaczącego obniżenia poziomu drgań maszyny, to wówczas należy brać pod uwagę konieczność zasadniczych zmian w jej układzie konstrukcyjnym. Dogodnym narzędziem do analizy opisanych stanów obciążeń dynamicznych są systemy programów komputerowych, których podstawę stanowią modele dynamiki maszyn lub wydzielonych z nich zespołów. Wykorzystanie współczesnych metod modelowania matematycznego i cyfrowej symulacji pracy maszyny daje możliwość analizy wielu wariantów konstrukcji i wybór na tej podstawie rozwiązań optymalnych.

3. STUDIUM DYNAMIKI MASZYN

Dynamika jest nauką o tym, jak rzeczy zmieniają się w czasie i o siłach, które są przyczyną tych zmian [4,16,19,28,40,51]. Celem studium dynamiki układu jest zrozumienie zasad funkcjonowania, zmian stanu obciążeń dynamicznych i przewidywanie poprawnego zachowania się układu. Potrzeba znajomości dynamiki układu wynika z coraz większych wymagań stawianych maszynom. Wraz ze wzrostem prędkości ich ruchu i wartości obciążeń, zwiększeniem wymagań dotyczących trwałości i niezawodności, a także konieczności stosowania sterowania automatycznego rośnie znaczenie analizy dynamiki konstrukcji.

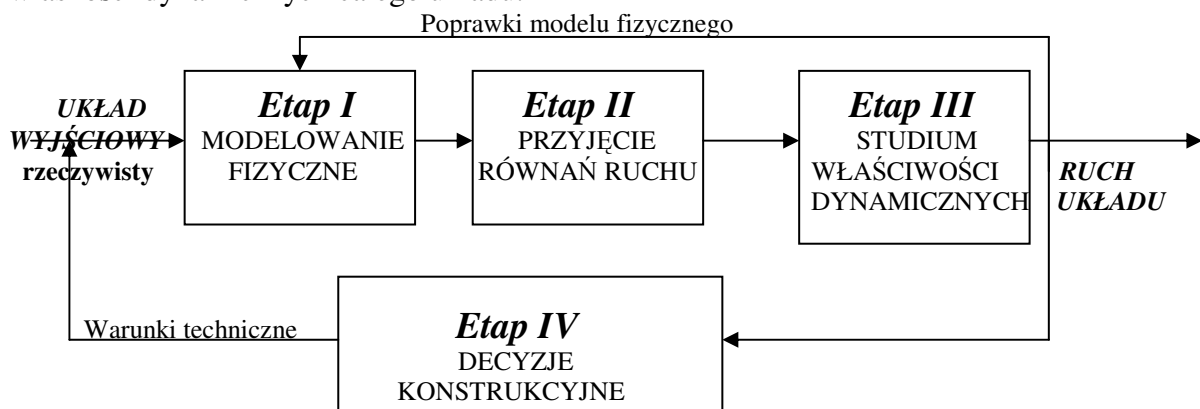
Na podstawie praw Newtona można stwierdzić, że w dynamice *bezwzględnym układem odniesienia* jest układ mający zawsze przyspieszenie równe zeru. Układ taki, poruszający się jednostajnie i prostoliniowo jest równoznaczny układowi pozostającemu stale w spoczynku. Podstawowe prawa dynamiki słuszne w tym układzie na ogół nie są słuszne w innym układzie, gdyż zmiana układu odniesienia powoduje zmianę zależności między siłą a ruchem. Układy odniesienia poruszające się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem absolutnie nieruchomego układu odniesienia, w którym słuszne są podstawowe prawa dynamiki nazywa się układami inercyjnymi (Galileusza, bezwładnościowymi).

Analiza dynamiki układu składa się z następujących etapów [16,51]:

- **etap I** - dokładne określenie układu, jego istotnych cech i budowa modelu fizycznego, którego własności dynamiczne będą w dostatecznym stopniu zgodne z własnościami rzeczywistego obiektu;
- **etap II** – analityczny opis zjawisk dynamicznych odzwierciedlanych modelem fizycznym, czyli znalezienie modelu matematycznego, równań różniczkowych opisujących ruch modelu fizycznego;
- **etap III** - przestudiowanie własności dynamicznych modelu matematycznego na podstawie rozwiązania równań różniczkowych ruchu, ustalenie przewidywanego ruchu układu;
- **etap IV** - podjęcie decyzji projektowych, tj. przyjęcie fizycznych parametrów układu, z modernizacją przystosowaną do oczekiwań. Synteza i optymalizacja prowadząca do osiągnięcia wymaganych własności dynamicznych konstrukcji.

Przedstawiona procedura opiera się na znajomości modelu układu, a wnioski płynące z działań na modelach zależą od ich jakości. Budową modeli zajmuje się identyfikacja, która utożsamia systemy rzeczywiste z ich modelami.

Na rys.2.1 przedstawiono etapy studium dynamiki układu z zaznaczeniem sprzężeń zwrotnych dotyczących poprawiania modelu fizycznego oraz porównania projektu z wykonaną konstrukcją. Przy opracowywaniu zadań studium dynamiki konstrukcji szeroko wykorzystywane są schematy blokowe. Mają one na celu przedstawienie kolejności zdarzeń lub wzajemne ich powiązania, ułatwiają pokazanie skomplikowanych układów za pomocą schematu blokowego zależności i związków między częściami tych układów. Złożone układy mogą więc być studiowane oddzielnie, by w końcu złożyć to w całość. Dla każdego bloku można podać model matematyczny opisujący własności dynamiczne, a schemat blokowy wskaże drogę zespolenia bloków i odpowiadających im modeli, umożliwiając analizę własności dynamicznych całego układu.



Rys.2.1 Etapy studium dynamiki układu

Funkcjonowanie maszyn i urządzeń mechanicznych nieodłącznie jest związane z przekazywaniem różnorodnych oddziaływań siłowych. Oddziaływania te można podzielić na statyczne (stałe w czasie, zapewniające projektowane położenia lub projektowany ruch) i dynamiczne (na ogół o charakterze oscylacyjnym). Analizując zachowanie się obiektów mechanicznych pod wpływem części statycznej (stan naprężeniowy, położenie równowagi, średni ruch na torze) przyjmuje się, że jest ono znane i nie stanowi problemu. Problemem jest zatem zrozumienie i przewidywanie zachowania się obiektu pod wpływem części dynamicznej oddziaływań, czyli *analiza dynamiczna obiektu*.

Kluczem do określenia dynamiki czyli drgań obiektu mechanicznego jest znajomość możliwych odpowiedzi układu dynamicznego, do którego można zredukować badany obiekt.

Uzyskanie modelu fizycznego obiektu jest *pierwszym krokiem jego analizy dynamicznej*. W wielu przypadkach otrzymany układ dynamiczny będzie układem elementarnym, podstawowym, zwanym układem lub *modelem o jednym stopniu swobody*. Procedura dojścia od obiektu rzeczywistego do jego zastępczego układu dynamicznego, zwanego często *modelem lub modelowaniem* jest pierwszym krokiem analizy dynamicznej. Wagę tego kroku dla całej analizy dynamicznej niech uzmysłowi fakt, że dla jednego obiektu mechanicznego można obmyślić nieskończenie wiele modeli, od bardzo prostych do niezwykle skomplikowanych, a do tego żaden może nie oddawać dostatecznie precyzyjnie poszukiwanych własności obiektu. Tak więc procedurę modelowania, czyli dojścia do modelu zastępczego obiektu mechanicznego należy przeanalizować na przykładzie i wyciągnąć ogólne wnioski metodyczne.

Własności mechaniczne, które będą nas interesować przy modelowaniu to: *masa* (inercja), *szttywność* i *dysypacja energii* maszyny, urządzenia. Własności te, jak łatwo spostrzec, rozłożone są w sposób ciągły na rozpiętości obiektu. Dążąc jednak do możliwej prostoty opisu modelu i dalszej jego analizy własności te będziemy skupiać w określonych punktach obiektu zwanych punktami redukcji.

Pierwszym krokiem modelowania jest określenie punktu redukcji własności mechanicznych obiektu. Punkt ten musi spełniać trzy istotne warunki:

- 1° drgania muszą mieć amplitudy zauważalne, nie może to być więc punkt podpory nieruchomej,
- 2° musi być spełniona względna łatwość redukcji rozciągniętych własności inercyjnych, sztywności i dysypacji obiektu do własności dyskretnych,
- 3° musi istnieć bezpośredni związek między amplitudą drgań w punkcie redukcji a celem analizy dynamicznej.

Suma założeń daje: *model dyskretny liniowy, o kilku stopniach swobody, stacjonarny, zdeterminowany*.

Następnym krokiem analizy dynamicznej obiektu jest zastosowanie praw mechaniki i fizyki do *uzyskania równań różniczkowych ruchu*. Analiza rozwiązań tych równań w funkcji parametrów modelu daje znajomość własności dynamicznych modelu. Wnioski płynące z analizy zachowania się modelu winny dalej być skonfrontowane z *wynikami eksperymentu* na obiekcie. W przypadku istotnych różnic zmieniamy model tak dalece, by otrzymać zgodne zachowanie się obiektu i jego modelu. Wymaga to dodatkowo pełnej wiedzy i umiejętności prowadzenia eksperymentu.

Podczas analizy stanu dynamicznego maszyn można poszukiwać odpowiedzi w zakresie:

- oceny stateczności układu;
- wartości amplitud drgań lub występujących sił;
- opisu stanu ustalonego lub procesów przejściowych;
- określenia częstości rezonansowych.

W zależności od celu prowadzonej analizy dynamicznej obiektu stawia się różne wymagania budowanym modelom, a ich ocenę przeprowadza się różnymi metodami eksperymentalnymi.

4. IDEALIZACJA UKŁADÓW RZECZYWISTYCH

4.1 Determinizm i losowość rzeczywistości

Każda racjonalna ocena stanu dynamicznego maszyny jest wynikiem dokonywania odpowiednich pomiarów i przetwarzania ich wyników. Głównym problemem do rozwiązania jest tu kwestia zależności pomiędzy cechami maszyny, a wartościami pomierzonych symptomów stanu, co stanowi o zakresie modelowania obserwowanej maszyny.