

Automatyka i Robotyka

Egzamin magisterski

1	Przedmioty podstawowe	4
1.1	APA	4
1.1.1	Przedstawić zasadnicze podobieństwa i różnice pomiędzy silnikami prądu stałego i prądu zmiennego. Omówić wejścia i wyjścia serwo-wzmacniaczy oraz ich rolę w układach automatyki.	4
1.1.2	Podać podstawową klasyfikację receptorów zwierząt ze względu na źródło bodźców, wymienić przykłady czujników stanowiących analogię dla wybranych zmysłów.	5
1.1.3	Wymienić kilka wielkości fizycznych, do pomiaru których można wykorzystać ciśnieniomierze, omówić pokrótce ideę działania wybranych czujników.	6
1.2	MODI	6
1.2.1	Przedstawić założenia metody najmniejszych kwadratów (MNK). Jakiej są jej ograniczenia? Jak wygląda wersja rekurencyjna MNK? Jakiej są możliwe rozszerzenia?	6
1.2.2	Jakiej są możliwe sygnały identyfikacyjne? Kiedy je stosujemy? Jakiej mają ograniczenia?	8
1.2.3	Przedstawić różne postacie modeli regresyjnych od AR aż do Boxa-Jenkinsa oraz modele z całkowaniem.	8
1.3	PODA	10
1.3.1	Sposoby opisu ciągłych liniowych układów dynamicznych. Omówić równania stanu, transmitancje, charakterystyki częstotliwościowe i odpowiedzi skokowe.	10
1.3.2	Omówić sprzężenie zwrotne i jego wpływ na dokładność, odporność na błędy i zakłócenia oraz stabilność układu sterowania. Przedstawić warunki podtrzymywania drgań oraz kryterium Nyquista dla obiektu stabilnego. Zdefiniować pojęcia zapasu fazy i modułu.	12
1.3.3	Omówić wybrane metody projektowania prostych układów regulacji: dla serwo-mechanizmów (obiektów minimalnofazowych) oraz dla regulacji przemysłowej (modelowanie obiektów, struktury i podstawowe metody doboru nastaw regulatorów PID).	14
1.4	SMS	17
1.4.1	Omówić cechy trzech sposobów komunikacji z układem peryferyjnym: podczytywanie, przerwanie, DMA. Podać przykłady ze wskazaniem przewagi wybranego sposobu.	17
1.4.2	Wymienić i omówić mechanizmy sprzętowe wspierające system operacyjny czasu rzeczywistego w procesorach Cortex-M.	17
1.4.3	Omówić metody odmierzania czasu w procesorach Cortex-M. Omówić wady i zalety każdego z nich.	17
1.5	SCZR	18
1.6	SP	18

1.6.1	Jak system operacyjny sterownika programowalnego wykonuje program użytkowy? Krótko omówić wszystkie fazy tego procesu. Jakie znaczenie ma czas wykonania jednego przebiegu programu?	18
1.6.2	Wymienić główne rodzaje współcześnie wykorzystywanych języków programowania sterowników PLC. Omówić zalety i wady oraz przedstawić obszar zastosowań każdego z nich.	18
1.6.3	Opisać metodę programowania zadań sekwencyjnych z wykorzystaniem automatu stanów.	19
1.7	STP	19
1.7.1	Omówić postać i funkcję regulatora liniowego ze sprzężeniem od stanu. Przedstawić kryteria wyboru biegunów zamkniętego układu regulacji w wersji ciągłej i dyskretniej.	19
1.7.2	Emulacja i bezpośrednie projektowanie układu regulacji: dwie metody projektowania dyskretnych układów regulacji.	20
1.7.3	Omówić strukturę oraz sposób działania rozmytych algorytmów regulacji: ze sprzężeniem od stanu, PID oraz predykcyjnych. Podać przeznaczenie tych algorytmów, scharakteryzować ich zalety i wady.	20
1.8	WR	21
1.8.1	Omówić procedurę rozwiązania prostego zadania kinematyki dla manipulatora o strukturze szeregowej z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga.	21
1.8.2	Wyjaśnić pojęcia stopnia mobilności, sterowności i manewrowości kołowego robota mobilnego.	22
1.8.3	Jakie zadania obejmuje autonomiczna nawigacja robotów? Omówić podstawowe metody stosowane do rozwiązania tych zadań.	22
2	Przedmioty zaawansowane	23
2.1	AMO EOPT POPTY TOP	23
2.1.1	Przedstawić metody minimalizacji funkcji bez ograniczeń oraz metody rozwiązywania zadań optymalizacji z ograniczeniami. Zdefiniować warunki konieczne i dostateczne optymalności ciągłych zadań optymalizacji z ograniczeniami i bez ograniczeń oraz warunki regularności.	23
2.1.2	Opisać dualność zadań programowania liniowego i optymalizacji wypukłej. Zdefiniować odstęp dualności.	25
2.1.3	Przedstawić metody rozwiązywania zadań programowania kwadratowego z ograniczeniami. Omówić wykorzystanie zadań programowania kwadratowego w metodach ograniczonego obszaru zaufania i sekwencyjnego programowania kwadratowego.	26
2.2	ISR	27
2.2.1	Omówić kolejne poziomy reprezentacji ontologicznej stosowane w językach programowania robotów.	27
2.2.2	Omówić strukturę agenta upostaciowionego oraz sposób opisu jego działania.	27
2.2.3	Omówić podstawowe rodzaje map otoczenia i metody ich budowy.	28
2.3	MI	29
2.3.1	Co to jest zmienna instrumentalna? Jakie warunki powinny one spełniać dla zapewnienia nieobciążonej estymaty? Jakie są typowe wybory zmiennej instrumentalnej?	29
2.3.2	Jakie są różnice pomiędzy obserwatorem stanu i filtrem Kalmana? Przedstawić zasadę działania filtru Kalmana, zalety oraz ograniczenia.	30

2.3.3	Jak można wyznaczyć odpowiedź częstotliwościową systemów liniowych dla nieokresowych sygnałów testowych? Jakiej są ich wady i zalety w stosunku do okresowych sygnałów testujących?	30
2.4	MORO	31
2.4.1	Czym są i jak się rozwiązuje proste i odwrotne zagadnienie kinematyczne dla szeregowych łańcuchów kinematycznych?	31
2.4.2	Jaka jest ogólna struktura modelu dynamiki manipulatora szeregowego oraz jego napędu elektrycznego?	32
2.4.3	Omówić podstawowe metody generacji trajektorii dla manipulatorów.	32
2.5	SST	33
2.5.1	Przedstawić zasadę działania Metody Bezpośredniej koordynacji iteracyjnej; podać jej podstawowe zalety i wady.	33
2.5.2	Przedstawić zasadę działania Metody Cen (Metody Zrównoważenia Interakcji) koordynacji iteracyjnej; podać jej podstawowe zalety i wady.	34
2.5.3	Opisać, na wybranym przykładzie, działanie układu hierarchicznego z koordynacją periodyczną.	35
2.6	TAP	35
2.6.1	Omówić układ regulacji wielopętlowej PID: zasady wyboru struktury połączeń, dobór nastaw regulatorów PI(D), odsprężanie pełne i częściowe.	35
2.6.2	Przedstawić zasadę regulacji predykcyjnej (MPC), sformułowanie wielowymiarowych algorytmów wyznaczania sterowań numerycznego i analitycznego (prawa regulacji), scharakteryzować krótko podstawowe algorytmy wielowymiarowe z liniowym modelem procesu.	38
2.6.3	Omówić podstawowe algorytmy nieliniowej regulacji predykcyjnej z numerycznymi zadaniami optymalizacji sterowań (MPC-NO, MPC-NPL), oraz szybki algorytm bazujący na liniowych prawach regulacji.	39
2.7	TST	40
2.7.1	Przedstawić opisowo typowe wymagania jakie musi spełniać dobrze zaprojektowany system regulacji. Powiązać je z wymaganiami dotyczącymi transmitancji składających się na podstawowe równanie systemu regulacji.	40
2.7.2	Podać definicję stabilności „ograniczone wejście-ograniczone wyjście” (ang. BIBO stability). Jakiej warunki gwarantują BIBO stabilność stacjonarnego układu liniowego dla każdego warunku początkowego. Rozpatrzeć układy z czasem ciągłym i dyskretnym.	42
2.7.3	Sformułować zadanie wyznaczenia optymalnego regulatora liniowo-kwadratowego (zadanie LQR). Omówić wybór parametrów wskaźnika jakości w tym zadaniu. Podać postać rozwiązania tego zadania. Rozpatrzeć układy z czasem ciągłym i dyskretnym.	43
3	Przedmioty zaawansowane obieralne	43
3.1	MISK	43
3.1.1	Przedstawić kategorie modeli systemów, omówić wybrane modele i metody ich opisu.	43
3.1.2	Omówić techniki symulacyjne: symulacja z czasem ciągłym, czasem dyskretnym i zdarzeń dyskretnych.	46
3.1.3	Omówić metody rozwiązywania zadań symulator-optymalizator.	47
3.2	ROSM	50
3.3	SAU	51

Przedmioty podstawowe

1.1 APA

1.1.1 Przedstawić zasadnicze podobieństwa i różnice pomiędzy silnikami prądu stałego i prądu zmiennego. Omówić wejścia i wyjścia serwo-wzmacniaczy oraz ich rolę w układach automatyki.

Podobieństwa w budowie:

1. wirnik,
2. uzwojenie wzbudające (ale o różnej budowie),
3. stojan.

Różnice:

1. Wirnik w silniku prądu zmiennego obraca się dzięki wpływowi pola magnetycznego na stojan z cewkami (pole magnetyczne wytwarzane jest przez uzwojenia w stojanie prowadzące prąd znajdujący się w różnej fazie) - dzięki indukcji uzwojenie wirnika się namagnesowuje co skutkuje ruchem obrotowym w wirującym polu magnetycznym. Silnik ten wymaga 3 różnych faz na wejściu - lub odpowiedniego modułu wewnętrznego.
2. Wirnik w silniku prądu stałego obraca się z powodu prądu przepływającego przez uzwojenia wirnika, natomiast kierunek prądu ustalany jest przez styk szczotek wirnika ze stojanem - kierunek przepływu prądu się zmienia wraz z wykonaniem połowy obrotu. Prąd stały przechodzi przez 2 wejścia (okablowanie proste).
3. Wirnik w silniku bezszczotkowym prądu stałego jest zbudowany z magnesu trwałego umieszczonego między trzema statorami (lub więcej) - pylonami z nawiniętymi cewkami przez które przepływa prąd. Prąd stały przechodzi przez przemiennie przez 3 z wejść (po 2 na raz) tworząc cykl (okablowanie złożone).

Zalety silników:

1. Prądu stałego: mała masa, duży moment mechaniczny, wysoka sprawność, łatwy w regulacji, wysokie obroty.
2. Prądu stałego (bezszyotkowy): bardzo duży moment obrotowy, mała masa, bardzo dobry w regulacji, cichy, bezobsługowy, trwały, wysokie obroty.
3. Prądu zmiennego: zasilanie z sieci, bardzo trwałe, ciche, bezobsługowe, tanie.
4. Krokowy (impuls): bezpośrednia kontrola, cichy, trwały.

Wady:

1. Prądu stałego: zasilanie przez prostownik, drogi, wymaga konserwacji, głośny.
2. Prądu stałego (bezszyotkowy): drogi, zasilany z przekształtnika.

3. Prądu zmiennego: wymaga rozruchu, trudny w regulacji obrotów, ciężki, ograniczone obroty.
4. Krokowy (impuls): zasilany z komutatora, mały moment, duża masa, kosztowny, niska sprawność (wirnik zębatkowy).

Serwowzmacniacze są pośrednikiem między modułem generatora poleceń serwomechanizmu (komputerem), a napędem. Rolą serwowzmacniacza jest dostarczenie odpowiednio wysokiej mocy do silnika tak, aby mógł on pracować zgodnie z zadaniem poleceniem. Enkoder wbudowany w serwowzmacniacza, który z kolei porównuje ją z wartością sygnału polecenia. Jeżeli różnica sygnałów jest równa 0 to oznacza to, że serwomechanizm działa poprawnie.

Wejściami serwowzmacniacza są sygnał sterujący (np. z PLC) oraz sprzężenie zwrotne (z enkodera zamieszczonego w serwowzmacniaku).

Wyjściami serwowzmacniacza są sygnał zasilający do serwowzmacniaka oraz sygnał sprzężenia zwrotnego (opcjonalnie)

1.1.2 Podać podstawową klasyfikację receptorów zwierząt ze względu na źródło bodźców, wymienić przykłady czujników stanowiących analogię dla wybranych zmysłów.

Podstawowy podział:

1. Eksteroreceptory - odbierają bodźce ze środowiska zewnętrznego:
 - (a) telereceptory – odbierają bodźce docierające z pewnej odległości (np. receptory wzroku, słuchu i równowagi, powonienia),
 - (b) kontaktoreceptory – odbierają bodźce działające bezpośrednio na receptor (np. receptory smakowe, dotyku i nacisku, bólowe, termoreceptory).
2. Interoreceptory - znajdują się wewnątrz ciała i odbierają bodźce ze środowiska wewnętrznego:
 - (a) proprioreceptory – znajdują się w narządach ruchu (stawowe, mięśniowe); informują o położeniu ciała oraz o lokalizacji jego części względem siebie (kinestezja),
 - (b) wisceroreceptory – znajdują się w narządach wewnętrznych; informują o stanie poszczególnych narządów,
 - (c) angioreceptory – znajdują się w naczyniach krwionośnych; informują o stanie środowiska w naczyniach.

Przykładowe analogie:

- wzrok - kamera,
- echolokacja - czujnik odległości,
- słuch - mikrofon,
- dotyk - czujniki kontaktu, czujniki pojemnościowe,
- pozycja - enkodery obrotowe, enkodery liniowe, resolver.

1.1.3 Wymienić kilka wielkości fizycznych, do pomiaru których można wykorzystać ciśnieniomierze, omówić pokrótce ideę działania wybranych czujników.

1. Wysokość (m n.p.m.) - obliczana jako różnica z ciśnieniem referencyjnym, stosowany w samolotach, rakietach, balonach pogodowych, do 11km n.p.m.,
2. Ciśnienie (Pa) - np. zmierzenie ciśnienia w oponie samochodowej,
3. Przepływ ($\frac{m^3}{s}$) - zwężka Venturiego polega na zmierzeniu przepływu cieczy lub gazu na podstawie różnicy ciśnień przed i po zwężce przepływu. Wykorzystując różnicę wysokości płynu znajdującego się w łączniku rury oraz zwężenia można wyznaczyć różnicę ciśnień. Następnie znając również pola przekrojów rury i zwężenia (a dokładniej ich stosunek) oraz ciśnienie w rurze można wyznaczyć prędkość przepływu,
4. Głębokościomierz (m) = wykorzystując wzór na ciśnienie płynu $P = \rho gh$ można wyznaczyć wysokość słupa cieczy - czyli głębokość na jakiej się znajduje ciśnieniomierz.

1.2 MODI

1.2.1 Przedstawić założenia metody najmniejszych kwadratów (MNK). Jakie są jej ograniczenia? Jak wygląda wersja rekurencyjna MNK? Jakie są możliwe rozszerzenia?

Założenia:

1. Szacowany model ekonometryczny jest liniowy względem parametrów α_j .
2. Zmienne objaśniające X_i są wielkościami nielosowymi o ustalonych elementach.
3. Rząd macierzy X równy jest liczbie szacowanych parametrów, czyli $r(X) = k + 1$.
4. Liczebność próby jest większa niż liczba szacowanych parametrów, tzn. $n \geq k + 1$.
5. Nie występuje zjawisko współliniowości pomiędzy zmiennymi objaśniającymi.
6. Wartość oczekiwana składnika losowego jest równa zero: $\forall_t E(\epsilon_t) = 0$.
7. Składnik losowy ma stałą skończoną wariancję $\forall_t D^2(\epsilon_t) = \sigma^2$.
8. Nie występuje zjawisko autokorelacji składnika losowego, czyli zależności składnika losowego w różnych jednostkach czasu $\forall_{t \neq s} cov(\epsilon_t, \epsilon_s) = 0$.
9. Składnik losowy ma n-wymiarowy rozkład normalny: $\epsilon_t : N(0, \sigma^2)$ dla $t=1, 2, \dots, n$.

Objaśnienia:

1. Ogólnie, w modelu typowo liniowym główną rolę odgrywa suma iloczynów typu "+ $a_i X_i$ ". To znaczy, że zarówno parametry, jak i zmienne powinny być jednocześnie w pierwszych potęgach, oraz zmienna objaśniana Y powinna być kombinacją liniową zmiennych objaśniających i różnych parametrów.

Stąd taki model można zapisać w postaci macierzowej: $Y = X\alpha + \epsilon$.

Wektor epsilon grupuje składniki losowe które są z definicji nieobserwowalne, postulujemy ich istnienie, by wyjaśnić wszelkie rozbieżności między teoretycznymi wartościami zmiennej objaśnianej a wartościami zaobserwowanymi.

W praktyce liczymy się z tym, że Z1 nie jest idealnie spełnione.

2. Zmienne objaśniające są nielosowe. Ich wartości traktowane są jako stałe w powtarzających się próbach.

3. Chodzi tu o niezależność pomiędzy zmiennymi objaśniającymi.

Założenia te zapewnia, że estymator można wyznaczyć w sposób jednoznaczny.

Z założenia 3 wynika od razu założenie 4 i założenie 5. Dlatego czasami wypisanie tych założeń osobno jest pomijane.

4. Liczba obserwacji n powinna być większa od liczby szacowanych parametrów (zmiennych objaśniających).

5. Zmienne objaśniające nie mogą być współliniowe, tzn. wektory obserwacji zmiennych objaśniających (kolumny macierzy X) powinny być liniowo niezależne.

Jeżeli istnieje liniowość to skoro widzimy, że coś się dzieje, to wypadałoby dojść do tego, co tam się kryje. Najprawdopodobniej w wartościach składnika losowego, w przypadku wystąpienia jego autokorelacji, zawarty jest jakiś czynnik mający spory wpływ na kształtowanie się zmiennej objaśnianej. Czynnik, którego nie wzięliśmy pod uwagę rozważając to, co może wpływać na badane przez nas zagadnienie.

6. Wartości oczekiwane składników losowych są równe zeru. Oznacza to, że zakłócenia reprezentowane przez składniki losowe mają tendencję do wzajemnej redukcji.

7. Wariancje składników losowych ϵ_t są stałe. Jest to tak zwana własność homoskedastyczności.

Macierz wariancji i kowariancji pomiędzy składnikami resztowymi jest postaci: $D^2 = \sigma^2 \mathbf{I}$.

Założenie to zapewnia, że wartość wariancji zakłóceń nie zależy od numeru obserwacji.

8. Składniki losowe ϵ_t i ϵ_s są od siebie niezależne. Nie występuje tzw. autokorelacja składników losowych.

Oznacza to liniową zależność pomiędzy resztami modelu odległymi od siebie o " k " okresów. Dotyczy to modeli dynamicznych.

Jej występowanie oznacza, że pominięto w modelu jedną z istotnych zmiennych objaśniających lub przyjęto niewłaściwą postać modelu.

9. Każdy ze składników losowych ϵ_t ma rozkład normalny.

Założenie to dotyczące normalności rozkładu składnika losowego ma znaczenie przy wnioskowaniu statystycznym.

Ograniczenia

Metoda najmniejszych kwadratów jest mało odporna na elementy odstające, czyli nieliczne obserwacje różniące się znacząco od pozostałych. Takie obserwacje przyciągają do siebie linię trendu, co może być niepożądane w niektórych zastosowaniach. Niemniej jednak o ile odstające informacje nie są wynikiem błędnego pomiaru, nie powinny one być usuwane z modelu, ponieważ prowadziłyby to do błędnej estymacji parametrów modelu oraz do niedoszacowania zmienności zmiennej zależnej niewyjaśnionej przez model, a zatem wnioskowanie statystyczne na podstawie takiego modelu byłoby nieprawidłowe. Jeśli wpływ obserwacji odstających jest niepożądany, należy rozważyć zastosowanie innych metod regresji (np. regresji odpornej).

Uogólniona MNK - Pozwala ona na uwzględnienie braku sferyczności błędów losowych.

Ważona MNK - Jeżeli macierz wariancji-kowariancji jest znana i jest ona macierzą diagonalną o elementach $var[E_i|x_i] = \sigma^2 \omega_i$ to przypisujemy poszczególnym obserwacjom wagi.

Regresja grzbietowa - Redukcja wariancji modelu kosztem jego obciążenia (zmniejsza MSE estymatorów w stosunku do MNK). Umożliwia estymację przy wysokiej współliniowości.

Całkowite NK - Zakładamy, że błąd dotyczy wyjścia oraz pomiarów w wektorze regresji.

Rozszerzone NK - Podobnie jak regresja grzbietowa, rozszerza metodę MNK na modele, w których zakłócenia są ze sobą skorelowane. Ponieważ jednak zakłócenia nie są mierzalne to model regresji jest budowany przez aproksymację zakłóceń obliczając błąd predykcji - m.in. modele ARMAX.

1.2.2 Jakie są możliwe sygnały identyfikacyjne? Kiedy je stosujemy? Jakie mają ograniczenia?

- Impuls
- Skok jednostkowy - tylko do obiektów o nieskomplikowanej dynamice (1, 2-inercyjne z opóźnieniem).
- Sygnał binarny
- Sygnał Gaussa
- Pseudolosowy sygnał binarny - rodzaj białego szumu (pobudza szeroki zakres częstotliwości).
- Sinusoida - suma kilku sygnałów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach. Do identyfikacji charakterystyk Bodego (amplitudowa i fazowa), Nyquista (amplitudowo-fazowa).

Przy wyborze sygnału należy zwrócić uwagę na:

- Możliwość do realizacji dynamikę wejścia (urządzenie wykonawcze)
- Typ identyfikowanego modelu (liniowy - skok jednostkowy, nieliniowy - sinusoida)
- Jakie mamy praktyczne możliwości oddziaływania na proces (pozwolenia od operatorów)

1.2.3 Przedstawić różne postacie modeli regresyjnych od AR aż do Boxa-Jenkinsa oraz modele z całkowaniem.

Ogólna postać modelu regresyjnego:

$$Y = f(X, \beta) + \varepsilon$$

S - gdy w badanym procesie występuje sezonowość (m)

AR(p) – autoregresja (rzęd opóźnienia p)

I(d) – stopień integracji szeregu (krotność różnicowania d)

MA(q) – średnia ruchoma (rzęd opóźnienia q)

ARX(r) - model autoregresywny z zewnętrznym wejściem

MA Charakterystyczna dla tego modelu jest propagacja losowych zaburzeń do przyszłych wartości szeregów czasowych. Interpretacja: Zadanie impulsu wejściowego sprawia, że wyjście modelu gwałtownie rośnie, a następnie powoli opada - rozłożenie średniej w czasie.

MA jest z definicji zależne od wejść stochastycznych (zakłóceń).

AR Charakterystyczna dla tego modelu jest liniowa zależność wyjścia od poprzednich jej wartości. Interpretacja: Wyjście obiektu jest jak filtr o nieskończonej odpowiedzi ze wszystkimi biegunami stabilnymi.

AR jest zależne od wyjść.

Modele AR i MA są względem siebie dualne - każde AR o skończonym rzędzie można opisać jako MA o nieskończonym rzędzie.

ARX Wykorzystywany w modelach, w których zakłócenia pojawiają się wcześniej. Sygnał stochastyczny (zakłóceń) oraz deterministyczny (sterowania) przechodzą razem przez blok $1/A$ - oznacza to, że dynamika odpowiedzi układu dla obu tych sygnałów wejściowych jest taka sama.

OE Jeżeli zakłócenia pojawiają się późno to lepiej zastosować model OE (output-error) - w tym modelu sygnał stochastyczny nie przechodzi przez blok $1/A$, czyli przez bloki B oraz $1/A$ przechodzi tylko sygnał deterministyczny.

Box-Jenkins Jest to kompletny model z zakłóceniami modelowanymi oddzielnie od dynamiki systemu. Również stosowany najlepiej, gdy zakłócenia pojawiają się późno w systemie. Jest to połączenie modeli ARMA oraz OE.

Wygląd sygnału, a model:

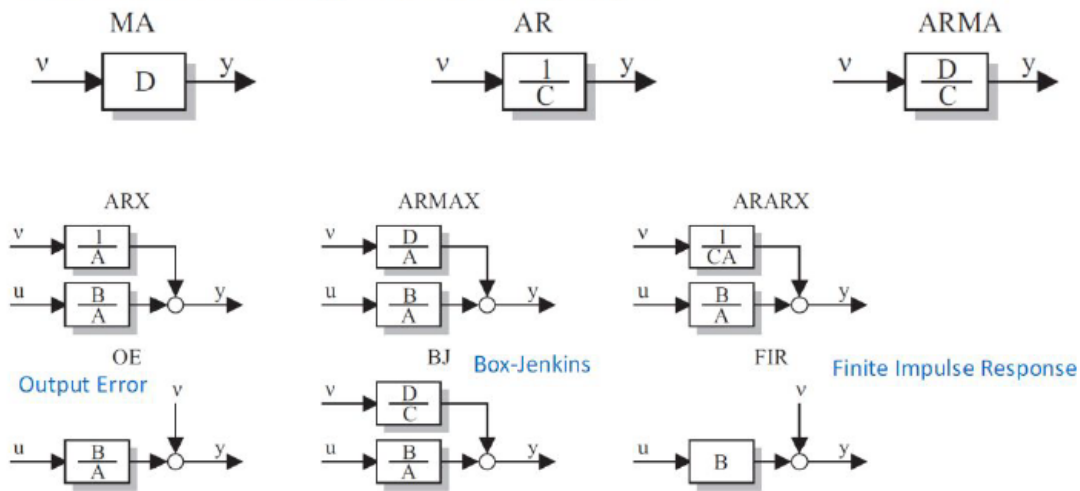
AR - Wykładniczy, opadający do zera lub oscylacje pozytywno-negatywne, również opadające do zera.

MA - Jeden lub więcej nagłych skoków, w pozostałości praktycznie zero.

ARMA - Opadający do zera, po kilku opóźnieniach.

SAR - Sezonowy model stosowany w przypadku, gdy pojawia się wiele wysokich skoków wyjścia w równych interwałach.

Brak - Nie opada do zera lub wszystko jest zerem lub blisko zera.



Modele z całkowaniem

Zmieniając zmienne z absolutnych na przyrostowe uzyskamy model z całkowaniem (np. ARIMA albo ARIMAX). Jest on użyteczny w przypadku, gdy model obiektu okazuje się być niestacjonarny, bo pozwala usunąć trend.

Identyfikacja

Wszystkie powyższe modele są liniowe względem parametrów, więc można je przedstawić w postaci typowej dla regresji liniowej i dobrać wektor parametrów metodą najmniejszych kwadratów. Nie zawsze jest to jednak możliwe – przeszłe wartości zakłóceń są nieobserwowalne, w związku z czym w przypadku modeli zawierających człon MA konieczne jest stosowanie metod iteracyjnych (w których wartość przeszłych zakłóceń estymuje się na podstawie błędu predykcji). Zakłócenie z danej chwili (występujące we wszystkich modelach) zakłada się, że jest zerowe (to najlepszy możliwy strzał, ponieważ taka jest wartość oczekiwana wejścia stochastycznego). Nie możemy wykorzystać wartości wyliczonej

na podstawie poprzedniego kroku ponieważ zakładamy, że każda kolejna wartość na wejściu stochastycznym stanowi niezależną zmienną losową, innymi słowy – nie ma żadnego związku z poprzednimi wartościami).

Podczas identyfikacji istotnym czynnikiem jest korelacja sygnałów. Np. w przypadku MNK zastosowanej do modelu ARX błąd doboru parametrów dąży do wielkości zależnej od wartości oczekiwanej z iloczynu wejścia deterministycznego i stochastycznego. Wartość ta jest zerowa tylko wtedy, jeśli zakłócenia stanowią szum biały.

Jeżeli jednak aktualna wartość zakłóceń jest skorelowana z którąkolwiek zmienną braną pod uwagę w regresji liniowej (czyli np. z poprzednimi wartościami zakłóceń albo wartościami sygnału deterministycznego), wówczas MNK daje niedokładne rezultaty i należy zastosować metodę zmiennej instrumentalnej (pytanie 31) albo zmienić model na bardziej adekwatny np. nieliniowy względem parametrów (wtedy zastosować metodę błędu predykcji). Zazwyczaj zależy nam na zidentyfikowaniu wektorów A i B. Wektory C i D na schemacie oznaczają wtedy, że zdajemy sobie sprawę, że szum jest kolorowy.

1.3 PODA

1.3.1 Sposoby opisu ciągłych liniowych układów dynamicznych. Omówić równania stanu, transmitancje, charakterystyki częstotliwościowe i odpowiedzi skokowe.

Równanie dynamiki

Równanie różniczkowe wyrażające zależność pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym nazywa się równaniem dynamiki.

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x \quad (1.1)$$

Równania stanu

Z równania dynamiki można następnie wyznaczyć równania różnicowe stanu.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Transmitancje

Modele opisane liniowymi równaniami lub układami równań różniczkowych można przekształcić do algebraicznych modeli operatorowych. Najpopularniejsze z nich to transmitancje, oparte na przekształceniach całkowych Laplace'a (L) i Fourier'a (F). Zastosowanie całkowego operatora Laplace'a L powoduje, że funkcje zależne od czasu zostają przekształcone w funkcje zmiennej s (transformaty funkcji), a zamiast pochodnych funkcji występują potęgi zmiennej s, czyli funkcje algebraiczne.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (1.3)$$

Transmitancja G(s) liniowego, stacjonarnego układu dynamicznego jest równa ilorazowi transformat Laplace'a, odpowiednio, przebiegu wyjścia i wejścia, przy zerowych warunkach początkowych.

Portrety fazowe

Jest to rodzina trajektorii w układzie współrzędnych [x, x'], przedstawiających zachowanie obiektu obserwowane przy stałym wymuszeniu ale dla różnych warunków początkowych, które są wówczas jedyną przyczyną zmian obserwowanych w układzie. Jest to graficzny sposób zobrazowania własności dynamicznych obiektów 1. lub 2. rzędu liniowych i nieliniowych. Portrety fazowe najłatwiej jest

uzyskać metodami symulacyjnymi na podstawie równań różniczkowych. Ilość trajektorii koniecznych do odtworzenia portretu można znacznie ograniczyć ze względu na jedną z podstawowych własności – trajektorie nie przecinają się ponieważ badane są układy deterministyczne.

Charakterystyki częstotliwościowe

Wyróżnia się dwa rodzaje charakterystyk częstotliwościowych. Bodego i Nyquista.

Zapewnienie stabilnego działania jest podstawowym wymaganiem, jakie stawiamy układowi automatycznej regulacji. Jednym z kryteriów badania stabilności jest kryterium Nyquista, które służy do oceny stabilności liniowego zamkniętego układu regulacji na podstawie znajomości charakterystyki częstotliwościowej układu otwartego. Badając otwarty układ regulacji możliwe są dwie sytuacje:

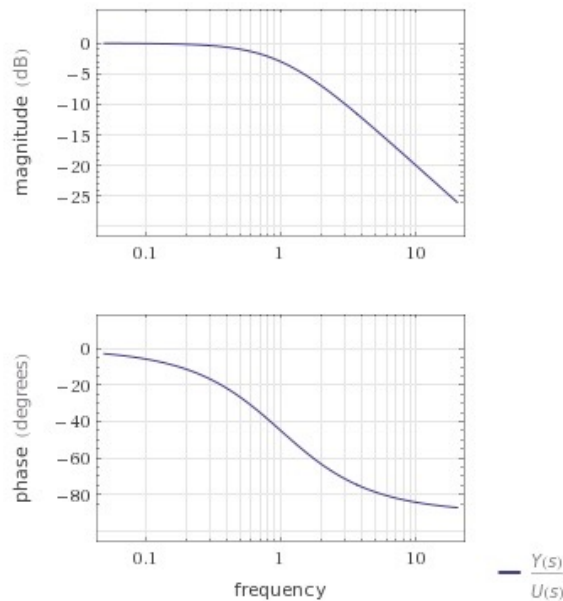
- otwarty układ regulacji jest stabilny,
- otwarty układ regulacji jest niestabilny.

Jednocześnie do analizy stabilności układów regulacji w oparciu o kryterium Nyquista można wykorzystać dla rodzaju charakterystyk częstotliwościowych:

- amplitudowo – fazowe (charakterystyki Nyquista),
- logarytmiczne (charakterystyki Bode'a).

Charakterystyka Bodego obrazuje logarytmiczną zależność amplitudy i fazy od częstotliwości. Składa się z dwóch wykresów: charakterystyki amplitudowej i charakterystyki fazowej.

Aby oddać zmiany zachodzące przy przejściu sygnału przez system wyznacza się dwie charakterystyki: jedną dla zmian amplitudy, a drugą dla przesunięcia w fazie. W ten sposób możemy zobaczyć, jak, dla określonych częstotliwości sygnału wejściowego zmienia się amplituda oraz przesunięcie fazy pomiędzy sygnałem wyjściowym i wejściowym. Skala częstotliwości przedstawiana jest na wykresach w postaci logarytmicznej, skala amplitudy w decybelach, a skala przesunięcia fazowego w kątach lub w radianach.



Z wykresów widać, że dla bardzo niskich częstotliwości sygnału wejściowego możemy założyć, że charakterystyka amplitudowa jest tak mała, że można ją pominąć (dla tego zakresu częstotliwości

amplituda sygnału wyjściowego będzie równa amplitudzie sygnału wejściowego). Natomiast dla częstotliwości wyższych amplituda maleje, co oznacza, że po przekroczeniu pewnej częstotliwości sygnału wejściowego, sygnał wyjściowy będzie coraz mocniej tłumiony.

Kryterium Nyquista

W zależności od położenia punktów przecięcia charakterystyki amplitudowo – fazowej (charakterystyki Nyquista) z osią rzeczywistą, względem punktu krytycznego $(-1, j0)$, charakterystyka ta dzieli się na dwa rodzaje:

- charakterystyka I rodzaju – wszystkie punkty przecięcia leżą na prawo od punktu krytycznego $(-1, j0)$,
- charakterystyka II rodzaju – punkty przecięcia leżą po obu stronach punktu krytycznego $(-1, j0)$.

Jeżeli liniowy otwarty układ regulacji jest stabilny i jego charakterystyka amplitudowo – fazowa (charakterystyka Nyquista) dla pulsacji $\omega \in (0, \infty)$ nie obejmuje punktu $(-1, j0)$, to układ ten po zamknięciu będzie stabilny.

Liniowy zamknięty układ regulacji jest stabilny, jeżeli punkt $(-1, j0)$ znajduje się w obszarze leżącym po lewej stronie charakterystyki amplitudowo – fazowej (charakterystyki Nyquista) $G(\omega)$, przesuając się w kierunku rosnących pulsacji ω .

Odpowiedzi skokowe

Reakcja układu na podanie wymuszenia w postaci skoku jednostkowego na wejście układu. Odpowiedź skokowa ilustruje dynamikę/wyjście/odpowiedź układu. Odpowiedź skokowa jest to wykres w przestrzeni czasu. Z odpowiedzi skokowej można odczytać takie informacje jak:

1. czy układ się stabilizuje, czy oscyluje, czy się rozbiega,
2. jak długo czas się stabilizuje,
3. czy układ ma opóźnienie,
4. wzmocnienie układu,
5. przeregulowanie.

1.3.2 Omówić sprzężenie zwrotne i jego wpływ na dokładność, odporność na błędy i zakłócenia oraz stabilność układu sterowania. Przedstawić warunki podtrzymania drgań oraz kryterium Nyquista dla obiektu stabilnego. Zdefiniować pojęcia zapasu fazy i modułu.

Sprzężenie zwrotne jest to połączenie elementów, w którym sygnał wyjściowy z bloku w torze głównym oddziałuje wstecznie na sygnał wejściowy tego bloku. Sprzężenie zwrotne poprawia skuteczność sterowania. Zamknięta ujemna pętla sprzężenia zwrotnego ma właściwości stabilizujące i linearyzujące. Układ zamknięty jest mniej czuły na zmiany wzmocnienia statycznego układu, powodując zmniejszenie uchybów statycznych. Zbyt duże wzmocnienie może prowadzić jednak do niestabilności. Sprzężenie zwrotne poprawia również parametry jakościowe odpowiedzi skokowej i dobrze sprawdza się w przypadku tłumienia nieznanych zakłóceń.

Dodatnie sprzężenie zwrotne:

- wzrost zniekształceń

- + przy wzroście współczynnika sprzężenia w układzie wystąpi generacja drgań, a nieskończone wzmocnienie oznacza, że generator sam dostarcza na wejście sygnał podtrzymujący drgania. Sygnał wyjściowy zostanie ograniczony do pewnej wartości określonej przez układ - nie może być ona wyższa od napięcia zasilającego wzmacniacz.

Dodatnie sprzężenie zwrotne jest podstawą działania generatorów, przy czym warunki generacji można wyrazić następująco: układ działa jak generator, gdy sprzężenie zwrotne jest dodatnie i dostatecznie silne ($\beta \cdot K = 1$, K - współczynnik pętli głównej, a β sprzężenia), aby podtrzymać drgania.

Jeżeli $\beta \cdot K < 1$ to w układzie następuje tylko wzrost wzmocnienia.

Ujemne sprzężenie zwrotne:

- + poprawia stabilność wzmocnienia (układ jest mniej wrażliwy na np. wahania napięć zasilających i temperatury),
- + zmniejszają się szумы i zniekształcenia (liniowe i nieliniowe),
- + zwiększa się górna częstotliwość graniczna (czyli ulega polepszeniu pasmo przenoszenia wzmacniacza),
- + możliwe jest kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej,
- + możliwa jest modyfikacja impedancji wejściowej i wyjściowej.

W celu podtrzymania drgań w generatorze wymagane jest spełnienie niezależnie dwóch warunków:

1. fazy - musi zachodzić zgodność sygnałów na wejściu i wyjściu wzmacniacza: $\phi_{we} + \phi_{wy} = n \times 360 \text{ deg}$,
2. amplitudy - $\beta \cdot K = 1$.

Kryterium Nyquista

- odnosi się do relacji układ otwarty \rightarrow układ zamknięty pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego o jednostkowym wzmocnieniu,
- pozwala badać stabilność układu zamkniętego na podstawie przebiegu charakterystyki częstotliwościowej układu otwartego, którą można wyznaczyć analitycznie lub doświadczalnie.

Jeżeli charakterystyka amp-faz otwartego układu regulacji automatycznej dla częstotliwości ω nie obejmuje punktu $(-1, j_0)$ to wtedy i tylko wtedy po zamknięciu będzie on równie stabilny.

Układ zamknięty jest stabilny tylko wtedy, gdy punkt $(-1, j_0)$ znajduje się w obszarze leżącym po lewej stronie charakterystyki, idąc od początku w stronę rosnących częstotliwości $\omega \rightarrow$ reguła lewej strony.

Jeżeli hodograf (charakterystyka fazowa Nyquista) przechodzi przez punkt stabilności to układ jest na granicy stabilności.

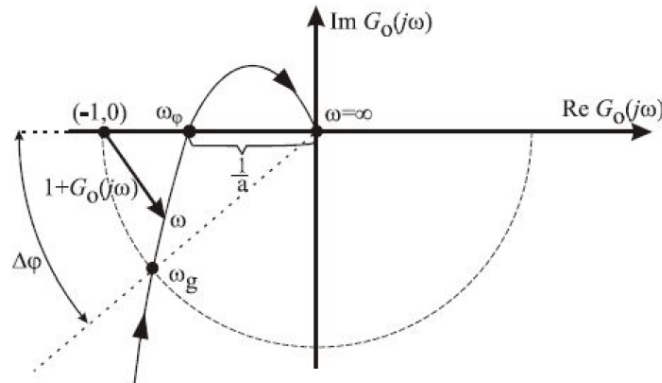
Zapas modułu i fazy to wielkości charakteryzujące od strony ilościowej stabilność układu zamkniętego.

Zapas modułu: $a = \frac{1}{|G_0(j\omega_\phi)|}$

Zapas fazy: $\Delta\phi = 180 \text{ deg} + \arg G_0(j\omega_g) (\text{deg})$

Pomnożenie wzmocnienia przez zapas modułu powoduje, że układ zamknięty znajduje się na granicy stabilności.

Zapas modułu i fazy na wykresie Nyquista:



Zapas stabilności stanowi zabezpieczenie, że gdy przy pewnych zmianach parametrów układu, które mogą zachodzić podczas pracy lub z upływem czasu, to mogą występować przesunięcia charakterystyk w niekorzystnym kierunku, a układ dalej pozostaje stabilny.

1.3.3 Omówić wybrane metody projektowania prostych układów regulacji: dla serwomechanizmów (obiektów minimalnofazowych) oraz dla regulacji przemysłowej (modelowanie obiektów, struktury i podstawowe metody doboru nastaw regulatorów PID).

Wymagania projektowania układu regulacji

1. Układ zamknięty musi być asymptotycznie stabilny, przy czym potrzebne jest zapewnienie odpowiednich zabezpieczeń (np. zapasów) stabilności.
2. Sygnał $y(t)$ powinien jak najlepiej (jak najdokładniej) nadążać za przebiegiem wartości zadanej.
3. Należy w jak największym możliwym stopniu wyeliminować wpływ zakłóceń.
4. Przebiegi przejściowe będące skutkiem różnych od zera warunków początkowych, bądź wynikające z załączenia układu lub zmiany wartości zadanej - na przykład skoku - powinny mieć odpowiedni kształt.

Projektowanie jest sztuką kompromisu między tymi wymaganiami.

Projektowanie serwomechanizmu - dany jest obiekt minimalnofazowy (bez opóźnienia i zer w prawej półpłaszczyźnie), ponadto zakładamy, że istotne jest uzyskanie odpowiedniej dokładności odtwarzania sygnałów zmiennych w czasie, skoncentrowanych w zadanym paśmie roboczym oraz zapewnienie tłumień pomiarowych, wpływ zakłóceń procesowych jest w zasadzie pomijalny.

Projektowanie układu regulacji przemysłowej - dany jest obiekt minimalnofazowy lub części, nieminimalnofazowy. Ponadto istotne jest uzyskanie odpowiednio małego (bądź zerowego) uchybu w stanie ustalonym oraz możliwie najlepsze tłumienie zakłóceń procesowych. Wpływ zakłóceń pomiarowych jest najczęściej pomijalnie mały.

Projektowanie serwomechanizmu

Założenia:

- pomijamy wpływ zakłóceń obiektowych $z(t)$,

- przyjmujemy, że sygnały określające wartość zadaną $y_{\text{zad}}(t)$ mają składowe sinusoidalne o pulsacjach dodatnich ograniczonych poprzez wartość ω_r - pulsacje robocze,
- sygnały określające zakłócenia pomiarowe $v(t)$ mają także przebiegi sinusoidalne,
- transmitancja obiektu $G(s)$ ma postać $G(s) = \frac{L(s)}{s^2 M(s)}$. Ponadto nie ma ona zer i biegunów w prawej półpłaszczyźnie, tzn. zarówno wielomian licznikowy $L(s)$ nie ma pierwiastków (zer transmitacyjnych) w prawej półpłaszczyźnie, jak i wielomian $M(s)$ nie ma pierwiastków (biegunów transmitancji) w prawej półpłaszczyźnie.

Sensowny układ sterowania da się zaprojektować wówczas, gdy $\omega_v > \omega_r$, tzn. wtedy, gdy występuje rozdzielczość pasm sygnałów zakłócających i sygnałów zadanych. Gdy te pasma na siebie wyraźnie nachodzą, konieczne jest poprawienie urządzeń pomiarowych. Trzeba je tak zmienić, aby pasmo zakłóceń nie pokrywało się z pasmem pulsacji roboczych.

Standardowe wymagania projektowe:

Stabilność - bezwzględnie wymagane uzyskanie asymptotycznej stabilności oraz zapewnienie odpowiednich zapasów modułu (6dB) i fazy (45deg).

Dokładność - może być wyrażona jako wymaganie dokładności nadążania. Może temu towarzyszyć także wymaganie zapewnienia zerowego uchybu w stanie ustalonym.

Tłumienie zakłóceń pomiarowych - należy zapewnić jak najlepsze tłumienie zakłóceń $v(t)$ dla $\omega \geq \omega_v$.

Projektowanie w takiej sytuacji polega na kształtowaniu przebiegu logarytmicznej charakterystyki amplitudowej przy pomocy odpowiedniego doboru transmitancji regulatora $R(s)$.

Przebieg charakterystyki amplitudowej układu otwartego:

1. Logarytmiczna charakterystyka modułu układu otwartego musi przechodzić ponad tzw. prostopadłym dokładności o wysokości $20\log\frac{1}{d}$, sięgającym na osi pulsacji do wartości ω_r , po to, by dla pulsacji $\omega \geq \omega_v$ spełnione było wymaganie $|G(j\omega)R(j\omega)| \geq \frac{1}{d}$.
2. Następnie możliwie jak najbliżej wartości ω równej ω_r nachylenie charakterystyki powinno osiągać wartość -2. Wynika to z tego, aby wzmocnienie toru otwartego malało dla pulsacji wyższych niż ω_r możliwie szybko w celu tłumienia zakłóceń pomiarowych.
3. W celu zapewnienia asymptotycznej stabilności układu zamkniętego w okolicy pulsacji odcięcia amplitudy ω_g , gdzie $20\log|G(j\omega)R(j\omega)| = 0$, należy zapewnić nachylenie charakterystyki modułu równe -1, przez dekadę. Nachylenie równe -1 musimy utrzymać na odcinku odpowiadającym mniej więcej jednej dekadzie, tj. od $\omega = \omega_a$ do $\omega = 10\omega_a$ oraz $20\log|G(j\omega)R(j\omega)| \approx 8 \div 10\text{dB}$.
4. Po osiągnięciu przez pulsację wartości równej $10\omega_a$ nachylenie charakterystyki modułu powinno znowu przyjąć wartość równą -2, aby nadal szybko zmniejszać wzmocnienie toru otwartego i tym samym zapewnić jak najlepsze tłumienie zakłóceń charakteryzujących się wysokimi częstotliwościami.

Regulacja przemysłowa

Układ regulacji przemysłowej - układy regulacji takich wielkości jak temperatura, ciśnienie, przepływ, poziom itp. występujące przede wszystkim w zakładach przemysłowych, energetycznych itp. W odróżnieniu od serwomechanizmów, gdzie wielkość regulowana ma charakter przesunięcia liniowego lub kątownego.

Cechy zadań regulacji przemysłowej:

- Sygnał wielkości zadanej jest najczęściej stały w dłuższych odcinkach czasu (tzw. zadanie regulacji stałowartościowej lub zadanie stabilizacji), o wartości zmienianej bardzo rzadko. Sygnał wartości zadanej może być też zmieniany w czasie, np. w z góry zaprogramowany sposób (tzw. regulacja programowa), czy też np. jako sygnał wyjściowy regulatora nadrzędnego zmienny w sposób wynikający z bieżącego działania tego regulatora (regulacja nadążna).
- Z reguły zadanie tłumienia zakłóceń jest najistotniejsze.
- Standardem jest stosowanie regulatora PID, przy czym najczęściej dysponujemy jedynie bardzo uproszczonym modelem obiektu utworzonym specjalnie dla zadania doboru nastaw regulatora.

Regulator PID:

- + prosta struktura
- + realizacja podstawowych celów: tłumienie zakłóceń przy poszerzaniu pas przenoszenia skutkujące dobrą szybkością regulacji również w zadaniu nadążania
- + zerowe uchyby regulacji w stanach ustalonych - dzięki całkowaniu
- + dodatkowe dodatnie przesunięcie fazowe w zakresie średnich częstotliwości skutkujące poszerzeniu pasma przenoszenia, a więc możliwością uzyskania większej szybkości działania układu regulacji - dzięki różniczkowaniu

Cechy:

- zmniejszenie wzmocnienia -> spadek przeregulowań; wydłużenie czasu regulacji
- zmniejszenie czasu zdwojenia (mianownik) -> duże przeregulowania; duże oscylacje
- zmniejszenie czasu wyprzedzenia (licznik) -> duże przeregulowania; duże oscylacje

Dobór nastaw PID

Typowym sposobem postępowania przed doбором nastaw PID jest aproksymacja dynamiki obiektu (w danym punkcie pracy) przy pomocy jednego ze standardowych prostych modeli dynamiki.

Proste modele typu przemysłowego:

1. jednoinercyjny z opóźnieniem FOPD - dla obiektów statycznych $\frac{ke^{-sT_0}}{1+sT}$
2. całkujący z opóźnieniem IPD - dla obiektów astatycznych $\frac{ke^{-sT_0}}{s}$
3. drugiego rzędu z opóźnieniem - dla obiektów o oscylacyjnej odp. skokowej $\frac{ke^{-sT_0}}{T^2s^2+2Ts+1}$

Metody doboru nastaw

1. Metoda Zieglera-Nicholsa (1)
 - (a) Doprowadzić układ do stałych oscylacji (dla P) - wzmocnienie krytyczne z charakterystyki Bodego
 - (b) Odczytać okres oscylacji i wzmocnienie
 - (c) Dodanie I (zniwelowanie uchybu) i D (zmniejszenie przeregulowań oscylacji)
2. Metoda Zieglera-Nicholsa (2) - Polega odczytaniu parametrów opóźnienia, ustalonej odpowiedzi oraz czasu narastania z odpowiedzi skokowej.
3. Metoda SIMC

1.4 SMS

1.4.1 Omówić cechy trzech sposobów komunikacji z układem peryferyjnym: podczytywanie, przerwanie, DMA. Podać przykłady ze wskazaniem przewagi wybranego sposobu.

Podczytywanie - polling - polega na systematycznym odczytywaniu parametrów urządzenia peryferyjnego przez jednostkę centralną, np. tradycyjne myszki są odczytywane z częstotliwością 125Hz. Zaleta: prosta implementacja. Wada: prądożerne.

Przerwanie - interrupt - urządzenie peryferyjne komunikuje jednostce centralnej dedykowanym impulsem, że należy wykonać określony zestaw instrukcji. Jednostka centralna (jeżeli jest uśpiona) budzi się i wykonuje odpowiednie instrukcje. Jeżeli jednostka centralna wykonywała inny program to następuje skok do podprogramu, jego wykonanie, a następnie powrót do pętli głównej. Przykładowo: stare myszki i klawiatury na złączu PS/2. Zaleta: płynność systemu, energooszczędne. Wada: trudniejsza implementacja, ograniczona liczba przerw w systemie.

DMA - direct memory access - jak sama nazwa wskazuje polega to na tym, że urządzenie peryferyjne posiada bezpośredni dostęp do pamięci jednostki centralnej, bez konieczności wykorzystania jednostki centralnej do kopiowania danych z pamięci podręcznej do pamięci urządzenia peryferyjnego. Przykładem czegoś takiego jest AMD Smart Memory Access pozwalający na dostęp karty graficznej do pamięci komputera przy użyciu ich nowszych CPU i GPU. Zaleta: energooszczędne, optymalne użycie zasobów. Wada: ograniczone możliwości - pamięć jest współdzielona DLA urządzenia peryferyjnego, nie na odwrót.

1.4.2 Wymienić i omówić mechanizmy sprzętowe wspierające system operacyjny czasu rzeczywistego w procesorach Cortex-M.

Podwójny wskaźnik stosu MSP oraz PSP.

MPS - main stack pointer - używany przez system operacyjny i program obsługi przerw

PSP - process stack pointer - używany przez podprogramy (taski)

Licznik systick - prosty licznik do generacji przerw. Program obsługi przerw od systick zarządza podprogramami.

Przerwanie SVC (supervisor call) i pendsv (pendable service call) - dwa przerwanie wywoływane programowo. Umożliwiają one nadzorowany dostęp do zasobów podprogramom pracującym na poziomie braku uprzywilejowania.

Poziom braku uprzywilejowania poprawia stabilność systemu poprzez ograniczenie dostępu podprogramów do krytycznych zasobów systemu.

1.4.3 Omówić metody odmierzania czasu w procesorach Cortex-M. Omówić wady i zalety każdego z nich.

Źródłem czasu w mikrokontrolerach jest zewnętrzny bądź wewnętrzny sygnał zegarowy. Jak większość mikrokontrolerów, Cortex-M jest wyposażony w wiele modułów zegarowych.

Źródłem czasu może być zatem moduł zegarowy, bądź też cyklicznie uruchamiany licznik o określonej częstotliwości wywoływania.

Zaletą tego pierwszego rozwiązania jest jego energooszczędność oraz możliwość rozbudowy (polepszającej dokładność) z wykorzystaniem lepszego modułu zegarowego. Natomiast cyklicznie wywoływana funkcja licząca posiada zaletę, że jest funkcją - może wykonać dodatkowe czynności. Wadą tego rozwiązania jest jednak ograniczenie liczby podprogramów, które mikrokontroler może wykonać zanim ponownie będzie musiał wywołać funkcję.

1.5 SCZR

-

1.6 SP

1.6.1 Jak system operacyjny sterownika programowalnego wykonuje program użytkowy? Krótko omówić wszystkie fazy tego procesu. Jakie znacznie ma czas wykonania jednego przebiegu programu?

Cykl wykonywania programu użytkowego w PLC:

1. Odczyt wejść - zapisanie wartości wejściowych/stanów w odpowiednich obszarach pamięci sterownika
2. Wykonanie programu - wszystkie instrukcje wykonywane są w oparciu o aktualny stan wejść.
3. Uaktualnienie wyjść
4. Diagnostyka i komunikacja

Znaczenie czasu wykonania jednego przebiegu:

- Jeśli program będzie wykonywać się zbyt długo to wyjścia wyliczone dla określonych wejść przestaną być aktualne.
- Jeśli na sterowniku zaimplementowany jest regulator o określonym okresie próbkowania i ten czas jest przekraczany to sterowany proces może zachować się w sposób odbiegający od pożądanego.

1.6.2 Wymienić główne rodzaje współcześnie wykorzystywanych języków programowania sterowników PLC. Omówić zalety i wady oraz przedstawić obszar zastosowań każdego z nich.

Języki programowania PLC dzielone są na dwie grupy:

1. graficzne:

FBD - Funkcjonalny Schemat Blokowy - programy przedstawione jako połączenie bloków funkcyjnych zadających zależności między wejściami a wyjściami - (łatwy język programowania, nie wymaga zaawansowanej wiedzy programistycznej)

LD - Schemat Drabinkowy - programy przedstawione są jako schematy elektryczne z przekaznikami - (intuicyjny dla elektryków/elektromechaników, dobry do nieskomplikowanych programów)

2. tekstowe:

IL - Lista Instrukcji - język tekstowy niskiego poziomu (\sim Assembler), (minus: trudna składnia)

ST - Tekst Strukturalny - język tekstowy wyższego poziomu (\sim C), (gotowe struktury)

1.6.3 Opisać metodę programowania zadań sekwencyjnych z wykorzystaniem automatu stanów.

W układach sekwencyjnych aktualne stany wyjść są zależne nie tylko od wejść, ale również od poprzednich stanów. Projektując układ sekwencyjny należy zdefiniować stany w jakich może znaleźć się układ oraz funkcje przejścia między stanami. Można także zdefiniować pętlę pozostania w aktualnym stanie.

Funkcje przejścia pomiędzy stanami odpowiadają konkretnej kombinacji wejść.

Przykłady automatów:

Moore'a - wyjście zależy jedynie od stanu wewnętrznego

Mealy'ego - wyjście jest funkcją stanu wewnętrznego i sygnałów wejściowych

1.7 STP

1.7.1 Omówić postać i funkcję regulatora liniowego ze sprzężeniem od stanu. Przedstawić kryteria wyboru biegunów zamkniętego układu regulacji w wersji ciągłej i dyskretniej.

Regulator liniowy ze sprzężeniem od stanu

Założenie: Układ liniowy

Cele:

- stabilizacja procesu niestabilnego
- sprowadzenie stanu do początku równowagi $x=0$ (z dowolnego warunku początkowego $x(t=0)$)

Etap 1: Wyznaczenie prawa regulacji $\rightarrow u(t) = -K \cdot x(t)$, gdzie u to sygnał sterujący, K to parametry regulatora, a x to pomiar zmiennych stanu.

Równanie charakterystyczne: $|sI - (A - BK)| = 0$

Postać wielomianowa: $(s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_n) = 0$

Projektowanie układu regulacji metodą sprzężenia od stanu:

1. przesuwanie biegunów układu zamkniętego za pomocą sprzężenia od stanu (uzyskanie požądanej dynamiki układu zamkniętego),
2. dobranie obserwatora pełnego rzędu (gdy zmienne stanu nie są mierzone) lub obserwatora zredukowanego (gdy tylko niektóre ze zmiennych stanu są mierzone).

Kryteria doboru biegunów układu zamkniętego (bieguny ciągłe):

- Muszą być stabilne aby proces + regulator był stabilny.
 $\dot{x}(t) = (A - BK)x(t)$ - warunek stabilności - części rzeczywiste wszystkich biegunów muszą być ujemne.
- Koncepcja bieguna dominującego - największy wpływ - biegun położony najbliżej osi urojonej.

Kompromis między jakością wykonania, a sygnałem sterującym.

Kryteria doboru biegunów układu zamkniętego (bieguny dyskretne):

- Wszystkie bieguny takie same - w kole jednostkowym. Najszybszy biegun w (0, 0). Bieguny stabilne w prawym półkolu, bieguny stabilne, ale dzwoniące w lewym.
- Koncepcja bieguna dominującego - największy wpływ - biegun położony najbliżej okręgu jednostkowego.

1.7.2 Emulacja i bezpośrednie projektowanie układu regulacji: dwie metody projektowania dyskretnych układów regulacji.

Emulacja pozwala wyznaczyć aproksymację ciągłego algorytmu regulacji (opisanego równaniem różniczkowym) za pomocą algorytmu dyskretnego (opisanego równaniem różnicowym). Projektujemy algorytm regulatora w zakresie czasu ciągłego, a następnie przybliżamy go do postaci równania różnicowego.

Metody:

Eulera - najprostsza metoda aproksymacji ciągłych równań różniczkowych za pomocą różnicowych

1. Z transmitancji regulatora otrzymuje się ciągłe równanie różniczkowe
2. Skorzystanie ze wzoru różnicowego $\dot{x}(t) \approx \frac{x(k+1)-x(k)}{T_{prbkowania}}$ - czyli metoda Eulera
3. Otrzymanie równania różnicowego aproksymującego ciągły algorytm regulacji

Całkowanie metodą prostokątów i trapezów - Emulacja metody trapezów -> do regulatora ciągłego podstawić $s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$

Metoda przekształcenia biegunów i zer - Na podstawie znajomości bieguna s_0 na płaszczyźnie s można wyznaczyć odpowiadający mu biegun na płaszczyźnie z :

- $z_0 = e^{s_0 T}$ - dyskretne zero
- $z_b = e^{s_b T}$ - dyskretne bieguny
- $R(s) = K_c \frac{(s-s_{o1})(s-s_{o2})...(s-s_{on})}{(s-s_{b1})(s-s_{b2})...(s-s_{bm})}$

Bezpośrednie w przeciwieństwie do emulacji wykorzystują dyskretny model procesu, do którego bezpośrednio dobiera się cyfrowy algorytm regulacji.

1. Wyznaczenie dyskretnego modelu procesu ciągłego: $G(z) = \frac{z-1}{z} Z \frac{G(s)}{s}$ - pozwala zastąpić cały obiekt z ekstrapolatorem zerowego rzędu przez obiekt dyskretny
2. Projektowanie dyskretnego układu regulacji analogicznymi metodami jak dla ciągłych - metody częstotliwościowe oraz metody przestrzeni stanu.

1.7.3 Omówić strukturę oraz sposób działania rozmytych algorytmów regulacji: ze sprzężeniem od stanu, PID oraz predykcyjnych. Podać przeznaczenie tych algorytmów, scharakteryzować ich zalety i wady.

Modele rozmyte służą do aproksymacji funkcji nieliniowych. Idea modelowania rozmytego polega na zastosowaniu wielu lokalnych modeli liniowych, przy czym przełączane są one w sposób rozmyty (nie ma sztywnej granicy pomiędzy modelami). Modele rozmyte można przedstawić przy pomocy bazy reguł wnioskowania rozmytego.

Wykorzystywane funkcje przynależności:

- sigmoidalne
- Gaussa
- trapezowe
- trójkątne

Ze sprzężeniem od stanu - Dla każdego z obszarów modelu rozmytego można zaprojektować standardowy liniowy regulator ze sprzężeniem od stanu.

Reguły, np. R_{reg}^1 : jeżeli $x_2(k) \in X_1$ to $u^1(k) = -K^{-1}x(k)$ - pierwszy regulator lokalny, K^j - wektor współczynników sprzężenia od stanu.

Kompletny nieliniowy regulator rozmyty (prawo regulacji) ma postać: $u(k) = -\sum_{j=1}^m \tilde{\omega}^j(k) K^j x(k)$, gdzie $\tilde{\omega}^j$ to unormowany poziom aktywacji reguły

PID Takagi-Sugeno - W każdym obszarze rozmytym pracuje inny liniowy regulator PID o innych parametrach. Całkowity sygnał sterujący regulatora rozmytego jest kombinacją sygnałów obliczanych przez poszczególne regulatory lokalne.

Reguły modelu rozmytego, np:

R_{reg}^1 : jeżeli $y(k) \in Y_1$ to $y^1(k) = ay(k-1) + bu(k-1)$

R_{reg}^2 : ...

Baza wiedzy rozmytego regulatora PID:

R_{reg}^1 : jeżeli $y(k) \in Y_1$ to $u^1(k) = u(k-1) + d \cdot e(k) + f \cdot e(k-1)$

Predykcyjny

- Opracowano kilka wersji takich algorytmów, różniących się sposobami wykorzystania nieliniowych modeli i uwzględnieniem lub nieuwzględnieniem ograniczeń.
- Projektowanie rozmytego algorytmu predykcyjnego przebiega analogicznie jak regulatora ze sprzężeniem od stanu lub rozmytego regulatora typu PID. Dla każdego z podobszarów, w których można przyjąć liniowe przybliżenie obiektu, projektuje się klasyczny, liniowy algorytm predykcyjny w wersji analitycznej. Finalny, nieliniowy algorytm regulacji jest kombinacją algorytmów lokalnych, wynikającą z zasad wnioskowania rozmytego.
- Rozmyty model odpowiedzi skokowej składa się z zestawu r lokalnych odpowiedzi skokowych.
- W trakcie projektowania rozmytego algorytmu DMC, należy dobrać liniowe regulatory lokalne do modeli zastosowanych w poszczególnych obszarach.
- GPC - modele lokalne są liniowymi równaniami różnicowymi dla których projektuje się niezależnie klasyczne, liniowe algorytmy GPC. Jak w DMC - sygnał wyjściowy rozmytego regulatora jest sumą ważoną sygnałów poszczególnych regulatorów lokalnych.

1.8 WR

1.8.1 Omówić procedurę rozwiązania prostego zadania kinematyki dla manipulatora o strukturze szeregowej z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga.

1. Umieść i oznacz osie przegubów z_1, \dots, z_n

2. Przyjmij bazowy układ współrzędnych 0, tak aby dla zerowej wartości współrzędnej konfiguracyjnej osie układów 0 i 1 pokrywały się. Dla $i = 1, \dots, n$ wykonaj kroki od 3 do 8
3. Umieść początek układu O_i w punkcie przecięcia osi z_i przez wspólną normalną do osi z_i oraz z_{i+1} lub w punkcie przecięcia osi z_i oraz z_{i+1} gdy te osie się przecinają.
4. Wybierz oś x_i wzdłuż prostej normalnej do osi z_i oraz z_{i+1} lub w kierunku normalnej do płaszczyzny tych osi, gdy osie z_i i z_{i+1} przecinają się.
5. Wybierz oś y tak aby układ był prawoskrętny (kciuk OZ, dłoń OX - zgięcie palców o 90deg wyznacza OY).
6. Wybierz takie usytuowanie układu n aby spowodować zerowanie się jak największej liczby parametrów.
7. Utwórz tabelę parametrów D-H ($a_{i-1}, \alpha_{i-1}, d_i, \Theta_i$).
8. Zbuduj macierze przekształcenia jednorodnego ${}^{i-1}_i T$ wstawiając parametry do równania.
9. Oblicz macierz ${}^0_n T$.

d - odległość wzdłuż OZ(i-1) do kolejnego układu n

a - przesunięcie OZ wzdłuż OX(i) do kolejnego układu n

α - kąt mierzony wokół OX(i) od z_{i-1} do z_i zasadą śruby prawoskrętnej

Θ - kąt mierzony wokół OZ(i-1) od x_{i-1} do x_i zasadą śruby prawoskrętnej

1.8.2 Wyjaśnić pojęcia stopnia mobilności, sterowności i manewrowości kołowego robota mobilnego.

Stopień mobilności robota - liczba stopni swobody bazy (korpusu robota), które mogą być zmienione poprzez zmianę prędkości koła

Stopień sterowności robota - liczba kół kierujących, które mogą być orientowane niezależnie dla kierowania robotem

Stopień manewrowości robota - całkowita liczba stopni swobody robota mobilnego

1.8.3 Jakie zadania obejmuje autonomiczna nawigacja robotów? Omówić podstawowe metody stosowane do rozwiązywania tych zadań.

Zadanie nawigacji jest kombinacją czynności:

Percepcji - pomiaru za pomocą różnych czujników stanu środowiska i robota. Wiedza o stanie robota i środowiska jest zazwyczaj częściowa i obciążona niepewnością.

Samo-lokalizacji - określenie pozycji robota w danym układzie odniesienia. "Gdzie jestem?"

Pozdawania lub planowania - zdolności podejmowania decyzji jakie działania są konieczne do osiągnięcia określonego celu w danej sytuacji (stanie robota i środowiska). "Jak dotrzeć do celu?"

- Planowanie zadania - określenie sekwencji działań potrzebnych do wykonania zadania.

- Planowanie ścieżki - wyznaczenia ścieżki przejścia z pozycji aktualnej do zadanej pozycji docelowej

Budowy mapy środowiska - tworzenie wzajemnie jednoznacznego odwzorowania środowiska w pewną reprezentację wewnętrzną (model). "Jak postrzegam swoje otoczenie?"

Wykrywania i unikania kolizji - lokalnej modyfikacji ścieżek ruchu w celu uniknięcia kolizji z przeszkodami.

Sterowania ruchem - obliczenie wielkości sterujących dla napędów robota.

Przedmioty zaawansowane

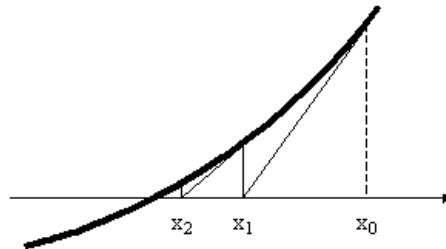
2.1 AMO|EOPT|POPTY|TOP

2.1.1 Przedstawić metody minimalizacji funkcji bez ograniczeń oraz metody rozwiązywania zadań optymalizacji z ograniczeniami. Zdefiniować warunki konieczne i dostateczne optymalności ciągłych zadań optymalizacji z ograniczeniami i bez ograniczeń oraz warunki regularności.

Metody bez ograniczeń:

Poszukiwanie w kierunku

- Metoda najszybszego spadku - Działanie metody najszybszego spadku jest bardzo podobne do metody gradientu prostego. Na samym początku algorytmu wybierany jest punkt startowy $\mathbf{x}_0 \in D$. W punkcie tym obliczany jest antygradient $-\nabla f(\mathbf{x}_k)$ funkcji celu, który będzie stanowił kierunek poszukiwań w procedurze. Następny punkt jest obliczany według wzoru $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k)$.
Różnicą pomiędzy metodą najszybszego spadku a metodą gradientu prostego jest sposób wyszukiwania wartości α_k – dokonywana jest minimalizacja kierunkowa funkcji:
 $f(\mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla f(\mathbf{x}_k)) = \min_{\alpha > 0} f(\mathbf{x}_k - \alpha \nabla f(\mathbf{x}_k))$
- Metoda Newtona - połączenie idei iteracji i lokalnej aproksymacji liniowej. W tej metodzie iteracyjnej x_{n+1} jest określone jako odcięta punktu przecięcia z osią x stycznej do krzywej $y=f(x)$ w punkcie $(x_n, f(x_n))$.



- Metody newtonowskie z aproksymacją różnicową - jest to metoda Newtona z tą różnicą, że równanie pochodnej funkcji minimalizowanej jest przybliżane z błędem rzędu $O(h)$. Aproksymacja ilorazem różnicowym w kierunku w wygląda następująco:

$$F'(x)w \approx \frac{F(x+hw) - F(x)}{h}$$

Metody quasi-newtonowskie - Metoda Quasi-Newtona może być używana, gdy obliczenie Hessianu (macierzy drugich pochodnych funkcji) wymaganego przez metodę Newtona jest trudne lub czasochłonne. Idea metody polega na przybliżeniu Hessianu lub jego odwrotności za pomocą pierwszych pochodnych.

Metody kierunków sprzężonych (Powella) - Metoda Powella polega na poszukiwaniu minimum w kolejnych kierunkach bazowych. Kierunki bazowe w każdym cyklu poszukiwań ulegają modyfikacji, tak aby prowadziły one do szybszego znalezienia minimum, przy czym w kolejnych cyklach muszą być wzajemnie sprzężone. Metoda Powella pozwala odnaleźć minimum funkcji liniowo-kwadratowej w skończonej liczbie iteracji, w wyniku minimalizacji tej funkcji wzdłuż każdego kierunku tylko raz. Metodę Powella zastosować można nie tylko do funkcji będących formą kwadratową, ale także do dowolnych funkcji analitycznych, przyjmując, że w bliskim otoczeniu minimum można je przybliżyć formą kwadratową.

Metody z ograniczeniami:

Wiele metod bez ograniczeń można przystosować do optymalizacji z ograniczeniami (np. dodając do funkcji celu składnik kary za naruszenie ograniczeń).

Metoda sympleks - Składa się z dwóch podstawowych elementów:

1. Pierwszy, który osiągniemy dodając dodatkowe zmienne decyzyjne. W ten sposób dojdziemy do rozwiązania bazowego dopuszczalnego.
2. Drugim elementem jest korekta przeprowadzonych już wcześniej iteracji rozwiązania bazowego dopuszczalnego do momentu, kiedy osiągniemy rozwiązanie optymalne, jeśli ono w ogóle istnieje.

Istotą algorytmu sympleks jest badanie rozwiązań bazowych w postaci kanonicznej tak, aby znaleźć dowolne rozwiązanie programu, równocześnie sprawdzając czy jest ono optymalne. Jeżeli rozwiązanie nie jest optymalne, zaczynamy ponownie od znalezienia rozwiązania bazowego lepszego od poprzedniego. Kiedy stwierdzimy, że nie jesteśmy w stanie poprawić rozwiązania oznaczając to, że rozwiązanie bazowe jest optymalne.

SLP - Algorytm SLP polega na sprowadzeniu minimalizacji nieliniowej funkcji celu przy nieliniowych ograniczeniach do ciągu minimalizacji liniowej funkcji celu przy liniowych ograniczeniach (czyli tzw. zadania programowania liniowego - LP). Takie postępowanie jest szczególnie skuteczne dla funkcji słabo nieliniowych, ponieważ ich liniowe przybliżenie jest dość dokładne, a problem LP jesteśmy w stanie rozwiązywać bardzo szybko, nawet przy dużej liczbie zmiennych decyzyjnych.

Warunek konieczny optymalności:

$g(x^*) = \nabla f(x^*) = 0$ - warunek I rzędu (stacjonarność), x^* - minimum lokalne
 $G^*(x^*) = \nabla^2 f(x^*) = d^T H(x^*) d \geq 0$ - warunek II rzędu

Warunek dostateczny lokalnego minimum:

$g(x^*) = \nabla f(x^*) = 0$
 $G^*(x^*) = \nabla^2 f(x^*) = d^T H(x^*) d > 0$ (warunek ściśle dodatniej określoności hesjanu - wypukłości w każdym kierunku)

Warunki regularności

1. Wszystkie funkcje ograniczeń c_i są liniowe (Karlin).
2. Wszystkie funkcje ograniczeń c_i są funkcjami wypukłymi oraz istnieje taki punkt x , że $c_i(x) < 0$ dla wszystkich indeksów $i \in I$ (Slater).
3. Gradienty wszystkich ograniczeń aktywnych ($\nabla c_i(\hat{x})$ dla $i \in A(\hat{x})$) są liniowo niezależne (Fiacco i McCormick).

Spełnienie jednego z powyższych warunków wystarczy, aby punkt był optymalny. Jak jedno z ograniczeń nie jest spełnione, to możliwe jest inne.

2.1.2 Opisać dualność zadań programowania liniowego i optymalizacji wypukłej. Zdefiniować odstęp dualności.

Pomiędzy zadaniami dualnymi i prymalnymi zachodzą silne związki umożliwiające konstrukcje alternatywnych algorytmów rozwiązywania zadań programowania liniowego, jak również zmniejszenia nakładu obliczeń.

Zadanie prymalne : $\min_x c^T x$

Przy ograniczeniach:

- $Ax \geq b$
- $x \geq 0$

Zadanie dualne: $\max_{\lambda} b^T \lambda$

Przy ograniczeniach:

- $A^T \lambda \leq c$
- $\lambda \leq 0$

1. Zamiast n -wymiarowego wektora zmiennych x mamy m -wymiarowy wektor zmiennych dualnych λ (m - liczba ograniczeń pełnych zadania prymalnego).
2. Wektor cen (c) modelu prymalnego staje się wektorem zasobów w zadaniu dualnym.
3. Wektor zasobów (prawych stron ograniczeń liniowych) b staje się wektorem cen w zadaniu dualnym.
4. W zadaniu prymalnym funkcja celu jest minimalizowana, w zadaniu dualnym maksymalizowana.
5. Jeżeli w zadaniu prymalnym ograniczenia są typu równościowego to w zadaniu dualnym zmienne te są nieograniczone.

Odstęp dualności - jest to różnica między wartością optymalną zadania dualnego i prymalnego.

2.1.3 Przedstawić metody rozwiązywania zadań programowania kwadratowego z ograniczeniami. Omówić wykorzystanie zadań programowania kwadratowego w metodach ograniczonego obszaru zaufania i sekwencyjnego programowania kwadratowego.

Zadania programowania kwadratowego są drugim po zadaniach liniowych specyficznym typem zadań optymalizacji z ograniczeniami, dla których rozwinięto specjalne metody ich rozwiązywania. Zwykle przez pojęcie zadań programowania kwadratowego rozumie się zadania, w których funkcja celu jest kwadratowa, a ograniczenia liniowe.

Przykładowa funkcja celu: $\min_{x \in R^n} f(x) = \frac{1}{2}x^T Gx + t^T x$

Metody rozwiązywania zadań programowania kwadratowego z ograniczeniami:

Ograniczenia równościowe - Źródło

- Metoda bezpośredniej eliminacji zmiennych - Metoda ta polega na wyznaczeniu m zmiennych z ograniczeń i wstawieniu ich do funkcji celu redukując w ten sposób wyjściowe zadanie do zadania minimalizacji bez ograniczeń funkcji n - m zmiennych.
- Metoda uogólnionej eliminacji - Metoda ta polega w istocie na tym, aby w eliminacji części zmiennych z ograniczeń równościowych $Ax = b$ zadania wykorzystać rozkład spełniającego te ograniczenia wektora x na składową leżącą w $\ker A$ i składową leżącą w $\text{Im } A^T$.

Ograniczenia nierównościowe - Metoda zbioru ograniczeń aktywnych - Jej działanie jest podobne do działania metody Simplex. Metoda ta polega na włączaniu i usuwaniu ograniczeń ze zbiorów ograniczeń aktywnych (zbiór ograniczeń, na których krawędziach leży rozpatrywany punkt).

Metoda obszaru zaufania

Rozważmy problem minimalizacji funkcji skalarnej $f(x)$ bez ograniczeń. Załóżmy, że punkt x znajduje się w n-wymiarowej przestrzeni i chcemy przejść z punktu x do punktu x' takiego, że wartość funkcji celu $f(x') < f(x)$. Metoda obszaru zaufania polega na przybliżaniu funkcji f inną, prostszą funkcją q, która w pewnym stopniu oddaje przebieg funkcji f w sąsiedztwie N punktu x. Sąsiedztwo to nazywamy obszarem zaufania. Krok próbny s jest wyliczany przez minimalizację w obszarze N. Tak zdefiniowany problem nazywamy podproblemem obszaru zaufania: $\min_s \{q(s), s \in N\}$.

Przejście z punktu x do punktu $x + s$ następuje tylko jeżeli: $f(x + s) < f(x)$.

W innym przypadku punkt x pozostaje niezmienny, obszar zaufania N ulega zawężeniu, a krok próbny zostaje powtórzony.

W standardowej metodzie obszaru zaufania funkcja f jest aproksymowana przez wielomian drugiego stopnia q definiowany jako dwa pierwsze wyrazy szeregu Taylora. Sąsiedztwo N jest zazwyczaj sferyczne lub elipsoidalne.

Sekwencyjne programowanie kwadratowe jest jedną z najbardziej skutecznych metod numerycznego rozwiązywania zadań optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami. Poniżej sformułowanie nieliniowego zadania optymalizacji, do którego stosujemy metodę SQP:

$$\min_{x \in R^n} f(x)$$

Przy ograniczeniach:

- $c_E(x) = 0$
- $c_I(x) \leq 0$

SQP jest procedurą iteracyjną, która buduje model kwadratowy zadania nieliniowego w każdym punkcie iteracyjnym x^k , rozwiązuje podproblem kwadratowy, a następnie używa tego rozwiązania do konstrukcji kolejnego punktu iteracyjnego x^{k+1} . Jego konstrukcja jest realizowana w taki sposób, że ciąg $\{x^k\}_{k=1}^{+\infty}$ zbiega do lokalnego minimum zadania nieliniowego. W tym sensie jest podobna do metod

Newtona i quasinewtonowskich do rozwiązywania układów równań nieliniowych. Jednakże obecność ograniczeń czyni analizę i implementację metod SQP znacznie bardziej skomplikowaną.

Metoda SQP rozwiązuje ciąg podproblemów optymalizacyjnych, każdy z nich optymalizuje model kwadratowy funkcji celu przy zlinearyzowanych warunkach ograniczających.

2.2 ISR

2.2.1 Omówić kolejne poziomy reprezentacji ontologicznej stosowane w językach programowania robotów.

Poziom ontologiczny języka programowania robotów wyznaczają przede wszystkim instrukcje ruchowe tego języka. Praktycznie we wszystkich językach instrukcje te odnoszą się albo do końcówki manipulatora, albo do jego złącz, a więc widać, że poziomy ontologiczne mogą być wymieszane w ramach jednego języka. Końcówką jest albo narzędzie, albo pewne miejsce charakterystyczne trzymanego przedmiotu. W przypadku narzędzi typu: aparaty spawalnicze, zgrzewarki lub pistolety lakiernicze rozkazy odnoszą się do pozycji części roboczej narzędzia. W przypadku chwytaków argumenty rozkazów ruchowych stanowią: pozycja punktu centralnego znajdującego się między szczękami lub, po uchwyceniu przedmiotu, jakaś jego część charakterystyczna, np. spód.

Poziom stawów - rusz się do pozycji w stawach

Poziom manipulatora - rusz się do pozycji operacyjnej

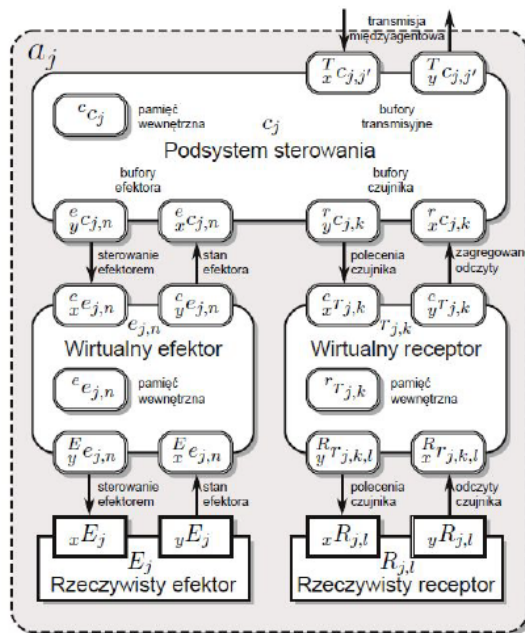
Poziom obiektów - połóż widelec na talerzu

Poziom zadania - otwórz drzwi

2.2.2 Omówić strukturę agenta upostaciowionego oraz sposób opisu jego działania.

Agent upostaciowiony postrzega swoje środowisko przez receptory i oddziałuje na nie przez efektory. Funkcja przejścia stanowi program działania agenta. Struktura działania agenta odpowiada strukturze skończonego automatu (maszyna stanów).

Agent komunikuje się z rzeczywistymi efektorami i receptorami z wykorzystaniem ich wirtualnych odpowiedników, przechowując w ich dedykowanych buforach wartości zadane. Następnie rolą wirtualnych efektorów i receptorów jest translacja rzeczywistych wartości napędowych i czujnikowych do (i z) wartości rozumianych przez podsystem sterowania.



Typ podsystemu:

- podsystem sterowania (pojedynczy),
- efektor wirtualny,
- receptor wirtualny.

Cykl pracy każdego podsystemu:

- pobrać dane z buforów wejściowych i wewnętrznych,
- obliczyć odpowiednio: $c_{f,j}$, $e_{f,j}$, $r_{f,j}$,
- odesłać wyniki do buforów wyjściowych i wewnętrznych.

2.2.3 Omówić podstawowe rodzaje map otoczenia i metody ich budowy.

Podstawowe rodzaje map:

Mapy metryczne opisujące relacje geometryczne między obiektami dzieli się na:

- Mapy rastrowe - najczęściej reprezentowane w postaci regularnej siatki (np. siatka zajętości) lub reprezentacje w postaci drzew (czwórkowych, ósemkowych).
- Mapy geometryczne - zwane też obiektowymi są zbudowane z obiektów (prymitywów) geometrycznych (punktów, linii, wielokątów...).

Mapy topologiczne są to grafy, w których węzły odpowiadają obserwowanym cechom (znacznikom), a łuki opisują związki między tymi cechami.

Mapy hybrydowe to połączenie elementów geometrycznych i topologicznych.

Mapy kognitywne zawierają dodatkowe, poza opisem geometrycznym i/lub topologicznym środowiska, informacje o obiektach, relacjach między obiektami oraz miejscach.

Metody budowy map:

Metryczne - budowane na podstawie pomiaru, rysunku CAR lub siatki zajętości.

Topologiczne - grafy widoczności i diagramy Woronoja.

Obrazy RGBd - RedGreenBlueDistance.

Mapy 3D - postać chmury punktów.

2.3 MI

2.3.1 Co to jest zmienna instrumentalna? Jakie warunki powinny one spełniać dla zapewnienia nieobciążonej estymaty? Jakie są typowe wybory zmiennej instrumentalnej?

Zmienna instrumentalna jest to zmienna nieskorelowana z wyjściem $y(t)$

- stosuje się ją do analizy modeli, których składnik losowy (patrz pytanie 1.2.3) nie jest zależny od zmiennych objaśniających model
- uogólnienie MNK
- metoda bezpośrednia w celu uniknięcia obciążenia estymaty
- dzięki metodzie zmiennych instrumentalnych, mimo tego, że zmienne objaśniające modelu są skorelowane ze składnikiem losowym, otrzymamy estymatę nieobciążoną (w przypadku MNK uzyskany estymator byłby obciążony)
- model w postaci $e = y - \Psi\hat{\Theta}$ mnożymy przez macierz zmiennych instrumentalnych W :
$$W^T e = W^T y - W^T \Psi \hat{\Theta}$$
$$\hat{\Theta} = (W^T \Psi)^{-1} W^T y$$
- Aby estymata była nieobciążona, liczba instrumentów jest równa liczbie zmiennych objaśniających (W ma taki sam wymiar jak Ψ)

W praktyce metoda zmiennych instrumentalnych polega na modyfikacji postaci modelu poprzez przemnożenie go przez macierz W skonstruowaną ze zmiennych instrumentalnych.

Warunki zapewnienia nieobciążonej estymaty:

- nieskorelowane z $n(k)$ - błąd losowy
- skorelowane z $u(k)$ i $y_u(k)$ - zmienne objaśniające

Wybór zmiennej instrumentalnej:

- można wykorzystać poprzednie (historyczne) wejścia jako zmienne instrumentalne:
$$w^T = (u(k-1-\delta)\dots(u(k-m-\delta)|u(k-d-1)\dots u(k-d-m))$$
- wykorzystanie sygnału w oparciu o estymatę zakłócenia wyjścia:
$$w^T = (-h(k-1)\dots -h(k-m)|u(k-d-1)\dots u(k-d-m))$$
$$h(k) = \hat{y}_u(j) = \Psi^T(k)\hat{\Theta}(k)$$

Podejście iteracyjne:

1. W pierwszej iteracji stosujemy zmienną instrumentalną w postaci sygnału wejściowego/
2. W kolejnej iteracji na podstawie pierwszej iteracji wyniku oraz zmiennej instrumentalnej wygenerowanej w oparciu o estymatę niezakłóconego wyjścia wyliczamy kolejną estymatę parametrów.
3. Powtarzamy krok 2. aż parametry się nie poprawią.

Estymator nieobciążony:

- gdy obiekt jest odpowiednio pobudzony

- gdy jego wartość oczekiwana jest równą rzeczywistej wartości estymowanego parametru (tzn. jest najbardziej prawdopodobne, że właśnie ją otrzymamy)
- rząd modelu musi się zgadzać z rzędem identyfikowanego obiektu

Estymator obciążony:

- gdy występuje przesunięcie pomiędzy rzeczywistą wartością parametru, a wartością oczekiwaną estymatora

2.3.2 Jakie są różnice pomiędzy obserwatorem stanu i filtrem Kalmana? Przedstawić zasadę działania filtru Kalmana, zalety oraz ograniczenia.

Filtr Kalmana może być użyty w roli obserwatora stanu (choć ma też inne zastosowania, np. nomen omen filtrowanie). Trudno zatem mówić o różnicach. Najczęściej na innych przedmiotach konstruowaliśmy obserwatory o stałym wektorze wzmocnień metodą lokowania biegunów. W ten sposób można dobrać obserwatora, który będzie zbiegał odpowiednio szybko do stanu obiektu pod warunkiem małego zaszumienia sygnałów – w przeciwnym wypadku będzie podążać za szumem. Filtr Kalmana jest przystosowany do działania w środowisku z zakłóceniami – lokuje swoje bieguny tak, by uzyskiwać statystycznie optymalne przewidywania.

Działanie filtra jest dwuetapowe (predyktor - korektor). Wpierw prognozowany jest stan jeden krok naprzód, potem prognoza ta jest korygowana w oparciu o nowy pomiar wyjścia. Stopień w jakim wykorzystywana jest informacja o aktualnym stanie wyjścia zależy od aktualizowanej na bieżąco macierzy wzmocnień K . Wyliczana jest na podstawie macierzy kowariancji stanów P (również aktualizowanej na bieżąco) – w taki sposób by minimalizować zależną od K i P wariancję błędu estymacji. W procesie stacjonarnym P i K dążą do wielkości ustalonych. Można zatem wyliczyć je a priori, co redukuje koszt obliczeniowy filtra.

Zalety:

- rezultat statystycznie optymalny bez względu na obserwowalność i wykrywalność systemu, odporny na szumy, jak to tylko możliwe
- algorytm rekursywny – nie trzeba kumulować danych

Wady:

- duży koszt obliczeniowy
- nie zawsze łatwo jest określić parametry zmiennych zakłócających (V), co prowadzi do trudności z inicjalizacją filtra
- działa dla liniowych procesów stacjonarnych przy założeniu, że wejście $u(k)$ i stan $x(k)$ to zmienne o rozkładzie gaussowskim (ale istnieją rozszerzenia znoszące te ograniczenia)

2.3.3 Jak można wyznaczyć odpowiedź częstotliwościową systemów liniowych dla nieokresowych sygnałów testowych? Jakie są ich wady i zalety w stosunku do okresowych sygnałów testujących?

Należy pobudzić takim sygnałem jakim się da (możliwie szeroko pobudzającym układ w dziedzinie częstotliwości), zebrać odpowiedź i wykonać transformatę Fouriera obu sygnałów. Ich stosunek odpowiada transmitancji widmowej obiektu - przekształcenie Fouriera stanowi szczególny przypadek przekształcenia Laplace'a.

Kryteria doboru sygnału wejściowego:

1. dobrze jest znać jego transformatę Fouriera
2. musi być realizowalny przez obiekt
3. powinien dobrze pobudzać różne częstotliwości
4. im bardziej strome brzegi impulsu, tym większe wzbudzenie dla wyższych częstotliwości
5. dla ustalonej amplitudy impulsu największa gęstość amplitudowa w widmie jest osiągana dla:
 - skoku jednostkowego w przypadku niskich częstotliwości
 - impulsów prostokątnych dla średnich i wysokich częstotliwości
6. sygnały te zapewniają najmniejszy błąd identyfikacji dla zaszumionych wejść

W przypadku skoku jednostkowego, rampy, i niesymetrycznego impulsu trapezowego nie da się bezpośrednio wyznaczyć transformaty Fouriera. Można wzbudzić układ wiele razy tym samym sygnałem i uśrednić wyniki. Można też pobudzić wieloma różnymi sygnałami, ale wtedy uśredniać należy wyznaczone charakterystyki częstotliwościowe.

Skok jednostkowy i impuls prostokątny zapewniają najmniejszy błąd identyfikacji charakterystyk częstotliwościowych dla zaszumionych wyjść.

Zalety:

- jednoczesne pobudzenie wielu częstotliwości
- można sprawdzić wiele częstotliwości mieszcząc się w ograniczeniach obiektu (prędzej nam pozwolą puścić skok jednostkowy niż sinusoidę)

Wady:

- wyliczenie transformaty bywa kłopotliwe, niektóre sygnały jej nie mają
- istotne jest okienkowanie
- należy dobrze dobrać sygnał do badanego zakresu częstotliwości (aby dominował nad szumem)
- żeby dobrze dobrać sygnał warto byłoby już znać proces

2.4 MORO

2.4.1 Czym są i jak się rozwiązuje proste i odwrotne zagadnienie kinematyczne dla szeregowych łańcuchów kinematycznych?

Proste zagadnienie kinematyki - mamy nastawy jointów i chcemy wyznaczyć pozycję chwytaka - 1.8.1

Odwrotne zagadnienie kinematyki - posiadamy pozycję chwytaka i chcemy wyznaczyć ustawienie jointów - stosujemy przyrównanie macierzy oraz podstawianie, np.: $(T_1^0)^{-1}T_3^0 = T_3^1 = T_2^1T_3^2$

2.4.2 Jaka jest ogólna struktura modelu dynamiki manipulatora szeregowego oraz jego napędu elektrycznego?

Struktura modelu dynamiki : $\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + B(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta)$

τ - wektor momentów sił na każdym stawie

M - macierz momentów bezwładności manipulatora

B - wektor sił i momentów sił odśrodkowych i Coriolisa

G - wektor sił i momentów sił grawitacji

Moment wirnika zależny od prądu liniowego : $M_W = M_B + M_\tau + M_{\text{const}}$

M_B - moment bezwładności $J \frac{d^2\Theta}{dt^2}$

M_τ - moment tarcia $B \frac{d\Theta}{dt}$

M_{const} - stały moment obciążenia

2.4.3 Omówić podstawowe metody generacji trajektorii dla manipulatorów.

Generacja trajektorii w przestrzeni złączy:

- wymaga mniej obliczeń online
- ciężka do przewidzenia trajektoria TCP (Tool Center Point)
- dobra do szybkich ruchów w nieograniczonej przestrzeni
- nie potrzeba obliczać OZK (odwrotne zadanie kinematyki)

Generacja trajektorii w przestrzeni zadania:

- więcej obliczeń online
- możliwość unikania kolizji poprzez wyznaczenie trajektorii TCP

Trajektoria z punktu do punktu w przestrzeni złącza:

1. wielomianowa 3-stopnia - 3 to najniższy stopień, gdyż to jest minimum by zadać początkowe i końcowe położenia oraz początkową i końcową prędkość. Cechuje się brakiem ciągłości funkcji przyspieszenia co powoduje szarpnięcie podczas sklejania trajektorii
2. wielomianowa 5-stopnia - zapewnia ciągłość przyspieszenia, gładkie sklejenie prędkości
3. LSPB - Linear Segments With Parabolic Blends (Symetryczny o trapezowym przebiegu prędkości)
4. Bang-Bang specjalny przypadek LSPB bez stałego fragmentu przebiegu wartości prędkości - od płynnego przyspieszania bezpośrednio w płynne hamowanie (bez fazy ze stałą prędkością)

2.5 SST

Słowem wstępu

Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje koordynacji: iteracyjną i periodyczną.

Koordynacja iteracyjna odpowiada jakby procesowi negocjacji pomiędzy decydentami, nazywanymi także jednostkami lokalnymi, z jednej strony, oraz koordynatorem (jednostka nadrzędna) z drugiej strony. Rezultatem tego iteracyjnego procesu ma być osiągnięcie stanu harmonii, w którym decyzje wszystkich ośrodków przekładają się na pożądane działanie systemu jako całości.

Na wykorzystaniu koordynacji iteracyjnej opierają się hierarchiczne metody optymalizacji: Metoda Bezpośrednia i Metoda Dualna, zwana także Metodą Cen.

Czynnik upływu czasu nie musi być w koordynacji iteracyjnej artykułowany, aczkolwiek w niektórych sytuacjach mechanizm tej koordynacji może być wykorzystany do sterowania systemów statycznych bądź systemów pracujących w stanie ustalonym, w oparciu o informacje pozyskiwane o aktualnych warunkach pracy tych systemów.

Jednym z zastosowań mechanizmu iteracyjnego Metody Cen może być sterowanie intensywnością transmisji źródeł ruchu w sieci danych.

Koordynacja periodyczna oparta jest o inną zasadę funkcjonowania: interwencje koordynatora modyfikujące działanie jednostek lokalnych mają miejsce w określonych odstępach czasu, pomiędzy tymi interwencjami jednostki lokalne realizują swoje zadania kierując się własnymi celami oraz wartościami instrumentów koordynujących przekazanych przez koordynatora.

W koordynacji periodycznej, stosowanej w złożonych układach sterowania i wspomagania decyzji, czynnik czasu odgrywa rolę podstawową. Jeśli przyjmiemy, że kolejne dyskretne chwile podejmowania decyzji m_i przez i -tą jednostkę lokalną są określone wskaźnikiem czasu k_l zaś wyróżniony podciąg tych chwil $\{k_l\}, l = 1, \dots, \dots$, odpowiada kolejnym interwencjom koordynatora, to:

$$m_l(k) = \mu(p(k_l), l_i(k)) \text{ dla } k_l \leq k < k_{l+1}$$

gdzie wielkość $p(k_l)$ oznacza wartość zestawu instrumentów koordynacji periodycznej ustaloną w chwili k_l , zaś $l_i(k)$ oznacza lokalną informację dostępną lokalnemu decydentowi w chwili k .

Ta ogólna zasada działania obecna jest w wielu systemach i organizacjach; postanowienia (wytyczne) podejmowane przez jednostkę nadrzędną są zmieniane, na ogół, w większych odstępach czasu niż decyzje określone lokalnie.

2.5.1 Przedstawić zasadę działania Metody Bezpośredniej koordynacji iteracyjnej; podać jej podstawowe zalety i wady.

Decydenci lokalni rozwiązują zadania cząstkowe modyfikowane przez koordynatora przy pomocy zmiennych koordynujących i przesyłają do koordynatora odpowiednie informacje; wartości zmiennych koordynujących są zmieniane do czasu osiągnięcia odpowiedniego warunku stopu (warunku koordynacji).

Na ogół dzieje się to tak, że koordynator proponuje wartości zmiennych podsystemom, podsystemy optymalizują swoją użyteczność i zwracają do koordynatora jej wartość oraz w razie potrzeby inne informacje (np. wartość gradientu cząstkowego), koordynator znajduje nowe wartości zmiennych itd. aż ustali się równowaga.

Zalety Metody Bezpośredniej:

- Mała wymiarowość zadań lokalnych; jest to podstawowa cecha metod hierarchicznych z koordynacją iteracyjną.
- Dla dopuszczalnych wartości zmiennych koordynujących zadania lokalne mają rozwiązania spełniające warunki nałożone na dostępne zasoby; inaczej mówiąc podczas procesu dochodzenia do

optymalnego przydziału zasobów w każdej iteracji mamy do czynienia z dopuszczalnymi rozwiązaniami.

- Jeśli wyjściowe Zadanie Przydziału (ZP) ma rozwiązanie, to niezależnie od własności funkcji użyteczności oraz funkcji występujących w ograniczeniach, zadania lokalne Zl_i , $i=1,\dots,N$, a także zadanie ZK (Zadanie Koordynacji), są dobrze określone i zastosowanie Metody Bezpośredniej prowadzi do znalezienia rozwiązania zadania ZP.

Wady Metody Bezpośredniej:

- Duża wymiarowość zadania ZK: liczba zmiennych koordynujących $= N \cdot J$.
- Jeśli wskaźniki jakości w zadaniach lokalnych nie są ściśle wklęsłe lub funkcje występujące w ograniczeniach na zasoby nie są wypukłe, to możemy tracić różniczkowalność funkcji celu górnego poziomu i może ona być trudna w optymalizacji.
- Jeśli decydenci lokalni z jakiś powodów postanowią oszukiwać koordynatora, to mogą podawać zaniżone wartości lokalnych użyteczności odpowiadających proponowanym przydziałom zasobów, a także zawyżone wartości pochodnych odpowiadającym aktywnym ograniczeniom zasobów - w ten sposób mogą uzyskać przydział dodatkowych nienależnych im zasobów.
- Decydenci lokalni nie wnoszą żadnych opłat za użytkowanie zasobów, które są ograniczone: wada ta wiąże się z poprzednią i jest charakterystyczna dla tzw. gospodarki nakazowej.
- W przypadku pojawienia się w zadaniach lokalnych dodatkowych ograniczeń na wielkości x_i , na przykład w postaci $h_i(x_i) \geq 0$, może się łatwo zdarzyć, że trudno będzie koordynatorowi wyznaczyć zakres zmienności przydzielanych lokalnym jednostkom ilości zasobów, dla których zadania lokalne będą miały dopuszczalne rozwiązania.

2.5.2 Przedstawić zasadę działania Metody Cen (Metody Zrównoważenia Interakcji) koordynacji iteracyjnej; podać jej podstawowe zalety i wady.

Zamiast zadania prymalnego (pytanie 2.5.1) rozwiązuje się zadanie dualne. Mnożniki Lagrange'a odpowiadają cenom za poszczególne zasoby. "Cena" w tym kontekście oznacza zmniejszenie użyteczności podsystemu wskutek zużycia zasobu. Podsystemy starają się osiągnąć jak największą użyteczność skorygowaną o poniesiony koszt. Koordynator tak steruje cenami, żeby wyszło optymalnie.

Zalety Metody Cen:

- Małą wymiarowość zadań lokalnych, podobnie jak w przypadku Metody Bezpośredniej; jest to podstawowa cecha metod hierarchicznych z koordynacją iteracyjną.
- Małą wymiarowość, równa J , wektora zmiennych koordynujących; jest to bardzo ważna zaleta Metody Cen; przypomnieć wypada, że w przypadku Metody Bezpośredniej liczba zmiennych koordynujących jest równa $N \cdot J$.
- Zbiór punktów dopuszczalnych każdego z zadań lokalnych jest bardzo prosty i niezależny od zmiennych koordynujących. W przypadku pojawienia się w zadaniach lokalnych dodatkowych ograniczeń na wielkości x_i , na przykład w postaci $h_i(x_i) \geq 0$, nie występują, w odróżnieniu od Metody Bezpośredniej, dodatkowe trudności.
- Jeśli zadanie koordynatora ma rozwiązanie w postaci wektora cen koordynujących p^* , to punkt ten minimalizuje wypukłą funkcję dualną na zbiorze nieujemnych wektorów w przestrzeni R_J .

Wady Metody Cen:

- Dla dopuszczalnych wartości zmiennych koordynujących zadania lokalne mogą mieć rozwiązania niespełniające ograniczeń nałożonych na dostępne zasoby; inaczej mówiąc podczas iteracyjnego procesu dochodzenia do optymalnego przydziału zasobów możemy mieć, i na ogół mamy, do czynienia z niedopuszczalnymi rozwiązaniami.
- Mogą nie istnieć wartości zmiennych koordynujących dla których spełniony zostaje warunek koordynacji, tj. może wystąpić luka dualności lub niemożność wybrania ze zbiorów rozwiązań zadań lokalnych punktów będących rozwiązaniami zadania PZ.
- Warunki wystarczające praktycznej stosowalności Metody Cen są bardzo wymagające; w podstawowej wersji tych warunków wymagana jest ścisła wklęsłość funkcji użyteczności i wypukłość funkcji określających zużycie zasobów.

2.5.3 Opisać, na wybranym przykładzie, działanie układu hierarchicznego z koordynacją periodyczną.

Koordynacja periodyczna: Jednostki lokalne kierują się swoimi celami oraz wartościami instrumentów koordynujących przekazanych przez koordynatora. Interwencje koordynatora modyfikujące ich działanie mają miejsce w określonych odstępach czasu.

Przykład koordynacji periodycznej - sterowanie zbiornikami retencyjnymi podczas przejścia fali powodziowej.

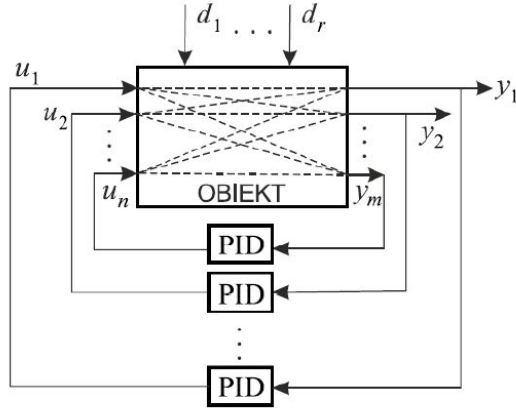
Operator zbiornika i , określający dyspozycje odpływu q_i rozwiązuje zadanie $\min_{q_i} \max_t a_i(t)q_i(y)$ przy wymaganych ograniczeniach.

Koordynator w wyróżnionych momentach t_i lub w miarę potrzeby (tzw. management by exception) określa, dla obydwu zbiorników, funkcje $a_i(t)$ w taki sposób, aby uzyskać możliwie małą kulminację w ważnym przekroju P, w którym występuje możliwość poniesienia istotnych strat powodziowych.

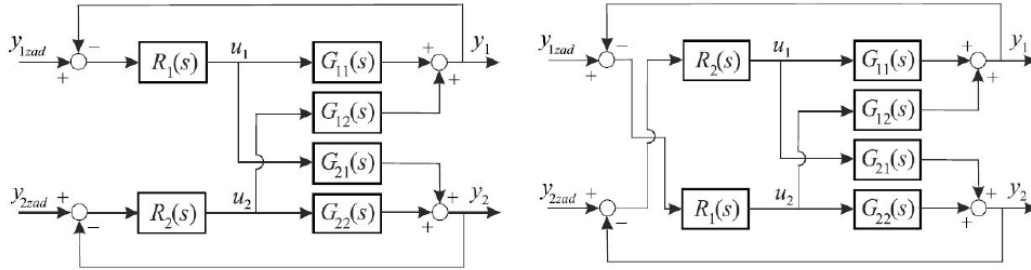
2.6 TAP

2.6.1 Omówić układ regulacji wielopętlowej PID: zasady wyboru struktury połączeń, dobór nastaw regulatorów PI(D), odsprężanie pełne i częściowe.

Regulacja wielopętlowa PID stosowana jest do struktur wielowymiarowych ze słabymi interakcjami.



Rysunek 2.1: Struktura wielopętlowego PID



Rysunek 2.2: Przykłady wielopętlowych PID

W powyższych strukturach występuje problem zjawiska ukrytego sprzężenia zwrotnego, w którym sygnał przebiega przez bloki: $G_{12} \rightarrow y_1 \rightarrow R_1 \rightarrow G_{21} \rightarrow y_2 \rightarrow R_2 \rightarrow G_{12} \dots$ (w przypadku struktury 1-1/2-2 - pierwszy przykład).

Wybór struktury połączeń - Metoda RGA

Rozważamy dwie struktury:

1. Wszystkie pętle regulacyjne rozwarte (regulatory na "manual", sterowania ustalone),
2. Pętla $u_j \rightarrow y_i$ rozwarta, wszystkie pozostałe regulatory na "automatic" (pętle zamknięte, regulatory stabilizują pozostałe wyjścia)

W każdej z tych sytuacji wyznaczone są wzmocnienia w torze $u_j \rightarrow y_i$, podając skok na wejście u_j i czekając na ustalenie się wyjść:

1. Pętla regulacyjna rozwarta: $k_{ij} = \left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_k = \text{const dla } k \neq j}$
2. Pętla $u_j \rightarrow y_i$ rozwarta, wszystkie pozostałe pętle regulacji zamknięte: $k_{ij}^c = \left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{y_k = \text{const dla } k \neq i}$

Względne wzmocnienie w torze $u_j \rightarrow y_i$: $\lambda_{ij} = \frac{k_{ij}}{k_{ij}^{cl}}$

Podstawowe zasady wyboru połączeń w strukturze wielopętlowej:

1. Nie należy wybierać połączeń, którym odpowiadają ujemne wartości λ_{ij} (zmiana znaku pętli sprzężenia $y_i \rightarrow u_j$ po zamknięciu/otwarcu innych pętli!),
2. Należy wybierać połączenia, którym odpowiadają wartości λ_{ij} bliskie 1 (zamykanie/otwieranie innych pętli niewiele wpływa na pętlę $y_i \rightarrow u_j$).

Metody doboru nastaw regulatorów PI(D):

Metody heurystyczne: Dobór nastaw PI(D) dla transmitancji głównych SISO $G_{jj}(s)$, a następnie korekta nastaw metodą prób i błędów, na początku z reguły stłumienie (detuning: zmniejszanie wzmocnień, zwiększanie czasów całkowania, itp.) - aż do osiągnięcia założonego celu:

- formalnego, np. odpowiednia wartość kryterium (metoda BLT Luybena),
- bardziej intuicyjnego - odpowiednie przebiegi odpowiedzi na skoki zakłóceń i/lub wartości zadanych.

Metoda optymalizacji parametrycznej: Nastaw regulatorów PI(D) - modelujemy układ regulacji i optymalizujemy nastawy wg wybranego kryterium, np. ISE. Wskazane dobre modelowanie obiektu - np. nieliniowe modelowanie obiektu w pętli symulacyjnej, a liniowy model uproszczony jedynie do wstępnego doboru nastaw (punktu startowego optymalizacji).

Inne: Istnieje w literaturze szereg propozycji metod doboru nastaw, ale nie zdobyły one szerszego uznania i zastosowania.

Odsprzęganie dynamiczne (pełne):

Wprowadzone zostają bloki pośredniczące, łączące sygnał R1 z G22 oraz R2 z G11 (w przypadku połączenia 1-1/2-2). Bloki te nazywają się kolejno D21 oraz D12.

Odsprzęganie może skutecznie kompensować interakcje przy nadążaniu za wartościami zadanymi i tłumieniu zakłóceń działających na wyjściu obiektu - może nawet pogorszyć tłumienie zakłóceń działających interaktywnie.

Warunki idealnego odsprzęgania:

$$\begin{aligned} G_{21}(s)U_{R1}(s) + G_{22}(s)D_{21}(s)U_{R1}(s) &= 0 \\ G_{12}(s)U_{R2}(s) + G_{11}(s)D_{12}(s)U_{R2}(s) &= 0 \end{aligned}$$

Stąd transmitancje idealnych bloków odsprzęgających:

$$\begin{aligned} D_{21}(s) &= -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}, \\ D_{12}(s) &= -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}. \end{aligned}$$

W odsprzęganiu nierealizowalne są elementy:

- opóźnienia: pozbywamy się e^{Ts} z licznika,
- bieguny niestabilne: pozbywamy się biegunów z prawej półpłaszczyzny układu współrzędnych z mianownika.

Odsprzęganie częściowe: Jeśli jedna interakcja jest silna (istotna), a druga słaba (mniej istotna), to można zastosować odsprzęganie częściowe (jednokierunkowe).

Wadą układów regulacji z odsprzęganiem jest wrażliwość na błędy modelowania i na zmiany parametrów obiektu - tym większa, im bardziej złożony układ odsprzęgający.

Konsekwencją układu regulacji wielopętlowej jest to, że strojenie regulatorów jest trudniejsze, bowiem nie może być dokonywane niezależnie, a odłączanie/dołączanie poszczególnych pętli może nawet zdestabilizować pozostałe.

2.6.2 Przedstawić zasadę regulacji predykcyjnej (MPC), sformułowanie wielowymiarowych algorytmów wyznaczania sterowań numerycznego i analitycznego (prawa regulacji), scharakteryzować krótko podstawowe algorytmy wielowymiarowe z liniowym modelem procesu.

Regulacja predykcyjna MPC:

- technika silnie oparta na modelu obiektu, wymagająca znacznie większego nakładu obliczeń niż algorytm PID,
- w sposób naturalny uwzględnia ograniczenia można je stosować do obiektów wielowymiarowych z silnymi interakcjami, również przy nierównej liczbie wejść sterujących i wielkości regulowanych do obiektów o trudnej dynamice.

Optymalizujemy przyrosty sterowania na horyzoncie sterowania (od chwili k do $k+N_u-1$). Optymalizacja ma na celu zminimalizowanie błędu przy jednoczesnym zachowaniu możliwie niewielkich zmian sterowania (kara za zmianę sterowania). Estymujemy wyjścia na horyzoncie predykcyj.

$$\min_{\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} \left\{ J(k) = \sum_{p=1}^N \| [y^{zad}(k+p|k) - y(k+p|k)] \|^2 + \lambda \sum_{p=0}^{N_u-1} \|\Delta u(k+p|k)\|^2 \right\} \quad (2.1)$$

Z ograniczeniami na minimum i maksimum sygnału $u(k+p|k)$, $\Delta u(k+p|k)$ oraz $y(k+p|k)$.

Analityczne prawo regulacji

Macierz dynamiczna "M" - zależy od konkretnej implementacji - oraz macierze diagonalne Ψ oraz Λ o wymiarowościach $(n_y \cdot N) \times (n_y \cdot N)$ i $(n_u \cdot N_u) \times (n_u \cdot N_u)$, odpowiednio ($n_u = \dim u$ jest liczbą sterowań obiektu).

$$K = [M^T \Psi M + \Lambda]^{-1} M^T \Psi$$

Wektor optymalnych przyrostów sterowań:

$$\Delta \hat{U}(k) = K[Y^{zad}(k) - Y^0(k)]$$

Prawo regulacji MPC bez ograniczeń:

$$\Delta u(k) = \Delta \hat{u}(k|k) = \bar{K}_1[Y^{zad}(k) - Y^0(k)]$$

gdzie:

Y_0 - odpowiedź swobodna

\bar{K}_1 = macierz o wymiarze $n_u \times (n_y \cdot N)$ złożona z pierwszych n_u wierszy macierzy K .

Numeryczne prawo regulacji

Przyjmując:

$$x = \Delta U(k)$$

$$H = 2(M^T \Psi M + \Lambda)$$

$$f = -2M^T \Psi (Y^{zad}(k) - Y^0(k))$$

$$A = [-J; J; -M; M]$$

$$b = [-U_{min} + U(k-1); U_{min} - U(k-1); -Y_{min} + Y^0(k); Y_{min} - Y^0(k)]$$

$$J = [I \ 0 \ 0; I \ I \ 0; I \ I \ I]$$

dostajemy zadanie optymalizacji regulatora MPC w postaci standardowej dla zadania programowania kwadratowego:

$$\min \left\{ J(x) = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \right\} \quad (2.2)$$

Uwaga: macierze H i A są stałe i wyznaczamy je off-line, wektory f i b zależą od $Y^0(k)$ i $U(k-1)$ - wyznaczamy je on-line w każdym kroku k regulatora.

Scharakteryzować krótko podstawowe algorytmy wielowymiarowe z liniowym modelem procesu:

DMC - M na podstawie odpowiedzi skokowej,

GPC - M na podstawie wyznaczenia odpowiedzi skokowej z modelu różnicowego ($y(k) = 0$ dla $k < 0$, $u(k) = 1$ dla $k \geq 0$),

MPCS - M wyznaczamy na podstawie parametrów równań stanu (macierze A , B i C).

2.6.3 Omówić podstawowe algorytmy nieliniowej regulacji predykcyjnej z numerycznymi zadaniami optymalizacji sterowań (MPC-NO, MPC-NPL), oraz szybki algorytm bazujący na liniowych prawach regulacji.

NO (Non-linear Optimization) - w każdej iteracji optymalizujemy sterowanie na podstawie modelu nieliniowego

NPL (Nieliniowa Predykcja trajektorii początkowej i Linearyzacja modelu dla optymalizacji)

- w każdej iteracji najpierw linearyzujemy, a potem optymalizujemy na podstawie modelu liniowego (szybsze, mniej dokładne)

GPC - najpierw linearyzujemy model, potem w każdej iteracji optymalizujemy

NMPC - szybki algorytm bazujący na modelach rozmytych T-S (najszybsze, najmniej dokładne)

Opis algorytmów:

NO

- pełna nieliniowa regulacja MPC, z predykcją całej trajektorii wyjść opartą na modelu nieliniowym
- w każdym kroku predykcja trajektorii wyjść obliczanych modelem nieliniowym wykonywana jest wielokrotnie, dla każdego kolejnego wektora zmiennych decyzyjnych wyznaczanych przez algorytm optymalizacji
- mamy nieliniowy model procesu (w postaci równania różnicowego lub w postaci nieliniowych równań stanu) i na jego podstawie wykonywane jest zadanie optymalizacji dynamicznej regulatora MPC
- predykcje wyjść liczone są z użyciem nieliniowego modelu procesu, zaś $u(k-1|k) = u(k-1)$
- rekurencyjne obliczanie predykowanej trajektorii wyjść dla każdej aktualnej trajektorii sterowań
- estymacja stanu procesu nieliniowego: mamy nieznaną dokładnie nieliniowy proces i estymujemy stan na podstawie modelu (albo metodą rozszerzonego filtru kalmana, albo rozszerzonego obserwatora Luenberga)

NPL - w każdej iteracji algorytmu NPL powtarzana jest sekwencja czynności:

- linearyzacja modelu nieliniowego (nieliniowy)
- wyznaczenie macierzy dynamicznej (zlinearyzowany z punktu poprzedniego)
- obliczenie odpowiedzi swobodnej (nieliniowy)
- sformułowanie zadania optymalizacji kwadratowej
- wyznaczenie sterowania

FMPC

1. Regulator nieliniowy rozmyty T-S DMC analityczny
 - Reguła wnioskowania: każda reguła R^i odpowiada jednemu podobszarowi A , gdzie zaprojektowano regulator DMC
 - Wnioskowanie rozmyte - nieliniowe uśrednianie z wagami $w^i(k)$ odpowiadającymi sile aktywności poszczególnych reguł
2. Nieliniowy analityczny regulator GPC rozmyty T-S: z lokalnymi liniowymi prawami regulacji GPC stanowiącymi następniki reguł wnioskowania (wnioskowanie rozmyte jak w nieliniowym DMC wyżej)
3. Nieliniowy analityczny regulator MPC rozmyty T-S: z lokalnymi liniowymi prawami regulacji MPC stanowiącymi następniki reguł wnioskowania (wnioskowanie rozmyte jak poprzednio)

2.7 TST

2.7.1 Przedstawić opisowo typowe wymagania jakie musi spełniać dobrze zaprojektowany system regulacji. Powiązać je z wymaganiami dotyczącymi transmitancji składających się na podstawowe równanie systemu regulacji.

Generalnie układ jest stabilny jeżeli jego stan/odpowiedź nie robiega się do nieskończoności. Dokładniejsze definicje stabilności są bardzo różne. Można podzielić je na dwie kategorie określające:

1. stabilność ze względu na warunki początkowe (stan układu nie rozbiega się po wychyleniu ze stanu początkowego przy braku sygnału wejściowego),
2. stabilność ze względu na wymuszenie (odpowiedź układu nie rozbiega się w wyniku podania dowolnego ograniczonego sygnału wejściowego)

Stabilność w sensie Lapunowa:

Układ jest stabilny w punkcie x_e , jeżeli dla dowolnie wybranej odległości ε od stanu x_e istnieje taka odległość δ , że dla dowolnego wychylenia ze stanu x_e nie większego od δ , stan układu nie odejdzie od x_e dalej niż na ε .

Innymi słowy: dla żadnego wychylenia ze stanu x_e stan układu nie oddala się nieskończenie od x_e . Nie musi jednak do niego wracać, a koniec końców może znaleźć się dalej niż wychyleno $\varepsilon > \delta$.

Własność ta może być lokalna albo globalna. Globalnie: dla żadnego wychylenia, lokalnie: dla żadnego wychylenia mieszczącego się w pewnych granicach.

Układ niestabilny:

Układ jest niestabilny w punkcie x_e jeżeli dla dowolnie małego wychylenia ze stanu x_e stan oddala się nieskończenie od x_e .

Układ zbieżny:

Układ jest zbieżny w punkcie x_e jeżeli dla dowolnego wychylenia δ stan układu powraca do x_e . Ale zanim tam zbiegnie może dowolnie wariować i osiągać wartości dalsze niż δ .

Układ stabilny asymptotycznie:

Układ jest stabilny asymptotycznie jeżeli jest stabilny i zbieżny. Innymi słowy: od razu dąży do wartości x_e .

Globalnie asymptotycznie stabilny: istnieje tylko jeden punkt równowagi.

Stabilność ze względu na wymuszenie:

Układ stabilny jest jeżeli dla dowolnego przebiegu sygnału wejściowego osiągniętego skończone wartości odpowiedzi układu nie będzie rozbiegać się do nieskończoności.

Układ niestabilny jest wtedy gdy układ nie jest... stabilny.

Nieskończona odpowiedź:

W rzeczywistych układach odpowiedź albo ucieczka od stanu początkowego nigdy nie jest nieskończona, ponieważ żaden rzeczywisty układ nie jest w nieograniczonym zakresie liniowy. Obrazowo mówiąc: w rzeczywistości prędzej układ ulegnie zniszczeniu niż osiągnie wartości nieskończone. Warto na to zwrócić uwagę, bo zwykle nie jest to ujęte w modelu matematycznym.

Algebraiczne kryteria stabilności:

Kryteria algebraiczne określające stabilność układów liniowych wyprowadzone są z twierdzenia o stabilności: aby układ liniowy był globalnie asymptotycznie stabilny wystarczy żeby wszystkie pierwiastki równania charakterystycznego układu (mianownik transmitancji całego układu = 0) znajdowały się w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej s . Dzieje się tak, ponieważ członem typu $\frac{1}{s-a}$ transmitancji odpowiadają wyrazy typu e^{at} w dziedzinie rzeczywistej (i znajdują się wobec tego w sygnale wyjściowym). Jeżeli a jest urojone to wystąpią oscylacje. Oscylacje te będą gasnące tylko jeżeli część rzeczywista pierwiastka a (odpowiadająca eksponencjalnej obwiedni sinusoidy) będzie ujemna.

Kryterium Hurwitza:

Równanie charakterystyczne układu (o współczynnikach rzeczywistych):

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (2.3)$$

Warunek konieczny globalnej stabilności asymptotycznej układu liniowego: wszystkie współczynniki równania muszą być tego samego znaku.

Warunek wystarczający : wszystkie wyznaczniki Δ_i są większe od zera.

Kryterium Routha:

Warunek konieczny globalnej stabilności asymptotycznej układu liniowego: wszystkie współczynniki równania muszą być tego samego znaku.

Warunek wystarczający : wszystkie elementy pierwszej kolumny tablicy Routha mają ten sam znak.

Liczba zmian znaków w pierwszej kolumnie tablicy równa jest liczbie pierwiastków w prawej półpłaszczyźnie.

Częstotliwościowe kryteria stabilności**Kryterium Nyquista:**

Pozwala na określenie stabilności układu zamkniętego (ze sprzężeniem zwrotnym) na podstawie badania charakterystyki amplitudowo-fazowej układu otwartego.

Jeżeli układ otwarty jest stabilny to układ zamknięty będzie stabilny wtedy i tylko wtedy, gdy charakterystyka amplitudowo-fazowa układu otwartego nie obejmuje punktu $(-1, j_0)$ na płaszczyźnie zespolonej. Gdy charakterystyka przechodzi przez ten punkt to układ jest na granicy stabilności.

Punkt ten jest istotny, ponieważ odpowiada częstotliwości najbardziej krytycznej dla układu, a mianowicie takiej dla której sygnał na końcu toru sprzężenia zwrotnego będzie przesunięty w fazie o π .

Wykresy Bodego:

Zapas modułu jest to współczynnik przez jaki należy przemnożyć wzmocnienie układu przy niezmienionym argumentie transmitancji widmowej układu otwartego, aby doprowadzić układ do granicy stabilności.

Zapas fazy mierzony w stopniach określa wartość zmiany argumentu transmitancji widmowej układu otwartego potrzebny, aby doprowadzić układ do granicy stabilności.

Z kryterium Nyquista sprawa jest w sumie odrobinę bardziej skomplikowana, ale nie ma co się w to zagłębiać. Dodać wypadałoby badanie stabilności w przypadku układów dyskretnych opisanych równaniami stanu. Wówczas wystarczy sprawdzić promień spektralny macierzy dynamiki układu (jeśli któryś jest większy niż 1 to na związanym z nim kierunku własnym układ jest niestabilny). Widmo - pierwiastki równania $\det(zI-A)=0$. Co do stabilności w dziedzinie transmitancji: w czasie ciągłym bieguny układu muszą być w lewej półpłaszczyźnie, w czasie dyskretnym – wewnątrz koła jednostkowego.

Wszystkie wymagania:

1. Stabilność
2. Zapas fazy i modułu
3. Realizowalne i bezpieczne wartości i przyrosty sygnałów (ograniczenia)
4. Spełnienie wymagań dotyczących jakości regulacji (metryki jakości) - np. czas potrzebny układowi do stabilizacji lub maksymalne przeregulowania
5. Odporność na zakłócenia

Wymagania transmitancji:

Transmitancje w czasie ciągłym muszą mieć bieguny w lewej półpłaszczyźnie (czyli $\text{Re}(s) < 0$).

Transmitancje w czasie dyskretnym muszą mieć bieguny wewnątrz koła jednostkowego.

2.7.2 Podać definicję stabilności „ograniczone wejście-ograniczone wyjście” (ang. BIBO stability). Jakie warunki gwarantują BIBO stabilność stacjonarnego układu liniowego dla każdego warunku początkowego. Rozpatrzyć układy z czasem ciągłym i dyskretnym.

System opisany równaniem $y(t) = H(q)u(t)$ jest stabilny w sensie BIBO, jeżeli dla każdego ciągu sterowań spełniających warunek $|u(t)| \leq c_0$ spełniony jest warunek $|y(t)| \leq c_1$, gdzie $c_0, c_1 < \infty$.

Innymi słowy układ jest BIBO stabilny jeżeli jego odpowiedź na ograniczony sygnał wejściowy jest również ograniczona.

Warunki:

Czasu ciągłego (konieczny i wystarczający): $\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)| dt = \|h\|_1 < \infty$

Czasu dyskretnego (wystarczający): $\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h[n]| = \|h\|_1 < \infty$

2.7.3 Sformułować zadanie wyznaczenia optymalnego regulatora liniowo-kwadratowego (zadanie LQR). Omówić wybór parametrów wskaźnika jakości w tym zadaniu. Podać postać rozwiązania tego zadania. Rozpatrzyć układy z czasem ciągłym i dyskretnym.

Regulacja liniowo-kwadratowa dla obiektu liniowego w przestrzeni stanu polega na doborze sterowań optymalizujących pewną kwadratową funkcję kosztu zdefiniowaną na sygnałach sterujących i wyjściowych. Funkcja ta zapisana jest w postaci całki dla systemu ciągłego lub w postaci sumy dla systemu dyskretnego.

LQR w czasie ciągłym

Układ liniowy określony równaniem: $\dot{x} = Ax + Bu$

Funkcja kosztu: $J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt$

Sterowanie ze sprzężeniem: $u = -Kx$

Dla K równego: $K = R^{-1} B^T P$

Z P wyznaczanym z równania algebraicznego Riccatiego dla czasu ciągłego:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

LQR w czasie dyskretnym

Układ liniowy określony równaniem: $x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$

Funkcja kosztu: $J = \sum_{k=0}^\infty (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k)$

Sterowanie ze sprzężeniem: $u_k = -F x_k$

Dla F równego: $F = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A$

Z P wyznaczanym z równania algebraicznego Riccatiego dla czasu dyskretnego:

$$P = Q + A^T (P - P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P) A$$

Przedmioty zaawansowane obieralne

3.1 MISK

3.1.1 Przedstawić kategorie modeli systemów, omówić wybrane modele i metody ich opisu.

Model wyraża istotne cechy procesu, jest odbiciem rzeczywistości, ale nie jest sumą wiedzy o procesie, ani zbiorem wszystkich praw rządzących procesem. W technice model to imitacja lub reprezentacja rzeczywistego systemu.

Model powinien reprezentować tylko tę część wiedzy, która jest istotna ze względu na przeznaczenie modelu.

Klasyfikacja modeli:

Reprezentacja modelu

- fizyczne - Inny układ fizyczny, znacznie prostszy i dostępny do prowadzenia na nim obserwacji, którego właściwości mogą w danych warunkach, z dostatecznie dobrym przybliżeniem, reprezentować właściwości modelowanego systemu.

- sformalizowane - Opisują zależności i zjawiska rzeczywiste przy użyciu równań lub wyrażeń logicznych.
Istotna cecha: odpowiedź modelu na powtarzane wielokrotnie wymuszenie jest taka sama (całkowite zdeterminowanie).
- intuicyjne - Formułowane przez eksperta przy wykorzystaniu dostępnej wiedzy o systemie i jego myślowej dedukcji i oceny.
Zawierają sporą dozę niepewności.
Odpowiedź eksperta na to samo pytanie zadawane w różnym czasie może być różna.

Szczegółowość przedstawienia struktury systemu

- korelacyjne - Budowane na podstawie zaobserwowanych lub hipotetycznych korelacji między zjawiskami.
Interesuje nas powiązanie zjawisk, a nie to co jest przyczyną, a co skutkiem zachodzącego procesu.
- przyczynowe - Podklasa modeli korelacyjnych. Interesuje nas jaki skutek wywołuje dane oddziaływanie na system.
Wymagania: wiedza o prawach, według których jedne zjawiska wywołują inne. W przypadku braku takiej wiedzy wykonanie czynnego eksperymentu identyfikacyjnego. Przykład: projektowanie układów sterowania.

Uwzględnianie dynamiki

- statyczne - Stosowane w zadaniach, w których problem dynamiki systemów nie jest rozważany (uwaga: system jest zawsze dynamiczny). Przykład: modele opisujące stany ustalone procesów dynamicznych.
- dynamiczne - Opisują poza stanami ustalonymi również przebiegi przejściowe. Istota modelu dynamicznego: uwzględnianie możliwej zmienności stanu procesu. Przykład: stany ustalone nie występują w systemie lub są krótkotrwałe (np. przepływ w systemach wodnych).

Reprezentację czasu

- czas ciągły - Wartości zmiennych wejściowych v , wyjściowych y i stanu x w procesie dynamicznym są określone dla każdej chwili czasu t . Czas jest ciągły. Opis w przestrzeni stanów.
- czas dyskretny - Wartości zmiennych wejściowych v , wyjściowych y i stanu x w procesie dynamicznym są wyznaczane tylko dla dyskretnych chwil $t = k\Delta t$, $k = 0, 1, \dots$. Czas jest dyskretny.
- zdarzenia dyskretnie - Dyskretnie zbiory wartości jakie mogą przyjmować zmienne wejściowe v , wyjściowe y , stanu x . Czas jest ciągły. Opis systemu i implementacja modelu:
 - lista zdarzeń,
 - zdarzeniom są przypisane znaczniki czasu (chwile wystąpienia)
 - zegar.

Uwzględnianie niepewności

- deterministyczne - Zależności funkcyjne, w których każdemu elementowi v zbioru wielkości wejściowych V przyporządkowany jest jednoznacznie określony element y zbioru wielkości wyjściowych Y .

- probabilistyczne - Zależności korelacyjne, funkcje regresji, zależności określające związki zachodzące między rozkładami prawdopodobieństwa wielkości wejściowych i wyjściowych. Modele probabilistyczne wymagają wyrażenia w modelu cech probabilistycznych wyjścia modelu przez np. analityczne wyznaczenie jego wartości oczekiwanej, wariancji, funkcji autokorelacji itd.

Sposób rozwiązywania:

- analityczne - Modele opisane za pomocą jawnie wyrażonych równań, w przypadku których można przedstawić rozwiązanie w postaci jawnego wzoru (np. $y = 2u$, gdzie u oznacza zmienną niezależną).
- numeryczne - Modele opisane za pomocą jawnie wyrażonych równań, w przypadku których nie można przedstawić rozwiązania w postaci jawnego wzoru. Wartości zmiennych zależnych są zazwyczaj określane za pomocą pewnego algorytmu (procedury numerycznej) i wyznaczane w komputerze.
- symulacyjne - Modele uproszczone, stosowane w przypadku, gdy model sformalizowany jest zbyt złożony lub dysponujemy jedynie modelem intuicyjnym. Wyznaczenie związków między zmiennymi modelu jest możliwe jedynie na drodze eksperymentu symulacyjnego. Cecha charakterystyczna: zmienne niezależne - wejścia systemu, zmienne zależne - wyjścia systemu.

Opis modelu zdarzeń dyskretnych (symulacja):

- Uporządkowana lista zdarzeń zewnętrznych i wewnętrznych.
- Globalny zegar w systemie.
- Obsługa zdarzenia powoduje zmianę stanu systemu, usunięcie pewnych zdarzeń z listy i wprowadzenie nowych zdarzeń na listę.
- Poszczególne zdarzenia są objęte relacjami zależności - dane zdarzenie musi być poprzedzone innym.
- Zależność zdarzeń odzwierciedla naszą wiedzę o kolejności zjawisk zachodzących w symulowanym systemie fizycznym.
- Zdarzeniom przypisywane są znaczniki czasowe określające chwile ich wystąpienia.
- Zagwarantowanie zachowania związku przyczynowo-skutkowego.

Uzupełnieniem opisu matematycznego systemów są ich reprezentacje graficzne. Można wymienić tu trzy najbardziej popularne metody:

- schematy blokowe (ang. block diagrams)
- grafy przepływu sygnałów (ang. signal flow graphs)
- grafy połączeń (ang. bond graphs)

Ukazują one w przejrzysty sposób poszczególne działania statyczne i dynamiczne. Są ściśle związane z programem na komputerze lub maszynie analogowej rozwiązującym model rozważanego systemu.

3.1.2 Omówić techniki symulacyjne: symulacja z czasem ciągłym, czasem dyskretnym i zdarzeń dyskretnych.

Symulacja to metoda badania lub naśladowania rzeczywistego systemu przez prowadzenie eksperymentów z modelem tego systemu.

Symulacja komputerowa to eksperyment z modelem systemu wykonywany w komputerze.

Czas ciągły

- Czas jest ciągły.
- Do opisu modelu stosuje się równania różniczkowe.
- Mogą być symulowane na maszynach analogowych i cyfrowych (wymaga dyskretyzacji modeli ciągłych DESS przez sprowadzenie do postaci DTSS).
- Zalety symulacji analogowej:
 - Szybkość umożliwiająca pracę w czasie rzeczywistym.
 - Szybkość operacji ograniczana jedynie przez szerokość pasma w jakim pracowały aktywne elementy elektroniczne (wzmacniacze operacyjne).
 - Przetwarzanie równoległe: poszczególne operacje, takie jak sumowanie, mnożenie, całkowanie wykonywane przez oddzielne bloki obliczeniowe.
- Wady symulacji analogowej:
 - Kosztowny sprzęt dedykowany konkretnej aplikacji.
 - Trudności implementacyjne.
 - Niska dokładność i wiarygodność wyników.
- Przykład: zbiornik retencyjny (równanie bilansu wody).

Czas dyskretny

- Czas jest dyskretny.
- Do opisu modelu stosuje się równania różnicowe.
- Mogą być symulowane tylko na maszynach cyfrowych.
- Przykład: systemy sygnalizacji, systemy komputerowe.

Zdarzenia dyskretnie

- Czas jest ciągły.
- Do opisu modelu stosuje się równania różniczkowe i listy zdarzeń:
 - Zewnętrzne** - zdarzenie, które jest obserwowane w postaci zmiany wielkości wejściowych systemu - na zdarzenia zewnętrzne nie mamy wpływu, nie wiemy zazwyczaj a priori kiedy wystąpią.
 - Wewnętrzne** - zdarzenie, które reprezentuje procesy przebiegające w systemie - znamy a priori czas wystąpienia zdarzeń wewnętrznych i możemy sporządzić listę takich zdarzeń.
- Zmiany stanu spowodowane są przez zdarzenia zewnętrzne i wewnętrzne.
- Zdarzenia nie muszą występować w regularnych odstępach czasu.
- Dwa warianty:
 - Sterowana zdarzeniami** - chronologicznie symulowane są zdarzenia zachodzące w procesach fizycznych, a w każdej iteracji zegar globalny przyjmuje wartość odpowiadającą znacznikowi czasu wykonywanego zdarzenia.

Sterowana zegarem - po wykonaniu każdej iteracji, zegar zwiększa się o stałą wartość (jeden takt symulowanego czasu) i realizowane są kolejno wszystkie zdarzenia z odpowiadającym tej chwili znacznikiem czasu.

- Przykład: linia montażowa, obsługa routera sieciowego.

3.1.3 Omówić metody rozwiązywania zadań symulator-optymalizator.

Symulacja-optymalizacja (ang. simulation-optimization) to schemat wyznaczania optymalnych decyzji sterujących, w którym w każdym kroku tego procesu jakość decyzji oceniana jest na podstawie symulacji działania systemu.

Sformułujmy zadanie minimalizacji rozwiązywane w układzie symulator-optymalizator:

$$\min_x [f(x) = J(x, S(x))], \quad x \in D_x \quad (3.1)$$

gdzie J jest wskaźnikiem oceniającym jakość decyzji na podstawie odpowiedzi symulatora $y = S(x)$, a D_x zbiorem dopuszczalnych rozwiązań.

Oczywiste jest, że symulator fizycznego systemu powinien uwzględniać czynniki losowe, wpływające na jego działanie, tj. losowe zakłócenia związane z oddziaływaniem otoczenia oraz błędami pomiarowymi. Mogą wystąpić również zaburzenia spowodowane przez błędy w realizacji samego symulatora, np. kumulujące się błędy numeryczne, a nawet sytuacje, gdy dla pewnych wartości wejściowych symulatora nie można wyznaczyć wartości wyjściowych. Odpowiedzi symulatora będą zależeć od losowych zakłóceń, a więc $y = \tilde{S}(x, V)$, gdzie \tilde{S} oznacza symulator uwzględniający czynniki losowe w rzeczywistym systemie, wektor $V = [v_1, \dots, v_m]$ reprezentuje skumulowane efekty losowe w symulatorze, a i -ty element v_i zaburzenie i -tego rodzaju. Funkcja celu f w zadaniu optymalizacji (3.1) przyjmuje wówczas postać wartości oczekiwanej funkcji zależnej od V , czyli:

$$\min_x \left[f(x) = E \left\{ q(x, V) = J(x, \tilde{S}(x, V)) \right\} \right], \quad x \in D_x \quad (3.2)$$

gdzie q oznacza funkcję oceniającą działanie systemu na podstawie jednokrotnego przebiegu symulacji \tilde{S} . Ze względu na występowanie efektów losowych jest to zakłócony pomiar wskaźnika f . Zmienne wejściowe x mogą w różny sposób wpływać na wyniki działania symulatora \tilde{S} :

1. Zmienne wejściowe x są tzw. „parametrami strukturalnymi”. Wpływają one bezpośrednio na wyniki działania symulatora. Zmienne losowe v_i nie zależą od zmiennych wejściowych x . Gęstość prawdopodobieństwa V oznaczmy przez $p(v)$.
2. Zmienne x są parametrami rozkładu zakłóceń losowych. W tej sytuacji v_i zależą od zmiennych wejściowych x i oznaczamy gęstość prawdopodobieństwa V przez $p(v|x)$.

Zadania optymalizacji (3.1) i (3.2) są nieliniowe, a często niewypukłe. Zazwyczaj są to zadania o znacznej liczbie optymalizowanych zmiennych i ograniczeń. Dodatkowo, często występują w nich ograniczenia na zmienne zależne y , stanowiące wynik działania symulatora. Ograniczenia te są sprawdzane wewnątrz symulatora i ich jawna postać jest nieznana. Utrudnia to wyznaczenie zbioru dopuszczalnego D_x , który może być niewypukły, a nawet niespójny. Wymienione własności zadań ograniczają listę metod numerycznych, które znajdują zastosowanie w tego typu problemach. Metody te muszą spełniać szereg kryteriów. Jednym z najważniejszych jest odporność algorytmu.

Metody obliczeniowe - w kolejnych punktach zostaną krótko omówione wymienione techniki do rozwiązywania zadań symulacja-optymalizacja:

Aproksymacja stochastyczna - W wielu zadaniach sterowania wymagających rozwiązania problemu (3.2) nie jesteśmy w stanie wyznaczyć wartości wskaźnika oceniającego f , gdyż nie znamy

rozkładu prawdopodobieństwa V . Możemy natomiast obliczyć wartości wyjść symulatora, a więc i wskaźnik q w (3.2) jako rezultat realizacji wyznaczonych przez algorytm numeryczny sterowań. Przyjmując założenie, że funkcje \tilde{S} i q są wypukłe i różniczkowalne względem x dla wszystkich V , możemy obliczyć pochodne cząstkowe. Wektor pochodnych cząstkowych, $\Delta q = \frac{\partial q}{\partial x}$, jest nazywany gradientem stochastycznym ponieważ zależy on od losowych zaburzeń V . Zakładając, że możliwe jest wyznaczenie gradientu, zadanie optymalizacji (3.2) można rozwiązać stosując algorytm aproksymacji stochastycznej SA. W zadaniach praktycznych metody te są trudne do realizacji. Wymagają wnikania w oprogramowanie realizujące model symulacyjny, tak aby symulator wyznaczał zarówno wartości funkcji odpowiedzi $q(x, V)$, jak i jej pochodne cząstkowe $\frac{\partial q(x, V)}{\partial x}$.

Metody różnicowe liczenia gradientów (Metoda z ustalonym zestawem próbek) - W przypadku wielu problemów praktycznych niemożliwe jest modyfikowanie kodu symulatora w celu wyznaczenia gradientu stochastycznego. W takiej sytuacji wyznacza się estymatę gradientu odpowiedzi układu, bazując na wielokrotnych zakłóconych pomiarach funkcji odpowiedzi q . Metoda wykorzystująca ustalony zestaw próbek jest deterministycznym odpowiednikiem aproksymacji stochastycznej. Wyniki eksperymentów symulacyjnych wykonanych dla stosunkowo małej, założonej liczby niezależnych realizacji V , tj. V_1, V_2, \dots, V_M służą do wyznaczenia aproksymacji \hat{f} funkcji celu f . Zadanie optymalizacji stochastycznej (3.2) jest zastępowane zadaniem deterministycznym. Sytuacja komplikuje się, gdy V zależy od x . Oznacza to, że dla każdego x powinien być wyznaczany nowy wektor V_i . Realizowana w ten sposób estymacja funkcji $\hat{f}(x)$ wymagałaby wykonania ogromnej liczby eksperymentów. W tym przypadku proponuje się następujące rozwiązanie. Przyjmijmy, że istnieje taka wartość $x' \in D_x$, że dla wszystkich $x \in D_x$ i $v \in D_v$ spełnienie warunku $p(v|x') = 0$ implikuje spełnienie warunku $p(v|x) = 0$.

Metoda powierzchni odpowiedzi - Metoda powierzchni odpowiedzi RSM (Response Surface Methodology) jest sekwencyjną strategią bazującą na lokalnej aproksymacji powierzchni odpowiedzi symulatora w otoczeniu $D_x^{(k)}$ aktualnego punktu $x^{(k)}$. W kolejnych krokach metody wyznaczana jest funkcja sparametryzowana $F(x, \alpha)$ przybliżająca wskaźnik $f(x)$ w zadaniu minimalizacji (3.2), gdzie wektor parametrów α jest wyznaczany na podstawie wyników symulacji. Kroki:

1. Wybierz zestaw wejść symulatora x i wykonaj M symulacji. Wyznacz wektor parametrów $\alpha^{(k)}$ minimalizujący błąd lokalnej aproksymacji $F(x, \alpha)$.
2. Wyznacz $x^B = \arg \min_x F(x, \alpha^{(k)})$.
3. Wyznacz odpowiedź symulatora dla x^B i oszacuj $\hat{f}(x^B)$. Jeżeli jest ono mniejsze od $\hat{f}(x^{(k)})$ wówczas $k=k+1$ i $x^{(k)} = x^B$. W przeciwnym wypadku zmniejsz rozmiar otoczenia $D_x^{(k)}$ lub zmodyfikuj F . Powrót do pkt 2.

Metody poszukiwań prostych - Skoncentrujemy się teraz na prostych technikach, w których rozwiązuje się zadanie optymalizacji korzystając jedynie z informacji o aktualnej wartości wskaźnika jakości. Są to podejścia zalecane w przypadku problemów niégładkich. Niektóre z nich można stosować do zadań dyskretnych. Kierunki poszukiwań mogą być wyznaczone w sposób zdeterminowany lub losowy.

Metody deterministyczne to klasyczne, opisane w wielu podręcznikach, rozwiązania dla zadań bez ograniczeń. Algorytmy te dość wolno zbiegają do rozwiązania, szczególnie gdy rozważamy zadanie o dużym wymiarze. Dla większości z nich nie przedstawiono dowodów zbieżności w skończonej liczbie iteracji. Mogą być stosowane w przypadkach, gdy dysponujemy zakłóconym pomiarem funkcji celu, ale wymaga to zazwyczaj wprowadzenia pewnych modyfikacji. Polegają one głównie na wyznaczaniu w każdym kroku wartości średniej wskaźnika oraz zmianie kryterium zatrzymania algorytmu.

Metody stochastyczne to techniki zalecane w zadaniach, w których funkcja celu lub zbiór rozwiązań dopuszczalnych są niewypukłe. Jest to szeroka klasa problemów, które nie mogą być skutecznie rozwiązywane za pomocą powszechnie znanych i sprawdzonych metod poszukiwania lokalnego. Brak gwarancji wypukłości charakteryzuje znaczną część zadań, w których stosuje się podejście symulacja-optimalizacja. W przypadku ogólnym nie można podać efektywnej metody rozwiązania problemu optymalizacji globalnej.

Punktem wyjścia do prostych technik stosujących poszukiwanie losowe jest metoda Monte-Carlo, zwana także metodą prostych poszukiwań losowych. Polega ona na losowaniu z rozkładem równomiernym punktów ze zbioru dopuszczalnego, wykonaniu eksperymentu symulacyjnego w celu wyznaczenia estymaty funkcji oceniającej i przyjmowaniu aktualnie najlepszej wartości \hat{f} jako oszacowania optimum. Zamiast generatorów losowych można zastosować sekwencje losowe. Przeszukiwanie otoczenia aktualnego punktu może być również realizowane za pomocą wymienionych wcześniej technik deterministycznych. W przypadku ogólnym, gdy pomiar jest zakłócony, zbieżność nie jest gwarantowana. W takich sytuacjach proponuje się wykonanie wielokrotnych pomiarów i wyznaczenie wartości średniej. Innym rozwiązaniem jest próba uodpornienia procesu decyzyjnego na zakłócenia.

CRS to proste rozwiązania stanowiące połączenie techniki losowania zbioru punktów i deterministycznych metod operujących na tym zbiorze. Zasada działania jest następująca. Losowany jest zbiór początkowy punktów P , dla których wykonywane są eksperymenty symulacyjne, wyznaczane są wartości estymat wskaźników jakości $\hat{f}(x_i)$, $i = 1, \dots, N_P$, gdzie N_P oznacza licznosc zbioru. Wybierane są dwa punkty $x_l = \arg \min_{x \in P} \hat{f}(x)$ oraz $x_h = \arg \max_{x \in P} \hat{f}(x)$. Zbiór P , w miarę upływu czasu, podlega przekształceniom. Są różne metody tego przekształcenia: CRS1, CRS2, ... A każda następnie posiada swój sposób wyznaczenia nowego punktu. Np. w CRS1 jest to interpolacja kwadratowa, podczas gdy w CRS1-5 wykorzystywane są techniki sympleksowe, w których wynik zastępuje w zbiorze P punkt x_h . Algorytmy CRS można w łatwy sposób realizować w wersji równoległej. Najefektywniejszym sposobem zrównoleglenia CRS jest uruchomienie niezależnych instancji programu na różnych procesorach. Wykorzystuje się tu strukturę gwiazdy. Poszczególne procesy, po wykonaniu obliczeń dla swoich zbiorów punktów P_p (p – liczba procesorów), przekazują wyniki do wybranego procesu, który wybiera rozwiązanie najlepsze.

Metody wykorzystujące heurystyki i metaheurystyki - W ostatnich kilkudziesięciu latach opracowano różne metody heurystycznego poszukiwania optymalnych rozwiązań, często inspirowane procesami fizycznymi, chemicznymi czy biologicznymi. Należą do nich strategie deterministyczne oraz niedeterministyczne.

Tabu TS to deterministyczna strategia z pamięcią. Polega ona na eksploracji przestrzeni, stworzonej ze wszystkich możliwych rozwiązań, za pomocą pewnej sekwencji ruchów. W celu uniknięcia niebezpieczeństwa wielokrotnego powracania do tego samego rozwiązania pewne ruchy są kwalifikowane jako niedozwolone – ruchy tabu. Zastosowane reguły klasyfikujące ruch bazują na krótkoterminowej bądź długoterminowej historii sekwencji ruchów. Tak np. można uznać za niedozwolony (tabu) ruch, jeżeli ruch do niego przeciwny został wykonany ostatnio lub był często wykonywany. Czasami, jeśli jest to korzystne, niektóre ruchy tabu są unieważniane. Długa lista tabu wymaga znacznych zasobów pamięci i wydłuża czas obliczeń związany z koniecznością jej przeglądania. Aby się przed tym zabezpieczyć tabu jest zazwyczaj realizowane w postaci cyklicznego bufora.

SAN należy do grupy tzw. metod błądzących, których działanie polega na symulowaniu losowo zakłócanego ruchu obiektu dynamicznego. Podczas poszukiwania minimum algorytm akceptuje nie tylko zmiany, które prowadzą do zmniejszenia wartości aproksymowanego wskaźnika

jakości \hat{f} , ale również zmiany prowadzące do zwiększenia \hat{f} . Akceptowanie zmian, prowadzących do zwiększenia wartości funkcji celu, odbywa się oczywiście w sposób kontrolowany, za pomocą losowego kryterium akceptacji takich zmian. Rozwiązania lepsze są zawsze akceptowane. Akceptacja rozwiązań gorszych zależy od wartości wyrażenia reguły Metropolis'a i prawdopodobieństwo akceptacji maleje wraz ze zmniejszaniem się parametru T . Algorytm wymaga określenia początkowej wartości parametru T (analog temperatury), funkcji opisującej schemat jego zmniejszania (tzw. schemat wyżarzania) oraz mechanizmu generowania kolejnych punktów.

Do generacji punktów w kolejnych krokach algorytmu stosuje się najczęściej losowanie z rozkładem jednostajnym.

Algorytmy ewolucyjne to odporne, proste heurystyki populacyjne, które często znajdują zastosowanie w przypadku, gdy wskaźnik jakości jest wyznaczany na podstawie symulacji. Pomysł technik ewolucyjnych pochodzi z symulacji procesu ewolucji żywych organizmów. Stan algorytmu opisuje zbiór odpowiednio zakodowanych łańcuchów (binarnie bądź rzeczywistoliczbowo), będących analogiem kodów genetycznych (chromosomów). Do każdego łańcucha jest przypisana miara przystosowania, w przypadku rozważanych przez nas zadań może to być wskaźnik jakości. Multizbiór łańcuchów (populacja) jest losowo wybierany z przestrzeni poszukiwań i poprzez mechanizmy wyboru, mutacji i (czasami) rekombinacji ewoluuje w kierunku minimum globalnego funkcji celu. W ten sposób uzyskujemy algorytm optymalizacji.

Algorytmy ewolucyjne można w sposób naturalny zrównoleglić. Najprostszym podejściem jest wariant synchroniczny, w którym operuje się na jednej wspólnej populacji (algorytm bez podziału dziedziny).

Bardziej efektywny wydaje się być wariant asynchroniczny algorytmu (z podziałem dziedziny), gdzie wiele procesów wykonuje autonomicznie operacje genetyczne dla rozproszonej populacji i komunikuje się między sobą w celu wymiany informacji (np. części osobników). Takie algorytmy nazywamy podpopulacyjnymi.

Metody genetyczne algorytmu:

inicjacja – wylosowanie początkowej populacji punktów]

selekcja – kopiowanie z poprzedniej populacji do nowej przy założeniu, że prawdopodobieństwo wyboru osobników o większej mierze przystosowania jest większe]

krzyżowanie – losowe skojarzenie w pary ciągów z populacji rodziców i wymiana między nimi części łańcucha kodującego zmienne zadania]

mutacja – losowa zmiana jednego znaku ciągu z populacji (np. odwrócenie bitu)]

Metody hybrydowe - Podejście to jest powszechnie stosowane w przypadku metod poszukiwania ekstremum globalnego, gdy w końcowej fazie procesu optymalizacji uruchamiany jest wybrany algorytm lokalny, tzw. metody dwufazowe. Powstają algorytmy, które łączą w sobie rozwiązania proponowane w różnych metodach, np. sympleks nieliniowy i symulowane wyżarzanie, czy sympleks nieliniowy i algorytm genetyczny. Najczęściej stosuje się jednak przełączanie między kilkoma algorytmami. Są one dobierane i aktywowane według reguł formułowanych na podstawie wiedzy o problemie, dotychczasowych wyników obliczeń, podatności metod na doraźne adaptacje, wymagań co do dokładności rozwiązania, dopuszczalnego czasu obliczeń oraz dostępnych mocy obliczeniowych. obliczeniowych.

3.2 ROSM

-

3.3 SAU

-

3.4 SZAU

-