# W1-1

## Jak dzielimy układy sterowania NE. Omów najważniejsze z tych podziałów.

Układy sterowania NE można dzielić i klasyfikować na wiele sposobów: ze względu na rodzaj sprzężeń (sprzężenia zwrotne, kompensacyjne, kombinowane), charakter sygnału zadającego (stałowartościowy, nadążny, programowy), sposób przekazywania informacji (cyfrowe i analogowe), rodzaj elementów (liniowe lub nieliniowe), liczbę wielkości regulowanych (jedno- lub wieloobwodowe) czy podstawowe cechy konstrukcyjne (prąd stały, przemienny, układy przekształtnikowe).

Najważniejsze kryteria podziału układów sterowania napędami elektrycznymi to:

**Podział ze względu na rodzaj sprzężeń**

Układy można dzielić ze względu na to, jakie sprzężenia są w nich zawarte. Można tu wyróżnić:

- **Układy ze sprzężeniem kompensacyjnym** – układy, w których wielkość regulowana ma być równa wielkości zadanej. Sygnałem zakłóceniowym zawsze obecnym w maszynie jest np. moment obciążenia. Informacja o zakłóceniu jest dodawana do sygnału wejściowego regulatora, więc sygnał ten jest większy o wartość zakłócenia.

Ograniczeniem tego układu jest konieczność posiadania informacji o zakłóceniu. Często pomiar zakłócenia jest niemożliwy ze względu na np. brak miejsca na umieszczenie miernika momentu, więc wielkość zakłócenia trzeba estymować w oparciu o pomiar prądu silnika.

Zaletą tej metody jest brak opóźnienia w dostarczaniu informacji o zakłóceniu do regulatora, bo informacja ta nie przechodzi przez regulowany obiekt.

**- Układy ze sprzężeniem zwrotnym** – układy, w których regulator otrzymuje informację poprzez pomiar wartości sterowanej – np. ze wzrostem momentu obciążenia maleje prędkość obrotowa, rośnie uchyb tej prędkości, a wartość zadana jest powiększana o ten uchyb.

Wadą tego typu układów jest zwłoka w podawaniu informacji na regulator, ponieważ wartość mierzona jest na sterowanym obiekcie. Reakcja układu jest przez to wolniejsza niż przy sprzężeniu kompensacyjnym, a regulator nie mierzy wartości zewnętrznych zakłóceń.

W przypadku tego typu układów, wartość wyjściowa może mieć bardzo dobre parametry – wymaga to optymalnego doboru parametrów oraz dostrojenia regulatora.

**- Układy kombinowane** – układy, w których regulator otrzymuje jednocześnie informację o zakłóceniu zewnętrznym oraz o wielkości sterowanej. Np. przy wzroście obciążenia i spadku prędkości obrotowej, regulator otrzymuje obie te informacje. Dzięki informacji o zakóceniu, regulator otrzymuje informację o sygnale wyjściowym jeszcze zanim sygnał ten zmieni swoją wartość – regulator tym sposobem zapewnia, że wielkość wartości regulowanej jest równa wielkości zadanej.

Ograniczeniem tego typu układu jest konieczność posiadania informacji o zakłóceniu (momencie obciążenia), co wymaga jego estymacji. Według informacji z wykładu, układy sterowania tego typu często oparte są o mikroprocesor, więc estymacja momentu nie sprawia dużego problemu.

**Podział ze względu na charakter sygnału zadającego**

Układy można dzielić ze względu na to, jakie wartości przybiera wartość zadana (referencyjna) i w jaki sposób się zmienia. Można w ten sposób wyróżnić:

**- Układy stałowartościowe** – wartość zadana jest stała w czasie i nie zmienia swojej wielkości

**- Układy śledzące (nadążne)** – wartość zadana jest dostosowywana przez zewnętrzne czynniki (kompensacja, sprzężenie zwrotne) w taki sposób, by wartość wyjściowa osiągała zadany poziom. Układ regulacji śledzi zewnętrzne czynniki i uwzględnia je w dostosowaniu wartości wielkości zadanej.

**- Układ programowy** – układ, w którym ustawiony jest cykl pracy. Po każdym okresie czasu, wielkość zadana przyjmuje pewną wartość stałą.

**Podział ze względu na sposób przekazywania informacji**

**- Układ ciągły** – układ, w którym elementy toru sterującego (wszystkie poza obiektem sterowania) mają charakter analogowy

**- Układ dyskretny (cyfrowy)** – układ, w którym przynajmniej jeden element ma charakter cyfrowy. Element cyfrowy sprawia, że trzeba zastosować przetwornik analogowo-cyfrowy. Sam przekształtnik nie jest powodem, aby traktować układ przekształtnikowy z silnikiem jako układ dyskretny.

## Wymień i omów (opisz) podstawowe struktury układów regulacji momentu w napędach elektrycznych. W których z nich mamy częściową bądź pełną możliwość kształtowania dynamiki momentu elektromagnetycznego i dlaczego?

**Struktura bezpośredniej regulacji prędkości**

W tej strukturze znajduje się jedynie regulator prędkości, sterujący przekształtnikiem tyrystorowym. Stosuje się tu sprzężenie zwrotne prędkości obrotowej. W układach ze strukturą bezpośredniej regulacji prędkości nie ma kontroli nad samym momentem silnika – sterowane jest tylko napięcie twornika. Układ ten charakteryzuje się słabą dynamiką, przede wszystkim dlatego że brakuje w nim sprzężeń od zmiennych stanu tworzących moment silnika. Nie ma tu również kontroli przebiegów dynamicznych prędkości przez regulację momentu przy zmianie punktu pracy.

**Struktura równoległa**

W tego typu strukturze, regulatory różnych zmiennych połączone są ze sobą równolegle, a ich wyjścia połączone są z członem logicznym, który steruje silnikiem. W danej chwili pracuje tylko jeden regulator, określony przez człon logiczny. To człon logiczny ma wpływ na układ – np. w razie przeciążenia, może on przekazać kontrolę z regulatora prędkości na regulator prądu. W strukturze równoległej, od każdej zmiennej stanu można poprowadzić pętlę sprzężenia zwrotnego.

Regulacja prędkości obrotowej jest najczęściej regulacją bezpośrednią, czyli w stanie normalnej pracy w strukturze równoległej nie ma możliwości kontroli momentu silnika. W przypadku stanu przeciążenia, kontrolę przejmuje regulator prądu. Oznacza to tylko częściową kontrolę momentu silnika, jedynie w stanach awaryjnych. Możliwość kontrolowania tylko jednej zmiennej ogranicza parametry dynamiczne układu ze strukturą równoległą.

**Struktura szeregowa (kaskadowa)**

W tej strukturze regulatory umieszczone są szeregowo, jeden za drugim. Do każdego z regulatorów dołączona jest pętla sprzężenia zwrotnego. Rozwiązanie to jest optymalne dla układów, w których istnieje potrzeba sterowania kilkoma zmiennymi.

Regulator nadrzędny (np. regulator prędkości) określa sygnał dla regulatorów podrzędnych (np. regulatora prąd), korygowanych przez sprzężenia zwrotne. Ostatni regulator steruje przekształtnikiem zgodnie z tym, co narzuciły mu regulatory nadrzędne. W strukturze szeregowej regulatory po wejściu w nasycenie nie zwiększają zadawanej wartości.

W strukturze szeregowej, pierwszy kontroler może służyć do ograniczania prądu, drugi do ograniczania strumienia. Przy założeniu stałego strumienia wzbudzenia, w opisanej sytuacji istnieje możliwość pełnej kontroli momentu silnika. Należy przy tym zauważyć, że regulatory wszystkich zmiennych pracują jednocześnie, co zapewnia bardzo dobrą dynamikę układu.

**Struktura z podporządkowaną regulacją momentu**

Jest to szczególny przypadek struktury szeregowej, w którym pozyskiwana i wykorzystywana jest informacja o momencie silnika. Jest ona na ogół estymowana na podstawie modelu matematycznego silnika. Warunkiem prawidłowego działania tej struktury jest dokładna estymacja momentu, ale zapewnia ona dzięki temu pełną kontrolę nad momentem wytwarzanym przez silnik prądu stałego.

## Jakie znasz wskaźniki jakości sterowania stosowane w ANE? Po co każdy z tych rodzajów się stosuje (co wynika)? Jakie są możliwości realizacji wskaźników optymalizacji statycznej w napędzie z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego (jakie metody sterowania z tego wynikają?)

W automatyce napędów elektrycznych wyróżnia się pięć wskaźników jakości sterowania. Dzieli się je na wskaźniki statyczne oraz dynamiczne. Każdy ze wskaźników jakości sterowania odpowiada za pewne cechy układu.

**Wskaźniki optymalizacji statycznej**

Wskaźnik J\_1 określa uchyb strumienia stojana maszyny, a jego minimalizacja zapewnia stałą wartość strumienia stojana, najczęściej wartość znamionową. Wynikają z niego struktury sterowania ze stabilizacją strumienia stojana.

Wskaźnik J\_2 określany jest przez współczynnik poboru mocy biernej. Jego minimalizacja prowadzi do uzyskania struktur o minimalnym poborze prądu, czyli np. struktur ze stałą pulsacją poślizgu maszyny indukcyjnej lub cos fi = 1 w maszynie synchronicznej.

**Wskaźniki optymalizacji dynamicznej**

Wskaźnik J\_3 jest wskaźnikiem optymalizacji dynamicznej, którego minimalizacja pozwala stabilizować strumień stojana również w stanach dynamicznych.

Wskaźnik J\_4 jest wskaźnikiem, którego minimalizacja zapewnia dobrą dynamikę i tłumienie momentu. Dzięki temu można uzyskać lepsze przyspieszenie np. w samochodzie elektrycznym.

Wskaźnik J\_5 to wskaźnik, którego minimalizacja zapewnia szybką i dobrze tłumioną regulację prędkości kątowej. Dotyczy to zarówno zmiany wielkości zadanej, jak i zmiany zakłóceń.

**Możliwości realizacji wskaźników optymalizacji statycznej w napędzie z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego**

Z minimalizacji wskaźnika J\_1 dla układu z silnikiem prądu stałego wynika konieczność zachowania stałej wartości strumienia wzbudzenia, a co za tym idzie – sterowanie prędkością obrotową poprzez zmianę napięcia twornika, przy stałym strumieniu wzbudzenia.

Z minimalizacji wskaźnika J\_2 wynika, że kąt pomiędzy wektorami strumienia wzbudzenia oraz prądu twornika ma być równy pi/2 (wtedy cos pi/2 = 0). Minimalizacja wskaźnika J\_2 narzuca w konstrukcji silnika uzwojenia kompensujące reakcję twornika, ale nie narzuca specjalnego układu sterowania.

**Metody sterowania wynikające z optymalizacji statycznej**

Z minimalizacji wskaźników optymalizacji statycznej wynikają podstawowe struktury sterowania silnikiem obcowzbudnym prądu stałego, czyli struktura szeregowa (kaskadowa), równoległa oraz struktura z podporządkowaną regulacją momentu.

# W1-2

## Przedstaw założenia upraszczające i model matematyczny silnika obcowzbudnego prądu stałego Jakie parametry i elementy go charakteryzują (czy jest to obiekt liniowy czy nieliniowy i dlaczego)? Co wnosi do tego modelu uwzględnienie stałości strumienia wzbudzenia (Psi\_f=const)

Tworząc model matematyczny silnika obcowzbudnego prądu stałego, jako założenia upraszczające przyjmuje się: stałe i skupione parametry silnika, pominięcie oddziaływania twornika, pominięcie zjawisk nieliniowych (histereza, prądy wirowe), niewprowadzenie indukcyjności twornika (zależnej od punktu pracy).

Równania modelu matematycznego silnika prądu stałego opisują jego poszczególne obwody oraz mechanikę. Podstawowymi równaniami są:

**Równanie napięciowe obwodu wzbudzenia**

U\_f = R\_f \* I\_f + dPsi\_f/dt

**Równanie napięciowe obwodu twornika:**

U\_t = R\_t \* I\_t + L\_t \* dI\_t/dt + E\_S

**Równanie równowagi mechanicznej**

J \* dOmega\_m/dt = M\_e – M\_o

Opisane wyżej równania można rozwinąć o następujące zależności:

**Charakterystyka magnesowania**

Psi\_f = f(I\_f)

**Zależność na siłę elektromotoryczną twornika E\_S**

E\_S = k\_e \* Psi\_f \* Omega\_m

**Równanie na moment elektromagnetyczny silnika**

M\_e = k\_e \* Psi\_f \* I\_t

Parametrami charakteryzującymi silnik prądu stałego są:

- R\_t, L\_t - rezystancja i indukcyjność obwodu twornika,

- k\_e - stała konstrukcyjna odpowiadająca za moment i siłę elektromotoryczną,

- J – moment bezwładności,

- T\_e = R\_t/L\_t – stała elektromagnetyczna obwodu twornika,

- T\_M = (J\*Omega\_0N)/(M\_N) – stała mechaniczna silnika

- K\_t – współczynnik wzmocnienia obwodu twornika SPS

- T\_fN – stała elektromagnetyczna obwodu wzbudzenia

- k(psi\_f) – nieliniowa charakterystyka magnesowania

Biorąc pod uwagę powyższe, silnik prądu stałego jest obiektem nieliniowym. Uwzględnienie stałości strumienia wzbudzenia powoduje, że obcowzbudny silnik prądu stałego staje się obiektem liniowym II rzędu, składającym się z członu inercyjnego modelującego obwód twornika i członu całkującego związanego z równaniem ruchu.

## Jakim obiektem dynamicznym jest silnik obcowzbudny prądu stałego przy sterowaniu ze stałym strumieniu wzbudzenia (Psi\_f=const)? Jaką postać ma równanie charakterystyczne dla transmitancji głównej, a jaką dla transmitancji zakłóceniowej i jakie parametry je charakteryzują? Jak parametry odpowiedzi skokowej zależą od parametrów silnika (stałych czasowych)?

Przy sterowaniu ze stałym strumieniem wzbudzenia, silnik prądu stałego jest obiektem liniowym drugiego rzędu. W schemacie blokowym można nie uwzględniać bloków odpowiadających za wzbudzenie silnika. Pozwala to na zapisanie modelu matematycznego silnika w postaci dwóch równań (obwodu twornika oraz równania ruchu). Transmitancja główna takiego układu ma postać:

G\_omega^z(p) = k\_M/(1 + T\_m\*p + T\_m \* T\_e \* p^2)

Z mianownika równania tej transmitancji wynika, że jest ona członem inercyjnym. Parametry charakteryzujące tę transmitancję to stała elektromechaniczna T\_m, stała elektromagnetyczna obwodu twornika T\_e oraz współczynnik k\_M, będący odwrotnością strumienia wzbudzenia (czyli ma wartość stałą).

Transmitancja zakłóceniowa ma postać:

G\_omega^z(p) = - (K\_Z \* (1 + T\_e \* p))/(1 + T\_m \* p + T\_m \* T\_e \* p^2)

Istotną cechą tej transmitancji jest znak „-„ na początku równania, który oznacza że wraz ze wzrostem momentu obciążenia, prędkość silnika maleje. Poza tym, licznik powyższego równania jest członem forsującym. Należy też zauważyć, że transmitancję tę charakteryzuje człon

K\_z = 1 / K\_t(psi\_f)^2

Z którego wynika, że wraz z osłabianiem strumienia K\_Z rośnie, co sprawia że przy osłabianiu strumienia ta sama zmiana momentu powoduje większą zmianę prędkości obrotowej.

Warto zaznaczyć przy tym, że efektywna stała elektromechaniczna zależy od wartości strumienia wzbudzenia, czyli w układzie ze stałym wzbudzeniem jest stała.

**Parametry odpowiedzi skokowej**

Z pierwiastków równania charakterystycznego transmitancji silnika obcowzbudnego (1 + T\_m\*p + T\_m\*T\_e\*p^2) można określić charakter odpowiedzi skokowej silnika prądu stałego.

Jeśli T\_m >= 4T\_e, to przy stałym znamionowym strumieniu wzbudzenia odpowiedź układu jest aperiodyczna. Jeżeli T\_m <= 4T\_e, to dla tego samego układu odpowiedź skokowa ma charakter oscylacyjny.

Ponadto, pulsacja drgań własnych jest opisywana zależnością

omega\_e = 1/sqrt(T\_e\*T\_m)

A współczynnik tłumienia

ksi = ½ \* sqrt(T\_m/T\_e)

Na wykładzie zanotowałem również informację o tym, że choć część urojona pierwiastków równania charakterystycznego świadczy o wielkości oscylacji, to obiekt jest zawsze stabilny.

## Jakim obiektem dynamicznym jest silnik obcowzbudny prądu stałego przy sterowaniu ze zmiennym strumieniu wzbudzenia (Psi\_f=var). Jaką postać ma równanie charakterystyczne transmitancji głównej, a jaką dla transmitancji zakłóceniowej i jakie parametry je charakteryzują? Jak parametry odpowiedzi skokowej zależą od parametrów silnika (stałych czasowych)?

*- obiekt nieliniowy,*

*- transmitancje główne i zakłóceniowe. Parametry – efektywna stała elektromechaniczna zależy od strumienia; jak strumień maleje to stała ta rośnie odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu*

*- parametry odp skokowej – wsp tłumienia i pulsacja drgań własnych, można dodać o stałej czasowej elektromechanicznej, dodatkowe fakty o odp i przebiegu odpowiedzi w SPS: strumień osłabiany*

Silnik obcowzbudny prądu stałego przy sterowaniu ze zmiennym strumieniem wzbudzenia jest obiektem nieliniowym o jednym wyjściu i trzech wejściach. W schemacie blokowym nie można pominąć obwodu wzbudzenia silnika, co oznacza konieczność uwzględnienia trzech równań w modelu matematycznym: obwodu twornika, obwodu wzbudzenia oraz równania ruchu. W związku z nieliniowością, w celu analizy układu należy przeprowadzać jego linearyzację w punkcie pracy. Uwzględnienie trzech wejść obiektu – dwóch sterujących i jednego zakłócającego – prowadzi do bardzo złożonego równania charakterystycznego SPS.

Transmitancje główna i zakłóceniowa mają podobne postaci, w których uwzględnia się napięcie twornika, strumień wzbudzenia, współczynnik wzmocnienia obwodu twornika i stałe czasowe, a także moment obciążenia. Przy stanie jałowym, gdy moment obciążenia jest równy 0, równanie transmitancji głównej jest uproszczone.

Jest kilka istotnych cech transmitancji silnika prądu stałego przy zmiennym strumieniu wzbudzenia. Po pierwsze, znak transmitancji może się zmieniać. W zakresie gdy

Psi\_fu > 2 m\_zu/(K\_t\*u\_tu)

prędkość obrotowa rośnie, gdy strumień maleje. Gdy warunek ten nie jest spełniony, prędkość obrotowa maleje wraz z maleniem strumienia – wynika z tego, że gdy moment obciążenia przekroczy pewną wartość, silnik jest przeciążony i zwalnia mimo zmniejszania strumienia wzbudzenia.

Inną znaczącą cechą jest fakt, że czasowa stała elektromechaniczna rośnie odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu strumienia wzbudzenia. Oprócz tego, silnik z osłabionym strumieniem wykazuje większą wrażliwość na zmiany momentu obciążenia.

Parametry odpowiedzi skokowej układu zależą od stałych czasowych. Analiza równania charakterystycznego silnika obcowzbudnego prądu stałego pokazuje też, że wraz ze zmniejszaniem strumienia, maleje pulsacja drgań własnych, a współczynnik tłumienia rośnie.

W układzie ze zmiennym strumieniem wzbudzenia, odpowiedź aperiodyczna występuje gdy:

T\_m >= 4T\_e gdy strumień wzbudzenia jest równy znamionowemu

TmN >= 4psi\_fu^2\*T\_e gdy strumień jest mniejszy od znamionowego.

Odwrotności powyższych warunków definiują odpowiedź oscylacyjną układu.

T\_m < 4T\_e gdy strumień wzbudzenia jest równy znamionowemu

TmN < 4psi\_fu^2\*T\_e gdy strumień jest mniejszy od znamionowego

Niektóre silniki mają skłonność do oscylacji, o czym decyduje właśnie stała elektromechaniczna.

## Opisz strukturę i zasadę działania szeregowej struktury regulacji prędkości silnika obcowzbudnego prądu stałego oraz metodę strojenia regulatorów (co jest regulowane, jak działają regulatory, jak się je stroi i co z tego wynika dla sterowania momentem SPS)

*- opisać wygląd struktury dla SPS, nie pomieszać przypadku ogólnego z tym*

*- konkretne regulatory RI, ROmega*

*- regulator nadrzędny prędkości, podporządkowany prądu, prędkość wymusza sygnał zadany*

*- struktura twornika, struktura z równaniem ruchu*

*- jak stroimy regulatory -od którego zaczynamy, ze względu na co je dobieramy? – wzór albo słowka, T\_i = T\_e*

*- co wynika z tego – regulator prądu kompensuje to, prędkości tamto, w efekcie – transmitancja zamknięta po zastosowaniu filtru, transmitancja 3. Stopnia, w którym parametrem jest najmniejsza stała czasowa (stała czasowa obw zatępczego regulacji prądu) która jest sumą stałej przekształtnika i czujnika prądu*

*- pełna kontrola momentu – stały strumień, sterujemy prądem*

*- odpowiedź bardzo szybka bo decyduje o niej niewielka stała czasowa*

W strukturze kaskadowej sterowania silnikiem obcowzbudnym prądu stałego stosuje się dwa regulatory, podłączone ze sobą szeregowo (jeden za drugim). Pierwszy regulator jest regulatorem prędkości obrotowej, drugi – regulatorem prądu twornika.

Regulator prędkości obrotowej jest regulatorem nadrzędnym i zadaje sygnał na podporządkowany regulator prądu. Regulator prądu ustawia napięcie twornika. Obydwa regulatory pracują jednocześnie. W tej strukturze pojawiają się dwa tory regulacji – wewnętrzny tor regulacji prądu w strukturze twornika oraz zewnętrzny tor regulacji prędkości w strukturze z równaniem ruchu.

W normalnych warunkach pracy, regulatory nie wchodzą w stan nasycenia i pracują w zakresach liniowych. W przypadku wejścia regulatora prędkości w stan nasycenia, podporządkowany regulator prądu stara się ograniczać prąd twornika do wartości znamionowej przez obniżenie napięcia.

Regulatory stroimy zaczynając od wewnętrznego toru sterowania, czyli od regulatora prądu. Regulator prądu stroi się przyjmując założenie że wartość napięcia indukowanego twornika zmienia swoją wartość dużo wolniej niż zachodzą zmiany prądu i pomijany jest wpływ SEM twornika na dynamikę obwodu regulacji prądu.

Regulator prądu stroi się według kryterium modułu. Jego nastawy dobiera się w taki sposób, żeby skompensowały stałą elektromagnetyczną obwodu twornika, czyli największą stałą kontrolowanego obiektu (czyli T\_RI = T\_e).

Parametry regulatora prędkości obrotowej dobiera się na podstawie kryterium symetrii. Regulator prędkości ma na celu skompensowanie stałej mechanicznej układu.

Dobór parametrów regulatora prądu kompensuje stałą czasową elektromagnetyczną obwodu twornika, a dobór parametrów regulatora prędkości kompensuje stałą mechaniczną układu. Jedyną nieskompensowaną stałą czasową pozostaje zastępcza stała czasowa obwodu regulacji prądu twornika, związana z opóźnieniem przekształtnika oraz układu pomiaru prądu. Zastosowanie filtru w zadajniku prędkości pozwala na ograniczenie przeregulowania.

Struktura szeregowa zapewnia dobrą dynamikę regulacji momentu, której szybkość zależy jedynie od niewielkiej stałej czasowej. Przy tym należy zauważyć, że jej cechą jest też pełna kontrola momentu przy stałym strumieniu, ponieważ jedyną zmienną od której zależy moment jest regulowany w układzie prąd twornika.

## Opisz strukturę i zasadę działania równoległej struktury regulacji prędkości silnika obcowzbudnego prądu stałego oraz metodę strojenia regulatorów (co jest regulowane, jak działają regulatory, jak się je stroi i co z tego wynika dla sterowania momentem SPS)

*- nie zapomnieć że RI działa tylko w razie awarii*

*- regulator wsp z obwodem twornika, stroimy analogicznie do obowdu twornika jak w szewregowej, do stałej czasowej twornika*

*- normalny stan pracy to brak przeciążenia – normalnie pracuje tylko Romega, wtedy ma do czynienia z obiektem 3 rzędu (przekształnik 1 rząd, silnik 2. Rząd) – wpływ przekształtnika pomijamy, stała czasowa jest pomijalnie mała*

*- regulator widzi układ 2 rzędu – stroimy metodą przeliczania G(jomega) moduł = 1*

*- nie trzeba dawać wzorów, można opowiedzieć co z tego wynika*

*- wynika że w równaniu chcznym wytstępuje tylko stała czasowa Te, Tm skompensowana – regulator prędkości jako jedyny w normalnej pracy -kompensuje stałą największą, czyli Mechaniczną.*

W strukturze równoległej sterowania silnikiem obcowzbudnym prądu stałego, regulator prędkości obrotowej oraz regulator prądu są połączone ze sobą równolegle. W danej chwili tylko jeden regulator steruje obiektem. Priorytet regulatorom nadaje blok logiczny.

W normalnych warunkach pracy, regulatorem sterującym obiektem jest regulator prędkości i to on zadaje sygnał na przekształtnik napięcia. W chwili wystąpienia przeciążenia, człon logiczny nadaje priorytet regulatorowi prądu, który ma za zadanie ograniczenie wartości prądu poprzez ograniczanie napięcia do chwili, w której prąd przestaje przekraczać wartość znamionową. Każda ze zmiennych ma własną pętlę sprzężenia.

W normalnym stanie pracy, czyli gdy pracuje tylko regulator prędkości, obiekt sterowania ze względu na przekształtnik napięcia, parametry silnika oraz układ pomiaru prędkości, stanowi układ 3. Rzędu. Dlatego parametry regulatora prędkości dobiera się zgodnie z kryterium modułu, czyli |G\_z(jomega)| = 1.

Po zastosowaniu regulatora o optymalnych nastawach, można zastosować filtr wejściowy o stałej czasowej równej stałej czasowej regulatora prędkości. Dzięki temu uzyskuje się układ zamknięty o optymalnych parametrach.

Działanie regulatora prędkości kompensuje stałą czasową mechaniczną, ale nie kompensuje stałej elektromagnetycznej i to ona decyduje o właściwościach dynamicznych napędu w normalnych stanach pracy.

W układzie równoległym, kontrola momentu jest tylko częściowa, ponieważ regulator prądu działa tylko w stanach awaryjnych.

# W2

## Jak rodzaj sterowania wpływa postać charakterystyki mechanicznej napędu indukcyjnego (podać ogólny wzór na każdą charakterystykę, opisać jej przebieg, podać wartość poślizgu krytycznego lub go scharakteryzować)?

*- nie narysujemy, najprościej by było*

*- nie pisać dokładnych wzorów, tylko ogólny Me = f1(par. omega\_s, omega\_r)\*|u|^2, Me = f2(par. omega\_s, omega\_r)\*|Psi|^2*

*- opisać chki jak wyglądają – poślizg, moment krytyczny, chka przy której nie ma poślizgu – stały strumień, podać wartość poślizgu krytycznego dla każdej charakterystyki i jakośto opisać*

W przypadku ogólnym silnika indukcyjnego, wektor elektromagnetycznych zmiennych stanu silnika można utworzyć za pomocą dwóch dowolnych wielkości spośród i\_s, i\_r, i\_m, Psi\_s, Psi\_r, Psi\_m, zgodnie z zależnością:

m\_e = k \* |x\_1e x x\_2e| \* sign(x\_1e x x\_2e)

Na podstawie równań dla stanu ustalonego pracy silnika indukcyjnego, moment elektromagnetyczny można wyrazić w funkcji amplitudy dowolnej zmiennej stanu lub zmiennej sterującej. Można w ten sposób osiągnąć następujące charakterystyki momentu silnika:

**Moment w funkcji kwadratu amplitudy napięcia stojana**

m\_e = f\_1(par., omega\_s, omega\_r)|u\_s|^2

Ta zależność na moment prowadzi do uzyskania „klasycznej” charakterystyki silnika indukcyjnego, z poślizgiem krytycznym o wartości mniejszej niż 0,1.

**Moment w funkcji kwadratu amplitudy prądu stojana**

m\_e = f\_2(par., omega\_s, omega\_r)|i\_s|^2

Charakterystyka mechaniczna wynikająca z tej metody sterowania ma bardzo dużą stromość narostu, poślizg krytyczny ma bardzo niewielką wartość, silnik pracuje w stanie silnego nasycenia a strumień znamionowy osiągany jest w niestabilnej jej części. Ta metoda sterowania, ze względu na stromy przebieg, wymaga stosowania układu zamkniętego.

**Moment w funkcji kwadratu strumienia stojana**

m\_e = f\_3(par., omega\_s, omega\_r)|Psi\_s|^2

Sterowanie ze stałą amplitudą strumienia stojana daje charakterystykę o wartości pulsacji krytycznej o znacznie większej wartości niż w tradycyjnej charakterystyce (0,2 – 0,3), a także większym momencie krytycznym.

**Moment w funkcji kwadratu strumienia głównego maszyny**

m\_e = f\_4(par., omega\_s, omega\_r)|Psi\_m|^2

Sterowanie ze stałym strumieniem głównym maszyny daje charakterystykę o bardzo dużej wartości poślizgu krytycznego (zbliżoną do 0,5), a także o momencie krytycznym wielokrotnie większym od osiąganego przy klasycznej charakterystyce maszyny.

**Moment w funkcji kwadratu strumienia głównego maszyny**

m\_e = f\_5(par., omega\_s, omega\_r)|Psi\_r|^2

Sterowanie ze stałym strumieniem wirnika sprawia, że w charakterystyce mechanicznej w ogóle nie występuje poślizg krytyczny, a wartość momentu rośnie liniowo wraz z pulsacją poślizgu.

## Jakie są możliwości realizacji wskaźników optymalizacji statycznej w napędzie z silnikiem indukcyjnym. Jakie metody sterowania z tego wynikają?

*- trzeba podać jak wyglądają wskaźniki optymalizacji – statyczne, dynamiczne, co opisują*

*- jak realizuje się pierwszy i drugi wskaźnik i jakie metody z tego wynikają;*

*- z pierwszego wskaźnika wynika sterowanie ze stabilizacją strumienia: najlepiej ze względu na linearyzację sterowania stabilizować strumień wirnika*

*- jakie metody wynikają – przy stałym strumieniu: skalarne, wektorowe – FOC, DTC; z optymalizacji J2 wynika praca ze stałą pulsacją poślizgu i też są dwie strategie: skalarna i wektorowa,*

*- nie opisywać przy tym pytaniu tych metod, tylko je wymienić i krótko skomentować jeśli zostanie czasu.*

*- wymienić metody – stały strumień, skalarne, wektorowe, foc, dtc + przy stałym poślizgu*

W automatyce napędów elektrycznych wyróżnia się pięć wskaźników jakości sterowania. Dzieli się je na wskaźniki statyczne oraz dynamiczne. Każdy ze wskaźników jakości sterowania odpowiada za pewne cechy układu.

**Wskaźniki optymalizacji statycznej**

Wskaźnik J\_1 określa uchyb strumienia stojana maszyny, a jego minimalizacja zapewnia stałą wartość strumienia stojana, najczęściej wartość znamionową. Wynikają z niego struktury sterowania ze stabilizacją strumienia stojana.

Wskaźnik J\_2 określany jest przez współczynnik poboru mocy biernej. Jego minimalizacja prowadzi do uzyskania struktur o minimalnym poborze prądu, czyli np. struktur ze stałą pulsacją poślizgu maszyny indukcyjnej lub cos fi = 1 w maszynie synchronicznej.

**Wskaźniki optymalizacji dynamicznej**

Wskaźnik J\_3 jest wskaźnikiem optymalizacji dynamicznej, którego minimalizacja pozwala stabilizować strumień stojana również w stanach dynamicznych.

Wskaźnik J\_4 jest wskaźnikiem, którego minimalizacja zapewnia dobrą dynamikę i tłumienie momentu. Dzięki temu można uzyskać lepsze przyspieszenie np. w samochodzie elektrycznym.

Wskaźnik J\_5 to wskaźnik, którego minimalizacja zapewnia szybką i dobrze tłumioną regulację prędkości kątowej. Dotyczy to zarówno zmiany wielkości zadanej, jak i zmiany zakłóceń.

**Możliwości realizacji wskaźników optymalizacji statycznej w napędzie z silnikiem indukcyjnym**

Minimalizacja pierwszego wskaźnika optymalizacji statycznej, czyli J\_1 prowadzi do utrzymywania stałego, znamionowego strumienia w maszynie. Ze względu na linearyzację charakterystyki mechanicznej, najlepiej jest w związku z tym stabilizować strumień wirnika.

Z minimalizacji wskaźnika J\_1 wynikają wszystkie metody sterowania ze przy stałym strumieniu. Chodzi tu zarówno o metody skalarne (sterowanie ze stałą amplitudą prądu lub napięcia), jak i metody wektorowe: sterowanie zorientowane polowo (FOC), bezpośrednie sterowanie momentem DTC.

Minimalizacja wskaźnika optymalizacji J\_2 oznaczałaby pracę silnika przy cos fi = 1, co w maszynie indukcyjnej jest niewykonalne. W związku z tym, w układzie z maszyną indukcyjną minimalizacja wskaźnika J\_2 prowadzi do minimalizacji kąta mocy maszyny, a zatem iloczynu |Psi\_s\*i\_s|. Skorzystanie z modelu matematycznego i schematu zastępczego pozwala określić, że minimalizacja wskaźnika J\_2 prowadzi do metod sterowania silnikiem indukcyjnym przy stabilizacji pulsacji poślizgu wirnika.

Z minimalizacji wskaźnika J\_2 wynikają struktury sterowania ze stałą pulsacją poślizgu wirnika – mowa tu konkretnie o metodzie skalarnej i wektorowej. Metody te charakteryzują się wysoką efektywnością energetyczną.

## Podać klasyfikację metod sterowania częstotliwościowego momentem i prędkością silnika indukcyjnego. Czym się różnią metody skalarne od wektorowych i co z tego wynika (np. dla dynamiki sterowania momentem)?

*- wymagana pewna dokładność: jak klasyfikujemy metody (minimalizacja wskaźników, stały strumień /. Poślizg)*

*- jakie są skalarne, jakie wektorowe*

*- czym się różnią skalarne od wektorowych – skalarne to amplituda i częstotliwość, wektorowe to zależności kątowe między zmiennymi i co z tego wynika -> w skalarnych nie mamy kontroli nad dynamiką, w wektorowych w pełni kontrolujemy dynamikę momentu, bo moment zależy od kąta położenia wektorów którymi sterujemy, trzeba to opisać i uzasadnić*

*- Przebiegi nie zależą od punktu pracy w metodach wektorowych (są identyczne przy naroście i spadku), bo pilnujemy tam zależności kątowych – sterujemy składowymi, a nie tylko amplitudami.*

*- „co z tego wynika” -najważniejsza część pytania*

Metody sterowania częstotliwościowego momentem i prędkością silnika indukcyjnego można podzielić na dwie zasadnicze podgrupy, wynikające z minimalizacji wskaźników optymalizacji statycznej J\_1 oraz J\_2. Z minimalizacji wskaźnika J\_1 wynikają struktury sterowania ze stabilizacją strumienia, a z minimalizacji wskaźnika J\_2 wynikają struktury sterowania ze stabilizacją pulsacji poślizgu wirnika.

Wśród obydwu grup układów sterowania można wyróżnić metody sterowania skalarnego oraz metody sterowania wektorowego. Pomiędzy tymi metodami istnieje zasadnicza różnica. Metody skalarne opierają się na zależnościach prawdziwych tylko w stanie ustalonym maszyny, czyli kontrolowane są w nich jedynie amplitudy i częstotliwości zmiennych stanu za pomocą amplitud wielkości sterujących. W przypadku metod wektorowych, sterowanie opiera się na wektorach wielkości sterujących. Oprócz amplitud i częstotliwości, kontrolowane są tu również chwilowe położenia kątowe wektorów poszczególnych zmiennych stanu określających moment silnika indukcyjnego.

Z różnic między metodami skalarnymi i wektorowymi płyną różnice w dynamice sterowania momentem tych układów. Po pierwsze, w metodach wektorowych przebiegi nie zależą od punktu pracy – czyli są identyczne przy naroście oraz przy spadku wielkości sterowanych. Przebiegi dynamiczne w sterowaniu skalarnym zależą od tego, w jakim kierunku zmienia się dana wielkość. Zasadniczą różnicą jest także możliwość kontroli dynamiki momentu w układach wektorowych oraz jej brak przy sterowaniu skalarnym.

Mówiąc krótko, metody wektorowe pozwalają na dużo lepszą kontrolę nad silnikiem w stanach dynamicznych niż metody skalarne. Wynika to z faktu, że zależności na których są oparte metody skalarne nie uwzględniają przebiegów wielkości w silniku podczas stanów nieustalonych.

Metodami sterowania skalarnego ze stabilizacją strumienia są metody oparte o wymuszenie amplitudy napięcia lub prądu stojana. Metodami sterowania wektorowego ze stabilizacją strumienia są metody FOC oraz DTC. W przypadku stabilizacji poślizgu, można wyróżnić jedną metodę sterowania skalarnego oraz jedną sterowania wektorowego.

## Jak jest zbudowany silnik BLDC i w jaki sposób steruje się jego prędkością (opisać strategię przełączeń falownika)?

*- opisać strategię sterowania symetryczną przełączeniami (łączeniem zaworów falownika)*

*- komutator mechaniczny zastąpiony elektronicznym, którego rolę pewni falownik napięcia sterowany w odpowiedni sposób*

*- sterowanie – w jaki sposób – 120 stopni elektrycznych załączone poszczególne zawory i 60 stopni przerwy, cykliczne załączanie z przesunięciem o 120 stopni*

Silniki BLDC są jednym z rodzajów silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Ich cechą charakterystyczną jest trapezoidalny rozkład siły elektromotorycznej wytwarzanej przez magnesy wirnika w stojanie, a także zastosowanie zamiast komutatora mechanicznego, komutatora elektronicznego którego rolę pełni falownik.

Sterowanie prędkością silnika BLDC opiera się na stosunkowo prostym układzie. Na podstawie zadanej prędkości dobierany jest moment silnika, co oznacza również wartość prądu wymaganą do osiągnięcia tego momentu. Sygnał ten jest podawany na regulatory histerezowe. Układ sterowania zaworami w oparciu o zadawane przez regulator histerezowy sygnały oraz uwzględniając aktualny kąt położenia wirnika wymusza odpowiednią częstotliwość oraz kolejność łączeń na falowniku napięcia zgodnie ze strategią załączania kolejnych faz dla silnika BLDC.

Strategia przełączeń falownika opiera się załączaniu w odpowiedniej kolejności poszczególnych faz przez falownik, w oparciu o aktualny sektor położenia wirnika. Powoduje to, że poszczególny zawory załączane są na 120 stopni elektrycznych. Przełączanie zaworów następuje co 60 stopni elektrycznych i pozostaje cykliczne, czyli kolejność załączania po każdym obrocie wirnika o 360 stopni się powtarza. Kolejność załączania zaworów zależy od kierunku w którym obraca się silnik – musi być realizowana w taki sposób, żeby stojan silnika wytwarzał pole wirujące wyprzedzające wirnik.

Pewna niedokładność w przełączaniu poszczególnych zaworów ze względu na dzielenie obwodu wirnika na sektory powoduje występowanie niewielkich oscylacji momentu i prędkości obrotowej, ale to jest temat na całą pracę inżynierską – czego mam świadomość, ponieważ w swojej pracy inżynierskiej zajmuję się właśnie napędem z silnikiem BLDC.

## Jakie znasz metody skalarnego sterowania prędkością SI? Podaj w jaki sposób wyznacza się charakterystykę sterowania – na podstawie czego (na wzorach zapisanych w sposób ogólny)

*- wymienić metody sterowania*

*- stały strumień i stała pulsacja poślizgu – dwie i jedna*

*- nie trzeba opisywać struktur, tylko ideę ogólną – „w tej przyrównujemy do siebie równania te i te, wyznaczamy strategie sterowania napięciem, amplituda napięcia to pierwiastek z czegoś tam”*

*- trzeba napisać że dwie chki momentu przyrównujemy do siebie i wynika z tego sterowanie napięciem / prądem w fkcji częstotliwości*

*- 3 metoda – omegar = const – sterujemy amplitudą prądu, wprost proporcjonalna do pierwsiatka modułu momentu, nie opisywać struktury. Tu tylko sterowanie prądem. Moduł is = pierwiastek z momentu*

Wyróżnia się trzy metody sterowania skalarnego prędkością silnika indukcyjnego. Dwie z nich są metodami ze stabilizacją strumienia silnika indukcyjnego wynikającą z minimalizacji wskaźnika J\_1, trzecia jest metodą ze stabilizacją poślizgu wynikającą z minimalizacji wskaźnika J\_2.

**Sterowanie z wymuszeniem amplitudy napięcia stojana.**

Można powiedzieć, że jest to najbardziej klasyczna metoda sterowania skalarnego, ponieważ opiera się o utrzymywanie stałego stosunku U/f. Sterowanie odbywa się przez zmianę amplitudy napięcia stojana. Charakterystyka sterowania tej metody opiera się o porównanie dwóch zależności na moment silnika, które w uproszczeniu przyjmują postacie:

m\_e ~|u\_s|^2

m\_e ~ |Psi\_s|^2

Dzięki porównaniu ze sobą tych równań, otrzymuje się uproszczoną zależność zgodnie z którą:

|u\_s| = f(omega\_s, omega\_r)

Przy założeniu stałego strumienia stojana, zasada sterowania amplitudą napięcia stojana opisana jest zależnością

|u\_s| ~ r\_s, x\_s, omega\_r

Która uwzględnia aktualną pulsację wirnika oraz parametry obwodu stojana i na tej podstawie pozwala dobrać odpowiednią amplitudę napięcia, żeby zachować stały strumień maszyny.

**Sterowanie z wymuszeniem prądu stojana**

Metoda ta nazywana jest pośrednią metodą prądową. Wynika ona z porównania do siebie zależności na moment silnika, zgodnie z którymi:

m\_e ~|u\_s|^2

m\_e ~ |Psi\_s|^2

Co daje charakterystykę sterowania opisaną zależnością

|i\_s| ~ omega\_r

W metodzie tej amplituda prądu jest dobierana na podstawie pulsacji poślizgu zgodnie z odpowiednią charakterystyką, zależnie od tego czy stabilizowany jest strumień stojana, czy wirnika.

**Sterowanie ze stabilizacją poślizgu**

Metoda ta wynika z minimalizacji wskaźnika optymalizacji J\_2, czyli optymalizacji energetycznej. Jej charakterystyka sterowania wynika z równania obwodu wirnika oraz równania momentu silnika. Sprowadza się to do uproszczonej zależności:

m\_e ~= i^2\_s \* omega\_r

Moment silnika w tej metodzie jest sterowany przez wartość prądu. Utrzymywanie stałej pulsacji poślizgu, czyli stałego omega\_r definiuje zależność wartości prądu od wartości momentu. Prąd jest zatem dobierany na podstawie określonej wartości momentu zgodnie z zależnością:

i\_s^z = sqrt(|m\_e^z|)a

## Jakie znasz metody sterowania polowo-zorientowanego momentem i prędkością SI. Czym się różnią?

*- nie opisywać struktur!!!*

*- tu tylko zasady sterowania – FOC, DTC i czym się różnią*

*- FOC – sterujemy składowymi wektora prądu, DTC – sterowanie strumieniem stojana przez zmianę napięcia stojana, czyli sterowanie składowymi strumienia stojana a de facto składowymi napięcia, szczególnie to widać w SVM -> usx, usy w svm przy dtc*

*- można co do struktury podać różnicę, optymalnie: w FOC regulatory PI prądu w pętlach podporządkowanych, a w DTC nie mamy żadnych regulatorów prądów, tylko histerezowy momentu i strumienia i tablicę przełączeń (podstawowa metoda to ST)*

*- głównie chodzi o idee sterowania – FOC sterowanie składowymi prądu, DTC sterowanie składowymi stojana czyli de facto napięciem.*

Metoda FOC polega na sterowaniu składowymi wektora prądu stojana zorientowanymi względem wektora strumienia wirnika. Metody sterowania polowo-zorientowanego dzieli się na dwa sposoby. Pierwszy z nich dotyczy sposobu pozyskiwania informacji o amplitudzie i kącie położenia strumienia – wyróżnia się tu metodę DFOC oraz IFOC. Drugi wynika z zastosowanego źródła zasilania, czyli dzielimy struktury ze względu na to, czy opierają się o wymuszanie prądu, czy napięcia.

**DFOC a IFOC**

Metoda DFOC do ustalania informacji o kącie położenia i amplitudzie strumienia wykorzystują estymator strumienia. Estymator ten wykonuje bezpośredni pomiar napięć i prądów fazowych, a następnie przekształca je do układu alfa-beta w którym punkt odniesienia do wyznaczania wielkości i położenia wektora wirnika stanowi nieruchomy stojan. W układzie tym istnieje możliwość wyodrębniania składowych x i y prądu i sterowania nimi.

Metoda IFOC opiera się na pośrednim wyznaczaniu położenia wektora strumienia i zyskała popularność wcześniej od metody DFOC, która wymaga estymatora wykonującego skomplikowane obliczenia. W metodzie IFOC, położenie wektora strumienia wyznaczane jest bez użycia estymatora – odbywa się przez sumowanie zmierzonej prędkości wału oraz obliczonej wartości pulsacji poślizgu. Następnie wykonywane jest całkowanie, którego wynikiem jest wyznaczenie kąta strumienia. Wartość tego kąta wykorzystywana jest w układzie przetwornika x-y -> alfa-beta, a wielkość wektora strumienia szacowana jest z zadanej składowej isxz prądu. Metoda ta jest bardziej zależna od stałej czasowej wirnika i indukcyjności głównej silnika niż metoda DFOC, a ze względu na brak regulatora strumienia ma od niej nieco gorsze właściwości dynamiczne.

**Źródło prądowe a źródło napięciowe**

Układy DFOC korzystające z wymuszenia prądowego (falownika prądu), regulują amplitudę strumienia i moment obrotowy silnika przy pomocy regulatorów histerezowych prądu. Sterowanie odbywa się w zamkniętych pętlach regulacji prądu w oparciu o PWM. Najważniejszym ograniczeniem metody z PWM prądowym jest ograniczenie częstotliwości łączeń, od którego zależy ograniczenie minimalnej szerokości histerezy regulatorów.

W układach DFOC ze źródłem napięciowym (falownikiem napięcia) mają za zadanie wymuszać odpowiednie prądy przez sterowanie składowymi napięcia, co sprawia że trzeba w tych strukturach wykorzystać równania napięciowe silnika indukcyjnego. Uwzględnienie ich powoduje, że tory poszczególnych składowych trzeba od siebie odprzęgać (zastosować człony odprzęgające), zapewniając autonomizację torów regulacji w ten sposób.

Istotnymi różnicami pomiędzy układami z wymuszeniem prądowym i napięciowym (oprócz samego wymuszenia) są stosowane regulatory (w pierwszym przypadku regulatory histerezowe, w drugim modulator wektorowy) oraz występowanie członów autonomizujących (odprzęgających) w przypadku falowników napięcia.

# W3

## Omów bezpośrednie sterowanie momentem DTC-ST silnika indukcyjnego (idea sterowania momentem, wielkości sterujące, opis struktury sterowania, rodzaj i sposób strojenia regulatorów, właściwości dynamiczne układu)?

*- idea sterowania – sterowanie momentem poprzez wpływanie na składowe strumienia stojana, zorientowanego wzgl strumienia wirnika, a ponieważ str stojana zmieniamy bezinercyjnie zmieniając napięcie, de facto sterujemy napięciem*

*- wielkości sterujące: składowe strumienia stojana, czyli napięcia stojana*

*- opis struktury sterowania: sterujemy wektorami napięcia odpowiednio z odpowiednią częstotliwością w zależności od aktualnego położenia strumienia stojana*

*- rodzaj regulatorów: w pełnej strukturze – Romega strojony wg. Kryterium symetrii, regulatory histerzzowe – dobieramy histerezę ze względu na to, czym się kierujemy – chcemy jak najmniejsze tętnienia momentu, ale bierzemy pod uwagę zdolności łączeniowe tranzystorów falownika napięcia, ograniczają one szewrokość histerezy; musimy uwzględnić stałą czasową obwodu stojana*

*- właściwości dynamiczne: ponieważ stała mechaniczna jest skompensowana a sterowanie jest bezpośrednie momentem poprzez strumień stojana czyli napięcie- > mamy bardzo dobrą dynamikę*

Metoda bezpośredniego sterowania momentem silnika indukcyjnego DTC-ST opiera się na równaniu momentu, z którego wynika że sterowanie momentem silnika może odbywać się poprzez kontrolę wartości strumieni wirnika i stojana oraz kąta między tymi wektorami. Przy założeniu stałego strumienia wirnika, moment może być sterowany poprzez zmianę składowych wektora strumienia stojana. Można to realizować bezinercyjnie zmieniając składowe napięcia stojana – i na tym zasadniczo polega DTC.

Wielkościami sterującymi w DTC są właśnie składowe strumienia stojana, czyli w rzeczywistości składowe wektora napięcia stojana. W układzie DTC-ST, regulatory histerezowe strumienia i momentu przekazują sygnały zadane tych wielkości na tabelę optymalnych przełączeń, która spośród 8 wektorów napięcia załącza wybrane z nich na odpowiednio długi czas w oparciu o aktualne położenie wektora strumienia stojana. Informacja o momencie i położeniu strumienia stojana są pozyskiwane z estymatora tych wielkości.

Regulacja może odbywać się przez zmianę kąta obciążenia, zmniejszenie wartości lub zmianę znaku momentu poprzez odpowiednie dobieranie poszczególnych wektorów napięcia z sektorów sąsiadujących z sektorem, w którym aktualnie znajduje się strumień stojana. W DTC-ST nie jest potrzebny tor regulacji prędkości – sterowanie może odbywać się tylko przy użyciu kontroli momentu wytwarzanego przez silnik.

**Regulatory**

W pełnej strukturze DTC, z regulacją prędkości obrotowej, istnieje możliwość doboru parametrów regulatora prędkości obrotowej tak, by kompensował stałą mechaniczną układu. Regulator ten stroi się według kryterium symetrii. Oprócz tego, w układzie DTC-ST znajdują się regulatory histerezowe, w których można dobrać szerokość histerezy. Im mniejsza, tym mniejsze tętnienia momentu, ale przy tym ograniczenia narzucane są przez zdolności łączeniowe tranzystorów falownika napięcia oraz stałą czasową obwodu stojana.

Właściwości dynamiczne układu DTC-ST przy skompensowanej stałej mechanicznej są bardzo dobre. Wynika to z faktu, że momentem steruje się bezpośrednio poprzez strumień stojana, czyli jego napięcie.

## Omów strukturę DFOC dla silnika indukcyjnego przy zasilaniu ze źródła prądu (idea sterowania momentem, wielkości sterujące, opis struktury sterowania, rodzaj i sposób strojenia regulatorów, właściwości dynamiczne układu)

- idea sterowania: polowo zorientowane; potem DFOC – informacja o strumieniu wirnika uzyskujemy bezpośrednio

- jak realizujemy zrodlo pradu, jakie wielkości są sterujące, opis struktury – jeden tor sterowania, drugi tor sterowania

- strojenie regulatorów: najpierw w pętlach wewnętrznych, potem regulator strumienia i prędkości i co z tego wynika – wnioski z materiałów do wykładu

- regulator prądu w osi x i y stroimy tak by skompensować stałą czasową obwodu stojana sigmaTs, wzoru nie trzeba; współczynnik wzmocnienia. Ważna jest kompensacja stałej czasowej – duża stała przez małą i podwójne wzmocnienie

- stałe czasowe – opisowo, np. regulator pI strumienia ze względu na większą stałą – Tr (uzwojenia wirnika)

## Omów metodę sterowania skalarnego silnika indukcyjnego ze stałą pulsacją poślizgu, podaj charakterystykę sterowania i mechaniczną (idea metody, opis struktury, właściwości dynamiczne sterowania momentem).

*- powiedzieć w jaki sposób charakterystykę sterowania się wyznacza*

*- czy to jest sterowanie przez wymuszenie prądu*

*- moduł prądu wprost proporcjonalny do pierwiastka momentu*

*- charakterystyka sterowania: do wyznaczenia częstotliwości prądu którego amplitudę wyznaczamy, stosujemy równanie statyczne że omegasi=omegam+omegar, omegar- zadane na wyjściu regulatora prędkości*

*- strojenie regulatorów: regulator prądu pilnuje zadanej amplitudy prądu, stroimy ze wzgl na stałą czasową obwodu wirnika; regulacja prędkości – kompensacja stałej czasowej mehcanicznej, z kryterium symetrii*

*- właściwości dynamiczne sterowania momentem: skalarne, moment zależy nie tylko od amplitudy prądu, więc 50% kontroli nad momentem. Poślizg który powinien być stały jest stały tylko w stanach ustalonych; w stanach dynamicznych nie jest stały, jest niekontrolowany (uproszczone równanie do wyznaczania częstotliwości prądu stojana) -> w stanach dynamicznych moment będzie oscylował i jego odpowiedzi dynamiczne będą zależeć od punktu pracy.*

## Omów strukturę DFOC dla silnika indukcyjnego przy zasilaniu ze źródła napięcia (idea sterowania momentem, wielkości sterujące, opis struktury sterowania, rodzaj i sposób strojenia regulatorów, właściwości dynamiczne układu)

- *odpowiedź* analogiczna do 4.2, z tym że trzeba uwzględnić układ odprzęgający

## Omów strukturę DTC dla silnika PMSM (idea sterowania momentem, wielkości sterujące, opis struktury sterowania, rodzaj i sposób strojenia regulatorów, właściwości dynamiczne układu)?

*- idea sterowania momentem taka sama jak dla indukcyjnego - opisać jak dla indukcyjnego; sterujemy strumieniem stojana, zakładając że strumień wirnika jest stały (w PMSM jest faktycznie stały i nie trzeba go kontrolować, chyba że zaczniemy go osłabiać)*

*- strumień sterujemy przez zmianę napięcia wykorzystując do tego falownik*

*- wielkości sterujące: składowe strumienia*

*- struktura sterowania: chodzi o DTC-ST; w SVM należy zwrócić uwagę na odprzęganie (dotyczy też PWM).*

*- odnośnie struktury sterowania -*

## Omów strukturę IFOC dla silnika indukcyjnego przy zasilaniu ze źródła prądu (idea sterowania momentem, wielkości sterujące, opis struktury sterowania, rodzaj i sposób strojenia regulatorów, właściwości dynamiczne układu)

*- idea sterowania czy sposób odpowiedzi jak przy DFOC,*

*- strojneie regulatorów – odpada regulator strumienia*

*- IFOC – nie wykorzystujemy info o strumieniu bo jej nie mamy*

*- pulsacje strumienia i kąt położenia strumienia wyznaczamy z równania na pulsację poślizgu i omegam (omegaspsi = omegam + omegar), trzeba to napisać*

*- sposób strojenia i właściwości dynamiczne jak przy DFOC*

## Omów metodę sterowania skalarnego ze stałym strumieniem i wymuszeniem prądu, omów charakterystykę sterowania i mechaniczną (idea metody, opis struktury, właściwości dynamiczne sterowania momentem ).

- „tulipanowa chka” moduł is w funkcji pulsacji poślizgu, można napisać że moduł is = f(par., omegar), czyli nic nie przesuwamy jak przy sterowaniu napięciowym

- tutaj: w charakterystyce sterowania nie trzeba niczego przesuwać w przeciwieństwie do 4.9

- chka mechaniczna przy sterowaniu ze stałym strumieniem i wymuszeniem prądu stojana: stroma ch-ka z momentem krytycznym z is=const wg wartości zadanej (chki sterowania); musimy tu sterować bezwzględnie w układzie zamkniętym po prędkości

- właściwości dynamiczne: znacznie lepsze niż przy napięciu; układ szybszy bo wpływamy na amplitudę prądu od której bezpośrednio zależy moment; pilnujemy prądu w torze sprzężenia zwrotnego po prądzie, jest w ogóle obwód regulacji prądu

- mamy „50%” pewności że moment w stanach dynamicznych jest sterowany; w stanach dynamicznych w zależności od punktu pracy, przebiegi oscylacyjne i tłumienność będą nieco inne – nie sterujemy zależności kątowych. Przebiegi nie zależą od punktu pracy w metodach wektorowych (są identyczne przy naroście i spadku), bo pilnujemy tam zależności kątowych – sterujemy składowymi, a nie tylko amplitudami.

## Omów strukturę FOC dla silnika PMSM (idea sterowania momentem, wielkości sterujące, opis struktury sterowania, rodzaj i sposób strojenia regulatorów, właściwości dynamiczne układu)?

## Opisz metodę sterowania skalarnego ze stałym strumieniem i wymuszeniem napięcia, omów charakterystykę sterowania i mechaniczną (idea metody, opis struktury, właściwości dynamiczne sterowania momentem ).

- tutaj napisać: amplituda napięcia na osi Y (odciętych), na osi X mamy częstotliwość, względem zmieniającego się poślizgu od zera do plus minus znamionowego chki muszą ulec przesunięciu; to jest w omówieniu chki sterowania

- charakterystyka mechaniczna – jak zwykle przy napięciu, klasyczna chka SI; właściwo

- brak toru regulacji prądu, co najwyżej pilnujemy napięcia żeby nie przekroczyć wartości dopuszczalnych; może być regulator napięcia

- na przebiegi dynamiczne momentu nie mamy wpływu; w stanie ustalonym moment jest jaki być powinien – jak wynika z przyłożonego napięcia i obciążenia; w stanach dynamicznych nie mamy w ogóle kontroli