



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: *Daniel Wachowiak*

Dyscyplina naukowa: *Automatyka i Robotyka*

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: *Analiza właściwości rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej*

Tytuł rozprawy w języku angielskim: *Analysis of extended speed observer of induction machine*

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor <i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński	
Promotor pomocniczy <i>podpis</i>	Kopromotor <i>podpis</i>
dr inż. Marek Adamowicz	

Gdańsk, rok 2016

*Składam serdeczne podziękowania Promotorowi
prof. dr hab. inż. Zbigniewowi Krzemińskiemu
za zachętę do podjęcia wyzwania, wsparcie
oraz odpowiadające mojej naturze zaangażowanie*

*Chciałbym podziękować również wszystkim członkom
Katedry Automatyki Napędu Elektrycznego
za stworzenie życzliwej atmosfery
oraz przyjazną postawę wobec mojego introwertycznego usposobienia*

*Szczególnie pragnę podziękować Rodzicom
za wsparcie, cierpliwość oraz nigdy nieustającą wiarę we mnie*

Spis treści

1.	Wstęp	5
1.1.	Opis problemów	5
1.2.	Teza i cele pracy.....	11
1.2.1.	Teza	11
1.2.2.	Cele pracy.....	11
1.3.	Układ pracy	12
1.4.	Spis oznaczeń.....	13
2.	Model matematyczny rozszerzonego obserwatora prędkości	18
2.1.	Model matematyczny maszyny indukcyjnej	18
2.1.1.	Wielkości względne	18
2.1.2.	Równania modelu matematycznego maszyny	20
2.1.3.	Rozszerzony model maszyny indukcyjnej	21
2.2.	Rozszerzony obserwator prędkości maszyny indukcyjnej.....	23
3.	Dobór wzmacnień obserwatora	25
3.1.	Równania dynamiki błędów odtwarzania obserwatora.....	25
3.2.	Linearyzacja równań dynamiki błędów odtwarzania.....	27
3.3.	Bieguny obserwatora.....	31
3.4.	Funkcja celu	32
3.4.1.	Ogólna postać funkcji celu	32
3.4.1.	Kryterium stabilności	33
3.4.2.	Kryteria właściwości dynamicznych.....	34
3.5.	Algorytmy ewolucyjne.....	36
3.6.	Algorytmy korekcji wzmacnień.....	42
3.7.	Modyfikacja wzmacnień przy zmianie kierunku obrotów.....	44
3.7.1.	Opis problemu	44
3.7.2.	Symetria rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej	45
3.7.3.	Symetria rozszerzonego obserwatora prędkości	47
3.7.4.	Korekcja wzmacnień obserwatora	49
4.	Załączanie maszyny przy niezerowej prędkości.....	53
4.1.	Opis metody	53
4.2.	Wstępna identyfikacja prędkości	56

4.3.	Algorytm załączania maszyny przy wstępnie znanej prędkości wirnika ...	60
5.	Analiza właściwości rozszerzonego obserwatora	64
5.1.	Opis stanowiska badawczego oraz środowiska symulacyjnego	64
5.2.	Analiza wyników algorytmu doboru wartości wzmocnień obserwatora ...	64
5.3.	Porównanie właściwości obserwatora z właściwościami zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania	71
5.4.	Wpływ punktów pracy maszyny na dynamikę obserwatora	78
5.4.1.	Wprowadzenie	78
5.4.2.	Wpływ prędkości wirnika	79
5.4.3.	Wpływ strumienia wirnika	86
5.4.4.	Wpływ obciążenia	92
5.4.5.	Wpływ kierunku obrotów wirnika	99
5.4.6.	Wpływ poślizgu maszyny	104
5.4.7.	Działanie obserwatora w szerokim zakresie zmian prędkości	113
5.5.	Analiza wpływu błędów parametrów modelu maszyny	119
5.6.	Załączanie maszyny przy niezerowej prędkości wirnika	144
5.6.1.	Wstępna identyfikacja prędkości	144
5.6.2.	Załączanie maszyny przy niezerowej prędkości wirnika	148
6.	Podsumowanie i wnioski	154
Załącznik A.	Parametry maszyny	158
Załącznik B.	Wartości wzmocnień obserwatora	159
B.1.	Zestaw stałych wzmocnień	159
B.2.	Zestawy wzmocnień zmieniane w funkcji prędkości	160
B.3.	Zestaw wzmocnień zastosowany do porównania właściwości obserwatora z rozkładem biegunów	160
Załącznik C.	Linearyzacja równań dynamiki błędów obserwatora	161
C.1.	Pochodne cząstkowe	161
7.	Bibliografia	166

1. WSTĘP

1.1. Opis problemów

Wraz z ciągłym rozwojem energoelektroniki coraz powszechniej w przemyśle stosowane są rozwiązania zawierające napędy elektryczne. Do najczęściej wykorzystywanych maszyn elektrycznych zaliczyć można maszyny indukcyjne, a w szczególności silniki klatkowe. Trójfazowe maszyny indukcyjne stanowią niemal 90% stosowanych w Europie maszyn prądu przemiennego [1]. Popularność zawdzięczają one prostej budowie maszyn indukcyjnych, a co za tym idzie stosunkowo dużej niezawodności oraz niskiemu kosztowi tych urządzeń, natomiast zastosowanie maszyny indukcyjnej w napędzie elektrycznym daje możliwość bezproblemowej regulacji prędkości pracy silnika. Większość stosowanych napędów, stanowiąca 80-90% rynku, są to napędy prostych urządzeń, jak pompy czy wentylatory, dla których nie wymaga się zapewnienia szczególnie dobrych właściwości dynamicznych [2]. Urządzenia takie pracować mogą w otwartym układzie regulacji bez pomiaru prędkości. Wystarczające jest wówczas zastosowanie prostego sterowania skalarne u/f [3]. Coraz częściej natomiast napędy elektryczne stosowane są w projektach, w których rosną wymagania co do właściwości dynamicznych oraz dokładności regulacji prędkości w różnych warunkach pracy maszyny. Przykładami napędów, w których konieczne może być wykorzystanie bardziej zaawansowanych układów sterowania, są napędy stosowane w windach, dźwigach oraz pojazdach elektrycznych. Złożone układy regulacji wykorzystywane są do generatorów stosowanych w turbinach wiatrowych. W algorytmach sterowania zapewniających dobre właściwości dynamiczne maszyny, jak FOC (Field-Oriented Control), DTC (Direct Torque Control) czy sterowanie multiskalarne [3]–[10], oprócz łatwo mierzalnych wielkości jak prąd stojana czy prędkość wirnika, wymagana jest znajomość pozostałych zmiennych, jak wartości składowych wektorów strumieni magnetycznych. Chociaż istniały próby pomiaru strumienia w maszynie indukcyjnej, jest to zagadnienie kłopotliwe oraz kosztowne. W praktyce przy wykorzystaniu zaawansowanych układów regulacji wartości strumienia odtwarzane są w wybranym estymatorze.

Prędkość kątowna wirnika jest jedną z wielkości występujących w równaniach modelu matematycznego maszyny indukcyjnej. Odtwarzanie strumieni maszyny możliwe jest zatem w napędzie wyposażonym w aparaturę do pomiaru prędkości lub w układzie

bezczylnikowym, w którym prędkość wirnika jest jedną z wielkości estymowanych. Instalacja dodatkowych urządzeń, jak enkoder optyczny, wiąże się ze wzrostem kosztu układu napędowego, przy czym udział wydatku na aparaturę do pomiaru prędkości jest szczególnie duży dla maszyn niewielkich mocy. Ponadto montaż prędkościomierza stwarza dodatkowe komplikacje oraz wprowadza ograniczenia w konstrukcji układu napędowego. Kolejnym utrudnieniem jest konieczność stosowania dodatkowych przewodów, co może być źródłem zakłóceń mierzonej prędkości wirnika. Przetworniki prędkości są urządzeniami mechanicznymi, więc szczególnie łatwo ulegać mogą awarii, a także charakteryzują się wrażliwością na warunki panujące w miejscu stosowania maszyny, w szczególności w środowiskach o dużym zapyleniu. Odtwarzanie prędkości wirnika w układzie bezczylnikowym umożliwia wyeliminowanie wad stosowania dodatkowej aparatury do pomiaru prędkości. W niektórych zastosowaniach napędy elektryczne wyposażone w przetwornik prędkości zaimplementowane mają także algorytmy odtwarzania prędkości, stanowiące dodatkowy poziom bezpieczeństwa pracy układu [11].

Wprowadzenie na rynek procesorów sygnałowych i cyfrowych układów programowalnych umożliwiło rozwój metod sterowania maszynami elektrycznymi. Stosowanie nowych układów regulacji wiązało się z koniecznością odtwarzania zmiennych stanu. Jednym z pierwszych oraz najprostszych w realizacji estymatorów strumienia maszyny jest estymator oparty na modelu napięciowym [12], [13], w którym strumień stojana obliczany jest jako całka funkcji zależnej od rezystancji stojana oraz mierzonych prądów i napięć stojana. Zaletą metody jest brak wpływu obciążenia maszyny na jakość odtwarzanego strumienia stojana oraz wymaganie znajomości jedynie jednego, łatwo mierzalnego parametru modelu maszyny indukcyjnej. Z drugiej strony, niewielkie nawet zmiany rezystancji stojana, spowodowane na przykład zmianami temperatury uzwojeń, przyczyniają się do powstawania błędów, zauważalnych zwłaszcza przy małych prędkościach. Ponadto całkowanie składowej stałej błędu pomiaru prądu stojana skutkuje dryfowaniem odtwarzanego strumienia do nieskończoności w całym zakresie prędkości maszyny. Problem ten rozwiązano poprzez wprowadzenie filtra górnoprzepustowego na wyjściu estymatora [14], [15], zapewniającego dobre właściwości układu przy dużych prędkościach. Estymator ten nie gwarantuje jednak poprawnej pracy dla małych pulsacji napięcia, bliskich częstotliwości odcięcia filtra. Wady tej pozbawione są estymatory oparte na modelu prądowym [13], [16]. Charakteryzują się one jednak dużą wrażliwością na błędy rezystancji wirnika, rosnące wraz ze wzrostem obciążenia maszyny. Kolejną komplikacją jest

występowanie w równaniu modelu prądowego prędkości kątovej wirnika, którą uzyskuje się na drodze pomiaru bądź estymacji.

Do bardziej zaawansowanych układów odtwarzania zmiennych stanu zaliczyć można estymatory MRAS (*Model Reference Adaptive System*). Odtwarzanie niedostępnych pomiarowo zmiennych opera się na porównaniu sygnałów wyjściowych uzyskanych z dwóch niezależnych modeli. W klasycznym estymatorze prędkości MRAS maszyny indukcyjnej [17] rolę modelu odniesienia stanowi model napięciowy, w którym strumień wirnika obliczany jest jedynie na podstawie mierzonych wielkości. W równaniach modelu prądowego, stanowiącego model przestrajany, występuje nieznaną prędkość kątovej wirnika maszyny, która korygowana jest poprzez zastosowanie odpowiedniego mechanizmu przestrajania. Korekcja prędkości odbywa się przy występowaniu różnicy między strumieniami wirnika uzyskanymi z modelu napięciowego oraz prądowego. Metoda ta pozwala na odtwarzanie zarówno strumieni maszyny jak i prędkości wirnika, jednak wciąż obciążona jest problemami związanymi z występowaniem otwartego integratora w modelu napięciowym. W innych wariantach estymatorów MRAS wielkościami wyjściowymi modelu odniesienia oraz modelu przestrajanego jest napięcie rotacji (*back EMF*) [18]. Wylimitowane są wówczas problemy występujące przy stosowaniu modelu napięciowego. Ponadto estymatory MRAS, wykorzystujące błąd napięcia rotacji jako wielkość dostrajającą prędkość wirnika, charakteryzują się mniejszą wrażliwością na termiczne zmiany rezystancji stojana oraz wirnika. Do nowej grupy estymatorów MRAS zaliczyć można estymatory, w których rolę modelu odniesienia stanowi rzeczywista maszyna, natomiast wielkością odniesienia jest mierzony prąd stojana [19]. Wówczas prędkość wirnika maszyny, będąca parametrem modelu dostrajanego, korygowana jest na podstawie błędu odtwarzanego prądu stojana uzyskanego z wybranego modelu maszyny. Rozwiązanie takie charakteryzuje się dobrymi właściwościami estymatora w szerokim zakresie prędkości, jak i odpornością na błędy parametrów modelu maszyny.

Kolejnym narzędziem powszechnie wykorzystywanym do odtwarzania zmiennych stanu obiektu, w tym maszyny indukcyjnej, jest obserwator Luenbergera [20]. Obserwator taki zawiera w swojej strukturze model matematyczny maszyny oraz błędy odtwarzania mierzonych zmiennych stanu. Zwykle bezpośrednio wykorzystywany jest jedynie do estymacji strumieni maszyny. Prędkość kątovej wirnika uzyskuje się na podstawie błędów odtwarzania poprzez zastosowanie odpowiedniego mechanizmu adaptacji [21], [22]. W obserwatorach stanu pełnego rzędu odtwarzane są wszystkie zmienne stanu. Możliwe jest także zaprojektowanie obserwatora zredukowanego rzędu [23], [24], w którym mierzone

zmiennie nie są estymowane, a także rozszerzonego obserwatora, opartego na modelu matematycznym maszyny, do którego wprowadzono dodatkowe zmienne stanu [25]–[28].

Istnieje wiele wariacji oraz modyfikacji opisanych w tym rozdziale metod odtwarzania zmiennych stanu maszyny, mających na celu poprawę właściwości estymatorów. Ponadto dostępne są inne sposoby odtwarzania zmiennych stanu maszyny, do których zaliczyć można między innymi metody niedeterministyczne, jak zastosowanie filtrów Kalmana [29], [30] bądź estymatorów opartych na metodach sztucznej inteligencji [31], [32]. Odtwarzanie prędkości kątovej wirnika, możliwe jest także bezpośrednio na podstawie pomiaru prądów stojana poprzez analizę widma sygnału [33].

Spośród badań prowadzonych w ostatnich dekadach w polskich ośrodkach badawczych wyróżnić można prace poświęcone estymatorom MRAS. W szczególności zaproponowano oraz przebadano estymator prądowy MRAS^{CC} [19], [34], w którym rolę modelu przestrajanego pełni estymator prądu stojana uzyskany poprzez przekształcenie modelu napięciowego oraz prądowego. Strumień wirnika występujący w otrzymanym równaniu odtwarzany jest za pomocą modelu prądowego. Rolę modelu odniesienia pełni natomiast silnik indukcyjny. Porównując estymowany prąd stojana z rzeczywistą wartością prądu, uzyskuje się błąd odtwarzania stanowiący składową mechanizmu adaptacji prędkości wirnika opartego na regulatorze PI [21]. W pracach [35]–[37] zbadano natomiast właściwości estymatora, w którym rolę modelu przestrajanego pełni obserwator Luenbergera.

Oprócz estymatorów MRAS, przedmiotem badań są obserwatory rozszerzone, w których występuje dodatkowy, wolnozmienny parametr jako zmienna stanu modelu maszyny. W [26] porównano działanie rozszerzonych obserwatorów, w których dodatkową zmienną jest prędkość wirnika maszyny i stała czasowa wirnika oraz wariant obserwatora, w którym odtwarzano dwie zmienne – prędkość kątową wirnika oraz moment obciążenia. W pracach [8], [9], [28] zaproponowano wprowadzenie nowej zmiennej ζ , stanowiącej iloczyn wektora strumienia wirnika oraz prędkości wirnika. Wówczas w obserwatorze oprócz strumienia wirnika odtwarzana jest także nowa zmienna, na podstawie której określić można prędkość kątową wirnika. Jest to stosunkowo nowe podejście do estymacji wartości niemierzonych zmiennych maszyny indukcyjnej i nie wszystkie problemy zostały do końca rozwiązane, stąd obserwator ten jest przedmiotem badań prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy.

Wprowadzenie zmiennej ζ do równań modelu matematycznego maszyny indukcyjnej po raz pierwszy zaproponowane zostało w [28]. Po zastosowaniu kolejnych

modyfikacji obserwatora [38], [39], przyjął on ostateczną formę opisaną w [40] i w dalszej części rozprawy nazywany on będzie rozszerzonym obserwatorem prędkości.

Właściwości estymatorów zależne są między innymi od wartości parametrów, zależnych od typu estymatora. W przypadku grupy estymatorów MRAS, w których zmienne odtwarzane są bezpośrednio na podstawie sygnałów mierzonych jedynymi parametrami, które wymagają dostrojenia, są wzmocnienia występujące w algorytmie adaptacyjnym. W przypadku zastosowania regulatora PI w mechanizmie adaptacyjnym, dobierane są dwie nastawy: wzmocnienie członu proporcjonalnego oraz całkującego. W innych wariantach estymatorów MRAS, na przykład w estymatorze zaprezentowanym w [36], rolę modelu dostrajanego pełni obserwator Luenbergera. Wówczas, oprócz nastaw mechanizmu adaptacyjnego, konieczny jest dobór wartości wzmocnień występujących w sprzężeniu od błędów odtwarzania, natomiast liczba tych wzmocnień wynosi cztery. Występująca w równaniach obserwatora prędkość kątowna wirnika jest wolnozmiennym parametrem. Traktując ją jako stałą, otrzymuje się obserwator jako układ liniowy. Możliwe jest zatem zastosowanie metod doboru wzmocnień właściwych dla obserwatorów liniowych. Istnieją analityczne zależności opisujące wartość wzmocnień obserwatora, dla których odległość biegunów obserwatora od środka układu współrzędnych płaszczyzny zespolonej jest wielokrotnością odległości biegunów obiektu od początku układu współrzędnych [21], [41]. Możliwe jest także wykorzystanie algorytmów ewolucyjnych do doboru wartości wzmocnień oraz parametrów algorytmu adaptacyjnego [35], [42]–[44], co daje większą swobodę lokalizacji biegunów obserwatora, a także możliwość ograniczenia wartości wzmocnień.

W rozszerzonym obserwatorem prędkości maszyny indukcyjnej wprowadzono nową zmienną, co wiąże się ze wzrostem liczby równań obserwatora oraz liczby błędów odtwarzania. W zaproponowanym obserwatorem prędkości występuje aż dwanaście wzmocnień, od których doboru zależy jakość odtwarzania oraz przede wszystkim stabilność obserwatora. Obserwator opisany jest nieliniowym układem równań różniczkowych, natomiast przyjęcie prędkości wirnika jako stałego parametru, jak w [35], nie jest możliwe, ponieważ w równaniach obserwatora prędkość zastąpiona jest funkcją strumienia wirnika oraz nowej zmiennej ζ . Przeprowadzone zostały udane próby zastosowania algorytmu optymalizacji rojem cząstek do doboru wartości wzmocnień rozszerzonego obserwatora [45]. Metoda ta wiąże się jednak z koniecznością przeprowadzania wielokrotnych, złożonych obliczeniowo symulacji. Problem doboru wartości wzmocnień rozszerzonego obserwatora prędkości pozostaje zatem otwarty.

Jakość odtwarzania obserwatorów w dużej mierze zależy od dokładności wprowadzonych parametrów modelu maszyny. W [46] przeanalizowano wpływ odchyłek parametrów modelu na błędy odtwarzania obserwatora strumienia wirnika. W [47] natomiast zbadano wpływ błędów parametrów modelu na położenie biegunów oraz stabilność estymatora typu MRAS. Przeprowadzono także badania mające na celu oszacowanie błędów estymacji prędkości wirnika przy zastosowaniu zamkniętego układu regulacji. W przypadku rozszerzonego obserwatora prędkości nie analizowano do tej pory wpływu błędów parametrów modelu maszyny na jakość odtwarzania.

Kolejnym problemem występującym w bezczujnikowych napędach elektrycznych jest załączanie maszyny przy niezerowej prędkości wirnika, nazywane lotnym startem. Zasilenie maszyny napięciem o pulsacji znacznie odbiegającej od prędkości wirnika maszyny powoduje wystąpienie dużych prądów, przekraczających wartości znamionowe. W przypadku, gdy obroty maszyny przed załączeniem falownika spowodowane są bezwładnością mas napędzanych przez wirnik, zasilenie maszyny napięciem o niewłaściwej częstotliwości spowodować może znaczną zmianę obrotów wirnika, co w niektórych zastosowaniach napędu może być niepożądane. Lotny start realizowany jest zwykle przy udziale dodatkowej aparatury pomiarowej. W niektórych napędach nawet jeśli prędkość wirnika odtwarzana jest w obserwatorze, stosuje się dodatkowy, mniej dokładny czujnik prędkości do wstępnego określenia prędkości maszyny [48]. W innych rozwiązaniach wykorzystane zostało zjawisko remanentu magnetycznego. W przypadku występowania dostatecznie dużej wartości strumienia magnetyzmu szczątkowego na zaciskach niezasilonej maszyny indukcyjnej pojawi się napięcie rotacji. Na podstawie częstotliwości tego sygnału możliwe jest wstępne określenie prędkości wirnika maszyny [49]. We współczesnych napędach elektrycznych zwykle jednak nie stosuje się bezpośredniego pomiaru napięcia na zaciskach maszyny. Zaimplementowanie tej metody wiąże się zatem z koniecznością zastosowania dodatkowego układu umożliwiającego pomiar częstotliwości omawianego sygnału. Przy wykorzystaniu obserwatora prędkości podczas procedury lotnego startu pojawia się natomiast problem występowania dużych poślizgów oraz małych wartości strumienia wirnika. Jednym z celów niniejszej pracy jest zbadanie możliwości wykorzystania rozszerzonego obserwatora prędkości w takich warunkach pracy napędu.

Odtwarzanie zmiennych stanu maszyny indukcyjnej przy wykorzystaniu rozszerzonego obserwatora prędkości jest zagadnieniem stosunkowo nowym. W przypadku pozostałych metod odtwarzania zmiennych stanu istnieje znaczny zbiór publikacji, w których zaprezentowano właściwości estymatorów. Literatura poświęcona rozszerzonemu

obserwatorowi prędkości nie jest tak obszerna. Opracowano kilka publikacji, w których poruszono problem doboru wartości wzmacnień tego obserwatora oraz w ograniczonym zakresie zbadano jego właściwości [40], [45], [50], [51]. Celem tej rozprawy jest między innymi uzupełnienie wiedzy na temat rozszerzonego obserwatora dotyczącej jego właściwości w różnych warunkach obciążenia maszyny, a także zbadanie wpływu błędów identyfikacji parametrów modelu maszyny na jakość odtwarzania.

1.2. Teza i cele pracy

1.2.1. Teza

Rozszerzony obserwator prędkości maszyny indukcyjnej dzięki zastosowaniu metody strojenia parametrów na podstawie rozkładu biegunów zachowuje dobre właściwości odtwarzania zmiennych stanu w szerokim zakresie pracy maszyny, włączając stany dynamiczne lotnego startu i osłabiania pola.

1.2.2. Cele pracy

Celem rozprawy jest wykazanie możliwości stosowania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej w szerokim zakresie zmian warunków pracy silnika z wykorzystaniem opracowanych metod dostrajania parametrów obserwatora.

Realizacja przedstawionego powyżej celu głównego obejmuje następujące cele szczegółowe:

- opracowanie metody analizy właściwości dynamicznych rozszerzonego obserwatora prędkości na podstawie zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania wokół zadanego punktu pracy;
- opracowanie wskaźnika jakości wartości wzmacnień obserwatora opartego na rozkładzie biegunów oraz wykorzystanie algorytmów ewolucyjnych do doboru tych wartości;
- opracowanie metody korekcji wzmacnień obserwatora przy zmianach prędkości maszyny oraz określenie sposobu modyfikacji wzmacnień po zmianie kierunku obrotów wirnika z zachowaniem właściwości obserwatora;

- opracowanie metody załączania falownika przy niezerowej prędkości wirnika maszyny w układzie bezczujnikowym z zastosowaniem rozszerzonego obserwatora prędkości;
- przeprowadzenie badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych potwierdzających zależność między rozkładem biegunów a właściwościami dynamicznymi obserwatora;
- zbadanie wpływu zmian punktu pracy napędu na właściwości rozszerzonego obserwatora;
- zbadanie wpływu błędów identyfikacji parametrów modelu maszyny na działanie obserwatora;
- przeprowadzenie badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych wykazujących możliwość zastosowania rozszerzonego obserwatora prędkości w procedurze lotnego startu.

1.3. Układ pracy

W pierwszych czterech rozdziałach zawarto opis teoretyczny rozpatrywanych problemów oraz niezbędne zależności i wyprowadzenia. W rozdziale 2 przedstawiony został model matematyczny maszyny indukcyjnej. Przekształcone równania tego modelu tworzą rozszerzony model matematyczny maszyny, na podstawie którego zaproponowany został rozszerzony obserwator prędkości. Rozdział 3 obejmuje zagadnienia doboru wartości wzmocnień obserwatora. W zaproponowanej metodzie doboru wartości wzmocnień wykorzystano algorytmy ewolucyjne, natomiast funkcja celu oparta jest na rozkładzie wartości własnych macierzy opisującej dynamikę zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania. Opisano także algorytm korekcji wartości wzmocnień obserwatora wraz ze zmianami prędkości wirnika oraz zaproponowano metodę modyfikacji wzmocnień po zmianie kierunku pracy maszyny, tak by zachować symetrię właściwości rozszerzonego obserwatora prędkości. Problem załączania maszyny indukcyjnej przy niezerowej prędkości wirnika z użyciem rozszerzonego obserwatora prędkości opisany został w rozdziale 4. Oprócz samego algorytmu lotnego startu opracowana została metoda wstępnej identyfikacji kierunku oraz wartości prędkości kątowej wirnika.

Wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych zaprezentowane zostały w rozdziale 5. Podsumowane zostały wyniki uzyskane podczas doboru wartości wzmocnień przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych. Zależność między rozkładem biegunów

obserwatora a właściwościami dynamicznymi rzeczywistego układu wykazana została na podstawie badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Zbadano wpływ zmian prędkości wirnika, obciążenia maszyny, modułu wektora strumienia wirnika oraz poślizgu na jakość pracy obserwatora. Symulacyjnie określono także w jaki sposób oddziałują błędy parametrów modelu maszyny na właściwości obserwatora, a w szczególności na jakość odtwarzania w stanie ustalonym. W rozdziale tym zaprezentowano także wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych przeprowadzonych podczas lotnego startu maszyny.

Parametry wykorzystywanej podczas badań maszyny indukcyjnej oraz wartości wzmocnień uzyskane podczas doboru przy użyciu algorytmów ewolucyjnych przedstawione zostały w załącznikach gdzie umieszczono nieprzedstawione w pracy etapy wyprowadzeń zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora prędkości.

1.4. Spis oznaczeń

a_1, \dots, a_7	Współczynniki zależne od parametrów modelu maszyny zdefiniowane w podrozdziale 2.1.2
A	Macierz stanu zlinearyzowanego układu opisującego dynamikę błędów odtwarzania obserwatora
D	Zbiór potomków (algorytm genetyczny)
D_a, D_b	Potomkowie powstałe w wyniku krzyżowania osobników K_a, K_b (algorytm genetyczny)
F	Funkcja celu stanowiąca wyznacznik jakości właściwości dynamicznych obserwatora
F_1	Składowa funkcji celu związana z kryterium stabilności
F_2	Składowa funkcji celu związana z kryterium czasu ustalania
F_3	Składowa funkcji celu związana z kryterium występowania oscylacji w stanach przejściowych obserwatora
I_b	Prąd odniesienia wykorzystywany do przeliczania prądów na wielkości względne
I_N	Znamionowy prąd stojana maszyny
i_r	Wektor prądu wirnika maszyny, wyrażonego w wartościach względnych

i_s	Wektor prądu stojana maszyny, wyrażonego w wartościach względnych
\hat{i}_s	Wektor odtwarzanego prądu stojana maszyny, wyrażonego w wartościach względnych
\tilde{i}_s	Wektor błędu odtwarzania prądu stojana
\bar{i}_s	Wartość błędu odtwarzania prądu stojana w punkcie pracy obserwatora
i_s	Moduł wektora prądu stojana, wyrażony w wartościach względnych
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	Składowe wektora prądu stojana maszyny w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana, wyrażone w wartościach względnych
i_{sd}, i_{sq}	Składowe wektora prądu stojana maszyny w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika, wyrażone w wartościach względnych
J	Moment bezwładności wirnika oraz części wirujących maszyny, wyrażony w wartościach względnych
k_{11}, \dots, k_{34}	Wzmocnienia obserwatora
K_a, K_b	Osobniki ze zbioru rodziców podlegające krzyżowaniu (algorytm genetyczny)
$k_{\psi/u}$	Stosunek ustalonej wartości składowej strumienia stojana ψ_{sy} do składowej napięcia stojana u_{sx} przy skokowym wymuszeniu składowej u_{sx} stosowany w algorytmie wstępnej identyfikacji prędkości wirnika
L_b	Indukcyjność odniesienia wykorzystywana do przeliczania indukcyjności na wielkości względne
L_m	Indukcyjność magnesująca maszyny, wyrażona w wartościach względnych
L_r	Indukcyjność wirnika rozumiana jako suma indukcyjności magnesującej oraz indukcyjności rozproszenia wirnika, wyrażona w wartościach względnych
L_s	Indukcyjność stojana rozumiana jako suma indukcyjności magnesującej oraz indukcyjności rozproszenia stojana, wyrażona w wartościach względnych
m_b	Moment odniesienia wykorzystywany do przeliczania momentów na wielkości względne
m_o	Moment obciążenia wału, wyrażony w wartościach względnych
p	Rozdział 3 – liczba biegunów obserwatora Pozostałe rozdziały – liczba par biegunów maszyny
P	Populacja w bieżącym pokoleniu (algorytm genetyczny)

P_k	Prawdopodobieństwo krzyżowania (algorytm genetyczny)
P_m	Prawdopodobieństwo mutacji (algorytm genetyczny)
\mathbf{R}	Zbiór rodziców (algorytm genetyczny)
R_b	Rezystancja odniesienia wykorzystywana do przeliczania rezystancji na wielkości względne
R_k	Liczba kandydatów na rodziców podczas selekcji populacji (algorytm genetyczny)
R_r	Rezystancja wirnika maszyny, wyrażona w wartościach względnych
R_s	Rezystancja stojana maszyny, wyrażona w wartościach względnych
t	Rozdział 3.5 – numer pokolenia (algorytm genetyczny) Pozostałe rozdziały – czas rzeczywisty (wyrażony w sekundach)
T	Rozdział 3.5 – Liczba pokoleń, po której algorytm ewolucyjny zostaje zakończony Rozdział 5 – stała czasowa związana biegunem dominującym obserwatora
t_b	Czas odniesienia wykorzystywany do przeliczania czasu na wielkości względne
T_e	Moment elektromagnetyczny maszyny, wyrażony w wartościach względnych
U_b	Napięcie odniesienia wykorzystywane do przeliczania napięć na wielkości względne
U_{Nf}	Znamionowe napięcie fazowe maszyny
\mathbf{u}_s	Wektor napięcia stojana, wyrażonego w wartościach względnych
u_s	Moduł wektora napięcia stojana, wyrażony w wartościach względnych
\tilde{u}_s	Początkowa wartość modułu wektora napięcia stojana podczas procedury lotnego startu, wyrażona w wartościach względnych
\mathbf{x}	Wektor zmiennych układu równań opisującego dynamikę błędów odtwarzania
$\bar{\mathbf{x}}$	Wartości wektora \mathbf{x} w punkcie pracy obserwatora
$\Delta\mathbf{x}$	Wektor odchylenia wektora \mathbf{x} od punktu pracy
ζ	Wprowadzony w rozszerzonym modelu matematycznym maszyny nowy wektor, stanowiący iloczyn prędkości kątowej wirnika oraz wektora strumienia wirnika
$\hat{\zeta}$	Odtwarzany wektor zmiennej ζ

$\tilde{\zeta}$	Wektor błędu odtwarzania zmiennej ζ
$\bar{\zeta}$	Wartość odtwarzanego wektora ζ w punkcie pracy obserwatora
$\Delta\hat{\zeta}$	Odchylenie odtwarzanego wektora zmiennej ζ od punktu pracy
$\zeta_\alpha, \zeta_\beta$	Składowe wektora ζ w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana
ζ_d, ζ_q	Składowe wektora ζ w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika
$\Delta\hat{\zeta}_d, \Delta\hat{\zeta}_q$	Składowe wektora odchyżeń odtwarzanej zmiennej ζ od punktu pracy wyrażone w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika
θ	Kąt utworzony przez oś rzeczywistych oraz prostą poprowadzoną przez biegun i środek płaszczyzny zespolonej
$\lambda_1, \dots, \lambda_6$	Bieguny obserwatora, rozumiane jako wartości własne macierzy \mathbf{A}
σ	Odległość bieguna dominującego obserwatora od osi urojonych
τ	Czas, wyrażony w wartościach względnych
ψ_b	Strumień odniesienia wykorzystywany do przeliczania strumieni na wielkości względne
ψ_r	Wektor strumienia wirnika maszyny, wyrażonego w wartościach względnych
ψ_r	Moduł wektora strumienia wirnika maszyny, wyrażony w wartościach względnych
$\hat{\psi}_r$	Wektor odtwarzanego strumienia wirnika maszyny, wyrażonego w wartościach względnych
$\tilde{\psi}_r$	Wektor błędu odtwarzania strumienia wirnika
$\bar{\psi}_r$	Wartość błędu odtwarzania strumienia wirnika w punkcie pracy obserwatora
ψ_r	Moduł wektora strumienia wirnika, wyrażony w wartościach względnych
$\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$	Składowe wektora strumienia wirnika w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana, wyrażone w wartościach względnych
ψ_{rd}, ψ_{rq}	Składowe wektora strumienia wirnika w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika, wyrażone w wartościach względnych
ψ_m	Znamionowy moduł wektora strumienia wirnika, wyrażona w wartościach względnych

ψ_s	Wektor strumienia stojana maszyny, wyrażonego w wartościach względnych
ω_0	Znamionowa pulsacja napięcia zasilającego maszynę
ω_b	Pulsacja odniesienia wykorzystywana do przeliczania pulsacji na wielkości względne
ω_r	Prędkość kątowna wirnika maszyny, wyrażona w wartościach względnych
$\hat{\omega}_r$	Odtwarzana prędkość kątowna wirnika maszyny, wyrażona w wartościach względnych
$\tilde{\omega}_r$	Wstępnie zidentyfikowana prędkość wirnika maszyny podczas procedury lotnego startu, wyrażona w wartościach względnych
$\tilde{\omega}_{r\max}$	Maksymalny błąd wstępnie oszacowanej prędkości kątowej wirnika podczas procedury lotnego startu
ω_s	Pulsacja napięcia stojana, wyrażona w wartościach względnych
$\tilde{\omega}_s$	Początkowa pulsacja napięcia stojana podczas procedury lotnego startu, wyrażona w wartościach względnych
ω_ψ	Prędkość wirowania wektora strumienia wirnika, wyrażona w wartościach względnych

2. MODEL MATEMATYCZNY ROZSZERZONEGO OBSERWATORA PRĘDKOŚCI

2.1. Model matematyczny maszyny indukcyjnej

Właściwości obserwatora w dużym stopniu zależne są od przyjętego modelu matematycznego obiektu. Wykorzystanie możliwie dokładnego modelu znajduje zastosowanie przede wszystkim w badaniach symulacyjnych. Uwzględnienie kolejnych zjawisk fizycznych w modelu matematycznym obiektu prowadzi zwykle do zwiększenia liczby zmiennych stanu, co skutkuje zwiększeniem stopnia złożoności obserwatora, a w szczególności wprowadzeniem dodatkowych wzmoceń obserwatora. Przy projektowaniu obserwatora przyjmuje się zatem najprostszy model zachowujący podstawowe zasady działania obiektu.

Wykorzystywany w pracy model maszyny indukcyjnej otrzymany został przy przyjęciu następujących założeń mających na celu wyeliminowanie mniej istotnych zjawisk fizycznych zachodzących w rzeczywistym obiekcie [8], [52]:

- pomijane są straty energii w obwodach magnetycznych,
- uzwojenia fazowe, obwody magnetyczne oraz geometria maszyny są symetryczne,
- rozkład uzwojeń na obwodzie stajana i wirnika jest ciągły,
- rozkład pola magnetycznego w szczelnie powietrznej jest sinusoidalny,
- rezystancja oraz reaktancja uzwojeń nie zmienia się wraz ze zmianami temperatury,
- pomijane są pojemności między zwojami,
- pomijane jest nasycenie magnetyczne ferromagnetyków,
- deformacja pola magnetycznego nie występuje na brzegach obwodu magnetycznego.

2.1.1. Wielkości względne

Zmienne określające stan maszyny oraz parametry modelu przedstawione są w niniejszej pracy w jednostkach względnych. Przyjęcie takiej reprezentacji zmiennych ułatwia analizę wyników badań, a także umożliwia bezproblemowe przeniesienie oprogramowania napędu na inne stanowisko. W pewnym przedziale mocy parametry

maszyn wyrażone w jednostkach względnych zmieniają się w niewielkim zakresie, zatem przy zmianie napędu modyfikacji ulegają głównie wartości odniesienia [3], [8]. Mniejszym priorytetem jest wówczas korekcja parametrów maszyny występujących w równaniach obserwatora prędkości podczas doboru wzmocnień, czy też, w przypadku bardziej zaawansowanych układów sterowania (na przykład sterowanie multiskalarne), korekcja parametrów maszyny występujących w algorytmie sterowania. Bez zmian można pozostawić zatem wartości wzmocnień obserwatora oraz nastawy regulatorów.

Wartości rzeczywiste W_R przeliczane są na wartości wyrażone w jednostkach względnych W według zależności:

$$W = \frac{W_R}{W_b} \quad (2.1)$$

gdzie W_b to wartość odniesienia dla danej wielkości.

Wartości odniesienia dla poszczególnych wielkości obliczane są na podstawie następujących zależności [8]:

- napięcie:

$$U_b = \sqrt{3}U_{Nf} \quad (2.2)$$

- prąd:

$$I_b = \sqrt{3}I_N \quad (2.3)$$

- rezystancja:

$$R_b = \frac{U_b}{I_b} \quad (2.4)$$

- indukcyjność:

$$L_b = \frac{U_b}{I_b \omega_0} \quad (2.5)$$

- moment:

$$m_b = \frac{U_b I_b P}{\omega_0} \quad (2.6)$$

- moment bezwładności:

$$J_b = \frac{U_b I_b P^2}{\omega_0^3} \quad (2.7)$$

- strumień:

$$\psi_b = \frac{U_b}{\omega_0}, \quad (2.8)$$

- prędkość kąтова:

$$\omega_b = \frac{\omega_0}{p}, \quad (2.9)$$

- czas:

$$t_b = \omega_0^{-1}, \quad (2.10)$$

gdzie: U_{Nf} i I_N są znamionowym napięciem fazowym oraz prądem maszyny, ω_0 jest znamionową pulsacją napięcia zasilającego maszynę oraz p jest liczbą par biegunów maszyny.

2.1.2. Równania modelu matematycznego maszyny

Przy uwzględnieniu założeń sformułowanych na początku rozdziału wektorowe równania modelu matematycznego maszyny indukcyjnej opisujące stan równowagi napięciowej uzwojeń stojana oraz wirnika przyjmują następującą postać [53]:

$$\frac{d\psi_s}{d\tau} + R_s \mathbf{i}_s = \mathbf{u}_s, \quad (2.11)$$

$$\frac{d\psi_r}{d\tau} - j\omega_r \psi_r + R_r \mathbf{i}_r = \mathbf{0}, \quad (2.12)$$

natomiast sprzężenia magnetyczne stojana oraz wirnika opisane są następującymi zależnościami:

$$\psi_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r, \quad (2.13)$$

$$\psi_r = L_r \mathbf{i}_r + L_m \mathbf{i}_s, \quad (2.14)$$

gdzie: ψ_s , ψ_r – wektory strumienia stojana i wirnika, \mathbf{i}_s , \mathbf{i}_r – wektory prądu stojana oraz wirnika, \mathbf{u}_s – wektor napięcia stojana, ω_r – prędkość kąтова wirnika, τ – czas względny, R_s , R_r – rezystancja stojana oraz wirnika, L_s – indukcyjność stojana, L_r – indukcyjność wirnika, L_m – indukcyjność wzajemna.

Przyjmując dwie wektorowe zmienne stanu powyższy układ równań zapisać można za pomocą dwóch wektorowych równań różniczkowych. Wektor strumienia wirnika jest istotną wielkością wykorzystywaną w układzie sterowania, która jest odtwarzana w obserwatorze wraz z prędkością kątową. Prąd stojana jest natomiast wielkością bezpośrednio

mierzoną, stanowiącą podstawę do obliczeń błędów odtwarzania. Jako zmienne stanu przyjęto zatem wektor strumienia wirnika oraz wektor prądu stojana. W razie potrzeby pozostałe wielkości, czyli wektor strumienia stojana oraz prądu wirnika, obliczyć można za pomocą równań algebraicznych zależnych od przyjętych zmiennych stanu.

Uwzględniając równania mechaniczne model matematyczny maszyny indukcyjnej dla wektorów strumienia wirnika oraz prądu stojana przyjętych jako zmienne stanu opisany jest następującym układem równań:

$$\frac{d\mathbf{i}_s}{d\tau} = a_1\mathbf{i}_s + a_2\boldsymbol{\psi}_r + ja_3\omega_r\boldsymbol{\psi}_r + a_4\mathbf{u}_s, \quad (2.15)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{d\tau} = a_5\mathbf{i}_s + a_6\boldsymbol{\psi}_r + j\omega_r\boldsymbol{\psi}_r, \quad (2.16)$$

$$\frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{1}{J}(T_e - m_o), \quad (2.17)$$

$$T_e = a_7(\psi_{r\alpha}i_{s\beta} - \psi_{r\beta}i_{s\alpha}), \quad (2.18)$$

gdzie: $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – składowe wektorów strumienia wirnika oraz prądu stojana w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana, T_e – moment elektromagnetyczny, m_o – moment obciążenia, J – moment bezwładności wirnika, a_1, \dots, a_7 – współczynniki zależne od parametrów maszyny zdefiniowane następująco:

$$a_1 = -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{w L_r}, a_2 = \frac{R_r L_m}{w L_r}, a_3 = -\frac{L_m}{w}, a_4 = \frac{L_r}{w}, a_5 = \frac{R_r L_m}{L_r}, a_6 = -\frac{R_r}{L_r},$$

$$a_7 = \frac{L_m}{L_r}, w = L_s L_r - L_m^2$$

2.1.3. Rozszerzony model maszyny indukcyjnej

Rozpatrywany w niniejszej pracy obserwator prędkości maszyny indukcyjnej oparty jest na rozszerzonym modelu maszyny indukcyjnej, do którego wprowadzono dodatkowy wektor $\boldsymbol{\zeta}$, zdefiniowany następująco [28]:

$$\boldsymbol{\zeta} = \omega_r \boldsymbol{\psi}_r. \quad (2.19)$$

Podstawiając wyrażenie z równania (2.19) do równań modelu maszyny indukcyjnej (2.15) oraz (2.16) otrzymuje się następujące zależności:

$$\frac{d\mathbf{i}_s}{d\tau} = a_1\mathbf{i}_s + a_2\boldsymbol{\psi}_r + ja_3\boldsymbol{\zeta} + a_4\mathbf{u}_s, \quad (2.20)$$

$$\frac{d\psi_r}{d\tau} = a_5 \mathbf{i}_s + a_6 \psi_r + j\zeta. \quad (2.21)$$

Dynamikę nowej zmiennej ζ uzyskać można różniczkując równanie (2.19):

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \frac{d\omega_r}{d\tau} \psi_r + \omega_r \frac{d\psi_r}{d\tau}. \quad (2.22)$$

Podstawiając do powyższego równania zależność (2.16), a następnie uwzględniając równanie (2.19) otrzymuje się [39]:

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \frac{d\omega_r}{d\tau} \psi_r + a_5 \omega_r \mathbf{i}_s + a_6 \zeta + j\omega_r \zeta. \quad (2.23)$$

Równania (2.20), (2.21), (2.23) wraz z równaniami mechanicznymi (2.17) oraz (2.18) stanowią rozszerzony model matematyczny maszyny indukcyjnej.

Rozpisując wektorową zależność (2.19) na składowe otrzymuje się:

$$\zeta_\alpha = \omega_r \psi_{r\alpha}, \quad (2.24)$$

$$\zeta_\beta = \omega_r \psi_{r\beta}. \quad (2.25)$$

Dodając powyższe równania stronami oraz przekształcając, otrzymuje się zależność opisującą prędkość kątową wirnika maszyny:

$$\omega_r = \frac{\zeta_\alpha + \zeta_\beta}{\psi_{r\alpha} + \psi_{r\beta}}. \quad (2.26)$$

W mianowniku powyższego wyrażenia występuje suma zmiennych o przebiegach sinusoidalnych, która okresowo przyjmuje wartość zerową. W celu uniknięcia dzielenia przez zero podczas obliczania prędkości wirnika przyjmuje się inną formę tego wyrażenia. Mnożąc obustronnie zależność (2.24) przez $\psi_{r\alpha}$ oraz (2.25) przez $\psi_{r\beta}$, otrzymuje się wyrażenie, w którego mianowniku występuję kwadrat modułu strumienia wirnika [40]:

$$\omega_r = \frac{\psi_{r\alpha} \zeta_\alpha + \psi_{r\beta} \zeta_\beta}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} = \frac{\psi_{r\alpha} \zeta_\alpha + \psi_{r\beta} \zeta_\beta}{\psi_r^2}. \quad (2.27)$$

Możliwość wyrażenia prędkości kątowej wirnika za pomocą algebraicznego równania zawierającego zmienne stanu modelu maszyny jest istotną cechą rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej. Stanowi ona podstawę do obliczenia odtwarzanej prędkości kątowej wirnika przy wykorzystaniu odtwarzanych zmiennych stanu z pominięciem równań mechanicznych modelu.

2.2. Rozszerzony obserwator prędkości maszyny indukcyjnej

Obserwator stanu oparty na rozszerzonym modelu matematycznym maszyny indukcyjnej zaproponowany w [40] opisany jest następującymi równaniami:

$$\frac{d\hat{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = a_1\hat{\mathbf{i}}_s + a_2\hat{\psi}_r + ja_3\hat{\zeta} + a_4\mathbf{u}_s + k_{11}\tilde{\zeta} + jk_{12}\tilde{\zeta} + k_{13}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{14}\tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (2.28)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{d\tau} = a_5\hat{\mathbf{i}}_s + a_6\hat{\psi}_r + j\hat{\zeta} + k_{21}\tilde{\zeta} + jk_{22}\tilde{\zeta} + k_{23}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{24}\tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (2.29)$$

$$\frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = a_5\hat{\omega}_r\hat{\mathbf{i}}_s + a_6\hat{\zeta} + j\hat{\omega}_r\hat{\zeta} + k_{31}\tilde{\zeta} + jk_{32}\tilde{\zeta} + k_{33}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{34}\tilde{\mathbf{i}}_s. \quad (2.30)$$

gdzie $\hat{\cdot}$ oznacza wielkości odtwarzane, k_{11}, \dots, k_{34} są wzmocnieniami obserwatora, natomiast $\tilde{\mathbf{i}}_s, \tilde{\zeta}$ są wektorami błędów odtwarzania.

Odtwarzaną prędkość kątową, występującą w równaniach obserwatora, obliczyć można na podstawie zależności:

$$\hat{\omega}_r = \frac{\hat{\psi}_{r\alpha}\hat{\zeta}_\alpha + \hat{\psi}_{r\beta}\hat{\zeta}_\beta}{\hat{\psi}_r^2}. \quad (2.31)$$

Możliwe jest wyrażenie prędkości kątowej wirnika za pomocą zmiennych stanu rozszerzonego modelu. Nie ma natomiast takiej możliwości w przypadku pochodnej tej wielkości. Występująca w równaniu (2.23) rozszerzonego modelu pochodna prędkości kątowej wirnika obliczona może zostać jedynie na podstawie równania mechanicznego, zawierającego niemierzony moment obciążenia, co wyklucza możliwość zastosowania tego równania w obserwatorze. W stanie ustalonym pracy maszyny prędkość wirnika jest stała, zatem człon zawierający pochodną prędkości jest równy zero. W równaniu obserwatora (2.30) pominięto zatem ten wyraz, natomiast ewentualne błędy zmiennej ζ wynikające z omawianego uproszczenia redukowane są poprzez sprzężenia od błędów odtwarzania.

W klasycznych obserwatorach Luenbergera błąd odtwarzania definiowany jest jako różnica między wartością odtwarzaną a wartością rzeczywistą mierzonej zmiennej stanu. Błąd odtwarzania prądu stojana opisany jest zatem następującym równaniem:

$$\tilde{\mathbf{i}}_s = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s. \quad (2.32)$$

W przypadku występowania błędu odtwarzania prędkości wirnika zwykle pojawia się błąd odtwarzanej zmiennej $\hat{\zeta}$. Przy zastosowaniu obserwatorów prędkości przyjmuje się, że jedyną wielkością dostępną pomiarowo jest prąd stojana, zatem nie ma możliwości określenia błędu odtwarzania $\tilde{\zeta}$ na podstawie wartości wielkości mierzonych. Z definicji

(2.19), w stanie ustalonym obserwatora, odtwarzana zmienna $\hat{\zeta}$ powinna równać się iloczynowi odtwarzanej prędkości kątowej wirnika oraz odtwarzanego strumienia wirnika. W przypadku gdy występują błędy obserwatora, powyższa zależność może być niespełniona. Zdefiniowano zatem kolejną wielkość, która występuje w równaniach obserwatora jako błąd odtwarzania, określona następującym równaniem:

$$\tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \hat{\psi}_r. \quad (2.33)$$

Ostatecznie równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisane są trzema równaniami różniczkowymi (2.28) – (2.30) oraz zależnościami definiującymi odtwarzaną prędkość wirnika (2.31) oraz błędy odtwarzania (2.32), (2.33).

3. DOBÓR WZMOCNIEŃ OBSERWATORA

3.1. Równania dynamiki błędów odtwarzania obserwatora

Równania obserwatora oparte są na rozszerzonym modelu maszyny indukcyjnej, natomiast właściwości dynamiczne obserwatora modyfikuje się poprzez zmianę wartości wzmocnień. Korekcji jakości odtwarzania dokonać można zatem poprzez odpowiedni dobór wzmocnień obserwatora. W równaniach rozszerzonego obserwatora prędkości występuje dwanaście wzmocnień, co czyni kłopotliwym zastosowanie metody prób i błędów jako sposobu ich określenia. Metody optymalizacyjne wiążą się natomiast z koniecznością wielokrotnego wywoływania funkcji celu, odzwierciedlającej jakość odtwarzania. Jednym ze sposobów oceny jakości obserwatora jest analiza przebiegów błędów odtwarzania. Wyznaczenie przebiegów wiąże się z koniecznością przeprowadzania złożonych obliczeniowo i czasochłonnych symulacji. Alternatywną metodą oceny stabilności oraz właściwości dynamicznych jest analiza położenia biegunów układu.

Błąd odtwarzania zmiennej stanu \tilde{x} zdefiniowany jest jako różnica wartości odtwarzanej \hat{x} i rzeczywistej x :

$$\tilde{x} = \hat{x} - x, \quad (3.1)$$

natomiast różniczkując obustronnie powyższe równanie uzyskuje się wyrażenie na pochodną błędu estymowanej zmiennej:

$$\frac{d\tilde{x}}{d\tau} = \frac{d\hat{x}}{d\tau} - \frac{dx}{d\tau}. \quad (3.2)$$

Równania opisujące dynamikę błędu odtwarzania prądu stojana oraz strumienia wirnika uzyskuje się odejmując równania modelu maszyny od równań obserwatora. W przypadku zmiennej ζ , błąd odtwarzania zdefiniowany jest zależnością (2.33). Różniczkując to wyrażenie otrzymuje się:

$$\frac{d\tilde{\zeta}}{d\tau} = \frac{d(\hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \hat{\psi}_r)}{d\tau} = \frac{d\hat{\zeta}}{dt} - \frac{d\hat{\omega}_r}{dt} \hat{\psi}_r - \hat{\omega}_r \frac{d\hat{\psi}_r}{dt}. \quad (3.3)$$

W [40] zaproponowano opis dynamiki błędów odtwarzania obserwatora za pomocą układu równań, w którym pochodne błędów prądu stojana oraz strumienia wirnika obliczane są z zależności (3.2) natomiast pochodna błędu odtwarzania zmiennej ζ uzyskana jest z zależności (3.3). Podstawiając do równania (3.3) za pochodne odtwarzanego strumienia

wirnika oraz zmiennej ζ równania obserwatora (2.29) oraz (2.30), otrzymuje się następujący układ równań:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = a_1\tilde{\mathbf{i}}_s + a_2\tilde{\psi}_r + ja_3(\tilde{\zeta} + \hat{\omega}_r\tilde{\psi}_r + \tilde{\omega}_r\psi_r) + k_{11}\tilde{\zeta} + jk_{12}\tilde{\zeta} + k_{13}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{14}\tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (3.4)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_r}{d\tau} = a_5\tilde{\mathbf{i}}_s + a_6\tilde{\psi}_r + j(\tilde{\zeta} + \hat{\omega}_r\tilde{\psi}_r + \tilde{\omega}_r\psi_r) + k_{21}\tilde{\zeta} + jk_{22}\tilde{\zeta} + k_{23}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{24}\tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (3.5)$$

$$\frac{d\tilde{\zeta}_r}{d\tau} = a_6\tilde{\zeta} - k_{21}\hat{\omega}_r\tilde{\zeta} - jk_{22}\hat{\omega}_r\tilde{\zeta} - k_{23}\hat{\omega}_r\tilde{\mathbf{i}}_s - jk_{24}\hat{\omega}_r\tilde{\mathbf{i}}_s + k_{31}\tilde{\zeta} + jk_{32}\tilde{\zeta} + k_{33}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{34}\tilde{\mathbf{i}}_s. \quad (3.6)$$

W powyższym układzie równań, oprócz stałych parametrów maszyny i wzmocnień obserwatora oraz zmiennych zależnych od punktu pracy maszyny, występuje odtwarzana prędkość kątowna wirnika. Próba wyrażenia tej wielkości za pomocą błędów odtwarzania, których dynamika opisana została omawianymi równaniami, prowadzi do tożsamości. Nie ma zatem możliwości określenia dynamiki błędów obserwatora na podstawie powyższego układu równań.

Określenie odtwarzanej prędkości kątowej wirnika możliwe jest przy znajomości odtwarzanej zmiennej $\hat{\zeta}$. W niniejszej pracy w równaniach dynamiki błędu estymacji nie wykorzystano zatem zależności opisującej dynamikę błędu $\tilde{\zeta}$. Pozostawiono przekształcone równanie obserwatora opisujące zmiany wektora $\hat{\zeta}$. Uzyskano w ten sposób następujący układ równań dynamiki błędów estymacji i dynamiki zmiennej $\hat{\zeta}$:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = a_1\tilde{\mathbf{i}}_s + a_2\tilde{\psi}_r + ja_3(\hat{\zeta} - \omega_r\psi_r) + k_{11}\tilde{\zeta} + jk_{12}\tilde{\zeta} + k_{13}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{14}\tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (3.7)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_r}{d\tau} = a_5\tilde{\mathbf{i}}_s + a_6\tilde{\psi}_r + j(\hat{\zeta} - \omega_r\psi_r) + k_{21}\tilde{\zeta} + jk_{22}\tilde{\zeta} + k_{23}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{24}\tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (3.8)$$

$$\frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = a_5\hat{\omega}_r(\mathbf{i}_s + \tilde{\mathbf{i}}_s) + a_6\hat{\zeta} + j\hat{\omega}_r\hat{\zeta} + k_{31}\tilde{\zeta} + jk_{32}\tilde{\zeta} + k_{33}\tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{34}\tilde{\mathbf{i}}_s. \quad (3.9)$$

gdzie odtwarzana prędkość kątowna wirnika, błąd odtwarzania prędkości oraz błąd $\tilde{\zeta}$ wyrażone są następującymi zależnościami:

$$\hat{\omega}_r = \frac{(\psi_{r\alpha} + \tilde{\psi}_{r\alpha})\hat{\zeta}_\alpha + (\psi_{r\beta} + \tilde{\psi}_{r\beta})\hat{\zeta}_\beta}{(\psi_{r\alpha} + \tilde{\psi}_{r\alpha})^2 + (\psi_{r\beta} + \tilde{\psi}_{r\beta})^2}, \quad (3.10)$$

$$\tilde{\omega}_r = \hat{\omega}_r - \omega_r, \quad (3.11)$$

$$\tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r\psi_r - \hat{\omega}_r\tilde{\psi}_r. \quad (3.12)$$

W powyższych równaniach oprócz współczynników zależnych od parametrów maszyny oraz wzmocnień obserwatora występują również rzeczywiste wartości prędkości kątowej wirnika, strumienia wirnika oraz prądu stojana. Oznacza to, że na właściwości obserwatora wpływ mają nie tylko właściwości dynamiczne maszyny oraz wzmocnienia obserwatora, ale także punkt pracy napędu.

3.2. Linearyzacja równań dynamiki błędów odtwarzania

Maszyna indukcyjna jest obiektem nieliniowym, zatem obserwator oraz dynamika błędu odtwarzania także opisane są nieliniowymi równaniami różniczkowymi. Uniemożliwia to bezpośrednie wyznaczenie biegunów układu.

Rozwijając nieliniową funkcję $f(x)$ w szereg Taylora otrzymuje się wyrażenie:

$$f(x) = f(x_0) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} (x-x_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2f(x)}{dx^2} \right|_{x=x_0} (x-x_0)^2 + \frac{1}{6} \left. \frac{d^3f(x)}{dx^3} \right|_{x=x_0} (x-x_0)^3 + \dots \quad (3.13)$$

Dla wartości y bliskich punktu pracy x_0 , różnica $(x-x_0)$ przyjmuje wartości bliskie zera. Występujące w szeregu Taylora wyrazy, zawierające kolejne potęgi $(x-x_0)^2$, $(x-x_0)^3$, ... przyjmują wówczas pomijalnie małe wartości. Uwzględniając ten fakt, zlinearyzowane równanie nieliniowego układu dynamicznego bez wejść wokół punktu pracy będącego punktem równowagi jest postaci [54]:

$$\Delta \dot{x}(t) \approx \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{\substack{x=\bar{x} \\ u=\bar{u}}} \Delta x(t), \quad (3.14)$$

gdzie $\Delta x(t) = x(t) - \bar{x}$, natomiast \bar{x} jest punktem pracy zmiennej $x(t)$.

Wektor zmiennych układu równań opisującego dynamikę błędów odtwarzania zdefiniowany jest następująco:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}}_s & \tilde{\boldsymbol{\psi}}_r & \hat{\boldsymbol{\zeta}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{s\alpha} & \tilde{i}_{s\beta} & \tilde{\psi}_{r\alpha} & \tilde{\psi}_{r\beta} & \hat{\zeta}_\alpha & \hat{\zeta}_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (3.15)$$

W stanie ustalonym obserwatora oczekuje się zerowych błędów odtwarzania prądu stojana oraz strumienia wirnika, natomiast odtwarzana zmienna $\hat{\boldsymbol{\zeta}}$ przyjmuje wartość równą iloczynowi rzeczywistej prędkości kątowej wirnika oraz strumienia wirnika. Zdefiniowano zatem następujący punkt pracy:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{i}}_s & \bar{\boldsymbol{\psi}}_r & \bar{\boldsymbol{\zeta}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \omega_r \boldsymbol{\psi}_r \end{bmatrix}^T, \quad (3.16)$$

gdzie $\bar{\cdot}$ oznacza wartość zmiennej w punkcie pracy.

W stanie ustalonym w punkcie pracy określonym powyżej wszystkie błędy odtwarzania, w tym błąd odtwarzania prędkości kątowej wirnika oraz błąd $\tilde{\boldsymbol{\zeta}}$, przyjmują zerowe wartości.

Wektor odchylenia wartości zmiennych opisujących błędy odtwarzania od punktu pracy zdefiniowany jest następująco:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}}_s - \bar{\mathbf{i}}_s & \tilde{\boldsymbol{\psi}}_r - \bar{\boldsymbol{\psi}}_r & \hat{\boldsymbol{\zeta}} - \bar{\boldsymbol{\zeta}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}}_s & \tilde{\boldsymbol{\psi}}_r & \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}} \end{bmatrix}^T, \quad (3.17)$$

gdzie $\Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}} = \hat{\boldsymbol{\zeta}} - \omega_r \boldsymbol{\psi}_r$.

Linearyzując układ równań (3.7) – (3.9) opisujący dynamikę błędów odtwarzania wokół punktu pracy (3.16) otrzymuje się następujące zależności opisujące składowe wektorów odchylenia od punktu pracy wyrażone w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{i}}_{s\alpha}}{dt} = (a_1 + k_{13})\tilde{\mathbf{i}}_{s\alpha} - k_{14}\tilde{\mathbf{i}}_{s\beta} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} & + \left(a_2 - k_{11}\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} - k_{12}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\alpha} + \left(k_{11}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{12}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \right) \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\beta}, \\ & + \left(k_{11} \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} + k_{12} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}}_\alpha - \left(a_3 + k_{11} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{12} \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \right) \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}}_\beta \end{aligned}$$

$$\frac{d\tilde{\mathbf{i}}_{s\beta}}{dt} = k_{14}\tilde{\mathbf{i}}_{s\alpha} + (a_1 + k_{13})\tilde{\mathbf{i}}_{s\beta} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} & + \left(k_{11}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - k_{12}\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} \right) \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\alpha} + \left(a_2 - k_{11}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} + k_{12}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\beta}, \\ & + \left(a_3 - k_{11} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{12} \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} \right) \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}}_\alpha + \left(k_{11} \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} - k_{12} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}}_\beta \end{aligned}$$

$$\frac{d\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\alpha}}{dt} = (a_5 + k_{23})\tilde{\mathbf{i}}_{s\alpha} - k_{24}\tilde{\mathbf{i}}_{s\beta} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} & + \left(a_6 - k_{21}\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} - k_{22}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\alpha} + \left(k_{21}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{22}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \right) \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{r\beta}, \\ & + \left(k_{21} \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} + k_{22} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}}_\alpha - \left(1 + k_{21} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{22} \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \right) \Delta \hat{\boldsymbol{\zeta}}_\beta \end{aligned}$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_{r\beta}}{dt} = k_{24}\tilde{i}_{s\alpha} + (a_5 + k_{23})\tilde{i}_{s\beta} \quad (3.21)$$

$$+ \left(k_{21}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - k_{22}\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} \right) \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left(a_6 - k_{21}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} + k_{22}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \tilde{\psi}_{r\beta},$$

$$+ \left(1 - k_{21} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{22} \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} \right) \Delta\hat{\zeta}_\alpha + \left(k_{21} \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} - k_{22} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \Delta\hat{\zeta}_\beta$$

$$\frac{d\Delta\hat{\zeta}_\alpha}{dt} = (k_{33} + a_5\omega_r)\tilde{i}_{s\alpha} - k_{34}\tilde{i}_{s\beta} \quad (3.22)$$

$$+ \left(-a_5\omega_r \frac{i_{s\alpha}\psi_{r\alpha}}{\psi_r^2} - k_{31}\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} - k_{32}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + \omega_r^2 \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \tilde{\psi}_{r\alpha}$$

$$+ \left(-a_5\omega_r \frac{i_{s\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{31}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{32}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} + \omega_r^2 \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} \right) \tilde{\psi}_{r\beta},$$

$$+ \left(a_6 + a_5 \frac{i_{s\alpha}\psi_{r\alpha}}{\psi_r^2} + k_{31} \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} + k_{32} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - \omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \Delta\hat{\zeta}_\alpha$$

$$+ \left(a_5 \frac{i_{s\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - k_{31} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - k_{32} \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} - \omega_r \left(1 + \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} \right) \right) \Delta\hat{\zeta}_\beta$$

$$\frac{d\Delta\hat{\zeta}_\beta}{dt} = k_{34}\tilde{i}_{s\alpha} + (k_{33} + a_5\omega_r)\tilde{i}_{s\beta} \quad (3.23)$$

$$+ \left(-a_5\omega_r \frac{i_{s\beta}\psi_{r\alpha}}{\psi_r^2} + k_{31}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - k_{32}\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} - \omega_r^2 \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \right) \tilde{\psi}_{r\alpha}$$

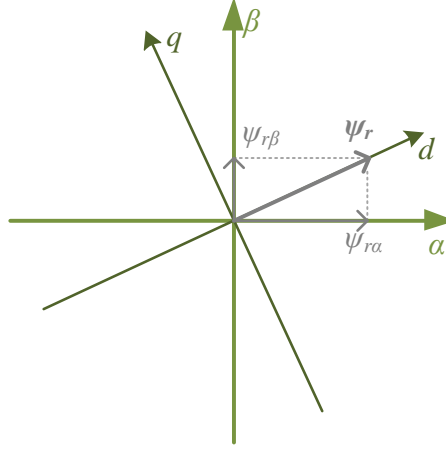
$$+ \left(-a_5\omega_r \frac{i_{s\beta}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - k_{31}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} + k_{32}\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} - \omega_r^2 \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \tilde{\psi}_{r\beta}.$$

$$+ \left(a_5 \frac{i_{s\beta}\psi_{r\alpha}}{\psi_r^2} - k_{31} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{32} \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_r^2} + \omega_r \left(1 + \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \right) \right) \Delta\hat{\zeta}_\alpha$$

$$+ \left(a_6 + a_5 \frac{i_{s\beta}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + k_{31} \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} - k_{32} \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} + \omega_r \frac{\psi_{r\alpha}\psi_{r\beta}}{\psi_r^2} \right) \Delta\hat{\zeta}_\beta$$

W układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana wektory zmiennych modelu maszyny wirują w stanie ustalonym z częstotliwością wirowania wektora napięcia stojana. Oznacza to, że składowe wektorów strumienia wirnika oraz prądu stojana występujące w równaniach (3.18) – (3.23) zmieniają się sinusoidalnie, zatem współczynniki macierzy stanu takiego układu zmieniałyby się z częstotliwością zbliżoną do częstotliwości sygnału wejściowego, co uniemożliwia analizę rozkładu biegunów.

W układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika, jak na rysunku 3.1, w stanie ustalonym wektory zmiennych maszyny pozostają nieruchome, zatem ich składowe są stałe.



Rys. 3.1. Układ współrzędnych dq zorientowany względem wektora strumienia wirnika

Przyjmując powyższy układ współrzędnych otrzymuje się następujące wartości składowych wektora strumienia wirnika:

$$\psi_{rd} = \psi_r = |\psi_r|, \quad (3.24)$$

$$\psi_{rq} = 0. \quad (3.25)$$

Dokonując transformacji równań (3.18) – (3.23) do układu współrzędnych zorientowanego względem wektora strumienia wirnika uzyskuje się następujący układ równań:

$$\frac{d\tilde{i}_{sd}}{dt} = (a_1 + k_{13})\tilde{i}_{sd} + (\omega_\psi - k_{14})\tilde{i}_{sq} + a_2\tilde{\psi}_{rd} + k_{12}\omega_r\tilde{\psi}_{rq} - (a_3 + k_{12})\Delta\hat{\zeta}_q, \quad (3.26)$$

$$\frac{d\tilde{i}_{sq}}{dt} = (k_{14} - \omega_\psi)\tilde{i}_{sd} + (a_1 + k_{13})\tilde{i}_{sq} + (a_2 - k_{11}\omega_r)\tilde{\psi}_{rq} + a_3\Delta\hat{\zeta}_d + k_{11}\Delta\hat{\zeta}_q, \quad (3.27)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_{rd}}{dt} = (a_5 + k_{23})\tilde{i}_{sd} - k_{24}\tilde{i}_{sq} + a_6\tilde{\psi}_{rd} + (\omega_\psi + k_{22}\omega_r)\tilde{\psi}_{rq} - (1 + k_{22})\Delta\hat{\zeta}_q, \quad (3.28)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_{rq}}{dt} = k_{24}\tilde{i}_{sd} + (a_5 + k_{23})\tilde{i}_{sq} - \omega_\psi\tilde{\psi}_{rd} + (a_6 - k_{21}\omega_r)\tilde{\psi}_{rq} + \Delta\hat{\zeta}_d + k_{21}\Delta\hat{\zeta}_q, \quad (3.29)$$

$$\frac{d\Delta\hat{\zeta}_d}{dt} = (k_{33} + a_5\omega_r)\tilde{i}_{sd} - k_{34}\tilde{i}_{sq} - \omega_r a_5 \frac{i_{sd}}{\psi_{rd}}\tilde{\psi}_{rd} + k_{32}\omega_r\tilde{\psi}_{rq} \quad (3.30)$$

$$+ \left(a_6 + a_5 \frac{i_{sd}}{\psi_{rd}} \right) \Delta\hat{\zeta}_d - (k_{32} + \omega_r - \omega_\psi) \Delta\hat{\zeta}_q,$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\hat{\zeta}_q}{dt} = & k_{34}\tilde{i}_{sd} + (k_{33} + a_5\omega_r)\tilde{i}_{sq} - \left(\omega_r a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r^2 \right) \tilde{\psi}_{rd} - k_{31}\omega_r \tilde{\psi}_{rq} \\ & + \left(a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + 2\omega_r - \omega_\psi \right) \Delta\hat{\zeta}_d + (a_6 + k_{31})\Delta\hat{\zeta}_q \end{aligned} \quad (3.31)$$

gdzie ω_ψ to prędkość wirowania wektora strumienia wirnika opisana następującą zależnością:

$$\omega_\psi = \omega_r + a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}}. \quad (3.32)$$

3.3. Bieguny obserwatora

Zlinearyzowany układ równań opisujący dynamikę błędu odtwarzania (3.26) - (3.31) wokół punktu pracy (3.16) jest postaci:

$$\frac{d\Delta\mathbf{x}}{d\tau} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}, \quad (3.33)$$

gdzie \mathbf{A} jest macierzą stanu układu. Z uwzględnieniem zależności (3.32) macierz \mathbf{A} przyjmuje postać:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 + k_{13} & -k_{14} + a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r & a_2 & k_{12}\omega_r & 0 & -a_3 - k_{12} \\ k_{14} - a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} - \omega_r & a_1 + k_{13} & 0 & a_2 - k_{11}\omega_r & a_3 & k_{11} \\ a_5 + k_{23} & -k_{24} & a_6 & a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r + k_{22}\omega_r & 0 & -1 - k_{22} \\ k_{24} & a_5 + k_{23} & -\left(a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} + \omega_r \right) & a_6 - k_{21}\omega_r & 1 & k_{21} \\ k_{33} + a_5\omega_r & -k_{34} & -\omega_r a_5 \frac{i_{sd}}{\psi_{rd}} & k_{32}\omega_r & a_6 + a_5 \frac{i_{sd}}{\psi_{rd}} & -k_{32} + a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} \\ k_{34} & k_{33} + a_5\omega_r & -\omega_r a_5 \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} - \omega_r^2 & -k_{31}\omega_r & \omega_r & a_6 + k_{31} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Wartości własne $\lambda_1, \dots, \lambda_6$ macierzy \mathbf{A} , stanowiące rozwiązanie równania:

$$|\mathbf{A} - \mathbf{I}\lambda| = 0, \quad (3.35)$$

nazywane będą w dalszej części pracy biegunami obserwatora.

Wartości elementów macierzy \mathbf{A} wyrażone są za pomocą współczynników zależnych od parametrów maszyny, wzmacnień obserwatora, prędkości kątowej wirnika i składowych wektorów strumienia wirnika oraz prądu stojana. Przyjmując układ współrzędnych

zorientowany względem wektora strumienia wirnika, otrzymuje się składową ψ_{rd} równą modułowi tego wektora. W stanie ustalonym składowe wektora prądu stojana wyrazić można za pomocą modułu wektora strumienia wirnika oraz momentu obciążenia:

$$i_{sd} = \frac{|\boldsymbol{\psi}_r|}{L_m} = \frac{\psi_{rd}}{L_m}, \quad (3.36)$$

$$i_{sq} = \frac{m_o}{a_7 |\boldsymbol{\psi}_r|} = \frac{m_o}{a_7 \psi_{rd}}. \quad (3.37)$$

Uwzględniając powyższe zależności, na właściwości dynamiczne zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania obserwatora wpływ mają:

- parametry maszyny,
- wzmocnienia obserwatora,
- punkt pracy maszyny, rozumiany jako:
 - prędkość kątową wirnika,
 - moduł wektora strumienia wirnika,
 - moment obciążenia.

3.4. Funkcja celu

3.4.1. Ogólna postać funkcji celu

O powodzeniu doboru wartości wzmocnień obserwatora przy wykorzystaniu metod optymalizacyjnych decyduje przede wszystkim zdefiniowanie właściwej funkcji celu, będącej wskaźnikiem jakości przyjętych wartości wzmocnień. Podstawowe właściwości obserwatora przy danych wzmocnieniach, jak stabilność i czas ustalania, określić można na podstawie przebiegów odtwarzanych zmiennych stanu. Wielokrotne wywoływanie funkcji celu, co jest cechą metod optymalizacyjnych, wiąże się z koniecznością wielokrotnego przeprowadzania złożonych obliczeniowo symulacji. W celu ograniczenia wymaganych zasobów obliczeniowych zdefiniowano wskaźnik jakości oparty jedynie na położeniu biegunów.

Dobierając wartości wzmocnień obserwatora należy zapewnić stabilność oraz odpowiednie właściwości dynamiczne odtwarzania zmiennych stanu. Zaproponowano zatem funkcję celu będącą sumą wskaźników jakości związanych z różnymi kryteriami doboru wzmocnień. Rozkład biegunów obserwatora zależny jest od wartości wzmocnień \mathbf{K}

oraz punktu pracy maszyny. Wartość minimalizowanej funkcji celu F oblicza się zatem korzystając z następującej zależności:

$$F = \sum_{j=1}^{n_k} F_j(\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{K}, \omega_r, \psi_r, m_o)), \quad (3.38)$$

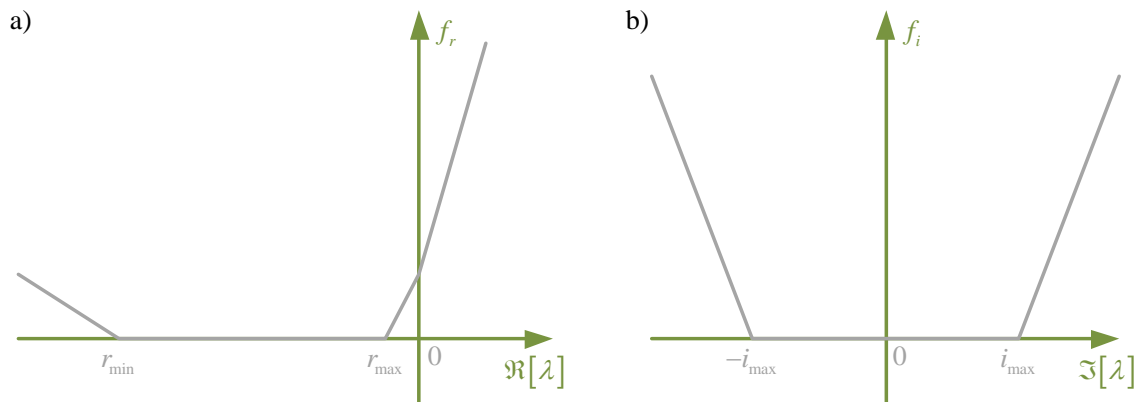
gdzie F_1, F_2, \dots są funkcjami stanowiącymi wskaźniki jakości poszczególnych kryteriów doboru wzmocnień, natomiast n_k jest liczbą kryteriów.

3.4.1. Kryterium stabilności

Podstawowym warunkiem, jaki musi spełniać dobierany zestaw wzmocnień, jest stabilność obserwatora. Zaproponowano następującą funkcję związaną z tym kryterium:

$$F_1(\boldsymbol{\lambda}) = \sum_{i=1}^p [f_r(\Re[\lambda_i]) + f_i(\Im[\lambda_i])], \quad (3.39)$$

gdzie f_r oraz f_i to funkcje zależne od części rzeczywistej oraz urojonej biegunów, zdefiniowane wykresami przedstawionymi na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Składowe funkcje kary związane ze stabilnością dla a) części rzeczywistych oraz b) części urojonych biegunów obserwatora

Wskaźnik jakości przyjmuje wartość zerową w przypadku gdy bieguny zajmują dozwolone położenie. Układ jest stabilny, jeśli wszystkie bieguny znajdują się po lewej stronie płaszczyzny zespolonej, czyli posiadają ujemną część rzeczywistą. Funkcja kary związana z kryterium stabilności przyjmuje zatem wartości rosnące wraz z częścią rzeczywistą biegunów leżących w prawej półpłaszczyźnie zespolonej. Maksymalną

dopuszczalną wartość części rzeczywistej, czyli wartość przy której funkcja f_r zaczyna szybko rosnąć, oznaczono jako r_{max} . Jest ona nieco mniejsza od zera, by zapewnić bezpieczne położenie biegunów z dala od granicy stabilności.

Obserwator, będący częścią programu mikrokontrolera, realizowany jest w układzie dyskretnym. Dla wiernego odwzorowania układu dyskretnego oraz uniknięcia ryzyka utraty stabilności przyjęto, że częstotliwość próbkowania powinna być co najmniej dwukrotnie większa od częstotliwości sygnałów wprowadzanych przez obserwator, a także okres próbkowania powinien być dwukrotnie mniejszy od stałych czasowych obserwatora. Maksymalna częstotliwość próbkowania ograniczona jest możliwościami przetwornika analogowo cyfrowego oraz mocą obliczeniową mikrokontrolera, zatem zdefiniowano minimalną wartość części rzeczywistej biegunów obserwatora r_{min} . Podobne ograniczenie dotyczy części urojonej biegunów, której wzrost zwiększa wprowadzaną częstotliwość odtwarzanych zmiennych stanu w stanach przejściowych.

Narastające wartości funkcji kary wraz z oddalaniem się od dozwolonych obszarów położenia biegunów mają na celu ukierunkowanie wyników uzyskanych w kolejnych iteracjach algorytmu doboru wzmocnień na dopuszczalny zakres rozkładu biegunów.

3.4.2. Kryteria właściwości dynamicznych

Właściwości dynamiczne układu ocenić można na podstawie położenia biegunów. Stała czasowa T_b opisująca dynamikę wprowadzaną przez dany biegun jest odwrotnie proporcjonalna do jego odległości od osi urojonej:

$$T_b = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{|\Re[\lambda]|}. \quad (3.40)$$

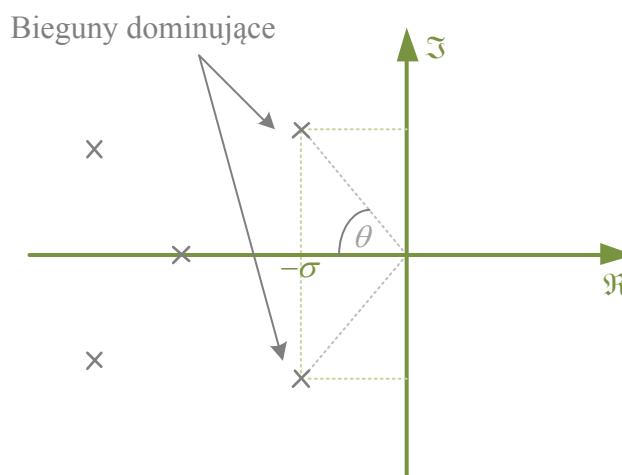
Stałe czasowe biegunów maleją wraz ze wzrostem odległości od osi urojonej, zatem stany przejściowe wprowadzane przez bieguny o dużej ujemnej wartości części rzeczywistej zanikają znacznie szybciej niż stany przejściowe związane z biegunami położonymi najbliżej osi urojonej. O właściwościach dynamicznych układu decydują zatem przede wszystkim bieguny położone najbardziej po prawej stronie płaszczyzny zespolonej. Biegun, bądź sprzężona para biegunów o największej części rzeczywistej, nazywane są biegunami dominującymi.

Oczekuje się, by stany przejściowe obserwatora trwały możliwie krótko, tak aby odtwarzane zmienne stanu nadążały za zmianami warunków pracy maszyny, takimi jak

prędkość wirnika czy moment obciążenia. Uzyskuje się to zapewniając jak najmniejszą wartość stałej czasowej biegunów dominujących, czyli lokując bieguny możliwie daleko od osi urojonej. Kryterium związane z czasem ustalania zdefiniowane jest zatem następującą funkcją:

$$F_2(\boldsymbol{\lambda}) = k_2 r = k_2 \max \{ \Re[\lambda_1], \Re[\lambda_2], \dots, \Re[\lambda_p] \}, \quad (3.41)$$

gdzie r jest częścią rzeczywistą bieguna dominującego, k_2 jest wzmocnieniem pełniącym funkcję współczynnika wagi rozpatrywanego kryterium, natomiast $\Re[\lambda]$ jest częścią rzeczywistą bieguna λ . Funkcja F_2 przyjmuje ujemne wartości i maleje wraz z oddalaniem się biegunów dominujących od osi urojonej. Kryterium stabilności zdefiniowane funkcją F_1 zapewnia wzrost wartości funkcji celu w przypadku gdy bieguny posiadają dodatnią część rzeczywistą, bądź ulokowane są zbyt daleko od osi urojonej.



Rys. 3.3. Bieguny dominujące na płaszczyźnie zespolonej

Układ, którego bieguny posiadają niezerowe części urojone wprowadzać może w stanach przejściowych oscylacje. Ich obecność w przebiegach odtwarzanych zmiennych stanu maszyny może negatywnie wpływać na działanie układu regulacji [55]. Kolejne kryterium ma zatem na celu zapewnienie odpowiednich właściwości dynamicznych obserwatora, tak by zminimalizować ryzyko występowania oscylacji. Oscylacje wprowadzane przez układ nie występują, gdy wszystkie bieguny leżą na osi rzeczywistej. Uzyskanie takiego rozkładu przy wykorzystaniu metod optymalizacyjnych jest jednak mało prawdopodobne. Przyjęto zatem graniczną wartość współczynnika tłumienia $\zeta_g = 0,707$, powyżej której oscylacje są na tyle silnie tłumione, że ich wpływ można pominąć.

Współczynnik tłumienia członu oscylacyjnego obliczyć można na podstawie położenia biegunów korzystając z zależności [56]:

$$\zeta_{damp} = \cos \theta = \cos \left(\arctan \left(\frac{|\Im[\lambda]|}{|\Re[\lambda]|} \right) \right), \quad (3.42)$$

gdzie θ jest kątem utworzonym przez oś rzeczywistych i prostą poprowadzoną przez biegun oraz środek płaszczyzny zespolonej, jak na rysunku 3.3.

Graniczną wartość współczynnika tłumienia uzyskuje się, gdy wartości części rzeczywistej oraz urojonej biegunu są sobie równe. Współczynnik tłumienia większy od ζ_g uzyskuje się zatem, gdy spełniony jest warunek:

$$\Re[\lambda] \geq \Im[\lambda]. \quad (3.43)$$

Funkcja związana z kryterium występowania oscylacji w stanach przejściowych jest sumą wskaźników jakości dla poszczególnych biegunów:

$$F_3(\lambda) = \sum_{i=1}^p \begin{cases} 0 & \text{gdy } |\Re[\lambda_i]| \geq |\Im[\lambda_i]| \\ k_3 \exp\left(-a \frac{r - \Re[\lambda_i]}{r}\right) & \text{gdy } |\Re[\lambda_i]| < |\Im[\lambda_i]| \end{cases} \quad (3.44)$$

gdzie p jest liczbą biegunów obserwatora, k_3 jest współczynnikiem wagowym kryterium związanego z występowaniem oscylacji, a określa jak szybko wartość funkcji maleje wraz ze wzrostem odległości rozpatrywanego biegunu od biegunów dominujących, natomiast r jest częścią rzeczywistą biegunów dominujących.

W przypadku gdy para biegunów dostatecznie tłumie wprowadzane przez nią oscylacje, funkcja F_3 przyjmuje wartość 0. W przypadku gdy tłumienie dla biegunów dominujących jest zbyt małe, czyli gdy ich część urojona jest większa od części rzeczywistej, składnik funkcji F_3 przyjmuje wartość k_3 . Wraz ze wzrostem odległości pozostałych biegunów od osi urojonej ich wpływ na stany nieustalone maleje ze względu na znacznie szybsze zanikanie stanów przejściowych związanych z tymi biegunami. Wartość funkcji F_3 dla biegunów innych niż dominujące maleje zatem eksponentalnie wraz z krotnością odległości biegunów dominujących od osi urojonej.

3.5. Algorytmy ewolucyjne

Problem doboru wartości wzmocnień obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej jest zagadnieniem stosunkowo skomplikowanym. Podstawowym celem optymalizacji jest

znalezienie najlepszego rozwiązania danego problemu. W niniejszej pracy poszukiwane jest minimum funkcji celu F (3.38). Wynikiem zastosowanego algorytmu optymalizacji jest rozwiązanie mające stanowić przybliżenie globalnego minimum funkcji F . Problem optymalizacji podczas doboru wartości wzmocnień badanego obserwatora jest zagadnieniem wielowymiarowym, w którym funkcja celu jest funkcją dwunastu parametrów o wielu minimach lokalnych. W takim przypadku wykorzystując metody deterministyczne podczas poszukiwania optymalnego rozwiązania uzyskanie satysfakcjonującego wyniku jest trudne oraz wymaga znacznych nakładów obliczeń.

Przy rozwiązywaniu problemów wielowymiarowych z funkcją celu o wielu minimach lokalnych często stosuje się metody niedeterministyczne, w których wprowadzono czynnik losowy. W niniejszej pracy do poszukiwania minimum zaproponowanej funkcji celu wykorzystano algorytm genetyczny przedstawiony na rysunku 3.4 [57].

Algorytm wykonywany jest dopóki nie zostanie osiągnięta z góry zadana liczba pokoleń T . Bieżący numer pokolenia oznaczony jest symbolem t . Populacja \mathbf{P} składa się z 500 osobników. W niniejszej pracy zastosowano kodowanie liczbami rzeczywistymi, zatem pojedynczym osobnikiem jest zestaw wzmocnień obserwatora \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = [k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{31}, k_{32}, k_{33}, k_{34}]. \quad (3.45)$$

Na początku każdego cyklu dokonywana jest ocena wszystkich osobników bieżącej populacji. Na podstawie uzyskanych wskaźników jakości zestawów wzmocnień obserwatora wybierane są najlepiej przystosowane osobniki. Wyselekcjonowane osobniki tworzą zbiór rodziców \mathbf{R} biorący udział w tworzeniu kolejnego pokolenia. W wyniku krzyżowania osobników ze zbioru \mathbf{R} oraz mutacji uzyskanych genów powstają potomkowie, z których utworzony zostanie zbiór stanowiący nowe pokolenie.

Zanim wykonana zostanie główna pętla algorytmu genetycznego, konieczne jest zdefiniowanie wartości wzmocnień osobników pierwszego pokolenia. Inicjalizacji populacji dokonuje się poprzez losowe przypisanie wartości kolejnych genów wszystkim osobnikom. W przypadku kodowania liczbami rzeczywistymi konieczne jest określenie przedziałów, z których generowane będą poszczególne wartości wzmocnień. W zaproponowanej funkcji celu uwzględniono dopuszczalny zakres położenia biegunów, nie zdefiniowano natomiast kryteriów ograniczających wartości wzmocnień. Większe wartości wzmocnień zapewniać mogą krótsze czasy ustalania. Potęgują natomiast negatywny wpływ błędów pomiarowych mierzonych wielkości [58]. Wartości wzmocnień obserwatora ograniczane są w algorytmie

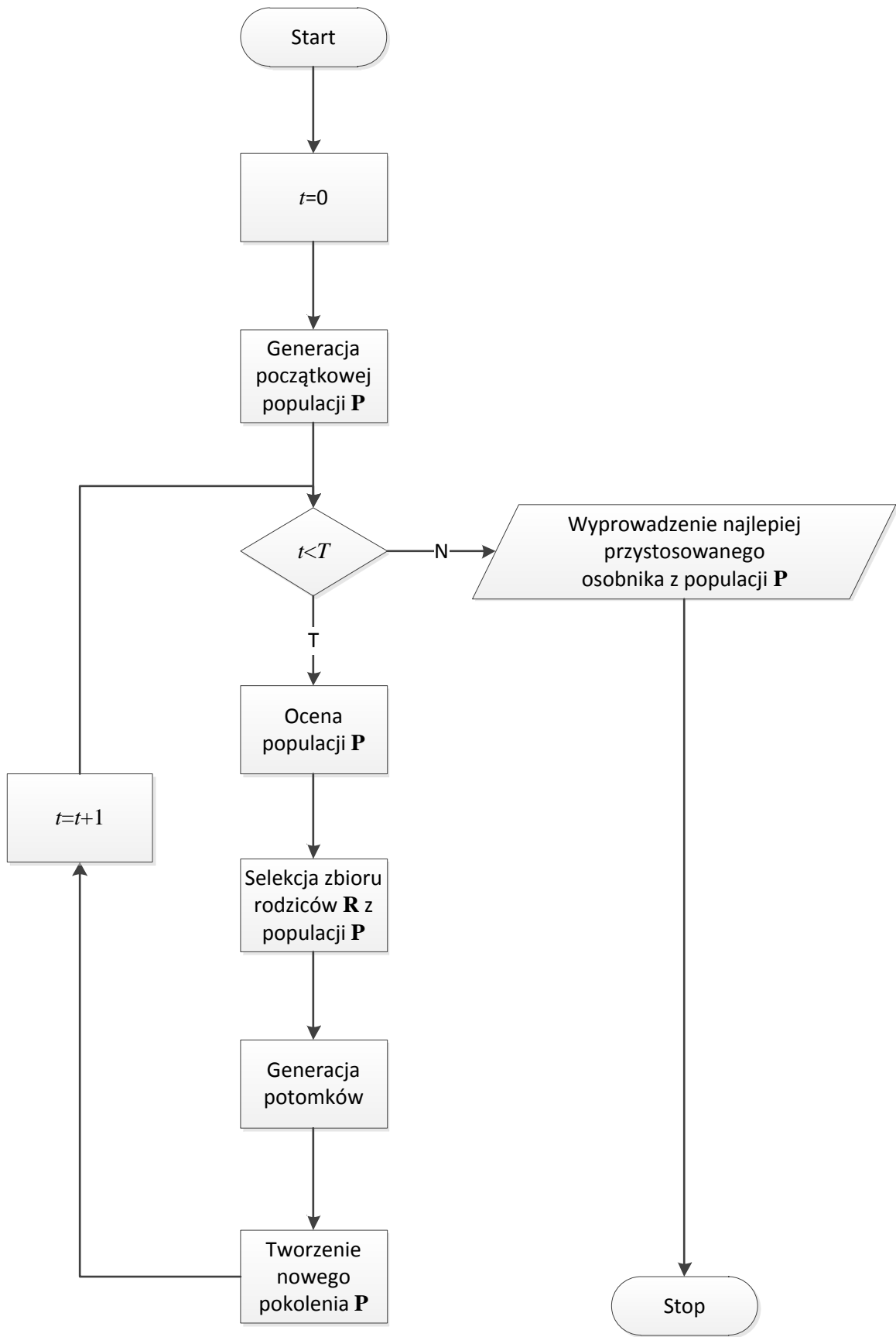
genetycznym poprzez określenie przedziałów dobieranych zmiennych. Dolne limity \mathbf{K}_L oraz górne \mathbf{K}_U definiowane są dla każdego ze wzmocnień oddzielnie:

$$\mathbf{K}_L = [k_{11L}, k_{12L}, k_{13L}, k_{14L}, k_{21L}, k_{22L}, k_{23L}, k_{24L}, k_{31L}, k_{32L}, k_{33L}, k_{34L}], \quad (3.46)$$

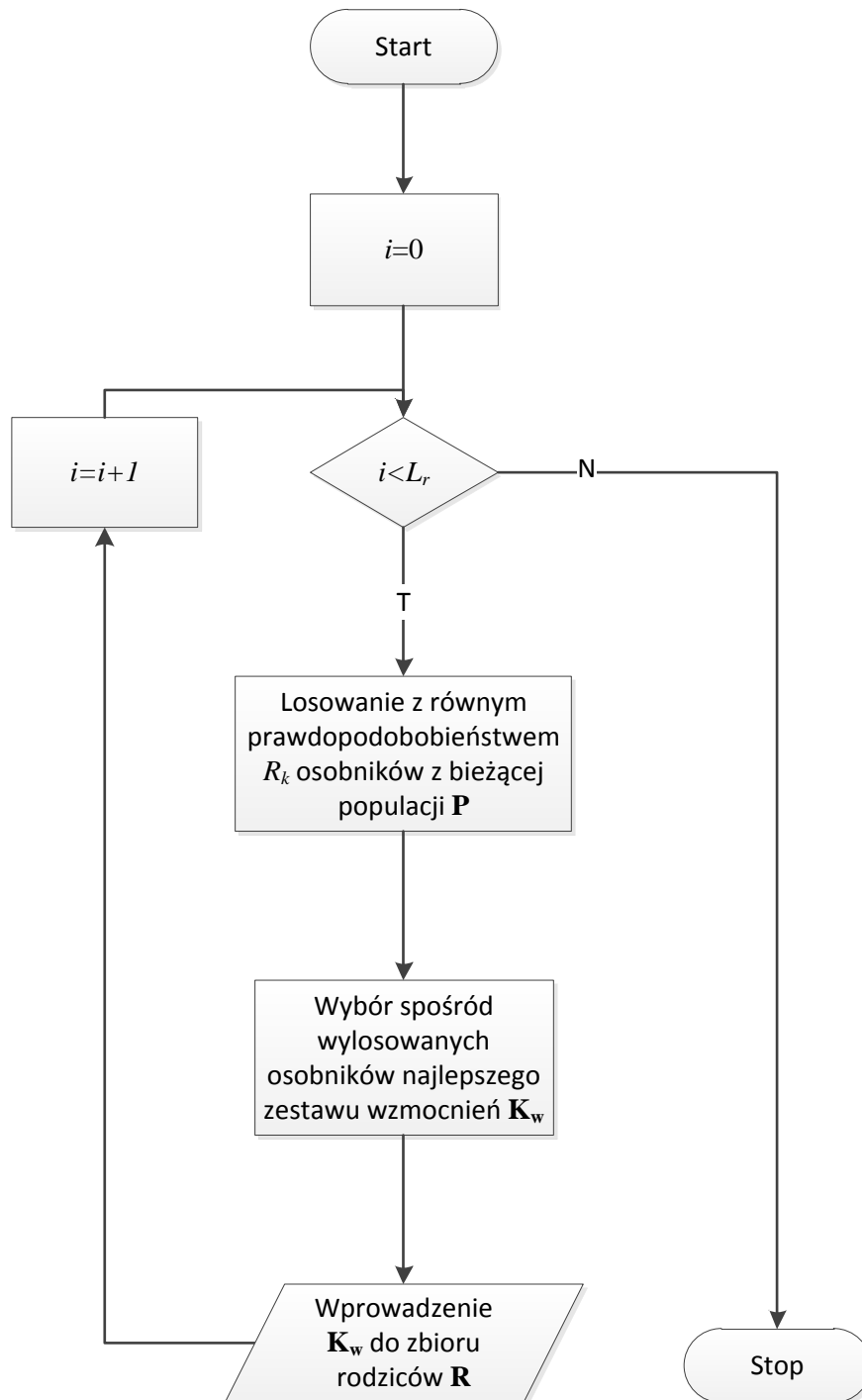
$$\mathbf{K}_U = [k_{11U}, k_{12U}, k_{13U}, k_{14U}, k_{21U}, k_{22U}, k_{23U}, k_{24U}, k_{31U}, k_{32U}, k_{33U}, k_{34U}]. \quad (3.47)$$

W niniejszej pracy przyjęto algorytm selekcji turniejowej rodziców, przedstawiony na rysunku 3.5 [57]. W każdym pokoleniu generowany jest zbiór rodziców \mathbf{R} o liczebności L_r osobników. Określając każdego z rodziców wybieranych jest losowo R_k osobników z bieżącej populacji \mathbf{P} . Następnie z otrzymanego zbioru wylosowanych kandydatów na rodziców wybierany jest zestaw wzmocnień o najlepszym wskaźniku jakości. Osobnik ten dodawany jest do zbioru rodziców \mathbf{R} .

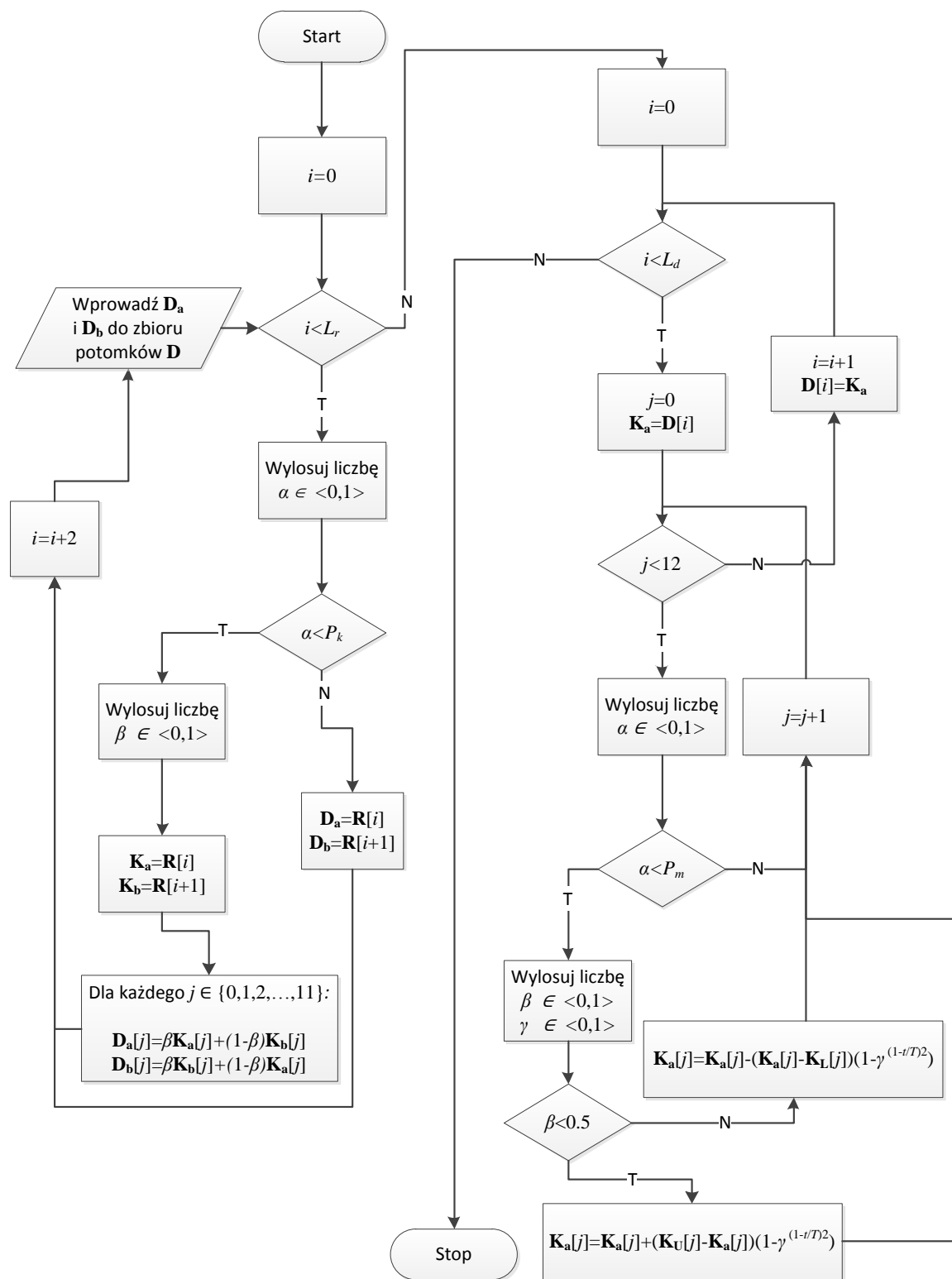
Na rysunku 3.6 przedstawiono algorytm generowania potomków [57]. Każda para rodziców podlega operacji krzyżowania lub bezpośrednio przechodzi do dalszego etapu. Prawdopodobieństwo krzyżowania określone jest współczynnikiem P_k . W niniejszej pracy zastosowano krzyżowanie arytmetyczne, w którym geny potomnych osobników D_a oraz D_b stanowią losową wartość pomiędzy wartościami wzmocnień rodziców K_a oraz K_b . Otrzymany zbiór potomków \mathbf{D} podlega operatorom mutacji. Każde ze wzmocnień osobników ze zbioru \mathbf{D} ulega mutacji z prawdopodobieństwem P_m . Zastosowano mutację nierównomierną, w której wpływ mutacji maleje wraz z kolejnymi pokoleniami. Na początku działania algorytmu, czyli dla numeru pokolenia t bliskiego zera, w wyniku mutacji wzmocnienie przyjmuje nową wartość wylosowaną z niemal całego dopuszczalnego przedziału możliwych wartości danego wzmocnienia. Wraz ze wzrostem wieku populacji w wyniku mutacji wzmocnień uzyskuje się wartości z przedziału zawężanego wokół wartości modyfikowanego genu. W ostatniej generacji mutacja nie ma żadnego wpływu na zmianę wartości wzmocnień.



Rys. 3.4. Schemat blokowy algorytmu ewolucyjnego



Rys. 3.5. Algorytm selekcji osobników biorących udział w tworzeniu nowego pokolenia



Rys. 3.6. Algorytm kreacji nowego pokolenia

3.6. Algorytmy korekcji wzmocnień

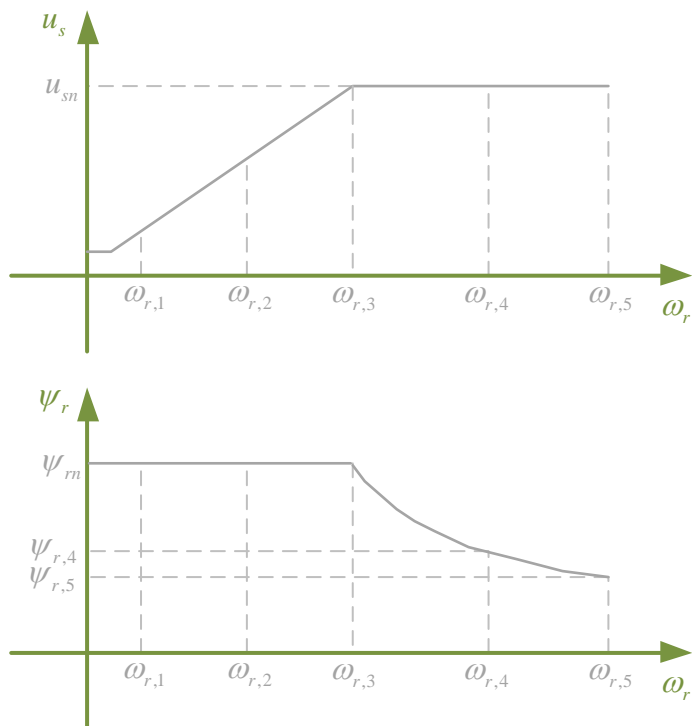
Z postaci macierzy stanu (3.34) opisującej dynamikę zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora prędkości wywnioskować można, że położenie biegunów obserwatora zależy od parametrów maszyny, wzmocnień obserwatora oraz warunków pracy układu napędowego, czyli prędkości kątowej wirnika, modułu wektora strumienia wirnika oraz momentu obciążenia. Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiany momentu obciążenia w całym zakresie dopuszczalnych wartości, zarówno przy pracy silnikowej jak i generatorowej, nie mają istotnego wpływu na właściwości dynamiczne rozszerzonego obserwatora. Wartość modułu wektora strumienia wirnika utrzymywana jest na stałym poziomie w zakresie prędkości znamionowych przez układ regulacji. Oznacza to, że na właściwości dynamiczne badanego obserwatora wpływ mają głównie zmiany prędkości wirnika.

Wraz ze wzrostem prędkości kątowej wirnika powyżej wartości znamionowej wartość modułu napięcia stojana pozostaje stała. Oznacza to, że nie jest zachowany stały stosunek modułu wektora napięcia stojana do prędkości kątowej wirowania tego wektora, co skutkuje hiperbolicznym spadkiem wartości modułu wektora strumienia wirnika wraz ze wzrostem prędkości. Przedział ten nazywany jest zakresem osłabiania pola.

Dobry zestaw wzmocnień przede wszystkim zapewniać musi stabilność, a także dobre właściwości dynamiczne obserwatora w całym zakresie dopuszczalnych warunków pracy maszyny. Korzystając z metod optymalizacyjnych uzyskać to można poprzez modyfikację funkcji celu, w taki sposób by była ona sumą wskaźników jakości F (3.38) dla kilku punktów pracy maszyny. Funkcję celu F_k uwzględniającą zmiany warunków działania układu napędowego zdefiniować można następująco:

$$F_k = \sum_{i=1}^{n_\omega} F(\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{K}, \omega_{r,i}, \psi_r(\omega_{r,i}))), \quad (3.48)$$

gdzie $\boldsymbol{\lambda}$ jest wektorem wartości własnych macierzy stanu \mathbf{A} (3.34), n_ω jest liczbą rozpatrywanych punktów pracy maszyny, \mathbf{K} jest ocenianym zestawem wzmocnień obserwatora, $\omega_{r,i}$ są wartościami prędkości kątowej wirnika w kolejnych punktach pracy maszyny, $\psi_r(\omega_{r,i})$ są wartościami modułu wektora strumienia wirnika dla danej prędkości wirnika. W prostych algorytmach sterowania, w których wymagany jest szeroki zakres zmian prędkości, zadany moduł wektora strumienia wirnika jest funkcją prędkości zgodnie z rysunkiem 3.7.



Rys. 3.7. Zależność modułu wektora napięcia stojana oraz strumienia wirnika w stanie ustalonym w funkcji prędkości wirnika

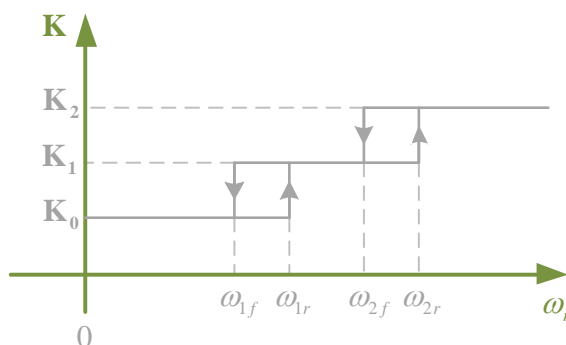
Z analizy położenia biegunów obserwatora w szerokim zakresie zmian prędkości wirnika przy stałych wartościach wzmacnień wywnioskować można, że prawdopodobne jest, iż dla pewnego przedziału prędkości uzyskuje się dobre właściwości dynamiczne obserwatora, natomiast poza tym zakresem układ traci stabilność. Z tego powodu przyjęcie jednego zestawu wzmacnień dla całego zakresu zmian prędkości znacznie komplikuje zagadnienie doboru parametrów obserwatora z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych. W wyniku zawężenia przedziału prędkości wirnika podczas doboru wzmacnień rośnie prawdopodobieństwo uzyskania zestawu wzmacnień zapewniającego akceptowalne właściwości obserwatora. Dokonując podziału całego zakresu dopuszczalnych prędkości na mniejsze przedziały możliwe jest zatem ułatwienie zagadnienia doboru wartości wzmacnień zapewniających dobrą jakość odtwarzania zmiennych stanu w szerokim zakresie zmian warunków pracy maszyny.

Funkcję celu F_p dla pojedynczego przedziału zdefiniowano jako sumę wskaźników jakości na krańcach rozpatrywanego przedziału:

$$F_p = F(\lambda(\mathbf{K}, \omega_{r,l}, \psi_r(\omega_{r,l}))) + F(\lambda(\mathbf{K}, \omega_{r,h}, \psi_r(\omega_{r,h}))), \quad (3.49)$$

gdzie $\omega_{r,l}$ oraz $\psi_r(\omega_{r,l})$ są prędkością kątową wirnika oraz modulem strumienia wirnika na początku przedziału, natomiast $\omega_{r,h}$ oraz $\psi_r(\omega_{r,h})$ są prędkością kątową wirnika oraz modulem strumienia wirnika na końcu rozpatrywanego przedziału prędkości.

W pracy zaproponowano metodę modyfikacji wzmacnień wraz ze zmianami warunków pracy maszyny, polegającą na przełączaniu aktywnych zestawów wzmacnień w zależności od aktualnej prędkości kątowej wirnika, tak jak na rysunku 3.8. Wartości wzmacnień pozostają wówczas stałe w granicach bieżącego przedziału prędkości. Modyfikacja wartości wzmacnień przy rosnącej prędkości następuje po przekroczeniu wartości ω_{ir} , natomiast w przypadku spowalniania prędkości kątowej wirowania wirnika po osiągnięciu prędkości ω_{if} . Wartości ω_{ir} oraz ω_{if} są to wartości bliskie prędkości granicznej ω_i , odpowiednio nieco od niej większa oraz mniejsza. Wprowadzenie takiej histerezy zapobiega wielokrotnemu przełączaniu zestawów wzmacnień wokół granicznych prędkości.



Rys. 3.8. Modyfikacja wzmacnień obserwatora wraz ze zmianami prędkości obrotów wirnika

3.7. Modyfikacja wzmacnień przy zmianie kierunku obrotów

3.7.1. Opis problemu

Maszyna indukcyjna posiada takie same właściwości dynamiczne bez względu na kierunek obrotów wirnika. W przypadku niektórych obserwatorów strumieni magnetycznych maszyny indukcyjnej, przyjmując pewną postać macierzy wzmacnień obserwatora, zachowana jest także symetria właściwości obserwatora po zmianie kierunku pracy wirnika [21], [35], [36], [41]. Prędkość kątowa wirnika jest wielkością, która zmienia się znacznie wolniej od pozostałych zmiennych maszyny, takich jak składowe wektorów prądów czy strumieni magnetycznych, natomiast w stanie ustalonym jest stała. Wielkość tą

często traktuje się zatem jako parametr modelu. Przyjąć można wówczas, że obserwator strumienia wirnika opisany w [35] jest układem liniowym. Symetrię właściwości obserwatora rozpatrywanego w [35] przy różnych kierunkach pracy maszyny wykazano poprzez analizę równania charakterystycznego obserwatora, w którym we współczynnikach tego wielomianu prędkość kątowna wirnika występuje zawsze w parzystych potęgach. Oznacza to brak wpływu znaku tej zmiennej na położenie biegunów obserwatora.

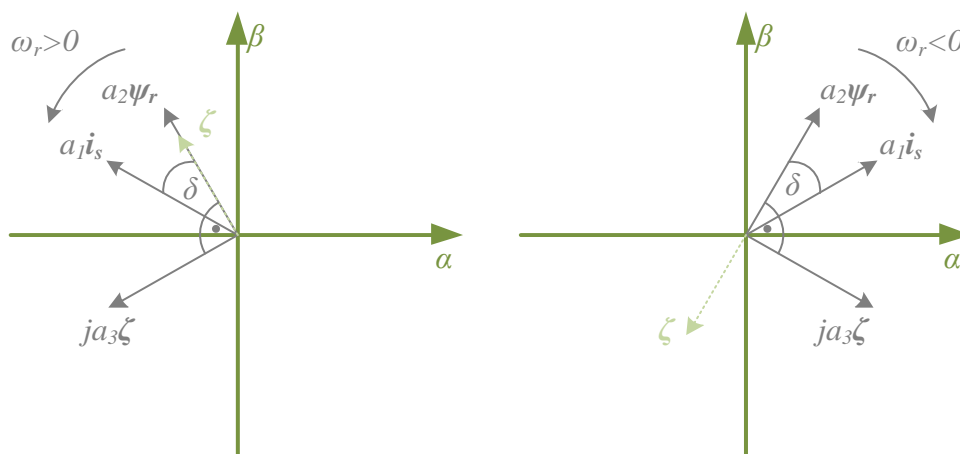
Ze względu na złożoność badanego w niniejszej pracy rozszerzonego obserwatora prędkości wyprowadzenie oraz analiza analitycznych zależności opisujących współczynniki wielomianu charakterystycznego macierzy (3.34) jest zagadnieniem niezwykle trudnym. Na podstawie uzyskanych wyników badań można wyciągnąć wniosek, że przy tych samych wartościach wzmocnień, a różnych kierunkach pracy maszyny, otrzymuje się zupełnie inny rozkład biegunów, a co za tym idzie inne właściwości obserwatora.

Zwykle przy stałych wartościach wzmocnień, po zmianie kierunku obrotów wirnika rozszerzony obserwator prędkości traci stabilność. Istnieje zatem konieczność modyfikacji wzmocnień, tak by zapewnić dobre właściwości dynamiczne dla obu kierunków. Możliwy jest dobór wartości wzmocnień oddzielnie dla dodatnich oraz ujemnych prędkości, jednak wiąże się to z dodatkowymi nakładami obliczeniowymi, a także nie gwarantuje takich samych właściwości obserwatora przy różnych kierunkach pracy maszyny. W niniejszej pracy wykorzystano symetrię właściwości modelu maszyny dla obu kierunków obrotów wirnika.

3.7.2. Symetria rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej

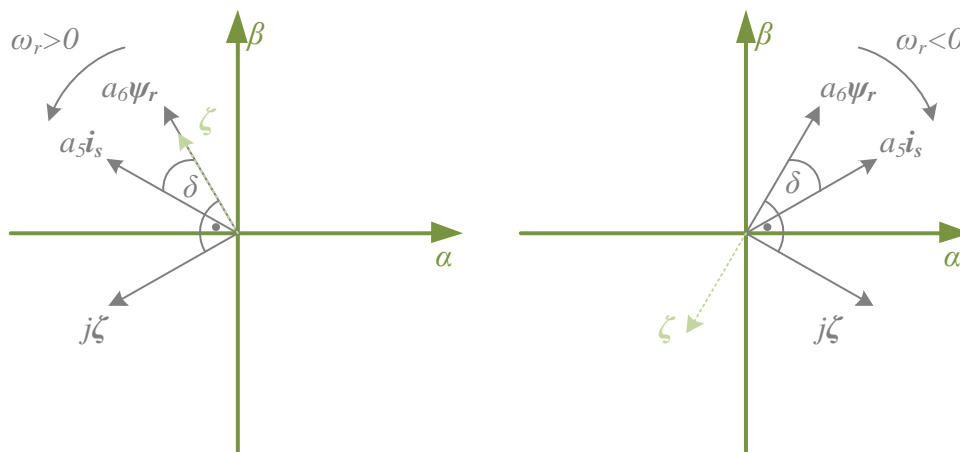
Na rysunku 3.9 przedstawiono wektory występujące po prawej stronie równania rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę prądu stojana (2.20). Na wykresie w pierwszej kolumnie rozpatrywany jest przypadek, w którym prędkość kątowna wirnika jest dodatnia. Wówczas wszystkie wektory wirują w kierunku dodatnim. W stanie pracy silnikowej maszyny wektor prądu stojana wyprzedza wektor strumienia wirnika o kąt δ zależny od obciążenia maszyny. Wektor ζ , będący iloczynem prędkości kątowej wirnika oraz wektora strumienia wirnika, dla dodatniej prędkości wirnika pokrywa się z wektorem ψ_r . Pomnożenie przez jednostkę urojoną j obraca wektor ζ o 90 stopni w kierunku dodatnim, zatem wektor $j\zeta$ wyprzedza wektor ψ_r o 90 stopni. W przypadku ujemnej prędkości wszystkie wektory wirują w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara. Tak jak w przypadku dodatniej prędkości, wektor prądu stojana wyprzedza wektor strumienia wirnika

o pewien kąt zależny od generowanego momentu. Wektor ζ jest tym razem obrócony o 180 stopni względem wektora ψ_r ze względu na ujemną prędkość kątową wirnika, natomiast iloczyn przez j obraca ten wektor o 90 stopni w kierunku dodatnim. Otrzymany wektor $j\zeta$ wyprzedza w kierunku obrotów wektor strumienia wirnika o 90 stopni. Mnożenie przez stałe a_1, \dots, a_6 wpływa jedynie na długości wektorów, natomiast nie modyfikuje ich kątów. Dla obydwu znaków prędkości uzyskuje się zatem taką samą kolejność wektorów w kierunku ich obrotów oraz takie same kąty między wektorami.

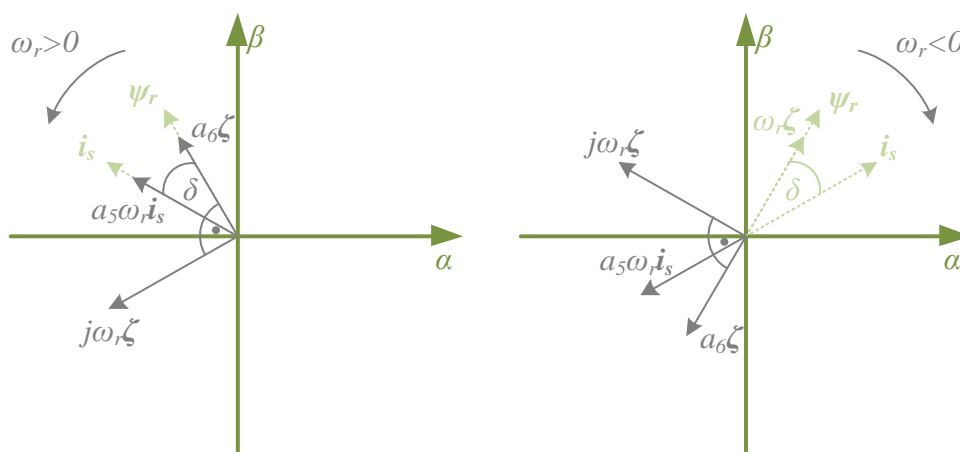


Rys. 3.9. Wektory zmiennych występujących po prawej stronie równania rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę prądu stojana

Postępując analogicznie, na rysunkach 3.10 oraz 3.11 przedstawiono wektory występujące w prawych stronach pozostałych równań rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej (2.21), (2.23). We wszystkich równaniach przy różnych znakach prędkości zachowana została kolejność wektorów w kierunku ich obrotów, a także kąty między nimi. Wyjaśnia to symetrię właściwości rozszerzonego modelu maszyny dla obydwu kierunków pracy silnika.



Rys. 3.10. Wektory zmiennych występujących po prawej stronie równania rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej opisujące dynamikę strumienia wirnika



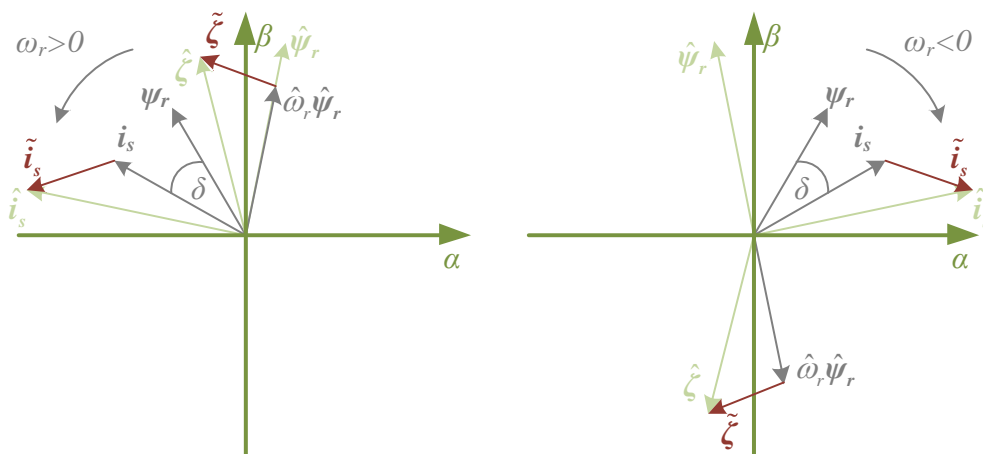
Rys. 3.11. Wektory zmiennych występujących po prawej stronie równania rozszerzonego modelu maszyny indukcyjnej opisujące dynamikę zmiennej ζ

3.7.3. Symetria rozszerzonego obserwatora prędkości

W przypadku równań obserwatora wektory odtwarzanych zmiennych maszyny obarczone są pewnymi błędami. Oznacza to, że wektory wielkości odtwarzanych oraz rzeczywistych nie zawsze pokrywają się, a kąt między odtwarzanym wektorem strumienia wirnika nie musi tworzyć kąta prostego z wektorem $j\hat{\zeta}$, tak jak jest to w rozszerzonym modelu maszyny.

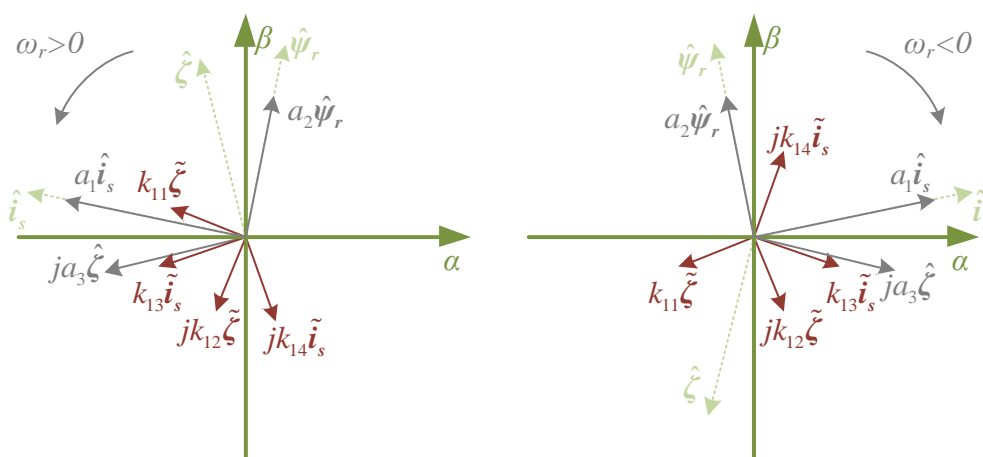
Błąd odtwarzania prądu stojana jest różnicą między wartością odtwarzaną a rzeczywistą tej wielkości, natomiast błąd zmiennej ζ opisano zależnością (2.33). Na rysunku

3.12 przedstawiono przykładowy rozkład wektorów zmiennych maszyny, ich wartości odtwarzanych oraz błędów estymacji. Wstępnie założono, że obserwator posiada takie same właściwości dla obu kierunków obrotów wirnika maszyny, zatem wartości kątów między wektorami oraz ich kolejność pozostają takie same po zmianie znaku prędkości.

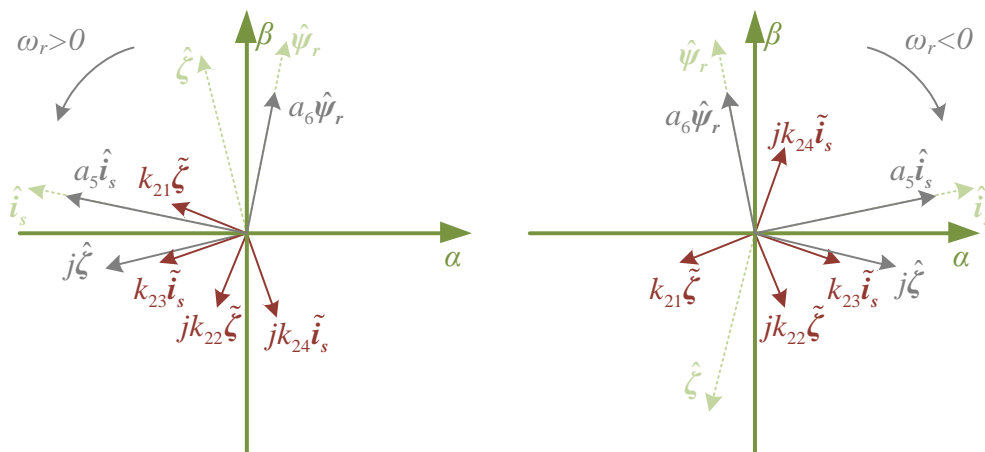


Rys. 3.12. Przykładowy rozkład wektorów błędów odtwarzania oraz wektorów rzeczywistych i odtwarzanych zmiennych maszyny przy założeniu symetrii obserwatora po zmianie kierunku obrotów

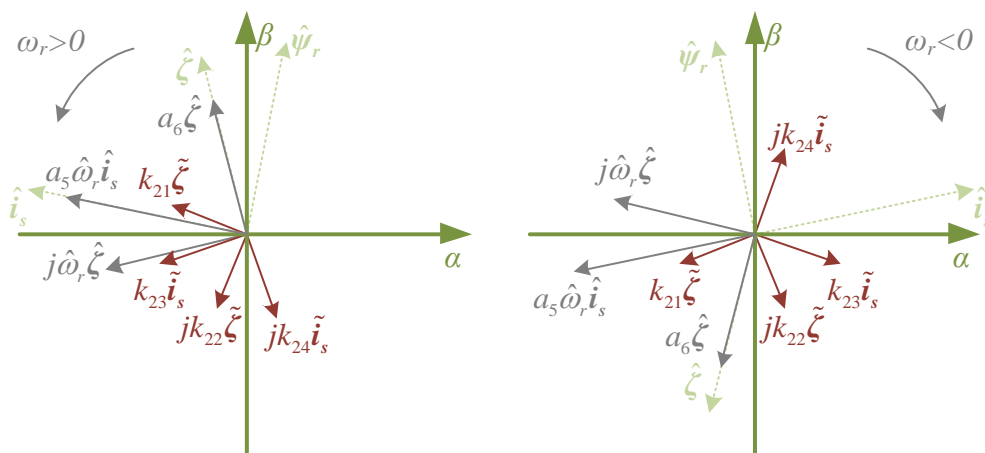
Przyjmując wektory wartości odtwarzanych oraz błędów estymacji jak na rysunku 3.12 otrzymuje się wektory występujące w prawych stronach równań obserwatora (2.28) – (2.30) przedstawione na rysunkach 3.13 – 3.15.



Rys. 3.13. Wektory zmiennych i błędów występujących w prawej stronie równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę odtwarzanego prądu stojana



Rys. 3.14. Wektory zmiennych i błędów występujących w prawej stronie równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę odtwarzanego strumienia wirnika



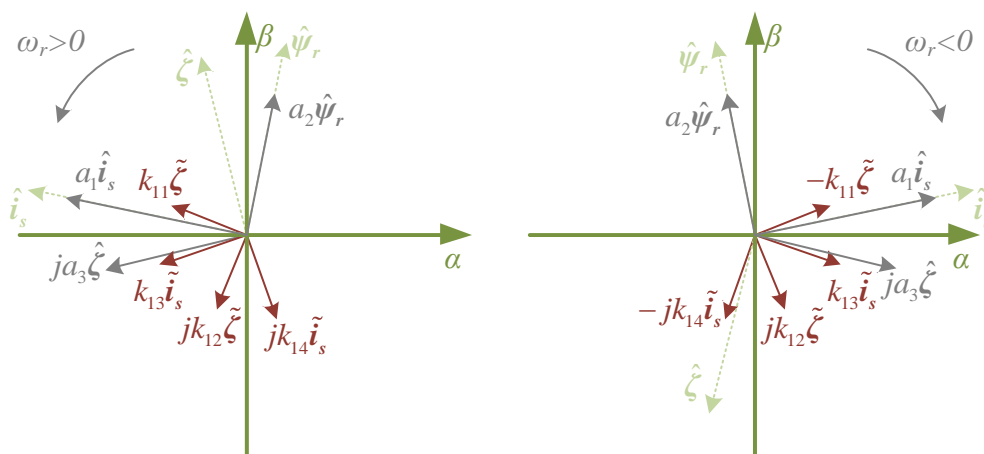
Rys. 3.15. Wektory zmiennych i błędów występujących w prawej stronie równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę odtwarzanej zmiennej ζ

Jak wynika z powyższych rysunków, w przypadku wektorów występujących w równaniach rozszerzonego obserwatora, po zmianie kierunku obrotów wirnika otrzymuje się inne kąty między wektorami. Oznacza to, że rozszerzony obserwator prędkości po zmianie znaku prędkości posiadać będzie inne właściwości. Brak jest zatem symetrii między działaniem obserwatora dla dodatnich oraz ujemnych kierunków obrotów wirnika.

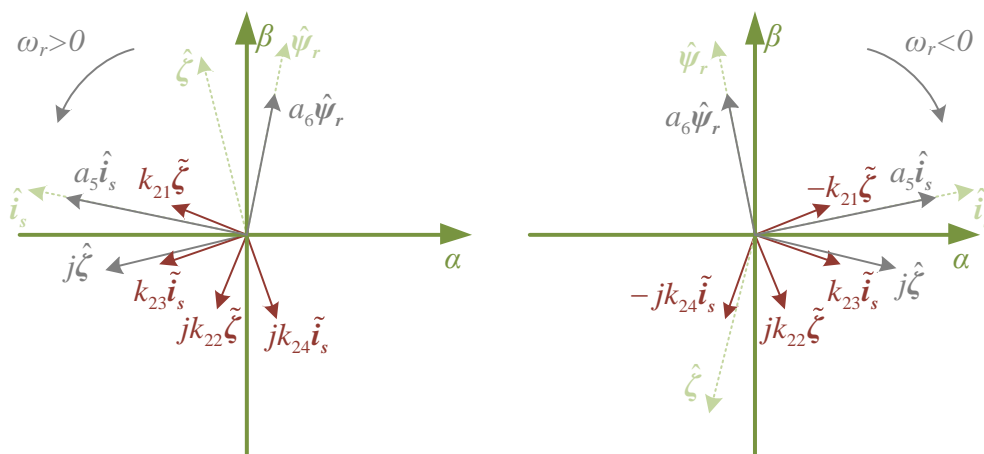
3.7.4. Korekcja wzmocnień obserwatora

W poprzednim podrozdziale wykazano brak symetrii właściwości obserwatora przy różnych kierunkach obrotów wirnika. Cecha ta wynika z braku zachowania kątów między wektorami błędów odtwarzania obserwatora przy dodatniej oraz ujemnej prędkości. Istnieje

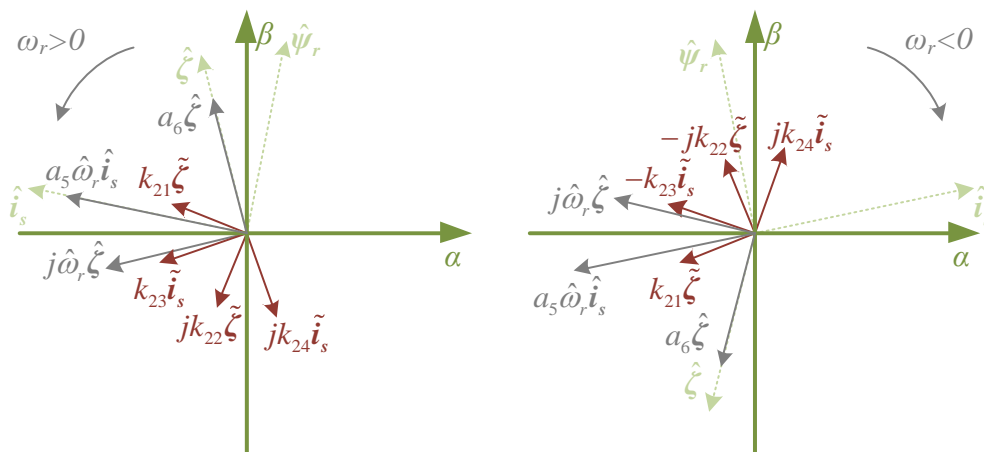
możliwość zmiany długości bądź obrót o 180 stopni wektorów będących wyrazami równań obserwatora zawierających błędy estymacji przez modyfikację wartości wzmacnień. Po pomnożeniu wybranych wektorów przez -1 (czyli po obrocie o 180 stopni), jak na rysunkach 3.16 – 3.18, wektory błędów tworzą takie same kąty między pozostałymi wektorami, a także zachowana jest kolejność wektorów w kierunku ich obrotów bez względu na znak prędkości. Oznacza to, że możliwe jest zachowanie właściwości obserwatora po zmianie kierunku obrotów poprzez odpowiednią modyfikację wzmacnień.



Rys. 3.16. Wektory zmiennych występujących w prawej stronie pierwszego równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę odtwarzanego prądu stojana z uwzględnieniem modyfikacji wzmacnień po zmianie kierunku obrotów wirnika



Rys. 3.17. Wektory zmiennych występujących w prawej stronie drugiego równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę odtwarzanego strumienia wirnika z uwzględnieniem modyfikacji wzmacnień po zmianie kierunku obrotów wirnika



Rys. 3.18. Wektory zmiennych występujących w prawej stronie trzeciego równania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej opisującego dynamikę odtwarzanej zmiennej ζ z uwzględnieniem modyfikacji wzmacnień po zmianie kierunku obrotów wirnika

Przyjmując zestaw wartości wzmacnień obserwatora \mathbf{K}_+ dla dodatnich prędkości:

$$\mathbf{K}_+ = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \end{bmatrix}, \quad (3.50)$$

należy przyjąć zestaw wzmacnień \mathbf{K}_- dla ujemnych prędkości by uzyskać takie same właściwości obserwatora po zmianie znaku:

$$\mathbf{K}_- = \begin{bmatrix} -k_{11} & k_{12} & k_{13} & -k_{14} \\ -k_{21} & k_{22} & k_{23} & -k_{24} \\ k_{31} & -k_{32} & -k_{33} & k_{34} \end{bmatrix}. \quad (3.51)$$

Wykorzystanie powyższej metody modyfikacji wzmacnień eliminuje konieczność doboru wzmacnień oddzielnie dla dodatnich oraz ujemnych prędkości. Wiąże się to z redukcją nakładów obliczeniowych wymaganych podczas określania wartości wzmacnień w całym zakresie dopuszczalnych prędkości wirnika, a także zapewnia niezmienność właściwości obserwatora po zmianie kierunku obrotów.

Podczas wyboru zestawu wzmacnień między zestawem dla dodatnich prędkości \mathbf{K}_+ a zestawem dla ujemnych prędkości \mathbf{K}_- konieczna jest znajomość bieżącego kierunku obrotów. W przypadku dużych prędkości wymóg ten nie stanowi problemu, gdyż kierunek jest znany, jednak dla małych prędkości, w szczególności podczas nawrotu, istnieje ryzyko błędnego określenia kierunku obrotów. Przyjęcie wartości wzmacnień przeznaczonych dla kierunku obrotów przeciwnego do rzeczywistego skutkować może utratą stabilności

obserwatora. Dla małych prędkości przyjęto zatem zestaw wzmacnień \mathbf{K}_0 następującej postaci:

$$\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} 0 & k_{012} & k_{013} & 0 \\ 0 & k_{022} & k_{023} & 0 \\ k_{031} & 0 & 0 & k_{034} \end{bmatrix}. \quad (3.52)$$

Zerując wzmacnienia, które zmieniają znak przy zmianie kierunku obrotów uzyskuje się zestaw wzmacnień zapewniający poprawną pracę obserwatora bez względu na kierunek pracy silnika. Zestaw wzmacnień postaci \mathbf{K}_0 dobierany jest jedynie dla małych wartości prędkości. Ograniczenie liczby dobieranych wzmacnień obserwatora zawęża zbiór możliwych rozwiązań, przez co trudniej jest uzyskać dobre właściwości dynamiczne obserwatora, w szczególności dla dużych prędkości. Podczas doboru wzmacnień dla większych prędkości szukany jest zatem pełny zestaw wzmacnień postaci \mathbf{K}_+ , natomiast wartości wzmacnień dla ujemnej prędkości uzyskiwane są poprzez zmianę znaku wybranych wartości, tak by uzyskać zestaw postaci \mathbf{K}_- .

4. ZAŁĄCZANIE MASZYNY PRZY NIEZEROWEJ PRĘDKOŚCI

4.1. Opis metody

Wejściami obserwatora są zadane wartości składowych wektora napięcia stojana oraz mierzone wartości składowych wektora prądu stojana. W przypadku niezasilonej maszyny indukcyjnej prąd w uzwojeniach stojana, przy pominięciu napięcia szczytkowego, jest zerowy, nawet gdy prędkość wirnika jest różna od zera. Do poprawnej pracy obserwatora konieczne jest zatem wymuszenie prądu stojana poprzez przyłożenie napięcia do zacisków maszyny. Z przeprowadzonych badań wynika, że rozszerzony obserwator posiada najlepsze właściwości dynamiczne oraz statyczne w przypadku, gdy moduł wektora strumienia wirnika jest bliski wartości znamionowej. Warunek ten jest zwykle spełniony, gdy stosunek modułu wektora napięcia stojana do jego pulsacji są bliskie jedności (dla wielkości wyrażonych w jednostkach względnych). Przyłożenie napięcia o wartości zapewniającej znamionowy moduł wektora strumienia wirnika w przypadku, gdy pulsacja wektora napięcia stojana jest różna od prędkości wirnika skutkować może pojawieniem się niedopuszczalnie dużych wartości prądów stojana. Podczas załączania maszyny indukcyjnej przy nieznannej, niezerowej prędkości wirnika należy zatem unikać skokowego wymuszania znamionowego strumienia wirnika.

Przy braku znajomości rzeczywistej prędkości wirnika można zasilić maszynę napięciem o pewnej częstotliwości, ale o znacznie obniżonej wartości. Sygnał taki wymusi pojawienie się prądu stojana, który nie przekroczy wartości znamionowej, natomiast będzie źródłem informacji, na podstawie których oszacować można prędkość wirowania wirnika. Po przyłożeniu do uzwojeń stojana napięcia o częstotliwości odbiegającej od prędkości wirnika maszyna pracować będzie z pewnym różnym od zera poślizgiem. W celu zapewnienia modułu wektora prądu stojana mniejszego od wartości i_{smax} , należy zachować warunek:

$$i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2 < i_{smax}^2. \quad (4.1)$$

Przy szacowaniu modułu wektora prądu stojana na podstawie punktu pracy maszyny wygodnie jest przyjąć składowe prądów wyrażone w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika i_{sd} oraz i_{sq} :

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 < i_{smax}^2. \quad (4.2)$$

Składowe wektora prądu stojana i_{sd} oraz i_{sq} obliczyć można na podstawie wartości modułu wektora strumienia wirnika ψ_r oraz momentu elektromagnetycznego T_e :

$$i_{sd} = \frac{\psi_r}{L_m}, \quad (4.3)$$

$$i_{sq} = \frac{L_r T_e}{L_m \psi_r}. \quad (4.4)$$

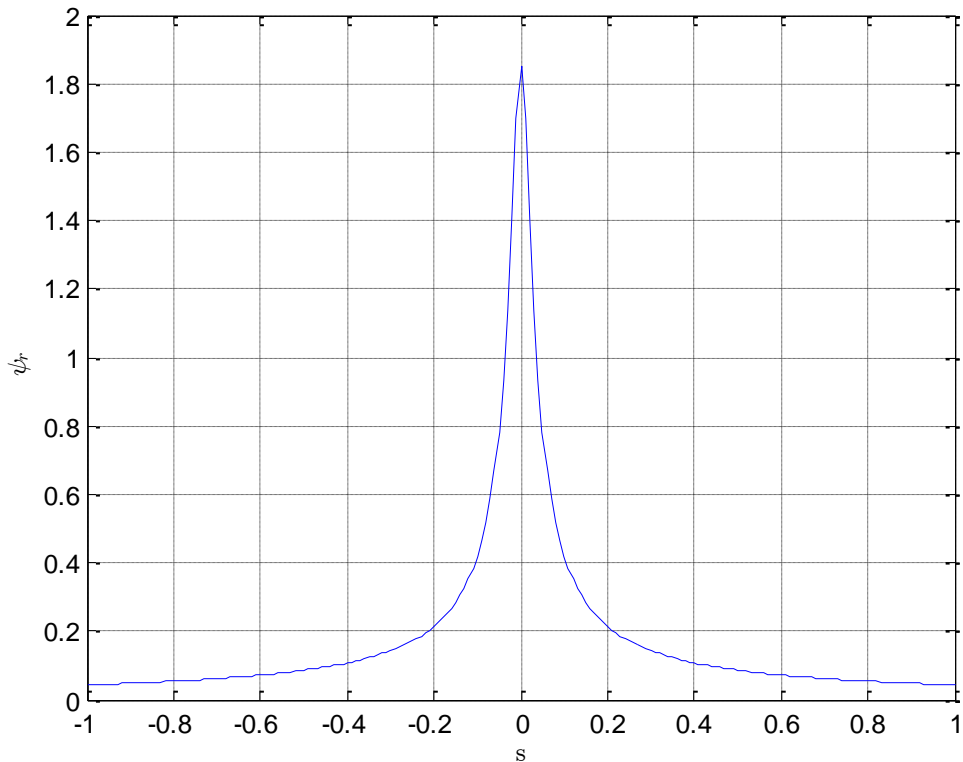
Wartość poślizgu zależna jest od składowej prądu stojana i_{sq} oraz modułu wektora strumienia wirnika i wyrazić ją można za pomocą zależności:

$$s = a_s \frac{i_{sq}}{\psi_r}. \quad (4.5)$$

Przekształcając układ utworzony z nierówności 4.1 oraz równań 4.3, 4.5 otrzymuje się zależność opisującą wartość modułu strumienia wirnika w funkcji poślizgu oraz maksymalnej wartości prądu stojana:

$$\psi_{r\max} = \frac{a_s L_m i_{s\max}}{\sqrt{a_s^2 + L_m^2 s^2}}. \quad (4.6)$$

Na rysunku 4.1 przedstawiono zakres zmian modułu wektora strumienia wirnika w stanie ustalonym wraz ze zmianami poślizgu maszyny przy założeniu, że wymuszany jest zawsze znamionowy prąd stojana. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w rozpatrywanym modelu maszyny nie uwzględniono zjawiska nasycenia rdzenia magnetycznego maszyny, zatem wnioski wyciągnięte z rysunku oraz zależności 4.6 można porównywać z rzeczywistymi jedynie w przypadku, gdy moduł strumienia wirnika nie przekracza wartości znamionowej.



Rys. 4.1. Ustalona wartość modułu wektora strumienia wirnika w funkcji poślizgu maszyny przy znamionowym prądzie stojana

Przekształcając zależność 4.6 uzyskać można warunek na wartość poślizgu, dla której otrzymuje się strumień wirnika przekraczający wartość znamionową przy danym prądzie stojana:

$$|s| < a_s \sqrt{i_s^2 - \frac{\psi_m^2}{L_m^2}}. \quad (4.7)$$

W celu uniknięcia nasycenia obwodu magnetycznego podczas lotnego startu dla małych poślizgów spełniających warunek 4.7 obowiązuje ograniczenie strumienia wirnika. W zakresie tym prąd stojana może być zatem mniejszy od znamionowego. Dla dużych wartości poślizgu moduł wektora prądu stojana ograniczany jest do wartości znamionowej, przy czym wraz ze wzrostem poślizgu maleje moduł strumienia wirnika.

W przypadku, gdy ani rzeczywista prędkość wirnika ani nawet kierunek obrotów wirnika nie są znane, przyłożenie do maszyny napięcia o arbitralnej częstotliwości prowadzi może do wystąpienia dużych wartości poślizgu. W takich warunkach maksymalna wartość strumienia wirnika, przy której nieprzekroczony zostanie znamionowy prąd stojana, może być bardzo mała. Z przeprowadzonych badań wynika, że w takich warunkach obserwator posiada gorsze właściwości dynamiczne. Ponadto zwiększa się

wówczas wpływ błędów identyfikacji parametrów modelu maszyny na występowanie błędów odtwarzania zmiennych stanu w stanie ustalonym. Korzystnie jest zatem rozpoczynać procedurę lotnego startu zasilając maszynę napięciem o częstotliwości jak najbardziej zbliżonej do rzeczywistej częstotliwości obrotów wirnika.

4.2. Wstępna identyfikacja prędkości

Rozszerzony obserwator prędkości oparty jest na modelu matematycznym maszyny indukcyjnej, w którym zmiennymi stanu są prąd stojana oraz strumień wirnika. Równania (2.11) – (2.14) przekształcić można do postaci, w której zmiennymi stanu są prąd stojana oraz strumień stojana:

$$\frac{d\mathbf{i}_s}{d\tau} = \left(-\frac{R_s L_r + L_s R_r}{w} + j\omega_r \right) \mathbf{i}_s + \left(\frac{R_r}{w} - j\frac{\omega_r L_r}{w} \right) \boldsymbol{\psi}_s + \frac{L_r}{w} \mathbf{u}_s, \quad (4.8)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{d\tau} = -R_s \mathbf{i}_s + \mathbf{u}_s. \quad (4.9)$$

Przyjmując, że prędkość kątowna wirnika ω_r jest stałym parametrem, model maszyny indukcyjnej opisany równaniami (4.8) – (4.9) traktować można jako obiekt liniowy postaci:

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\tau} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (4.10)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (4.11)$$

gdzie \mathbf{x} jest wektorem stanu:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{sx} & i_{sy} & \psi_{sx} & \psi_{sy} \end{bmatrix}^T, \quad (4.12)$$

\mathbf{u} jest wektorem wymuszenia:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{sx} & u_{sy} \end{bmatrix}^T, \quad (4.13)$$

\mathbf{A} jest macierzą stanu:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r + L_s R_r}{w} \mathbf{I} + \omega_r \mathbf{J} & \frac{R_r}{w} \mathbf{I} - \frac{\omega_r L_r}{w} \mathbf{J} \\ -R_s \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

\mathbf{B} jest macierzą wejść:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{L_r}{w} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

y jest wektorem wyjść obiektu, natomiast \mathbf{C} jest macierzą wyjść, zależną od przyjętych wielkości wyjściowych. Macierze \mathbf{I} oraz \mathbf{J} są postaci:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Identyfikacji parametrów modelu matematycznego dokonać można poprzez analizę odpowiedzi obiektu na pewne wymuszenie. W pracy tej rozpatrywany jest przypadek, w którym na wejściu pojawia się wymuszenie skokowe, natomiast analizowana jest wartość ustalona jednej ze zmiennych stanu.

Transmitancję opisującą zależność między wyjściem a wejściem obiektu zdefiniowanego za pomocą równań stanu obliczyć można na podstawie zależności [59]:

$$G(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}. \quad (4.18)$$

Wzmocnienie w stanie ustalonym między danym wyjściem a wejściem obliczyć można na podstawie transmitancji:

$$k = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = G(0). \quad (4.19)$$

W zależności od przyjętych składowych wielkości wejściowej (wektora napięcia stojana) oraz wyjściowej (wektora prądu stojana), otrzymuje się następujące wzmocnienia w stanie ustalonym:

Tab. 4.1. Wzmocnienia statyczne maszyny indukcyjnej dla prądów stojana jako wyjścia

	Out: i_{sx}	Out: i_{sy}
In: u_{sx}	$\frac{1}{R_s}$	0
In: u_{sy}	0	$\frac{1}{R_s}$

Z powyższej tabeli wynika, że wartości prądów stojana w stanie ustalonym nie zależą od prędkości wirnika maszyny. Nie ma zatem możliwości oszacowania prędkości wirnika analizując wzmocnienie statyczne napięcia stojana w przypadku, gdy wyjściem jest prąd stojana.

Relacje między wyjściem a wejściem w stanie ustalonym, dla składowych wektora strumienia stojana jako wyjścia, przedstawione zostały w tablicy:

Tab. 4.2. Wzmocnienia statyczne maszyny indukcyjnej dla strumienia stojana jako wyjścia

	Out: ψ_{sx}	Out: ψ_{sy}
In: u_{sx}	$\frac{R_r^2 L_s + \omega_r^2 L_r w}{R_s R_r^2 + \omega_r^2 L_r^2 R_s}$	$-\frac{R_r \omega_r (w + L_r L_s)}{R_s R_r^2 + \omega_r^2 L_r^2 R_s}$
In: u_{sy}	$\frac{R_r \omega_r (w + L_r L_s)}{R_s R_r^2 + \omega_r^2 L_r^2 R_s}$	$\frac{R_r^2 L_s + \omega_r^2 L_r w}{R_s R_r^2 + \omega_r^2 L_r^2 R_s}$

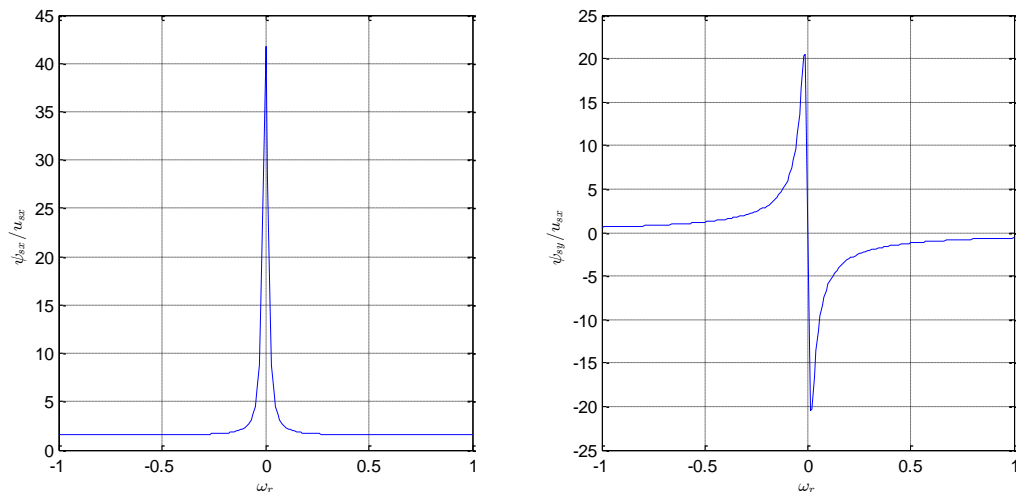
Wartości składowych wektora strumienia stojana w stanie ustalonym przy skokowym wymuszeniu napięcia stojana zależne są od prędkości wirnika. Oznacza to, że istnieje możliwość oszacowania prędkości wirnika na podstawie wartości ustalonej strumienia stojana. Wielkość ta nie jest jednak bezpośrednio mierzona.

Wartości składowych wektora strumienia stojana obliczyć można na podstawie przebiegów prądu stojana oraz napięcia stojana. Przekształcając równanie (4.9) otrzymuje się:

$$\psi_s = \int (-R_s \mathbf{i}_s + \mathbf{u}_s) d\tau + \psi_{s0}, \quad (4.20)$$

gdzie ψ_{s0} to początkowa wartość strumienia stojana.

Wartość strumienia stojana wyzerować można poprzez zwarcie zacisków maszyny. Dokonując takiego zabiegu przed przeprowadzeniem identyfikacji, zapewnia się początkową wartość badanej wielkości bliską zeru.



Rys. 4.2. Wzmocnienie statyczne składowej napięcia stojana u_{sx} w funkcji prędkości wirnika dla składowych strumienia stojana jako wyjść

Wymuszając skokową wartość jednej ze składowych wektora napięcia stojana analizować można dwie składowe wektora strumienia stojana. Na rysunku 4.2 przedstawiono wzmocnienia statyczne składowej napięcia stojana u_{sx} , dla składowych wektora strumienia stojana jako wyjść, w funkcji prędkości wirnika. Przyjęto parametry modelu maszyny zdefiniowane w załączniku A.

Wpływ składowej wektora strumienia stojana ψ_{sx} , przy wymuszeniu składowej napięcia u_{sx} , jest niemal stały dla prędkości wirnika większych od 0,3, trudno zatem wywnioskować na podstawie wzmocnienia tej wielkości jakie są rzeczywiste obroty wirnika. Składowa ψ_{sy} charakteryzuje się znacznie większym zakresem zmian wzmocnienia statycznego w zakresie dużych prędkości. Ponadto analizując tą składową można określić kierunek obrotów. Przekształcając zależność opisującą wzmocnienie statyczne dla składowej ψ_{sy} , uzyskuje się wyrażenie na prędkość wirnika:

$$\omega_r = \frac{R_r (w + L_r L_s) + \sqrt{R_r^2 (w + L_r L_s)^2 + 4(k_{\psi/u} L_r R_s R_r)^2}}{2k_{\psi/u} L_r^2 R_s}, \quad (4.21)$$

gdzie $k_{\psi/u}$ jest wzmocnieniem statycznym składowej napięcia u_{sx} dla składowej strumienia stojana ψ_{sy} jako wyjście.

Zależność (4.21) jest rozwiązaniem równania kwadratowego. Oznacza to, że danemu wzmocnieniu odpowiadają dwie możliwe prędkości wirnika. Jak wynika z rysunku 4.2b jedno z rozwiązań występuje przy bardzo małych prędkościach wirnika, mniejszych od 0,01. Przy niewielkich obrotach wirnika możliwe jest pominięcie procedury lotnego startu oraz przeprowadzenie rozruchu jak przy zatrzymanej maszynie. Przy małych prędkościach stosunek składowej strumienia stojana ψ_{sx} do składowej napięcia stojana u_{sx} osiąga bardzo duże wartości już w stanach przejściowych. Możliwe jest zatem wykrycie niewielkiej prędkości, bądź wręcz zatrzymanego wirnika zanim odpowiedź na wymuszenie skokowe ustali się. W przypadku, gdy w stanach przejściowych wzmocnienie dla składowej ψ_{sx} przekroczy 10, będzie to oznaczało, że wirnik obraca się z prędkością mniejszą niż 0,03 i możliwe jest zakończenie algorytmu wstępnej identyfikacji prędkości wirnika. W pozostałych sytuacjach wartość prędkości odczytywana z charakterystyki 4.2b będzie mieściła się zawsze w przedziale większych wartości prędkości, zatem wyprowadzając zależność (4.21) przyjęto rozwiązanie równania kwadratowego, w którym wartość prędkości wirnika jest większa od 0,01.

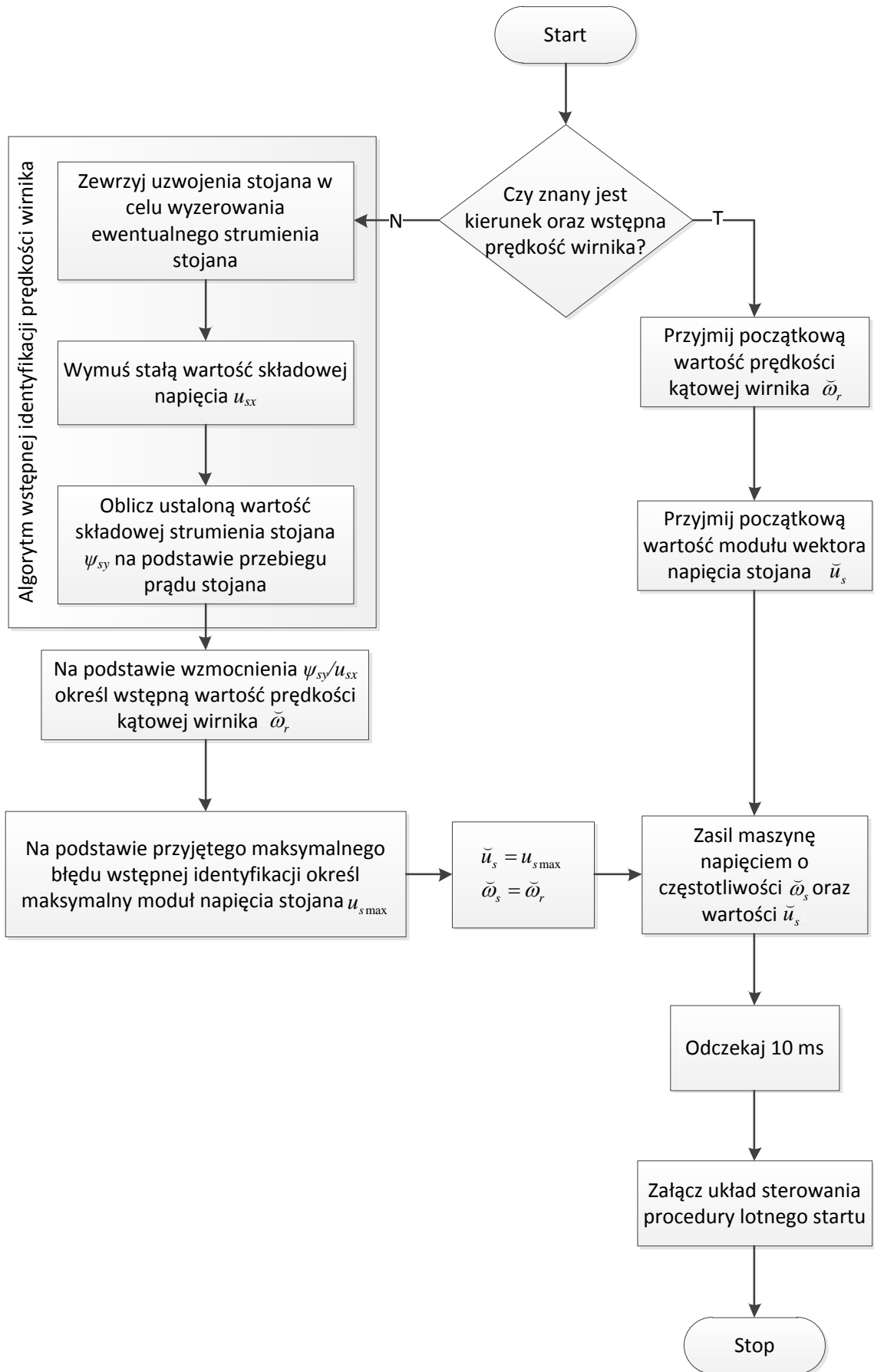
4.3. Algorytm załączania maszyny przy wstępnie znanej prędkości wirnika

Algorytm procedury lotnego startu przedstawiony został na rysunku 4.3. Do zadziałania obserwatora prędkości konieczne jest uprzednie zasilenie maszyny indukcyjnej. Prędkość wirowania wektora napięcia stojana powinna być wówczas możliwie bliska rzeczywistej prędkości wirnika. W przypadku gdy znany jest kierunek obrotów oraz orientacyjna wartość prędkości wirnika, na przykład po krótkotrwałym wyłączeniu falownika, możliwe jest przyjęcie tej prędkości jako początkowej pulsacji napięcia stojana $\tilde{\omega}_s$. Wartość tego napięcia powinna być możliwie mała, tak by ograniczyć prądy maszyny oraz moment mogący wpływać na zmianę prędkości wirnika. Przyjęcie zbyt małego napięcia skutkować może natomiast niepoprawną pracą obserwatora prędkości.

Jeżeli nie jest znana wstępna prędkość wirnika możliwe jest skorzystanie z algorytmu wstępnej identyfikacji prędkości opisanego w rozdziale 4.2. Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że prędkość uzyskana przy zastosowaniu przedstawionej metody wstępnej identyfikacji prędkości wirnika obciążona może być stosunkowo dużym błędem. W chwili przyłożenia napięcia o źle oszacowanej częstotliwości poślizg maszyny jest równy błędowi wstępnej identyfikacji prędkości. Znając maksymalną wartość tego błędu, czyli też maksymalny poślizg, przy wykorzystaniu zależności (4.6) określić można maksymalną wartość modułu wektora strumienia wirnika, przy której prąd stojana nie przekracza wartości znamionowej. Na podstawie wartości strumienia wirnika wyznaczyć można natomiast przybliżoną maksymalną wartość początkowego napięcia stojana $\tilde{u}_{s\max}$:

$$\tilde{u}_{s\max} \approx \psi_{r\max} \tilde{\omega}_r + R_s i_{s\max}, \quad (4.22)$$

gdzie $\tilde{\omega}_r$ jest wstępnie oszacowaną prędkością wirnika równą początkowej pulsacji wektora napięcia stojana. W przypadku możliwego dużego poślizgu strumień wirnika osiąga niewielkie wartości. Przy małym napięciu stojana oraz prądzie bliskim wartości znamionowej spadek napięcia na rezystancji stojana nie jest pomijalnie mały, zatem został on uwzględniony w powyższej zależności.

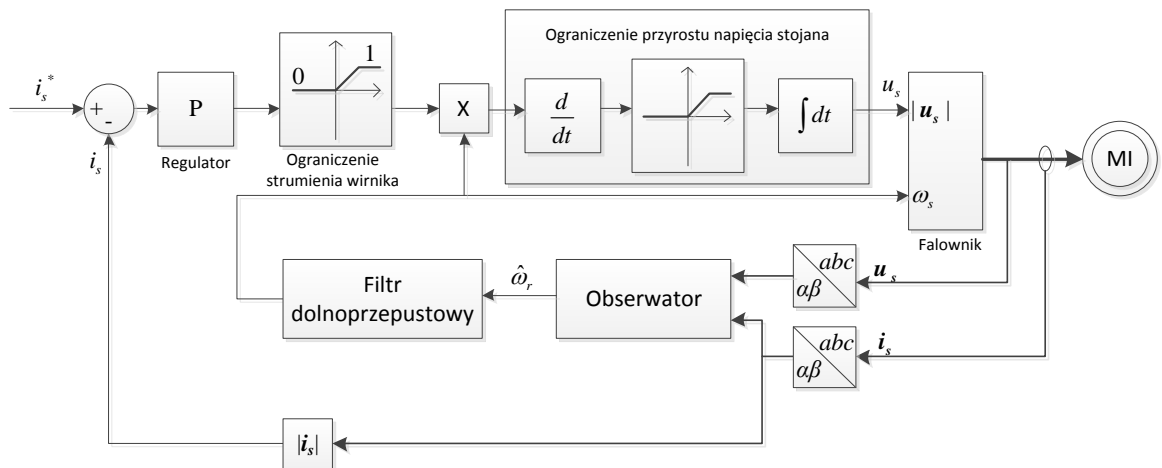


Rys. 4.3. Algorytm załączania napędu bezczujnikowego przy niezerowej prędkości wirnika

Uwzględniając warunek na ograniczenie strumienia wirnika (4.7) uzyskuje się następującą zależność opisującą początkową wartość napięcia \tilde{u}_s , jaką można bezpiecznie przyłożyć podczas lotnego startu do maszyny, w przypadku gdy maksymalny błąd wstępnej identyfikacji prędkości wirnika wynosi $\tilde{\omega}_{r\max}$ (wielkości wyrażone są jako wielkości względne):

$$\tilde{u}_s = \begin{cases} \tilde{\omega}_r & \text{gdy } |\tilde{\omega}_{r\max}| < a_5 \sqrt{i_{s\max}^2 - \frac{\psi_{rn}^2}{L_m^2}} \\ \frac{a_5 L_m i_{s\max} \tilde{\omega}_r}{\sqrt{a_5^2 + L_m^2 \tilde{\omega}_{r\max}^2}} + R_s i_{s\max} & \text{gdy } |\tilde{\omega}_{r\max}| \geq a_5 \sqrt{i_{s\max}^2 - \frac{\psi_{rn}^2}{L_m^2}} \end{cases} \quad (4.23)$$

Po zasileniu maszyny napięciem \tilde{u}_s o pulsacji $\tilde{\omega}_r$ zaleca się odczekanie pewnego krótkiego okresu przed kontynuowaniem przeprowadzania procedury lotnego startu. Utrzymanie stałej częstotliwości oraz modułu napięcia stojana ma na celu wyeliminowanie negatywnego wpływu stanów przejściowych obserwatora na działanie układu sterowania stosowanego podczas załączania maszyny. Nie ma natomiast potrzeby całkowitego ustalenia stanu obserwatora.



Rys. 4.4. Układ sterowania w procedurze lotnego startu

Proponowany układ sterowania stosowany podczas procedury lotnego startu maszyny indukcyjnej z wykorzystaniem obserwatora prędkości przedstawiony został na rysunku 4.4. W pierwszym kroku uruchamiania maszyny w warunkach lotnego startu do uzwojeń stojana przykładane jest napięcie o częstotliwości równej wstępnie przyjętej prędkości wirnika oraz o takiej wartości, przy której moduł wektora strumienia wirnika jest

znacznie mniejszy od jedności, tak by uniknąć przekroczenia znamionowych wartości prądów przy występowaniu dużego poślizgu. W takich warunkach obserwator odtwarzać może zmienne stanu ze stosunkowo dużymi błędami ze względu na potencjalne odchyłki wartości parametrów modelu maszyny. Wraz z aktualizowaniem zadanej pulsacji napięcia, stanowiącej filtrowaną wartość odtwarzanej prędkości wirnika, regulator prądu stojana steruje wartością modułu napięcia w taki sposób, by wymusić w maszynie zadany prąd stojana i_s^* . Moduł wektora napięcia stojana ograniczany jest do wartości zapewniającej znamionowy strumień wirnika maszyny. Ponadto ze względu na występowanie znacznych oscylacji prądu w stanach przejściowych przy dużych przyrostach modułu napięcia stojana pochodna tej wielkości podlega ograniczeniu. Oscylacje prądu wystąpić mogą także podczas zmniejszania modułu napięcia, zatem działanie regulatora mające na celu zmniejszenie prądu stojana w praktyce mogłoby doprowadzać do jego chwilowego zwiększenia. Dolna wartość przyrostu napięcia stojana ograniczona została zatem do zera.

Uzyskanie maksymalnego dopuszczalnego strumienia wirnika gwarantuje lepszą dynamikę obserwatora, a także mniejsze błędy odtwarzania w stanie ustalonym. Wraz ze spadkiem błędu odtwarzania prędkości, która zadawana jest jako prędkość wirowania wektora napięcia stojana, maleje także poślizg. Wraz ze spadkiem poślizgu rośnie dopuszczalna wartość strumienia wirnika przy której nie zostaną przekroczone znamionowe prądy, co skutkuje większą dokładnością odtwarzania zmiennych stanu. Algorytm rozruchu maszyny uznać można za zakończony w momencie uzyskania znamionowej wartości modułu wektora strumienia wirnika, natomiast potwierdzeniem braku występowania poślizgu jest uzyskanie modułu prądu stojana bliskiego wartości:

$$i_s = \frac{\psi_m}{L_m} \frac{u_s}{\omega_s}, \quad (4.24)$$

gdzie ψ_m jest znamionowym modulem wektora strumienia wirnika. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz składowych wektora strumienia wirnika powinny być wówczas dostatecznie małe, by można było przełączyć sterowanie na dowolny zamknięty układ regulacji maszyny indukcyjnej.

5. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ROZSZERZONEGO OBSERWATORA

5.1. Opis stanowiska badawczego oraz środowiska symulacyjnego

Właściwości obserwatora wywnioskowane na podstawie rozkładu biegunów porównane zostały z wynikami uzyskanymi z symulacji oraz rzeczywistego eksperymentu. Głównym celem badań symulacyjnych jest wstępne zweryfikowanie wartości wzmocnień uzyskanych przez algorytmy ewolucyjne oraz wykazanie zależności między rozkładem biegunów a właściwościami obserwatora prędkości. Środowisko symulacyjne powinno zatem zapewnić możliwie wyidealizowane warunki. W szczególności model maszyny powinien odpowiadać modelowi matematycznemu, na podstawie którego uzyskano równania obserwatora. W badaniach symulacyjnych jako model maszyny wykorzystano równania (2.15) – (2.18). Równania różniczkowe modelu rozwiązywano metodą Rungego-Kutty czwartego rzędu. W badaniach symulacyjnych pominięto zniekształcenie napięcia generowanego w falowniku.

W skład stanowiska badawczego wchodzi dwie maszyny. Obserwator estymuje zmienne stanu maszyny indukcyjnej o mocy 5,5 kW, której parametry przedstawione są w załączniku A. Maszyna zasilana jest z przekształtnika o dwukierunkowym przepływie energii, w którym realizowany jest algorytm odtwarzania prędkości. Obciążenie badanego silnika stanowi maszyna prądu stałego. Rzeczywista prędkość kątowna wirnika obliczana jest na podstawie sygnałów uzyskanych z optycznego enkodera inkrementalnego o rozdzielczości 2048 impulsów na obrót.

Wartości wzmocnień obliczane są przy wykorzystaniu biblioteki stanowiącej część środowiska symulacyjnego opracowanego na potrzeby realizacji przedstawionych w pracy badań. Przed wgraniem uzyskanych wartości wzmocnień do układu regulacji przekształtnika weryfikuje się właściwości obserwatora symulacyjnie.

5.2. Analiza wyników algorytmu doboru wartości wzmocnień obserwatora

W rozdziale 3.5 opisano metodę doboru wartości wzmocnień obserwatora przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych. Zastosowana funkcja celu zdefiniowana została w rozdziale 3.4. Opisany algorytm genetyczny wykorzystywany jest do określenia wartości

wzmocnień zapewniających stabilność obserwatora oraz jego dobre właściwości dynamiczne. W pracy przyjęto liczebność populacji wynoszącą 500 osobników, i zakończenie algorytmu po osiągnięciu 50 pokoleń. Metoda ta wiąże się zatem z koniecznością wielokrotnego wywoływania funkcji celu. W tym przypadku wskaźnik jakości oparty jest na rozkładzie biegunów obserwatora, co eliminuje konieczność przeprowadzania długotrwałych symulacji.

W celu zapewnienia dobrych właściwości obserwatora w szerokim zakresie zmian prędkości analizowany zestaw wzmocnień należy zweryfikować dla różnych wartości prędkości lub cały zakres prędkości wirnika należy podzielić na mniejsze przedziały, zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 3.6. W tablicy 5.1 przedstawiono wartości funkcji celu najlepszego osobnika w pierwszym oraz ostatnim pokoleniu uzyskanych podczas kolejnych prób doboru wzmocnień, w których funkcja celu obliczana jest dla pojedynczej wartości prędkości. Rozpatrywane są trzy wartości prędkości:

- mała prędkość ($\omega_r = 0,1$), dla której przyjęto specjalną postać zestawu wzmocnień (3.52) w celu zapewnienia symetrii właściwości obserwatora bez względu na kierunek obrotów;
- znamionowa prędkość synchroniczna ($\omega_r = 1,0$);
- duża prędkość z zakresu osłabiania pola ($\omega_r = 2,0$), dla której podczas doboru wzmocnień uwzględniono mniejszą wartość strumienia wirnika ($\psi_r = 0,5$).

Dla każdej z prędkości przeprowadzono 30 prób doboru wartości wzmocnień. W populacji początkowej wszystkie osobniki generowano losowo. Z postaci funkcji celu wynika, że dodatnia wartość wskaźnika przystosowania oznacza występowanie biegunów o niedozwolonych położeniach, czyli potencjalny brak stabilności obserwatora. Należy zwrócić uwagę na fakt, że dla małych prędkości w żadnej populacji początkowej nie ma osobnika o ujemnej wartości funkcji celu. Oznacza to, że żaden spośród 15.000 (po 500 osobników w każdej z 30 prób doboru wzmocnień) losowo wygenerowanych zestawów wzmocnień nie zapewnia pożądanej jakości pracy obserwatora. Dobieranych jest 6 wartości wzmocnień dla małych prędkości oraz 12 wartości wzmocnień w pozostałych przypadkach, zatem przestrzeń poszukiwań optymalnego rozwiązania jest stosunkowo duża i mało prawdopodobne jest odnalezienie wartości wzmocnień zapewniających oczekiwane właściwości dynamiczne metodą prób i błędów.

Tab. 5.1. Porównanie przystosowania najlepszych osobników na początku oraz na końcu działania algorytmu ewolucyjnego dla różnych prędkości wirnika maszyny

Nr próby	$\omega_r = 0,1$		$\omega_r = 1,0$		$\omega_r = 2,0$	
	Pierwsze pokolenie	Ostatnie pokolenie	Pierwsze pokolenie	Ostatnie pokolenie	Pierwsze pokolenie	Ostatnie pokolenie
1	1002.173	-0.060	-4.696	-28.400	62.159	-38.481
2	1006.043	-0.053	-9.735	-35.866	1083.293	-33.581
3	1004.096	0.173	1019.266	-31.579	1062.217	-38.601
4	1004.745	-0.061	-0.285	-27.657	1140.470	-38.121
5	1003.453	-0.099	1069.767	-30.782	-4.439	-40.626
6	0.153	-0.063	25.011	-28.141	1304.528	-39.388
7	0.146	-0.060	1018.874	-29.850	1245.502	-43.011
8	1007.448	-0.061	3.092	-32.743	1042.033	-38.119
9	1005.763	-0.229	1080.371	-30.031	25.033	-39.328
10	566.008	-0.059	1314.877	-28.829	1356.684	-39.818
11	137.582	-0.060	-11.127	-30.583	-5.284	-43.800
12	0.157	-0.216	13.237	-25.045	-8.691	-39.047
13	1004.302	-0.484	-3.405	-36.675	-1.414	-38.175
14	0.175	-0.059	-10.819	-28.064	1119.181	-39.628
15	0.179	-0.061	1018.056	-33.353	1.952	-39.682
16	1008.899	-0.068	-11.919	-31.780	1089.420	-36.790
17	1003.174	-0.062	-4.977	-33.922	1077.646	-41.213
18	0.184	-0.060	1030.505	-28.553	-12.003	-36.780
19	1002.835	-0.057	-3.581	-29.164	69.974	-40.025
20	1008.216	-0.077	10.468	-30.798	1115.956	-43.096
21	1001.463	-0.062	-11.598	-32.104	1210.058	-38.084
22	1003.377	-0.056	1033.784	-26.446	1047.119	-38.054
23	1000.989	-0.061	10.817	-27.028	1015.269	-40.885
24	1004.006	-0.056	-3.193	-32.847	-17.645	-44.109
25	0.161	-0.101	-6.886	-33.849	1134.562	-42.010
26	0.153	-0.059	-15.985	-35.845	1106.979	-36.712
27	0.186	-0.125	1035.597	-33.459	-19.516	-41.058
28	1002.961	-0.163	-13.374	-32.055	1057.905	-41.756
29	0.180	-0.068	4.198	-35.379	-11.091	-35.818
30	0.157	-0.067	0.377	-28.656	46.869	-40.535

Algorytmy ewolucyjne zastosowane do doboru wartości wzmocnień obserwatora dla znamionowych oraz dużych prędkości zapewniają w ostatnich pokoleniach ujemną wartość wskaźnika jakości, co świadczy o pomyślnym rozwiązaniu problemu. Należy jednak zauważyć, że nie we wszystkich próbach doboru wzmocnień otrzymano ujemną wartość przystosowania najlepszego osobnika. Jedno z wywołań algorytmu doboru wzmocnień dla małych prędkości zakończyło się rozwiązaniem o niewielkiej dodatniej wartości funkcji

celu. W tym przypadku nie świadczy to o braku stabilności obserwatora, a o występowaniu oscylacji odtwarzanych zmiennych w stanach przejściowych obserwatora.

Wskaźniki jakości dla znamionowych oraz dużych prędkości przyjmują znacznie mniejsze wartości niż dla małych prędkości, co świadczy o lepszym ułożeniu biegunów. Mniejsza ujemna wartość funkcji celu oznacza większą odległość bieguna dominującego od osi urojonej, zatem szybsze działanie obserwatora. Wraz ze spadkiem prędkości wirnika rosną wartości stałych czasowych wprowadzanych przez bieguny obserwatora. Ponadto dla małych prędkości przyjmuje się specjalny zestaw wzmocnień, w którym wybrane wzmocnienia są zerowe, w celu zapewnienia symetrii pracy obserwatora po zmianie kierunku obrotów, co dodatkowo zawęży zbiór możliwych położeń biegunów.

Dobór wartości wzmocnień dla pojedynczej prędkości zapewnia oczekiwane właściwości obserwatora tylko dla danych warunków pracy maszyny. Jednym z rozwiązań tego problemu jest przyjęcie funkcji celu w postaci (3.48), będącej sumą wskaźników jakości dla kilku prędkości. W ten sposób analizowany zestaw wzmocnień jest kontrolowany pod względem właściwości dynamicznych w szerokim zakresie zmian prędkości. W tabelicy 5.2 zamieszczone zostały wyniki kolejnych prób doboru wzmocnień przy wykorzystaniu tej metody. Przedstawiono wartości wskaźników jakości uzyskane dla trzech badanych prędkości oraz całkowitą wartość funkcji celu dla najlepszego zestawu wzmocnień w pierwszym oraz ostatnim pokoleniu. W każdej próbie doboru wzmocnień ostatecznie uzyskano ujemny wskaźnik jakości dla wszystkich prędkości. Wskaźniki jakości dla dużych oraz znamionowych prędkości są nieco gorsze niż w przypadku, gdy zestaw wzmocnień dobierany był oddzielnie dla każdej wartości prędkości. Większa wartość wskaźnika jakości spowodowana jest mniejszą odległością bieguna dominującego od osi urojonej, co skutkuje nieco wolniejszym działaniem obserwatora. Ponadto dobierając jeden zestaw wzmocnień dla całego zakresu dopuszczalnych prędkości przyjęto pełny wektor wzmocnień, w którym dobieranych jest 12 wartości, co wyjaśnia lepsze przystosowanie wzmocnień obserwatora przy małych prędkościach niż w przypadku rozpatrywanym w tabelicy 5.1. Zastosowanie takiego zestawu wzmocnień wymusza natomiast konieczność znajomości kierunku pracy maszyny w celu ewentualnej zmiany wzmocnień po zmianie znaku prędkości, co może stanowić problem podczas pracy z prędkością bliską zeru.

Tab. 5.2. Porównanie składowych wskaźnika jakości przystosowania najlepszych osobników na początku oraz na końcu działania algorytmu ewolucyjnego

Nr próby	Pierwsze pokolenie				Ostatnie pokolenie			
	$\omega_r = 0,1$	$\omega_r = 1,0$	$\omega_r = 2,0$	Suma	$\omega_r = 0,1$	$\omega_r = 1,0$	$\omega_r = 2,0$	Suma
1	1000.007	1009.383	1032.804	3042.194	-0.597	-9.172	-15.514	-25.284
2	1005.925	1003.825	153.067	2162.817	-0.767	-9.080	-29.430	-39.277
3	-1.418	1084.779	1279.301	2362.663	-0.514	-15.221	-28.718	-44.454
4	0.087	1073.838	1151.834	2225.758	-0.672	-21.074	-15.267	-37.014
5	1065.172	1371.710	1618.444	4055.326	-1.204	-10.404	-9.312	-20.920
6	1001.587	12.697	-4.636	1009.648	-0.634	-4.641	-28.033	-33.308
7	1139.985	2348.656	2581.469	6070.109	-0.657	-19.874	-9.125	-29.657
8	11.945	228.717	1161.941	1402.604	-1.038	-13.016	-23.251	-37.304
9	2023.738	-1.512	-7.692	2014.534	-0.862	-14.686	-14.805	-30.353
10	1012.421	1118.527	1252.768	3383.716	-0.945	-14.196	-24.510	-39.651
11	1021.959	1218.347	1395.375	3635.680	-0.260	-6.140	-13.726	-20.127
12	1023.714	1138.648	1179.518	3341.880	-0.937	-8.540	-16.037	-25.514
13	1002.695	1022.302	1037.412	3062.409	-0.458	-8.047	-15.488	-23.992
14	1055.518	1438.815	1718.126	4212.459	-0.067	-3.881	-9.279	-13.227
15	1500.935	1407.094	1408.651	4316.679	-0.849	-9.540	-18.069	-28.458
16	0.089	-1.535	-0.346	-1.792	-0.382	-5.962	-13.657	-20.002
17	1011.141	1112.895	1208.953	3332.988	-1.353	-14.729	-34.054	-50.136
18	2024.186	1128.353	1285.973	4438.512	-1.702	-19.276	-18.601	-39.579
19	1254.559	1312.822	1404.965	3972.347	-1.025	-14.325	-20.003	-35.353
20	1177.041	1320.371	1461.466	3958.878	-0.669	-11.225	-25.374	-37.268
21	1027.308	1285.812	1526.959	3840.078	-1.566	-17.424	-22.829	-41.819
22	1020.858	1237.425	1473.000	3731.282	-0.575	-24.117	-17.843	-42.535
23	1044.211	1219.389	1355.844	3619.444	-0.400	-5.243	-8.394	-14.038
24	1585.326	1557.473	1568.236	4711.035	-1.275	-20.658	-28.643	-50.576
25	1003.080	1024.818	1015.477	3043.376	-0.210	-14.105	-12.845	-27.160
26	1001.305	1037.797	1086.621	3125.723	-0.070	-1.929	-5.250	-7.250
27	1002.087	1079.184	1280.595	3361.867	-0.272	-1.430	-4.033	-5.735
28	1004.273	1021.441	456.626	2482.340	-0.794	-18.241	-9.222	-28.258
29	312.292	1112.673	1286.144	2711.109	-0.844	-15.537	-22.689	-39.070
30	1000.659	-2.305	-12.218	986.136	-0.774	-17.379	-18.897	-37.050

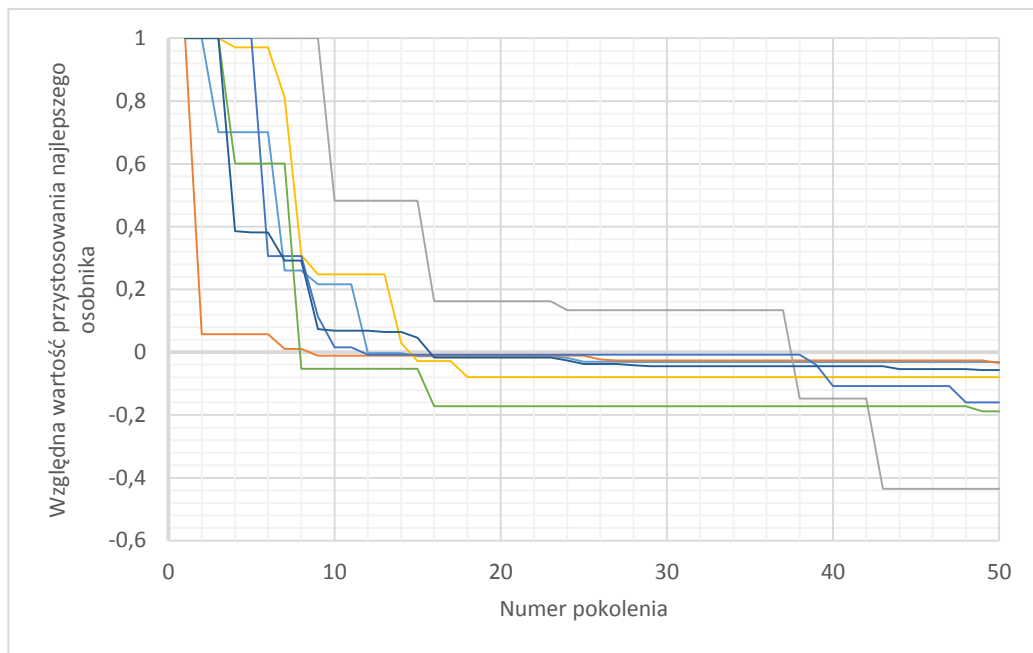
Innym podejściem jest dobór kilku zestawów wzmocnień obserwatora dla różnych przedziałów prędkości. Wówczas funkcją celu jest suma wskaźników jakości na krańcach rozpatrywanych przedziałów prędkości, zgodnie z równaniem (3.49). W pracy rozpatrywane są trzy przedziały prędkości: małe prędkości (mniejsze od 0,1), prędkości robocze (od 0,1 do 1,0) oraz zakres osłabiania pola (dla prędkości większych od 1,0). Uzyskane w kolejnych próbach wartości funkcji celu oraz jej składowe dla różnych przedziałów prędkości przedstawione zostały w tabelicy 5.3. Korzystając z tej metody udało się uzyskać nieco lepsze wartości wskaźnika jakości dla prędkości znamionowej oraz jej dwukrotności. Ponadto

istnieje możliwość przyjęcia zestawu wzmacnień zapewniającego symetrię obserwatora dla małych prędkości. Należy jednak zauważyć, że podczas doboru wartości wzmacnień dla małych prędkości jedynie 4 zestawy spośród 30 uzyskały ujemny wskaźnik jakości na obu krańcach przedziału prędkości, co świadczy o złożoności problemu doboru wzmacnień dla małych prędkości zapewniających symetrię obserwatora przy zmianach kierunku.

Tab. 5.3. Porównanie składowych wskaźników jakości przystosowania najlepszych osobników na początku oraz na końcu działania algorytmu ewolucyjnego dla trzech przedziałów prędkości

Nr próby	Mała prędkość			Prędkości robocze			Osłabianie pola		
	$\omega_r = 0,01$	$\omega_r = 0,1$	Suma	$\omega_r = 0,1$	$\omega_r = 1,0$	Suma	$\omega_r = 1,0$	$\omega_r = 2,0$	Suma
1	154.916	-0.011	154.905	-0.402	-18.149	-18.551	-16.218	-26.314	-42.532
2	148.666	-0.011	148.655	-1.848	-25.325	-27.173	-14.685	-29.716	-44.401
3	154.066	-0.010	154.056	-1.285	-13.970	-15.255	-26.080	-19.587	-45.668
4	151.840	-0.011	151.829	-2.161	-14.555	-16.716	-14.799	-20.352	-35.150
5	172.035	-0.013	172.022	-0.050	-2.511	-2.561	-12.513	-26.682	-39.195
6	150.584	25.224	175.808	-0.681	-11.443	-12.124	-12.996	-24.838	-37.834
7	130.635	-0.030	130.606	-0.558	-22.053	-22.611	-34.049	-15.176	-49.225
8	-0.023	-0.023	-0.046	-0.275	-18.573	-18.847	-16.817	-36.188	-53.005
9	139.023	-0.011	139.013	-0.566	-11.470	-12.036	-17.046	-39.239	-56.285
10	151.677	-0.011	151.666	-1.197	-25.512	-26.709	-20.608	-26.499	-47.106
11	151.842	-0.011	151.831	-1.338	-18.213	-19.551	-15.551	-33.871	-49.421
12	148.938	121.284	270.222	-0.601	-28.359	-28.960	-21.662	-32.401	-54.062
13	-0.010	-0.010	-0.021	-0.158	-19.389	-19.547	-15.943	-37.638	-53.582
14	-0.011	-0.021	-0.032	-1.463	-24.329	-25.793	-13.674	-33.303	-46.977
15	127.666	77.292	204.958	-0.156	-24.010	-24.166	-11.786	-31.124	-42.911
16	153.965	25.420	179.385	-1.362	-26.548	-27.910	-15.095	-21.610	-36.705
17	149.523	-0.010	149.513	-0.270	-27.680	-27.950	-28.702	-18.037	-46.739
18	-0.012	-0.380	-0.393	-0.095	-22.670	-22.765	-16.019	-37.449	-53.467
19	150.746	-0.011	150.734	-0.114	-29.784	-29.898	-12.661	-32.906	-45.567
20	75.963	-0.011	75.953	-0.535	-19.272	-19.806	-10.960	-24.758	-35.718
21	146.004	-0.017	145.987	-1.384	-29.629	-31.013	-16.821	-26.793	-43.613
22	147.617	53.899	201.516	-0.108	-21.641	-21.750	-20.545	-28.907	-49.453
23	147.113	121.442	268.555	-0.466	-17.113	-17.579	-21.143	-26.021	-47.164
24	152.185	-0.011	152.175	-0.389	-29.246	-29.635	-13.746	-32.377	-46.123
25	155.698	-0.011	155.687	-0.641	-7.957	-8.599	-16.735	-33.963	-50.697
26	157.487	158.859	316.346	-0.506	-18.177	-18.682	-17.706	-34.897	-52.603
27	151.264	144.496	295.759	-0.204	-24.821	-25.024	-17.212	-10.015	-27.228
28	149.278	-0.010	149.268	-1.853	-19.900	-21.753	-12.883	-34.487	-47.370
29	152.595	-0.011	152.584	-1.859	-22.710	-24.568	-25.936	-22.841	-48.777
30	144.206	-0.011	144.196	-0.748	-11.777	-12.525	-12.920	-28.114	-41.034

Na rysunku 5.1 przedstawiono zmiany wskaźnika jakości najlepszego osobnika w danym pokoleniu wraz z ewolucją populacji. Wyniki przedstawiono na przykładzie siedmiu losowo wybranych prób doboru wzmocnień obserwatora. Wartości przystosowania najlepszego osobnika w początkowej populacji znacznie się różnią w kolejnych uruchomieniach algorytmu, zatem w celu poprawy czytelności rysunku wykresy zostały przeskalowane w taki sposób, by wskaźniki jakości w populacji początkowej były równe jedności.



Rys. 5.1. Zmiany przystosowania najlepszego osobnika wraz ze starzeniem się populacji

Najintensywniejsze spadki wartości funkcji celu najlepiej przystosowanych osobników populacji występują w kilku pierwszych pokoleniach. Wraz ze starzeniem się populacji tempo zmian wskaźnika jakości maleje, natomiast w ostatnich pokoleniach ulega zwykle niewielkim zmianom.

Wskaźnik jakości opisujący właściwości dynamiczne obserwatora oparty jest na rozkładzie biegunów uzyskanych ze zlinearyzowanych równań dynamiki błędów odtwarzania. Wnioski wyciągnięte na temat dynamiki obserwatora są prawdziwe jedynie w pewnym otoczeniu punktu pracy. Może się zatem zdarzyć, że pomimo ułożenia wszystkich biegunów w dopuszczalnym obszarze na płaszczyźnie zespolonej obserwator straci stabilność w przypadku występowania dużych błędów odtwarzania. Ponadto układy nieliniowe posiadać mogą więcej niż jeden punkt równowagi. Punkt pracy, w którym błędy odtwarzania wynoszą zero, jest punktem równowagi. Może jednak wystąpić sytuacja, w

której odtwarzane zmienne stabilizować się będą w nieoczekiwanym punkcie równowagi, którego występowanie zależy między innymi od wartości wzmocnień obserwatora.

Po dobraniu wzmocnień obserwatora optymalizujących położenie biegunów należy przeanalizować uzyskane wyniki symulacyjnie. Zbadać należy przede wszystkim stabilność obserwatora, a także jego właściwości w stanie ustalonym. Konieczne jest przeprowadzenie symulacji także przy dużych błędach odtwarzania, tak by wykluczyć istnienie nieoczekiwanych punktów równowagi obserwatora zagrażających jakości odtwarzania.

Z badań symulacyjnych wynika, że błędy identyfikacji parametrów modelu maszyny są kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na błędy estymacji w stanie ustalonym. Pokazano także, że wpływ ten można ograniczyć poprzez odpowiedni dobór wzmocnień. Zalecany jest zatem wielokrotny dobór wartości wzmocnień przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych, a następnie spośród otrzymanego zbioru zestawów wzmocnień wybranie rozwiązania, które symulacyjnie gwarantuje najlepsze właściwości odtwarzania.

5.3. Porównanie właściwości obserwatora z właściwościami zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania

W rozdziale 3.2 zaproponowano układ równań opisujący dynamikę zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania, natomiast w rozdziale 3.3 zdefiniowano pojęcie biegunów rozszerzonego obserwatora. Celem opisanych poniżej badań jest potwierdzenie zależności między właściwościami dynamicznymi obserwatora, a właściwościami zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania.

Właściwości dynamiczne obiektu ocenić można poprzez analizę przebiegów wybranych wielkości w stanach nieustalonych. Wymuszenia stanów przejściowych obserwatora dokonać można poprzez wprowadzenie zakłócenia odtwarzanych zmiennych maszyny. Przeprowadzone eksperymenty polegają na wprowadzeniu skokowej zmiany odtwarzanego modułu strumienia wirnika w stanie ustalonym obserwatora. Umożliwia to porównanie właściwości dynamicznych zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania z rzeczywistymi właściwościami obserwatora.

Wartość strumienia wirnika nie jest wielkością mierzoną, nie ma zatem możliwości określenia rzeczywistego błędu tej wielkości w badaniach eksperymentalnych. Błąd strumienia wirnika w badaniach eksperymentalnych rozumiany jest zatem jako różnica między wartością odtwarzaną a średnią wartością w stanie ustalonym przed wprowadzeniem

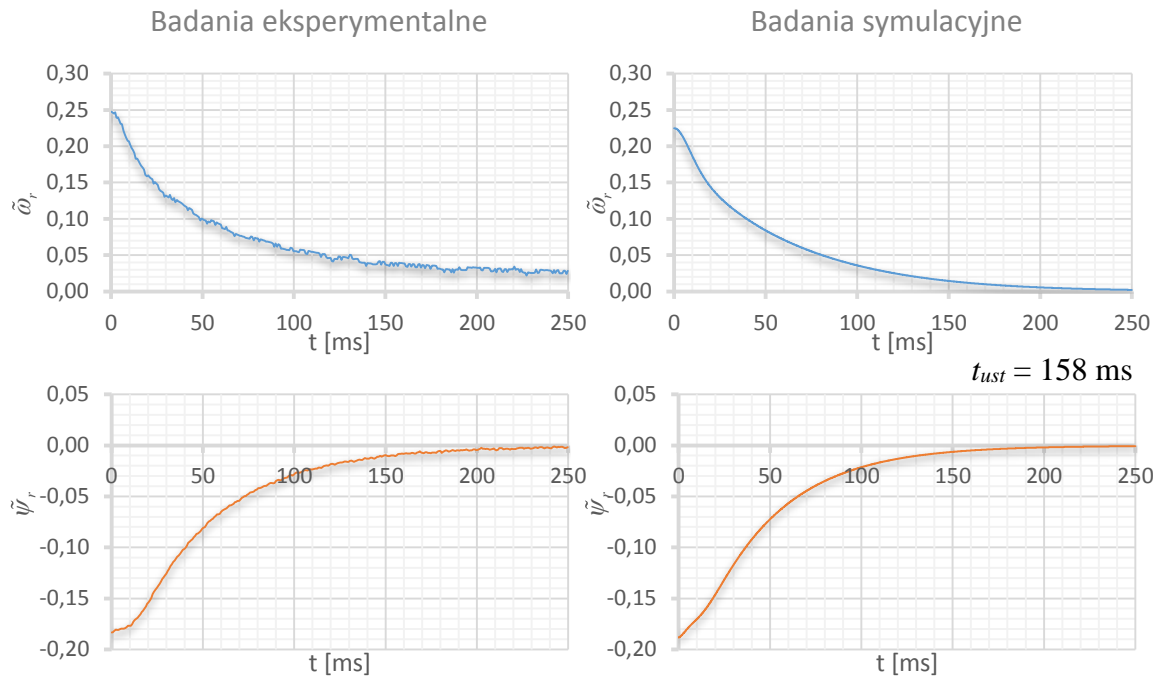
zakłócenia, co wystarcza do oceny właściwości dynamicznych obserwatora. Jakość odtwarzania strumienia wirnika w stanie ustalonym ocenić można poprzez analizę wyników symulacyjnych, gdzie błąd tej wielkości wyrażony jest jako różnica między wartością odtwarzaną a rzeczywistą.

Do przeprowadzenia badań zawartych w niniejszym podrozdziale posłużono się zestawem wzmocnień, który nie ma zastosowania w rzeczywistym napędzie ze względu na niedostateczne właściwości dynamiczne, jednak pozwala na czytelne zobrazowanie zależności między rozkładem biegunów a jakością odtwarzania. Wartości wzmocnień użytych w tym eksperymencie przedstawione zostały w załączniku B.3. Pomiar powtórzono kilkakrotnie, zmieniając wartość wzmocnienia k_{23} , tak by zobrazować wpływ zmian położenia biegunów na właściwości obserwatora. Kolejne próby przeprowadzono przy stałej prędkości wirnika $\omega_r = 0,9$ oraz obciążeniu $m_o = 0,3$.

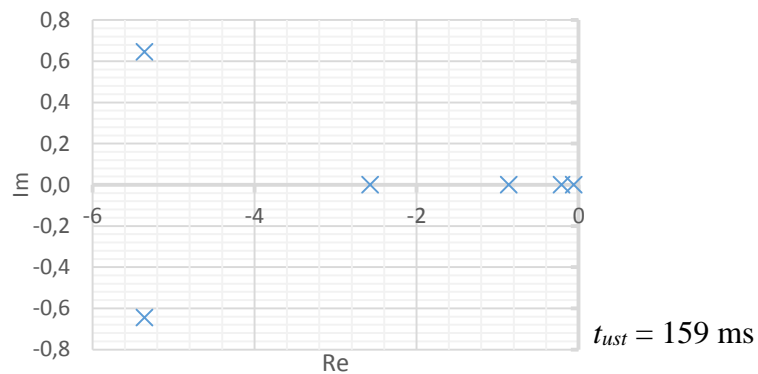
Na rysunku 5.2 przedstawiono przebiegi błędów odtwarzania prędkości i modułu strumienia wirnika uzyskane w badaniach eksperymentalnych i symulacyjnych natomiast na rysunku 5.3 zaprezentowano rozkład biegunów dla wartości wzmocnienia $k_{23} = 0,05$. Bieguny dominujące, znajdujące się najbliżej osi urojonej, są biegunami rzeczywistymi. Oznacza to, że nie wprowadzają one oscylacji do odtwarzanych zmiennych, a zatem odpowiedź obserwatora powinna mieć charakter inercyjny, co potwierdzają przebiegi. Część rzeczywista bieguna dominującego wynosi $\sigma = -0,0601$. Stałą czasową, po przeliczeniu z jednostek względnych, obliczyć można na podstawie zależności:

$$T = \frac{1}{\sigma} t_b, \quad (5.1)$$

gdzie t_b to czas bazowy. Stała czasowa związana z biegunem dominującym wynosi zatem $T = 53$ ms. Przyjęto, że stan przejściowy trwa do momentu, w którym błąd odtwarzania staje się mniejszy niż $\pm 5\%$ i nie opuszcza więcej tego zakresu. Stan ustalony otrzymuje się wówczas po upływie czasu $t_{ust} \approx 3T$ [56]. Dla porównania czasy ustalania t_{ust} uzyskane z przebiegów symulacyjnych oraz na podstawie położenia bieguna dominującego przedstawione zostały na rysunkach.

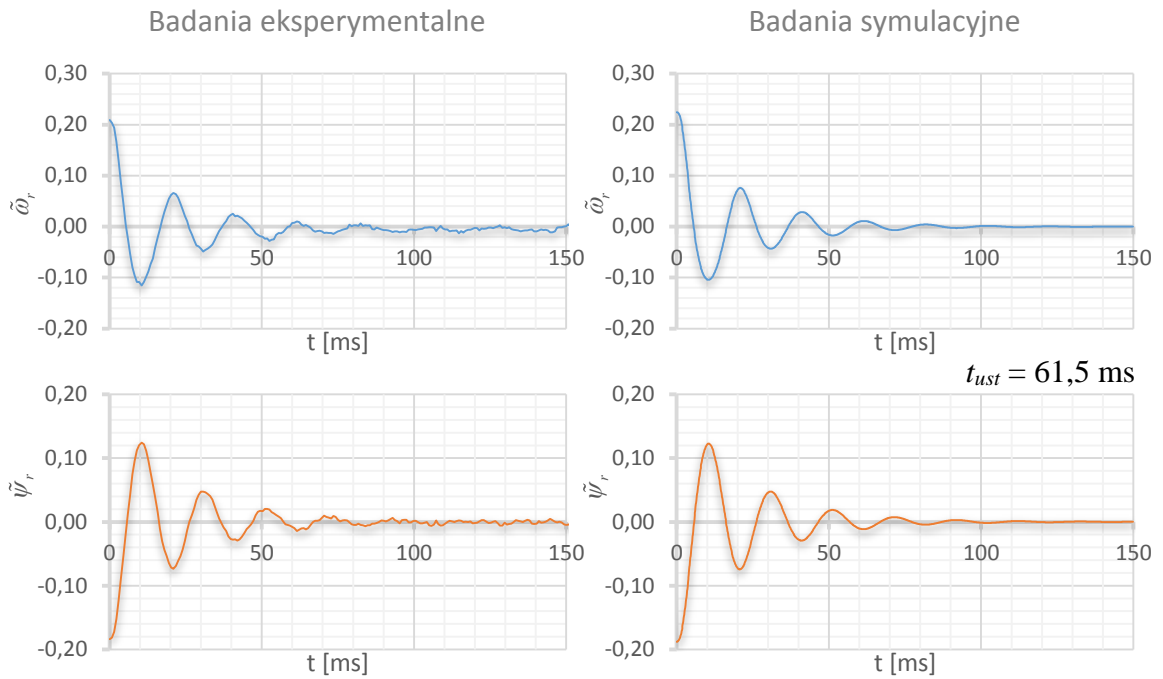


Rys. 5.2. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych dla wzmocnień zapewniających inercyjny charakter odpowiedzi obserwatora ($k_{23} = 0,05$)

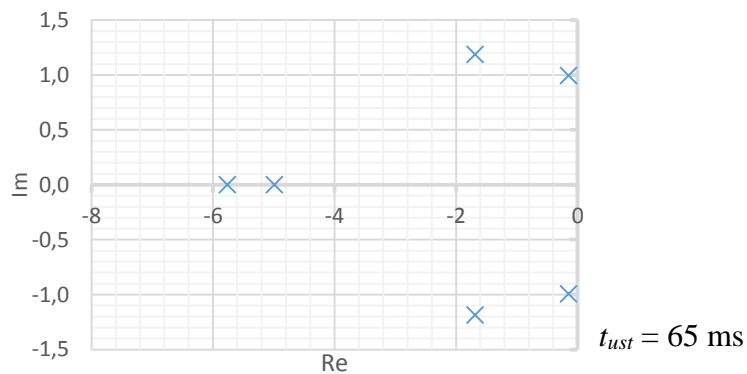


Rys. 5.3. Rozkład biegunów obserwatora dla wzmocnień zapewniających inercyjny charakter odpowiedzi obserwatora ($k_{23} = 0,05$)

Wraz ze wzrostem wzmocnienia k_{23} dwa bieguny znajdujące się najbliżej osi urojonej przemieszczają się ku sobie, a następnie tworzą sprzężoną parę biegunów o niezerowej części urojonej. Na rysunkach 5.4 oraz 5.5 przedstawiono przebiegi błędów oraz rozkład biegunów przy wzmocnieniu $k_{23} = 1,2$, dla którego bieguny dominujące tworzone są przez parę biegunów o małym tłumieniu. Skutkuje to występowaniem oscylacji w stanach przejściowych obserwatora, co potwierdzają uzyskane przebiegi błędów odtwarzania.

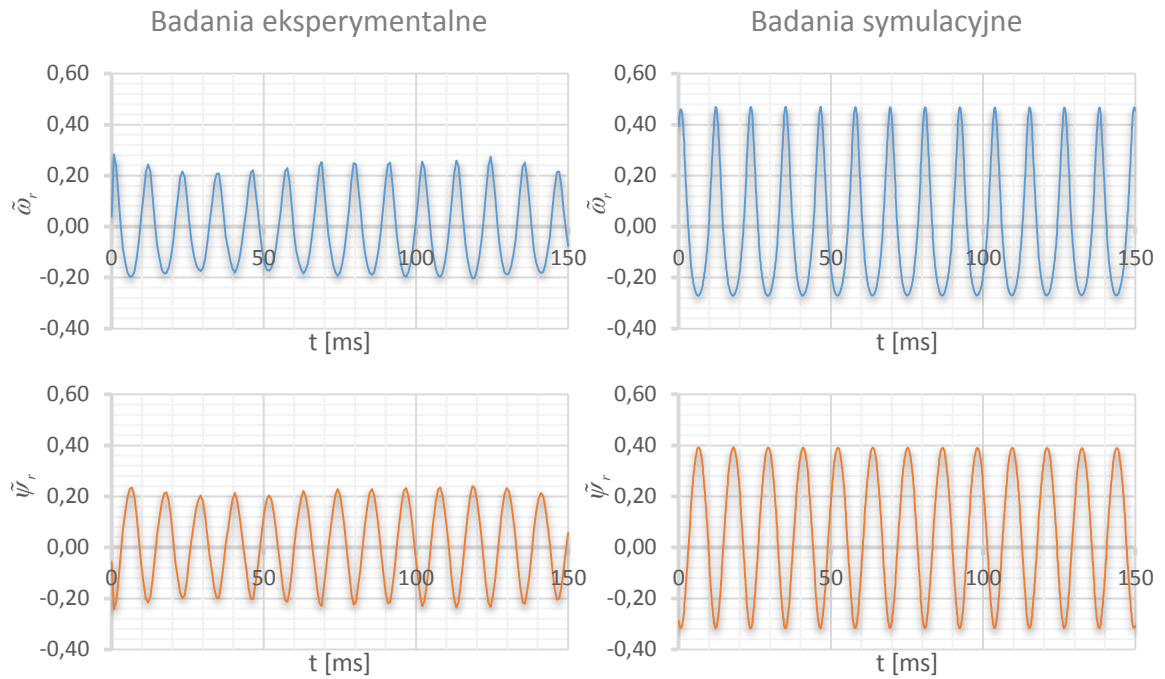


Rys. 5.4. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych dla wzmoceń zapewniających oscylacyjny charakter odpowiedzi obserwatora ($k_{23} = 1,2$)

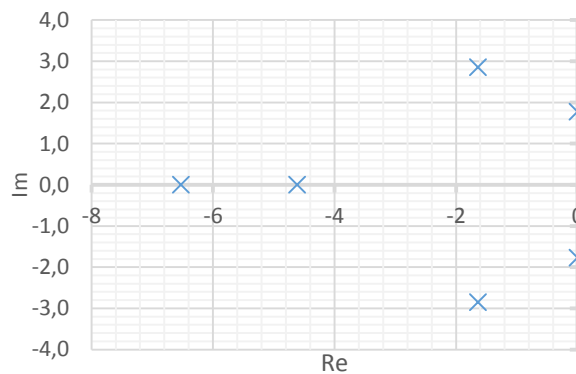


Rys. 5.5. Rozkład biegunów obserwatora dla wzmoceń zapewniających oscylacyjny charakter odpowiedzi obserwatora ($k_{23} = 1,2$)

Wraz ze wzrostem wzmożenia k_{23} powyżej wartości 1,2 bieguny dominujące przemieszczają się w kierunku osi urojonej. Dla wartości $k_{23} = 4,07$ część rzeczywista tych biegunów przyjmuje wartość zero. Obserwator znajduje się wówczas na granicy stabilności. Przypadek ten przedstawiony został na rysunkach 5.6 oraz 5.7. Po wprowadzeniu zakłócenia odtwarzanego strumienia wirnika błędy obserwatora oscylują wokół punktu równowagi.

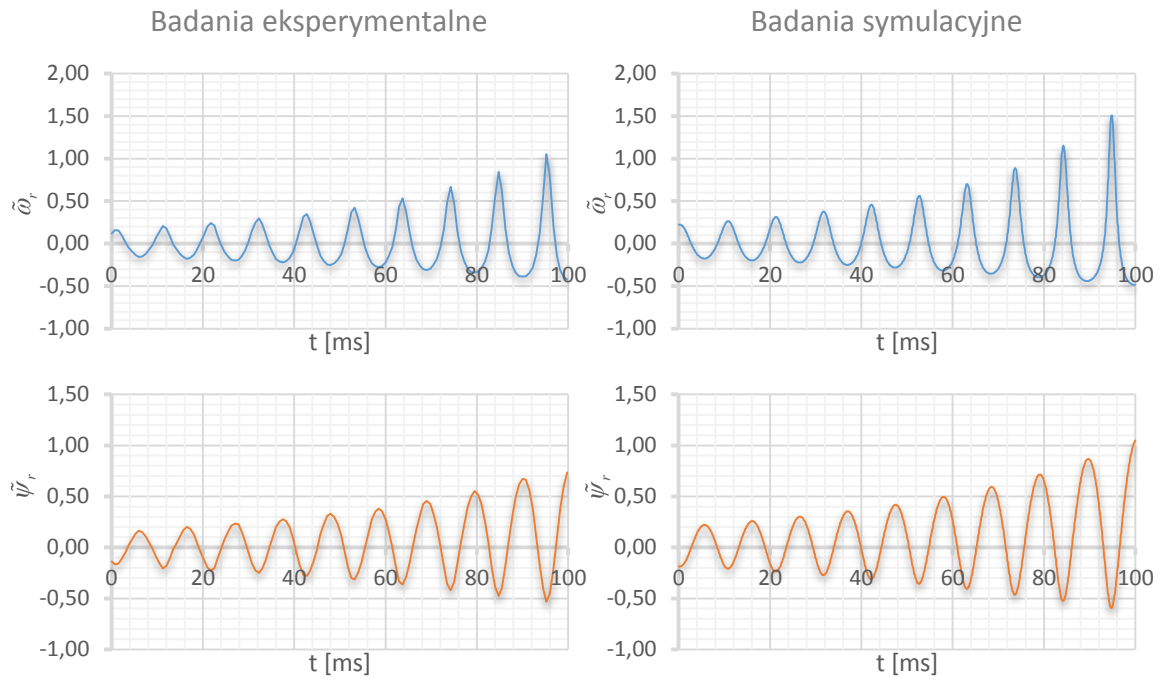


Rys. 5.6. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych dla wzmacnień zapewniających pracę obserwatora na granicy stabilności ($k_{23} = 4,07$)

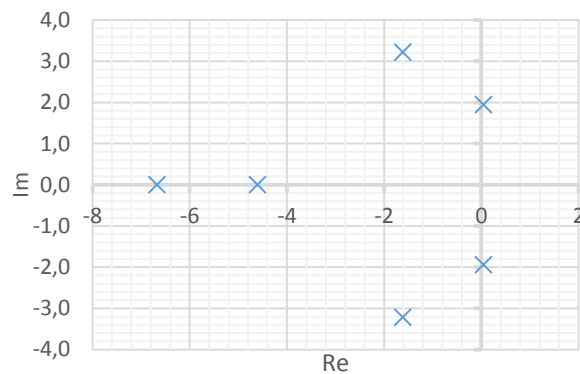


Rys. 5.7. Rozkład biegunów obserwatora dla wzmacnień zapewniających pracę obserwatora na granicy stabilności ($k_{23} = 4,07$)

Dla wzmacnienia k_{23} większego od wartości granicznej bieguny obserwatora przechodzą na prawą stronę płaszczyzny zespolonej, zatem układ jest niestabilny. Na rysunkach 5.8 oraz 5.9 zaprezentowano przypadek, w którym $k_{23} = 5,0$. Jedna z par biegunów posiada niewielką dodatnią część rzeczywistą, co skutkuje występowaniem narastającej amplitudy oscylacji.



Rys. 5.8. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora dla wzmocnień, przy których obserwator jest niestabilny ($k_{23} = 5,0$)



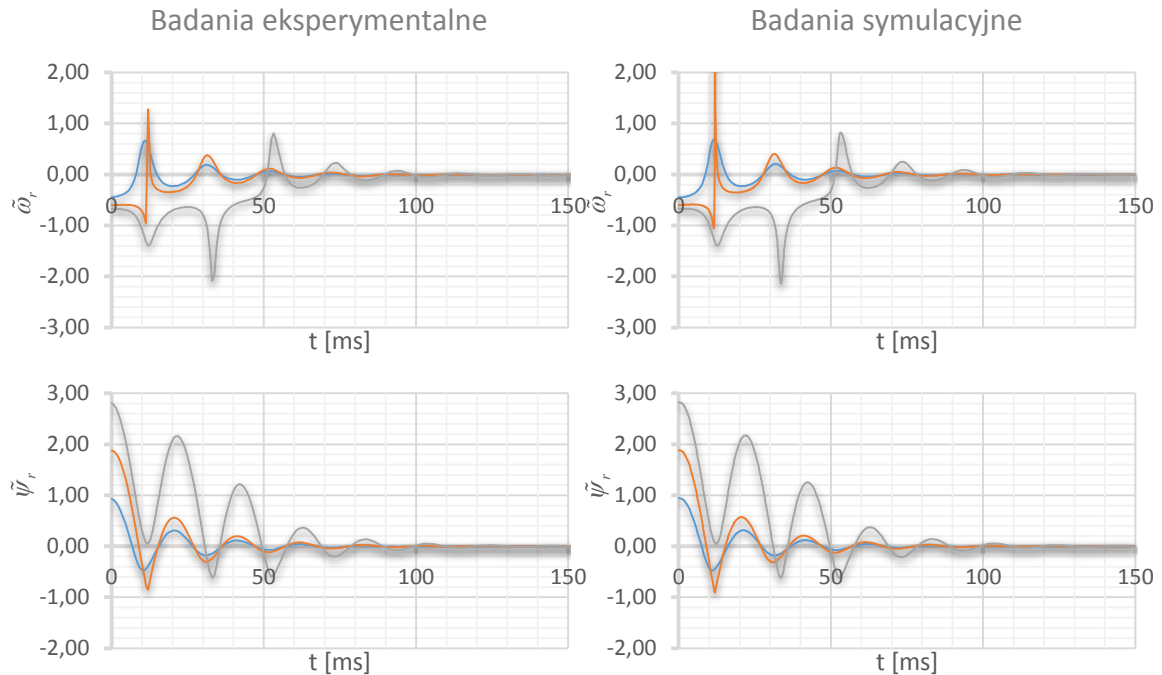
Rys. 5.9. Rozkład biegunów obserwatora dla wzmocnień, przy których obserwator jest niestabilny ($k_{23} = 5,0$)

Na podstawie przeprowadzonych badań wywnioskować można, że istnieje silna zależność między rozkładem biegunów uzyskanym ze zlinearyzowanych równań opisujących dynamikę błędów odtwarzania a jakością pracy obserwatora. Przede wszystkim ocenić można stabilność obserwatora w punkcie pracy, a także, analizując położenie biegunów dominujących, właściwości dynamiczne. Powiodło się przewidzenie wystąpienia oscylacji w stanach przejściowych odtwarzanych zmiennych oraz oszacowanie czasu ustalania obserwatora.

Położenie biegunów zgodnie z zaproponowanym algorytmem otrzymuje się dla zlinearyzowanych równań dynamiki błędów odtwarzania. Można przyjąć, że dla niewielkich odchyłek zmiennych od punktu pracy, w tym przypadku zerowych błędów odtwarzania, zlinearyzowane równania wiernie odzwierciedlają dynamikę obserwatora. Podczas pracy maszyny błędy estymacji nie przekraczają zwykle kilku procent wartości znamionowych. W przedstawionych w tym rozdziale badaniach w celu uzyskania stanów przejściowych wymuszane są błędy strumienia wirnika wynoszące około 20% wartości znamionowej, co wielokrotnie przekracza wartości błędów odtwarzania występujące w trakcie normalnej pracy silnika. Pomimo stosunkowo dużych błędów wnioski na temat dynamiki obserwatora wyciągnięte na podstawie zlinearyzowanych równań są zgodne z rzeczywistymi właściwościami układu.

W przypadku występowania dużych błędów estymacji wpływ nieliniowości rozszerzonego obserwatora prędkości może się nasilać. Zjawisko to jest zauważalne w przypadku przebiegów niestabilnego obserwatora, gdzie wraz ze wzrostem błędów odtwarzania strumienia wirnika oscylacje nieco odkształcają się od przebiegu sinusoidalnego oraz uzyskują szybciej rosnącą amplitudę dla dodatnich połówek niż dla ujemnych. Na rysunku 5.10 przedstawiono przebiegi błędów odtwarzania prędkości kątowej oraz modułu strumienia wirnika dla różnych błędów początkowych strumienia wirnika dla wzmocnienia $k_{23} = 1,2$. Rozkład biegunów dla tego przypadku przedstawiony został wcześniej na rysunku 5.5. Dominujące bieguny są sprzężoną parą biegunów o małym tłumieniu. Pozostałe bieguny oddalone są co najmniej kilkudziesięciokrotnie bardziej od osi urojonej, zatem ich wpływ na przebiegi zmiennych w stanach przejściowych jest znikomy. Przyjmując, że układ zlinearyzowany odzwierciedla dynamikę rzeczywistych równań błędów obserwatora, przebiegi w stanach przejściowych obserwatora powinny być zbliżone do stanów przejściowych liniowego członu oscylacyjnego. Jest to prawdą dla niewielkich błędów. Uzyskano oczekiwaną odpowiedź przy błędach wynoszących około 20% wartości znamionowej strumienia wirnika (rysunek 5.4), a nawet dla błędów sięgających 100% (niebieskie przebiegi na rysunku 5.10). W przypadku większych błędów przebiegi ulegają znacznemu odkształceniu. W przypadku pomarańczowego przebiegu (błąd początkowy strumienia około 200%) pierwsze przeregulowanie błędu modułu strumienia wirnika osiąga wartość bliską -1, co jest równoważne z odtwarzaniem niemal zerowego modułu strumienia. Prędkość wirnika obliczana jest z zależności (2.31), gdzie w mianowniku występuje kwadrat modułu strumienia wirnika, natomiast dzielenie przez niemal zerową wartość powoduje występowanie znacznych skoków błędów prędkości wirnika. Zmienna ta jest zatem znacznie

bardziej podatna na wpływ nieliniowości obserwatora. Odkształcenia te zauważalne są jednak jedynie w przypadku bardzo dużych błędów, rzędu kilkuset procent, natomiast obserwator w dalszym ciągu ma możliwość ustabilizowania się wokół zerowych błędów estymacji.



Rys. 5.10. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika przy różnych błędach początkowych

5.4. Wpływ punktów pracy maszyny na dynamikę obserwatora

5.4.1. Wprowadzenie

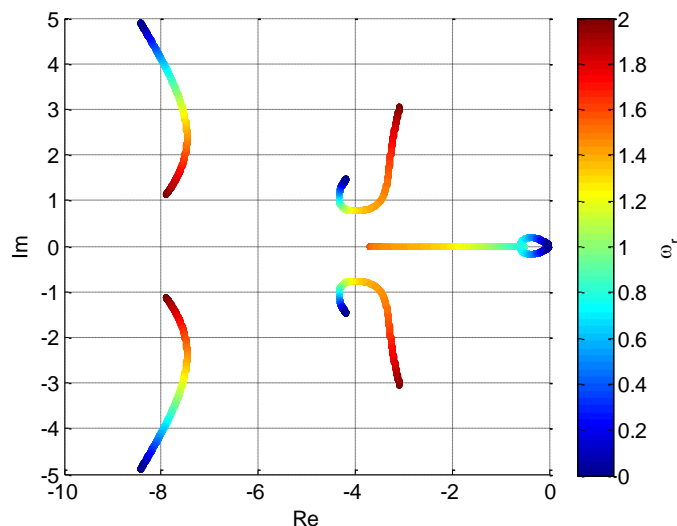
W rozdziale 3.3 zwrócono uwagę na fakt, że elementy macierzy \mathbf{A} opisującej dynamikę zlinearyzowanych równań błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora zależą nie tylko od parametrów maszyny oraz wzmocnień obserwatora, ale także od punktu pracy maszyny. W wyrazach macierzy występują wielkości zależące od rzeczywistych wartości prędkości kątowej wirnika, modułu strumienia wirnika oraz momentu obciążenia. Oznacza to, że wielkości te mają wpływ na położenie biegunów obserwatora, a co za tym idzie na jego dynamikę.

W niniejszym rozdziale przedstawione zostały wyniki badań obrazujące wpływ zmian warunków pracy maszyny na położenie biegunów obserwatora. Rozpatrywane są dwa

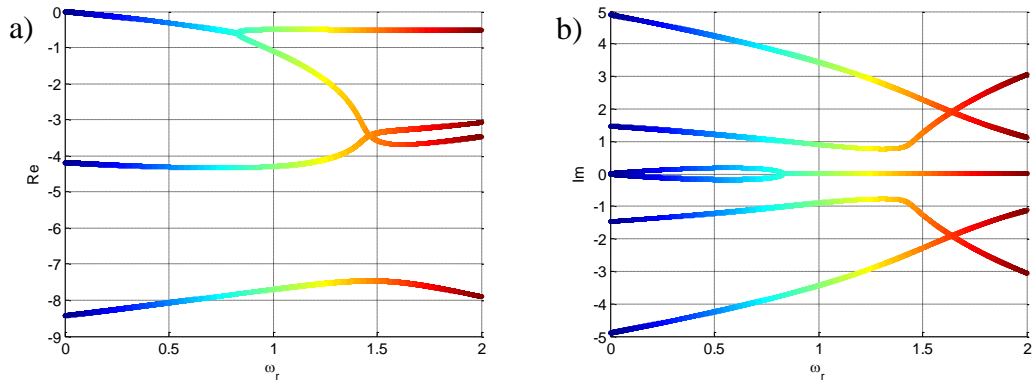
przypadki. Wyniki uzyskane przy stałych wzmocnieniach porównane zostały z właściwościami obserwatora otrzymanego przy wykorzystaniu metody modyfikacji zestawów wzmocnień opisanej w podrozdziale 3.6. Analizowany jest zakres prędkości od wartości bliskich zera do wartości sięgających dwukrotności prędkości znamionowej. Ze względu na brak możliwości odtwarzania prędkości wirnika przy zerowej pulsacji napięcia stojana [2], [55] w badaniach rozpatrywane są jedynie punkty pracy maszyny spełniające warunek $\omega_s \neq 0$. W praktyce w bezczujnikowych układach regulacji unika się pracy z zerową pulsacją napięcia, zatem wykluczenie omawianego punktu pracy nie ma istotnego wpływu na wnioski dotyczące jakości odtwarzania w rzeczywistym napędzie.

5.4.2. Wpływ prędkości wirnika

Na rysunku 5.11 przedstawiono rozkład wartości własnych macierzy \mathbf{A} na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika od 0 do 2 przy zastosowaniu stałych wartości wzmocnień \mathbf{K}_s zdefiniowanych w załączniku B.1. Przyjęto wartość modułu wektora strumienia wirnika $\psi_r = 0,94$ oraz moment obciążenia $m_o = 0,3$. Dla prędkości większych od znamionowych uwzględniono spadek wartości modułu wektora strumienia wirnika. W celu poprawy czytelności oraz umożliwienia dokładniejszego określenia położenia biegunów dla danej prędkości, na rysunku 5.12 przedstawiono zmiany części rzeczywistych oraz urojonych biegunów w funkcji prędkości wirnika.

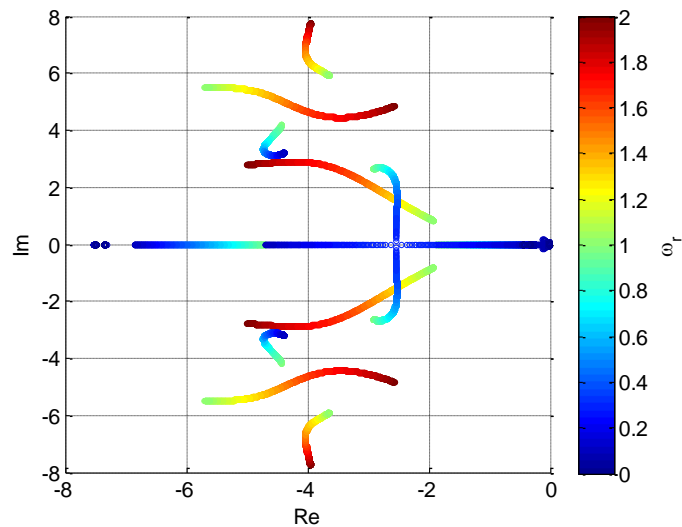


Rys. 5.11. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s

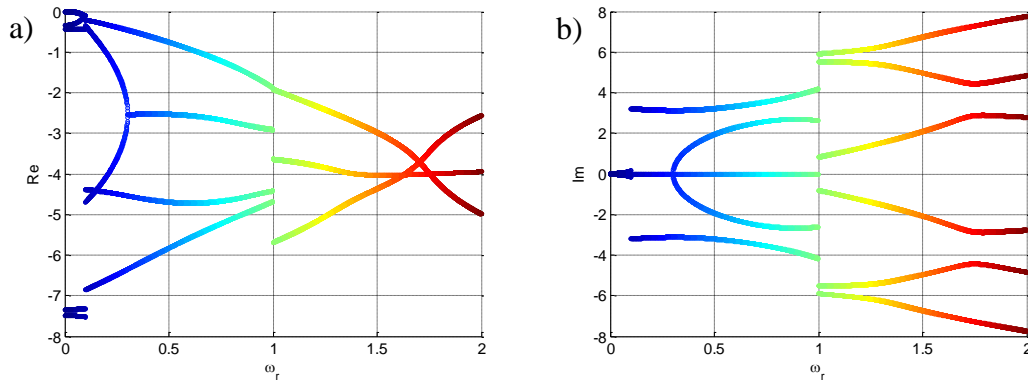


Rys. 5.12. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s

Położenia biegunów przy zastosowaniu algorytmu modyfikacji wzmocnień opisanego w rozdziale 3.6 przedstawione zostały na rysunkach 5.13 oraz 5.14. Rozpatrywane są trzy zestawy wzmocnień: \mathbf{K}_{z0} dla ω_r mniejszych od 0,1; \mathbf{K}_{z1} dla ω_r większej od 0,1, ale mniejszej od 1,0; \mathbf{K}_{z2} dla ω_r większej od 1,0. Ze względu na zmiany zestawów wzmocnień po przejściu przez prędkości graniczne charakterystyki są nieciągłe.



Rys. 5.13. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika dla adaptacyjnego zestawu wzmocnień



Rys. 5.14. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji prędkości wirnika dla adaptacyjnego zestawu wzmacnień

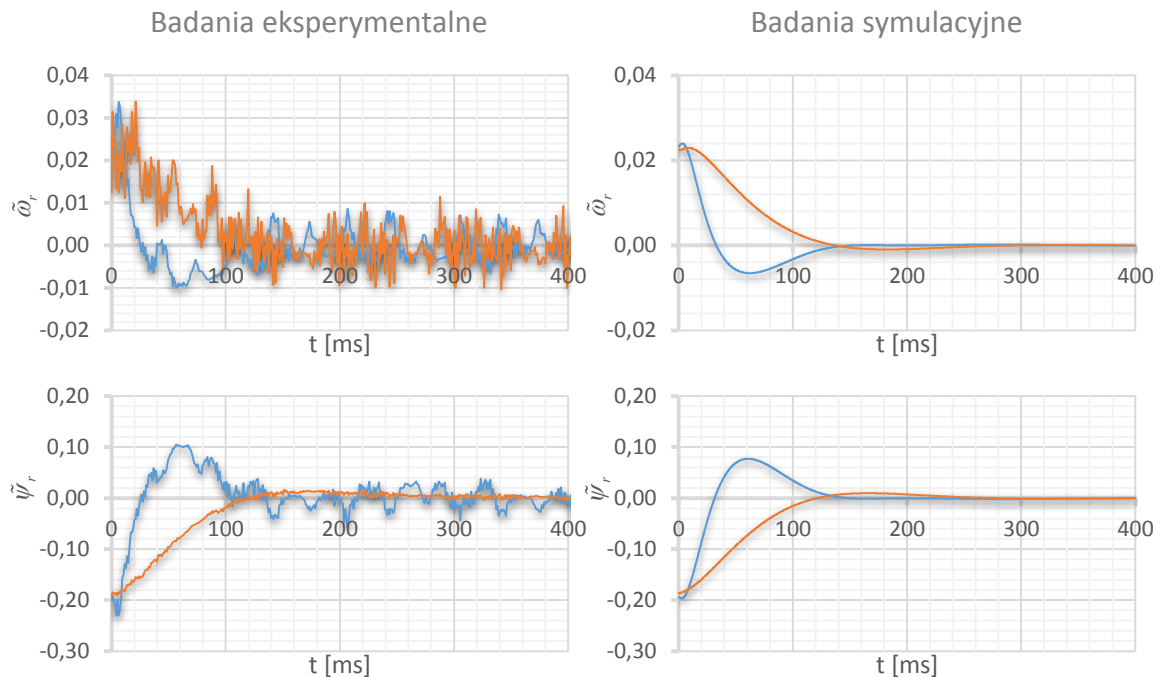
Macierz \mathbf{A} ma sześć wierszy oraz kolumn, zatem posiada ona sześć wartości własnych. Dla pewnych prędkości nie wszystkie bieguny są widoczne na płaszczyźnie zespolonej. Ukryte przez część charakterystyki położenia biegunów odczytać można z rysunków 5.12 oraz 5.14.

Jak wynika z powyższych rysunków, właściwości obserwatora zależą od prędkości wirnika. Bieguny wraz ze wzrostem prędkości znacznie zmieniają swoje położenie. Zmiany prędkości kątowej wirnika mają istotny wpływ na bieguny dominujące, czyli wartości własne macierzy o największej części rzeczywistej. Oznacza to, że wraz ze wzrostem prędkości w znacznym stopniu zmieniać się będzie także wskaźnik jakości opisany w rozdziale 3.4. Należy zauważyć, że wraz ze spadkiem prędkości część rzeczywista biegunów dominujących zbliża się do zera. Dla małych prędkości wirnika wydłuża się zatem czas ustalania zmiennych obserwatora.

W przypadku, gdy stosowany jest jeden zestaw wzmacnień \mathbf{K}_s dla całego zakresu prędkości, część rzeczywista biegunu dominującego maleje wraz z przyspieszaniem maszyny aż do prędkości wynoszącej około 0,8 (rysunek 5.12). Powyżej tej wartości dalszy wzrost prędkości skutkuje lekkim przybliżeniem się biegunu dominującego do osi urojonej, a następnie jego część rzeczywista pozostaje niemal stała. W przypadku wykorzystania zmienianych zestawów wzmacnień (rysunek 5.14), wraz ze wzrostem prędkości bieguny dominujące oddalają się od osi urojonej. Po przekroczeniu prędkości 1,0 zestaw wzmacnień zostaje zmieniony z \mathbf{K}_{z1} na nowy zestaw \mathbf{K}_{z2} przystosowany do pracy w zakresie dużych prędkości. W przedziale tym części rzeczywiste biegunów w dalszym ciągu oddalają się od osi urojonej wraz ze wzrostem prędkości, aż do prędkości wynoszącej około 1,7. Można wywnioskować, że zastosowanie zmienianego zestawu wzmacnień charakteryzuje się krótszymi stanami przejściowymi obserwatora, zwłaszcza dla dużych prędkości.

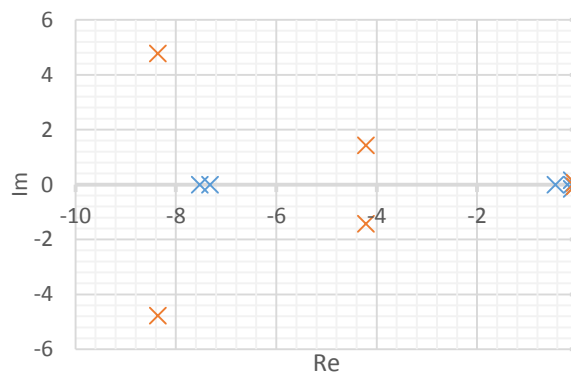
Porównania rzeczywistych właściwości obserwatora dla różnych wartości prędkości dokonano poprzez analizę odpowiedzi obserwatora na skokowe wymuszenie błędu modułu odtwarzanego strumienia wirnika. Rozpatrywane są cztery wartości prędkości wirnika $\omega_r = \{0,1; 0,5; 0,9; 2,0\}$. Zbadano wpływ prędkości wirnika oraz zastosowanych wzmocnień na czas ustalania obserwatora oraz występowanie oscylacji.

Na rysunkach 5.15 oraz 5.16 przedstawiono przebiegi błędów odtwarzania przy małej prędkości, dla zmienianego zestawu wzmocnień (niebieskie przebiegi oraz bieguny) oraz stałego zestawu \mathbf{K}_s (pomarańczowe przebiegi oraz bieguny). W przypadku zmienianych wzmocnień dla małych prędkości przyjęty został zestaw \mathbf{K}_{z0} .



Rys. 5.15. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**:

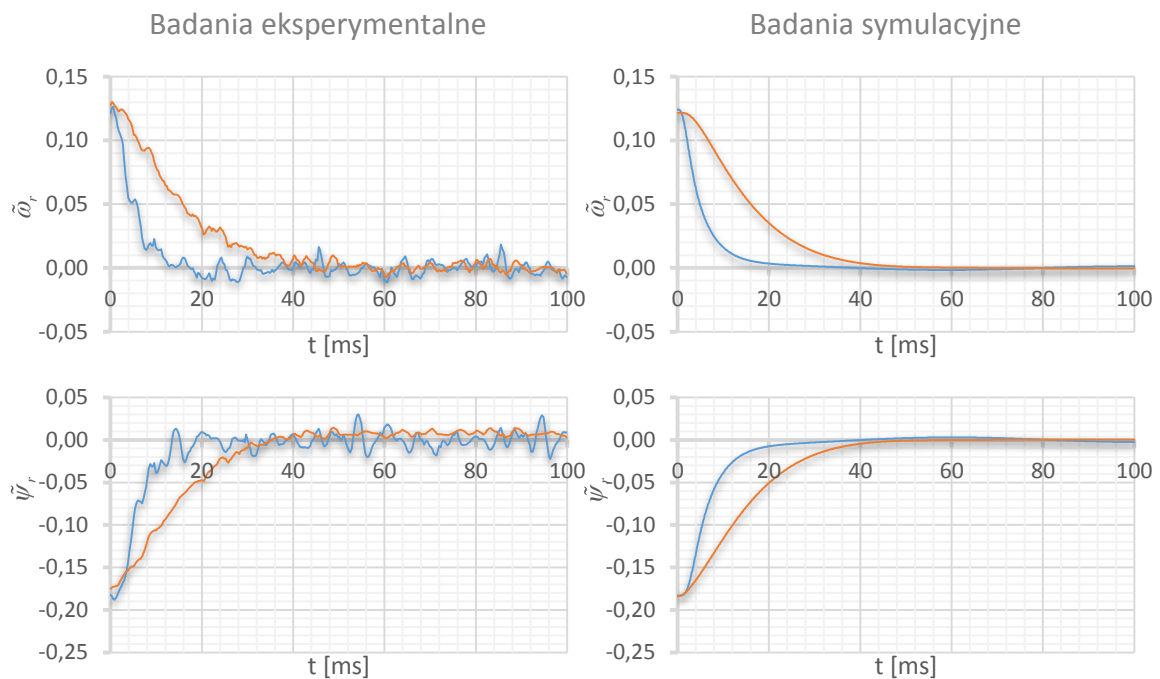
$$\omega_r = 0,1; m_o = 0,3; \psi_r = 0,94$$



Rys. 5.16. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**: $\omega_r = 0,1; m_o = 0,3; \psi_r = 0,94$

Dla małych prędkości wirnika w przypadku obydwu zestawów wzmacnień dostrzegalne są oscylacje w stanach przejściowych obserwatora, co jest uzasadnione występowaniem urojonych par biegunów dominujących. Zestaw wzmacnień \mathbf{K}_s charakteryzuje się lepszym tłumieniem, jednak nieco dłuższym czasem ustalania. Należy także pamiętać, że zestaw wzmacnień \mathbf{K}_{z0} przystosowany jest do pracy zarówno przy dodatniej jak i ujemnej prędkości. W przypadku zestawu \mathbf{K}_s konieczna jest natomiast modyfikacja wzmacnień po zmianie kierunku obrotów.

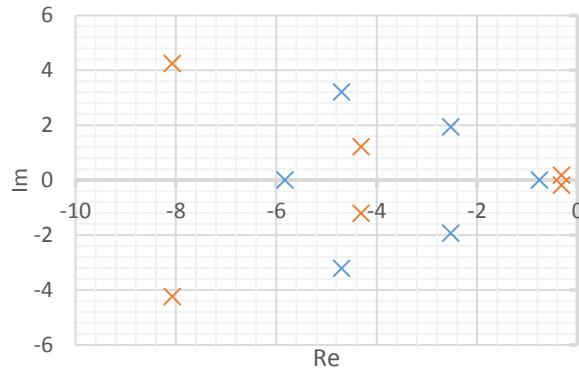
Właściwości obserwatora w stanach przejściowych dla prędkości $\omega_r = 0,5$ przedstawione zostały na rysunkach 5.17 oraz 5.18. Przy użyciu zmienianych zestawów wzmacnień dla tej prędkości, stosowane są wzmacnienia \mathbf{K}_{z1} . Biegun dominujący przy wykorzystaniu tego zestawu znajduje się kilkakrotnie dalej niż w przypadku stałego zestawu \mathbf{K}_s . Lepszą dynamikę obserwatora dla wzmacnień \mathbf{K}_{z1} potwierdzają przebiegi, na których wyraźnie widać przewagę stosowania tego zestawu pod względem czasu ustalania obserwatora.



Rys. 5.17. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla

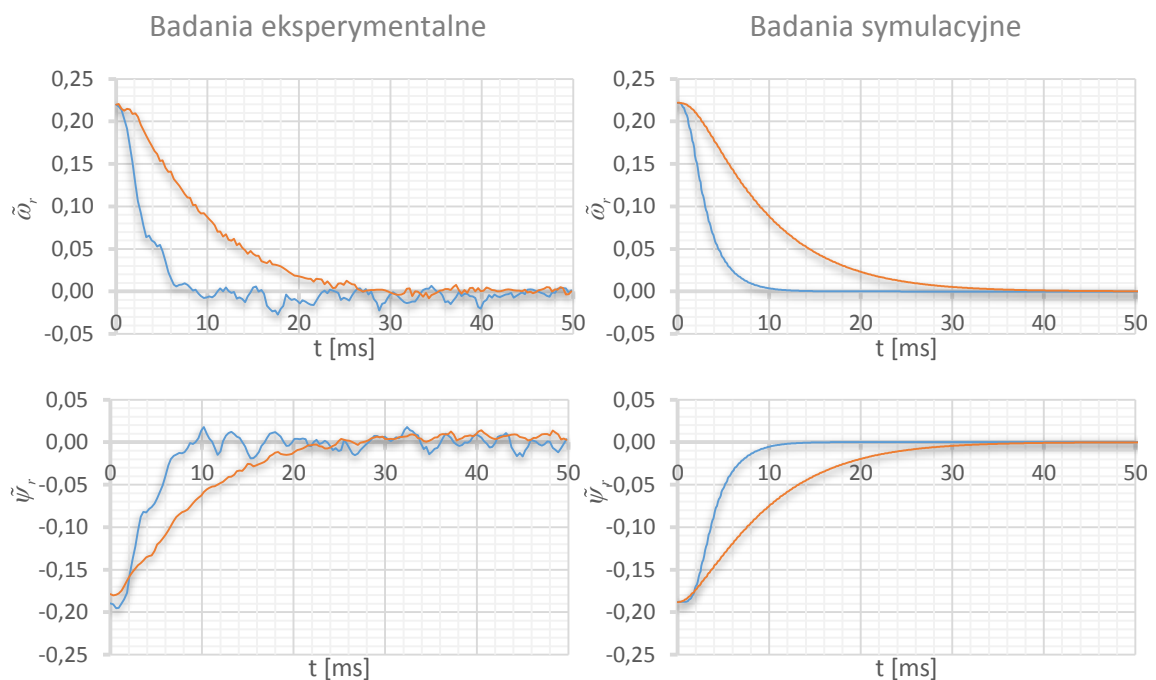
zmienianego zestawu wzmacnień oraz stałego zestawu wzmacnień:

$$\omega_r = 0,5; m_o = 0,3; \psi_r = 0,94$$

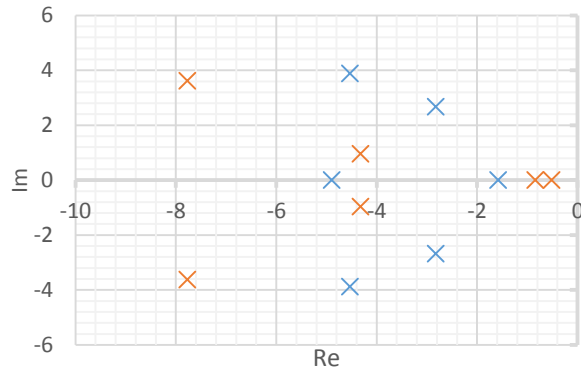


Rys. 5.18. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**: $\omega_r = 0,5$; $m_o = 0,3$; $\psi_r = 0,94$

Na rysunkach 5.19 oraz 5.20 rozpatrywany jest przypadek, w którym prędkość wirnika jest bliska wartości znamionowej. Zwiększenie obrotów maszyny doprowadziło do skrócenia czasu trwania stanów przejściowych obserwatora do około 10 ms w przypadku adaptacyjnego zestawu wzmocnień oraz nieco ponad 30 ms przy stosowaniu stałych wzmocnień. Rzeczywiste bieguny dominujące w obydwu przypadkach świadczą o braku występowania oscylacji.

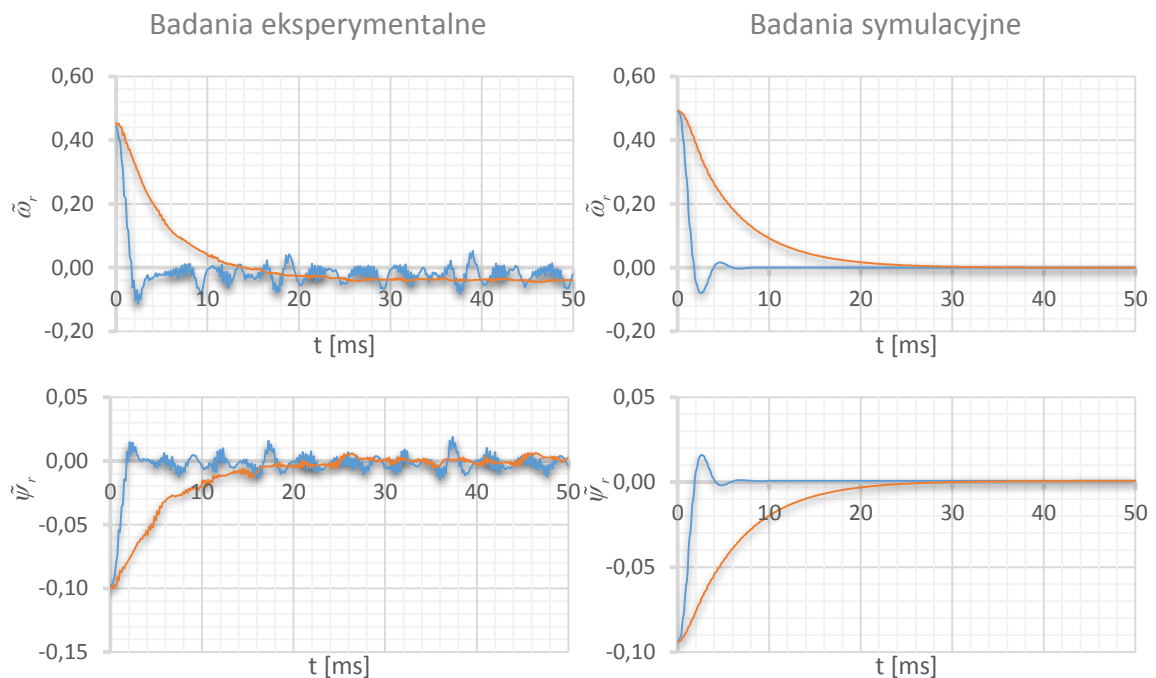


Rys. 5.19. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**:
 $\omega_r = 0,9$; $m_o = 0,3$; $\psi_r = 0,94$



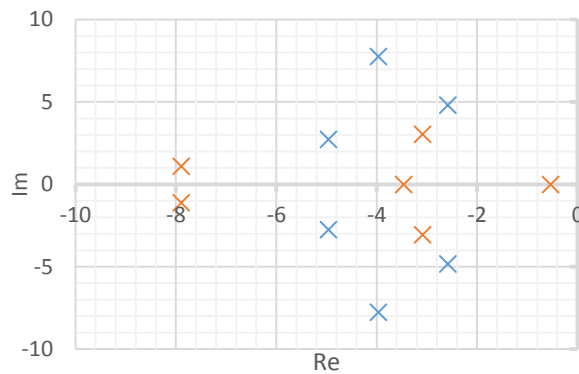
Rys. 5.20. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**: $\omega_r = 0,9$; $m_o = 0,3$; $\psi_r = 0,94$

Korzystając ze zmienianych wzmacnień dla zakresu osłabiania pola przyjmuje się zestaw \mathbf{K}_{z2} . Na rysunkach 5.21 oraz 5.22 przedstawiono przebiegi stanów przejściowych obserwatora i rozkład biegunów dla prędkości wirnika $\omega_r = 2,0$ oraz strumienia wirnika równego 0,5. Przy zastosowaniu stałego zestawu wzmacnień \mathbf{K}_s czas ustalania uległ niewielkiemu skróceniu w porównaniu do przypadku, w którym prędkość wirnika wynosiła 0,9. Korzystając z zestawu \mathbf{K}_{z2} uzyskano niemal dwukrotnie krótszy czas ustalania, wynoszący około 6 ms. Bieguny dominujące w tym przypadku posiadają niezerowe części urojone, na tyle duże, że wprowadzają oscylacje w przebiegach błędów.



Rys. 5.21. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**:

$$\omega_r = 2,0; m_o = 0,0; \psi_r = 0,47$$

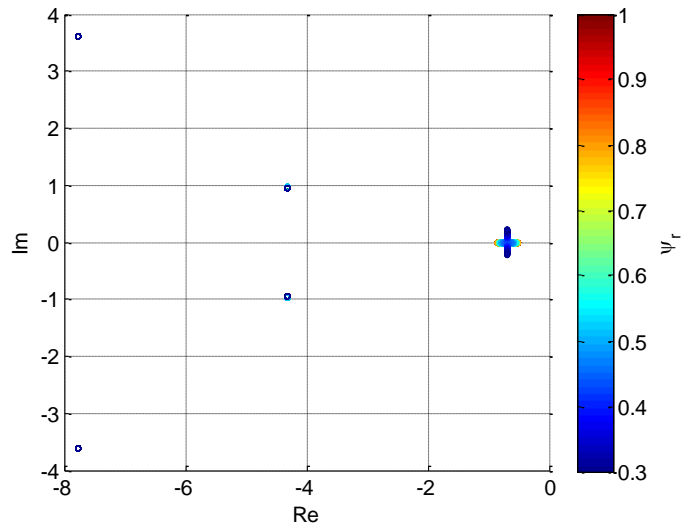


Rys. 5.22. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmiennego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**: $\omega_r = 2,0$; $m_o = 0,0$; $\psi_r = 0,47$

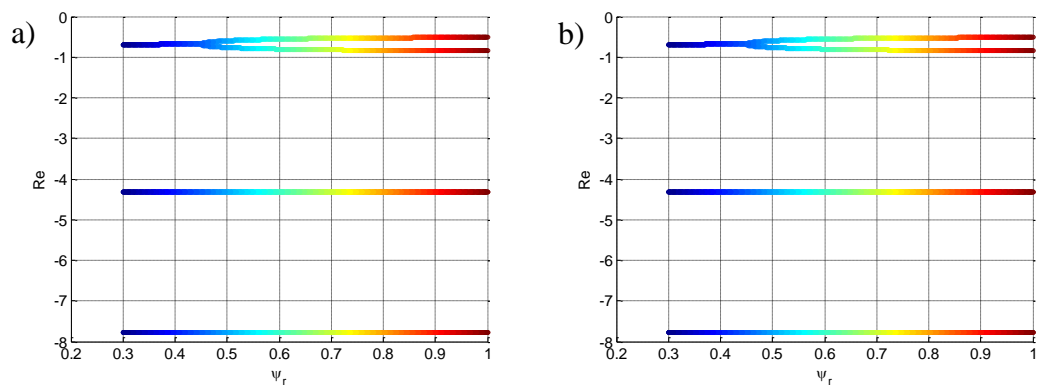
W rozdziale 5.2 wykazano, że przyjęcie węższych przedziałów prędkości podczas doboru wzmocnień umożliwia uzyskanie lepszych wartości wskaźnika jakości poprzez zapewnienie lepszych właściwości dynamicznych obserwatora. Potwierdzają to przeprowadzone badania eksperymentalne oraz symulacyjne, z których wynika, że stany przejściowe zanikają szybciej przy zastosowaniu zmiennych zestawów wzmocnień dobieranych dla mniejszych zakresów prędkości niż dla stałego zestawu wzmocnień dla całego dopuszczalnego przedziału prędkości.

5.4.3. Wpływ strumienia wirnika

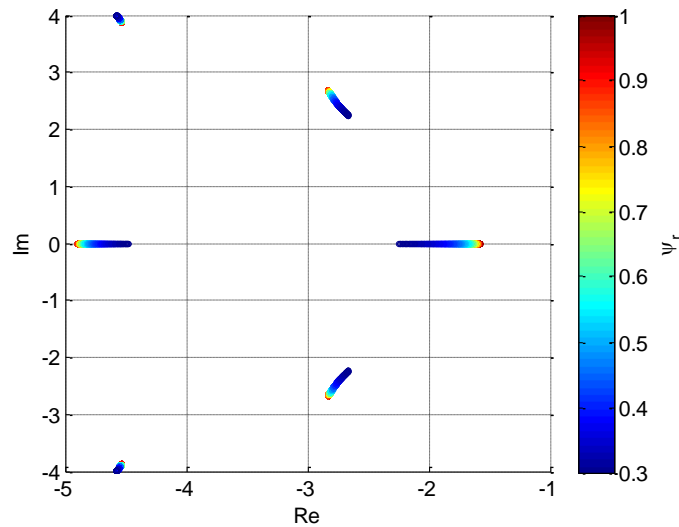
Wpływ zmian modułu strumienia wirnika na położenie biegunów obserwatora dla różnych wariantów wzmocnień przedstawiono na rysunkach 5.23 - 5.26. Podczas wyznaczania wartości własnych macierzy \mathbf{A} przyjęto prędkość wirowania wektora napięcia stojana $\omega_s = 0,9$ oraz moment obciążenia 0,3. Przy zastosowaniu zmiennego zestawu wzmocnień dla rozpatrywanych prędkości aktywny jest zestaw wzmocnień \mathbf{K}_{z1} .



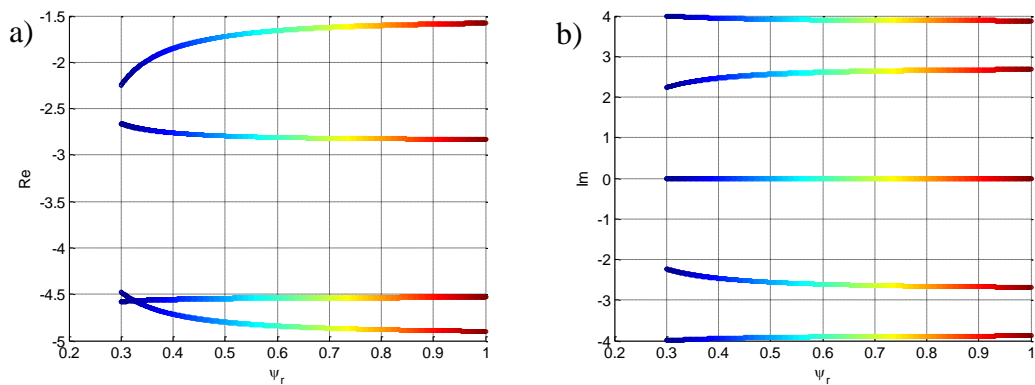
Rys. 5.23. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach modułu strumienia wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



Rys. 5.24. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji modułu strumienia wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



Rys. 5.25. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach modułu strumienia wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z1}

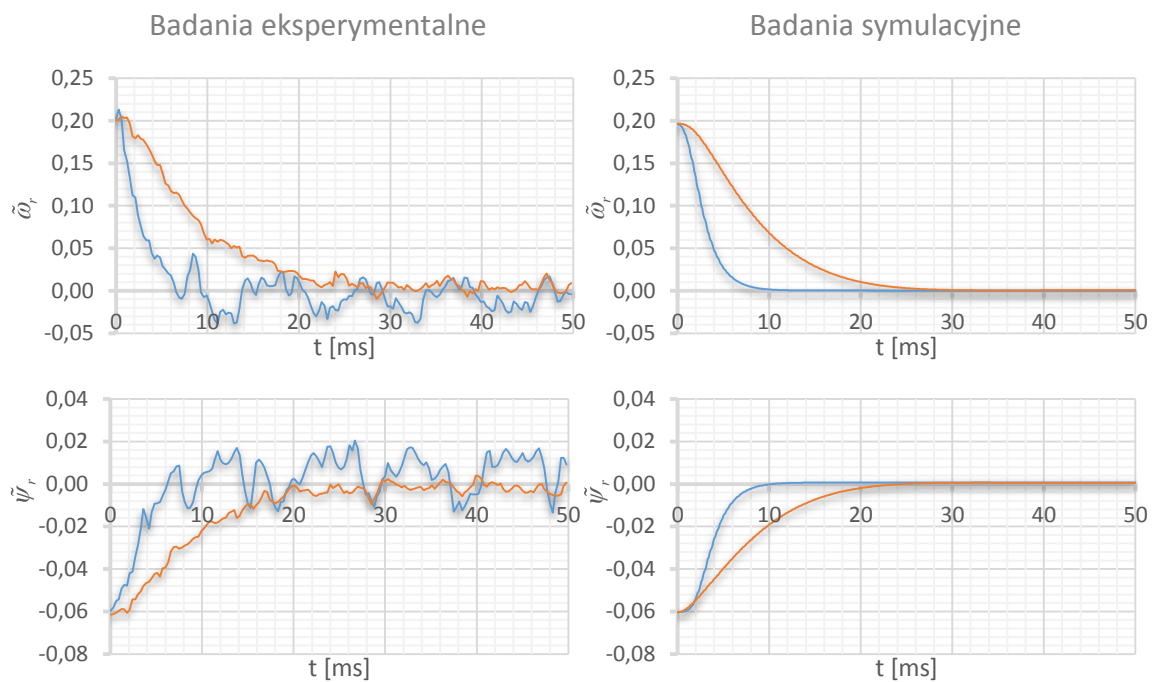


Rys. 5.26. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji modułu strumienia wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z1}

W przypadku dużych wartości modułu wektora strumienia wirnika zmiany tej wielkości nie mają znacznego wpływu na położenie biegunów. Dla obydwu zestawów wzmocnień wartości własne macierzy \mathbf{A} ulegają zauważalnym zmianom dopiero przy małych wartościach strumienia wirnika i zmiany te wpływają pozytywnie na dynamikę obserwatora. W praktyce podczas pracy maszyny poza zakresem osłabiania pola moduł strumienia wirnika utrzymywany jest zwykle na stałym poziomie, bliskim wartości znamionowej. W pracy [60] zaproponowano metody sterowania maszyną indukcyjną, w których ze względów ekonomicznych niedociążony silnik pracuje przy obniżonych wartościach strumienia wirnika. Z rysunków 5.23 oraz 5.25 odczytać można, że właściwości obserwatora praktycznie nie zmieniają się, gdy moduł strumienia wirnika jest większy od

0,5. Dopiero dla wartości mniejszych od 0,5 bieguny dominujące zaczynają się przemieszczać i zbliżają się do osi urojonej. Można zatem przyjąć, że rozszerzony obserwator może być stosowany także we wspomnianych wcześniej układach regulacji zapewniających optymalną pod względem ekonomicznym pracę maszyny. Nie ma wówczas konieczności korekcy wartości wzmacnień w funkcji modułu wektora strumienia wirnika.

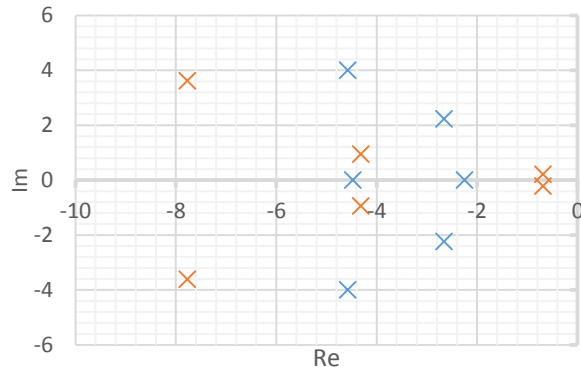
Na rysunkach 5.27 - 5.30 przedstawione zostały przebiegi błędów odtwarzania oraz rozkłady biegunów uzyskane dla skrajnych wartości strumienia wirnika, czyli wartości znamionowej oraz strumienia obniżonego do wartości nieco większej od wartości, przy której maszyna była w stanie wygenerować moment 0,3. Zgodnie z oczekiwaniami właściwości dynamiczne obserwatora nie uległy znacznym zmianom. Podczas pracy z obniżonym strumieniem obserwator odtwarza zmienne nieznacznie szybciej niż w przypadku znamionowego strumienia.



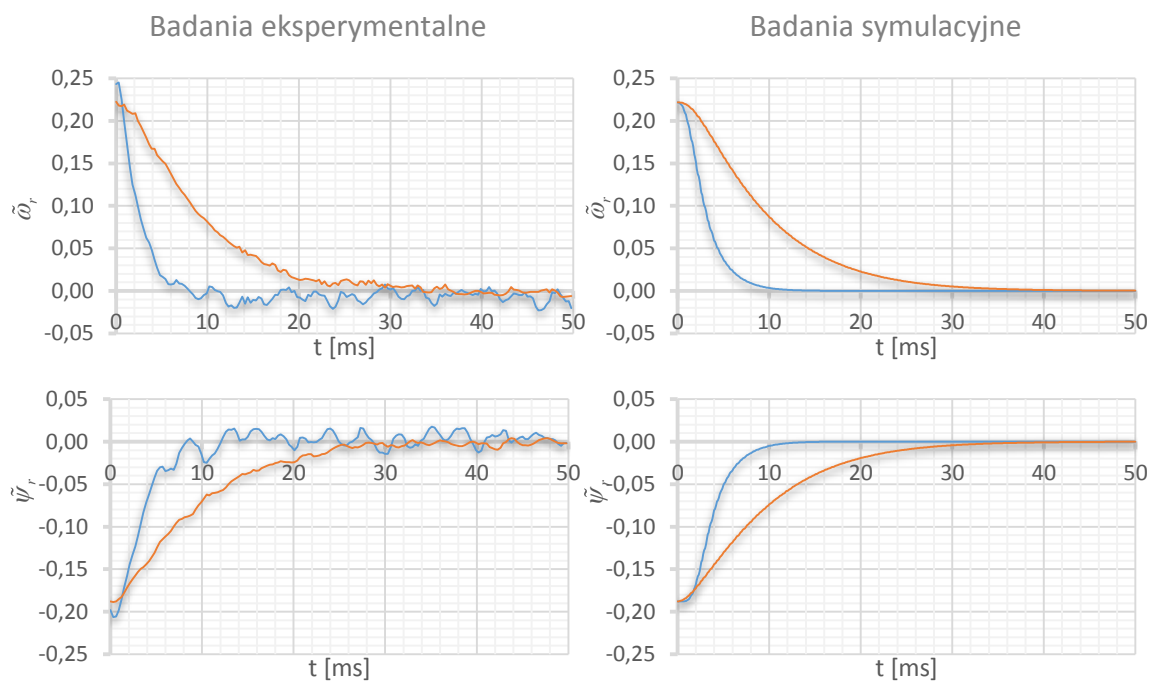
Rys. 5.27. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla

zmienianego zestawu wzmacnień oraz stałego zestawu wzmacnień:

$$\omega_s = 0,9; m_o = 0,3; \psi_r = \mathbf{0,3}$$

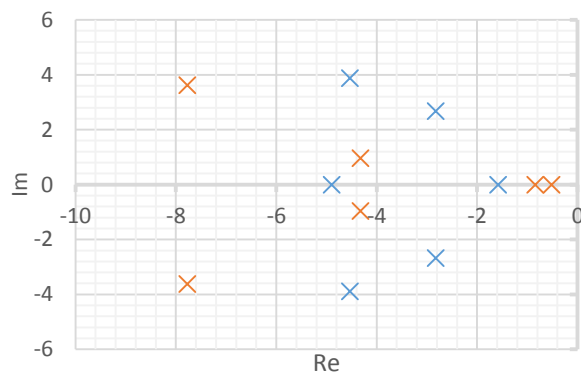


Rys. 5.28. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**: $\omega_s = 0,9$; $m_o = 0,3$; $\psi_r = 0,3$



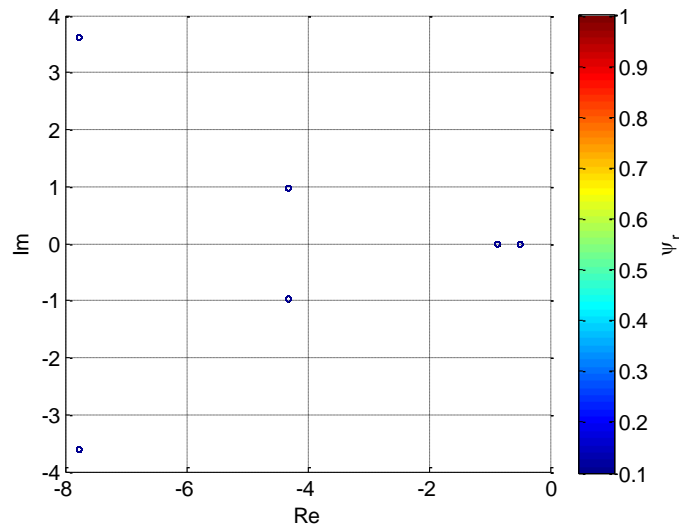
Rys. 5.29. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**:

$$\omega_s = 0,9; m_o = 0,3; \psi_r = 0,94$$

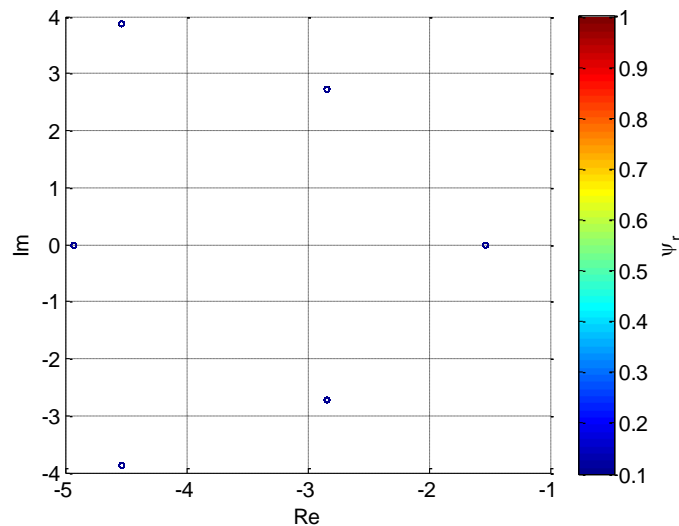


Rys. 5.30. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmocnień** oraz **stałego zestawu wzmocnień**: $\omega_s = 0,9$; $m_o = 0,3$; $\psi_r = 0,94$

Wraz ze zmniejszaniem momentu obciążenia wpływ zmian modułu strumienia wirnika na rozmieszczenie biegunów obserwatora maleje. Na rysunkach 5.31 oraz 5.32 przedstawiono rozkłady biegunów w przypadku, gdy moment obciążenia wynosi zero. Wartości własne macierzy \mathbf{A} pozostają wówczas stałe bez względu na wartość modułu wektora strumienia wirnika.



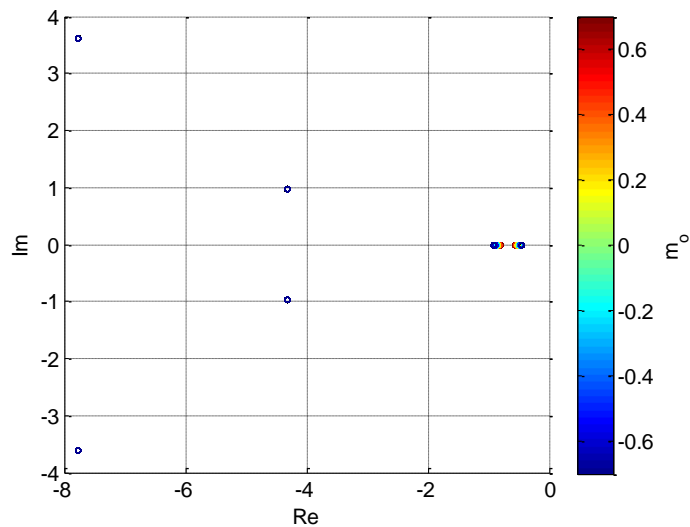
Rys. 5.31. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach modułu strumienia wirnika maszyny nieobciążonej dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



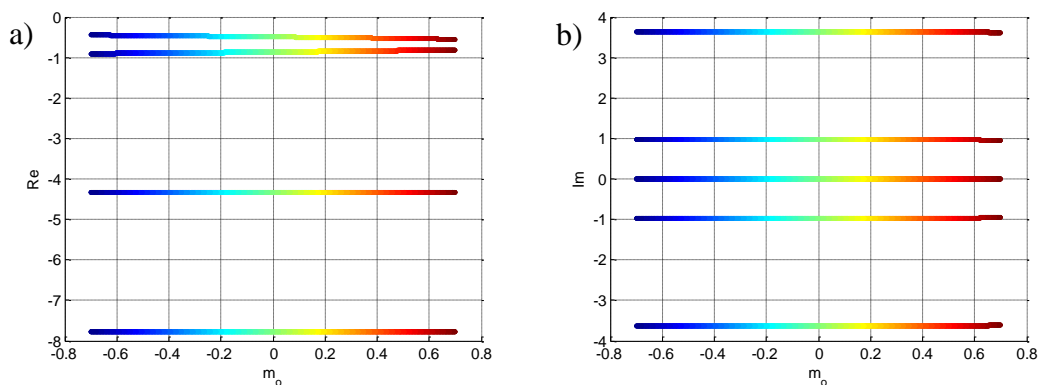
Rys. 5.32. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach modułu strumienia wirnika maszyny nieobciążonej dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z1}

5.4.4. Wpływ obciążenia

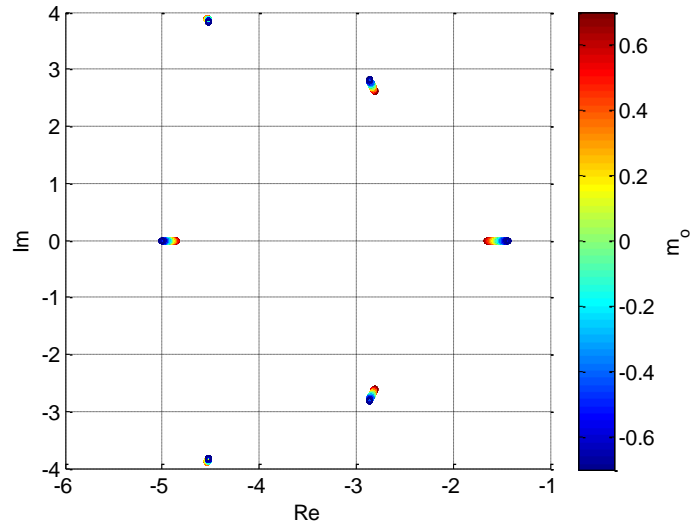
Wpływ zmian momentu obciążenia na rozkład biegunów obserwatora zobrazowany został na rysunkach 5.33 - 5.36. Przyjęto znamionową wartość modułu wektora strumienia wirnika oraz prędkość kątową wirnika wynoszącą 0,9. Z rysunków wynika, że zmiany momentu obciążenia w takich warunkach mają niewielki wpływ na właściwości dynamiczne rozszerzonego obserwatora. Rozpatrywany zakres zmian momentu obejmuje zarówno pracę silnikową jak i generatorową maszyny.



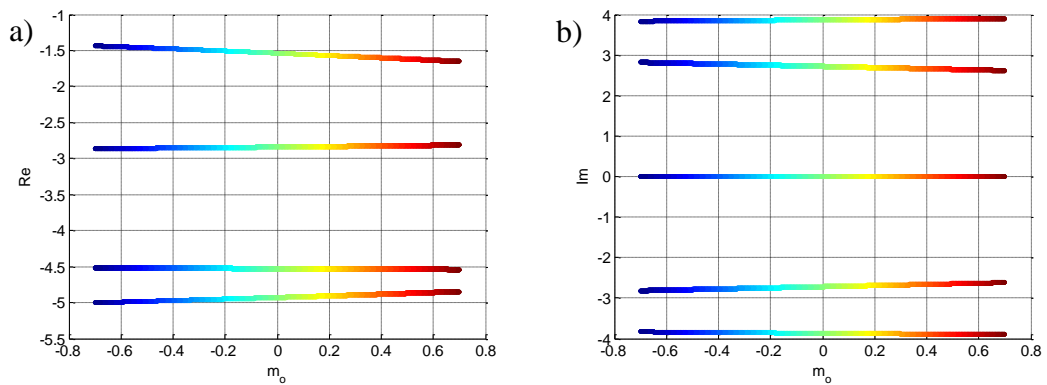
Rys. 5.33. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach momentu obciążenia dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



Rys. 5.34. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji momentu obciążenia dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s

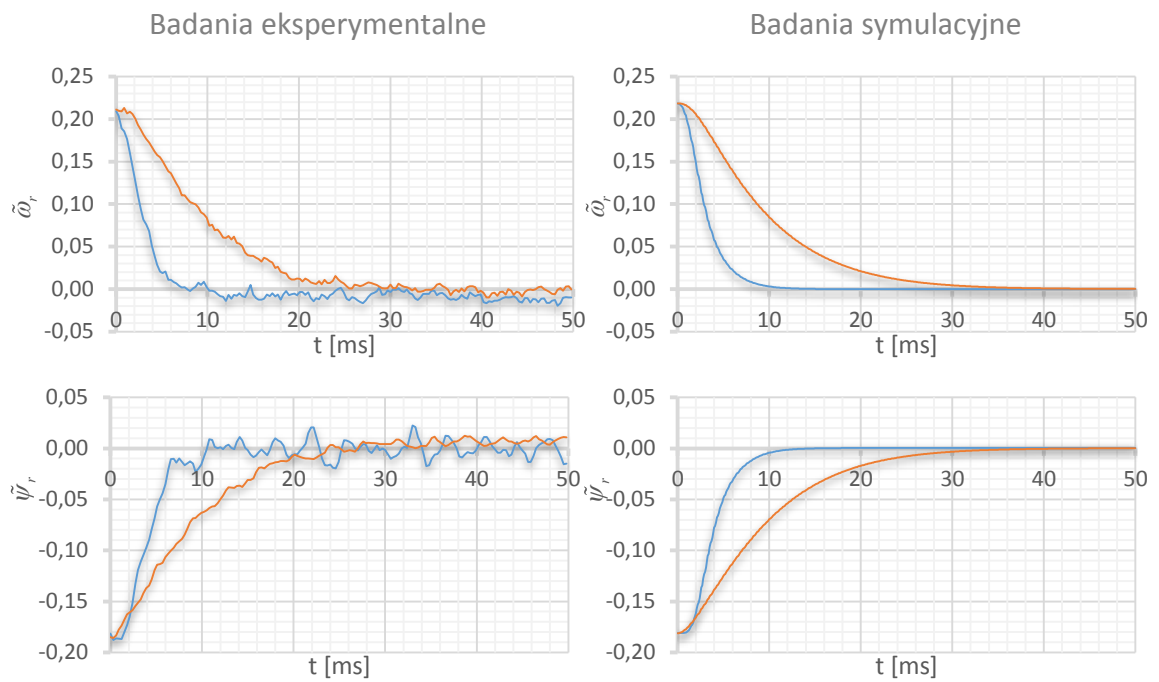


Rys. 5.35. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach momentu obciążenia dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z1}



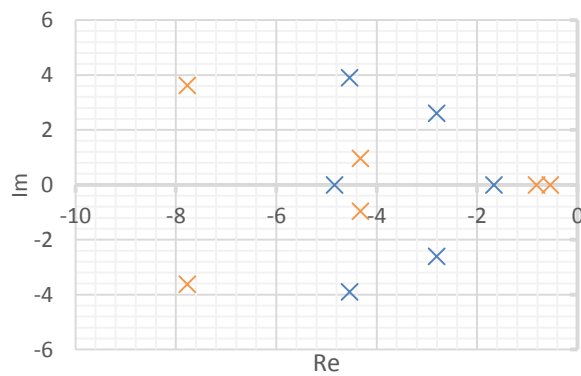
Rys. 5.36. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji momentu obciążenia dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z1}

Przebiegi błędów odtwarzania w stanach przejściowych oraz bieguny obserwatora przedstawiono na rysunkach 5.37 - 5.42. Porównano właściwości obserwatora podczas pracy silnikowej przy znamionowym obciążeniu, bez obciążenia, a także podczas pracy generatorowej. Bez względu na charakter obciążenia uzyskano zbliżone przebiegi. Można zatem wywnioskować, że nie ma konieczności modyfikacji wartości wzmocnień obserwatora w zależności od rodzaju pracy czy wartości obciążenia maszyny.

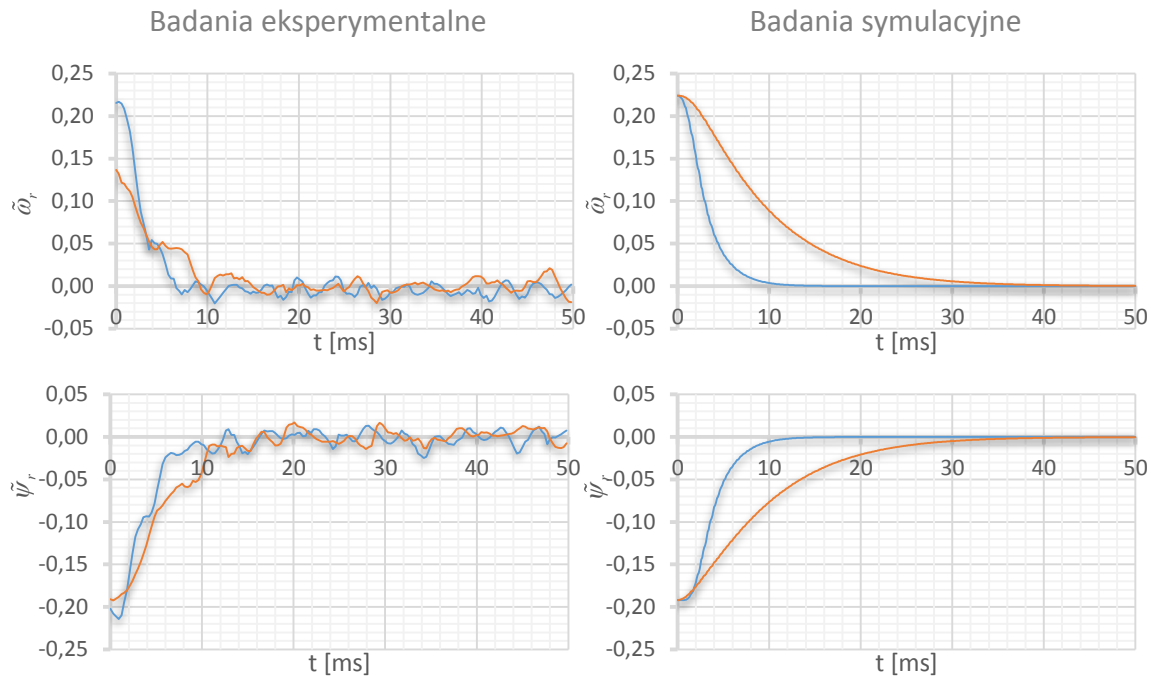


Rys. 5.37. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**:

$$\omega_r = 0,9; m_o = \mathbf{0,7}; \psi_r = 0,94$$

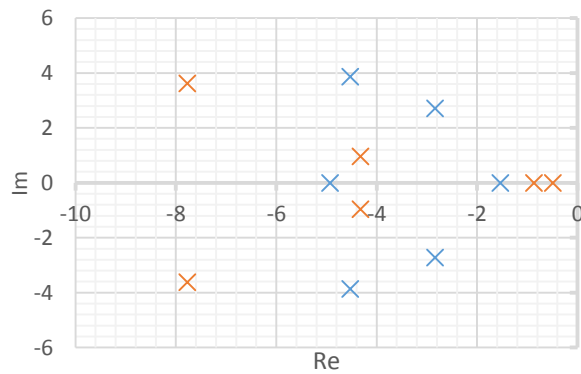


Rys. 5.38. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**: $\omega_r = 0,9; m_o = \mathbf{0,7}; \psi_r = 0,94$

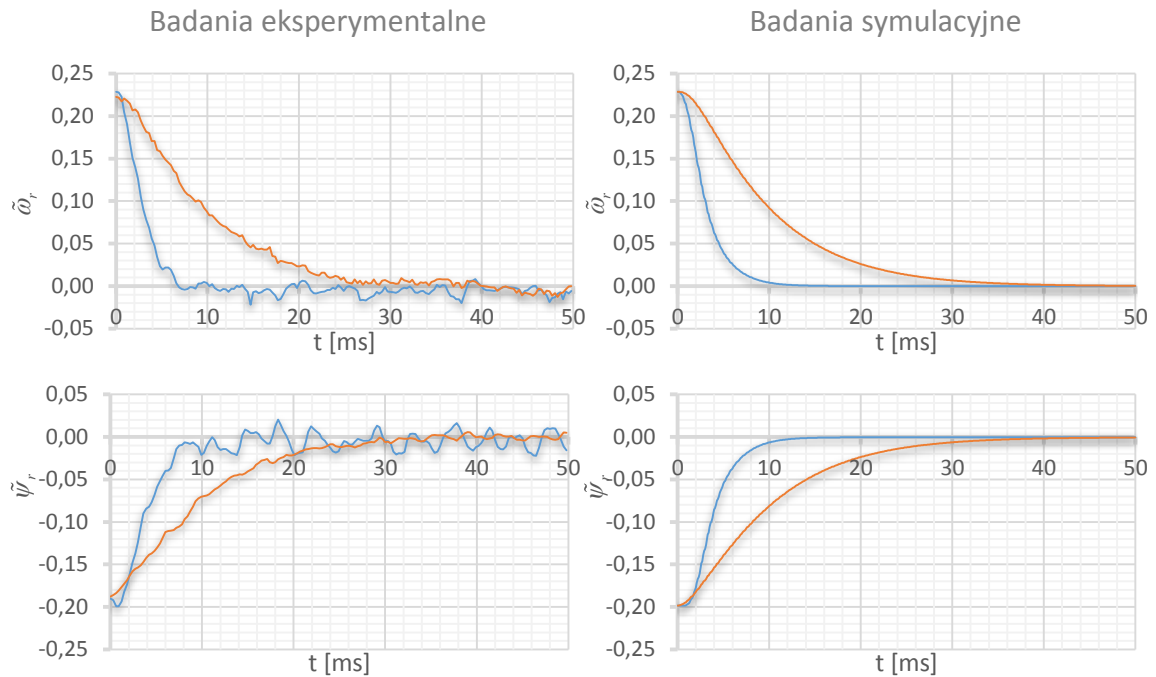


Rys. 5.39. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**:

$$\omega_r = 0,9; m_o = \mathbf{0},\mathbf{0}; \psi_r = 0,94$$

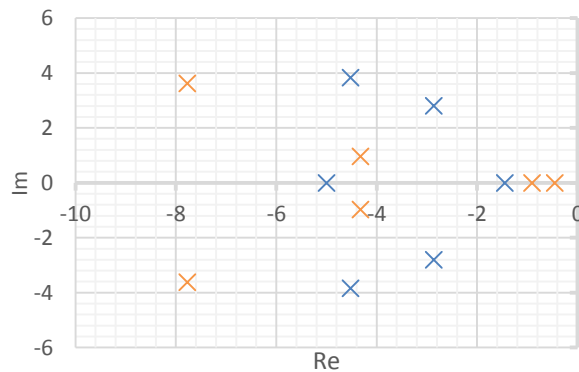


Rys. 5.40. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**: $\omega_r = 0,9; m_o = \mathbf{0},\mathbf{0}; \psi_r = 0,94$



Rys. 5.41. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**:

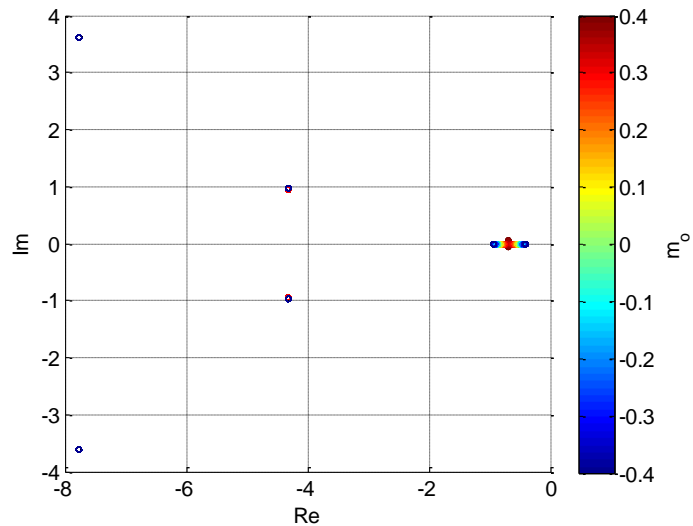
$$\omega_r = 0,9; m_o = -0,7; \psi_r = 0,94$$



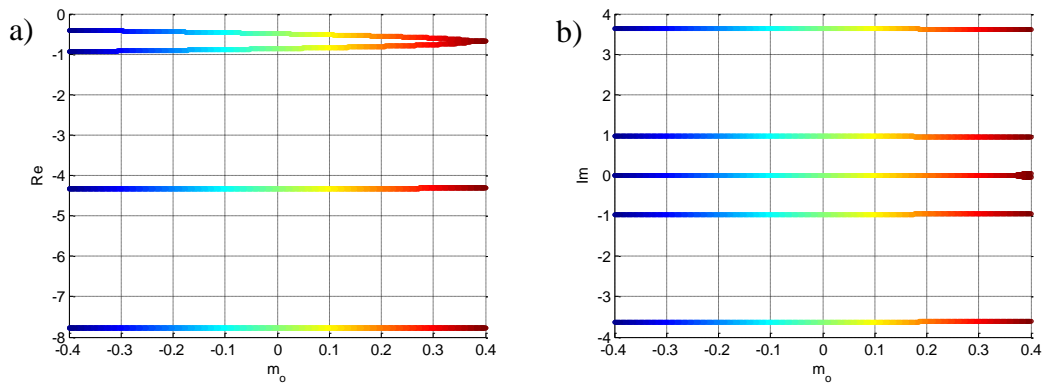
Rys. 5.42. Rozkład biegunów obserwatora dla **zmienianego zestawu wzmacnień** oraz **stałego zestawu wzmacnień**: $\omega_r = 0,9; m_o = -0,7; \psi_r = 0,94$

Podczas badania wpływu zmian modułu strumienia wirnika na dynamikę obserwatora zauważono, że rozkład biegunów w funkcji modułu strumienia wirnika przyjmuje inny kształt po zmianie momentu obciążenia. Dynamika obserwatora może zatem nieco różnić się po obniżeniu wartości strumienia wirnika. Wyniki badań dla $\psi_r = 0,5$ przedstawiono na rysunkach 5.43 - 5.46. Przy osłabionym strumieniu zmiany momentu obciążenia mają nieco większy wpływ na dynamikę obserwatora niż przy znamionowej wartości strumienia wirnika. Wpływ ten jest bardziej zauważalny dla dużych wartości

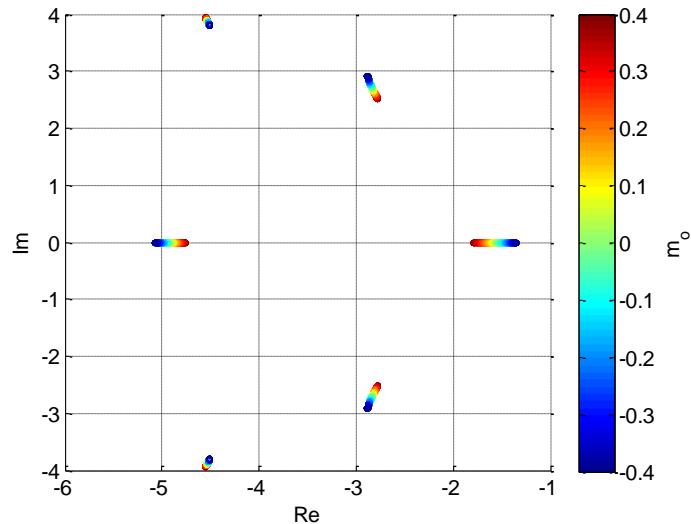
momentu zarówno przy pracy silnikowej jak i generatorowej. W żadnym przypadku nie dochodzi jednak do utraty stabilności obserwatora bądź znacznego pogorszenia właściwości dynamicznych. Można zatem przyjąć, że nawet w przypadku, gdy maszyna pracuje przy obniżonych wartościach modułu strumienia wirnika, właściwości obserwatora nie ulegają znacznym zmianom wraz ze zmianami obciążenia.



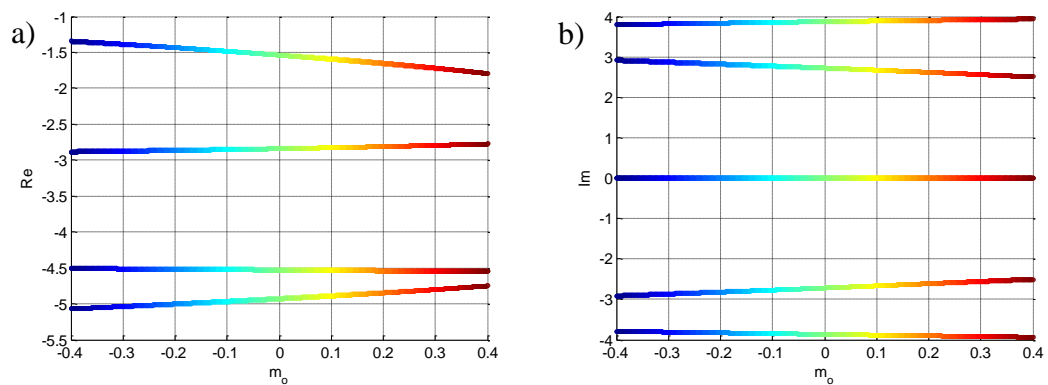
Rys. 5.43. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach momentu obciążenia dla obniżonego strumienia wirnika $\psi_r = 0,5$ oraz zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



Rys. 5.44. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji momentu obciążenia dla obniżonego strumienia wirnika $\psi_r = 0,5$ oraz zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



Rys. 5.45. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach momentu obciążenia dla obniżonego strumienia wirnika $\psi_r = 0,5$ oraz zestawu wzmacnień \mathbf{K}_{z1}

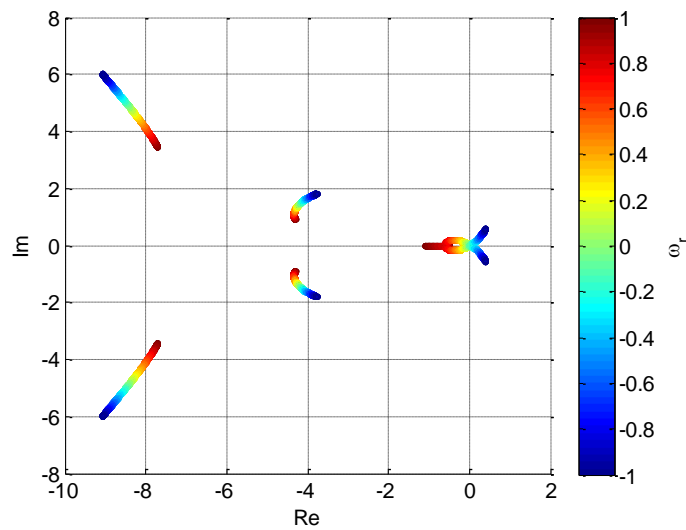


Rys. 5.46. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji momentu obciążenia dla obniżonego strumienia wirnika $\psi_r = 0,5$ oraz zestawu wzmacnień \mathbf{K}_{z1}

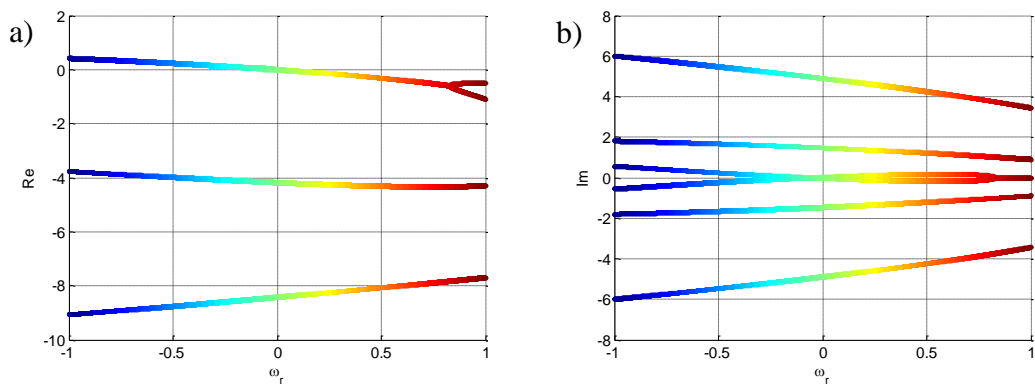
Na podstawie badań przeprowadzonych w rozdziałach 5.4.2 - 5.4.4 wywnioskować można, że najistotniejszy wpływ na dynamikę obserwatora ma prędkość kątowna wirnika. Zmiany momentu obciążenia maszyny praktycznie nie oddziałują na właściwości rozszerzonego obserwatora. Podobnie moduł strumienia wirnika, w ograniczonym zakresie, nie wpływa znacząco na rozkład biegunów. Powyższe badania obrazują wpływ zmian warunków pracy maszyny na właściwości obserwatora dla dwóch zestawów wzmacnień – stałego zestawu \mathbf{K}_s oraz zestawu \mathbf{K}_{z1} aktywnego dla badanej prędkości w przypadku przyjęcia zmienianego zestawu wzmacnień. Wnioski przedstawione w tym akapicie wyciągnąć można także na podstawie analizy wyników uzyskanych także przy innych wartościach wzmacnień.

5.4.5. Wpływ kierunku obrotów wirnika

W podrozdziale 5.4.2 zbadano wpływ zmian prędkości kątowej wirnika na położenie biegunów obserwatora. Rozpatrywano wówczas jeden kierunek obrotów. Na rysunkach 5.47 oraz 5.48 przedstawiono rozkłady biegunów wraz ze zmianami prędkości od -1 do 1 dla stałego zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s . Maszyna pracuje ze znamionowym modulem wektora strumienia wirnika oraz momentem obciążenia wynoszącym 0,3.



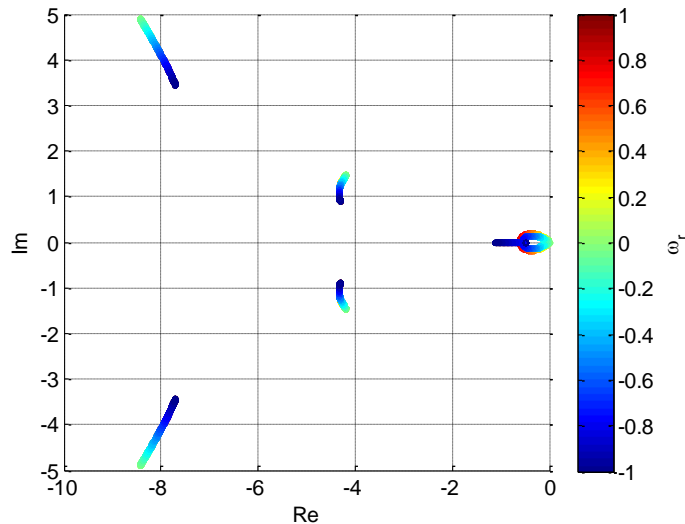
Rys. 5.47. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s



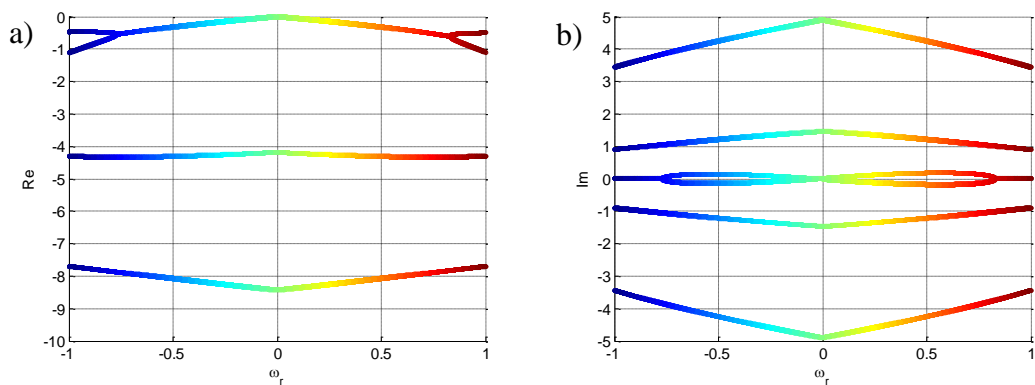
Rys. 5.48. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s

Wraz ze zmianą znaku prędkości, części rzeczywiste jednej z par biegunów przyjmują dodatnią wartość. Oznacza to, że obserwator traci stabilność po zmianie kierunku obrotów. W podrozdziale 3.7.4 zaproponowano metodę modyfikacji wzmocnień obserwatora w zależności od znaku prędkości, tak by właściwości obserwatora pozostawały

bez zmian bez względu na kierunek pracy maszyny. Metoda ta polega na zmianie znaków wybranych wzmocnień w zależności od kierunku obrotów wirnika. Na rysunkach 5.49 oraz 5.50 przedstawiono rozkłady biegunów przy zastosowaniu opisanej metody modyfikacji wzmocnień oraz przy stałym momencie obciążenia 0,3.



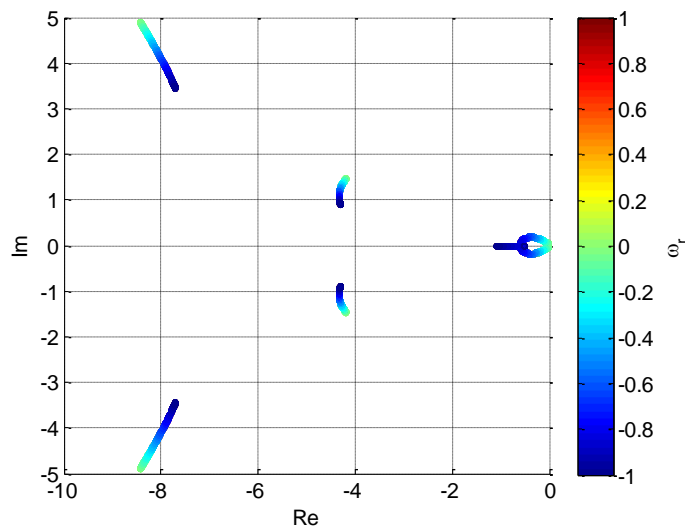
Rys. 5.49. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s korygowanego po zmianie kierunku prędkości



Rys. 5.50. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s korygowanego po zmianie kierunku prędkości

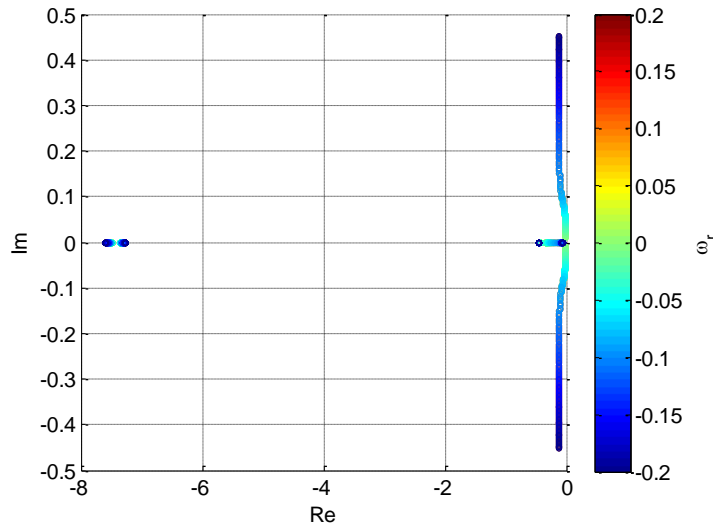
Stosując metodę modyfikacji wzmocnień wraz ze zmianą kierunków obrotów uzyskuje się zbliżone rozkłady biegunów dla dodatnich oraz ujemnych prędkości. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że nie są one idealnie symetryczne. Podczas opracowywania metody modyfikacji wzmocnień założono, że maszyna pracuje w takich samych warunkach przy obydwu kierunkach pracy maszyny. Dla dodatniej prędkości wirnika dodatnia wartość momentu obciążenia oznacza, że maszyna funkcjonuje w trybie pracy silnikowej. W

przypadku, gdy wirnik zmieni kierunek obrotów, natomiast na wał nadal oddziałuje ten sam moment, generowany moment maszyny skierowany jest przeciwnie do kierunku obrotów wirnika, zatem maszyna pracuje jako generator. Oznacza to, że w przypadku gdy na wał oddziałuje stały moment, po zmianie kierunków obrotów zmienia się charakter obciążenia maszyny. W rozdziale 5.4 wykazano, że właściwości dynamiczne obserwatora zależne są w niewielkim stopniu od obciążenia maszyny, co tłumaczy pewien brak symetrii rozkładu biegunów przy dodatnich oraz ujemnych prędkościach. W przypadku, gdy moment obciążenia zmienia kierunek wraz z kierunkiem obrotów maszyny, bieguny dla dodatniej prędkości idealnie pokrywają się z biegunami przy ujemnej prędkości, co pokazano na rysunku 5.51.

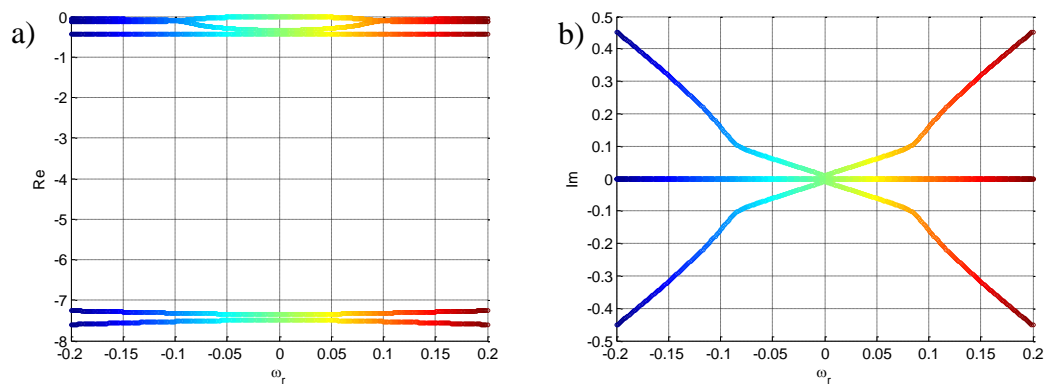


Rys. 5.51. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s korygowanego po zmianie kierunku prędkości przy pracy silnikowej w całym zakresie prędkości wirnika

W podrozdziale 3.7.4 zaproponowano specjalną postać zestawu wzmocnień, w którym wartości zmieniające znak wraz ze zmianą kierunku pracy maszyny przyjmują wartość zero. Na rysunkach 5.52 oraz 5.53 przedstawiono w jaki sposób zmiany prędkości wirnika wpływają na rozkład biegunów obserwatora dla pracy silnikowej maszyny zarówno przy dodatnim jak i ujemnym kierunku obrotów wirnika. Przyjęto stały zestaw wzmocnień \mathbf{K}_{z0} , którego wartości zostały zdefiniowane w załączniku B.2.



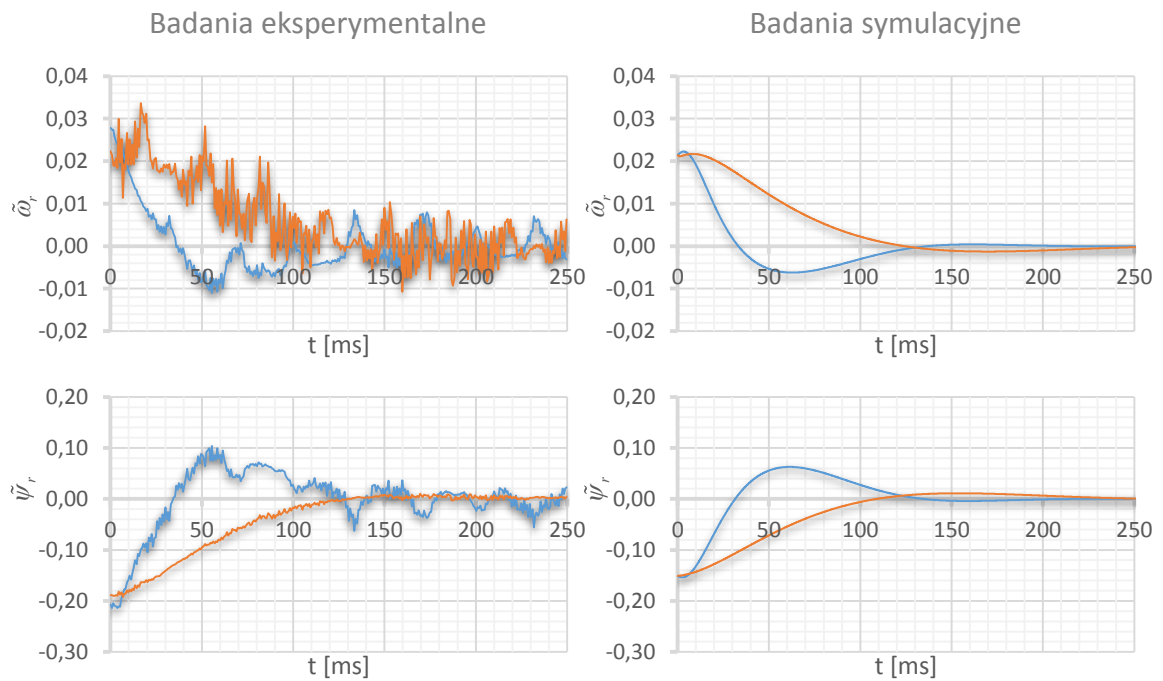
Rys. 5.52. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z0} przy pracy silnikowej w całym zakresie prędkości wirnika



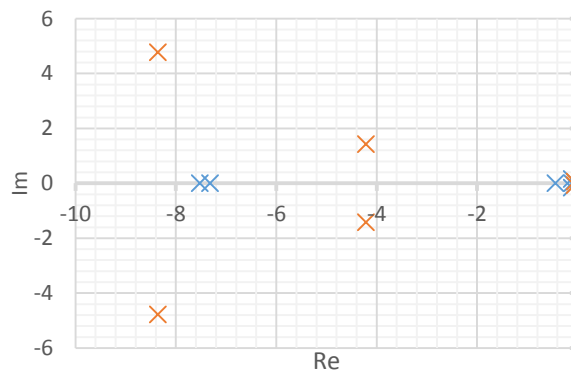
Rys. 5.53. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z0} przy pracy silnikowej w całym zakresie prędkości wirnika

Jak widać na rysunkach, bieguny obserwatora przemieszczają się w ten sam sposób wraz ze zmianami prędkości bez względu na kierunek obrotów wirnika pomimo zastosowania takich samych wartości wzmocnień dla dodatnich oraz ujemnych prędkości. Przyjęty zestaw wzmocnień \mathbf{K}_{z0} wykorzystywany jest jedynie dla małych prędkości, gdzie nie ma pewności co do rzeczywistego kierunku obrotów wirnika. Podczas doboru wartości wzmocnień szukano zatem zestawu, dla którego wskaźnik jakości jest jak najmniejszy przy niewielkich prędkościach. W porównaniu do innych zestawów wzmocnień, właściwości dynamiczne obserwatora przy stosowaniu zestawu \mathbf{K}_{z0} są niezadowolające przy dużych prędkościach. Zaleca się zatem wykorzystanie tego zestawu jedynie w wąskim zakresie dla prędkości bliskich zera.

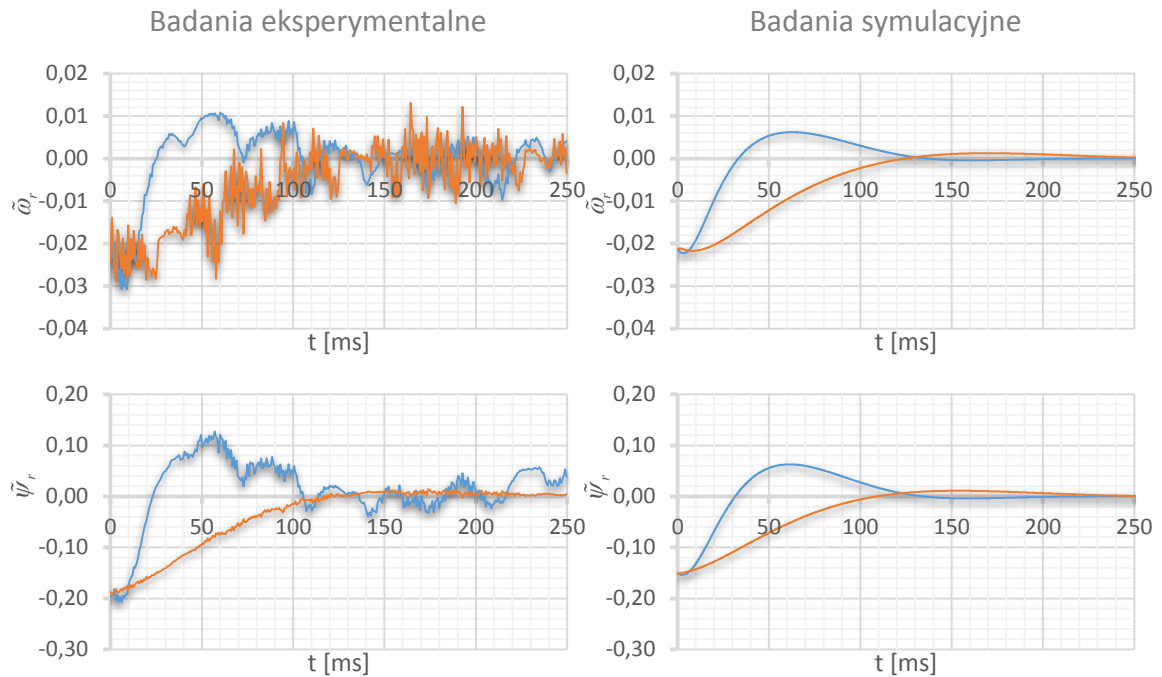
Symetria rzeczywistych właściwości obserwatora dla różnych kierunków obrotów wirnika przy stałym zestawie wzmacnień \mathbf{K}_{z0} oraz korygowanym zestawie \mathbf{K}_s zaprezentowana została na rysunkach 5.54 - 5.57. W obydwu przypadkach charakter przebiegów błędów odtwarzania strumienia wirnika dla dodatniej oraz ujemnej prędkości jest niemal identyczny. Moduł strumienia wirnika jest dodatni bez względu na kierunek pracy maszyny, stąd przebieg błędu odtwarzania tej wielkości nie jest symetryczny względem osi czasu, jak w przypadku błędu prędkości wirnika.



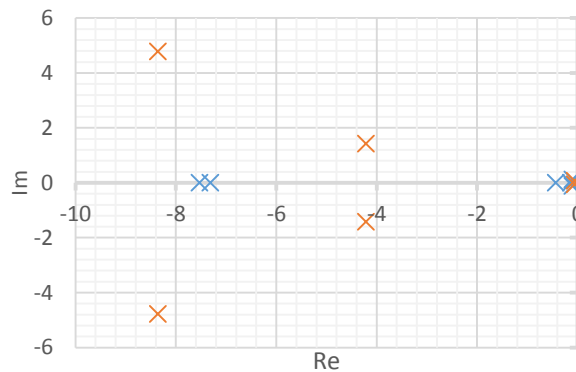
Rys. 5.54. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny przy dodatniej prędkości wirnika dla zestawu wzmacnień \mathbf{K}_{z0} oraz zestawu wzmacnień \mathbf{K}_s : $\omega_r = +0,1$; $m_o = 0,3$



Rys. 5.55. Rozkład biegunów obserwatora dla dodatniej prędkości wirnika dla zestawu wzmacnień \mathbf{K}_{z0} oraz zestawu wzmacnień \mathbf{K}_s : $\omega_r = +0,1$; $m_o = 0,3$



Rys. 5.56. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny przy ujemnej prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z0} oraz zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s : $\omega_r = -0,1$; $m_o = -0,3$



Rys. 5.57. Rozkład biegunów obserwatora dla ujemnej prędkości wirnika dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_{z0} oraz zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s : $\omega_r = -0,1$; $m_o = -0,3$

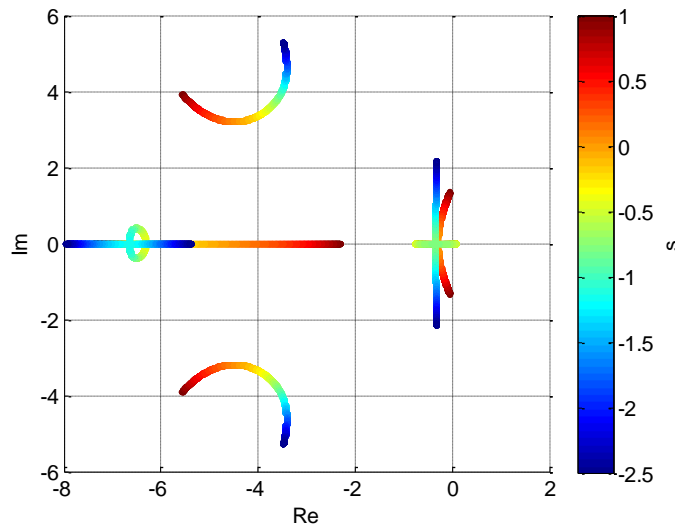
5.4.6. Wpływ poślizgu maszyny

W podrozdziałach 5.4.2 - 5.4.5 zbadano właściwości dynamiczne rozszerzonego obserwatora na podstawie rozkładu biegunów w warunkach, w których poślizg maszyny nie przekracza wartości znamionowej. W szczególnych przypadkach może zdarzyć się, że w stanie ustalonym prędkość wirowania wektora napięcia stojana oraz prędkością wirnika będą się od siebie znacznie różnić. Sytuacja taka wystąpić może podczas załączania układu napędowego w przypadku, gdy prędkość wirnika nie jest zerowa oraz nie jest znana jej

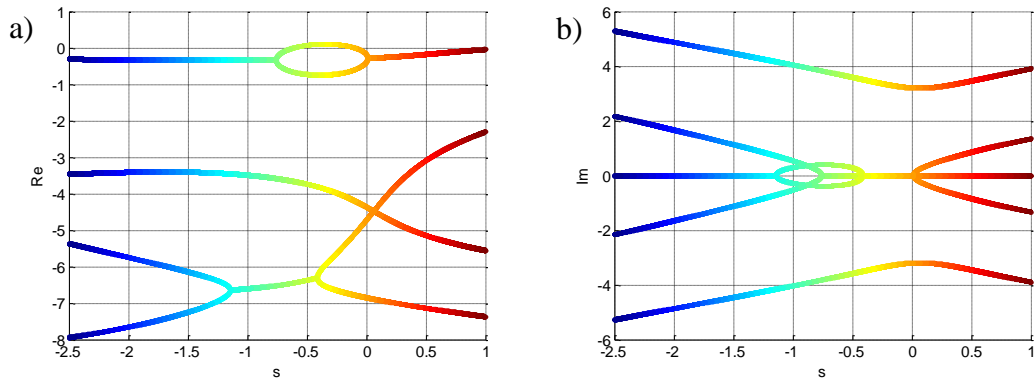
dokładna wartość. Metodę załączania bezczujnikowego napędu w takich warunkach opisano w rozdziale 4. Podczas rozruchu napędu przy niezerowej prędkości wirnika w wyniku błędnego wstępnego oszacowania tej wielkości, zadana prędkość wirowania wektora strumienia wirnika może znacznie odbiegać od rzeczywistej prędkości wirnika. Wpływ tej różnicy, czyli poślizgu s , na położenia biegunów obserwatora dla prędkości wirnika wynoszącej 0,1 przedstawiono na rysunkach 5.58 - 5.59. Algorytm lotnego startu opracowany został w taki sposób, by podczas załączania maszyny przy dowolnej prędkości wirnika w miarę możliwości nie została przekroczona znamionowa wartość prądu stojana. Podczas wykreślania rozkładów biegunów punkty pracy maszyny określone zostały zatem w taki sposób, by zapewnić znamionową wartość modułu wektora prądu stojana. Wówczas składowe prądów stojana wyrażone w układzie zorientowanym względem wektora strumienia wirnika, występujące w elementach macierzy \mathbf{A} , przyjmują postać:

$$i_{sd} = \frac{a_5 i_{s \max}}{\sqrt{a_5^2 + L_m^2 s^2}}, \quad (5.2)$$

$$i_{sq} = \frac{L_m s i_{s \max}}{\sqrt{a_5^2 + L_m^2 s^2}}. \quad (5.3)$$



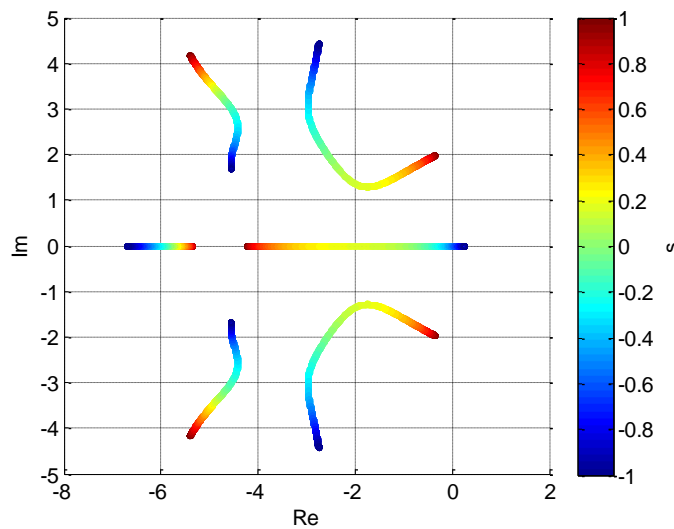
Rys. 5.58. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach poślizgu dla prędkości wirnika $\omega_r = 0,1$



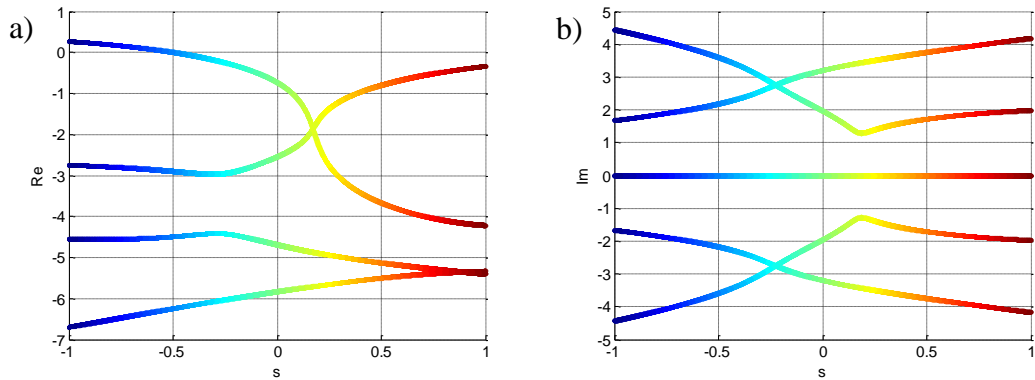
Rys. 5.59. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji poślizgu dla prędkości wirnika $\omega_r = 0,1$

Z rozkładów biegunów obserwatora wynika, że w przedziale poślizgów od -0,6 do -0,1 obserwator jest niestabilny. Odtwarzanie zmiennych stanu dla prędkości wirnika 0,1 jest zatem możliwe dla dodatnich wartości poślizgu oraz dużych ujemnych poślizgów, mniejszych od -0,6.

Zmiany położenia biegunów wraz ze zmianami poślizgów dla prędkości wirnika 0,5 zaprezentowane zostały na rysunkach 5.60 oraz 5.61.

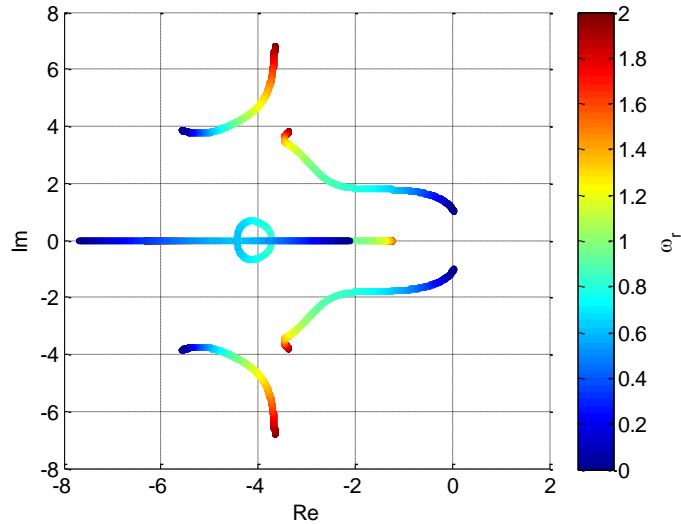


Rys. 5.60. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach poślizgu dla prędkości wirnika $\omega_r = 0,5$

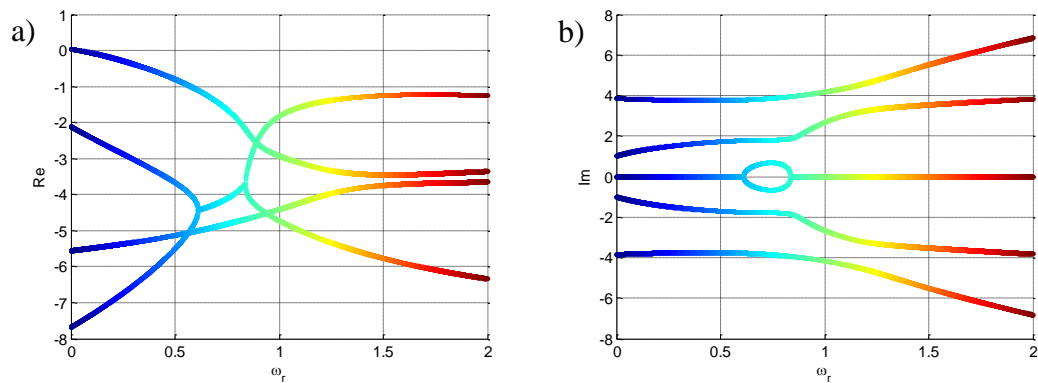


Rys. 5.61. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji poślizgu dla prędkości wirnika $\omega_r = 0,5$

Dla prędkości wirnika wynoszącej 0,5 obserwator zachowuje stabilność przy poślizgach większych od -0,5. Podczas lotnego startu w napędzie bezczujnikowym rzeczywista prędkości wirnika nie jest znana. Stabilność obserwatora dla ujemnych poślizgów w dużym stopniu zależna jest od bieżącej prędkości wirnika, zatem zasilenie maszyny napięciem o pulsacji mniejszej niż ω_r może zakończyć się niepowodzeniem odtwarzania zmiennych maszyny. Dla dodatnich poślizgów obserwator jest stabilny w całym badanym zakresie, aż do $s = 1$ zarówno dla $\omega_r = 0,1$ jak i $\omega_r = 0,5$. Można zatem wywnioskować, że podczas procedury lotnego startu bezpieczniej jest zasilić maszynę napięciem o zbyt dużej pulsacji, niż napięciem o pulsacji mniejszej od ω_r . Możliwe jest zatem przyjęcie znamionowej pulsacji, czyli $\tilde{\omega}_s = 1,0$, jako początkową wartość pulsacji napięcia stojana. Założenie to zastało zweryfikowane poprzez badanie, którego wyniki przedstawiono na rysunkach 5.62 oraz 5.63. Zaprezentowane zostały tam zmiany położenia biegunów wraz ze wzrostem prędkości wirnika przy stałej pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$. Przy zmianach poślizgu wartość strumienia wirnika określana jest w taki sposób, by uzyskać znamionowy prąd stojana. Obserwator pozostaje stabilny w niemal całym badanym zakresie prędkości wirnika, włączając w to prędkości przekraczające wartość znamionową. Bieguny przyjmują dodatnią część rzeczywistą jedynie dla $\omega_r < 0,035$, zatem dla bardzo małych prędkości. Przy tak niewielkich obrotach nie ma potrzeby korzystania z procedury lotnego startu.



Rys. 5.62. Rozkład biegunów obserwatora na płaszczyźnie zespolonej przy zmianach prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$ oraz znamionowym prądzie stojana

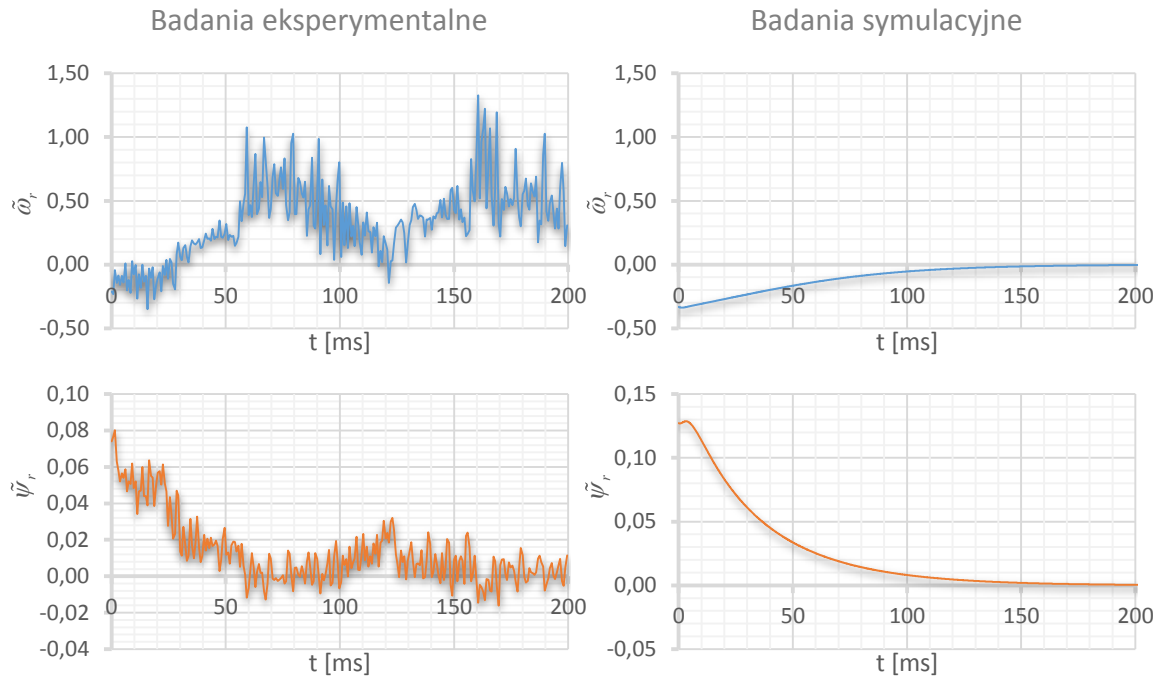


Rys. 5.63. Części rzeczywiste (a) oraz urojone (b) biegunów obserwatora w funkcji prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$ oraz znamionowym prądzie stojana

Należy zwrócić uwagę na fakt, że próba wymuszenia znamionowego prądu dla wartości poślizgu bliskich zera wiązałaby się z koniecznością znacznego zwiększenia wartości napięcia stojana, co z kolei skutkowałoby zwiększeniem wartości strumienia wirnika powyżej wartości znamionowej. Są to warunki, których unika się podczas sterowania maszyną. Ponadto model maszyny, na którym oparty jest obserwator oraz równania błędów odtwarzania, nie uwzględnia zjawiska nasycenia rdzenia, zatem wnioski wyciągnięte na temat dynamiki obserwatora w zakresie małych wartości poślizgu przy znamionowej wartości prądu stojana mogą odbiegać od rzeczywistości.

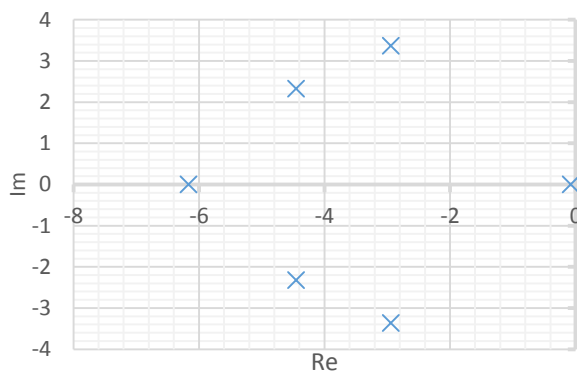
Badania eksperymentalne nad wpływem poślizgu maszyny na właściwości dynamiczne obserwatora przeprowadzono dla prędkości wirnika $\omega_r = 0,5$, natomiast poślizg wymuszano poprzez przyłożenie napięcia o pulsacji odbiegającej od 0,5 oraz amplitudzie

zapewniającej znamionowy prąd stojana. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rysunkach 5.64 - 5.71. Poślizgi maszyny dobrano tak, by zaprezentować właściwości obserwatora przy dużym dodatnim oraz ujemnym poślizgu, rzędu $s = \pm 0,4$ oraz przy stosunkowo niewielkich (jednak wciąż przekraczających znamionowe) poślizgach $s = \pm 0,1$.

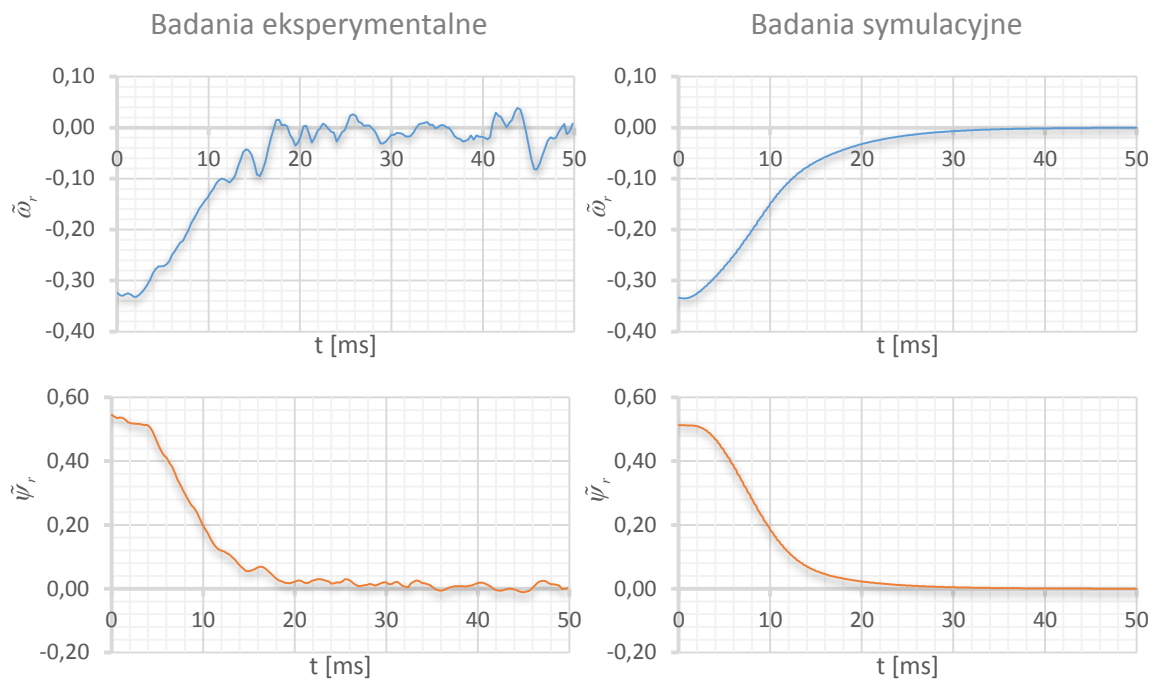


Rys. 5.64. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny:

$$\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{0,1}; i_s = 1,0$$

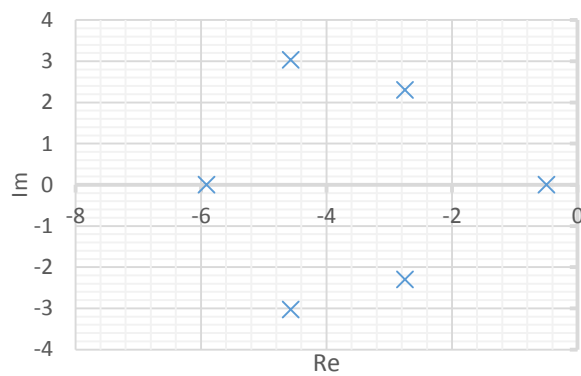


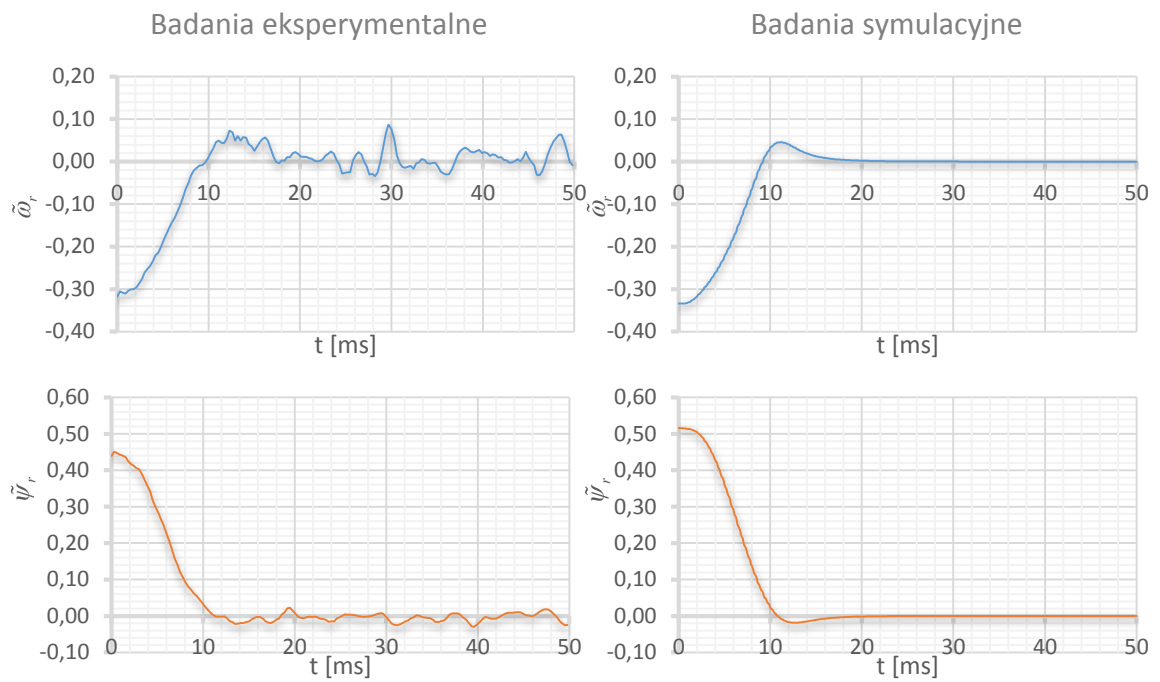
Rys. 5.65. Rozkład biegunów obserwatora: $\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{0,1}; i_s = 1,0$



Rys. 5.66. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny:

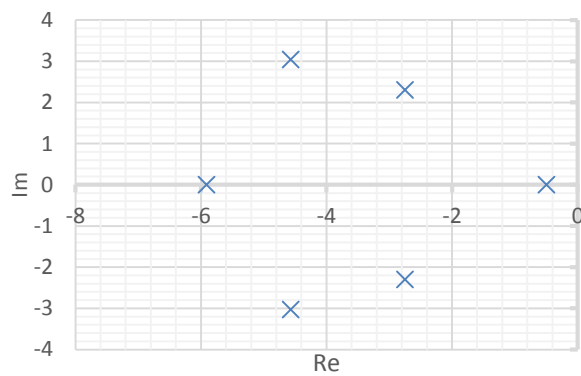
$$\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{0,4}; i_s = 1,0$$

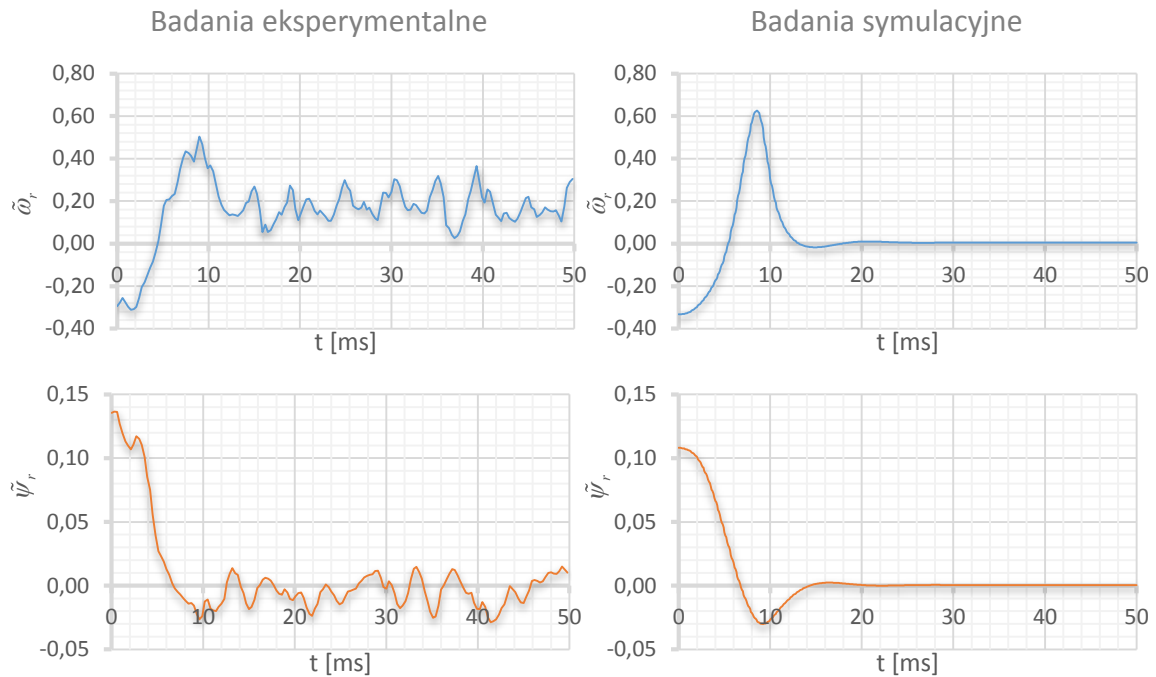
Rys. 5.67. Rozkład biegunów obserwatora: $\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{0,4}; i_s = 1,0$



Rys. 5.68. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny:

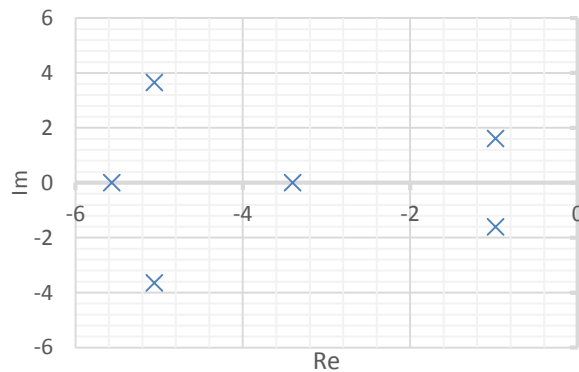
$$\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{0,6}; i_s = 1,0$$

Rys. 5.69. Rozkład biegunów obserwatora: $\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{0,6}; i_s = 1,0$



Rys. 5.70. Błędy odtwarzania w stanach przejściowych obserwatora w stanie ustalonym maszyny:

$$\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{1,0}; i_s = 1,0$$

Rys. 5.71. Rozkład biegunów obserwatora: $\omega_r = 0,5; \omega_s = \mathbf{1,0}; i_s = 1,0$

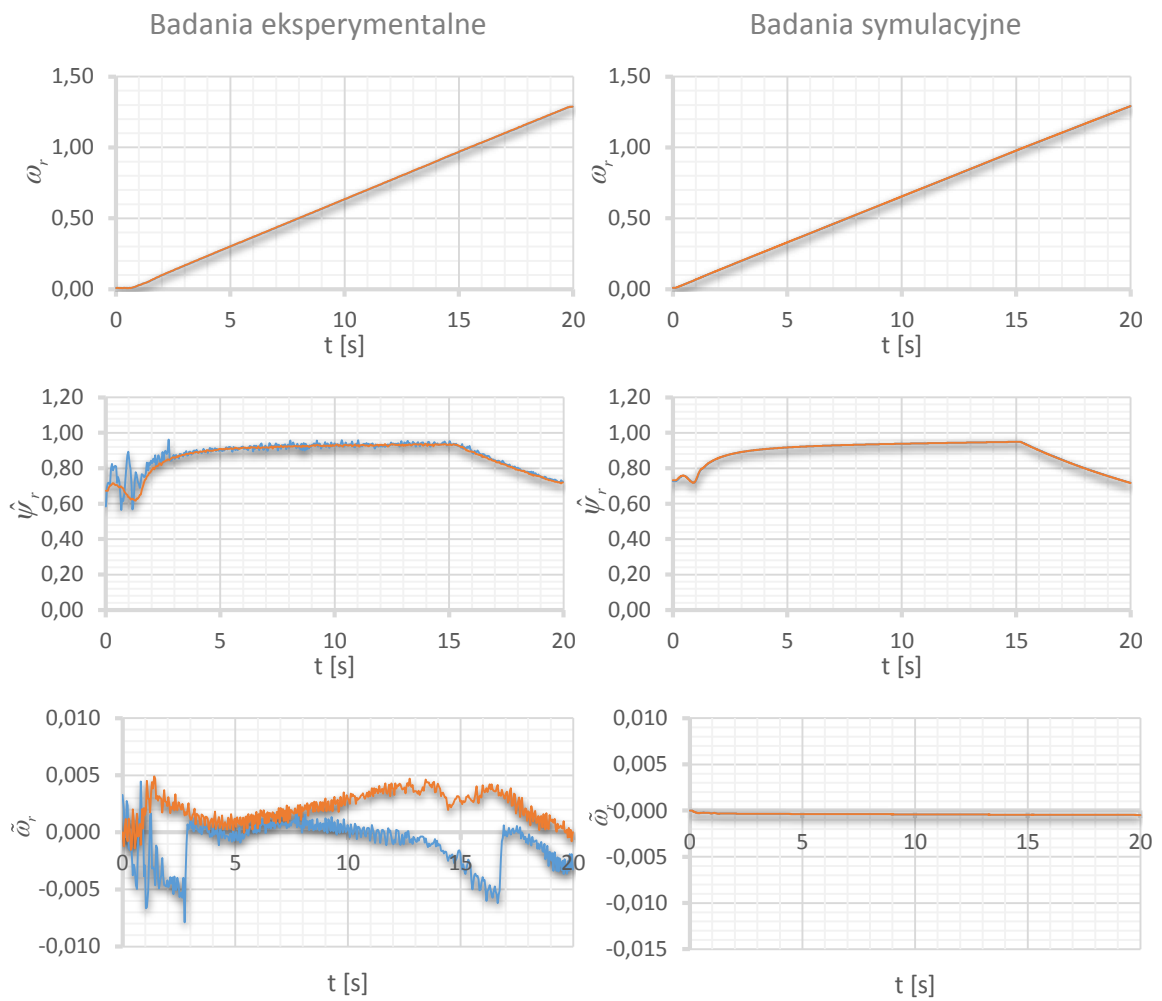
Dla wszystkich przebadanych eksperymentalnie poślizgów bieguny obserwatora znajdują się po lewej stronie płaszczyzny zespolonej, zatem obserwator jest stabilny, co potwierdzają uzyskane wyniki. Przy niewielkich poślizgach, czyli dla pulsacji napięcia stojana 0,4 oraz 0,6, średni błąd odtwarzania prędkości wirnika w stanie ustalonym jest zbliżony do zera. W przypadku dużych poślizgów prędkość odtwarzana w eksperymencie na rzeczywistej maszynie stabilizuje się wokół dużych błędów. Na podstawie badań symulacyjnych wykazano, że w warunkach dużego poślizgu przy znamionowym prądzie oddziaływanie błędów parametrów modelu maszyny jest bardzo duże i prowadzi do występowania znacznych błędów ustalonych obserwatora. W praktyce dokładne wartości

parametrów modelu nie są znane, stąd w rozpatrywanych warunkach należy spodziewać się znacznych błędów odtwarzania. Pomimo dużych błędów odtwarzania uzyskana prędkość wirnika wskazuje kierunek korekcji pulsacji napięcia stojana prowadzącej do zmniejszenia poślizgu. Przy pulsacji napięcia stojana wynoszącej 0,1, odtwarzana prędkość wirnika oscyluje wokół wartości 1,0, zatem wywnioskować można, że rzeczywista prędkość, która wynosi 0,5, jest większa od bieżącej pulsacji napięcia. W przypadku $\omega_s = 1,0$ uzyskano natomiast odtwarzaną prędkość wirnika wynoszącą około 0,7, zatem, można wyciągnąć wniosek, że rzeczywista prędkość jest mniejsza od pulsacji 1,0. Są to wystarczające dane do przeprowadzenia lotnego startu, rozpoczynając procedurę nawet przy bardzo dużych poślizgach.

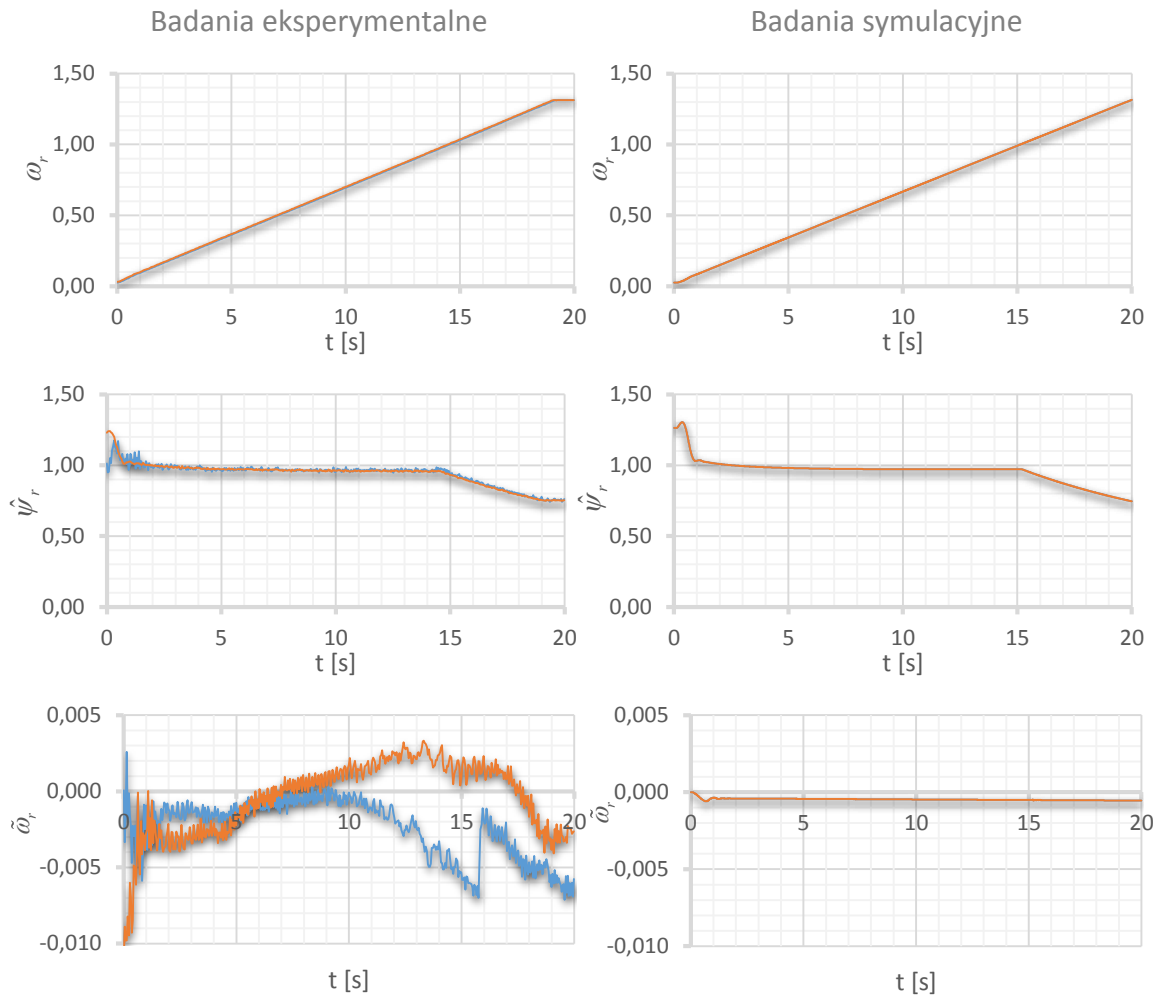
5.4.7. Działanie obserwatora w szerokim zakresie zmian prędkości

Badania mające na celu wykazanie właściwości obserwatora w realnych warunkach pracy maszyny dla szerokiego zakresu zmian prędkości przeprowadzono realizując łagodny rozruch silnika oraz nawroty. Eksperymenty przeprowadzono dla dwóch wariantów wartości wzmocnień obserwatora. W pierwszym wariantcie aktywny zestaw wzmocnień wybierany jest w zależności od bieżącego zakresu prędkości wirnika maszyny, natomiast w drugim przypadku przyjęty został stały zestaw wzmocnień \mathbf{K}_s .

Przebiegi modułu odtwarzanego wektora strumienia wirnika oraz błędów odtwarzania prędkości wirnika podczas rozruchu maszyny dla pracy silnikowej oraz generatorowej przedstawiono na rysunkach 5.72 oraz 5.73. W badanym zakresie prędkości (dla ω_r od 0,02 do 1,3) uwzględniono również niewielki przedział zakresu osłabiania pola, sięgający prędkości przekraczających około 30% wartości znamionowej. Przy zastosowaniu stałego zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s błędy odtwarzania prędkości wirnika w całym badanym zakresie nie przekraczają 1% wartości znamionowej. W przypadku wzmocnień zmienianych w funkcji prędkości wirnika zauważyć można zależność błędów odtwarzania od aktywnego zestawu wzmocnień. Pierwsza zmiana wzmocnień następuje przy prędkości $\omega_r = 0,15$ czemu towarzyszy skokowa redukcja wartości błędu odtwarzania prędkości wirnika, szczególnie zauważalna w przypadku pracy silnikowej. Podczas zwiększania obrotów maszyny, w zakresie prędkości 0,15 – 1,1 obowiązuje zestaw wzmocnień \mathbf{K}_{z1} .



Rys. 5.72. Przebiegi zmiennych obserwatora podczas łagodnego rozruchu maszyny dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s , oraz wzmocnień zmieniających w funkcji prędkości wirnika podczas silnikowej pracy maszyny: $m_o = 0,3$

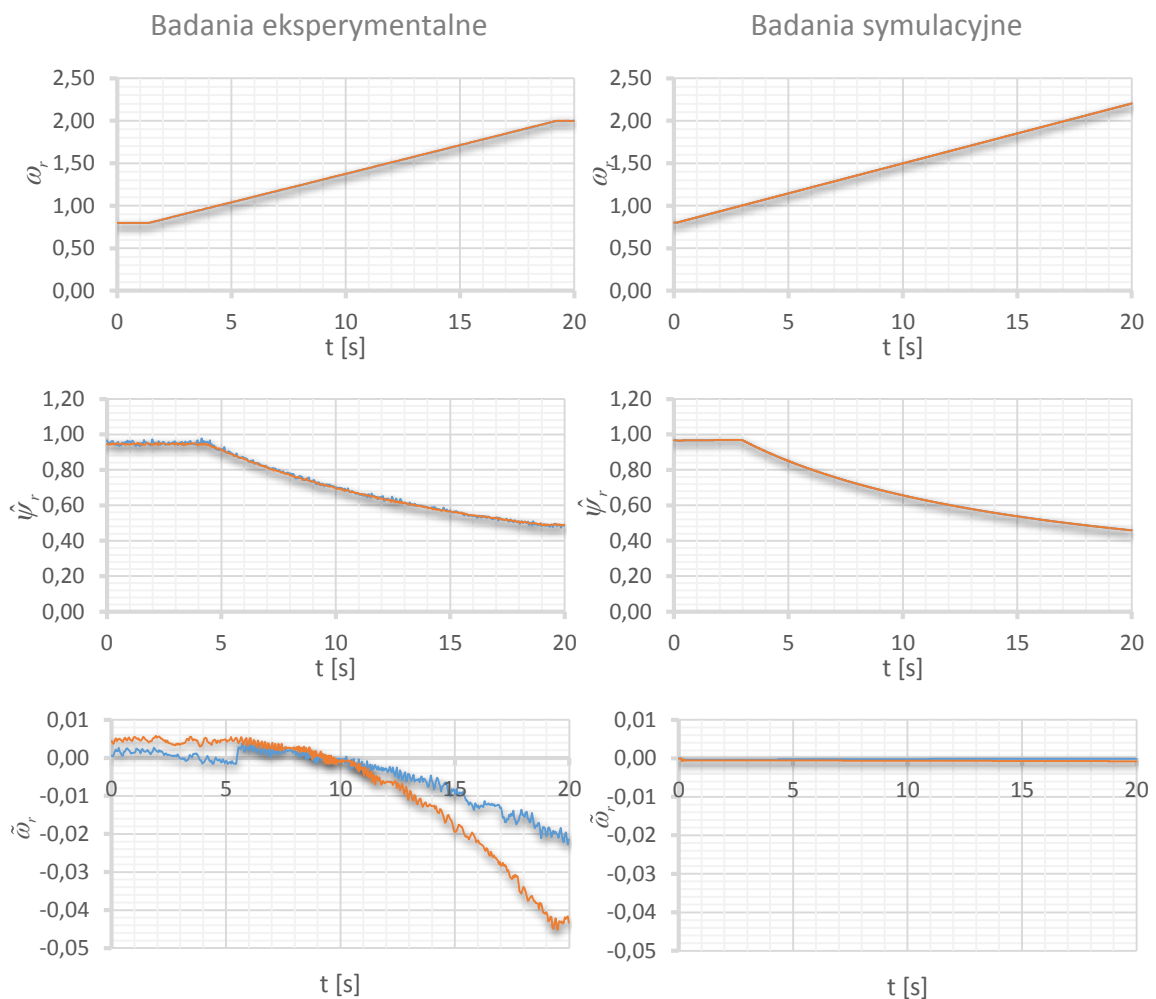


Rys. 5.73. Przebiegi zmiennych obserwatora podczas łagodnego rozruchu maszyny dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s oraz wzmocnień zmienianych w funkcji prędkości wirnika podczas generatorowej pracy maszyny: $m_o = -0,3$

W badaniach eksperymentalnych wraz ze wzrostem prędkości zauważyć można wzrost błędów odtwarzania. Na podstawie badań symulacyjnych wykazano, że wraz ze wzrostem prędkości wirnika rośnie także wpływ błędów niektórych parametrów modelu maszyny na błędy odtwarzania obserwatora, co może tłumaczyć zjawisko zaobserwowane na przebiegach uzyskanych z rzeczywistego napędu, gdzie nie są znane dokładne wartości parametrów modelu. W rozdziale poświęconym analizie wpływu błędów parametrów modelu maszyny wyciągnięto także wniosek, że wartości wzmocnień, w ograniczonym zakresie, mają wpływ na błędy odtwarzania przy występowaniu błędów parametrów. Wyjaśnia to skokowe zmiany błędów odtwarzania prędkości wirnika po zmianach zestawów wzmocnień. W przypadku badań symulacyjnych założono zerowe błędy parametrów modelu maszyny oraz brak błędów pomiarowych. W takich warunkach zmienne odtwarzane

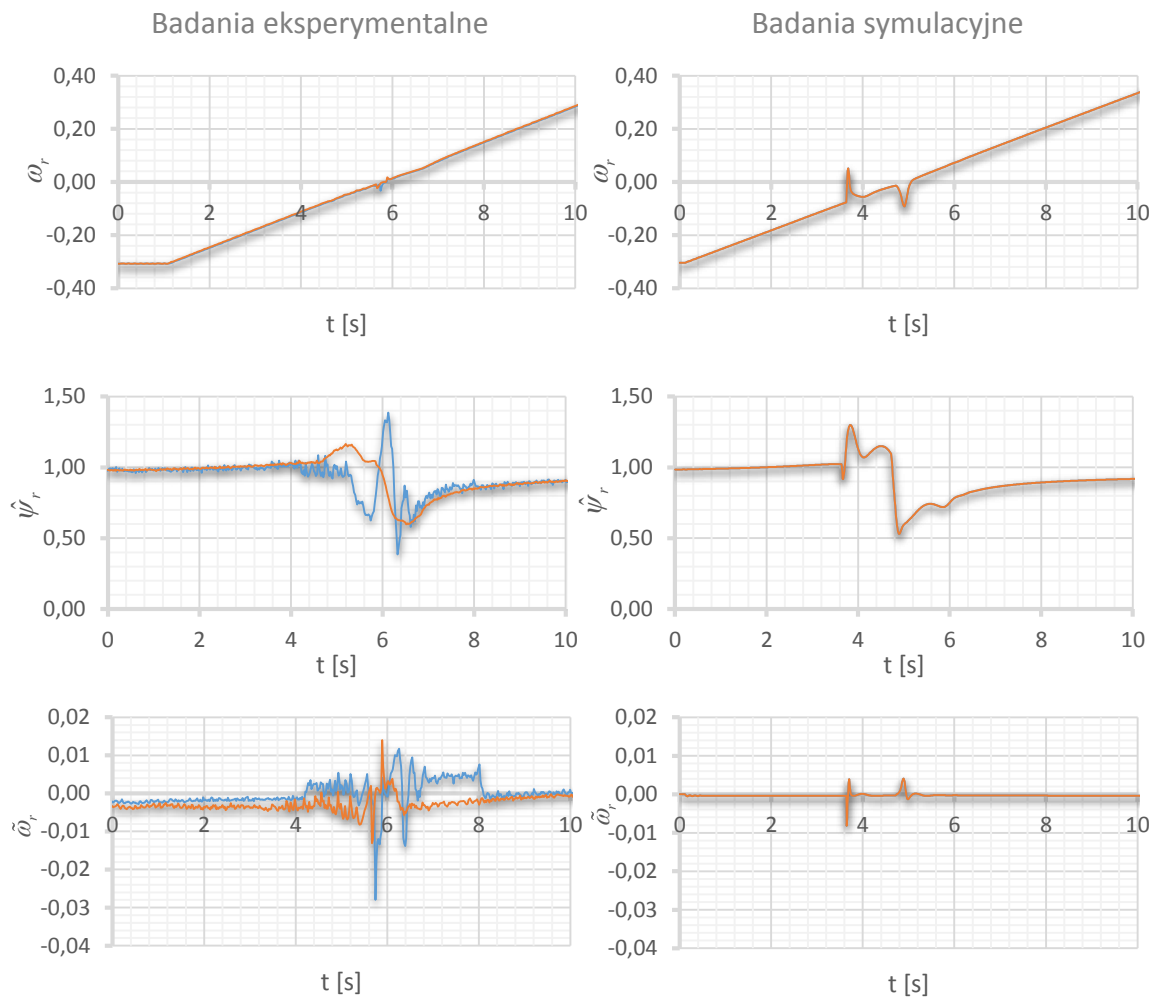
są z niemal zerowymi błędami bez względu na przyjęty zestaw wzmocnień, stąd uzyskane przebiegi praktycznie pokrywają się.

Wyniki uzyskane w przedziale prędkości obejmującym zakres osłabiania pola bez obciążenia przedstawiono na rysunku 5.74. Ze względu na brak przystosowania do pracy z dużymi prędkościami zastosowanej w stanowisku maszyny prądu stałego stanowiącej obciążenie, na potrzeby tego badania została ona mechanicznie odłączona. Jak zauważono wcześniej, wraz ze wzrostem prędkości rośnie także błąd odtwarzania prędkości wirnika w badaniach eksperymentalnych. Jest to najprawdopodobniej spowodowane błędami parametrów modelu maszyny. Z przeprowadzonych dalej badań wynika, że w obecności błędów parametrów modelu jakość odtwarzania pogarsza się podczas pracy maszyny z niewielkim strumieniem wirnika. Wraz ze wzrostem prędkości w zakresie osłabiania pola maleje moduł strumienia wirnika, co może dodatkowo zwiększać błędy odtwarzania.

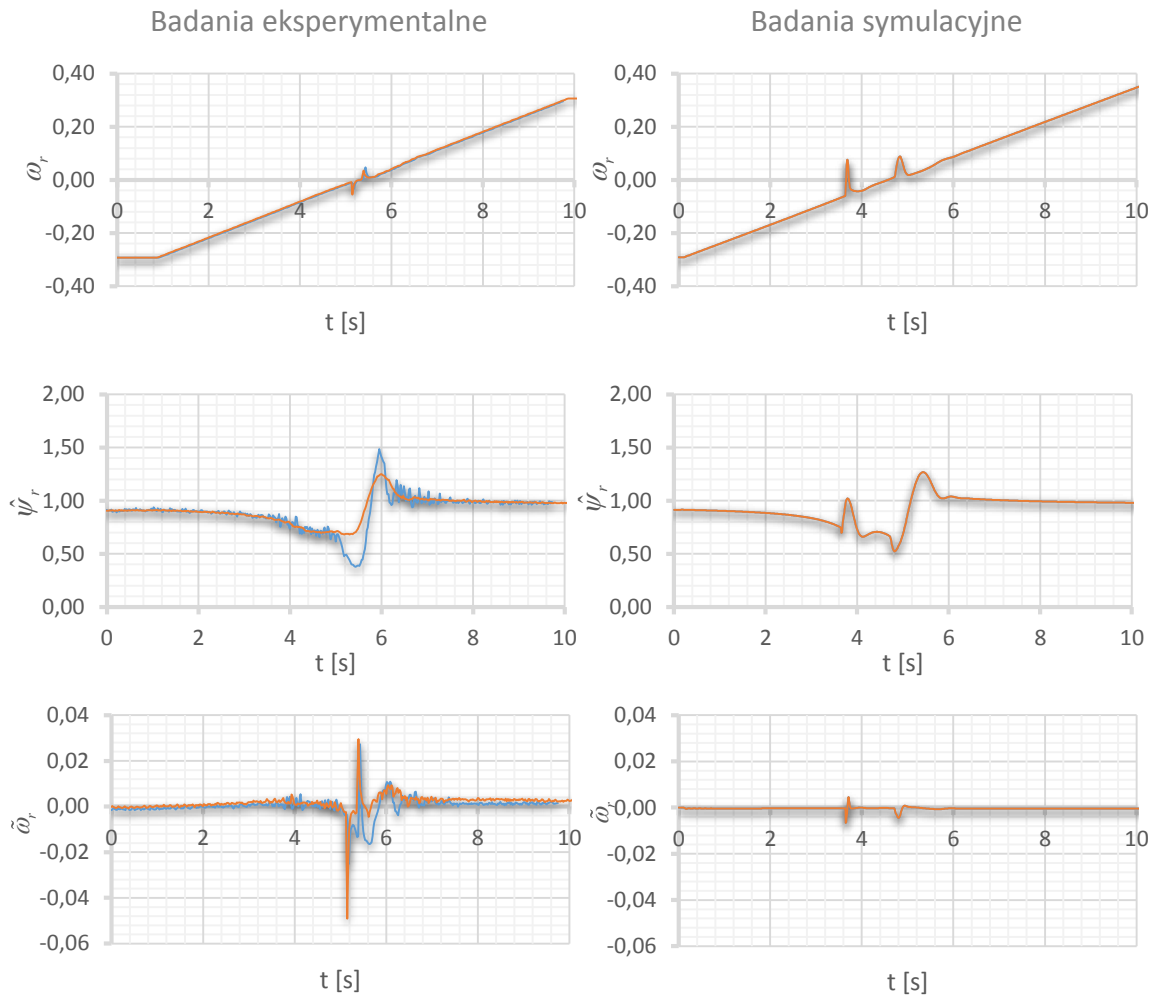


Rys. 5.74. Przebiegi zmiennych obserwatora podczas nawrotu maszyny dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s oraz wzmocnień zmienianych w funkcji prędkości wirnika przy momencie obciążenia $m_o = 0,0$

Wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych podczas nawrotu maszyny przedstawiono na rysunkach 5.75 oraz 5.76. Rozpatrywany jest przypadek, w którym maszyna obciążona jest dodatnim momentem, czyli następuje przejście z pracy generatorowej na silnikową. Badanie powtórzono przy ujemnym momencie, czyli przy przejściu z pracy silnikowej na generatorową.



Rys. 5.75. Przebiegi zmiennych obserwatora podczas nawrotu maszyny dla zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s oraz wzmocnień zmienianych w funkcji prędkości wirnika przy momencie obciążenia $m_o = 0,3$



Rys. 5.76. Przebiegi zmiennych obserwatora podczas nawrotu maszyny dla **zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s** oraz **wzmocnień zmienianych w funkcji prędkości wirnika** przy momencie obciążenia $m_o = -0,3$

Przebieg rzeczywistej prędkości obciążonego momentem wirnika podczas nawrotu ulega odkształceniom w okolicach zerowych prędkości. Obserwator nie nadąża za gwałtowną zmianą obrotów maszyny, co skutkuje krótkotrwałymi impulsami błędów odtwarzania prędkości wirnika. Pomijając te odkształcenia, przy zastosowaniu zestawu wzmocnień \mathbf{K}_s obserwator odtwarza prędkość wirnika z błędami nie przekraczającymi 0,01. Podobnie jak w przypadku rozruchu maszyny przyjmując zmieniany zestaw wzmocnień uzyskuje się większe amplitudy błędów przy małych prędkościach w obrębie działania zestawu \mathbf{K}_{z0} . Przy korzystaniu z tego zestawu nie ma konieczności modyfikacji wzmocnień po zmianie kierunku obrotów wirnika. W przypadku zestawu \mathbf{K}_s w celu zachowania stabilności obserwatora wymagana jest modyfikacja znaku wybranych wzmocnień obserwatora w zależności od znaku prędkości wirnika. Kierunek obrotów wirnika określany jest wówczas na podstawie znaku odtwarzanej prędkości wirnika. Rozwiązanie takie niesie

ryzyko utraty stabilności obserwatora, w szczególności w przypadku zastosowania zamkniętego układu regulacji prędkości maszyny.

5.5. Analiza wpływu błędów parametrów modelu maszyny

W przypadku błędnie zidentyfikowanych rezystancji bądź indukcyjności maszyny, współczynniki zależne od parametrów silnika występujące w równaniach obserwatora obciążone są błędami \tilde{a}_n :

$$\tilde{a}_n = \hat{a}_n - a_n, \quad (5.4)$$

gdzie $n = 1 \dots 6$, \hat{a}_n to wartość współczynnika występującego w równaniach obserwatora uzyskana na drodze pomiaru parametrów maszyny, natomiast a_n to rzeczywista wartość współczynnika modelu maszyny. Współczynniki te zdefiniowane zostały w rozdziale 2.1.2 i zależne są od rezystancji stojana oraz wirnika, a także od indukcyjności stojana oraz wirnika i indukcyjności głównej.

W praktyce rzeczywiste wartości parametrów maszyny nie są znane. Współczynniki występujące w równaniach obserwatora są funkcją parametrów maszyny, które szacowane są na podstawie przeprowadzonych pomiarów. W takim przypadku równania rozszerzonego obserwatora prędkości, zdefiniowane w rozdziale 2.2, przyjmują następującą postać:

$$\frac{d\hat{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = \hat{a}_1 \hat{\mathbf{i}}_s + \hat{a}_2 \hat{\boldsymbol{\psi}}_r + j\hat{a}_3 \hat{\boldsymbol{\zeta}} + \hat{a}_4 \mathbf{u}_s + k_{11} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + jk_{12} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + k_{13} \tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{14} \tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (5.5)$$

$$\frac{d\hat{\boldsymbol{\psi}}_r}{d\tau} = \hat{a}_5 \hat{\mathbf{i}}_s + \hat{a}_6 \hat{\boldsymbol{\psi}}_r + j\hat{\boldsymbol{\zeta}} + k_{21} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + jk_{22} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + k_{23} \tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{24} \tilde{\mathbf{i}}_s, \quad (5.6)$$

$$\frac{d\hat{\boldsymbol{\zeta}}}{d\tau} = \hat{a}_5 \hat{\omega}_r \hat{\mathbf{i}}_s + \hat{a}_6 \hat{\boldsymbol{\zeta}} + j\hat{\omega}_r \hat{\boldsymbol{\zeta}} + k_{31} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + jk_{32} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + k_{33} \tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{34} \tilde{\mathbf{i}}_s. \quad (5.7)$$

W rozdziale 3.1 przedstawiono równania opisujące dynamikę błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora prędkości. W przypadku, gdy współczynniki obserwatora zależne od parametrów maszyny obciążone są błędami identyfikacji, otrzymuje się następujący układ równań dynamiki błędów:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\mathbf{i}}_s}{d\tau} = & \hat{a}_1 \tilde{\mathbf{i}}_s + \hat{a}_2 \tilde{\boldsymbol{\psi}}_r + j\hat{a}_3 \left(\hat{\boldsymbol{\zeta}} - \omega_r \boldsymbol{\psi}_r \right) \\ & + k_{11} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + jk_{12} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + k_{13} \tilde{\mathbf{i}}_s + jk_{14} \tilde{\mathbf{i}}_s + \tilde{a}_1 \mathbf{i}_s + \tilde{a}_2 \boldsymbol{\psi}_r + j\tilde{a}_3 \omega_r \boldsymbol{\psi}_r + \tilde{a}_4 \mathbf{u}_s \end{aligned}, \quad (5.8)$$

$$\frac{d\tilde{\psi}_r}{d\tau} = \hat{a}_5\tilde{i}_s + \hat{a}_6\tilde{\psi}_r + j(\hat{\zeta} - \omega_r\psi_r) \quad (5.9)$$

$$+ k_{21}\tilde{\zeta} + jk_{22}\tilde{\zeta} + k_{23}\tilde{i}_s + jk_{24}\tilde{i}_s + \tilde{a}_5\tilde{i}_s + \tilde{a}_6\psi_r \quad (5.10)$$

$$\frac{d\hat{\zeta}}{d\tau} = \hat{a}_5\hat{\omega}_r(\tilde{i}_s + \tilde{i}_s) + (\hat{a}_6 + j\hat{\omega}_r)\hat{\zeta}$$

$$+ k_{31}\tilde{\zeta} + jk_{32}\tilde{\zeta} + k_{33}\tilde{i}_s + jk_{34}\tilde{i}_s$$

Oczekuje się, by w stanie ustalonym obserwator odtwarzał zmienne z zerowymi błędami. Punktem pracy rozszerzonego obserwatora jest zatem punkt $\bar{\mathbf{x}}$:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{\tilde{i}}_s & \bar{\tilde{\psi}}_r & \bar{\tilde{\zeta}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \omega_r\psi_r \end{bmatrix}^T, \quad (5.11)$$

dla którego wszystkie odtwarzane zmienne pokrywają się z wartościami rzeczywistymi. Konieczne jest zatem, by zaproponowany punkt pracy był punktem równowagi układu opisującego dynamikę błędów odtwarzania. Warunek ten jest spełniony dla obserwatora, w którym współczynniki obliczono na podstawie idealnie zidentyfikowanych parametrów modelu maszyny. W przypadku gdy występują błędy parametrów, po prawych stronach równań (5.8) oraz (5.9) w punkcie pracy $\bar{\mathbf{x}}$ zerują się wszystkie wyrazy oprócz wyrazów zawierających błędy współczynników. Oznacza to, że rozpatrywany punkt pracy nie zawsze jest punktem równowagi. Istnieje zatem prawdopodobieństwo, że obserwator, którego współczynniki obarczone są błędami, w stanie ustalonym będzie odtwarzać zmienne z niezerowymi błędami.

Układ równań opisujący dynamikę błędów odtwarzania po rozpisaniu wektorów na jego składowe oraz uwzględnieniu zależności opisującej odtwarzaną prędkość wirnika (3.10) oraz błędy odtwarzania zmiennej ζ (3.12) jest nieliniowym układem sześciu równań różniczkowych. Wyprowadzenie analitycznych zależności opisujących punkty równowagi omawianego układu równań jest zatem zagadnieniem bardzo złożonym, natomiast wyciągnięcie wniosków z takich równań byłoby praktycznie niemożliwe. Wpływ błędów parametrów modelu maszyny przeanalizowany zostanie zatem na podstawie badań symulacyjnych.

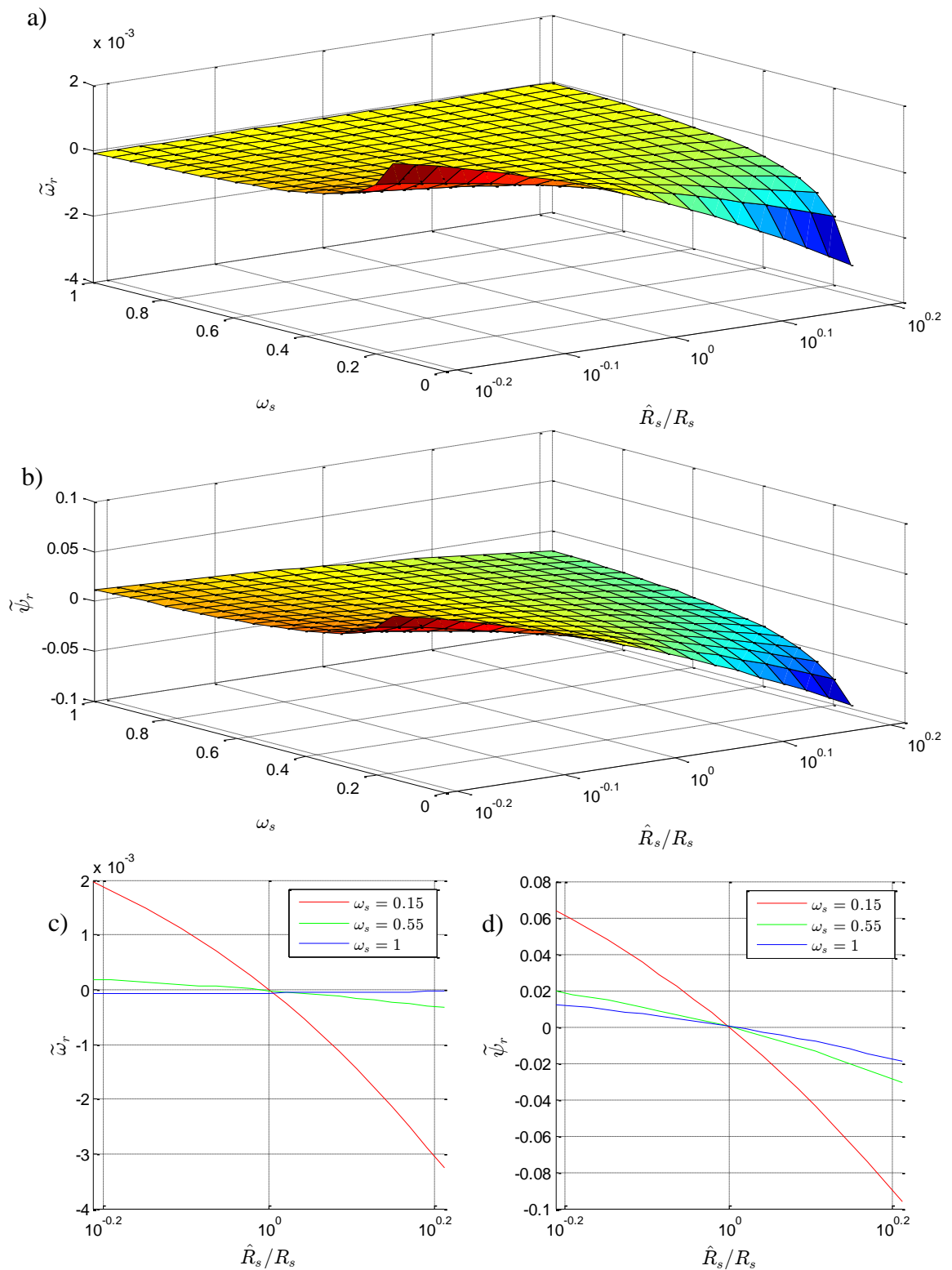
Współczynniki obserwatora $\hat{a}_1 \dots \hat{a}_6$ zależne są od wartości parametrów modelu maszyny. W rozdziale tym badany jest wpływ błędów wartości poszczególnych rezystancji oraz indukcyjności na działanie obserwatora. Po wprowadzeniu błędu jednego z parametrów aktualizowane są wartości współczynników $\hat{a}_1 \dots \hat{a}_6$, a następnie przeprowadzana jest symulacja. W stanie ustalonym obserwatora oraz maszyny odczytywana jest różnica między

wartością odtwarzaną a rzeczywistą prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika. Przy każdym uruchomieniu symulacji wartości składowych wektora prądu stojana oraz zmiennej ζ są zerowane. Ze względu na występowanie kwadratu modułu wektora strumienia wirnika w mianowniku zależności opisującej odtwarzaną prędkość kątową wirnika, w chwili rozpoczęcia symulacji przynajmniej jedna ze składowych tego wektora musi być różna od zera i w tym przypadku wynosi 0,1. Eksperyment przeprowadzono dla różnych prędkości wirnika przy stałym momencie obciążenia wynoszącym 0,4 oraz przy wykorzystaniu zestawu wzmacnień obserwatora \mathbf{K}_{z1} z załącznika B.2, który stosowany jest w układzie napędowym dla prędkości wirnika z przedziału od 0,1 do 1,0.

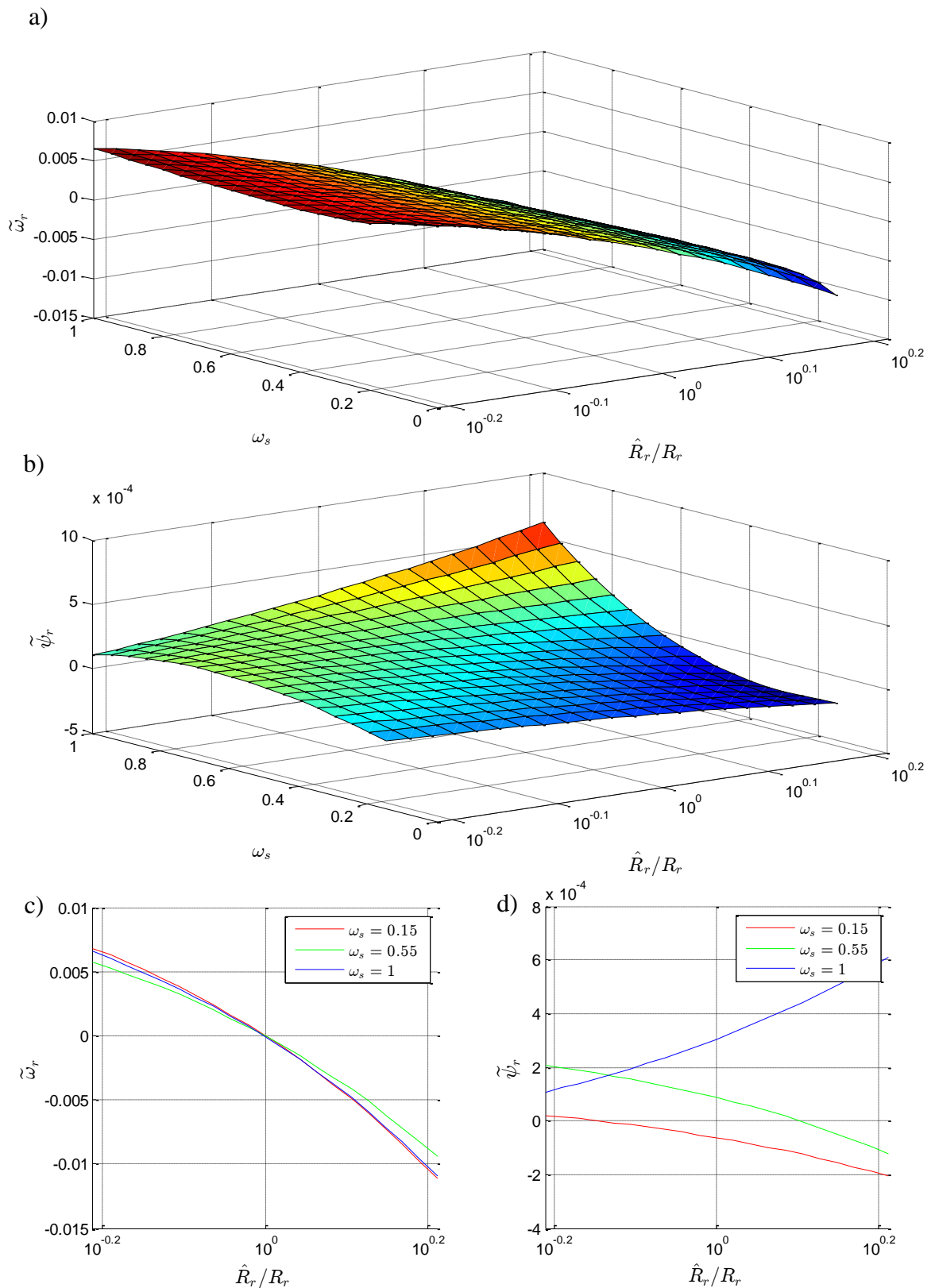
Na rysunkach 5.77 oraz 5.78 przedstawiono wyniki badań przy błędnie zidentyfikowanych rezystancjach stojana oraz wirnika. Dla poprawy czytelności rysunków oraz ułatwienia odczytania wartości, oprócz wykresu trójwymiarowego zamieszczono wykresy przedstawiające błędy odtwarzania w funkcji błędów identyfikacji parametrów dla skrajnych wartości prędkości oraz jednej prędkości pośredniej. Ponadto na osi błędów parametrów modelu maszyny zastosowano skalę logarymiczną, natomiast błędy te wyrażone są jako stosunek wartości zidentyfikowanej \hat{c} do rzeczywistej c . W tabelicy 5.4 przedstawiono wartości względne błędów odpowiadające danemu stosunkowi \hat{c}/c .

Tab. 5.4. Przeliczenie wartości błędów na błędy względne

$\frac{\hat{c}}{c}$	$10^{-0,2}$	$10^{-0,1}$	10^0	$10^{0,1}$	$10^{0,2}$
$\frac{\hat{c}-c}{c} [\%]$	-36,9	-20,6	0,0	25,9	58,5



Rys. 5.77. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu rezystancji stojana oraz pulsacji napięcia stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



Rys. 5.78. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu rezystancji wirnika oraz pulsacji napięcia stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$

Z przeprowadzonych badań wynika, że wpływ błędów identyfikacji rezystancji stojana nie ma istotnego wpływu na jakość odtwarzania prędkości wirnika w stanie ustalonym. W niewielkim stopniu oddziaływanie błędów rezystancji stojana rośnie wraz ze spadkiem prędkości i jest zauważalne dopiero dla prędkości mniejszych od 0,4. Błędy odtwarzania modułu wektora strumienia wirnika występują w całym zakresie prędkości i, podobnie jak błędy wirnika, rosną wraz ze spadkiem częstotliwości obrotów wirnika. W badanym przedziale prędkości, gdy zidentyfikowana wartość rezystancji stojana jest większa od rzeczywistej o 60%, błąd odtwarzania prędkości nie przekracza 0,32% prędkości znamionowej, natomiast maksymalny błąd odtwarzania modułu wektora strumienia wirnika nie przekracza 8%.

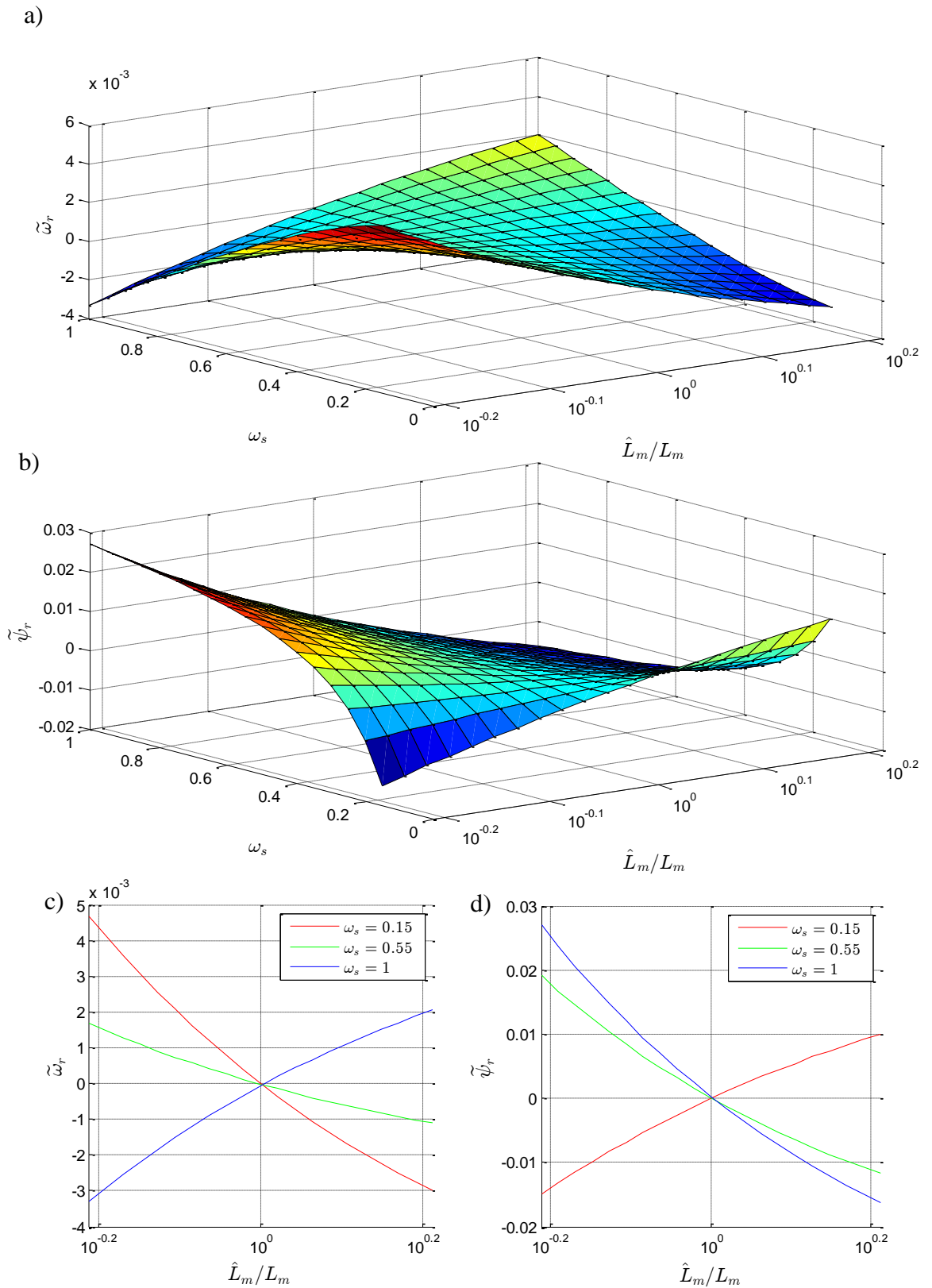
Błędy identyfikacji rezystancji wirnika mają niemal stały wpływ na błędy odtwarzania prędkości wirnika bez względu na pulsację napięcia stojana. Oddziaływanie błędów rezystancji wirnika jest bardziej zauważalne od oddziaływania błędów rezystancji stojana. W całym zakresie prędkości błąd identyfikacji rezystancji wirnika wynoszący 60% powoduje odchyłkę odtwarzanej prędkości wirnika wynoszącą około 0,011. Błąd rezystancji wirnika ma natomiast znikomy wpływ na odtwarzanie strumienia wirnika.

Indukcyjność stojana L_s , wirnika L_r oraz ich indukcyjność wzajemna L_m są wielkościami wzajemnie zależnymi. Podczas analizy wpływu błędów pojedynczych parametrów modelu maszyny indukcyjnej na działanie obserwatora korzystniej jest zatem rozpatrywać zmiany indukcyjności wzajemnej L_m oraz indukcyjności rozproszenia stojana $L_{s\sigma}$ oraz wirnika $L_{r\sigma}$:

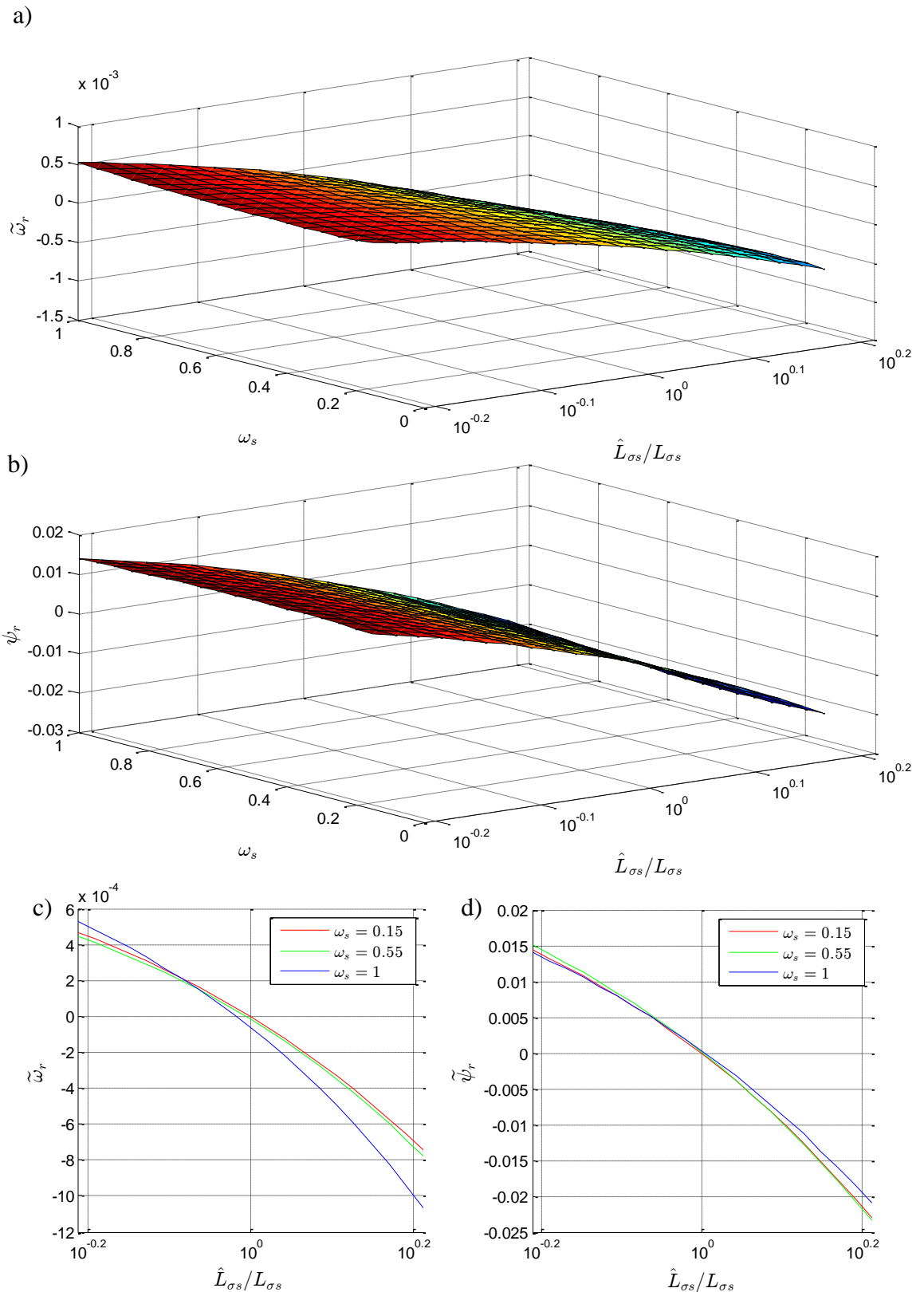
$$L_{s\sigma} = L_s - L_m, \quad (5.12)$$

$$L_{r\sigma} = L_r - L_m. \quad (5.13)$$

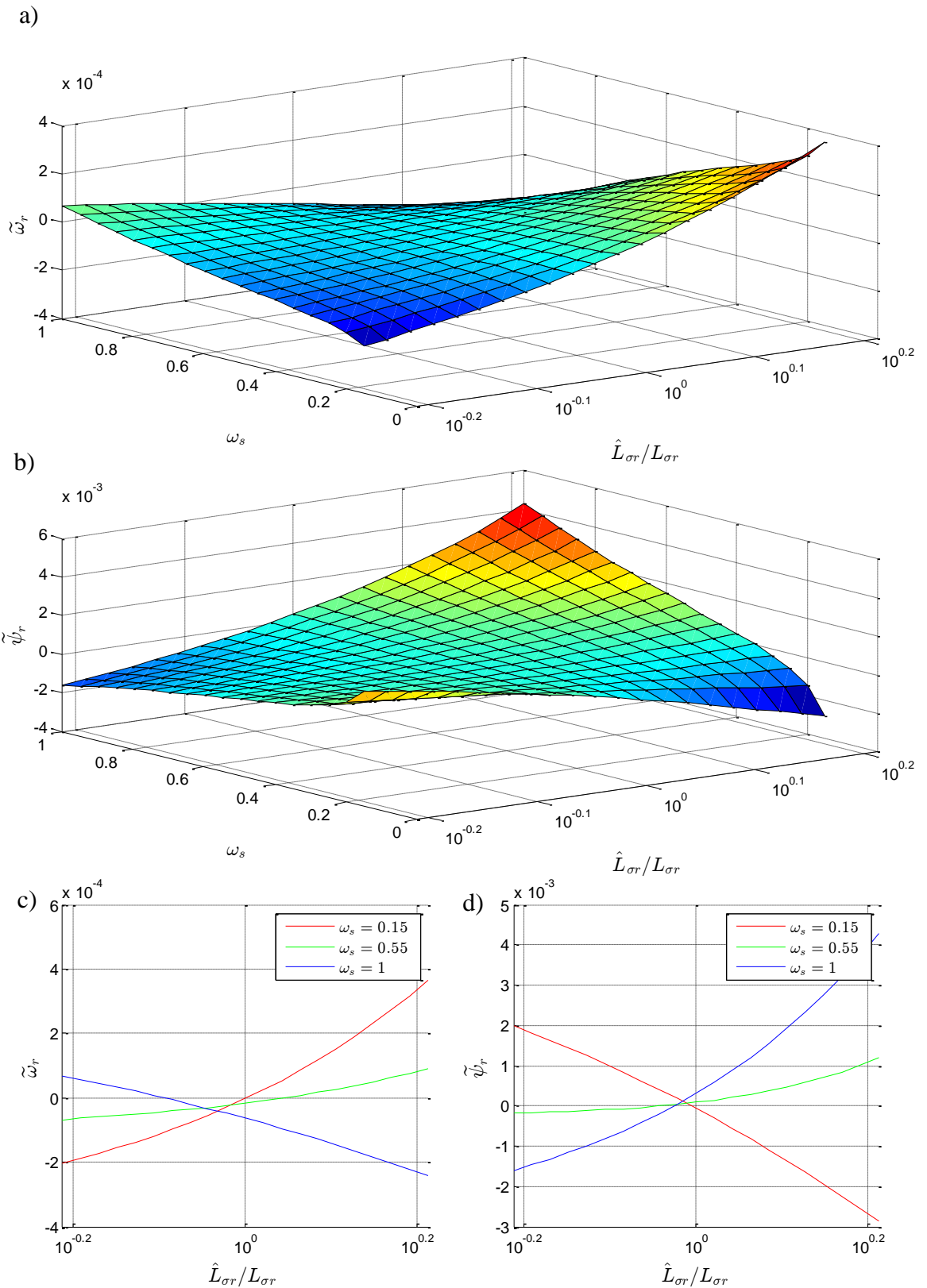
Na rysunkach 5.79 - 5.81 przedstawiono wpływ błędów identyfikacji indukcyjności głównej oraz indukcyjności rozproszenia na wartości błędów odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu wektora strumienia wirnika w stanie ustalonym. Symulacje przeprowadzono przy stałym momencie obciążenia wynoszącym 0,4.



Rys. 5.79. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności magnesującej oraz pulsacji napięcia stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



Rys. 5.80. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia stojana oraz pulsacji napięcia stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$



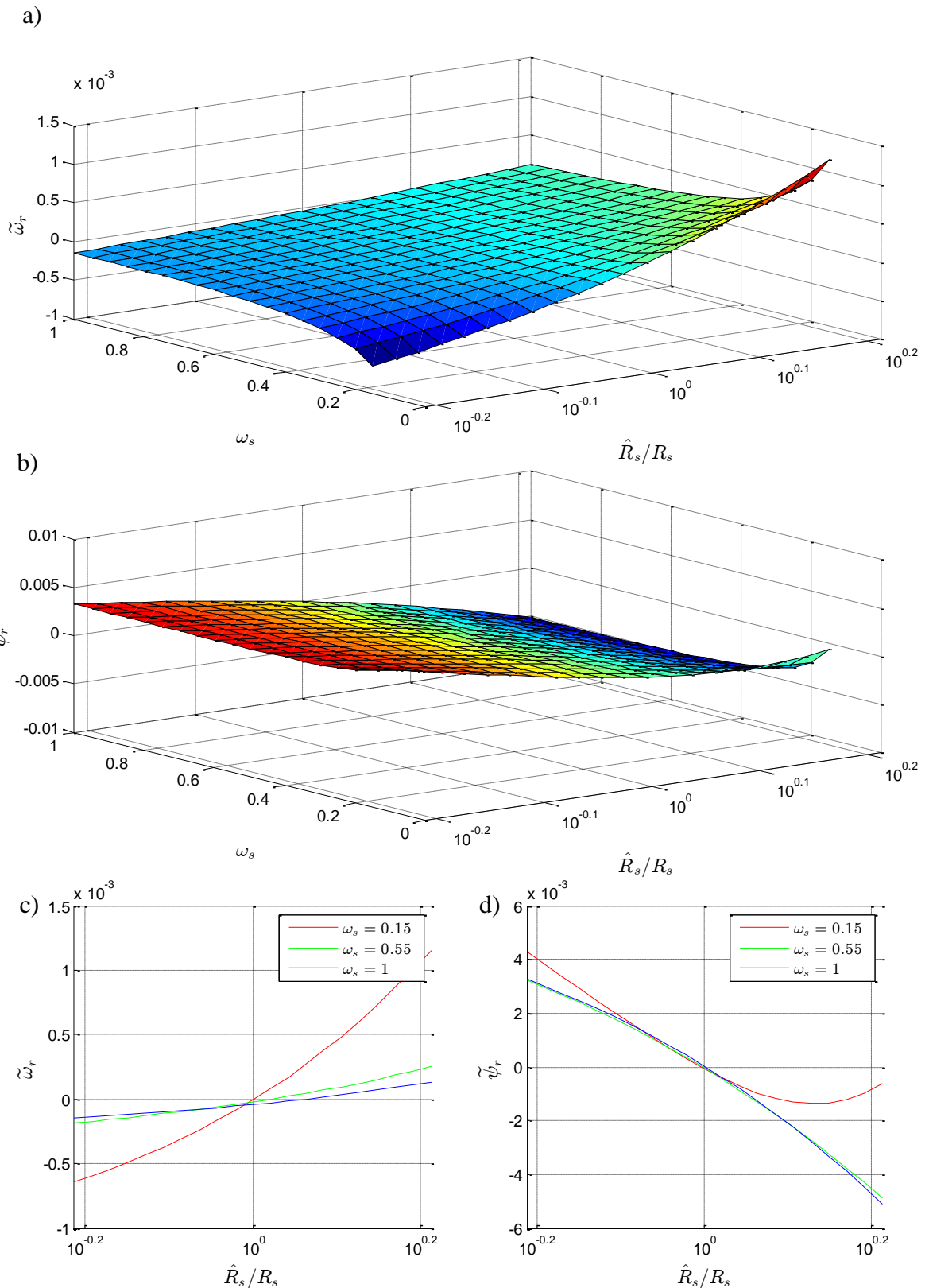
Rys. 5.81. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia wirnika oraz pulsacji napięcia stojana maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$

Podobnie jak w przypadku rezystancji, wpływ błędów identyfikacji indukcyjności magnesującej na błędy odtwarzania rośnie wraz ze spadkiem prędkości maszyny. W przypadku, gdy w obserwatorze indukcyjność \hat{L}_m jest około 1,6 razy mniejsza od wartości rzeczywistej, w stanie ustalonym błąd prędkości osiąga 0,5% dla $\omega_s = 0,15$, natomiast błąd modułu wektora strumienia wirnika dochodzi do 3% przy dużych prędkościach wirnika. Wraz ze wzrostem prędkości rośnie także błąd odtwarzania prędkości wirnika, co może być szczególnie zauważalne w zakresie osłabiania pola.

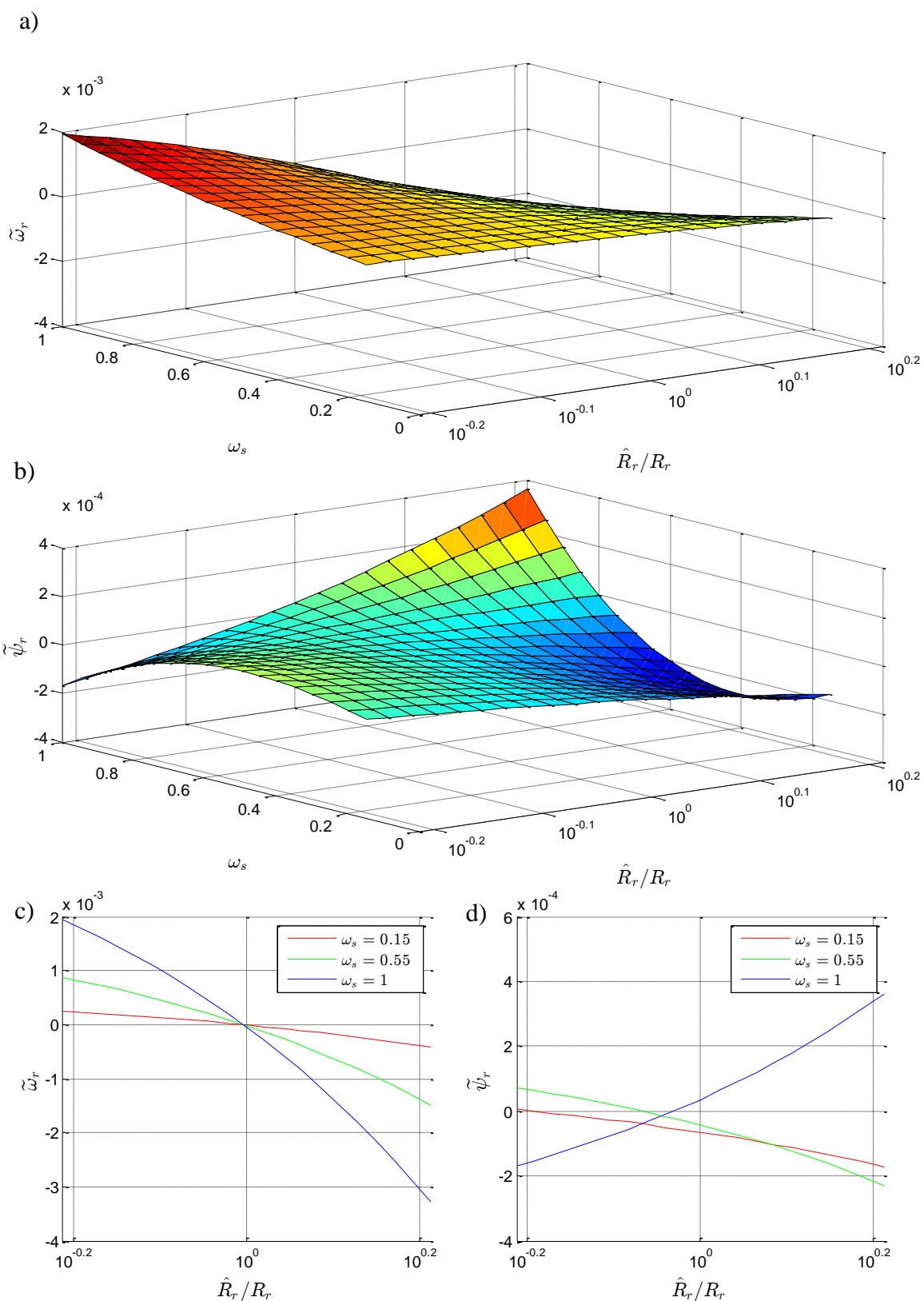
Błędy indukcyjności rozproszenia stojana oraz wirnika nie mają znacznego wpływu na jakość pracy obserwatora w stanie ustalonym. Jedynie odchyłki indukcyjności rozproszenia stojana prowadzą do występowania 2% błędu strumienia wirnika. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz strumienia wirnika w przypadku występowania źle oszacowanej indukcyjności rozproszenia wirnika są od dwóch do trzech rzędów wielkości mniejsze od błędów występujących w przypadku odchyłek pozostałych parametrów modelu maszyny.

Z powyższych badań wynika, że obserwator najbardziej narażony jest na błędy identyfikacji parametrów maszyny przy małych prędkościach wirnika. Najistotniejszy wpływ na błędy odtwarzania przy małych prędkościach w stanie ustalonym ma indukcyjność główna oraz rezystancja wirnika. Nieco mniejsze oddziaływanie błędów identyfikacji odnotować można w przypadku rezystancji stojana. Praktycznie bez wpływu są błędy indukcyjności rozproszenia zarówno stojana jak i wirnika. W przypadku dużych prędkości wirnika największe błędy odtwarzania występują dla błędnie oszacowanej rezystancji wirnika. Błędy rezystancji stojana oraz indukcyjności głównej sprzyjają występowaniu błędów odtwarzania również przy dużych prędkościach, jednak w mniejszym stopniu. Wpływ indukcyjności głównej nasila się jednak wraz ze wzrostem prędkości.

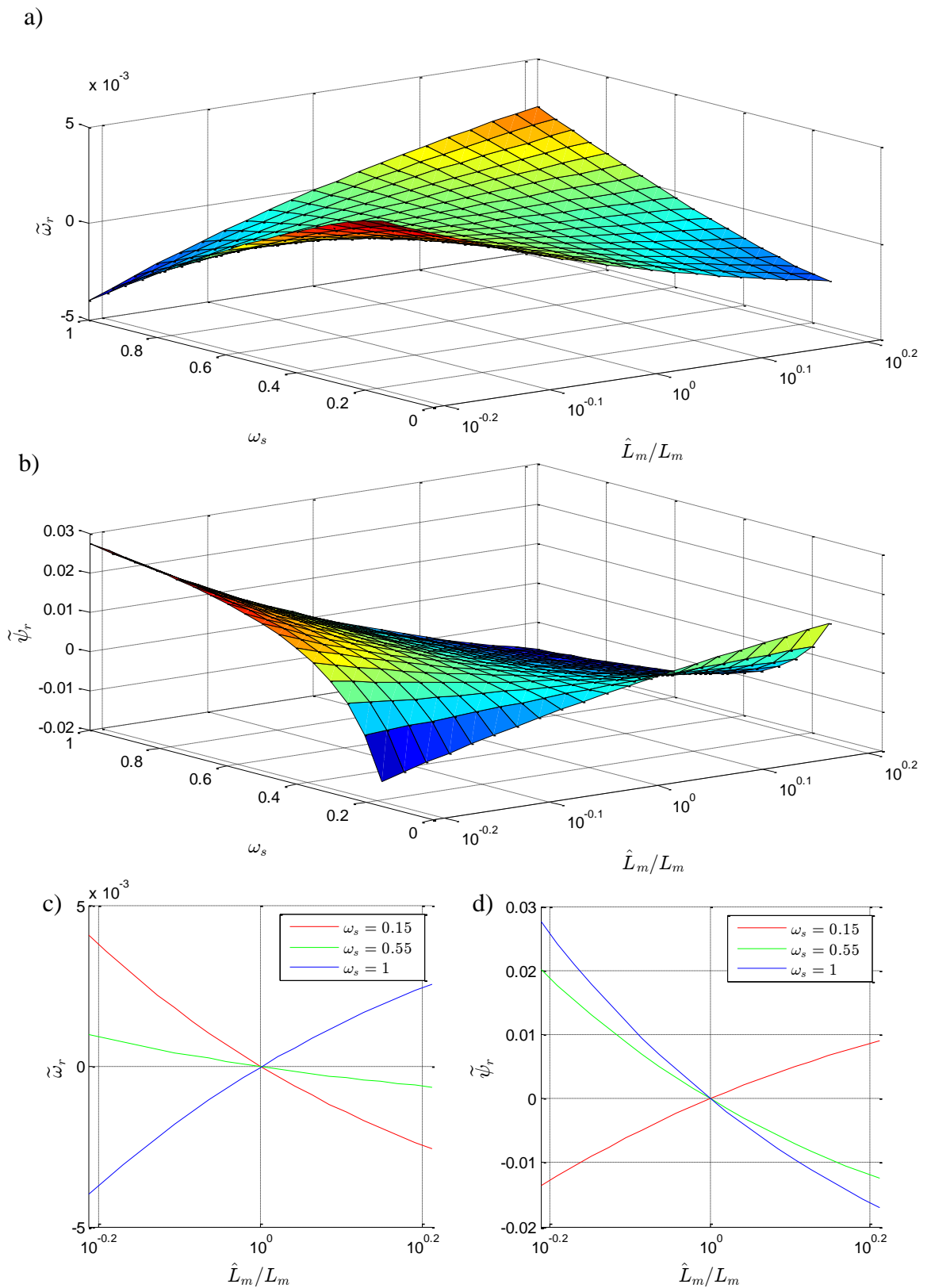
Powyższe wnioski wyciągnięto z przebiegów symulacyjnych uzyskanych przy maszynie obciążonej momentem $m_o = 0,4$. W rozdziale 5.4, na podstawie rozkładów biegunów obserwatora wykazano, że właściwości dynamiczne obserwatora są zależne od obciążenia jedynie w niewielkim stopniu. Błędy odtwarzania w stanie ustalonym uwarunkowane są natomiast błędami parametrów modelu maszyny. W celu zbadania wpływu momentu obciążenia na jakość działania obserwatora w stanie ustalonym badania powtórzono dla silnika nieobciążonego. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 5.82 - 5.86.



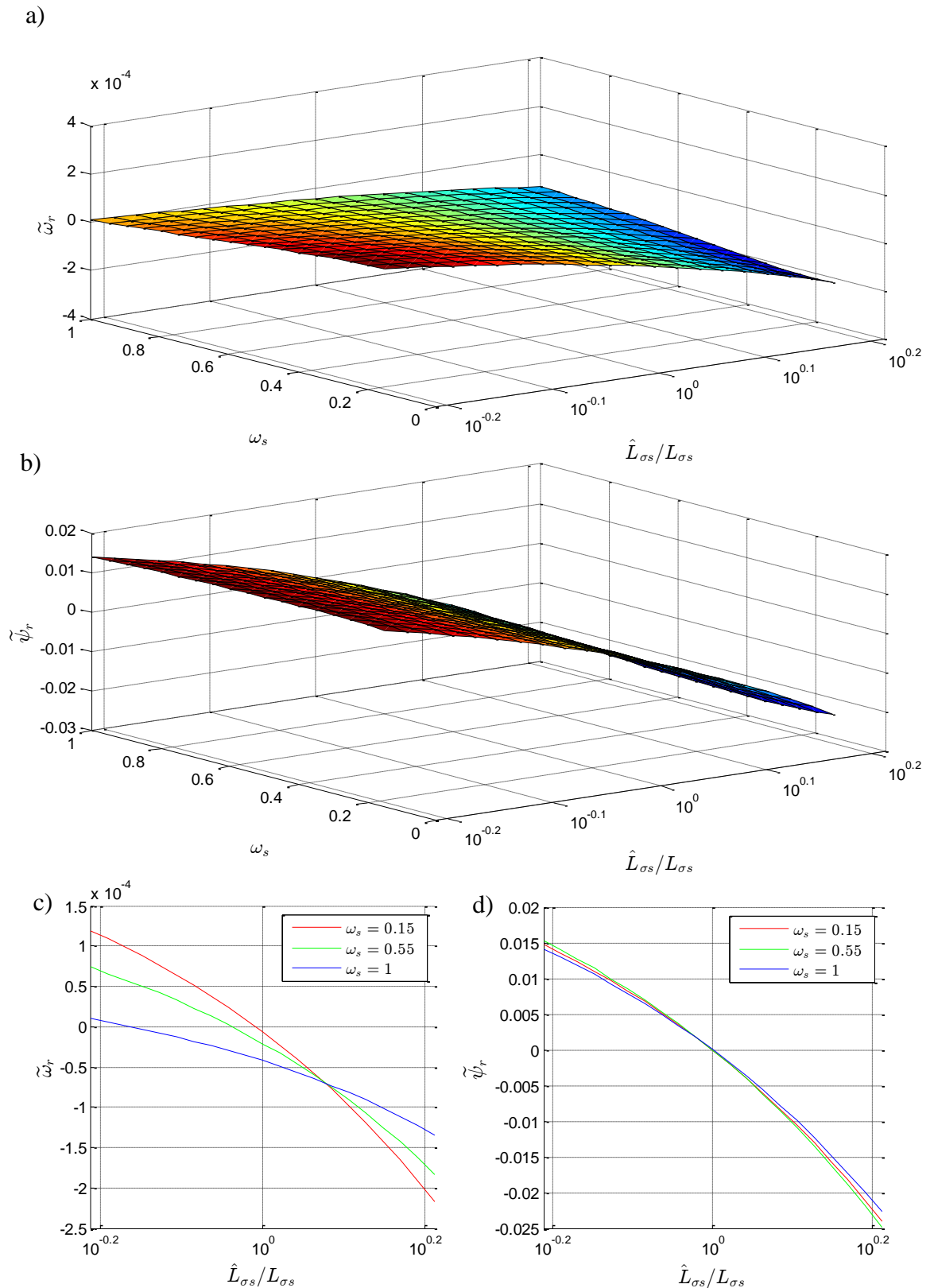
Rys. 5.82. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu rezystancji stojana oraz pulsacji napięcia stojana maszyny nieobciążonej



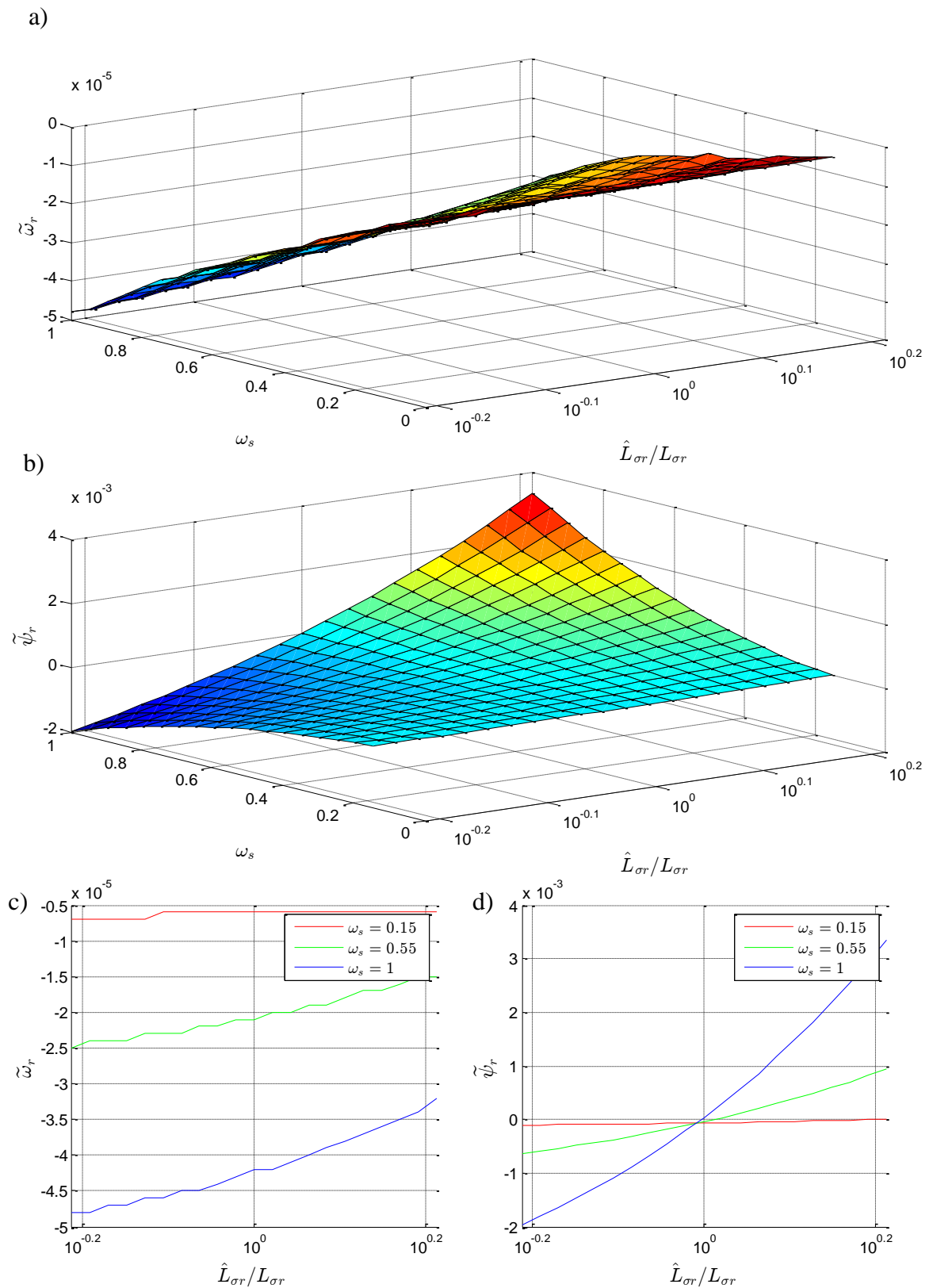
Rys. 5.83. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu rezystancji wirnika oraz pulsacji napięcia stojana maszyny nieobciążonej



Rys. 5.84. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności magnesującej oraz pulsacji napięcia stojana maszyny nieobciążonej



Rys. 5.85. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia stojana oraz pulsacji napięcia stojana maszyny nieobciążonej



Rys. 5.86. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia wirnika oraz pulsacji napięcia stojana maszyny nieobciążonej

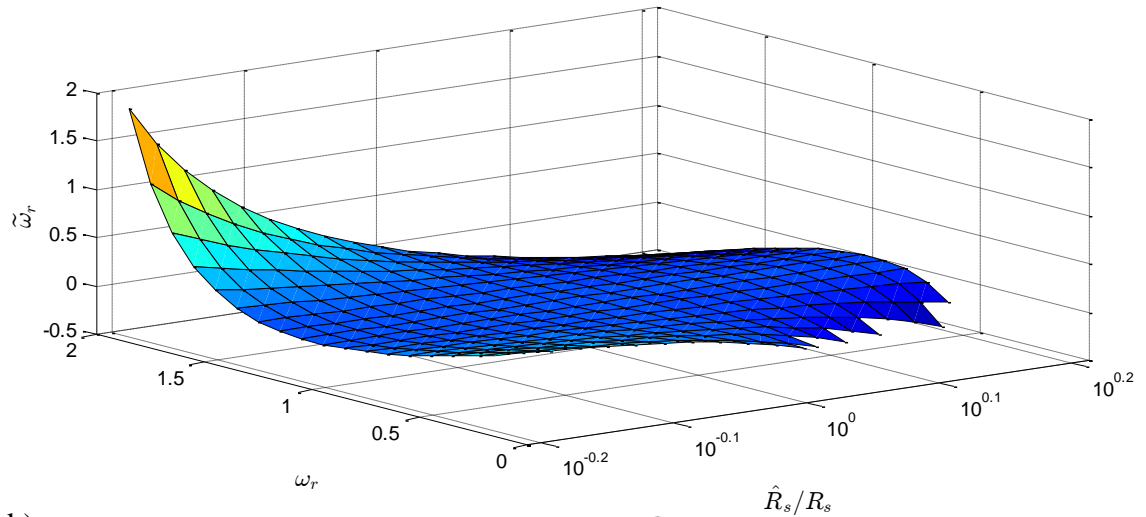
Podczas pracy maszyny bez obciążenia zmalał wpływ błędów rezystancji na występowanie błędów odtwarzania w stanie ustalonym. Błąd odtwarzania modułu strumienia wirnika przy występowaniu odchyłek rezystancji stojana zmalał ponad dziesięciokrotnie dla małych prędkości oraz kilkukrotnie w przypadku większych prędkości. Ociążenie maszyny przyczyniło się także do spadku wpływu błędów rezystancji wirnika na jakość odtwarzania prędkości w stanie ustalonym. Największe błędy estymacji tej wielkości występują przy dużych prędkościach wirnika i są one ponad trzykrotnie mniejsze niż w przypadku maszyny obciążonej momentem $m_o = 0,4$. Zmiana momentu praktycznie nie ma wpływu na wartości ustalonych błędów odtwarzania przy źle zidentyfikowanych indukcyjnościach, zarówno magnesującej jak i rozproszenia.

Z przeprowadzonych w tym rozdziale badań wynika, że największe oddziaływanie błędów parametrów nieobciążonej maszyny występuje w przypadku indukcyjności magnesującej oraz w mniejszym stopniu indukcyjności rozproszenia stojana. Wielkości te wpływają przede wszystkim na zmiany błędów odtwarzania modułu strumienia wirnika. Wraz ze wzrostem momentu obciążenia pojawia się także wpływ błędu rezystancji stojana na występowanie błędów odtwarzanego modułu strumienia wirnika. Ponadto błędy rezystancji wirnika wpływają negatywnie na jakość odtwarzania prędkości wirnika obciążonej maszyny.

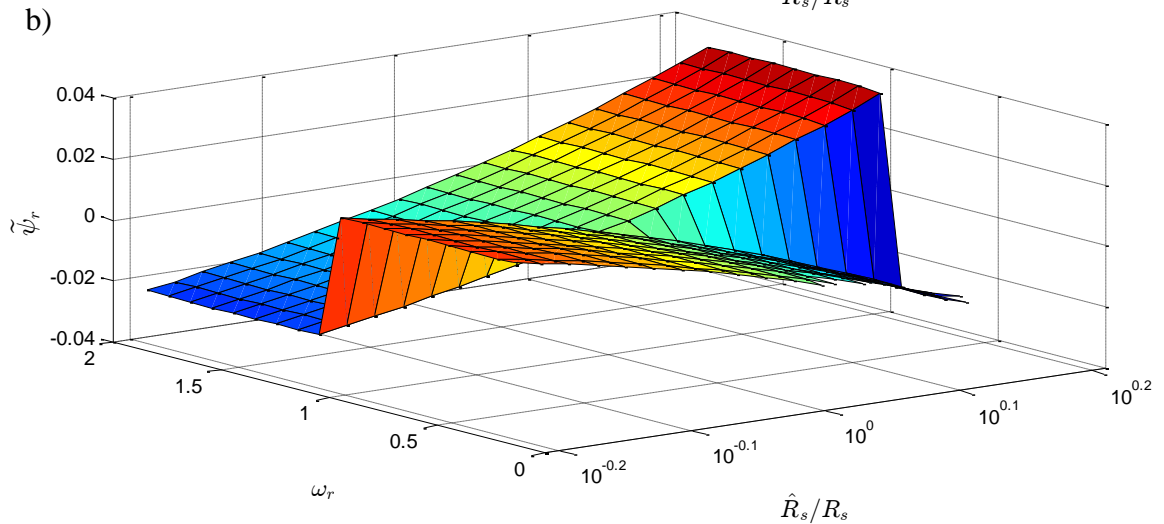
Jednym z celów niniejszej rozprawy jest zbadanie możliwości wykorzystania rozszerzonego obserwatora prędkości w procedurze lotnego startu, podczas którego występować mogą bardzo duże poślizgi. Ograniczając napięcie stojana do takiej wartości by nie przekroczyć znamionowego prądu stojana, uzyskuje się bardzo mały strumień wirnika. Analiza wpływu błędów parametrów maszyny na działanie obserwatora w stanie ustalonym w warunkach lotnego startu przeprowadzona została w kolejnym badaniu. Maszyna zasilana jest napięciem o stałej pulsacji $\omega_s = 1,0$. Badania symulacyjne przeprowadzono dla różnych prędkości wirnika, wymuszając w ten sposób poślizg maszyny, natomiast napięcie ograniczane jest do poziomu zapewniającego znamionowy prąd stojana. Wyniki eksperymentu przedstawiono na rysunkach 5.87 - 5.91. W badanych warunkach przy małych prędkościach wirnika oraz występowaniu dużych błędów parametrów obserwator traci stabilność. Wyniki dla tych punktów nie zostały zatem zaprezentowane na wykresach. Brak stabilności występuje przede wszystkim przy małych prędkościach, gdzie oczekiwany duży ujemny błąd odtwarzania przyczyniłby się do uzyskania ujemnej odtwarzanej prędkości wirnika. Stosując stały zestaw wzmocnień, zmiana odtwarzanego kierunku obrotów

proceeds often to the loss of stability of the observer, which justifies the obtained negative results.

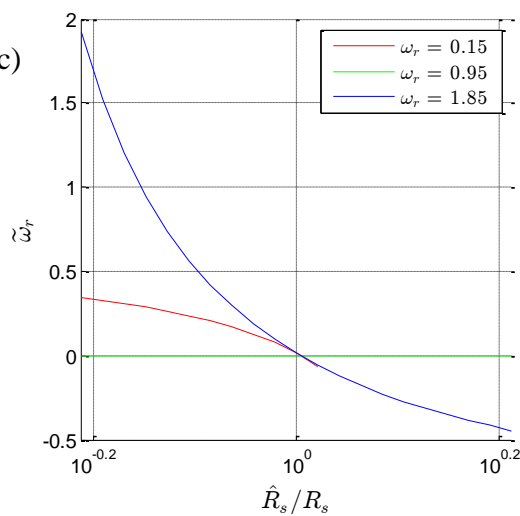
a)



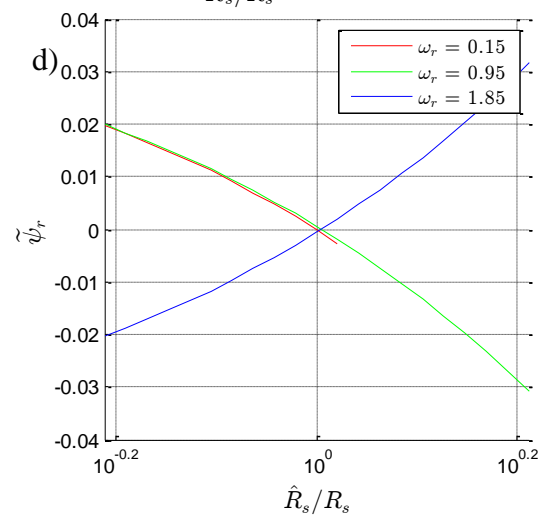
b)



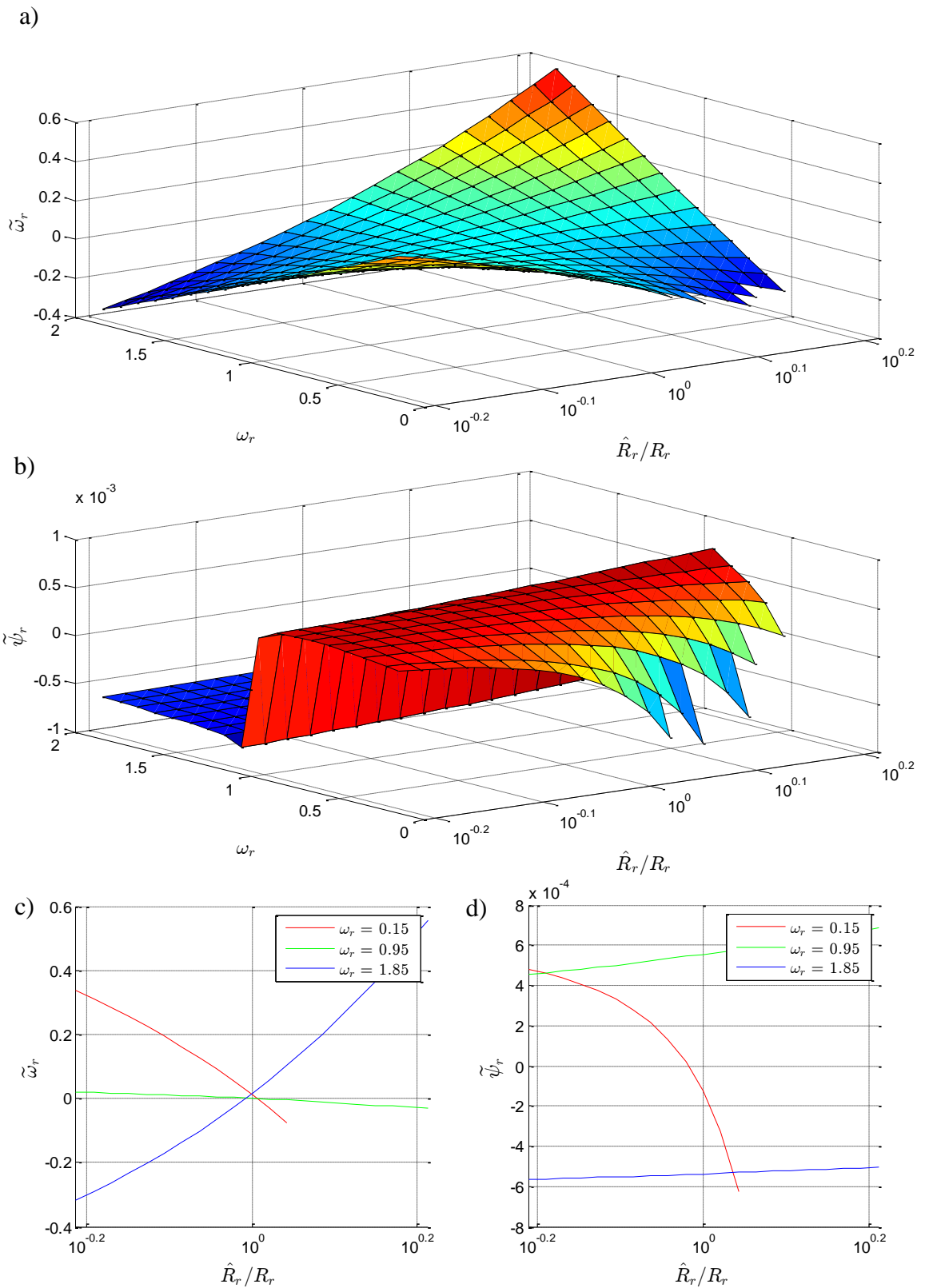
c)



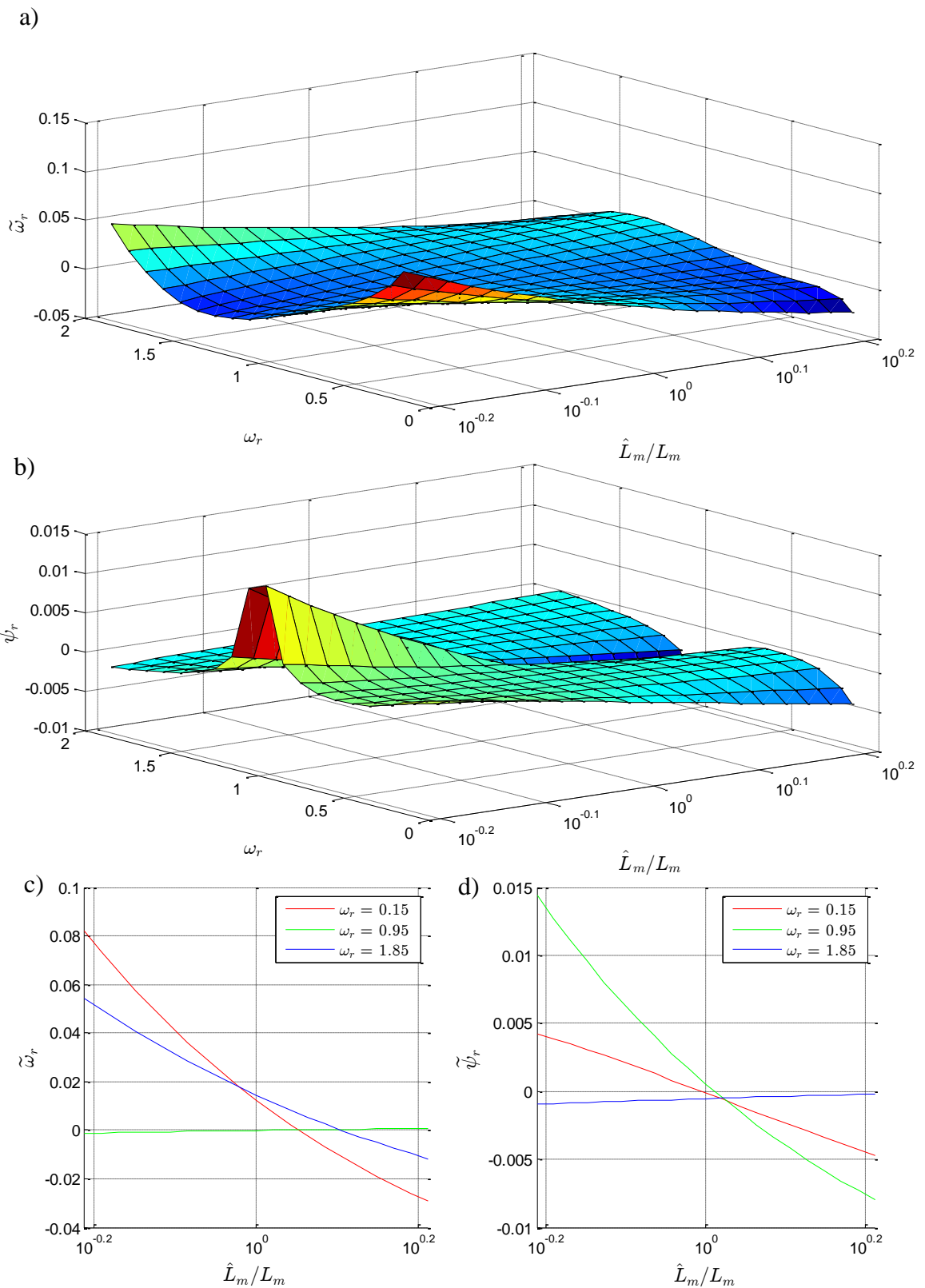
d)



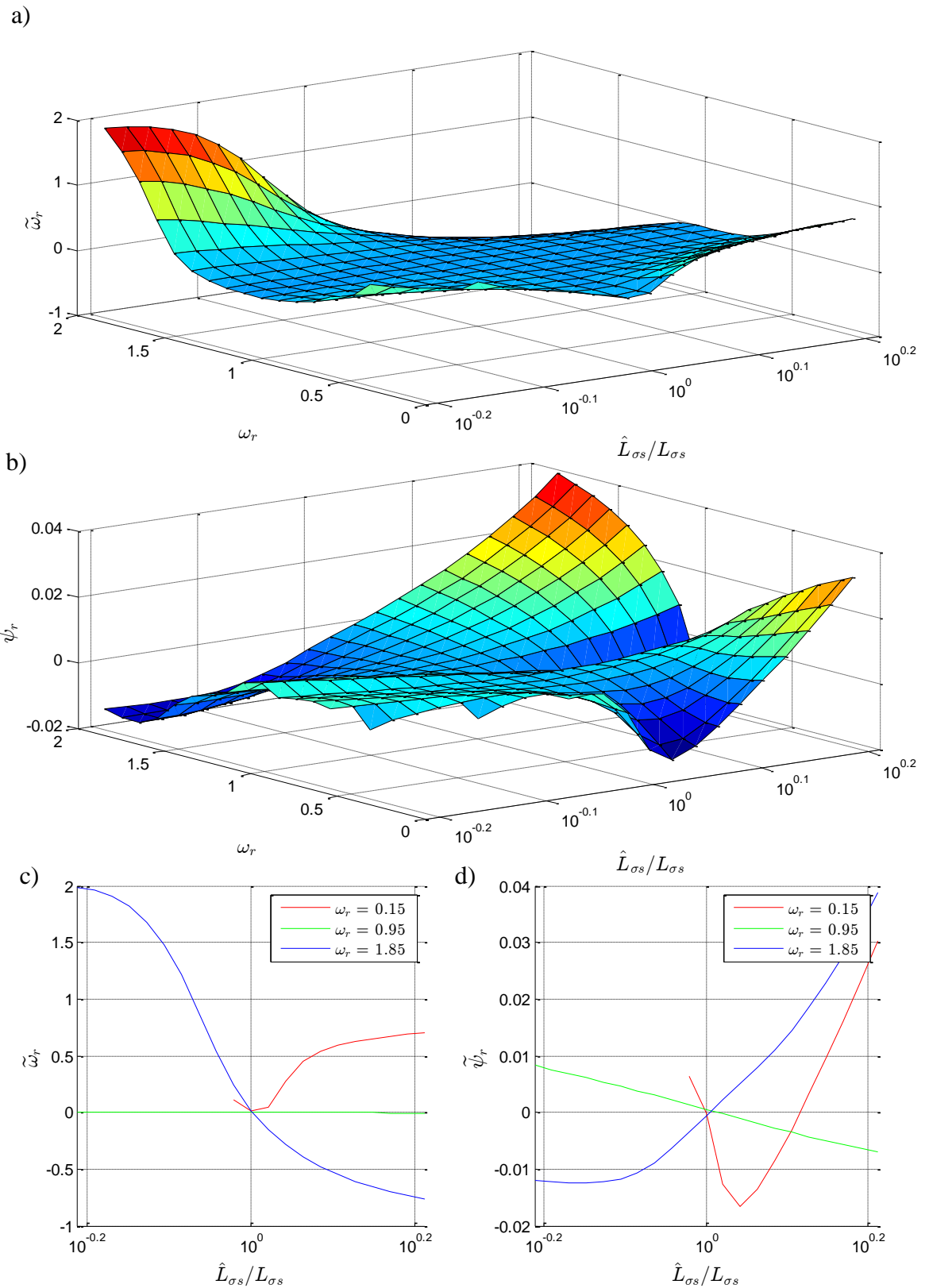
Rys. 5.87. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu rezystancji stojana oraz prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$



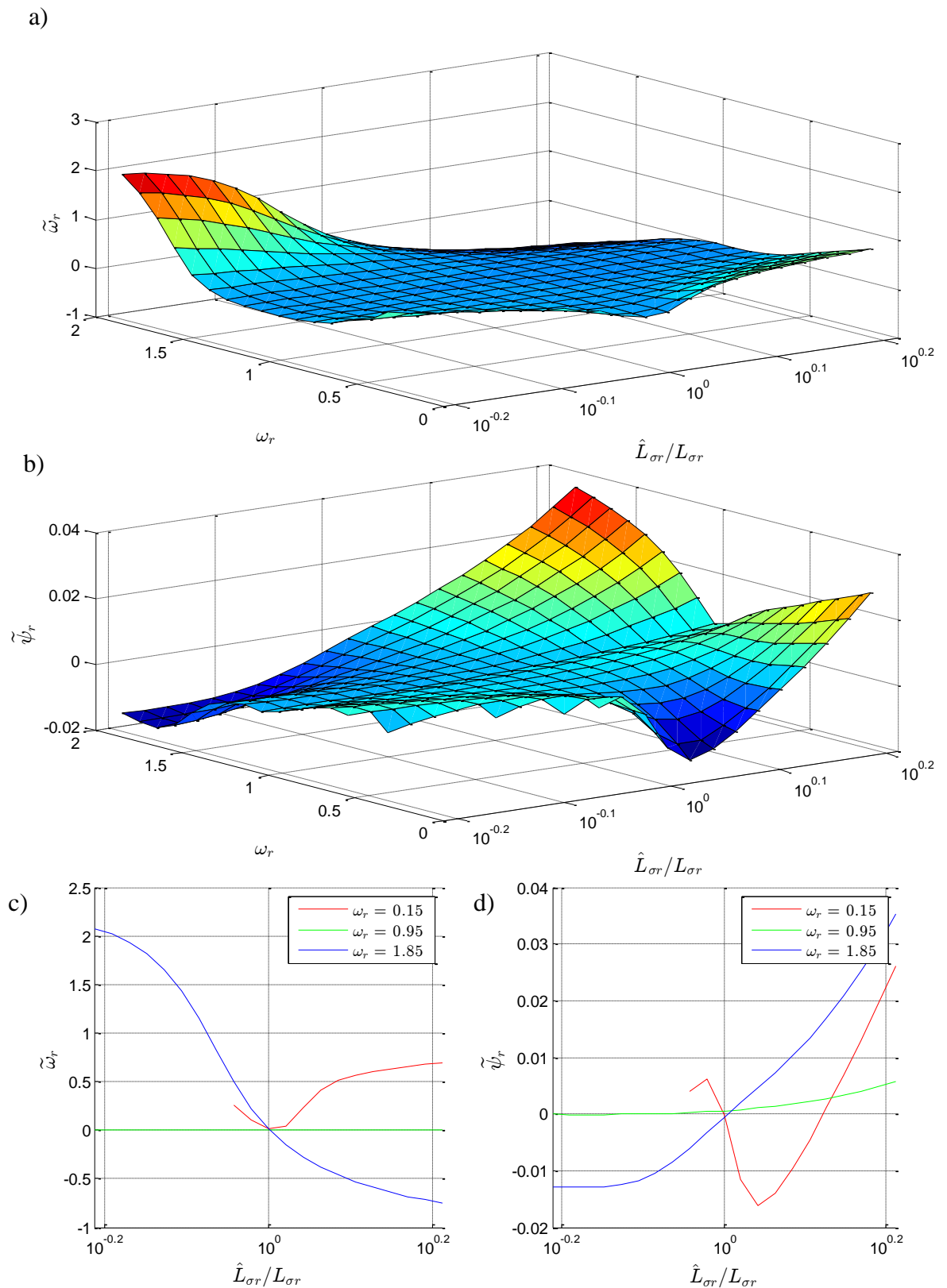
Rys. 5.88. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu rezystancji wirnika oraz prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$



Rys. 5.89. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności magnesującej oraz prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$



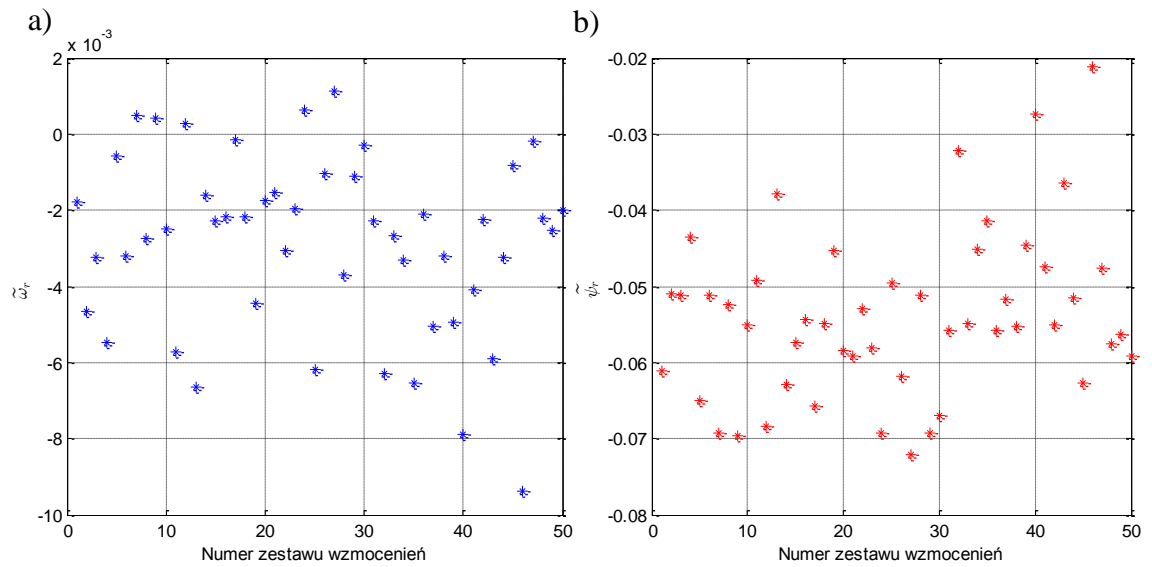
Rys. 5.90. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia stojana oraz prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$



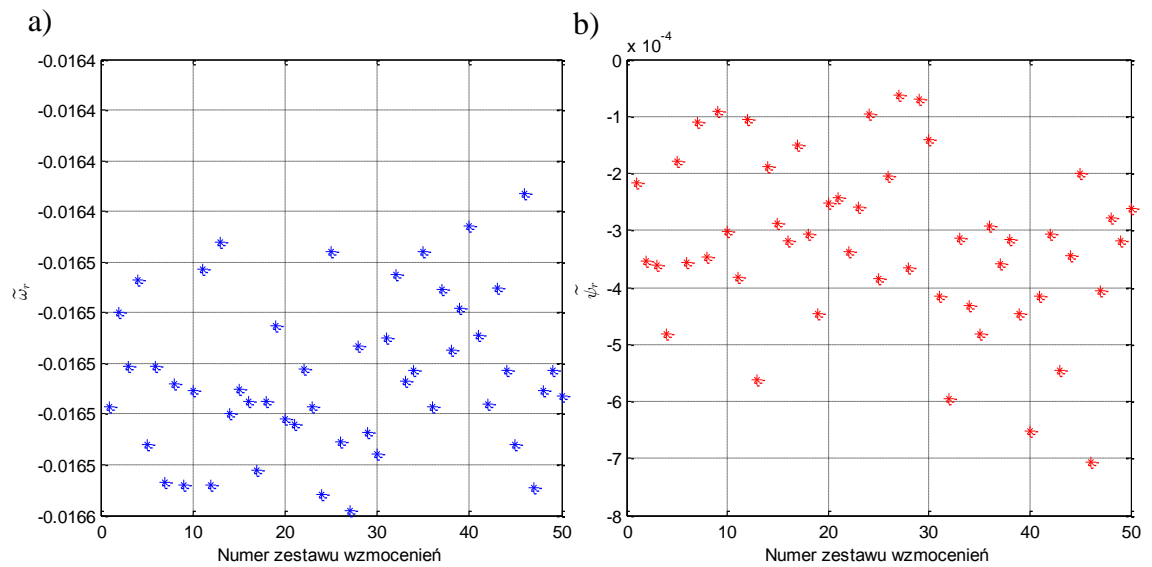
Rys. 5.91. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu strumienia wirnika w funkcji błędu indukcyjności rozproszenia wirnika oraz prędkości wirnika przy pulsacji napięcia stojana $\omega_s = 1,0$

Oddziaływanie błędów parametrów modelu maszyny przy dużych poślizgach jest znacznie większe niż podczas pracy silnika w typowych warunkach. Błędy odtwarzania prędkości wirnika sięgają nawet 100% rzeczywistej wartości. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że nawet przy takich błędach poprawnie można określić czy rzeczywista prędkość wirnika jest większa czy też mniejsza od pulsacji przyłożonego napięcia. Podczas procedury lotnego startu znany jest zatem kierunek zmiany częstotliwości napięcia stojana, tak by zmniejszyć poślizg. Wraz ze spadkiem poślizgu możliwe jest uzyskanie większego strumienia wirnika, a co za tym idzie maleje wpływ odchyłek parametrów modelu maszyny na jakość odtwarzania. Pomimo występowania stosunkowo dużych błędów odtwarzania przy dużych poślizgach oraz źle zidentyfikowanych parametrach maszyny, możliwe jest zatem wykorzystanie rozszerzonego obserwatora prędkości w procedurze lotnego startu.

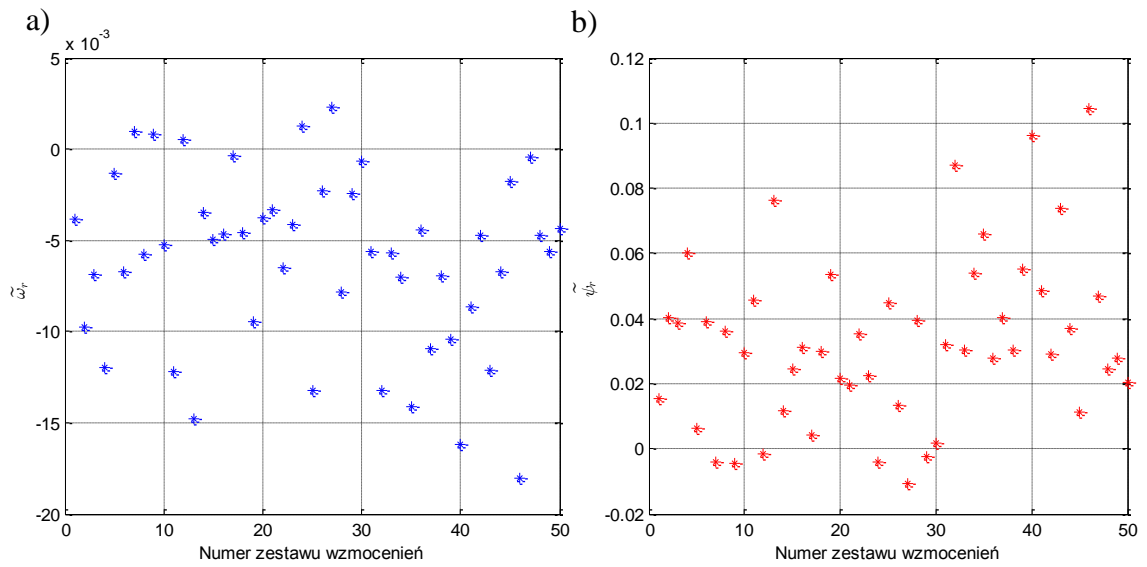
W [46] wykazano, że wartości wzmocnień obserwatora strumienia wirnika mają wpływ na występowanie błędów odtwarzania przy występowaniu błędów parametrów modelu. Podobnego spostrzeżenia spodziewać się można również w przypadku rozszerzonego obserwatora prędkości. Ze względu na brak znajomości analitycznych zależności opisujących błędy odtwarzania w stanie ustalonym w funkcji błędów parametrów modelu oraz dużą liczbę wzmocnień obserwatora, praktycznie nie ma możliwości zbadania wpływu wartości wzmocnień z całego dopuszczalnego przedziału. W pracy tej wpływ wartości wzmocnień obserwatora na jego właściwości w stanie ustalonym przeanalizowano na podstawie 50 zestawów wzmocnień uzyskanych w kolejnych uruchomieniach algorytmu ewolucyjnego. Z przeprowadzonych badań wynika, że największe błędy odtwarzania w stanie ustalonym pojawiają się przy małych prędkościach wirnika. Podczas eksperymentu przyjęto zatem prędkość $\omega_r = 0,2$ oraz moment obciążenia wynoszący 0,4. Błędy odtwarzania prędkości wirnika oraz modułu wektora strumienia wirnika w stanie ustalonym dla kolejnych zestawów wzmocnień przedstawiono na rysunkach 5.92 - 5.96.



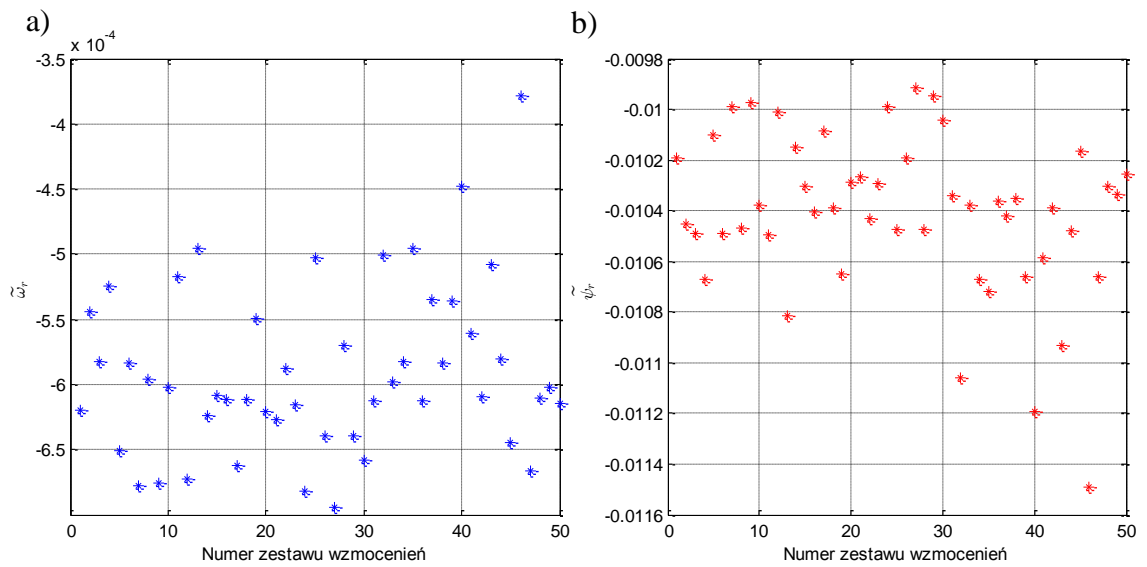
Rys. 5.92. Ustalone błędy odtwarzania prędkości wirnika a) oraz modułu strumienia wirnika b) dla 50 różnych zestawów wzmacnień przy błędzie rezystancji stojana wynoszącym 60%



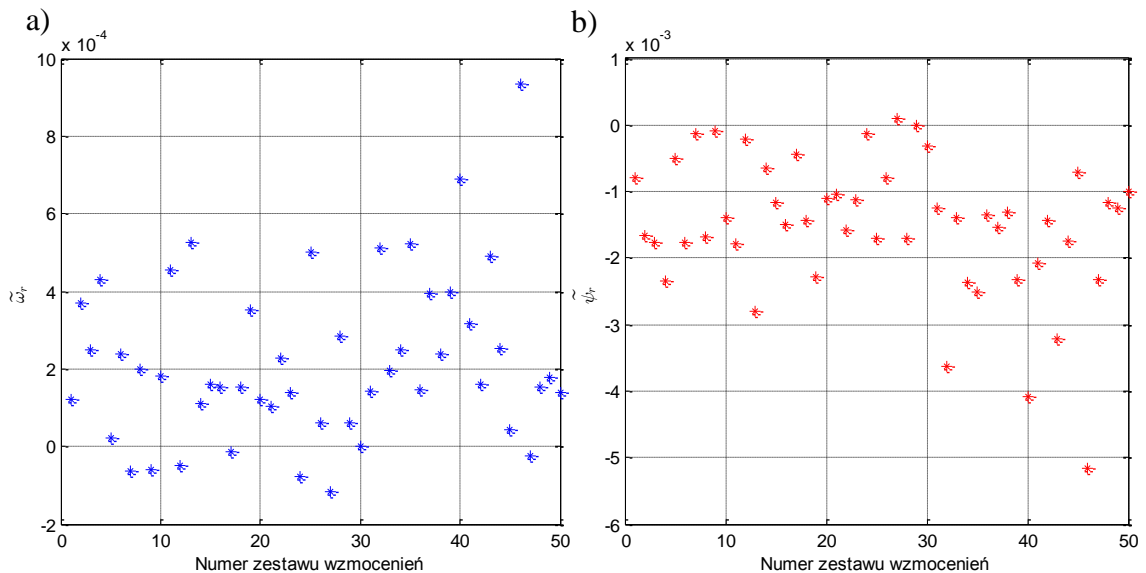
Rys. 5.93. Ustalone błędy odtwarzania prędkości wirnika a) oraz modułu strumienia wirnika b) dla 50 różnych zestawów wzmacnień przy błędzie rezystancji wirnika wynoszącym 60%



Rys. 5.94. Ustalone błędy odtwarzania prędkości wirnika a) oraz modułu strumienia wirnika b) dla 50 różnych zestawów wzmacnień przy błędzie indukcyjności magnesującej wynoszącym 60%



Rys. 5.95. Ustalone błędy odtwarzania prędkości wirnika a) oraz modułu strumienia wirnika b) dla 50 różnych zestawów wzmacnień przy błędzie indukcyjności rozproszenia stojana wynoszącym 60%



Rys. 5.96. Ustalane błędy odtwarzania prędkości wirnika a) oraz modułu strumienia wirnika b) dla 50 różnych zestawów wzmacnień przy indukcyjności rozproszenia wirnika wynoszącym 60%

Z przeprowadzonych badań wynika, że właściwości obserwatora w stanie ustalonym zależą nie tylko od wartości błędów parametrów, ale także od wartości wzmacnień obserwatora. W przypadku występowania błędów identyfikacji rezystancji stojana, ustalone błędy odtwarzania prędkości wirnika wahają się w przedziale od $-0,009$ do $+0,001$ w zależności od wartości wzmacnień. Istnieją zatem wzmacnienia, dla których błąd prędkości jest bliski zera. Należy jednak zauważyć, że przyjęcie zestawu wzmacnień minimalizującego błędy estymacji prędkości wirnika, pogarsza jakość odtwarzania strumienia wirnika. Dla zestawu wzmacnień numer 30 w stanie ustalonym błąd odtwarzania prędkości wirnika jest mniejszy niż $-0,001$, natomiast błąd odtwarzania modułu wektora strumienia wirnika wynosi prawie $-0,07$. Odwrotnie jest w przypadku zestawu wzmacnień numer 46, gdzie błąd odtwarzania prędkości wirnika niemal sięga $-0,009$, natomiast błąd strumienia wirnika spada do $-0,02$.

Wpływ błędów identyfikacji rezystancji wirnika na jakość odtwarzania w stanie ustalonym praktycznie nie ulega zmianie wraz ze zmianami wartości wzmacnień. Błąd odtwarzania prędkości dla wszystkich badanych zestawów wynosi około $0,0165$, natomiast błędy modułu wektora strumienia wirnika pozostają niemal zerowe.

Wraz ze zmianami wzmacnień obserwatora, błędy identyfikacji indukcyjności głównej wpływają na właściwości obserwatora w stanie ustalonym w podobny sposób jak błędy rezystancji stojana. Zestaw wzmacnień numer 30, który zapewnia niewielkie błędy odtwarzania prędkości wirnika w przypadku występowania błędu identyfikacji rezystancji stojana, prowadzi do uzyskania niewielkich błędów odtwarzania prędkości wirnika także

przy występowaniu błędu indukcyjności głównej. W odróżnieniu od błędów rezystancji stojana, błędy indukcyjności głównej nie przyczyniają się do występowania błędów strumienia wirnika dla zestawów wzmacnień, które zapewniają niewielkie błędy odtwarzania prędkości wirnika.

Błędy identyfikacji indukcyjności rozproszenia stojana nie przyczyniają się do pojawiania się błędów odtwarzania prędkości wirnika. Błąd odtwarzania strumienia wirnika natomiast zmienia się w niewielkim zakresie przy zmianach zestawów wzmacnień. Błędy identyfikacji indukcyjności rozproszenia wirnika nie mają praktycznie wpływu na jakość odtwarzania w stanie ustalonym, zatem zmiany wartości wzmacnień obserwatora w przypadku tego parametru nie wpływają na występowanie błędów estymacji prędkości wirnika czy strumienia wirnika.

Istnieje możliwość doboru wartości wzmacnień obserwatora zapewniających małe błędy odtwarzania prędkości wirnika w stanie ustalonym w przypadku, gdy parametry modelu maszyny obciążone są błędami. Nie ma jednak możliwości redukcji wpływu błędów rezystancji wirnika na statyczne właściwości obserwatora. Przyjęcie zestawu wzmacnień zapewniającego małe błędy odtwarzania prędkości wirnika może skutkować występowaniem błędów odtwarzania strumienia wirnika, szczególnie w przypadku gdy rezystancja stojana obciążona jest znacznym błędem.

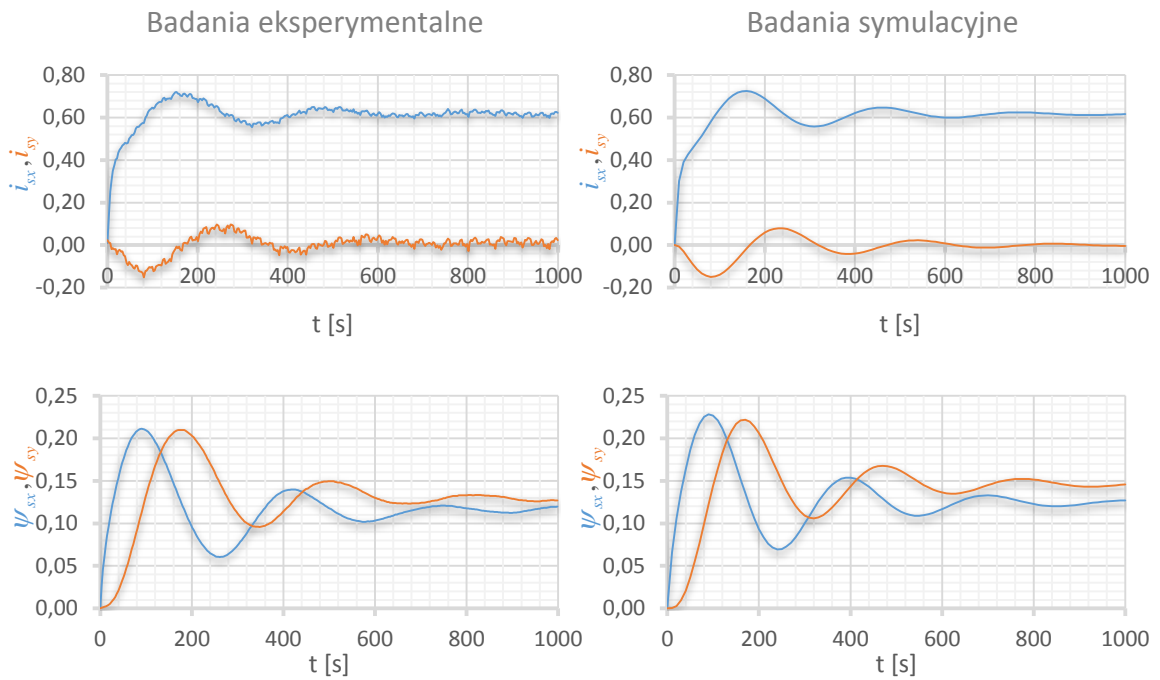
5.6. Załączanie maszyny przy niezerowej prędkości wirnika

5.6.1. Wstępna identyfikacja prędkości

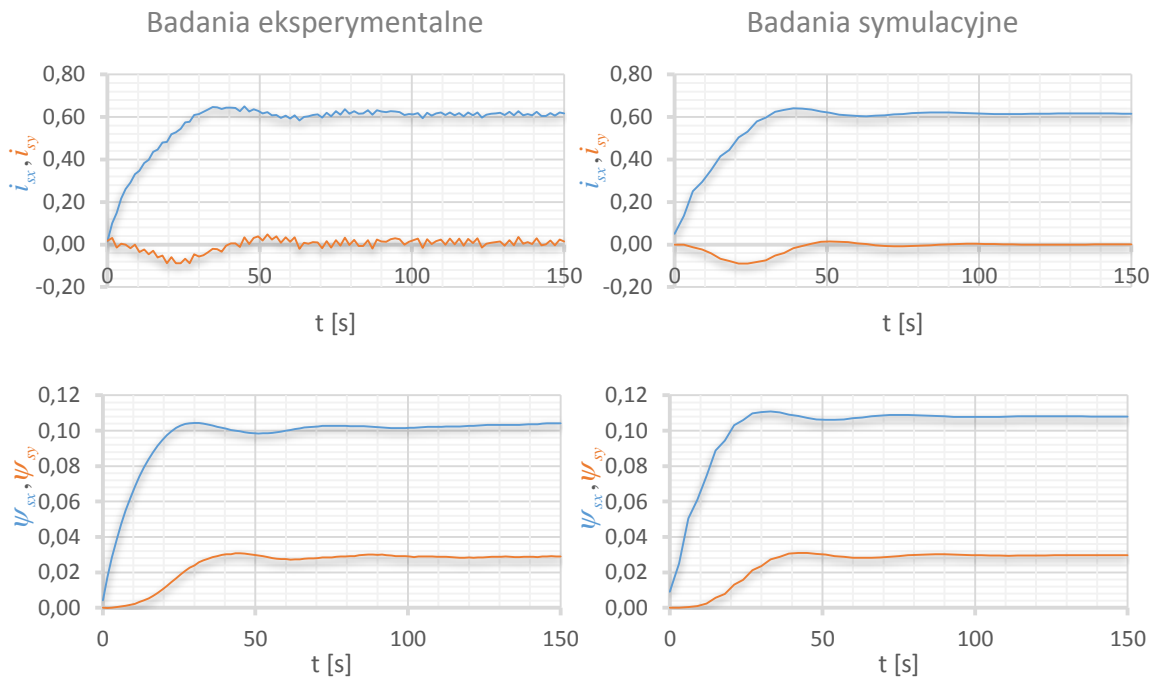
Algorytm wstępnej identyfikacji prędkości wirnika przed załączeniem falownika maszyny do normalnej pracy opisany został w rozdziale 4.2. W celu oszacowania prędkości wirnika wymuszana jest skokowo stała wartość składowej u_{sx} napięcia stojana. Strumień stojana obliczany jest z zależności (4.20) na podstawie przebiegów prądów stojana. W stanie ustalonym określany jest stosunek składowej strumienia stojana ψ_{sy} do składowej napięcia stojana u_{sx} . Na podstawie uzyskanego wzmacnienia statycznego $k_{\psi/u}$ obliczana jest prędkość wirnika z zależności (4.21).

Na rysunkach 5.97 - 5.100 przedstawiono przebiegi składowych prądu stojana oraz obliczonych składowych strumienia stojana przy skokowym wymuszeniu składowej

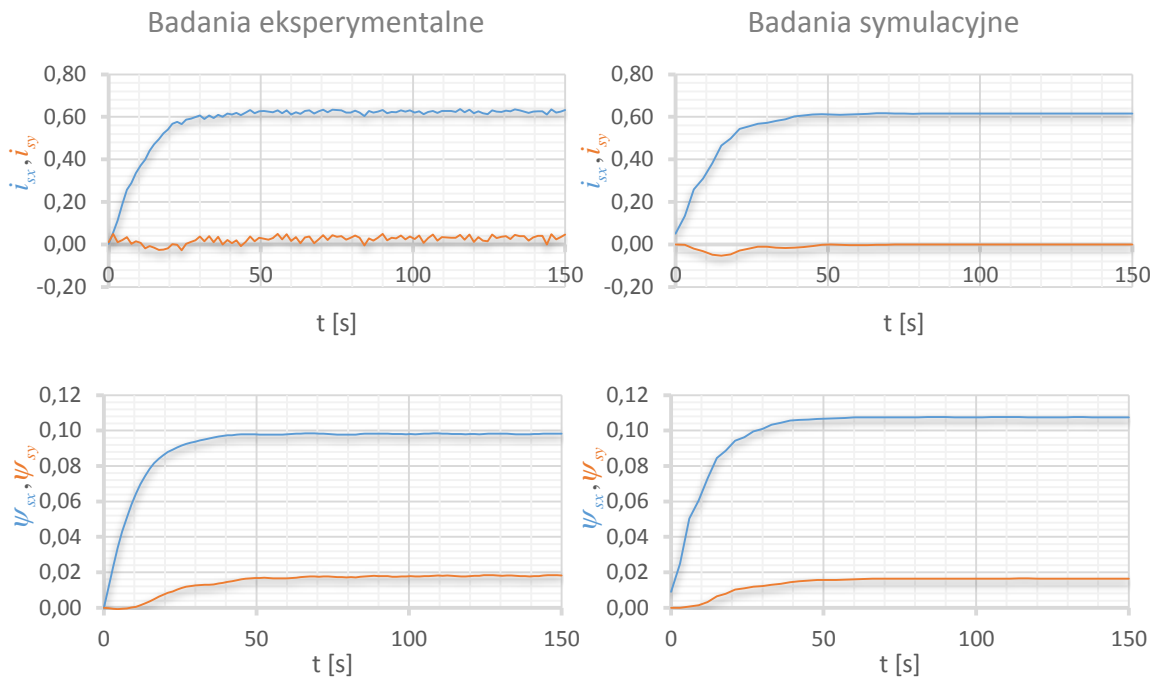
$u_{sx} = 0,03$ dla różnych prędkości wirnika. Odczytane wzmocnienia statyczne $k_{\psi/u}$ oraz oszacowane prędkości przedstawiono w tabelicy 5.5.



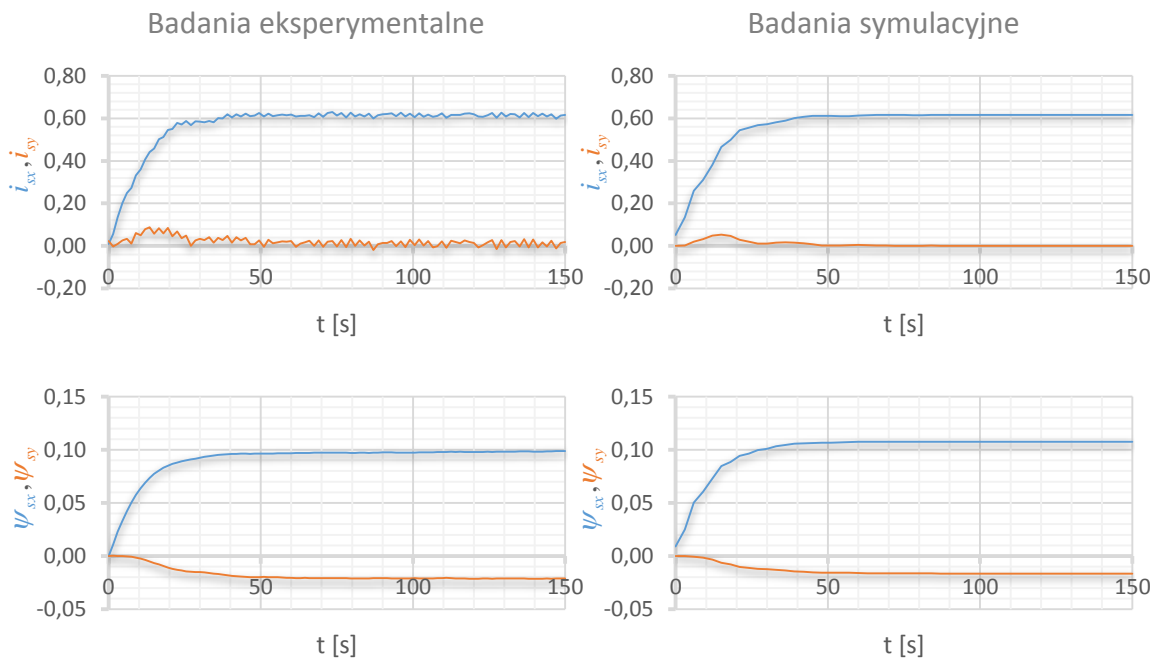
Rys. 5.97. Przebiegi składowych wektora prądu stojana oraz strumienia stojana podczas wstępnej identyfikacji prędkości wirnika przy $\omega_r = 0,1$



Rys. 5.98. Przebiegi składowych wektora prądu stojana oraz strumienia stojana podczas wstępnej identyfikacji prędkości wirnika przy $\omega_r = 0,5$



Rys. 5.99. Przebiegi składowych wektora prądu stojana oraz strumienia stojana podczas wstępnej identyfikacji prędkości wirnika przy $\omega_r = 0,9$



Rys. 5.100. Przebiegi składowych wektora prądu stojana oraz strumienia stojana podczas wstępnej identyfikacji prędkości wirnika przy $\omega_r = -0,9$

Tab. 5.5. Wzmocnienia statyczne $k_{\psi/u}$ oraz oszacowane prędkości wirnika uzyskane w eksperymencie oraz symulacjach podczas wstępnej identyfikacji prędkości

ω_r	Eksperyment		Symulacja	
	$k_{\psi/u}$	ω_r	$k_{\psi/u}$	ω_r
0.1	4.232	0.138	4.879	0.120
0.5	0.963	0.601	0.988	0.586
0.9	0.605	0.956	0.549	1.054
-0.9	-0.703	-0.823	-0.549	-1.054

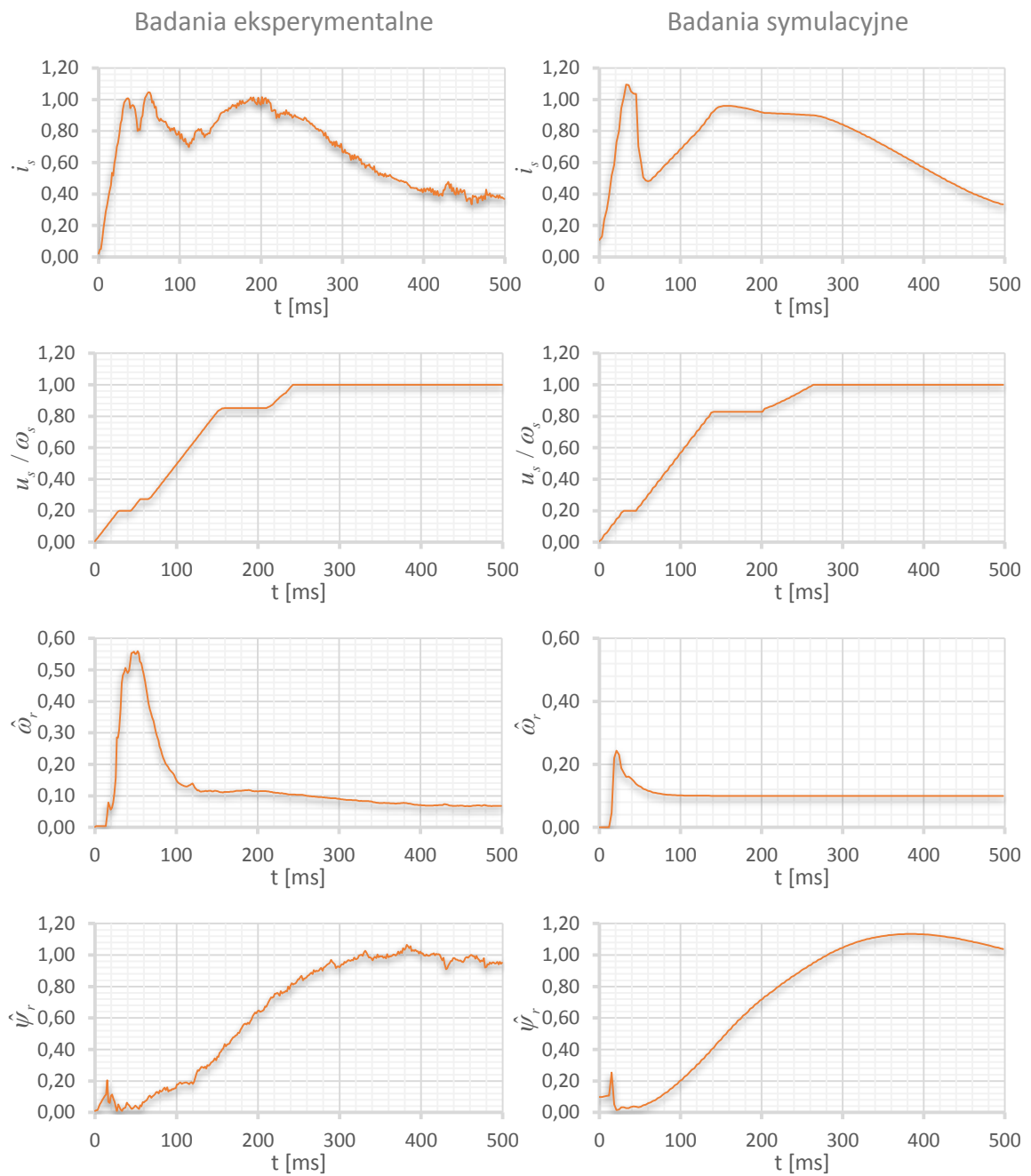
Prędkość wirnika zidentyfikowana została z błędem bezwzględnym nieprzekraczającym 0,15 dla wszystkich przebadanych prędkości. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że uzyskiwanie wartości składowych wektora strumienia stojana z równania (4.20) obarczone jest problemami charakterystycznymi dla modelu napięciowego [2]. Odtwarzane zmienne podatne są na błędy rezystancji stojana, pomiaru prądu stojana oraz brak dokładności generowania zadanego napięcia w falowniku. Czynniki te wpływają mogą na duże błędy identyfikacji prędkości wirnika. W przypadku niewielkich prędkości niewielkie zmiany obrotów wirnika powodują stosunkowo duże zmiany wzmocnienia statycznego $k_{\psi/u}$. Możliwe jest wówczas dokładniejsze oszacowanie prędkości wirnika. Przy dużych obrotach maszyny, powyżej 0,5, ustalony strumień stojana ulega niewielkim zmianom wraz ze zmianą prędkości, co czyni uzyskany wynik bardziej podatny na błędy.

Wykorzystanie zaproponowanej metody wstępnej identyfikacji umożliwia rozróżnienie zakresu małej lub dużej prędkości. Jest to wystarczająca informacja do przeprowadzania dalszej procedury lotnego startu. W przypadku, gdy prędkość jest bardzo mała, możliwe jest dokonanie tradycyjnego rozruchu maszyny, rozpoczynając od zerowej pulsacji napięcia stojana. W przypadku większych prędkości wirnika przeprowadzana jest procedura lotnego startu opisana w rozdziale 4.3. Ponadto przeprowadzając wstępną identyfikację prędkości wirnika możliwe jest określenie kierunku obrotów wirnika. Jest to istotna informacja, ponieważ w procedurze lotnego startu stosowany jest zestaw wzmocnień \mathbf{K}_{z1} , w którym wymagana jest zmiana znaku wybranych wzmocnień w przypadku pracy z ujemną prędkością wirnika.

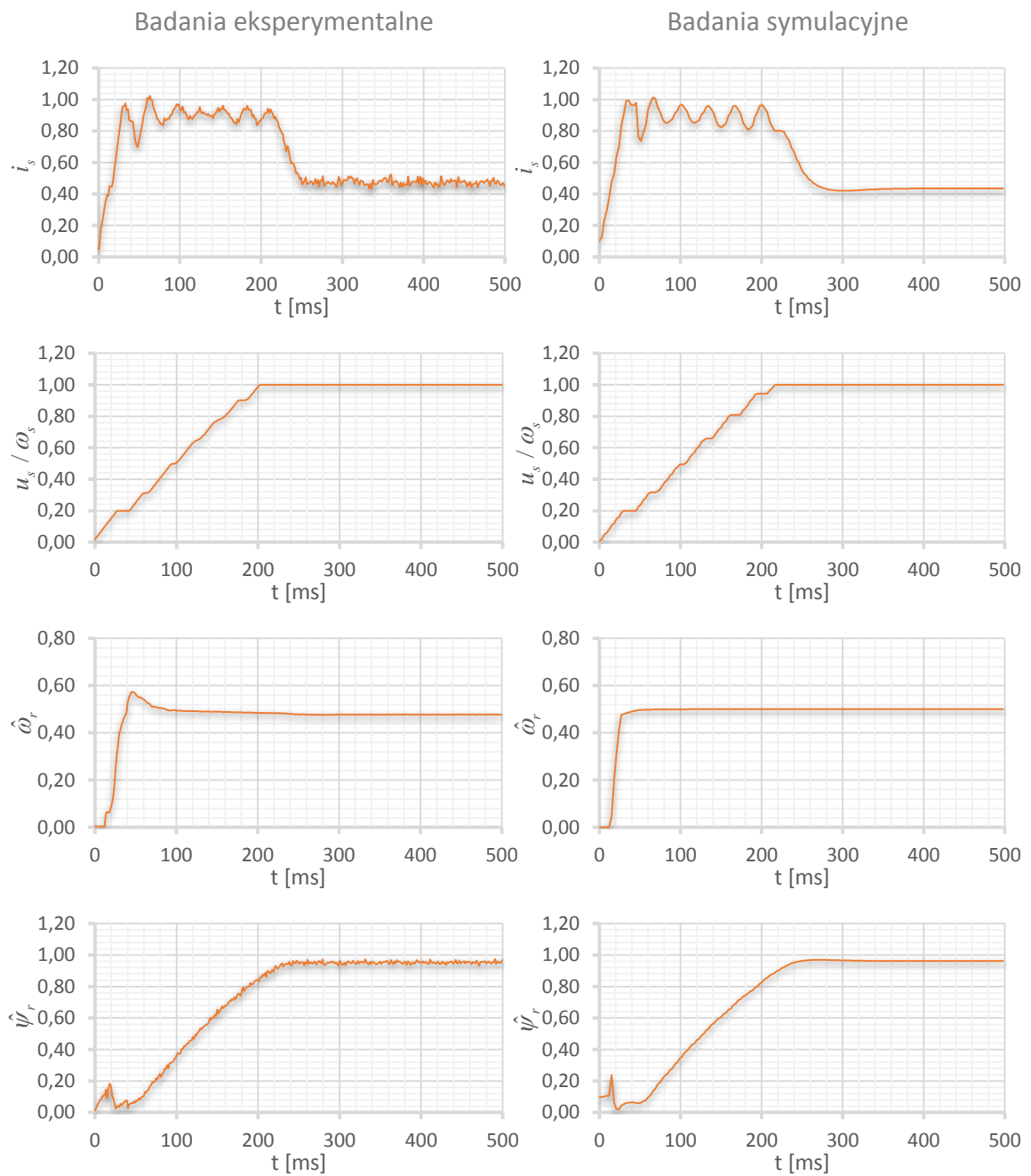
5.6.2. Załączanie maszyny przy niezerowej prędkości wirnika

Metoda załączania napędu przy niezerowej prędkości wirnika opisana w niniejszej pracy polega na przyłożeniu napięcia stojana o pulsacji $\tilde{\omega}_s$ równej wartości wstępnie przyjętej prędkości wirnika $\tilde{\omega}_r$ oraz module \tilde{u}_s . Wstępne szacowanie prędkości opisane w poprzednim podrozdziale wiązać się może z dużymi błędami. W podrozdziale 5.4.6 wykazano natomiast stabilność obserwatora w przypadku zasilania maszyny napięciem o znamionowej pulsacji przy dowolnej prędkości kątowej wirnika z przedziału od 0,035 do 2,0. Zaproponowano zatem przyjęcie znamionowej pulsacji stojana bez względu na wynik wstępnej identyfikacji prędkości wirnika. Konieczne jest natomiast wymuszenie kierunku wirowania wektora napięcia stojana zgodnego z kierunkiem obrotów wirnika. Znak prędkości wirnika jest zgodny ze znakiem prędkości uzyskanym przy zastosowaniu algorytmu wstępnej identyfikacji tej wielkości.

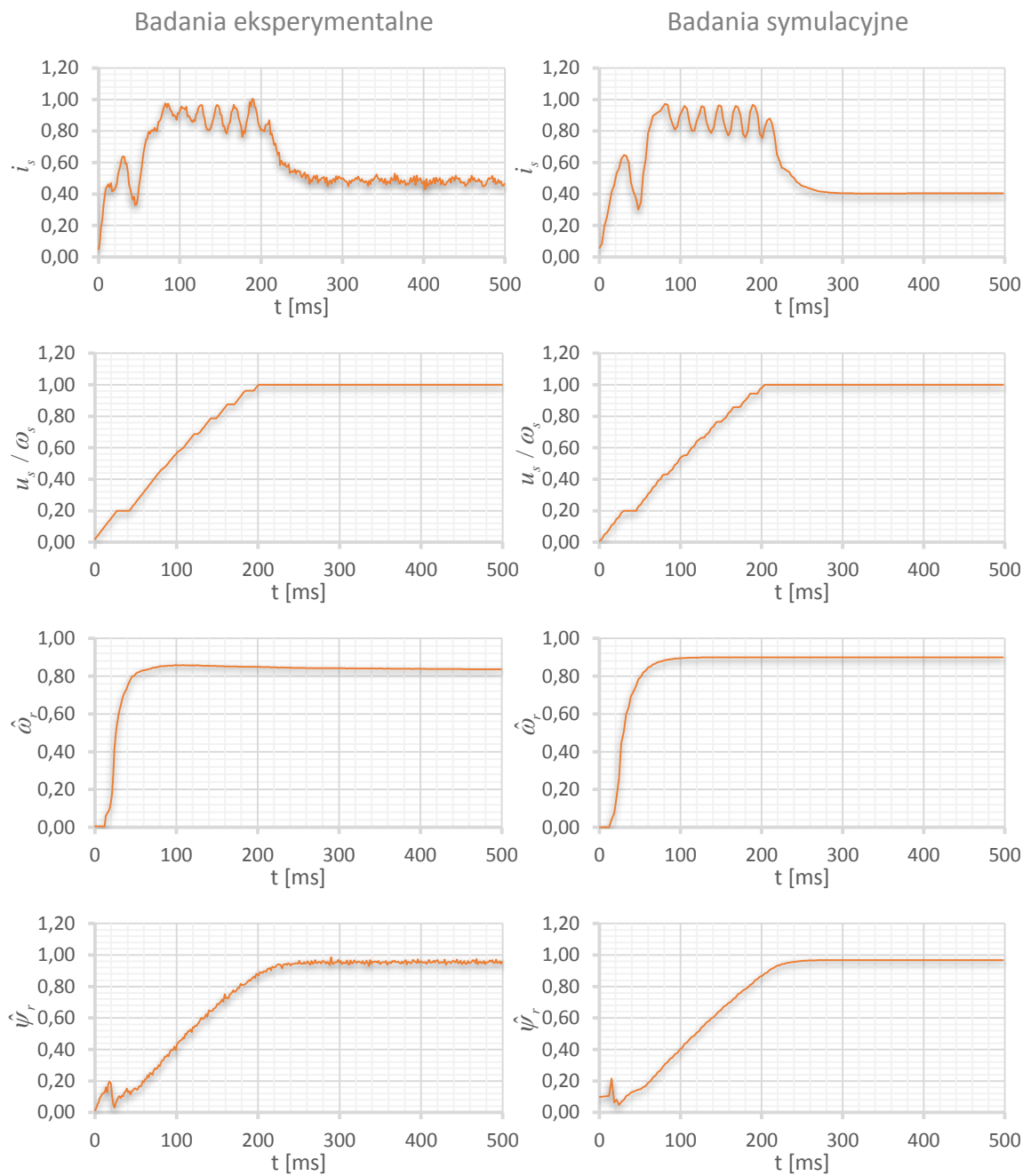
Na rysunkach 5.101 - 5.104 przedstawiono przebiegi modułu wektora prądu stojana, stosunku modułu wektora napięcia stojana do pulsacji stojana oraz przebiegi odtwarzanej prędkości wirnika i odtwarzanego modułu strumienia wirnika podczas próby rozruchu. Badania przeprowadzono przyjmując wstępną wartość prędkości wirnika $\tilde{\omega}_r = 1,0$ oraz wstępne napięcie stojana $\tilde{u}_s = 0,2$. Wstępne napięcie stojana uzyskiwane jest poprzez łagodne zwiększanie amplitudy tej wielkości rozpoczynając od 0. Eksperyment powtórzono dla rzeczywistych prędkości wirnika wynoszących 0,1, 0,5, 0,9 oraz 1,3.



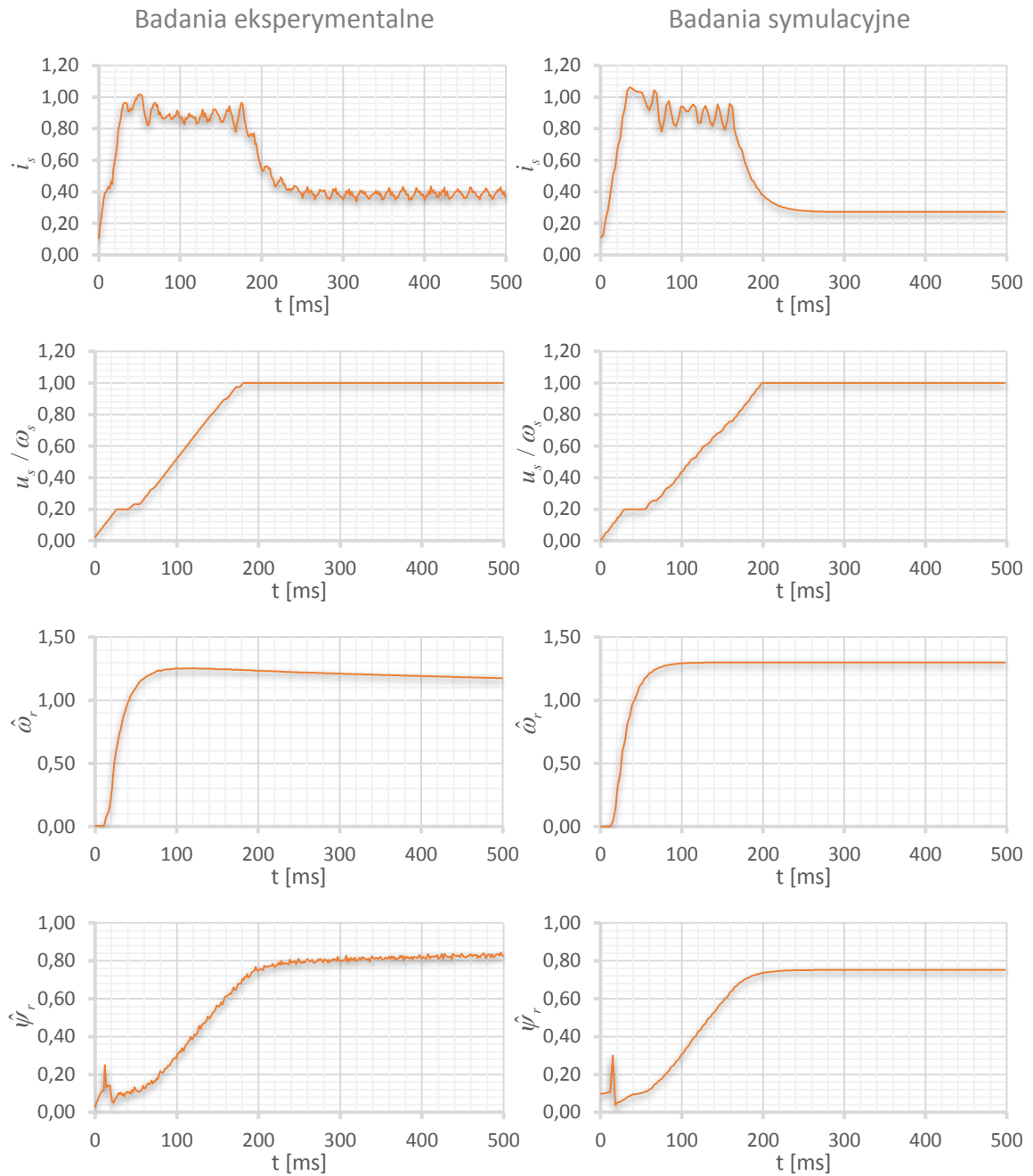
Rys. 5.101. Przebiegi prądu stojana, stosunku modułu wektora napięcia stojana do jego pulsacji, odtwarzanej prędkości wirnika oraz odtwarzanego modułu strumienia wirnika podczas procedury lotnego startu przy prędkości wirnika $\omega_r = 0,1$



Rys. 5.102. Przebiegi prądu stojana, stosunku modułu wektora napięcia stojana do jego pulsacji, odtwarzanej prędkości wirnika oraz odtwarzanego modułu strumienia wirnika podczas procedury lotnego startu przy prędkości wirnika $\omega_r = 0,5$



Rys. 5.103. Przebiegi prądu stojana, stosunku modułu wektora napięcia stojana do jego pulsacji, odtwarzanej prędkości wirnika oraz odtwarzanego modułu strumienia wirnika podczas procedury lotnego startu przy prędkości wirnika $\omega_r = 0,9$



Rys. 5.104. Przebiegi prądu stojana, stosunku modułu wektora napięcia stojana do jego pulsacji, odtwarzanej prędkości wirnika oraz odtwarzanego modułu strumienia wirnika podczas procedury lotnego startu przy prędkości wirnika $\omega_r = 1,3$

Dla wszystkich przebadanych prędkości wirnika lotny start przeprowadzono niemal nie przekraczając znamionowych prądów stojana zarówno w symulacjach jak i eksperymencie na rzeczywistej maszynie. Czas załączania napędu, bez względu na prędkość wirnika, wynosi około 200 ms, natomiast obserwator wskazuje poprawnie prędkość wirnika po okresie nie przekraczającym 100 ms. Procedurę lotnego startu przeprowadzono w szerokim zakresie obrotów maszyny, zarówno dla małych prędkości, rzędu 0,1, jak i dla prędkości przekraczających wartości znamionowe. Znacznie większe błędy odtwarzania prędkości wirnika w początkowych fazach załączania rzeczywistego napędu niż układu symulacyjnego spowodowane są przede wszystkim błędami identyfikacji parametrów maszyny. Wraz ze wzrostem strumienia wirnika, wpływ tych błędów ulega redukcji.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W rozprawie przedstawiono wyniki badań nad rozszerzonym obserwatorem prędkości maszyny indukcyjnej. Zrealizowane zostały następujące cele:

- **Opracowano układ równań opisujący dynamikę błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej.** Przyjmując układ równań, w którym jako zmienne występują błędy \tilde{i}_s , $\tilde{\psi}_r$, $\tilde{\zeta}$ nie ma możliwości wyrażenia odtwarzanej prędkości wirnika jako funkcji tych zmiennych. Zaproponowano zatem, by oprócz błędów prądu stojana oraz strumienia wirnika jedną ze zmiennych była odtwarzana zmienna $\hat{\zeta}$.

- **Zlinearyzowano układ równań błędów odtwarzania obserwatora w celu uzyskania rozkładów biegunów.** Równania te zależne są od rzeczywistych wartości prądów stojana, strumienia wirnika oraz prędkości wirnika. Składowe wektorów \mathbf{i}_s oraz $\boldsymbol{\psi}_r$ wyrażone w układzie współrzędnych nieruchomym względem stojana w stanie ustalonym zmieniają się sinusoidalnie. Do ostatecznej analizy wektory występujące w równaniach wyrażono zatem w układzie współrzędnych zorientowanym względem wektora strumienia wirnika. Wówczas punkt pracy napędu wyrazić można za pomocą prędkości wirnika, momentu obciążenia oraz modułu wektora strumienia wirnika.

- **Zaproponowano funkcję celu będącą wskaźnikiem jakości właściwości dynamicznych obserwatora opartą na rozkładzie biegunów obserwatora.** Sformułowano trzy kryteria doboru wartości wzmocnień. Pierwsze ogranicza położenie biegunów obserwatora tak, żeby zapewnić jego stabilność. Kolejne dwa związane są z zapewnieniem odpowiednich właściwości dynamicznych. Zastosowanie tych kryteriów minimalizuje czas ustalania błędów obserwatora, a także oscylacje w stanach przejściowych odtwarzanych zmiennych. Wykorzystanie rozkładu biegunów do doboru wartości wzmocnień eliminuje konieczność wielokrotnego przeprowadzania złożonych obliczeniowo symulacji. Ponadto wskaźnik jakości oparty na rozkładzie biegunów zawiera także informacje na temat odległości biegunów od osi urojonej także w przypadku braku stabilności. Możliwe jest wówczas ukierunkowanie zmian wzmocnień w kolejnych krokach algorytmu ich doboru tak, by bieguny ułożone zostały po lewej stronie płaszczyzny zespolonej.

- **Wykorzystano algorytm ewolucyjny do doboru wartości wzmacnień przy zastosowaniu zaproponowanej funkcji celu.** Osobniki tworzone są przez wzmacnienia obserwatora przy wykorzystaniu kodowania liczbami rzeczywistymi. Zastosowano algorytm selekcji turniejowej, krzyżowanie arytmetyczne oraz mutację nierównomierną. Niemal każde wywołanie algorytmu kończy się powodzeniem, czyli ulokowaniem wszystkich biegunów w dozwolonych obszarach płaszczyzny zespolonej, zapewniających stabilność oraz dobre właściwości dynamiczne obserwatora.

- **Przeprowadzono badania eksperymentalne oraz symulacyjne, w których wykazano zależność między uzyskanym rozkładem biegunów obserwatora a jego stabilnością oraz właściwościami dynamicznymi.** Uzyskane czasy ustalania obserwatora odpowiadają stałym czasowym odczytanym z rozkładu biegunów obserwatora. Ponadto z rozkładu biegunów oszacować można współczynnik tłumienia, na podstawie którego określa się występowanie oscylacji w stanach przejściowych. Omawiana zależność między biegunami a przebiegami uzyskanymi w eksperymentach przebadana została przy wymuszeniu 20% błędu strumienia wirnika. Wraz ze wzrostem błędu rośnie także wpływ nieliniowości obserwatora. Dobrany zestaw wzmacnień przy zastosowaniu zaproponowanej funkcji celu warto zatem przebadać symulacyjnie, w celu wykluczenia utraty stabilności w przypadku występowania znacznych błędów odtwarzania.

- **Przeprowadzono badania eksperymentalne oraz symulacyjne prowadzące do określenia wpływu zmian punktu pracy napędu na właściwości obserwatora.** Na podstawie położenia biegunów wywnioskowano, że jedynie prędkość wirnika ma istotny wpływ na zmianę właściwości dynamicznych obserwatora. Moment obciążenia oraz strumień wirnika (w zakresach, w których maszyna jest w stanie wygenerować moment, którym obciążony jest wał) nie odgrywają istotnej roli na jakość działania obserwatora w stanach przejściowych. Wnioski te potwierdzone zostały uzyskanymi przebiegami. Czas ustalania odtwarzanych zmiennych nie ulega zmianie wraz ze zmianami momentu zarówno dla pracy silnikowej jak i generatorowej.

- **Zaproponowano metodę modyfikacji wzmacnień obserwatora po zmianie kierunku obrotów wirnika w celu zapewnienia symetrii właściwości obserwatora.** Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze zmianą znaku prędkości bieguny obserwatora przemieszczają się na prawą stronę płaszczyzny zespolonej powodując utratę stabilności. Na podstawie analizy położenia wektorów utworzonych przez wyrazy występujące w równaniach obserwatora zaproponowano modyfikację wzmacnień poprzez

zmianę znaku wybranych wartości wraz ze zmianą kierunku obrotów. Ponadto zaproponowano zastosowanie zestawu wzmocnień z zerowymi wartościami wzmocnień, które zmieniają znak wraz ze zmianą znaku prędkości, w celu zapewnienia symetrii właściwości obserwatora wokół zerowej prędkości wirnika, gdzie ze względu na potencjalne błędy znak odtwarzanej prędkości może nie być zgodny z rzeczywistością.

- **Zaproponowano metodę modyfikacji wzmocnień wraz ze zmianami prędkości wirnika.** Dobrane zostały trzy zestawy wzmocnień dla trzech przedziałów prędkości. Uwzględniono zakres prędkości bliskich zera, w których zastosowano zestaw wzmocnień specjalnej postaci, zapewniającej symetrię właściwości obserwatora bez względu na znak odtwarzanej prędkości wirnika. Drugi przedział obejmuje prędkości z zakresu nieprzekraczającego prędkości znamionowej, natomiast w ostatnim przedziale uwzględniono zakres osłabiania pola.

- **Przeprowadzono badania eksperymentalne oraz symulacyjne w szerokim zakresie zmian prędkości.** Porównano wyniki uzyskane przy zastosowaniu stałego zestawu wzmocnień, dobrane dla całego zakresu dopuszczalnych prędkości, z przebiegami otrzymanymi przy wykorzystaniu metody modyfikacji wzmocnień wraz ze zmianami prędkości wirnika. Przyjęcie węższego zakresu doboru wzmocnień umożliwiło uzyskanie lepszych wartości wskaźnika jakości podczas doboru wzmocnień. W przypadku zastosowania zmienianych wzmocnień zauważalne są nagłe zmiany błędów odtwarzania w momencie przełączenia zestawu wzmocnień. Błędy odtwarzania rosną wraz ze wzrostem prędkości, co jest szczególnie zauważalne w zakresie osłabiania pola.

- **Na podstawie badań symulacyjnych zbadano wpływ błędów parametrów modelu maszyny na jakość działania obserwatora.** Właściwości dynamiczne obserwatora zależne są od współczynników obliczonych na podstawie wprowadzonych wartości parametrów modelu maszyny, które mogły zostać błędnie zidentyfikowane. Wartości wzmocnień dobierane są dla tych współczynników, zatem uzyskane wzmocnienia zapewniają stabilność obserwatora nawet gdy parametry modelu obciążone są błędami. Błędy parametrów modelu maszyny mają natomiast istotny wpływ na jakość pracy obserwatora w stanie ustalonym. Z przeprowadzonych badań wynika, że największe oddziaływanie na błędy ustalone ma jakość identyfikacji indukcyjności głównej oraz, w przypadku maszyny obciążonej, rezystancje stojana oraz wirnika. Wartości wzmocnień jedynie w pewnym zakresie wpływają na błędy ustalone obserwatora w przypadku występowania błędów zidentyfikowanych parametrów. Zaleca się zatem kilkukrotne uruchomienie algorytmu doboru wzmocnień oraz symulacyjne przepadanie uzyskanych

wyników pod kątem występowania błędów w stanie ustalonym i wybór najlepszego zestawu wzmocnień.

- **Zaproponowano metodę załączania napędu przy niezerowej prędkości wirnika w napędzie bezczujnikowym.** W algorytmie do określenia pulsacji napięcia stojana minimalizującej poślizg wykorzystywana jest prędkość wirnika odtwarzana w obserwatorze. W celu wymuszenia działania obserwatora do uzwojeń stojana przykładane jest napięcie o pewnej wstępnej częstotliwości. Metodę opracowano w taki sposób, by nie przekraczać znamionowych wartości prądu stojana.

- **Zaproponowano metodę wstępnej identyfikacji prędkości wirnika podczas lotnego startu.** Poprzez analizę stosunku wartości ustalonej jednej ze składowych strumienia stojana do wymuszonego stałego napięcia stojana oszacować można zarówno prędkość wirnika jak i kierunek obrotów maszyny.

- **Zbadano symulacyjnie oraz eksperymentalnie możliwość zastosowania procedury wstępnej identyfikacji prędkości w procedurze lotnego startu.** Obliczona prędkość wirnika może być obciążona stosunkowo dużym błędem. Określić można jednak kierunek obrotów wirnika, a także zakres prędkości w jakim pracuje maszyna. Uzyskana wartość prędkości wykorzystana może być w dalszej procedurze lotnego startu jako początkowa pulsacja napięcia stojana.

- **Przeprowadzono badania symulacyjne oraz eksperymentalne procedury lotnego startu.** Przy ograniczeniu prądu stojana do wartości znamionowej wymuszenie wstępnego napięcia stojana o pulsacji znacznie odbiegającej od prędkości wirnika znacznie ogranicza moduł strumienia wirnika. Odtwarzane zmienne stanu obciążone są wówczas dużymi błędami. Na podstawie prędkości wirnika estymowanej w takich warunkach możliwe jest określenie kierunku zmian pulsacji napięcia minimalizujących poślizg. Wraz ze spadkiem poślizgu rośnie dokładność odtwarzania. Estymowana prędkość ustala się w okresie nie przekraczającym 100 ms nawet w przypadku początkowego poślizgu przekraczającego 0,9.

Z przeprowadzonych badań wynika, że rozszerzony obserwator prędkości maszyny indukcyjnej może zostać zastosowany w szerokim zakresie zmian prędkości wirnika zarówno podczas pracy silnikowej jak i generatorowej. Ponadto możliwe jest jego wykorzystanie podczas procedury lotnego startu.

Załącznik A. Parametry maszyny

Tab. Z.1. Parametry badanej maszyny indukcyjnej z tabliczki znamionowej

Typ	Sg 132S-4
Znamionowe napięcie stojana U_N	400 V
Znamionowa częstotliwość napięcia stojana f_{sN}	50 Hz
Znamionowy prąd I_N	11 A
Znamionowa moc P_N	5,5 kW
Współczynnik mocy $\cos\varphi$	0,84
Sprawność η	85,5%
Znamionowa prędkość obrotowa wirnika n_N	1450 min ⁻¹

Tab. Z.2. Parametry modelu maszyny indukcyjnej

Rezystancja stojana R_s	1,02 Ω
Rezystancja wirnika R_r	0,55 Ω
Indukcyjność magnesująca L_m	0,143 H
Indukcyjność stojana L_s	0,149 H
Indukcyjność wirnika L_r	0,149 H

Tab. Z.3. Parametry modelu maszyny indukcyjnej wyrażone w jednostkach względnych

Rezystancja stojana R_s	0,0487
Rezystancja wirnika R_r	0,0261
Indukcyjność magnesująca L_m	2,135
Indukcyjność stojana L_s	2,224
Indukcyjność wirnika L_r	2,224

Załącznik B. Wartości wzmocnień obserwatora**B.1. Zestaw stałych wzmocnień**Tab. Z.4. Wartości wzmocnień obserwatora dla zestawu \mathbf{K}_s obowiązującego w całym zakresie prędkości

\mathbf{K}_s	
k_{11}	$1.283644 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{12}	-1.093325
k_{13}	-8.343980
k_{14}	$0.350289 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{21}	$0.362627 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{22}	0.048933
k_{23}	1.161854
k_{24}	$-2.213881 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{31}	-7.671370
k_{32}	$0.562616 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{33}	$0.837763 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{34}	-3.719300

B.2. Zestawy wzmocnień zmieniane w funkcji prędkości

Tab. Z.5. Wartości wzmocnień obserwatora dla zmienianego zestawu wzmocnień

	K_{z0}	K_{z1}	K_{z2}
k_{11}	0	$0.889978 \cdot \text{sign}(\omega_r)$	$4.561362 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{12}	1.545225	5.938047	1.646267
k_{13}	-7.357498	-6.506142	-6.915026
k_{14}	0	$1.193272 \cdot \text{sign}(\omega_r)$	$-0.163042 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{21}	0	$0.389094 \cdot \text{sign}(\omega_r)$	$0.512920 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{22}	-0.790338	-0.479801	0.010433
k_{23}	7.672290	-0.540533	5.339118
k_{24}	0	$-5.833852 \cdot \text{sign}(\omega_r)$	$-2.337104 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{31}	-0.034621	-6.970160	-7.294784
k_{32}	0	$-1.094788 \cdot \text{sign}(\omega_r)$	$5.179695 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{33}	0	$-4.333440 \cdot \text{sign}(\omega_r)$	$0.655925 \cdot \text{sign}(\omega_r)$
k_{34}	-0.658702	-4.045299	-8.021375

B.3. Zestaw wzmocnień zastosowany do porównania właściwości obserwatora z rozkładem biegunów

Tab. Z.6. Wartości wzmocnień obserwatora stosowanych do porównania właściwości obserwatora z właściwościami oszacowanymi z rozkładu biegunów

	K
k_{11}	2.504487
k_{12}	3.928353
k_{13}	-5.399574
k_{14}	0.294352
k_{21}	0.629416
k_{22}	-0.365903
k_{23}	zmienne
k_{24}	-0.354728
k_{31}	-2.182907
k_{32}	2.274474
k_{33}	-0.022253
k_{34}	-0.542032

Załącznik C. Linearyzacja równań dynamiki błędów obserwatora

C.1. Pochodne cząstkowe

W rozdziale 3.1 przedstawiono wektorowy układ równań (3.7) – (3.9) opisujący dynamikę błędów odtwarzania rozszerzonego obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej. Równania te są sumą wyrazów będących funkcją błędów odtwarzania oraz odtwarzanej zmiennej $\hat{\zeta}$. W dalszej części pracy pochodne cząstkowe tych wyrazów w punkcie pracy obserwatora po zmiennej x zapisywane będą następująco:

$$\left. \frac{\partial f(\tilde{i}_s, \tilde{\psi}_r, \hat{\zeta})}{\partial x} \right|_{\bar{x}} = \left. \frac{\partial f(\tilde{i}_s, \tilde{\psi}_r, \hat{\zeta})}{\partial x} \right|_{\substack{\tilde{i}_s=0 \\ \tilde{\psi}_r=0 \\ \hat{\zeta}=\omega_r \psi_r}} .$$

Zlinearyzowany układ równań opisujących dynamikę obserwatora po rozpisaniu na składowe wektorów przyjmuje następującą postać:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_{s\alpha}}{d\tau} &= (a_1 + k_{13})\tilde{i}_{s\alpha} - k_{14}\tilde{i}_{s\beta} + a_2\tilde{\psi}_{r\alpha} - a_3\Delta\hat{\zeta}_\beta + \\ &+ k_{11} \left(\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{i}_{s\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{i}_{s\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_a} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_a + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_\beta \right) + \\ &- k_{12} \left(\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{i}_{s\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{i}_{s\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_a} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_a + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_\beta \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_{s\beta}}{d\tau} &= k_{14}\tilde{i}_{s\alpha} + (a_1 + k_{13})\tilde{i}_{s\beta} + a_2\tilde{\psi}_{r\beta} + a_3\Delta\hat{\zeta}_\alpha + \\ &+ k_{12} \left(\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{i}_{s\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{i}_{s\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_a} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_a + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_\beta \right) + \\ &+ k_{11} \left(\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{i}_{s\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{i}_{s\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_a} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_a + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_\beta \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\psi}_{r\alpha}}{d\tau} &= (a_5 + k_{23})\tilde{i}_{s\alpha} - k_{24}\tilde{i}_{s\beta} + a_6\tilde{\psi}_{r\alpha} - \Delta\hat{\zeta}_\beta + \\ &k_{21} \left(\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{i}_{s\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{i}_{s\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_a} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_a + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_\beta \right) + \\ &- k_{22} \left(\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{i}_{s\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{i}_{s\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{i}_{s\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\alpha} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} \tilde{\psi}_{r\beta} + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_a} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_a + \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} \Delta\hat{\zeta}_\beta \right) \end{aligned}$$

Występujące w powyższych równaniach pochodne cząstkowe przedstawione zostały poniżej. Różniczkowane wyrazy nie zawierają składowych wektora błędu odtwarzania prądu stojana, zatem pochodne po tej zmiennej są równe zero i nie zostały wyszczególnione poniżej.

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} = -\frac{\omega_r \psi_{r\alpha}^3 + 2\omega_r \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^2 - \omega_r \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^2}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = -\frac{\omega_r \psi_{r\alpha}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} = -\frac{-\omega_r \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta} + 2\omega_r \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\beta}^3}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = -\frac{\omega_r \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} = \frac{\psi_{r\alpha}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} = \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} = -\frac{\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^4 + 2\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 - \omega_r^2 \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = -\frac{\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} = -\frac{-\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^3 \psi_{r\beta} + 2\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^3 \psi_{r\beta} + \omega_r^2 \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^3}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = -\frac{\omega_r^2 \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} = \frac{2\omega_r \psi_{r\alpha}^2 + \omega_r \psi_{r\beta}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} = \frac{\omega_r \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} = -\frac{\omega_r \psi_{r\alpha}^3 \psi_{r\beta} + 2\omega_r^2 \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^3 - \omega_r^2 \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^3}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = -\frac{\omega_r^2 \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} = -\frac{-\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 + 2\omega_r^2 \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 + \omega_r^2 \psi_{r\beta}^4}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = -\frac{\omega_r^2 \psi_{r\beta}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} = \frac{\omega_r \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \hat{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} = \frac{\omega_r \psi_{r\alpha}^2 + 2\psi_{r\beta}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} = \frac{\omega_r \psi_{r\alpha}^4 + \omega_r \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 + \omega_r \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 + \omega_r \psi_{r\beta}^4}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = \omega_r$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} = 0$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} = 0$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} = 0$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} = 0$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} = \frac{\omega_r \psi_{r\alpha}^4 + \omega_r \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 + \omega_r \psi_{r\alpha}^2 \psi_{r\beta}^2 + \omega_r \psi_{r\beta}^4}{(\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2)^2} = \omega_r$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} = 0$$

$$\left. \frac{\partial \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_{r\alpha}}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} = 0$$

Zmienną $\tilde{\zeta}$ wyrazić można następującą zależnością:

$$\tilde{\zeta} = \hat{\zeta} - \hat{\omega}_r \psi_r - \hat{\omega}_r \tilde{\psi}_r.$$

Jej pochodne cząstkowe przyjmują zatem następującą postać:

$$\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} = 0 - \left(-\frac{\omega_r \psi_{r\alpha}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \right) \psi_{r\alpha} - \omega_r = -\omega_r \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} = 0 - \left(-\frac{\omega_r \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \right) \psi_{r\alpha} - 0 = \omega_r \frac{\psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} = 1 - \frac{\psi_{r\alpha}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \psi_{r\alpha} - 0 = \frac{\psi_{r\beta}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\alpha}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} = 0 - \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \psi_{r\alpha} - 0 = -\frac{\psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\alpha}} \right|_{\bar{x}} &= 0 - \left(-\frac{\omega_r \psi_{r\alpha}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \right) \psi_{r\beta} - 0 = \omega_r \frac{\psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \\ \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \tilde{\psi}_{r\beta}} \right|_{\bar{x}} &= 0 - \left(-\frac{\omega_r \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \right) \psi_{r\beta} - \omega_r = -\omega_r \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \\ \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\alpha} \right|_{\bar{x}} &= 0 - \frac{\psi_{r\alpha}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \psi_{r\beta} - 0 = -\frac{\psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \\ \left. \frac{\partial \tilde{\zeta}_\beta}{\partial \hat{\zeta}_\beta} \right|_{\bar{x}} &= 1 - \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \psi_{r\beta} - 0 = \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \end{aligned}$$

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira, J. Fong, and P. Fonseca, "EUP Lot 11 Motors," 2008.
- [2] J. Bocker and S. Mathapati, "State of the Art of Induction Motor Control," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, vol. 2, pp. 1459–1464.
- [3] H. Tunia and M. Kaźmierkowski, *Automatyka napędu przekształtnikowego*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1987.
- [4] M. Depenbrock, "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 420–429, 1988.
- [5] I. Takahashi and Y. Ohmori, "High-performance direct torque control of an induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 2, 1989.
- [6] R. Gabriel, W. Leonhard, and C. J. Nordby, "Field-Oriented Control of a Standard AC Motor Using Microprocessors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-16, no. 2, pp. 186–192, 1980.
- [7] Z. Krzemiński, "Nonlinear control of induction motor," in *Proceedings of the 10th IFAC World Congress*, 1987, pp. 349–354.
- [8] Z. Krzemiński, *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2000.
- [9] B. M. Wilamowski and D. J. Irwin, *Power Electronics and Motor Drives. The Industrial Electronics Handbook.*, Second Edi. CRC Press, 2011.
- [10] T. Orłowska-Kowalska, *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [11] G. Tarchała, T. Orłowska-Kowalska, K. Nguyen-Thac, and M. Dybkowski, "Analiza bezczujnikowego indukcyjnego napędu trakcyjnego z optymalnym algorytmem osłabiania pola," *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów i Pomiarów Elektr. Politech. Wrocławskiej*, vol. 66, no. 32, pp. 125–134, 2012.
- [12] X. Xu, R. De Doncker, and D. W. Novotny, "A stator flux oriented induction machine drive," *PESC '88 Rec. 19th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 870–876, 1988.
- [13] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "A physically insightful approach to the design and accuracy assessment of flux observers for field oriented induction machine drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 1, pp. 101–110, 1994.
- [14] M. Hinkkanen and J. Luomi, "Modified Integrator for Voltage Model Flux Estimation of Induction Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 4, pp. 818–820, 2003.
- [15] K. D. Hurst, T. G. Habetler, G. Griva, and F. Profumo, "Zero-speed tacholeless IM torque control: simply a matter of stator voltage integration," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 4, pp. 790–795, 1998.
- [16] G. Verghese and S. Sanders, "Observers for flux estimation in induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 35, no. 1, pp. 85–94, 1988.
- [17] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 5, pp. 1054–1061, 1992.

- [18] F.-Z. Peng and T. Fukao, "Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1234–1240, 1994.
- [19] T. Orłowska-Kowalska and M. Dybkowski, "Stator-current-based MRAS estimator for a wide range speed-sensorless induction-motor drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1296–1308, 2010.
- [20] D. Luenberger, "Observers for multivariable systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 11, no. 2, pp. 190–197, 1966.
- [21] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, "New adaptive flux observer of induction motor for wide speed rangemotor drives," [Proceedings] *IECON '90 16th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 921–926, 1990.
- [22] C. Djamila, M. Yahia, and T. Ali, "Simultaneous Estimation of Rotor Speed and Stator Resistance in Sensorless Indirect Vector Control of Induction Motor Drives Using a Luenberger Observer," *Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 9, no. 3, No 2, pp. 325–335, 2012.
- [23] P. Claessens, P. Mathys, J. Bou Saada, and P. Colignon, "An optimized, adaptative, reduced-order flux observer," in *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, 1993, pp. 422–427.
- [24] P. Kamenicky, Z. Peroutka, and M. Hinkkanen, "Reduced-Order Flux Observer for Speed-Sensorless Induction Motor Drives: Gain Selection for Better Noise Rejection," in *International Conference on Applied Electronics*, 2012, pp. 139–142.
- [25] E. Von Westerholt, M. Pietrzak-David, and B. De Fornel, "Extended state estimation of nonlinear modeled induction machines," *PESC '92 Rec. 23rd Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 271–278, 1992.
- [26] T. Du and M. A. Brdys, "Implementation of extended Luenberger observers for joint state and parameter estimation of PWM induction motor drive," *Fifth Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, vol. 4, pp. 439 – 444, 1993.
- [27] T. Kulworawanichpong, "Optimizing an extended luenberger speed observer for single-phase induction motor drives based on genetic algorithms," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2009, pp. 3289–3294.
- [28] Z. Krzeminski, "A new speed observer for control system of induction motor," *Proc. IEEE 1999 Int. Conf. Power Electron. Drive Syst. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475)*, vol. 1, no. July, pp. 555–560, 1999.
- [29] H.-W. Kim and S.-K. Sul, "A new motor speed estimator using Kalman filter in low speed range," *Proc. IECON'94 - 20th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron.*, vol. 1, no. 4, pp. 498–504, 1994.
- [30] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong, and S. L. Ho, "Speed estimation of an induction motor drive using an optimizedextended Kalman filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 124–133, 2002.
- [31] M. Datta, M. A. Rafiq, and B. C. Ghosh, "Genetic Algorithm Based Fast Speed Response Induction Motor Drive without Speed Encoder," *2007 Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, pp. 146–151, Apr. 2007.
- [32] K. Szabat, T. Tran-Van, and M. Kamiński, "A Modified Fuzzy Luenberger Observer for a Two-Mass Drive System," *Ind. Informatics, IEEE Trans.*, vol. 11, no. 2, pp. 531–539, 2015.

- [33] K. D. Hurst and T. G. Habetler, "Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 66–73, 1996.
- [34] T. Orłowska-Kowalska and M. Dybkowski, "Zastosowanie estymatorów typu MRAS do odtwarzania strumienia i prędkości wirnika oraz parametrów uzwojenia stojana w bezczujnikowym napędzie indukcyjnym," *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów i Pomiarów Elektr. Politech. Wrocławskiej*, no. 62, pp. 362–371, 2008.
- [35] T. Białoń, A. Lewicki, R. Niestrój, and M. Pasko, "Porównanie dwóch metod doboru parametrów proporcjonalnego obserwatora zmiennych stanu silnika indukcyjnego pracującego w roli modelu przestrajanego estymatora typu," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 4b, 2012.
- [36] R. Niestrój and T. Białoń, "Estymator typu mras z proporcjonalnym obserwatorem luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego," *Pr. Nauk. Inst. Masz. Napędów i Pomiarów Elektr. Politech. Wrocławskiej*, no. 62, pp. 372–377, 2008.
- [37] H. Li, W. Xuhui, and C. Guilan, "General Adaptive Schemes for Resistance and Speed Estimation in Induction Motor Drives," in *2006 IEEE Workshops on Computers in Power Electronics*, 2006, no. 1, pp. 173–178.
- [38] M. Adamowicz and Z. Krzeminski, "Novel Adaptive Flux Observer for Wide Speed Range Sensorless Control of Induction Motor," *Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–10, 2007.
- [39] Z. Krzemiński, "Observer of induction motor speed based on exact disturbance model," *2008 13th Int. Power Electron. Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, pp. 2294–2299, 2008.
- [40] Z. Krzemiński, "Identyfikacja parametrów maszyny indukcyjnej z zastosowaniem obserwatorów prędkości," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 4b, 2012.
- [41] H. Kubota, K. Matsuse, S. Member, and T. Nakmo, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor," vol. 29, no. 2, pp. 344–348, 1993.
- [42] T. Białoń, "Zastosowanie obserwatorów Luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego," Politechnika Śląska w Gliwicach, 2010.
- [43] H. Luo, Y. Lv, X. Deng, and H. Zhang, "Optimization of adaptation gains of full-order flux observer in sensorless induction motor drives using genetic algorithm," *Inf. Technol. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 577–582, 2009.
- [44] T. Białoń and M. Pasko, "Wielokryterialny dobór parametrów proporcjonalnego obserwatora strumieni magnetycznych silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego," *Masz. Elektr. Zesz. Probl.*, no. 91, pp. 51–54, 2011.
- [45] Z. Krzemiński and M. Gackowski, "Optymalizacja wzmocnień obserwatora prędkości maszyny indukcyjnej," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 2, pp. 154–159, 2010.
- [46] B. Robyns, F. Berthereau, G. Cossart, L. Chevalier, F. Labrique, and H. Buyse, "A methodology to determine gains of induction motor flux observers based on a theoretical parameter sensitivity analysis," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 6, pp. 983–995, 2000.
- [47] T. Orłowska-Kowalska and M. Dybkowski, "Analiza stabilności klasycznego estymatora prędkości typu MRAS w indukcyjnym napędzie bezczujnikowym," *Pr.*

- Nauk. Inst. Masz. Napędów i Pomiarów Elektr. Politech. Wrocławskiej*, no. 60, 2007.
- [48] J. Szewczyk, M. Adamowicz, and Z. Krzemiński, “Bezczujnikowe sterowanie generatorem klatkowym w stanach lotnego startu elektrowni wiatrowej,” *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 1, pp. 159–164, 2011.
- [49] S. J. Jeong, Y. M. Park, and G. J. Han, “An estimation method of rotation speed for minimizing speed variation on restarting of induction motor,” *8th Int. Conf. Power Electron. - ECCE Asia "Green World with Power Electron. ICPE 2011-ECCE Asia*, pp. 697–704, 2011.
- [50] Z. Krzemiński and D. Wachowiak, “Dobór wzmacnień rozszerzonego obserwatora prędkości na podstawie rozkładu biegunów,” *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 11, pp. 163–168, 2013.
- [51] Z. Krzemiński and D. Wachowiak, “Analiza działania rozszerzonego obserwatora prędkości w szerokim zakresie zmian prędkości maszyny indukcyjnej,” *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 6, pp. 91–96, 2014.
- [52] M. Popescu, *Induction Motor Modelling for Vector Control Purposes*. Helsinki, 2000.
- [53] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Third edit. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [54] A. Packard, K. Poolla, and R. Horowitz, *Dynamic Systems and Feedback*. Berkeley: University of California, 2002.
- [55] L. Harnefors, “Stabilization Methods for Sensorless Induction Motor Drives - A Survey,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 2, no. 2, pp. 132 – 142, 2014.
- [56] J. Kowal, *Podstawy automatyki*. Kraków: AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2003.
- [57] T. D. Gwiazda, *Algorytmy genetyczne. Kompendium. T. 1*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.
- [58] J. Ahrens and H. Khalil, “High-gain observers in the presence of measurement noise: A switched-gain approach,” *Automatica*, vol. 45, no. 4, pp. 936–943, 2009.
- [59] T. Kaczorek, A. Dzieliński, W. Dąbrowski, and R. Łopatka, *Podstawy teorii sterowania*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2005.
- [60] S. Lim and K. Nam, “Loss-minimising control scheme for induction motors,” *IEE Proceedings-Electric Power Appl.*, vol. 151, no. 4, pp. 385–397, 2004.