

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI
i INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

mgr inż. Henryk Krawiec

ROZPRAWA DOKTORSKA

ODPORNOŚĆ UKŁADÓW ELEKTROMECHANICZNYCH Z SILNIKAMI
PRĄDU PRZEMIENNEGO NA ZAPADY NAPIĘCIA I KRÓTKIE
PRZERWY W ZASILANIU

Promotor:

Dr hab. inż. Zygfryd Głowacz, prof. n. AGH

Kraków, 2015

*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu Profesorowi
Zygrydowi Głowaczowi za pomoc merytoryczną niezbędną
do realizacji niniejszej pracy.*

*Składam również podziękowania Współpracownikom Katedry
Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania
Energii za okazaną mi pomoc podczas wykonywania badań
laboratoryjnych.*

SPIS TREŚCI

Spis wybranych symboli i oznaczeń.....	6
1. Wstęp.....	9
1.1. Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu.....	9
1.1.1. Klasyfikacja zapadów napięcia wg Bollena.....	9
1.1.2. Definicja krótkich przerw w zasilaniu.....	11
1.2. Definicja odporności układu elektromechanicznego na zapady.....	12
1.3. Stan wiedzy w aspekcie poprawy odporności układów elektro- mechanicznych na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu.....	14
1.4. Ocena odporności wybranych układów elektromechanicznych na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu.....	16
1.4.1. Pomiary laboratoryjne.....	16
1.4.2. Badania symulacyjne.....	21
1.4.3. Wnioski.....	28
1.5. Teza i cel pracy	30
1.6. Krótki opis realizacji.....	31
2. Badania symulacyjne odporności układów elektromechanicznych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, w warunkach zapadu napięcia i krótkich przerw w zasilaniu	35
2.1. Równania silnika indukcyjnego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika	35
2.1.1. Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika	36
2.1.2. Stan ustalony – przebiegi czasowe podstawowych wielkości, wykresy wskazowe	37
2.1.3. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego	44

2.2.	Propozycja układu regulacji układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika	50
2.3.	Badania symulacyjne, przy założeniu idealnego źródła napięcia	56
2.4.	Badania symulacyjne - przy uwzględnieniu zapadu napięcia sieci zasilającej oraz przemiennika częstotliwości VSI (PWM) - dla zapadów napięcia typu A – G oraz przerw w zasilaniu	68
2.4.1.	Zapad napięcia typu A	70
2.4.2.	Zapad napięcia typu B.....	77
2.4.3.	Zapad napięcia typu C.....	83
2.4.4.	Zapad napięcia typu D.....	89
2.4.5.	Zapad napięcia typu E.....	95
2.4.6.	Zapad napięcia typu F.....	101
2.4.7.	Zapad napięcia typu G.....	107
2.4.8.	Przerwy w zasilaniu P.....	113
2.5.	Wnioski	119
3.	Pomiary laboratoryjne układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym klatkowym, w warunkach zapadu napięcia i krótkich przerw w zasilaniu.....	120
3.1.	Opis stanowiska laboratoryjnego.....	120
3.2.	Wstępne testy zaproponowanego układu regulacji w środowisku dSPACE	125
3.3.	Pomiary z wykorzystaniem uproszczonego sterowania amplitudowo-częstotliwościowego $u_s/f_s = f(u_{DC})$	128
3.4.	Pomiary z zastosowaniem zmodyfikowanego wektorowego układu regulacji, przy zadawaniu strumienia $\psi_r^* = f(u_{DC})$	131
3.5.	Wnioski.....	140
4.	Podsumowanie i wnioski końcowe	141
4.1.	Potwierdzenie tezy pracy.....	141
4.2.	Kierunki dalszych badań.....	142

Załączniki.....	144
Załącznik 1: Parametry silnika indukcyjnego z biblioteki MATLAB SIMULINK.....	144
Załącznik 2: Parametry silnika indukcyjnego wykorzystanego podczas pomiarów laboratoryjnych.....	144
Załącznik 3: Zaprogramowanie zapadów i krótkich przerwy w zasilaniu	148
Literatura.....	155

Spis wybranych symboli i oznaczeń

Kursywa oznacza jednostki względne odniesione do wartości znamionowych momentu, prądu, napięcia, częstotliwości oraz prędkości synchronicznej.

- f_N – częstotliwość znamionowa napięcia zasilania silnika
- f_z – częstotliwość napięcia zasilania przemiennika
- f_s – częstotliwość napięcia zasilania silnika
- I_N – prąd znamionowy silnika
- i_{sA} – wartość chwilowa prądu silnika w fazie A
- i_{sB} – wartość chwilowa prądu silnika w fazie B
- i_{sC} – wartość chwilowa prądu silnika w fazie C
- i_{sd}, i_{sd}^* – składowa d prądu stojana we współrzędnych zawiązanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika
- i_{sq}, i_{sq}^* – składowa d prądu stojana we współrzędnych zawiązanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika
- $\mathbf{I}_s$ – wektor prądu zasilania silnika,
- j – symbol części urojonej liczby zespolonej
- J – moment bezwładności silnika
- $L_{\sigma s}$ – indukcyjność rozproszenia uzwojeń stojana
- L_μ, L_m – indukcyjność wzajemna uzwojeń stojana i wirnika silnika
- $L_{\sigma r}$ – indukcyjność rozproszenia wirnika
- $L_s = L_\mu + L_{\sigma s}$ – indukcyjność uzwojeń stojana
- $L_r = L_\mu + L_{\sigma r}$ – indukcyjność uzwojeń wirnika
- n_N – prędkość znamionowa silnika
- P_N – moc znamionowa silnika
- p, p_b – liczba par biegunów
- R_s – rezystancja stojana
- R_r – rezystancja wirnika
- s – poślizg silnika indukcyjnego
- t – czas
- T_e, T_e^* – moment elektromagnetyczny silnika
- $T_r = L_r/R_r$ – stała czasowa wirnika
- T_L – moment obciążenia silnika
- T_N – moment znamionowy silnika
- U_N – napięcie znamionowe silnika
- u_z – napięcie zasilania przemiennika
- u_{DC} – napięcie na kondensatorze
- u_s – napięcie zasilania silnika
- u_{Af} – napięcie fazowe zasilania silnika (pomiar z wykorzystaniem filtra pomiarowego RC)
- $\mathbf{U}_s$ – wektor napięcie zasilania silnika,
- u_{sA} – wartość chwilowa napięcia silnika w fazie A

- u_{sB} – wartość chwilowa napięcia silnika w fazie B
 u_{sC} – wartość chwilowa napięcia silnika w fazie C
 u_{sd}, u_{sd}^* – składowa d napięcia stojana we współrzędnych zawiązanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika
 u_{sq}, u_{sq}^* – składowa q napięcia stojana we współrzędnych zawiązanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika
 u_{DC} – napięcie DC na kondensatorze VSI
 $\sigma = 1 - L_\mu^* L_\mu / L_s / L_r$ – całkowity współczynnik rozproszenia (także sigma)
 ψ_r – strumień sprzężony z uzwojeniem wirnika (także phir)
 Ψ_r – wektor strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika
 ω – prędkość kątowna silnika
 ω_N – znamionowa prędkość kątowna silnika
 ω_{ks} – prędkość kątowna układu współrzędnych względem stojana (także wks)
 ω_m, ω_r – prędkość kątowna wirnika (także wm)
 ω_{rr} – pulsacja strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika względem wirnika (także wrphir)
 ϑ – kąt pomiędzy wektorem prądu silnika I_s oraz wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika Ψ_r

Indeksy

- A, B, C – poszczególne fazy napięcia trójfazowego
d, q – wielkości we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika
N – wartości znamionowe
* – wartość zadana
r, m – wielkości wirnika
rsm – wartość skuteczna
s – wielkości stojana
z – wielkości sieci zasilającej
 μ – wielkości obwodu indukcyjności głównej
 σ – rozproszenie
0 – zasilanie bezpośrednio z sieci
1 – zasilanie przez VSI, sterowanie uproszczone amplitudowo-częstotliwościowe funkcji u_{DC}
4 – zasilanie przez VSI, sterowanie wektorowe, zadawanie strumienia
 $\Psi_r^* = f(u_{DC})$

Stosowane skróty

DC	prąd stały (Direct Current)
EUT	badane urządzenie (Equipment under Test)
RMS	wartość skuteczna (Root Mean Square)
SEM	siła elektromotoryczna
VSI	napięciowy przemiennik częstotliwości (Voltage Source Inverter)
PWM	modulacja szerokości impulsu (Pulse Width Modulation)

1. Wstęp

1.1. Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu

1.1.1. Klasyfikacja zapadów napięcia wg Bollena

Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu są obecnie jednym z najważniejszych zagadnień w dziedzinie jakości energii elektrycznej, są zagrożeniem dla odbiorców wrażliwych na zaburzenia napięcia zasilającego, mogą prowadzić do bardzo dużych kosztów związanych z przestojem w pracy zakładów przemysłowych [1], [3], [5], [9], [12], [13], [21], [24], [26], [28], [34], [36], [38], [40], [42], [47], [48], [49], [51], [52], [57], [59], [67], [77], [79], [88], [89].

Zapad napięcia wg normy EN 61000-4-11 [53]: nagłe zmniejszenie się napięcia w rozpatrywanym punkcie energetycznej sieci zasilającej poniżej wartości progowej zapadu zakończone po krótkim okresie powrotem do poprzedniej wartości.

Zapady napięcia charakteryzują się krótkotrwałym, nagłym obniżeniem wartości skutecznej napięcia w danym punkcie sieci, po którym w krótkim czasie następuje wzrost napięcia do wartości przed pojawieniem się zapadu [2], [37], [74]. Charakteryzują się czasem trwania oraz zmniejszeniem amplitudy napięcia jak również ilością faz, w których wystąpił zapad napięcia.

Zapad napięcia jest zwykle związany z powstaniem i trwaniem zwarcia lub innym znacznym wzrostem prądu w systemie lub instalacji przyłączonej do niego [53].

Zapad napięcia jest dwuwymiarowym zaburzeniem elektromagnetycznym, którego poziom zależy zarówno od napięcia jak też czasu (okres występowania) [53].

Klasyfikację typowych zapadów napięcia dla występujących w praktyce konfiguracji sieci oraz układów połączeń transformatorów opracowaną przez Bollena [7], [10], [34], [57] przedstawiono na rysunku 1.1 :

Typ A: zwarcie trójfazowe,

Typ B: zwarcie jednofazowe z doziemieniem,

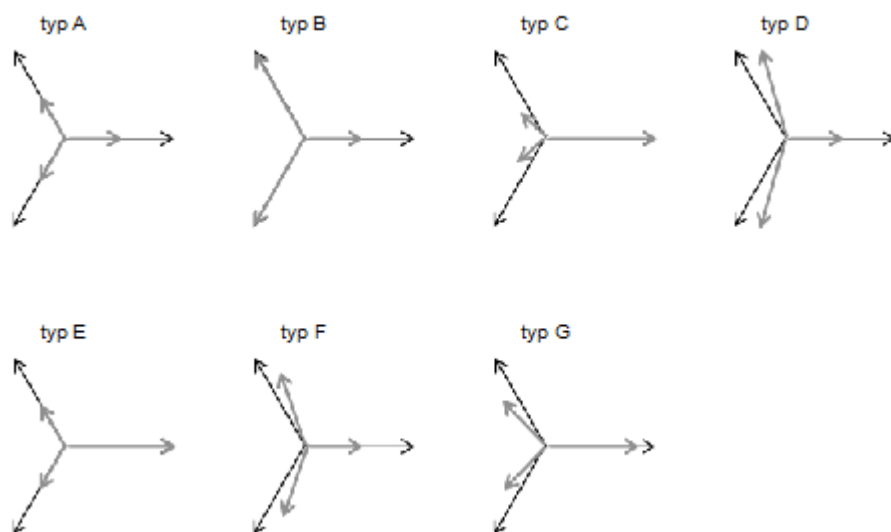
Typ C: dwufazowe zwarcie bez doziemienia,

Typ D: C po transformatorze o grupie połączeń Dy,

Typ E: dwufazowe zwarcie do ziemi,

Typ F: E po transformatorze o grupie połączeń Dy,

Typ G: E po transformatorze o grupie połączeń Dz.



Rys.1.1. Typy zapadów napięcia (amplituda 50%) [10], [34]

Głównymi przyczynami zapadów napięcia w sieciach zasilających są krótkotrwałe wzrosty prądu powstające jako skutek zwarć systemowych lub zwarć w instalacjach odbiorczych, procesów łączeniowych odbiorników dużej mocy (np. silników, transformatorów), zmian konfiguracji sieci prowadzących do wzrostu impedancji zastępczej systemu oraz pracy odbiorników o zmiennym obciążeniu (szczególnie biernym) [38] .

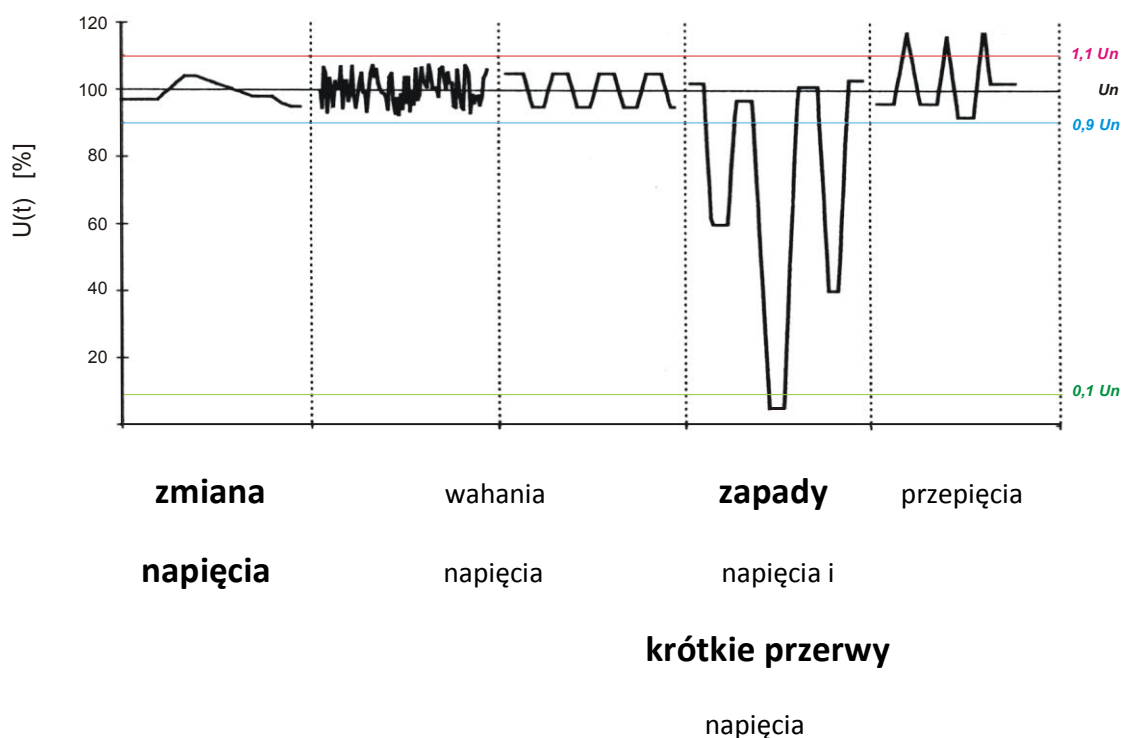
Pomiar zapadów napięcia: wiarygodnym sposobem pozostaje długotrwały pomiar wykonany w miejscu planowanego przyłączenia odbiornika lub w węzłowych punktach rozważanej sieci zasilającej. Współczesny rejestrator zapadów monitoruje w sposób ciągły napięcia i zapisuje w pamięci ich zaburzone wartości. Przyrząd lub odpowiednie oprogramowanie wykonuje także analizę statyczną wyników pomiaru [38] .

1.1.2. Definicja krótkich przerw w zasilaniu

Krótka przerwa wg normy EN 61000-4-11 [53]: nagłe zmniejszenie się napięcia we wszystkich fazach w rozpatrywanym punkcie systemu elektroenergetycznego poniżej wartości progowej przerwy zakończona po krótkim okresie powrotem do wartości poprzedniej.

Krótkie przerwy są zwykle związane z działaniem aparatury łączeniowej wynikającym z powstania i trwania zwarcia w systemie lub w instalacji przyłączonej do systemu [53] .

Przykładowo, krótkie przerwy w zasilaniu występują wtedy, gdy wartość skuteczna napięcia jest mniejsza od 5% lub 10% wartości napięcia znamionowego (rysunek 1.2) .



Rys.1.2. Definicja zmiany napięcia, wahaniami napięcia, zapadu napięcia , krótkich przerw oraz przebiegów wg PN-EN 61000-4-11 (Zapady - Przerwy - Zmiany Napięcia) [53]

1.2. Definicja odporności układu elektromechanicznego na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu

Norma PN-EN 61000-4-11 w części 4-11 Metody badań i pomiarów. Badania odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia [53] :

odporność (na zaburzenie) określa jako „właściwość przyrządu, urządzenia lub systemu, charakteryzująca zdolność do działania bez obniżania jakości w obecności zaburzenia elektromagnetycznego.

Ocena wyników badań:

wyniki badań należy klasyfikować w zależności od utraty funkcji użytkowych lub pogorszenia jakości działania badanego urządzenia, w stosunku do poziomu działania zdefiniowanego przez producenta, zlecniodawcę badań lub poziomu uzgodnionego między producentem i nabywcą wyrobu. Zaleca się następującą klasyfikację:

- a) normalna praca w zakresie dopuszczalnych wartości określonych przez producenta, zlecniodawcę badań lub nabywcę;
- b) chwilowa utrata funkcji użytkowych lub pogorszenie działania, które kończą się po zaniku zaburzenia i badane urządzenie odzyskuje swoje właściwości bez interwencji operatora;
- c) chwilowa utrata funkcji użytkowych lub pogorszenie działania, których korekta wymaga interwencji operatora;
- d) utrata funkcji użytkowych lub pogorszenie jakości działania, które mają charakter nieodwracalny, ze względu na uszkodzenie urządzenia lub oprogramowania albo utratę danych.

Producent może określić w specyfikacji skutki powstałe w EUT, które mogą być uznane za nieistotne i tym samym do przyjęcia.

Powyższa kwalifikacja może być wykorzystana jako wskazówka przy formułowaniu kryteriów oceny działania przez komitety odpowiedzialne za normy ogólne, normy wyrobu oraz normy rodziny wyrobów, lub jako podstawa porozumienia dotyczącego kryteriów oceny działania, zawieranego między producentem i nabywcą na przykład, gdy brak odpowiedniej normy ogólnej, wyrobu lub rodziny wyrobów. „

Wychodząc z klasyfikacji wg pkt. a, w niniejszej pracy przyjęto, że odporność układu elektromechanicznego na zapady napięcia oraz krótkie przerwy w zasilaniu jest

zachowana, jeśli podczas trwania zapadu napięcia/ krótkiej przerwy w zasilaniu, układ elektromechaniczny jest w stanie zapewnić wymagany moment obrotowy silnika i tym samym utrzymać oczekiwaną przez technologię prędkość obrotową silnika z wymaganą dokładnością np. 1% [14], [20], [35], [36], [48], [77] .

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest układ elektromechaniczny (układ napędowy) z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Przyjęto, że układ elektromechaniczny ma utrzymać zadaną prędkość znamionową przy obciążeniu znamionowym momentem.

Mogą być rozpatrywane również przypadki, w których prędkość zadana jest inna niż znamionowa (np. 70 % znamionowej), zaś moment obciążenia jest równy znamionowemu.

1.3. Stan wiedzy w aspekcie poprawy odporności układów elektromechanicznych na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu

Jakość napięcia oczekiwana przez odbiorców nie ogranicza się tylko do ciągłości zasilania w skali roku, lecz coraz częściej w skali sekund, a nawet ms [37].

Główną przyczyną zapadów napięcia są zwarcia występujące w systemie elektroenergetycznym [2], [37], [74].

Skutki zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu w przypadku silników indukcyjnych [37]: w efekcie zapadu napięcia następuje początkowo redukcja momentu elektromagnetycznego i w konsekwencji zmniejszenie prędkości.

Przed skutkami krótkich zmian napięcia układy napędowe są z reguły zabezpieczone swoją inercją [37].

W [38] wskazano, że wzrost momentu bezwładności silnika powoduje zmniejszenie uchybu prędkości. Na przebieg prędkości silnika w reakcji na zapad napięcia ma również wpływ charakter obciążenia mechanicznego – „kwadratowa” charakterystyka momentu np. wentylator, dmuchawy, pompy, kompresory itp. jest bardziej korzystna.

W [38] zaproponowano wiele różnych technicznych sposobów, mających zabezpieczyć proces technologiczny przed skutkami zapadów napięcia:

- zmiana sposobu eksploatacji napędu i modyfikacja sterowania,
- modyfikacja topologii układów energoelektronicznych
- alternatywne zasilanie,
- instalowanie stabilizatorów napięcia.

W szczególności przez zastosowanie następujących sposobów:

- ręczny lub automatyczny ponowny rozruch napędu,
- szybkie zahamowanie napędu do zerowej prędkości, a następnie konwencjonalny ponowny rozruch,
- automatyczny ponowny rozruch po zadanym czasie opóźnienia,
- strategia sterowania synchronizująca podczas zapadu napięcia wyjściowe przemiennika częstotliwości z SEM silnika,
- dodatkowe kondensatory w obwodzie DC,
- zmniejszenie prędkości silnika/ momentu obciążenia mechanicznego napędu,
- wykorzystanie bezwładności całego elektromechanicznego układu,
- stosowanie silników o mniejszym napięciu znamionowym,
- zastosowanie bezprzerwowego zasilania układu sterowania napędu,
- wspólne szyny DC do zasilania wielu napędów,
- aktywna kontrola napięcia w obwodzie prądu stałego przemiennika częstotliwości.

Reasumując, dotychczasowe rozwiązania przedstawione w dostępnej literaturze [14], [15], [16], [20], [23], [24], [27], [36], [38], [49], [51], [52], [54], [55], [56], [58], [60], [61], [67], [76], [77], [78], [80], [81], [86], [90], zmierzające do zwiększenia odporności układów elektromechanicznych na zapady napięcia koncentrują się głównie na

energoelektronice – zwiększenie odporności na zapady przez rozbudowę układu zasilania względnie przemiennika częstotliwości.

1.4. Ocena odporności wybranych układów elektromechanicznych na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu

Celem analizy wstępnej jest ocena jak dalece występuje w praktyce problem odporności układów elektromechanicznych na zapady i krótkie przerwy w zasilaniu.

Przeprowadzono wstępne rozeznanie jak reagują wybrane układy elektromechaniczne na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu.

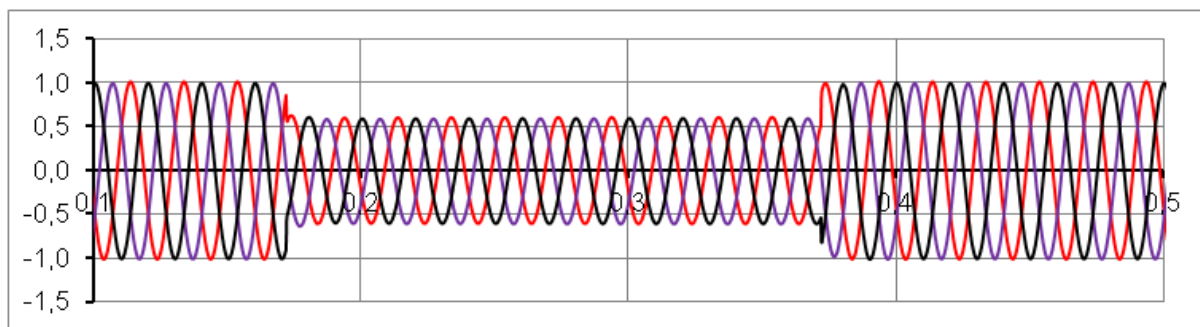
1.4.1. Pomiary laboratoryjne

Do testu wykorzystano przykładowy (ogólnie dostępny na rynku) przemiennik częstotliwości [83] sterowany wg zasady U/f zasilający silnik indukcyjny o danych wg załącznika 1.

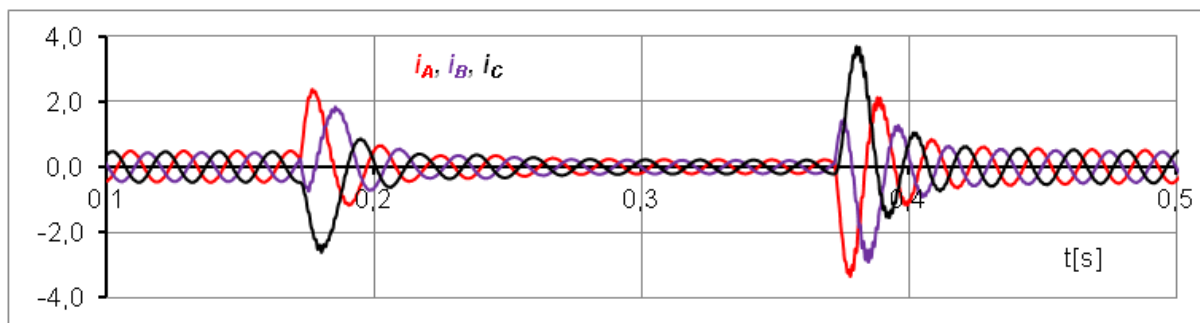
Celem porównania najpierw zasilono silnik bezpośrednio z sieci w warunkach zapadu typu A, następnie w warunkach przerwy w zasilaniu .

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 1.3 – 1.4 .

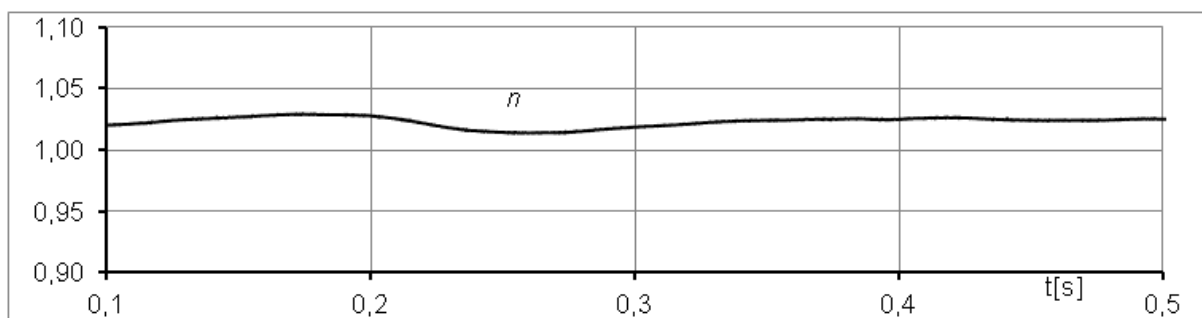
a)



b)

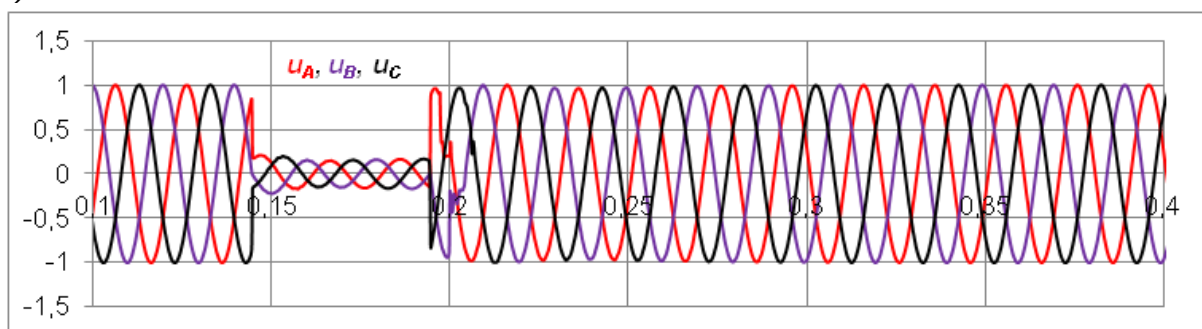


c)

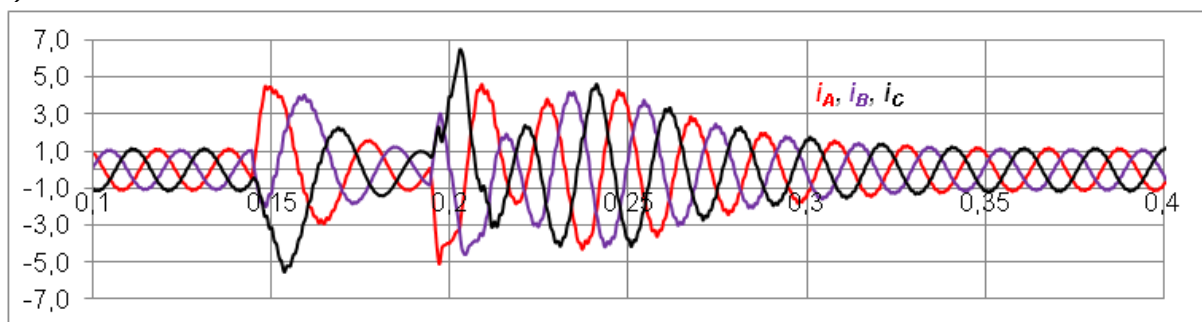


Rys.1.3. Przebiegi u_A , u_B , u_C , i_A , i_B , i_C , n podczas badania laboratoryjnego odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym (bez obciążenia $T_L = 0\%T_N$) zasilanym bezpośrednio z sieci, na zapady napięcia typu A

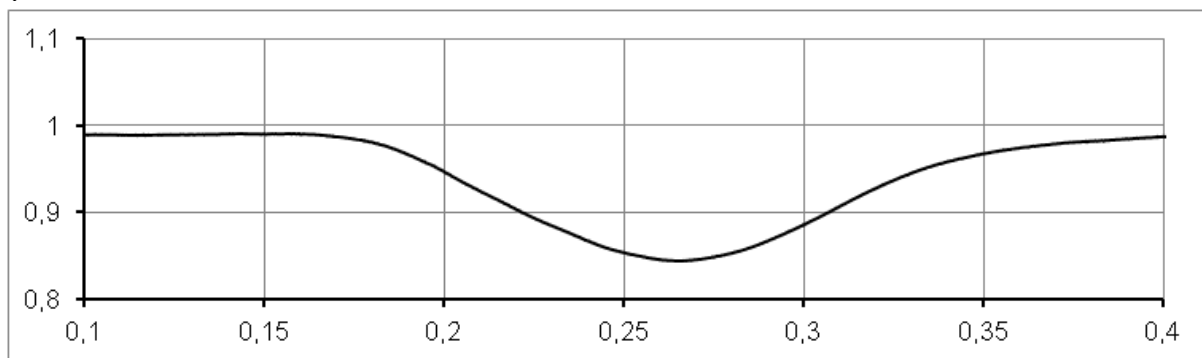
a)



b)



c)



Rys.1.4. Przebiegi u_A , u_B , u_C , i_A , i_B , i_C , n podczas badania laboratoryjnego odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym (z obciążeniem $T_L = 60\%T_N$) zasilanym bezpośrednio z sieci, na przerwy w zasilaniu 50 [ms]

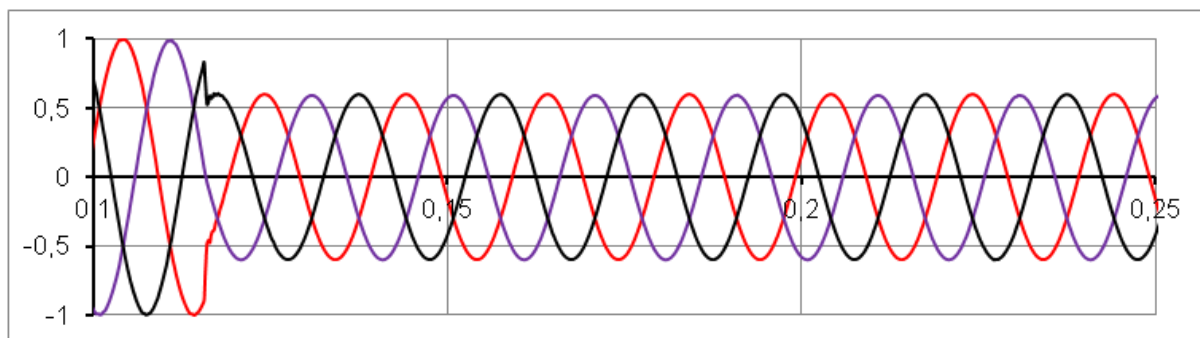
W układzie elektromechanicznym z silnikiem indukcyjnym pojawienie się zapadu napięcia powoduje nawet w warunkach biegu jałowego znaczne przeregulowania prądu na początku i końcu zapadu.

W przypadku przerwy w zasilaniu obniżenie amplitudy napięcia zasilania do poziomu 10% przez okres 50 [ms] powoduje bardzo duże wahania prądu stojana, do kilkakrotnej wartości prądu znamionowego, jak również znaczne obniżenie prędkości obrotowej silnika.

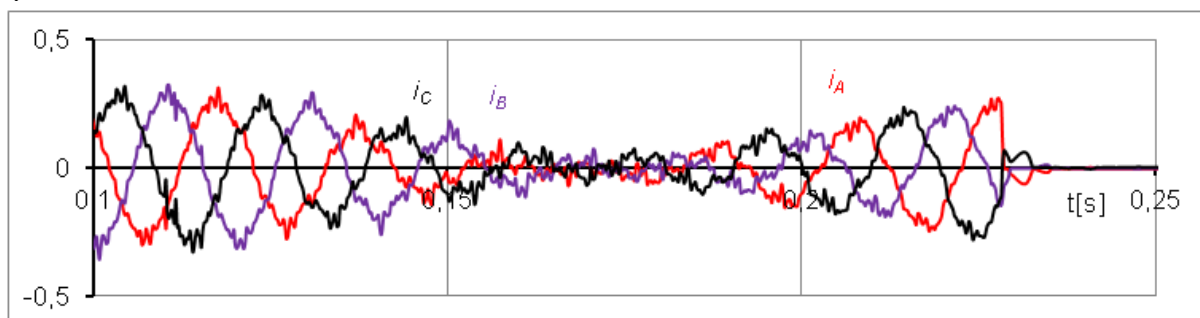
Silnik indukcyjny zasilany przez przykładowy (ogólnie dostępny na rynku) przemiennik częstotliwości .

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 1.5 – 1.6 .

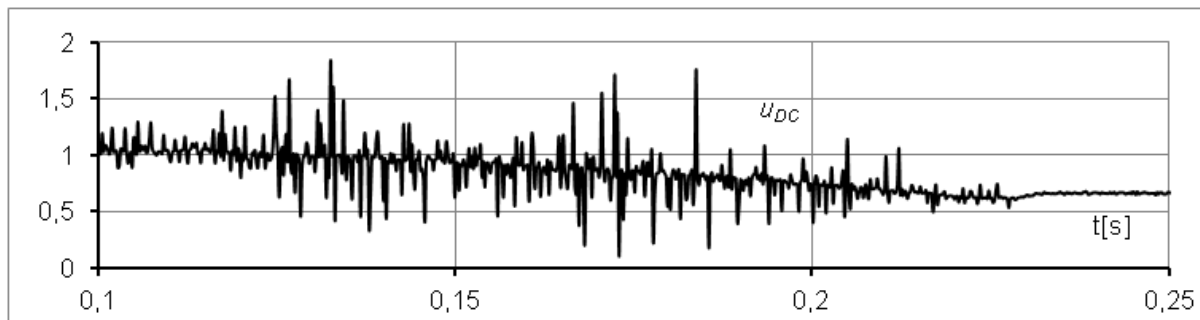
a)



b)

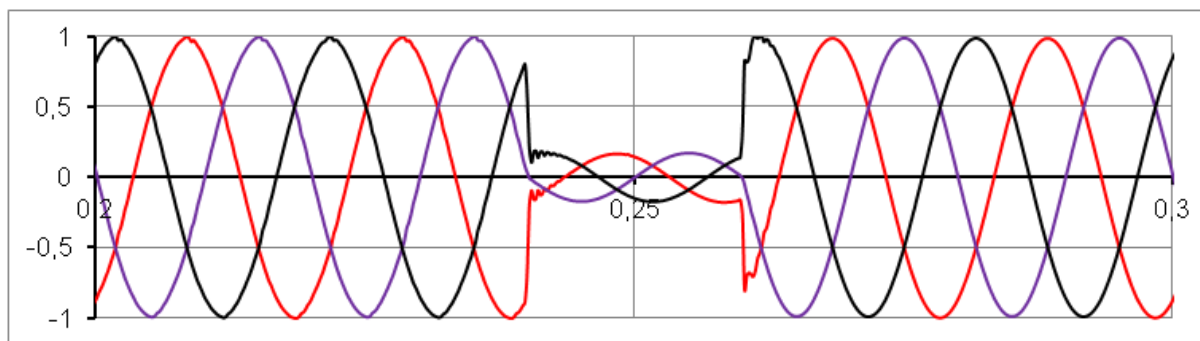


c)

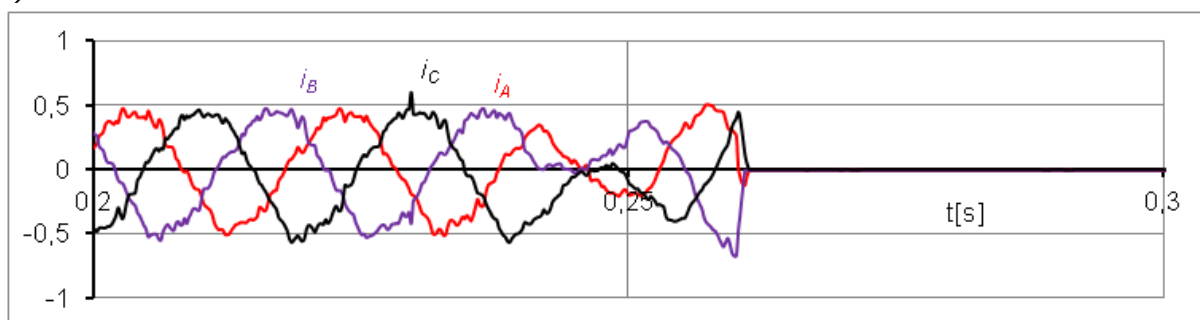


Rys.1.5. Przebiegi u_A , u_B , u_C , i_A , i_B , i_C , u_{DC} podczas badania laboratoryjnego odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym (bez obciążenia $T_L = 0\%T_N$) zasilanym z typowego przemiennika częstotliwości, na zapady napięcia typu A

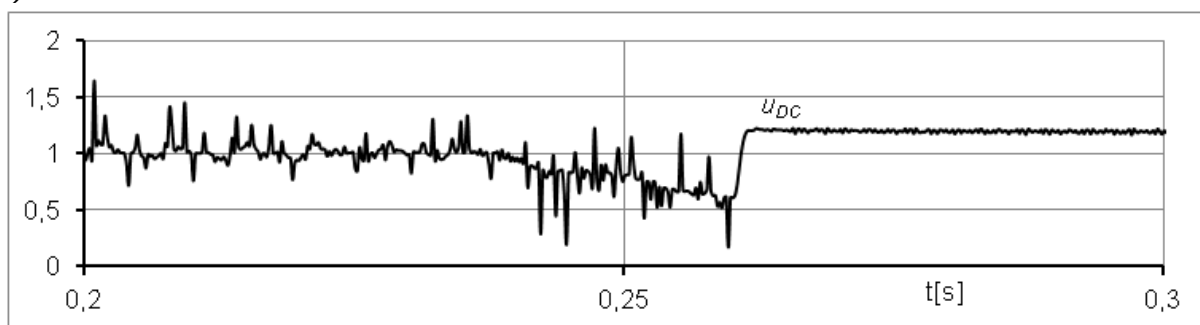
a)



b)



c)



Rys.1.6. Przebiegi u_A , u_B , u_C , i_A , i_B , i_C , u_{DC} podczas badania laboratoryjnego odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym (z obciążeniem $T_L = 60\%T_N$) zasilanym z typowego przemiennika częstotliwości, na przerwy w zasilaniu

W obu przypadkach układ sterowany wg $U/f = \text{const}$ starał się realizować zadane wartości amplitudy i częstotliwości napięcia bez względu na poziom napięcia zasilania. Jedynym kryterium dalszej pracy był minimalny poziom napięcia u_{DC} , po przekroczeniu jego wartości minimalnej nastąpiło natychmiastowe wyłączenie przemiennika częstotliwości.

1.4.2. Badania symulacyjne

Wybrano model rozbudowanego przemiennika częstotliwości z wektorowym układem regulacji (AC3 wybranego z dostępnej biblioteki MATLAB SIMULINK [4]) i poddano testom polegającym na zasilaniu napięciem w warunkach zapadu typu A (najtrudniejszy dla napędu, w przypadku innych typów zapadu tylko może być lepiej). Uznano, że układ jest zoptymalizowany względem zastosowanego silnika, dlatego też nie próbowano zastosować parametrów silnika wykorzystywanego później w laboratorium. Analizę potraktowano rozpoznawczo, bez dokładnej analizy układu elektromechanicznego.

Określono charakterystyki odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym prądu przemiennego na zapady napięcia.

Badanie odporności polegało na stopniowym obniżeniu napięcia zasilania - zapad napięcia typu A (0,9 0,85 0,8 0,75 0,7 0,65 0,6) U_N w okresie 200 [ms].

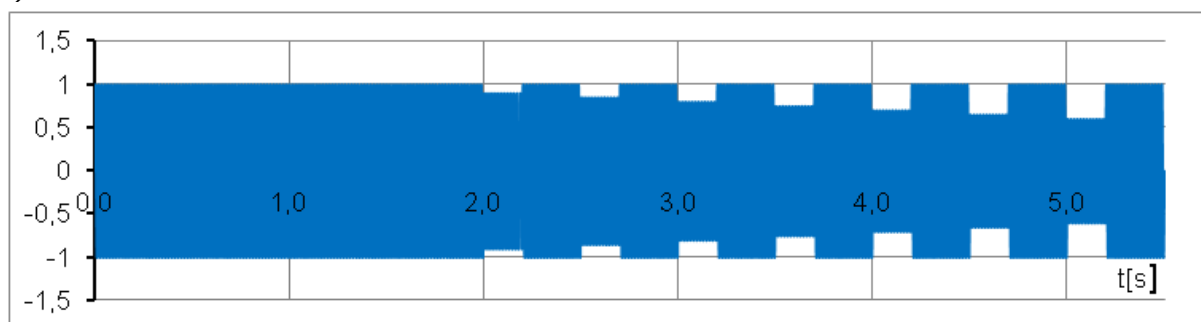
Jeżeli prędkość silnika obniżyła się o 1% poniżej zadanej wartości ω_m^* , to zostało to uznane za utratę odporności.

Wyniki symulacji odnośnie wymagań dotyczących odporności napędu nie w pełni zadawałają (dopuszczalne zmiany napięcia w niewielkim zakresie), dlatego zaproponowano modyfikację układu regulacji polegającą na zmianie sposobu zadawania wartości strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika.

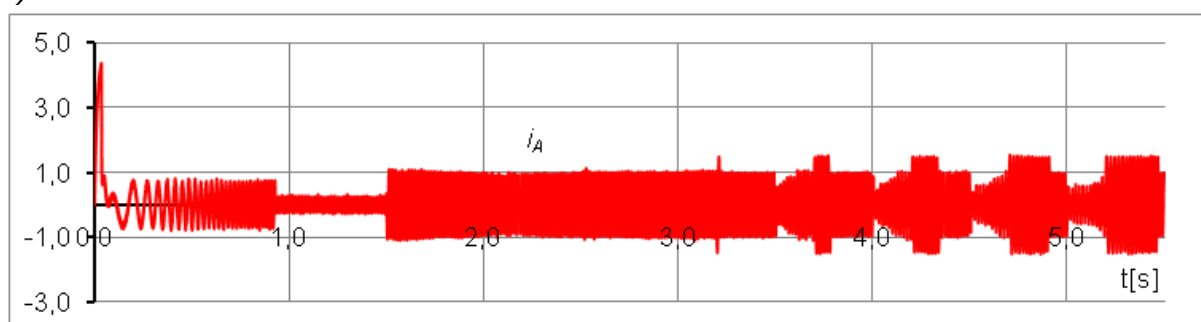
W standardowym przypadku wartość zadana strumienia sprzężonego nie zależy od poziomu napięcia zasilania, w proponowanym rozwiązaniu uzależnienie wartości zadanej strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika od poziomu napięcia zasilania w sposób znaczący poprawiło odporność układu elektromechanicznego na zapady napięcia.

Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 1.7 - 1.8 .

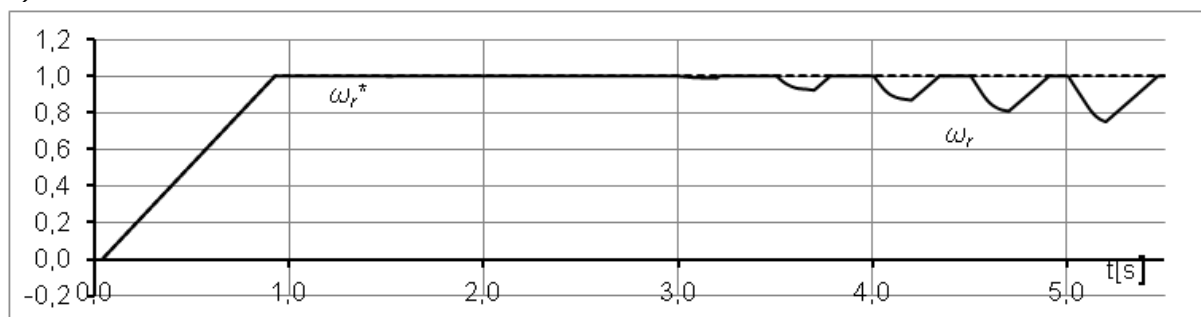
a)



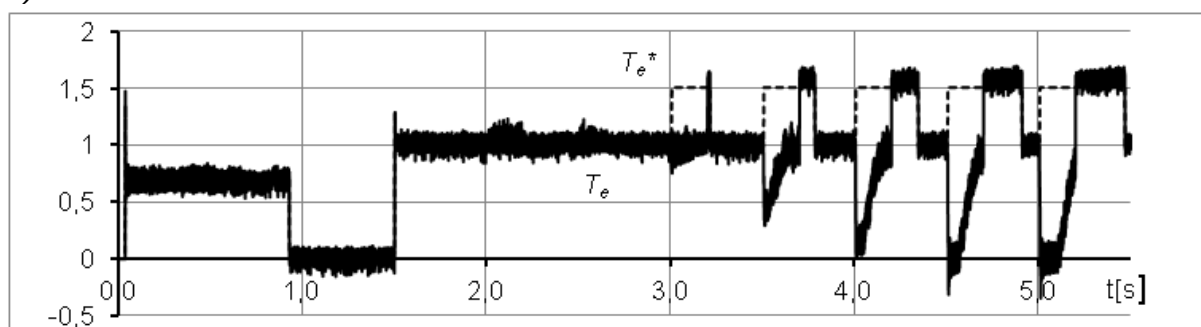
b)



c)

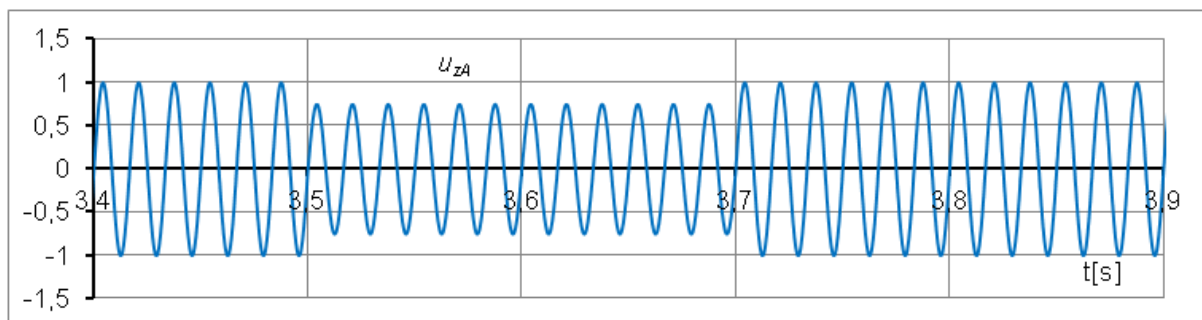


d)

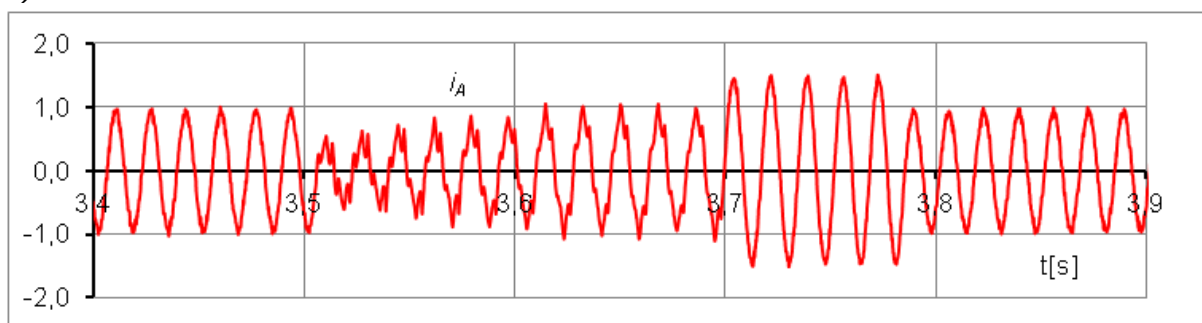


Rys.1.7. Przebiegi u_{zA} , i_A , ω_r^* , ω_r , T_e^* , T_e podczas badania odporności układu elektromechanicznego AC3 z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez przemiennik częstotliwości, na zapady napięcia

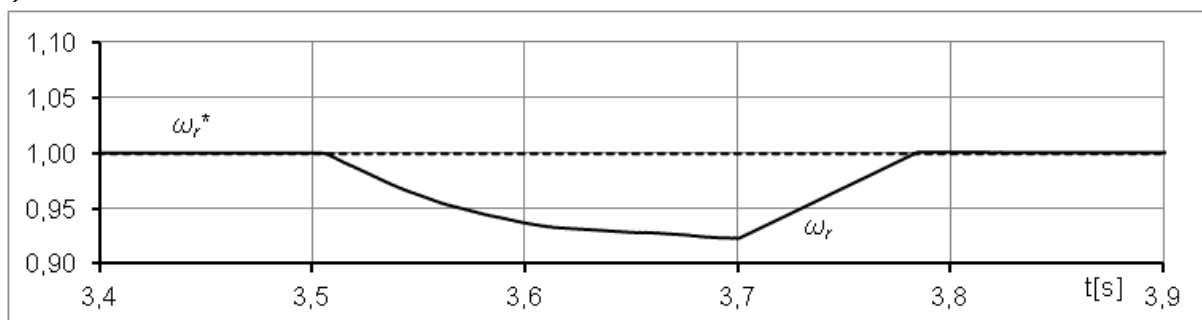
a)



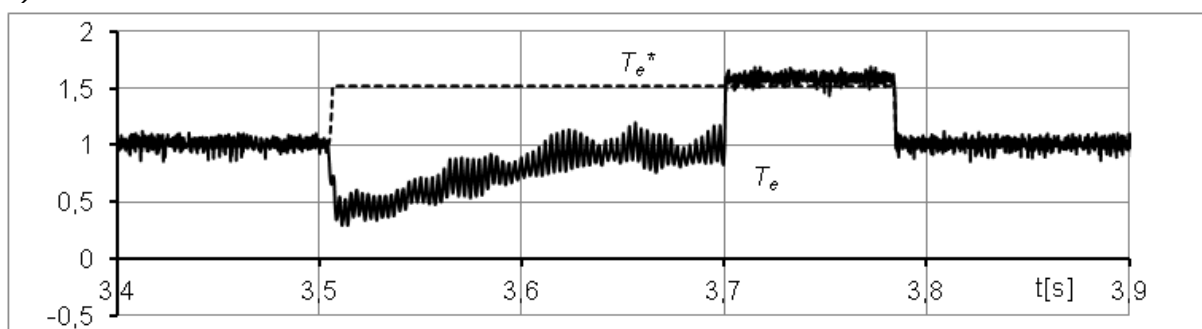
b)



c)



d)



Rys.1.8. Przebiegi u_{ZA} , i_A , ω_r^* , ω_r , T_e^* , T_e podczas badania odporności układu elektromechanicznego AC3 z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez przemiennik częstotliwości na zapady napięcia - inna skala czasu

Na rysunku 1.7 przedstawiono zachowanie się układu elektromechanicznego podczas zapadów napięcia typu A. Przykładowo obniżenie napięcia zasilania przemiennika częstotliwości do 75% napięcia znamionowego spowodowało spadek obrotów silnika o około 8%.

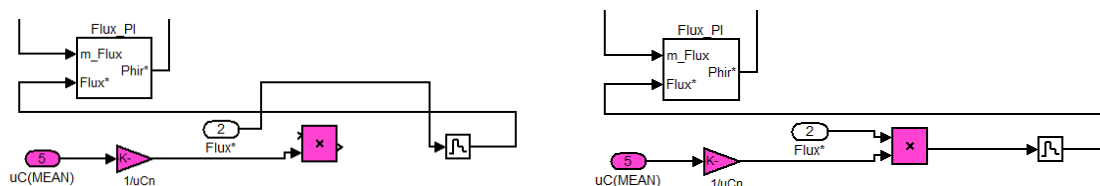
W oparciu o przeprowadzone symulacje, na rysunku 1.8 przedstawiono charakterystykę odporności układu elektromechanicznego na zapady napięcia.

Dla zadanej prędkości znamionowej, bardzo złożony, rozbudowany układ regulacji pozwala zachować odporność układu elektromechanicznego na zapady do poziomu 80% napięcia znamionowego.

Przy prędkości zadanej na poziomie 60% prędkości znamionowej napięcie zasilania może obniżyć się do poziomu 50% zachowując wymaganą odporność układu elektromechanicznego na zapady napięcia.

Wprowadzenie modyfikacji we wcześniej rozpatrywanym modelu AC3 tj. uzależnienie zadawanej wartości strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika silnika indukcyjnego od wartości napięcia u_{DC} znacznie *podwyższyło odporność układu elektromechanicznego na zapady napięcia*.

W tym przypadku zadawanie wartości strumienia może być bezpośrednie, bądź z korektą od aktualnej wartości napięcia u_{DC} (rysunek 1.9).



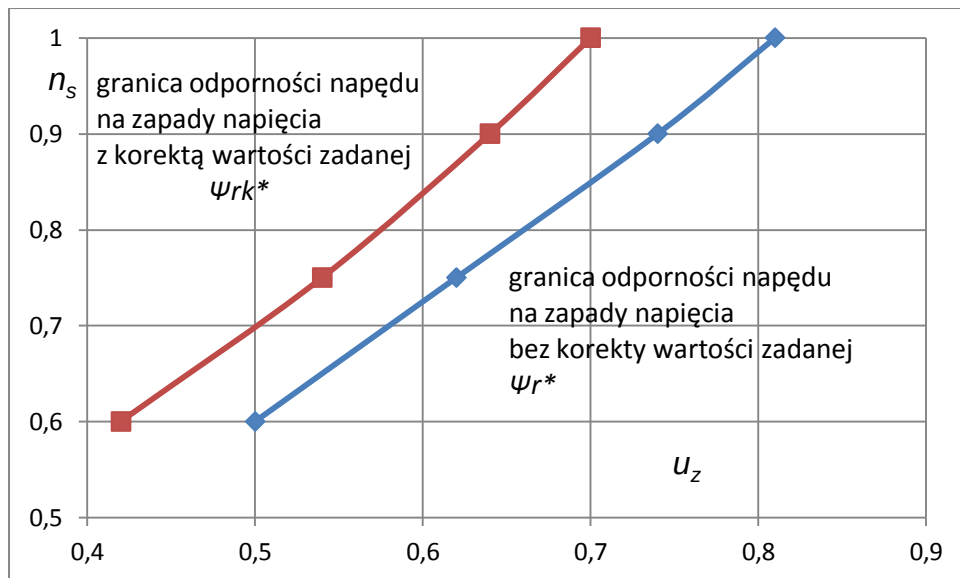
Rys.1.9. Modyfikacja sposobu zadawania wartości strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika silnika indukcyjnego

W oparciu o otrzymane wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 1.10 charakterystykę odporności układu elektromechanicznego na zapady napięcia.

Widać wyraźną poprawę odporności układu elektromechanicznego na zapady napięcia, w przypadku zadanej prędkości znamionowej przy obciążeniu momentem znamionowym:

- granica odporności napędu na zapady napięcia bez korekty wartości zadanej Ψ_r^* występuje przy napięciu zasilania przemiennika 85% U_N ,
- granica odporności napędu na zapady napięcia z korektą wartości zadanej Ψ_{rk}^* występuje przy napięciu zasilania przemiennika 70% U_N .

Oczywiście odbywa się to kosztem wzrostu prądu stojana.

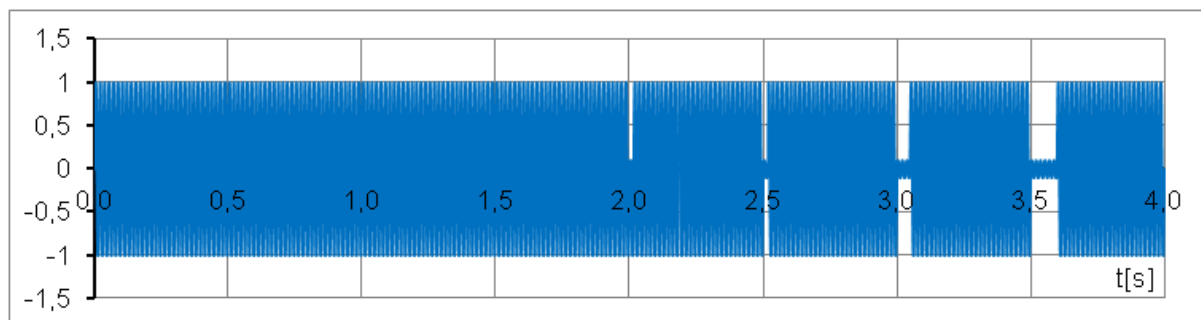


Rys.1.10. Charakterystyka odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym na zapady napięcia, $\Psi_{rk}^* = \Psi_r^* u_{DC} / u_{DCN}$, $T_L = 100\% T_N$

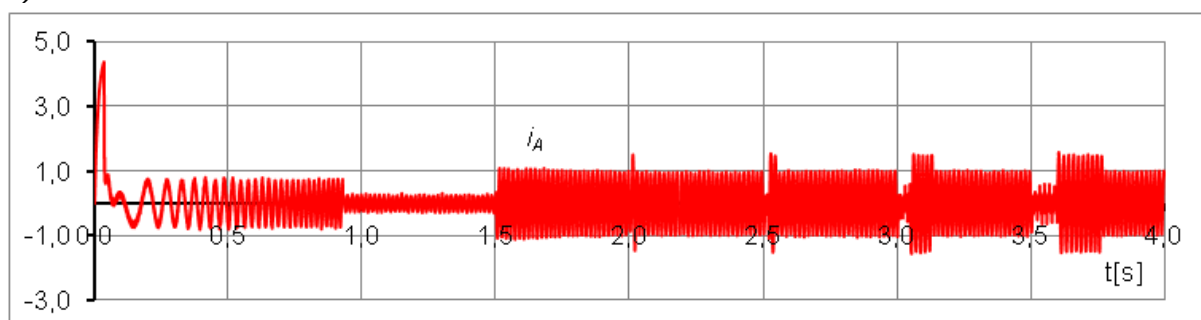
Wyniki symulacji reakcji ww. układu elektromechanicznego podczas krótkich przerw w zasilaniu – napięcie zasilania obniża się do poziomu 10% napięcia znamionowego w czasie 10 [ms], 20 [ms], 50 [ms] oraz 100 [ms] - przedstawiono na rysunku 1.11 oraz na rysunku 1.12 .

Przerwy w zasilaniu powodują znaczne spadki prędkości (rysunek 1.11), ale przykładowo przerwa 10 [ms] spowoduje obniżenie prędkości obrotowej o mniej niż 1%.

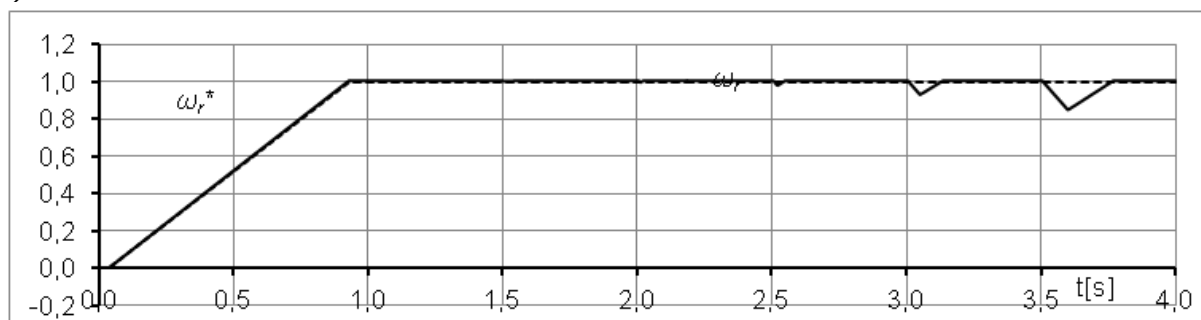
a)



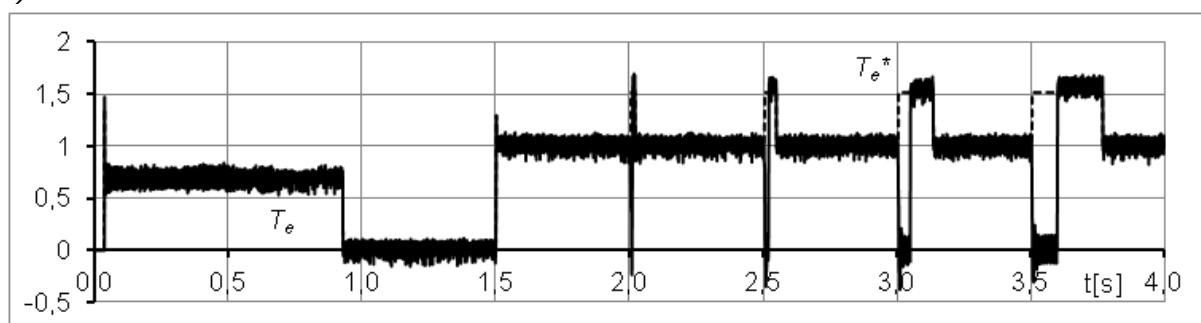
b)



c)

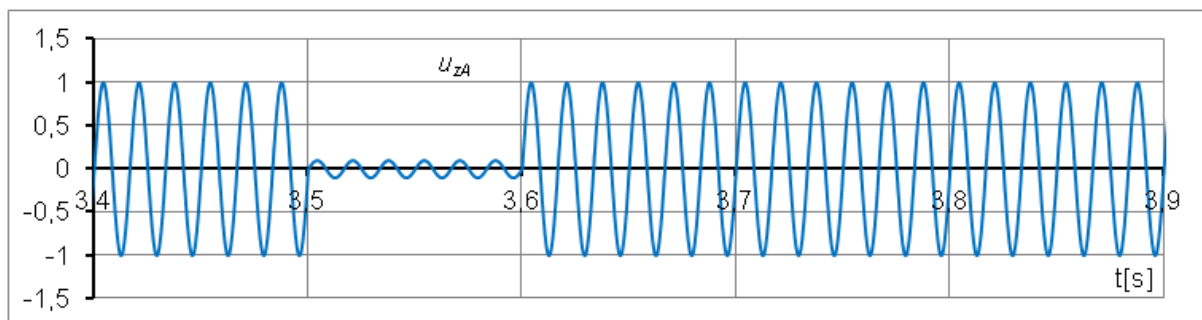


d)

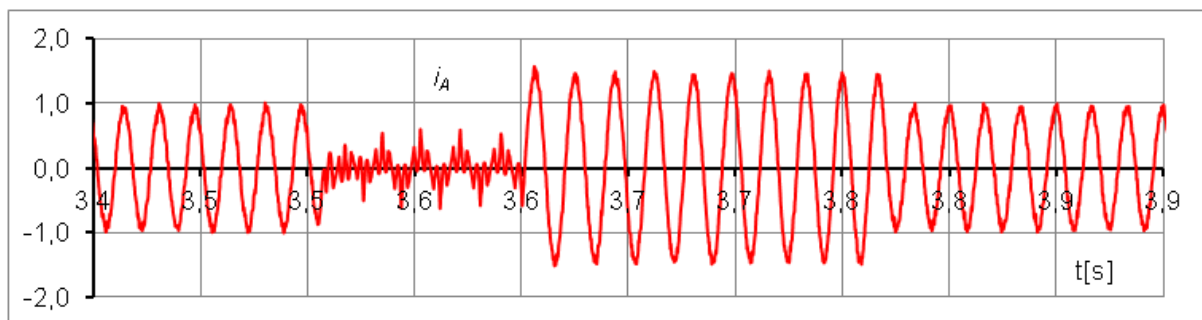


Rys.1.11. Przebiegi u_A , i_A , ω_r^* , ω_r , T_e^* , T_e podczas badania odporności układu elektromechanicznego AC3 z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez przemiennik częstotliwości, na przerwy w zasilaniu 10 [ms], 20 [ms], 50 [ms], 100 [ms]

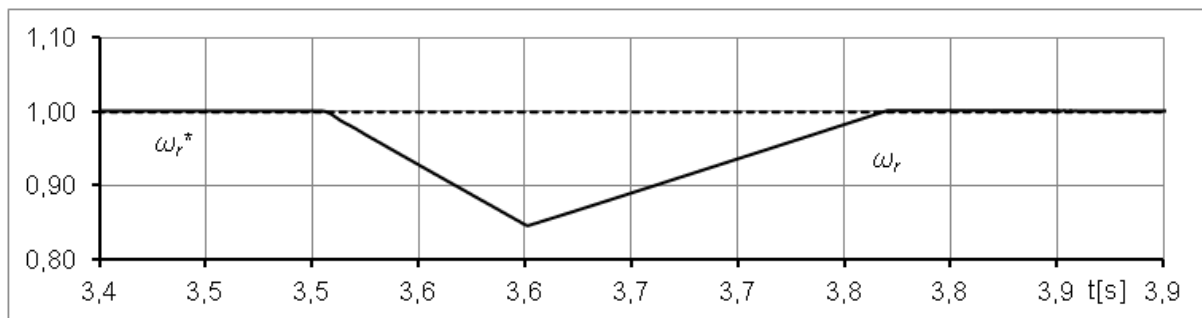
a)



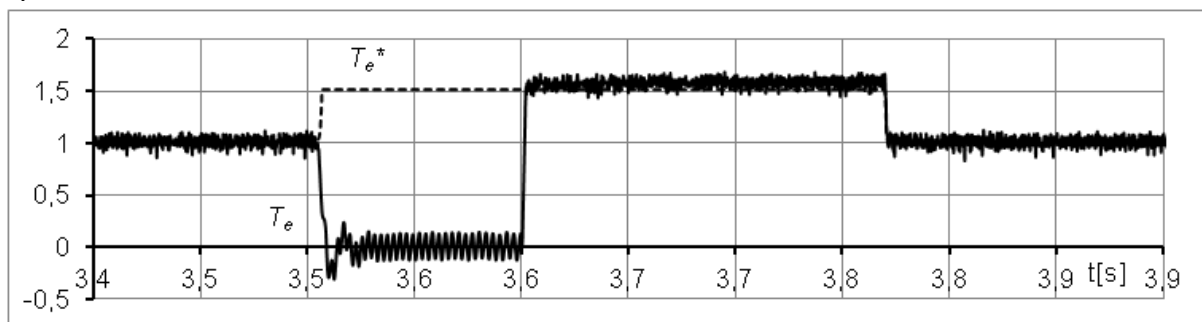
b)



c)



d)



Rys.1.12. Przebiegi u_A , i_A , ω_r^* , ω_r , T_e^* , T_e podczas badania odporności układu elektromechanicznego AC3 z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez przemiennik częstotliwości, na przerwy w zasilaniu 100 [ms] - inna skala czasu

1.4.3. Wnioski

W przypadku bezpośredniego zasilania z sieci silnika indukcyjnego podczas zapadu napięcia pojawiają się silne przeregulowania prądu stojana, momentu elektromechanicznego i w konsekwencji silne wahania prędkości silnika, niezależnie od obciążenia – obniżenie prędkości silnika o 16%.

Co potwierdza, wpływ zapadu napięcia na prędkość silnika indukcyjnego.

Przemiennik częstotliwości był sterowany wg U/f , wartości zdane napięcia i częstotliwość znamionowe.

Kontrola napięcia zasilania w przypadku przykładowego przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia ogranicza się do pomiaru napięcia u_{DC} . Niezależnie od typu zapadu napięcia czy przerwy w zasilaniu, jeżeli u_{DC} obniży się poniżej 70% wartości znamionowej następuje wyłączenie przemiennika częstotliwości (rysunki 1.5 – 1.6).

W przypadku zasilania silnika indukcyjnego przez przemiennik częstotliwości, podczas przerwy w zasilaniu 100 [ms] (rysunek 1.12) występują duże wahania momentu T_e , osiągając nawet ujemne wartości i w konsekwencji obniżenie prędkości o około 15%. Przerwa w zasilaniu - obniżenie napięcia zasilania do poziomu 10% napięcia znamionowego przez okres 50 [ms] - powoduje bardzo silne wahania prądów i w konsekwencji obniżenie prędkości o około 15%.

Charakterystyczne, że największe obniżenie prędkości występuje do momentu powrotu napięcia do wartości znamionowej (rysunek 1.12).

Jak wykazała symulacja nawet bardzo złożone układy regulacji nie są w stanie zapewnić odpowiedniej odporności układu elektromechanicznego z silnikiem

Propozycja zmiany sposobu zadawania strumienia, jak wykazała wstępna symulacja jest interesująca w aspekcie podwyższenia odporności układu elektromechanicznego na zapady napięcia, w związku z tym celowe jest kontynuowanie dalszych badań w tym kierunku.

Warunkiem podtrzymania wymaganej (zadanej) ω_m^* prędkości silnika jest zapewnienie potrzebnego momentu elektromagnetycznego silnika T_e .

Przez analogię do silnika obcowzbudnego prądu stałego moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego zależy od strumienia Ψ_r sprzężonego z uzwojeniem wirnika oraz składowej i_{sq} prądu stojana (3.1) [6], [11], [30], [31], [32], [44], [69], [70], [71].

Wymagany moment obrotowy silnika może być zapewniony również przy obniżonym strumieniu Ψ_r oraz podwyższonym prądzie stojana, tak aby iloczyn $i_{sq} \cdot \Psi_r$ w zależności (3.1) na moment elektromagnetyczny T_e miał wartość stałą.

$$T_e = \frac{3}{2} p_b \frac{L_\mu}{L_r} i_{sq} \Psi_r \quad (3.1)$$

gdzie

p_b – liczba par biegunów

L_μ – indukcyjność wzajemna uzwojeń stojana i wirnika

$L_r = L_\mu + L_{\sigma r}$ – indukcyjność uzwojeń wirnika

i_{sq} – składowa q prądu stojana we współrzędnych zawiązanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika

Ψ_r – strumień sprzężony z uzwojeniem wirnika

1.5. Teza i cel pracy

Po wstępnym rozpoznaniu można postawić pytanie: co można zrobić, aby w sytuacji zapadu napięcia zasilającego przemiennik częstotliwości (VSI) zachować potrzebny moment elektromagnetyczny i tym samym utrzymać wymagane obroty silnika?

Dotychczasowe rozwiązania przedstawione w dostępnej literaturze [1], [2], [3], [4], [19], [34], [66], [72], zmierzające do zwiększenia odporności napędów na zapady napięcia koncentrują się głównie na energoelektronice – zwiększenie odporności na zapady poprzez rozbudowę układu zasilania względnie rozbudowę przemiennika częstotliwości.

W większości obecnie oferowanych na rynku standardowych przemienników częstotliwości, w przypadku wystąpienia zapadu napięcia nie stosuje się żadnych specjalnych strategii sterowania/ regulacji [11], [48], [53], [62], [63], [70], [73], [75], [78], [80], [86].

W rozprawie przedstawiono i udowodniono następującą tezę:

Istnieje możliwość zwiększenia odporności układów elektromechanicznych z silnikami indukcyjnymi prądu przemiennego na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu, poprzez modyfikację wektorowego układu sterowania silników indukcyjnych prądu przemiennego.

W szczególności, w przypadku układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym klatkowym zwiększenie odporności na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu jest możliwe poprzez zadawanie wartości strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika Ψ_r^* w funkcji napięcia u_{DC} na kondensatorze w obwodzie pośrednim przemiennika częstotliwości.

W celu uzasadnienia tezy pracy przyjęto następujący sposób realizacji :

- rozpoznanie wstępne,
- symulacja w idealnych warunkach celem określenia maksymalnych możliwości,
- symulacje w warunkach zapadów i przerw w zasilaniu, przy zasilaniu przez przemiennik częstotliwości PWM,
- pomiary laboratoryjne.

1.6. Krótki opis realizacji

W rozdziale 1

- omówiono klasyfikację zapadów napięcia wg Bollena oraz zdefiniowano krótkie przerwy w zasilaniu,
- zdefiniowano odporność układów elektromechanicznych na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu,
- przedstawiono stan wiedzy w aspekcie poprawy odporności układów elektromechanicznych,
- oceniono odporność wybranych przykładowych układów elektromechanicznych na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu,
- określono cel oraz zdefiniowano tezę pracy.

W rozdziale 2 przedstawiono przeprowadzone badania symulacyjne odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, zasilanym przez przemiennik częstotliwości sterowanym zmodyfikowanym wektorowym układem regulacji, w warunkach zapadu napięcia i krótkich przerw w zasilaniu.

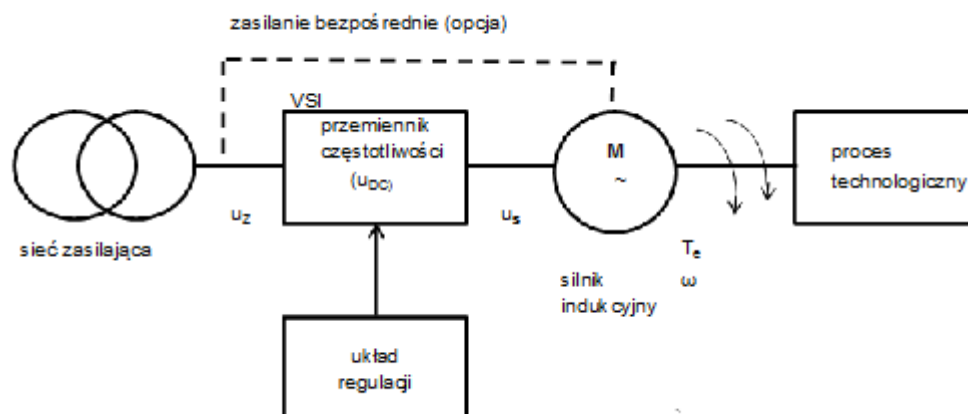
Przedstawiono równania silnika indukcyjnego we współrzędnych związanych ze strumieniem sprzężonym z uzwojeniem wirnika (współrzędne polowo zorientowane).

Zaprezentowano podstawowe przebiegi czasowe stanu ustalonego, wykresy wskazowe oraz charakterystyki statyczne napięciowo-częstotliwościowe.

W oparciu o przedstawione równania silnika we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika, zaproponowano modyfikację wektorowego układu regulacji i sterowania układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym klatkowym.

Rozpatrywano układy elektromechaniczne z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, zawierające (rysunek 1.13):

- sieć (zapady – krótkie obniżenie amplitudy napięcia zasilania, przerwy w zasilaniu),
- napięciowy przemiennik częstotliwości VSI (mostek diodowy, obwód pośredni LC, kondensator magazynujący energię),
- układ regulacji przetwornika częstotliwości – sterowanie wektorowe (model silnika we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika, linearyzacja modelu, określenie strumienia, regulatory),
- silniki indukcyjne o różnych momentach bezwładności J - realizujące wymagania technologii dotyczące prędkości ω , obciążone różnymi momentami T_L .



Rys.1.13. Układ elektromechaniczny z przełącznikiem częstotliwości VSI

Przeprowadzono badania symulacyjne układu elektromechanicznego przy założeniu idealnego źródła napięcia celem określenia maksymalnych możliwości poprawy odporności układu elektromechanicznego podczas zapadów napięcia oraz przerw w zasilaniu.

Podstawowe badania symulacyjne przy uwzględnieniu zapadu napięcia sieci zasilającej/ przerwy w zasilaniu oraz napięciowego przełącznika częstotliwości dla zapadów typu A – G oraz przerw w zasilaniu, dla różnych sposobów zasilania oraz sposobów sterowania:

- zasilanie bezpośrednio z sieci,
- zasilanie przez VSI, sterowanie uproszczone amplitudowo-częstotliwościowe funkcji u_{DC} ,
- zasilanie przez VSI, zmodyfikowane sterowanie wektorowe, zadawanie strumienia Ψ_r^* funkcji u_{DC} ,

Zaproponowano dwie możliwości odwzorowania wymaganych do układu regulacji sprzężeń zwrotnych strumienia Ψ_r , kąta θ oraz składowych prądów stojana i_{sd} oraz i_{sq} :

- przedstawione w literaturze [4], [44], [69] oraz
- zaproponowane przez autora pracy wykorzystanie równoległego modelu silnika z korektą napięć u_{sd} oraz u_{sq} w funkcji napięcia u_{DC} .

Ze względu na złożoność określenia wielkości sprzężenia zwrotnego zaproponowano uproszczone sterowanie $u_s/f_s = f(u_{DC})$. W tym celu wykorzystano obliczenia dla stanu ustalonego.

Celem określenia tych zależności przeprowadzono symulacje układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym dla różnych napięć zasilania (u_s , f_s)

tak aby przy różnych napięciach zasilania uzyskać obroty odpowiadające znamionowym.

W rozdziale 3 przedstawiono wyniki pomiarów laboratoryjnych zaproponowanych rozwiązań, w warunkach zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu.

Symulacje w czasie rzeczywistym przeprowadzono w środowisku dSPACE DS1104.

Zapady napięć oraz krótkie przerwy w zasilaniu zaprogramowano na generatorze napięć CHROMA.

Pomiary przeprowadzono pomiary w układzie elektromechanicznym z silnikiem indukcyjnym przy zasilaniu:

- przez VSI ze sterowaniem uproszczonym amplitudowo-napięciowym $u_s / f_s = (u_{DC})$,
- przez VSI ze sterowaniem wektorowym przy zadawaniu strumienia $\psi_r^* = f(u_{DC})$ dla zapadów napięcia typu A – G oraz przerw w zasilaniu P.

W rozdziale 4 przedstawiono wnioski końcowe, potwierdzające postawioną tezę.

Przedstawiono również kierunki dalszych badań, mających na celu rozszerzenie metody na układy elektromechaniczne z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych.

Praca zawiera następujące załączniki:

- dane silnika indukcyjnego z biblioteki MATLAB SIMULINK,
- dane silnika indukcyjnego klatkowego, wykorzystanego podczas pomiarów laboratoryjnych,
- zaprogramowanie zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu na generatorze CHROMA.

W zakończeniu pracy przedstawiono wykaz literatury.

Generalnie badania zrealizowano przy następujących założeniach:

- symulacje przeprowadzono w środowisku MATLAB SIMULINK,
- rozważa się zachowanie układu elektromechanicznego w sytuacji ustabilizowanej prędkości i obciążenia momentem znamionowym bezpośrednio przed wystąpieniem zapadu napięcia bądź przerwy w zasilaniu .
- stałość momentu obciążenia, charakter momentu obciążenia czy stały, czy zależny liniowo/ kwadratowo od prędkości oczywiście ma znaczenie (w modelu symulacji uzależnienie momentu od prędkości obrotowej jest możliwe) ale w tym punkcie pracy układu ma mniejsze znaczenie,

- określenia układ elektromechaniczny a układ napędowy mają znaczenie zamienne.
- badano reakcje układu napędowego na zapady napięcia typu A – G do 60% napięcia znamionowego, trwające 200 [ms] oraz
- krótkie przerwy w zasilaniu na poziomie 10% napięcia znamionowego w czasie 10 [ms], 20 [ms], 50 [ms], 100 [ms].
- maksymalne obciążenie układu elektromechanicznego w laboratorium 60% T_N (w zestawie laboratoryjnym nie ma możliwości obciążenia 100% T_N).

2. Badania symulacyjne odporności układów elektromechanicznych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, w warunkach zapadu napięcia i krótkich przerw w zasilaniu

2.1. Równania silnika indukcyjnego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika

Założenia do modelu matematycznego silnika indukcyjnego [6], [11], [25], [43], [45], [46], [62], [66], [68], [72], [73], [84], [85],

- obwód magnetyczny silnika jest nienasycony,
- straty w żelazie pomijalne,
- uzwojenia silnika są symetrycznie rozmieszczone na stojanie i wirniku,
- uzwojenia stojana zasilane są symetrycznym układem napięć,
- rezystancje i reaktancje uzwojeń są stałe,
- uzwojenia silnika są tak wykonane, że zapewniają sinusoidalny rozkład przestrzenny przepływu lub uwzględnia się tylko pierwszą harmoniczną.

Wychodząc z równań przedstawionych w [11] można napisać,

dla stanu dynamicznego:

$$d(i_{sd})/dt + j*d(i_{sq})/dt = -j*\omega_{ks}*(i_{sd}+j*i_{sq}) + 1/(\sigma*L_s)*[u_{sd} + j*u_{sq} - (R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*(i_{sd} + j*i_{sq}) + (-j*\omega_{rs}*L_m/L_r + L_m*R_r/L_r^2)*\Psi_r] \quad (2.1)$$

$$d(i_{sd})/dt + j*d(i_{sq})/dt = -j*\omega_{ks}*i_{sd} + \omega_{ks}*i_{sq} + 1/(\sigma*L_s)*[u_{sd} + j*u_{sq} - (R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sd} - j*(R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sq}] - j*\omega_{rs}*L_m/L_r*\Psi_r + L_m*R_r/L_r^2*\Psi_r] \quad (2.2)$$

$$d(i_{sd})/dt + j*d(i_{sq})/dt = -j*\omega_{ks}*i_{sd} + \omega_{ks}*i_{sq} + 1/(\sigma*L_s)*u_{sd} + j*1/(\sigma*L_s)*u_{sq} - 1/(\sigma*L_s)*(R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sd} - j*1/(\sigma*L_s)*(R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sq} - j*1/(\sigma*L_s)*\omega_{rs}*L_m/L_r*\Psi_r + 1/(\sigma*L_s)*L_m*R_r/L_r^2*\Psi_r] \quad (2.3)$$

dla składowej rzeczywistej:

$$d(i_{sd})/dt = \omega_{ks}*i_{sq} + 1/(\sigma*L_s)*u_{sd} - 1/(\sigma*L_s)*u_{sq} - 1/(\sigma*L_s)*(R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sd} + 1/(\sigma*L_s)*R_r*L_m/L_r^2*\Psi_r \quad / \sigma*L_s \quad (2.4)$$

$$\sigma*L_s*d(i_{sd})/dt = \sigma*L_s*\omega_{ks}*i_{sq} + u_{sd} - (R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sd} + R_r*L_m/L_r^2*\Psi_r \quad (2.5)$$

$$u_{sd} = \sigma*L_s*d(i_{sd})/dt + (R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sd} - \sigma*L_s*\omega_{ks}*i_{sq} - R_r*L_m/L_r^2*\Psi_r \quad (2.6)$$

dla składowej urojonej:

$$d(i_{sq})/dt = -\omega_{ks}*i_{sd} + 1/(\sigma*L_s)*u_{sq} - 1/(\sigma*L_s)*(R_s + R_r*L_m^2/L_r^2)*i_{sq} - 1/(\sigma*L_s)*\omega_{rs}*R_r*L_m/L_r*\Psi_r \quad / \sigma*L_s \quad (2.7)$$

$$\sigma^*L_s^*d(i_{sq})/dt = -\sigma^*L_s^*\omega_{ks}^*i_{sd} + u_{sq} - (R_s + R_r^*L_m^2/L_r^2)^*i_{sq} - \omega_{rs}^*L_m/L_r^* \Psi_r \quad (2.8)$$

$$u_{sq} = \sigma^*L_s^*d(i_{sq})/dt + (R_s + R_r^*L_m^2/L_r^2)^*i_{sq} + \sigma^*L_s^*\omega_{ks}^*i_{sd} + \omega_{rs}^*L_m/L_r^* \Psi_r \quad (2.9)$$

dla stanu ustalonego:

dla składowej d:

$$u_{sd} = (R_s + R_r^*L_m^2/L_r^2)^*i_{sd} - \sigma^*L_s^*\omega_{ks}^*i_{sq} - R_r^*L_m/L_r^2)^* \Psi_r \quad (2.10)$$

$$u_{sd} = R_s^*i_{sd} - \sigma^*L_s^*\omega_{ks}^*i_{sq} \quad (2.11)$$

analogicznie dla składowej q:

$$u_{sq} = R_s^*i_{sq} + L_s^*\omega_{ks}^*i_{sd} \quad (2.12)$$

2.1.1. Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika

Równania silnika indukcyjnego klatkowego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika, wyprowadzone w oparciu [6], [11], [44], [69], [70], [71] mają następującą postać :

$$u_{sd} = \sigma^*L_s^*d(i_{sd})/dt + (R_s + R_r^*L_m^*L_m/L_r/L_r)^*i_{sd} - \sigma^*L_s^*\omega_{ks}^*i_{sq} - L_m^*R_r/L_r/L_r^* \Psi_r \quad (2.13)$$

$$u_{sq} = \sigma^*L_s^*d(i_{sq})/dt + (R_s + R_r^*L_m^*L_m/L_r/L_r)^*i_{sq} + \sigma^*L_s^*\omega_{ks}^*i_{sd} + L_m/L_r^* \omega_m^* \Psi_r \quad (2.14)$$

$$d(\Psi_r)/dt = -R_r/L_r^* \Psi_r + R_r/L_r^*L_m^*i_{sd} \quad (2.15)$$

$$T_e = 3/2^*p^*L_m/L_r^*i_{sq}^* \Psi_r \quad (2.16)$$

gdzie

$$\sigma = 1 - L_m^*L_m/L_r/L_s \quad (2.17)$$

$$-\omega_r \Psi_r = \omega_{\Psi rr} = \omega_{rr} = R_r/L_r^*L_m^*i_{sq}/\Psi_r \quad (2.18)$$

$$\omega_{\Psi rs} = \omega_{ks} = \omega_{rs} + \omega_{\Psi rr} = \omega_m + \omega_{rr} \quad (2.19)$$

Model silnika wg równań (2.13) – (2.16) przedstawiono na rysunku 2.1 .

$$\Psi_{rq}=0 \quad (2.8)$$

$$\Psi_{rd}=\Psi_r \quad (2.9)$$

$$U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq} \quad (2.10)$$

$$U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot L_s \cdot i_{sd} \quad (2.11)$$

$$\omega_s = \omega_{rr} + \omega_m \quad (2.12)$$

$$d(\Psi_r)/dt = 0 = -R_r/L_r \cdot \Psi_r + R_r/L_r \cdot L_m \cdot i_{sd} \quad (2.13)$$

$$\Psi_r = L_m \cdot i_{sd} \quad (2.14)$$

$$s = \omega_{rr}/\omega_s \quad (2.15)$$

Dla silnika o danych wg załącznika 1 :

$$P_N = 4 \text{ [kW]}$$

$$U_N = 400 \text{ [V]}, 50 \text{ [Hz]}$$

$$n_N = 1430 \text{ [obr/min]}$$

$$J = 0,0131 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

$$R_s = 1,405 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{\sigma s} = 0,005839 \text{ [H]}$$

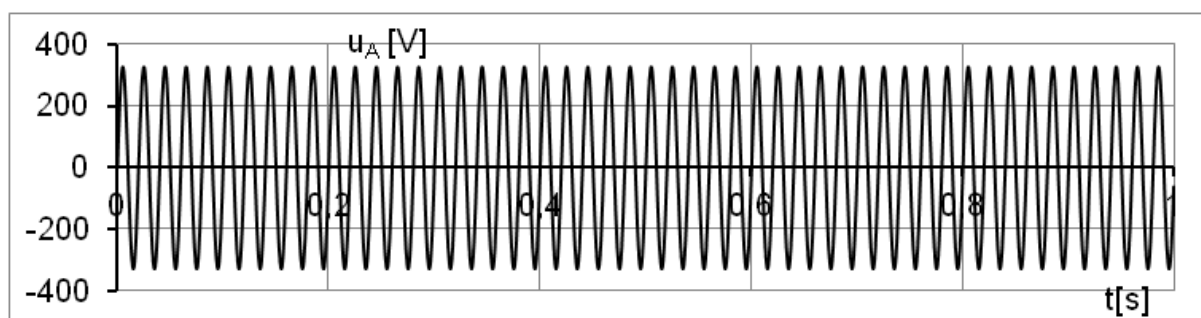
$$R_r = 1,395 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{\sigma r} = 0,005839 \text{ [H]}$$

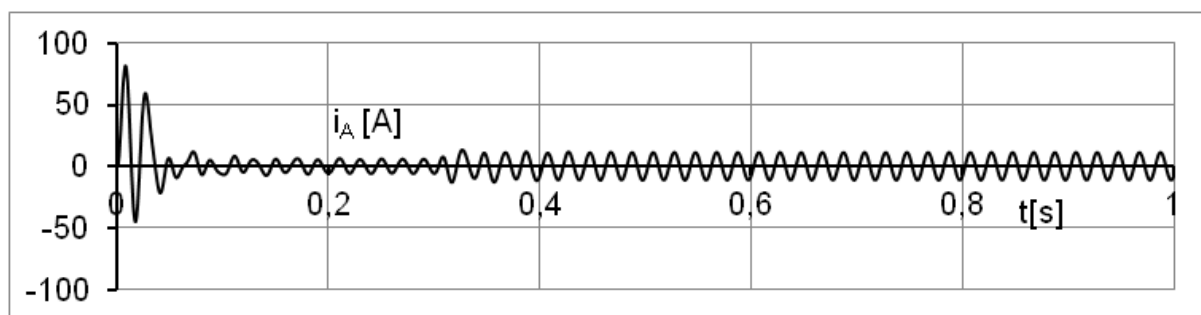
$$L_m = 0,1722 \text{ [H]}$$

Określono podstawowe zależności dla napięcia zasilania $U = U_N$, oraz momentu obciążenia $T_L = T_N$, ($T_N = 26,71 \text{ [N*m]}$) przedstawiono na rysunku 2.3 .

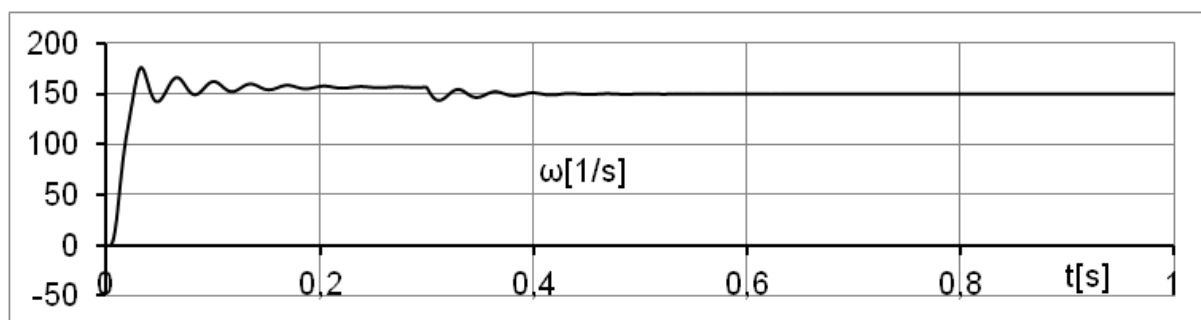
a)



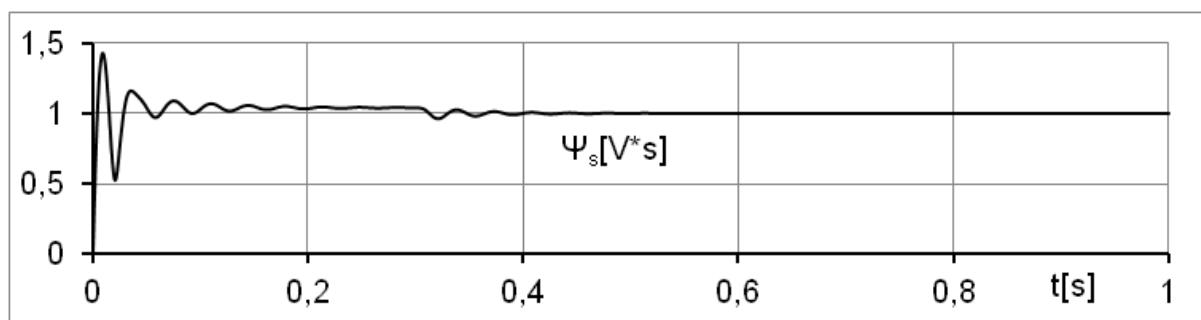
b)



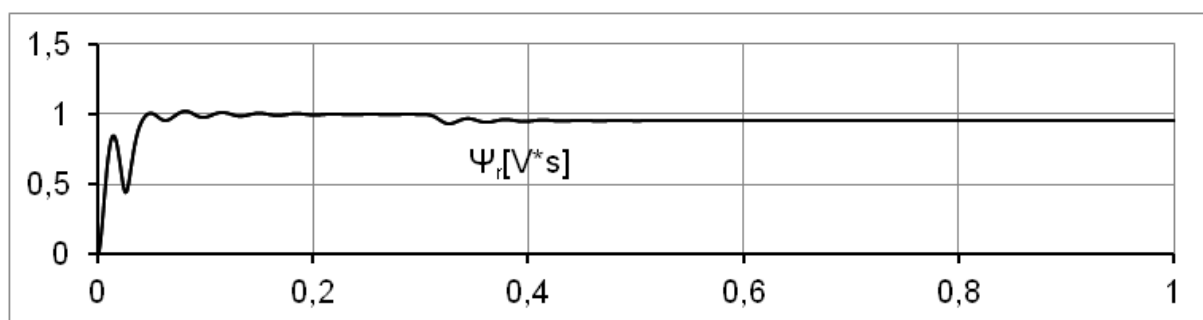
c)



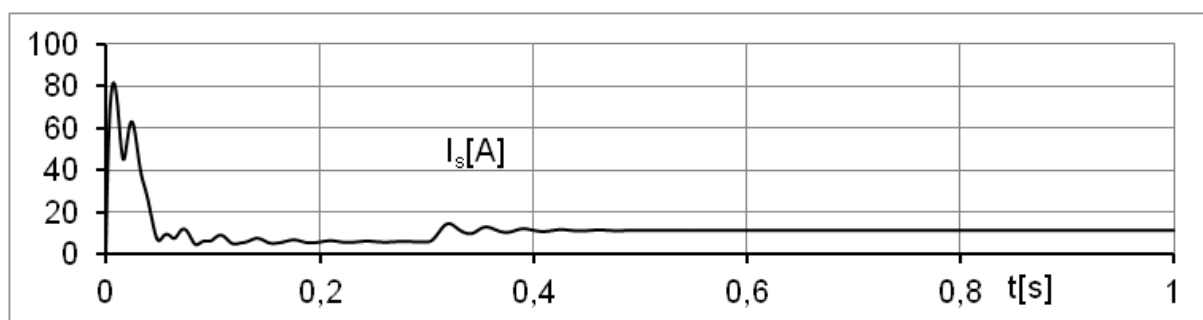
d)



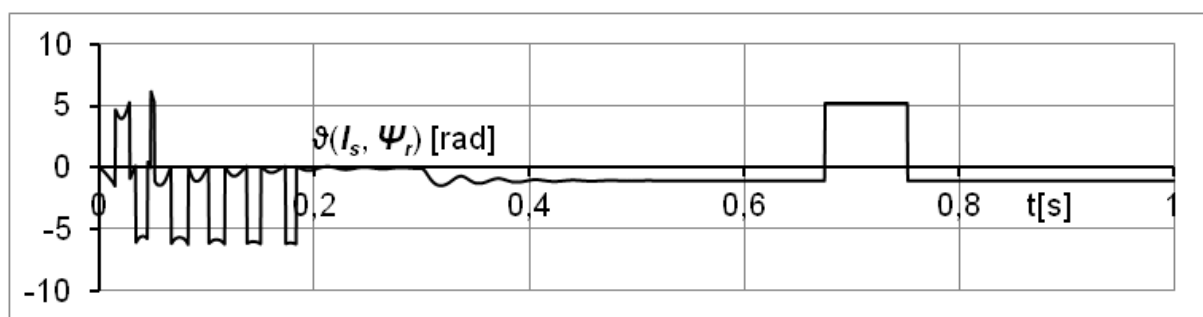
e)



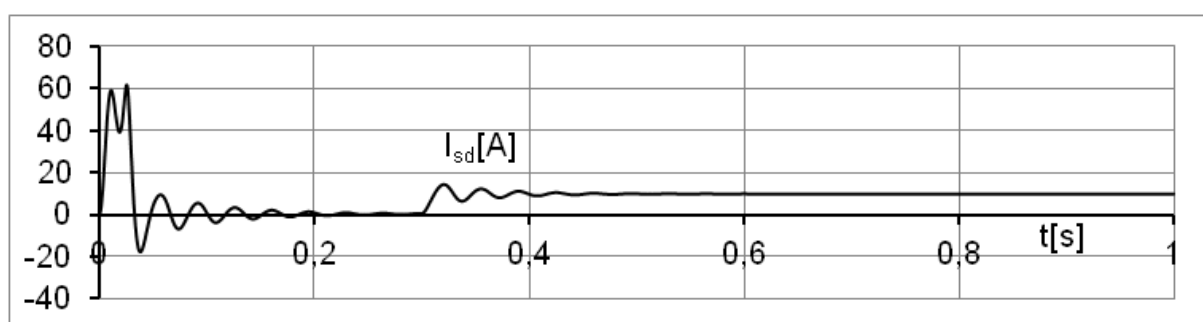
f)



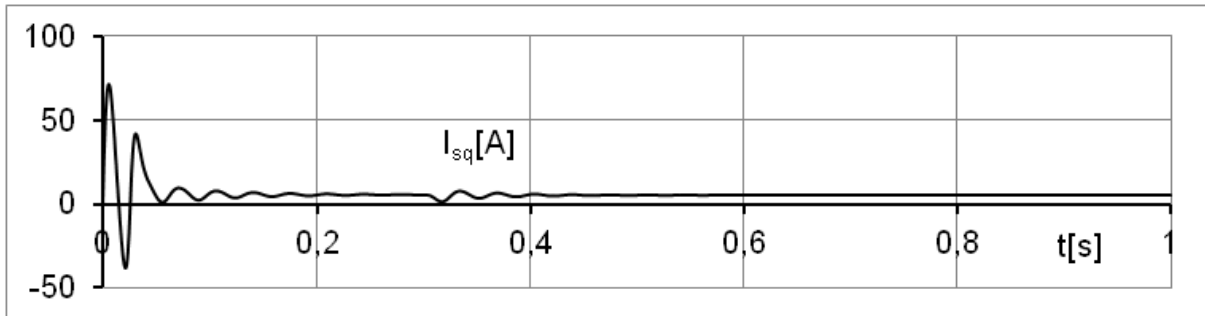
g)



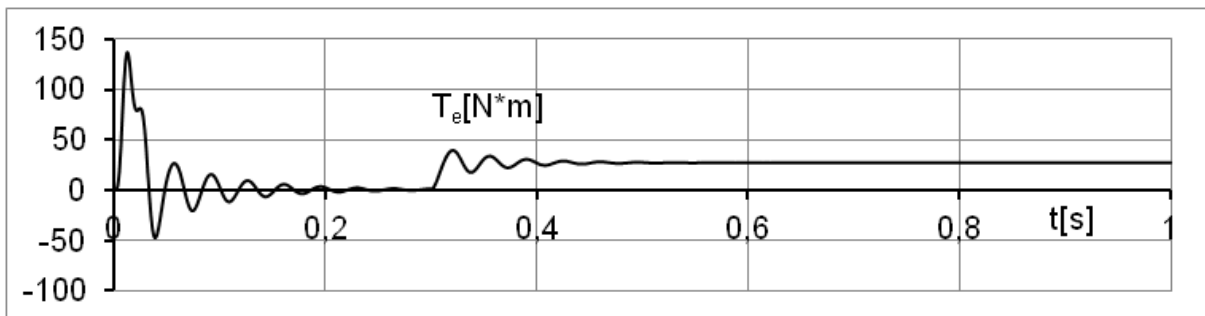
h)



i)



j)



Rys.2.3. Przebiegi podstawowych wielkości u_A , i_A , ω , ψ_s , ψ_r , $\vartheta(i_s, \psi_r)$, i_{sd} , i_{sq} oraz T_e podczas rozruchu i pracy ustalonej układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym – przy zasilaniu bezpośrednio z sieci, dla obciążenia momentem znamionowym

Na podstawie przeprowadzonych symulacji, określono następujące wielkości, wyrażone w jednostkach bezwzględnych celem unaocznienia skali wartości rzeczywistych.

$$i_{sd} = 5,57 \text{ [A]}$$

$$i_{sq} = 9,75 \text{ [A]}$$

$$U_{sd} = -27,37 \text{ [V]} \quad U_{sq} = 325,24 \text{ [V]}$$

$$\omega_{rr} = 13,71 \text{ [1/s]}$$

$$\cos\varphi = 0,89$$

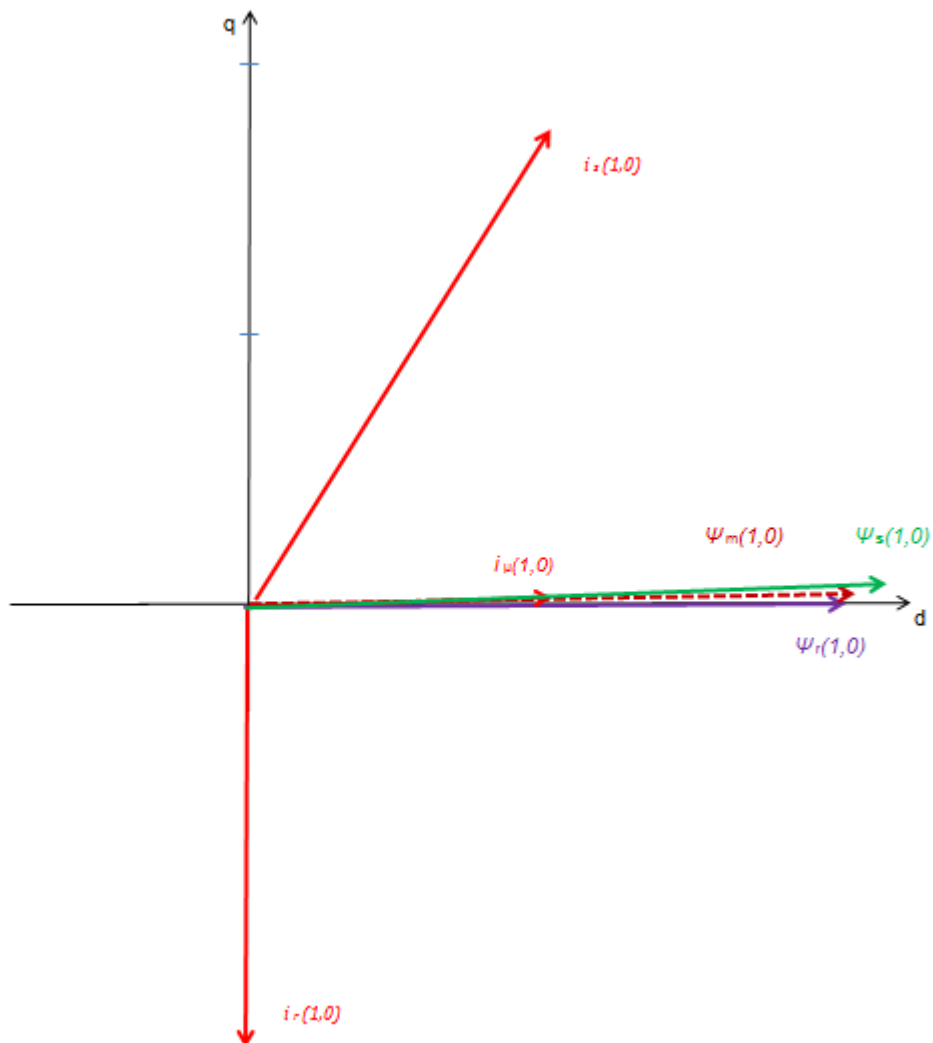
zaś z obliczeń kontrolnych

$$\omega_{rr} = R_r \cdot L_m / L_r \cdot i_{sq} / \psi_r = 13,70 \text{ [1/s]}$$

$$U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sq} = 7,83 - 35,18 = -27,36 \text{ [V]}$$

$$U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sd} = 13,7 + 311,55 = 325,25 \text{ [V]}$$

Co potwierdza poprawność przeprowadzonych symulacji.



Rys.2.4. Wykresy wskazowe prądów i_s , i_r , i_m strumieni Ψ_s , Ψ_r , Ψ_m dla stanu ustalonego układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym – przy zasilaniu bezpośrednio z sieci napięciem znamionowym(1,0), dla obciążenia momentem znamionowym

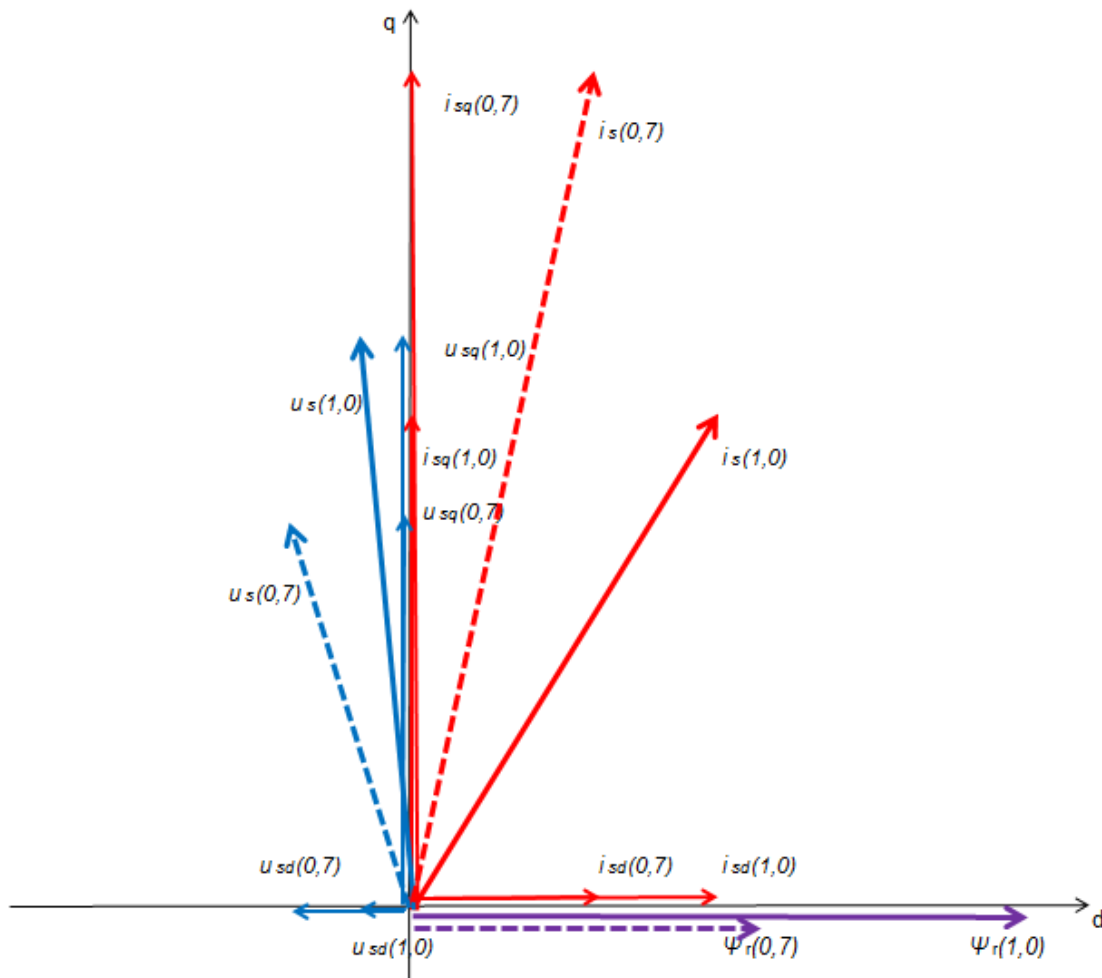
Na rysunku 2.4 przedstawiono w postaci wykresów wskazowych następujące zależności:

$$\underline{\Psi}_s = L_{\sigma s} * \underline{i}_s + L_m * (\underline{i}_s + \underline{i}_r) \quad (2.16)$$

$$\underline{\Psi}_{\sigma s} = L_{\sigma s} * \underline{i}_s \quad (2.17)$$

$$\underline{\Psi}_{\sigma r} = L_{\sigma r} * \underline{i}_r \quad (2.18)$$

$$\underline{\Psi}_m = L_m * (\underline{i}_s + \underline{i}_r) \quad (2.19)$$



Rys.2.5. Wykresy wskazowe prądów i_{sd} , i_{sq} , napięć u_{sd} , u_{sq} , , strumieni Ψ_r , dla stanu ustalonego układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym – przy zasilaniu bezpośrednio z sieci (1,0) – napięciem znamionowym, (0,7) – napięciem 70% U_N , dla obciążenia momentem znamionowym

Przy obciążeniu silnika momentem obciążenia 100% T_N , w przypadku zasilania napięciem 70% znamionowego celem podtrzymania prędkości zmniejszyła się składowa prądu i_{sd} , wzrosła składowa i_{sq} i w konsekwencji wzrosła wartość prądu stojana i_s .

W sytuacji obniżenia napięcia zasilania silnika występuje nieznaczna poprawa $\cos\varphi$ (rysunek 2.5).

2.1.3. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego

Poniżej określono charakterystyki mechaniczne silnika, dla różnych napięć zasilania (U_s, f_s), w szczególności dla $1,0 \cdot U_N$, $0,9 \cdot U_N$, $0,8 \cdot U_N$, $0,7 \cdot U_N$, $0,65 \cdot U_N$.

Postawiono pytanie czy można dobrać częstotliwość napięcia zasilania tak aby również przy obniżonej amplitudzie napięcia zapewnić wymagany moment obrotowy silnika, tym samym utrzymać zadane obroty.

Wychodząc z podstawowych równań stanu ustalonego :

$$u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sq} \quad (2.20)$$

$$u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sd} \quad (2.21)$$

$$T_N = 3/2 \cdot p \cdot L_m \cdot L_m / L_r \cdot i_{sq} \cdot i_{sd} \quad (2.22)$$

$$u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = U_N^2 \quad (2.23)$$

$$\omega_{rr} + \omega_N = \omega_s \quad (2.24)$$

$$\omega_{rr} = R_r / L_r \cdot i_{sq} / i_{sd} \quad (2.25)$$

$$i_{sq} = a / i_{sd} \quad (2.26)$$

$$a = T_N \cdot L_r / (3/2 \cdot p \cdot L_m \cdot L_m / i_{sd}) \quad (2.27)$$

$$\omega_{rr} = R_r / L_r \cdot a / i_{sd}^2 = b / i_{sd}^2 \quad (2.28)$$

$$b = R_r / L_r \cdot a \quad (2.29)$$

niech $i_{sd} = x$

$$u_{sd} = R_s \cdot x - (\omega_N + b/x^2) \cdot \sigma \cdot L_s \cdot a / \quad (2.30)$$

$$u_{sq} = R_s \cdot a / x + (\omega_N + b/x^2) \cdot L_s \cdot a / x \quad (2.31)$$

$$(R_s \cdot x - (\omega_N + b/x^2) \cdot \sigma \cdot L_s \cdot a / x)^2 + (R_s \cdot a / x + (\omega_N + b/x^2) \cdot L_s \cdot a / x)^2 = u_s^2 \quad (2.32)$$

Równanie (4.28) jest równaniem 4 – stopnia, trudnym do rozwiązania analitycznie, dlatego i_{sd} określono metodą prób i błędów korzystając z programu EXCEL: dla danego poziomu napięcia zasilania w zakresie od 1,0 do 0,64 obliczono napięcie zasilania u_z ($u_s = u_z$), zaś i_{sd} zmieniano tak długo aż $u_s = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$ - obliczenia przedstawiono w tabeli 2.1 oraz w tabeli 2.2, zaś zależności $i_{sd} = f(u_z)$, $i_{sq} = f(u_z)$, $u_{sd} = f(u_z)$, $u_{sq} = f(u_z)$, $i_s = f(u_z)$, $\psi_r = f(u_z)$, $f_s = f(u_z)$, przedstawiono na rys.2.6 .

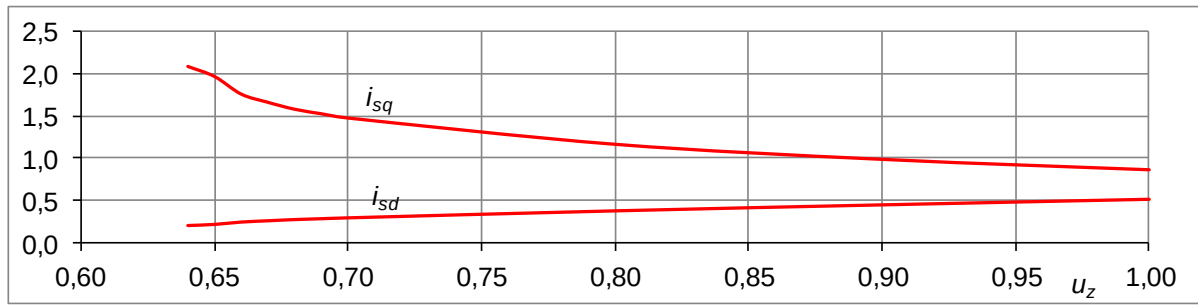
Tab.4.1.

zapad	u_z [V]	i_{sd} [A]	u_{sq} [V]	u_{sd} [V]	u_s^2 [V ²]	i_{sq} [A]	ω_r [1/s]	ω_s [1/s]	f_s [Hz]	uwagi
1,00	325,27	5,58	-26,64	324,12	325,21	9,59	13,48	312,97	49,81	
0,90	292,74	4,88	-33,04	290,89	292,76	10,95	17,59	317,09	50,47	
0,80	260,22	4,14	-42,30	256,69	260,15	12,93	24,50	324,00	51,57	
0,70	227,69	3,27	-59,13	219,94	227,75	16,37	39,29	338,79	53,92	
0,69	224,44	3,16	-61,99	215,75	224,48	16,93	42,03	341,52	54,36	
0,68	221,18	3,05	-65,08	211,71	221,48	17,53	45,03	344,52	54,83	
0,67	217,93	2,90	-69,89	206,25	217,77	18,43	49,80	349,30	55,59	
0,66	214,68	2,74	-75,77	200,73	214,56	19,51	55,79	355,29	56,55	
0,65	211,43	2,45	-89,11	191,73	211,43	21,82	69,78	369,28	58,77	
0,64	208,17	2,31	-97,23	187,97	211,63	23,14	78,49	377,99	60,16	brak rozw.

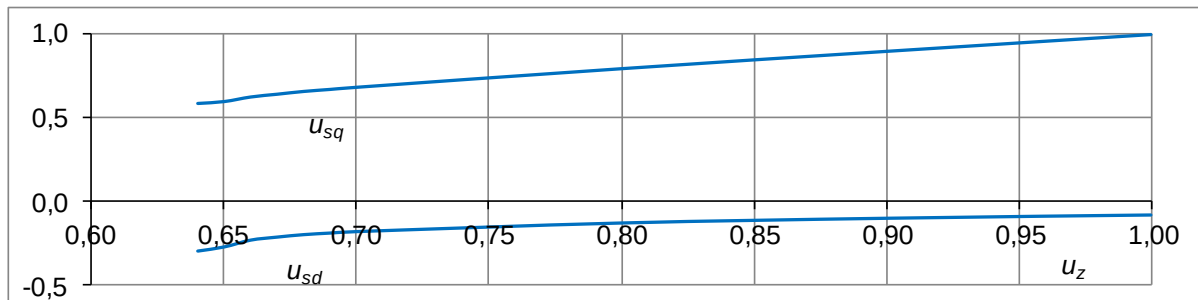
Tab.4.2.

u_z	f_s	Ψ_r	i_{sd}	i_{sq}	u_{sd}	u_{sq}
1,00	1,00	0,96	0,50	0,86	-0,08	1,00
0,90	1,01	0,84	0,44	0,99	-0,10	0,89
0,80	1,04	0,71	0,37	1,17	-0,13	0,79
0,70	1,08	0,56	0,29	1,48	-0,18	0,68
0,69	1,09	0,54	0,28	1,53	-0,19	0,66
0,68	1,10	0,53	0,27	1,58	-0,20	0,65
0,67	1,12	0,50	0,26	1,66	-0,21	0,63
0,66	1,14	0,47	0,25	1,76	-0,23	0,62
0,65	1,18	0,42	0,22	1,97	-0,27	0,59
0,64	1,21	0,40	0,21	2,09	-0,30	0,58

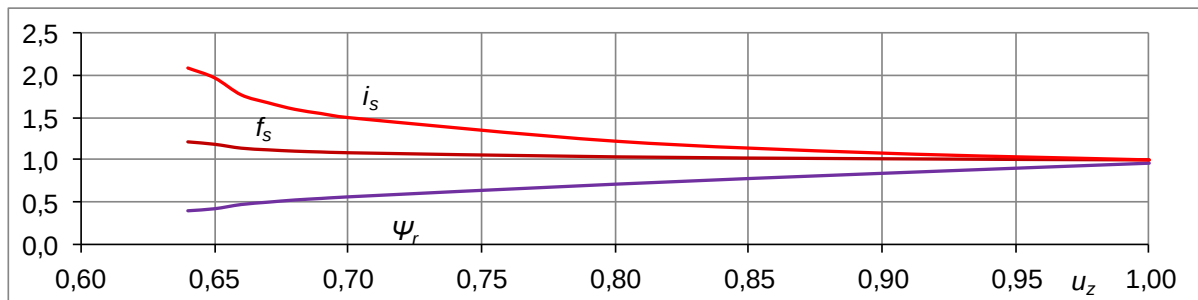
a)



b)



c)



Rys.2.6. Zależności i_{sd} , i_{sq} , u_{sd} , u_{sq} , i_s , ψ_r oraz f_s dla różnych napięć zasilania u_z .

Dla $R_s = 0$ wzory na pulsację ω_{mk} oraz moment krytyczny wg [6] :

$$\omega_{mk} = R'_r / L'_{\sigma r} \quad (4.29)$$

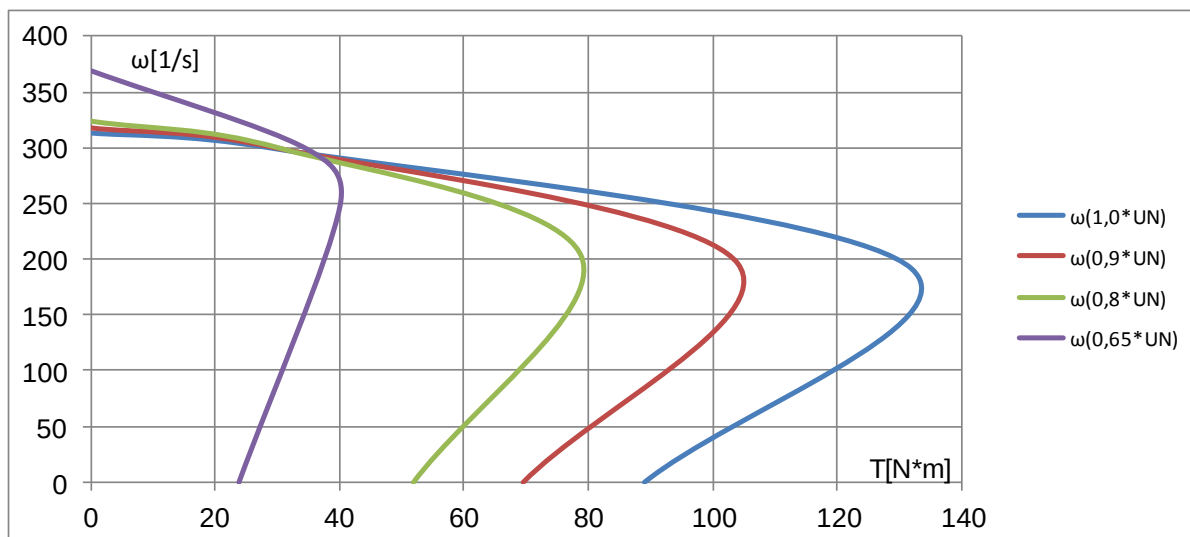
$$T_{ke} = 3 \cdot p \cdot U_s^2 / (L'_{\sigma r} 2 \cdot L'_{\sigma r} \cdot \omega_s^2) \quad (4.30)$$

$$R'_r = L_s^2 / L_m^2 \cdot R_r \quad (4.31)$$

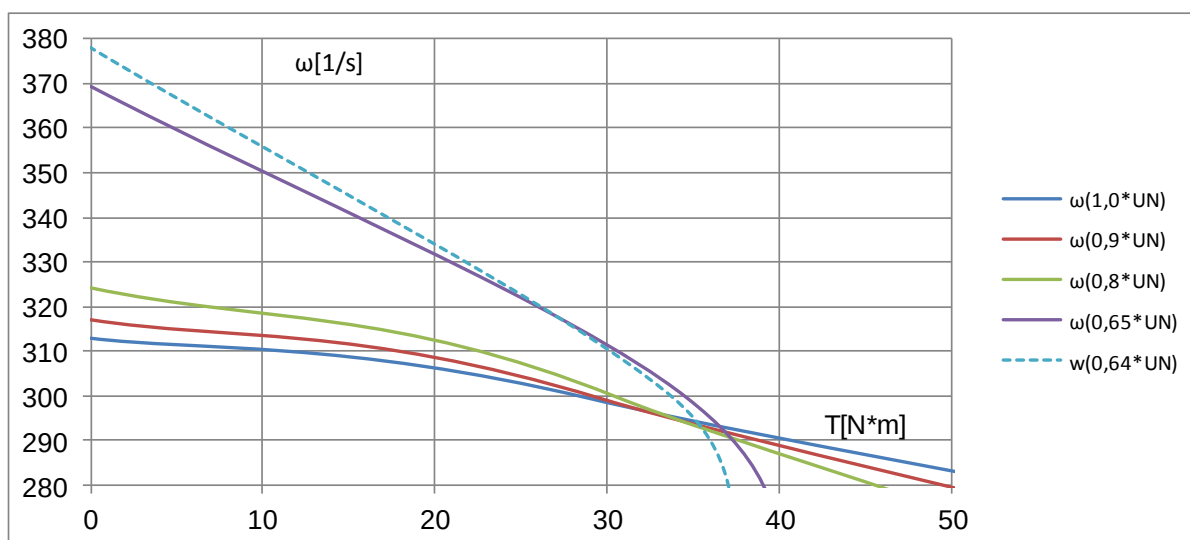
$$L'_{\sigma r} = \sigma(1-\sigma) \cdot L_s \quad (4.32)$$

$$T_e / T_{ke} = 2 / (\omega_m / \omega_{mk} + \omega_{mk} / \omega_m) = 2 / (s/s_k + s_k/s) \quad (4.33)$$

Otrzymane wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2.7a oraz w innej skali czasu na rysunku 2.7b .



Rys.2.7a. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego zasilanego z sieci, dla różnych napięć zasilania silnika u_s



Rys.2.7b. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego zasilanego bezpośrednio z sieci, dla różnych napięć zasilania silnika u_s – inna skala

Powyższe wyniki należy traktować jako szacunkowe, ze względu na przyjęte założenia dotyczące R_s oraz zastosowanie wzoru Klossa.

Przykładowo wg dokładnych równań [2.16] - [2.28] dla wartość napięcia $0,64 \cdot U_N$ nie ma rozwiązania – nie uzyskano równości $u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = (0,64 \cdot u_s)^2$.

Stąd konieczność przeprowadzenia dokładniejszych symulacji.

Określono zależności $f_s = f(u_A)$, $I_s = f(u_A)$, $\Psi_s = f(u_A)$, $\Psi_r = f(u_A)$ dla obciążenia znamionowego oraz obciążenia 60% przedstawione w tabeli 4.3 (dla $T_L=100\%T_N$), tabeli 4.4 (dla $T_L=60\%T_N$) oraz na rysunku 2.8 i rysunku 2.9.

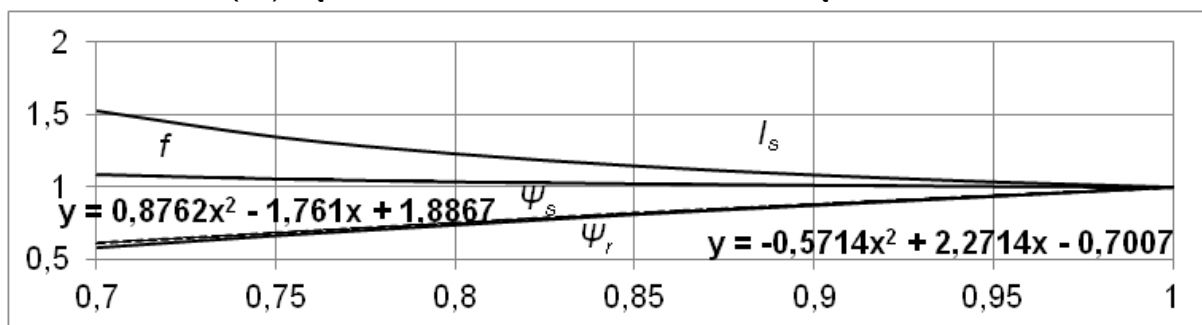
Tab.4.3.

$U_A[V]$	$I_s[A]$	$\Psi_r[V*s]$	$\Psi_s[V*s]$	$f_s[Hz]$	u_A	I_s	Ψ_r	Ψ_s	f_s
400,00	11,23	0,96	1,00	50,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
380,00	11,64	0,90	0,94	50,30	0,95	1,04	0,94	0,94	1,01
360,00	12,17	0,84	0,88	50,70	0,90	1,08	0,88	0,88	1,01
340,00	12,87	0,78	0,82	51,20	0,85	1,15	0,81	0,82	1,02
320,00	13,80	0,71	0,75	51,80	0,80	1,23	0,74	0,75	1,04
300,00	15,10	0,64	0,68	52,80	0,75	1,34	0,67	0,68	1,06
280,00	17,10	0,56	0,61	54,30	0,70	1,52	0,58	0,61	1,09

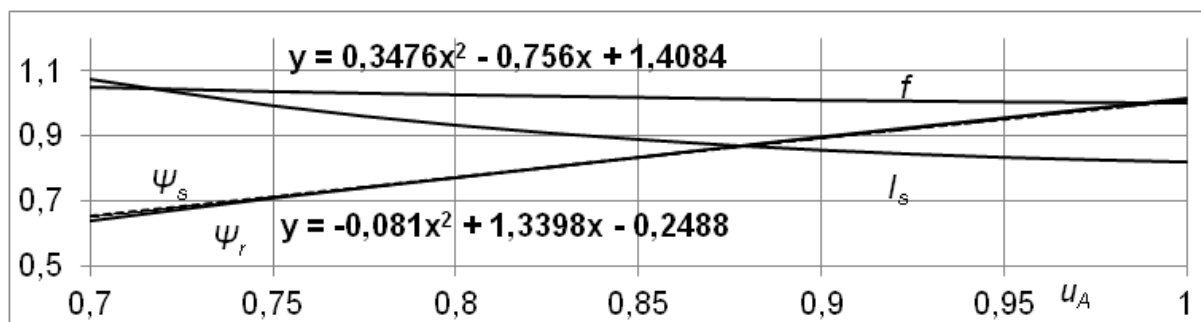
Tab.4.4.

$U_A[V]$	$I_s[A]$	$\Psi_r[V*s]$	$\Psi_s[V*s]$	$f_s[Hz]$	u_A	I_s	Ψ_r	Ψ_s	f_s
400,00	9,20	0,97	1,01	50,00	1,00	0,82	1,01	1,01	1,00
380,00	9,36	0,92	0,95	50,20	0,95	0,83	0,95	0,95	1,00
360,00	9,61	0,86	0,89	50,45	0,90	0,86	0,90	0,89	1,01
340,00	9,98	0,80	0,83	50,90	0,85	0,89	0,83	0,83	1,02
320,00	10,47	0,74	0,77	51,30	0,80	0,93	0,77	0,77	1,03
300,00	11,14	0,68	0,71	51,80	0,75	0,99	0,71	0,71	1,04
280,00	12,05	0,61	0,65	52,50	0,70	1,07	0,64	0,65	1,05

Zależności $f_s = f(u_A)$ są mocno zależne od momentu obciążenia.



Rys.2.8. Zależności $f_s = f(u_A)$, $I_s = f(u_A)$, $\Psi_s = f(u_A)$, $\Psi_r = f(u_A)$ dla obciążenia znamionowego



Rys.2.9. Zależności $f_s = f(u_A)$, $i_s = f(u_A)$, $\psi_s = f(u_A)$, $\psi_r = f(u_A)$ dla obciążenia 60% znamionowego

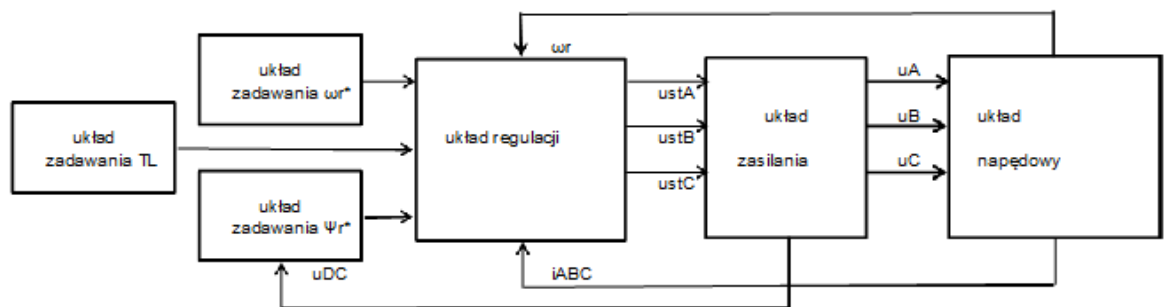
Powyższe analizy miały zadanie wstępne określenie czy zmieniając parametry sieci zasilającej (amplituda i częstotliwość) można w pewnym zakresie zapewnić potrzebny moment obrotowy i tym samym utrzymać zadane obroty silnika.

2.2. Propozycja układu regulacji i sterowania układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika

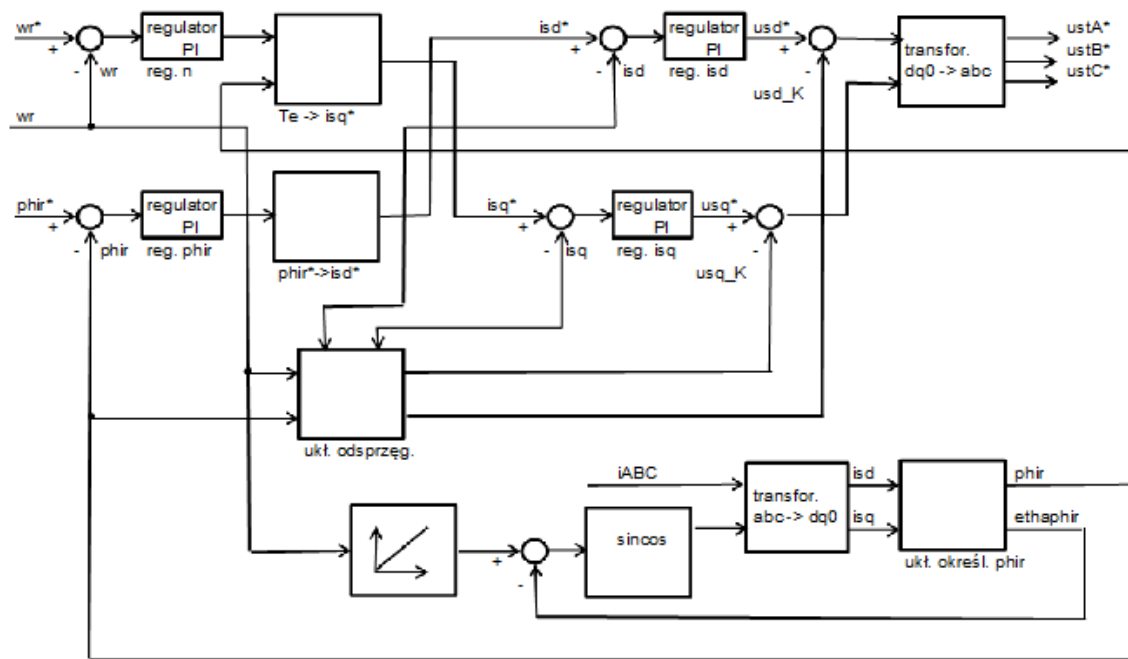
Dla rozpatrywanego układu elektromechanicznego (rysunek 2.10), w oparciu o literaturę [6], [11], [17], [18], [19], [33], [41], [44], [68], [69], [70], [71], [82], [85], zaproponowano układ regulacji przedstawiony na rysunku 2.12.

Układ składa się z następujących bloków:

- zadawania prędkości ω_m^* ,
- zadawania strumienia Ψ_r^* ,
- zadawania momentu obciążenia T_L ,
- układu regulacji,
- układu zasilania,
- silnika indukcyjnego.



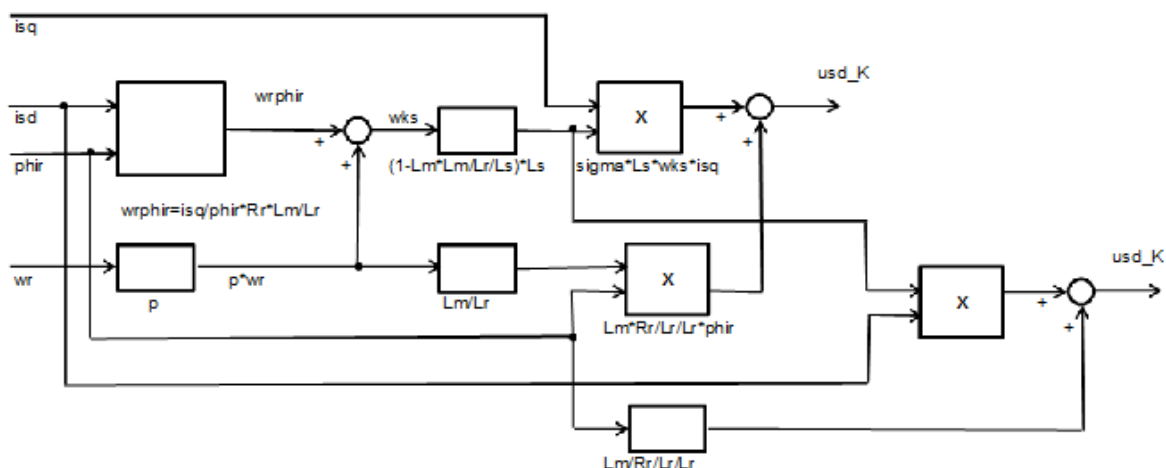
Rys.2.10. Model układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika



Rys.2.11. Układ regulacji i sterowania wraz z transformacją napięć zadanych dq0 - abc oraz abc - dq0 prądów stojana

Układ regulacji zawiera m.in. regulatory prądów i_{sd} , i_{sq} , regulator predkości oraz regulator strumienia przedstawiono na rysunku 2.11.

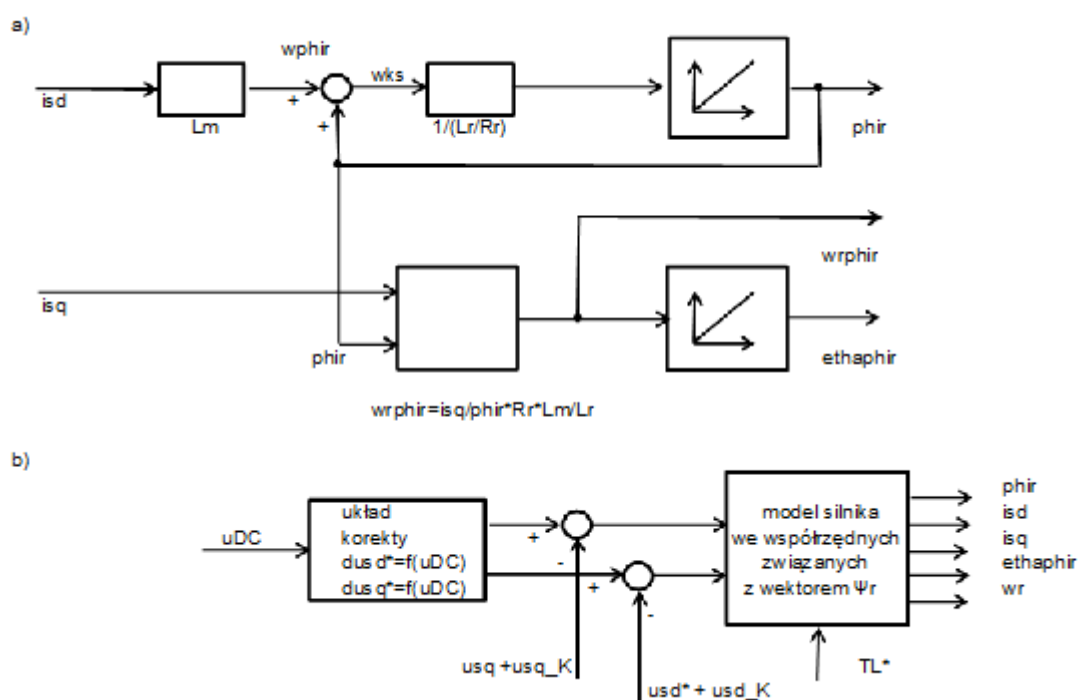
W celu ułatwienia doboru parametrów regulatorów prądów i_{sd} , i_{sq} dokonano linearyzacji układu regulacji prądów przez zastosowanie układu odsprężenia (rysunek 2.12).



Rys.2.12. Układ linearyzacji i dobór parametrów regulatorów prądu i_{sd} oraz i_{sq}

Dla odwzorowania wymaganych do układu regulacji sprzężeń zwrotnych strumienia Ψ_r , kąta θ oraz składowych prądów stojana i_{sd} oraz i_{sq} zaproponowano dwie możliwości:

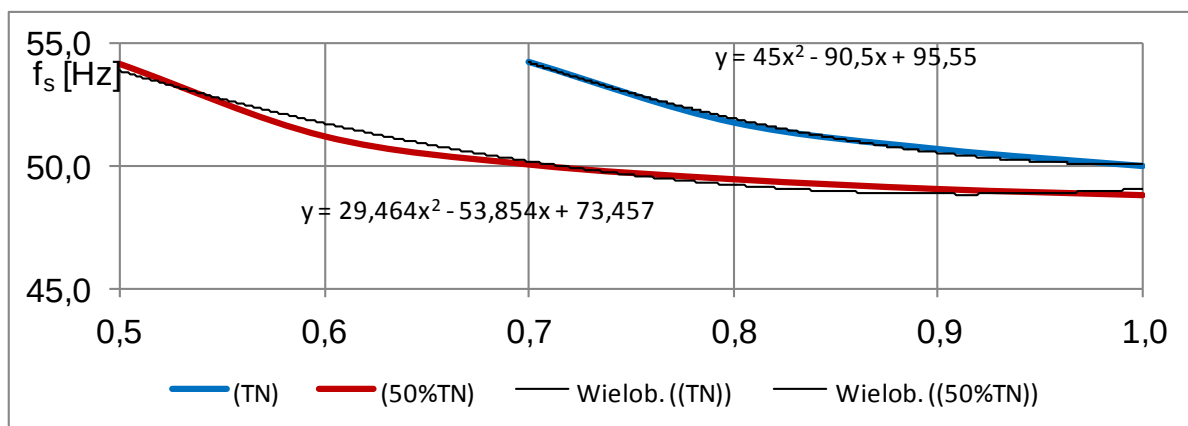
- przedstawione w literaturze [4], [44], [69] (rysunek 2.13a) oraz
- zaproponowane przez autora pracy wykorzystanie równoległego modelu silnika z korektą napięć u_{sd} oraz u_{sq} w funkcji napięcia u_{DC} (rysunek 2.13b) .



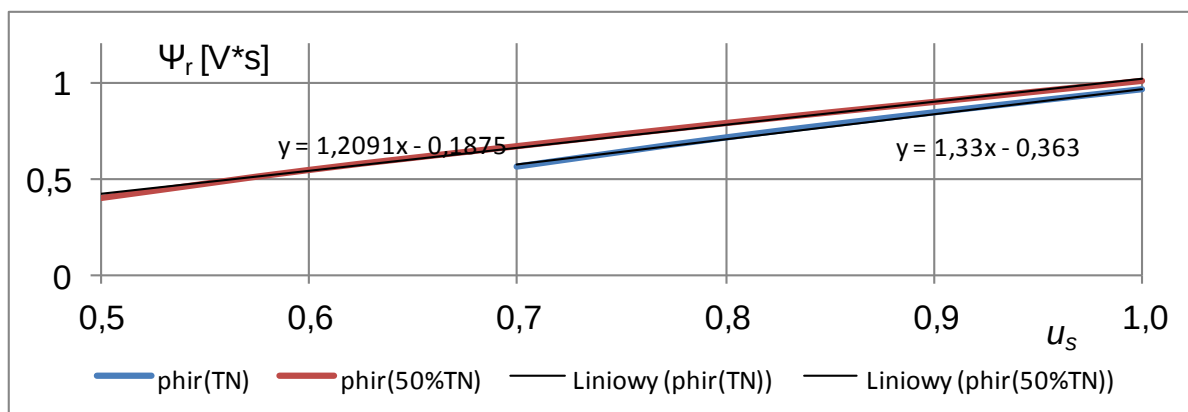
Rys.2.13. Określenie wielkości sprzężeń zwrotnych

Korektę napięć ustalono w oparciu o obliczenia dla silnika indukcyjnego wg załącznika 1 następujących zależności: $f_s = f(u_s)$, $\Psi_r = f(u_s)$, $i_s = f(u_s)$, $i_{sd} = f(u_s)$, $i_{sq} = f(u_s)$, $u_{sd} = f(u_s)$, $u_{sq} = f(u_s)$, przy założeniu stałej prędkości ω_m , dla obciążenia 50% oraz 100% (rysunek 2.14) .

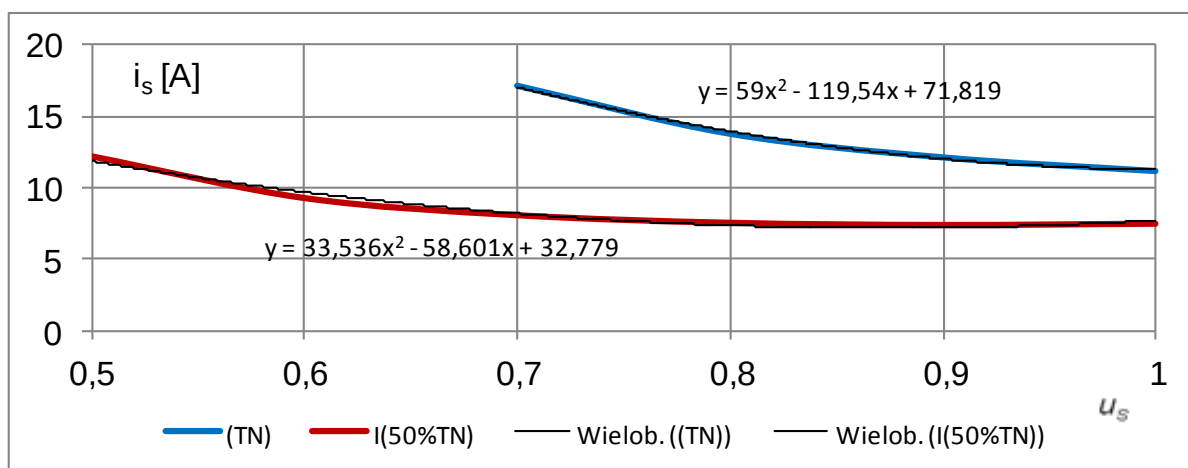
a)



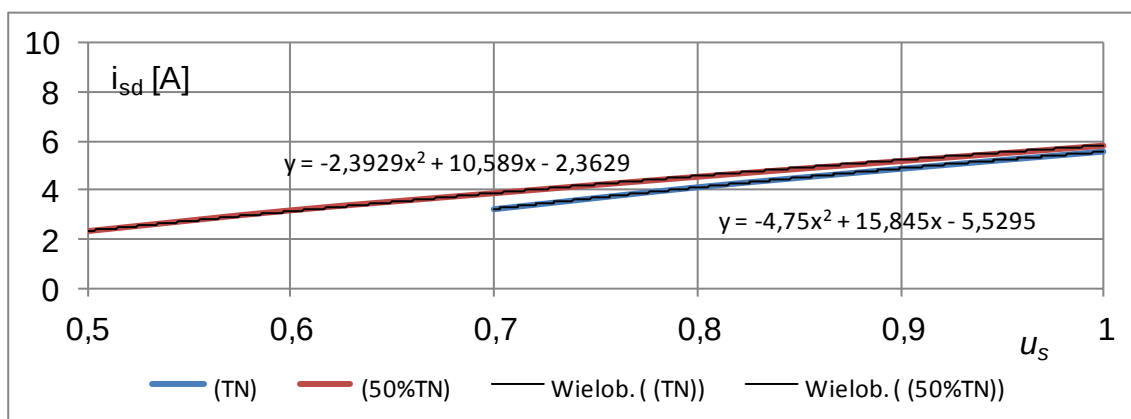
b)



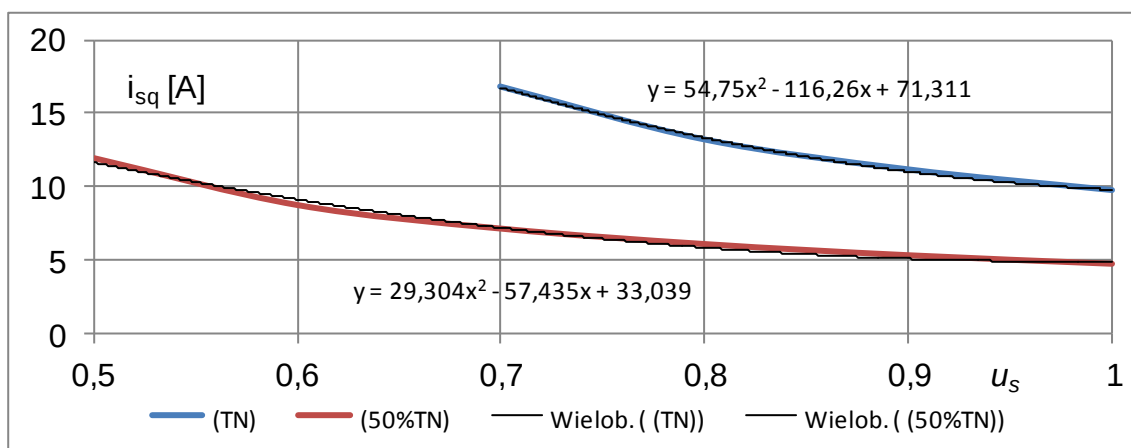
c)



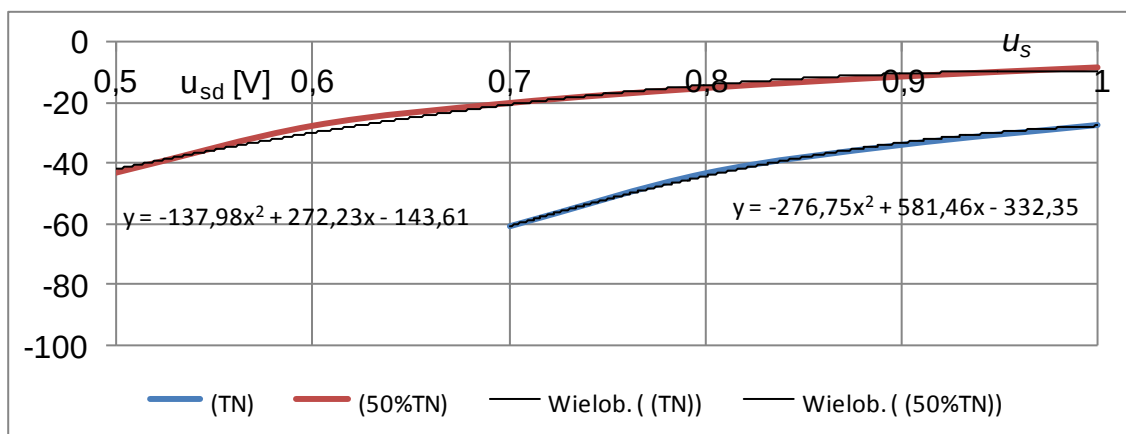
d)



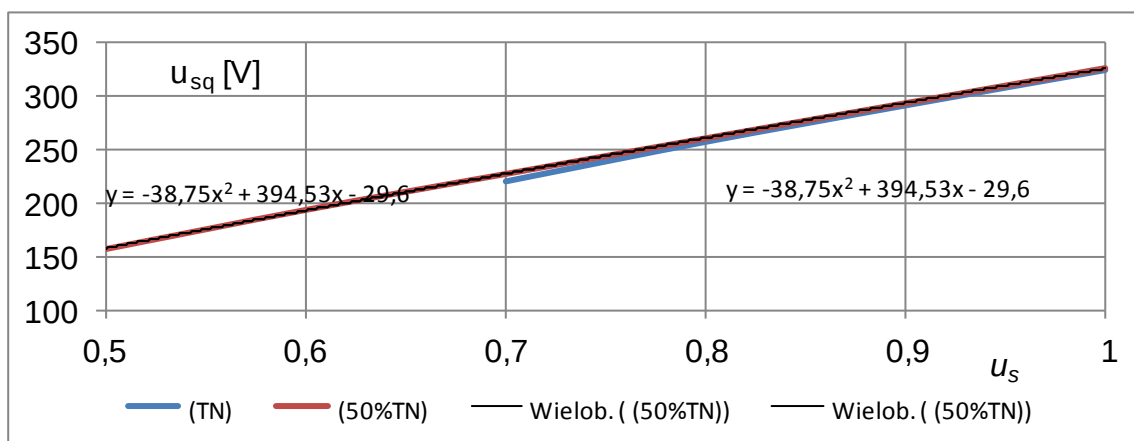
e)



f)



g)



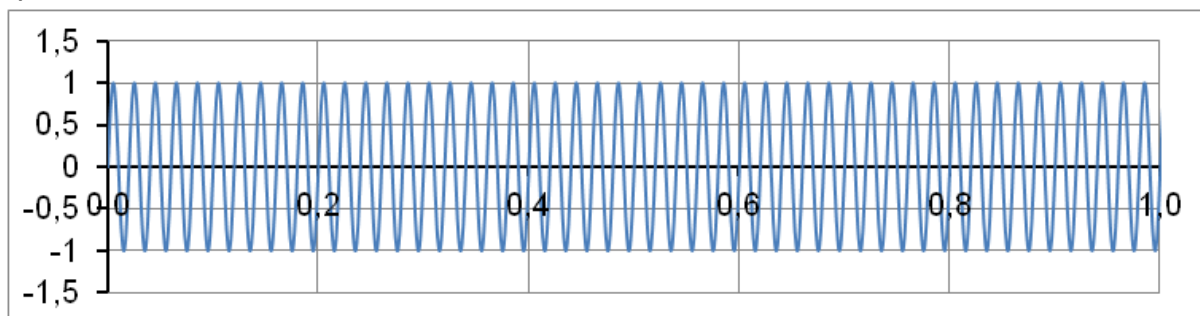
Rys.2.14. Zależności $f_s = f(u_s)$, $\Psi_r = f(u_s)$, $i_s = f(u_s)$, $i_{sd} = f(u_s)$, $i_{sq} = f(u_s)$, $u_{sd} = f(u_s)$, $u_{sq} = f(u_s)$ dla silnika indukcyjnego, przy założeniu stałej prędkości ω_m , dla obciążenia 50% oraz 100% obciążenia znamionowego.

2.3. Badania symulacyjne, przy założeniu idealnego źródła napięcia

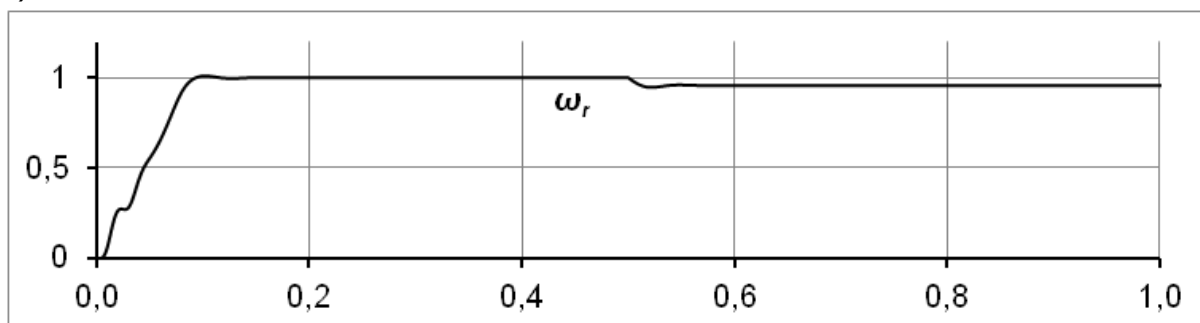
Celem sprawdzenia poprawności opracowanego modelu porównano zachowanie układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym w przypadku bezpośredniego zasilania z sieci oraz w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości sterowany wg zaproponowanego układu regulacji i sterowania.

Wyniki symulacji dla zasilania bezpośredniego przedstawiono na rysunkach 2.15 – 2.16, zaś dla zasilania przez idealne źródło napięcia (napięcie zasilające silnik jest proporcjonalne do sygnału wyjściowego regulatora) na rysunkach 2.17 - 2.22 .

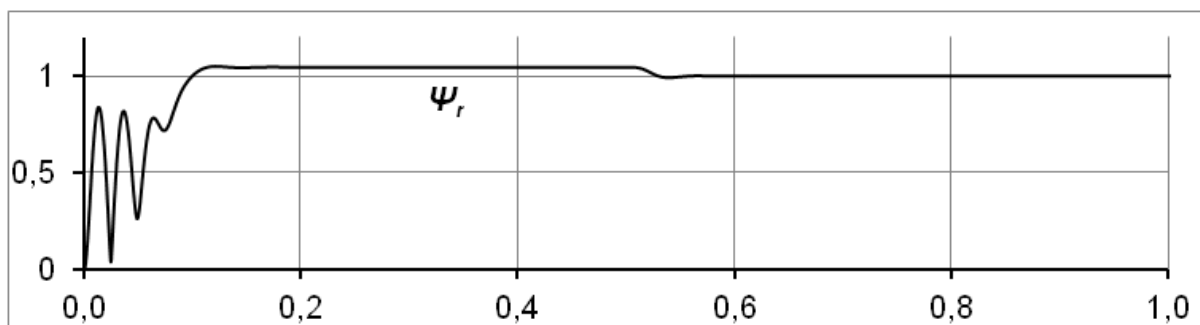
a)



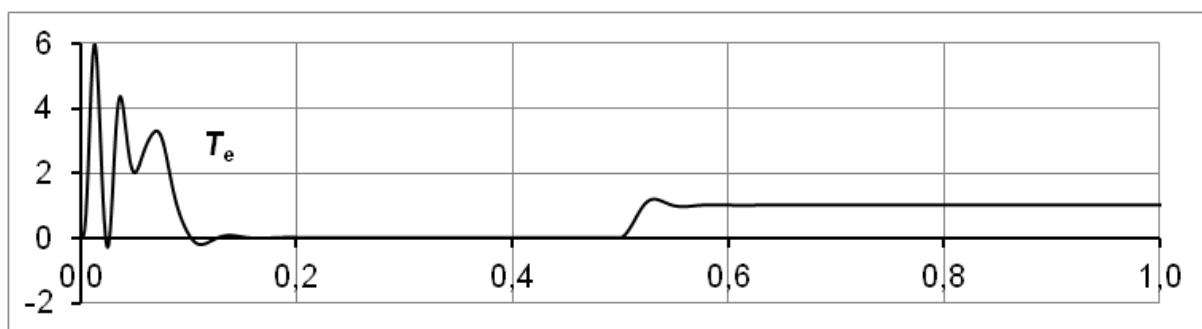
b)



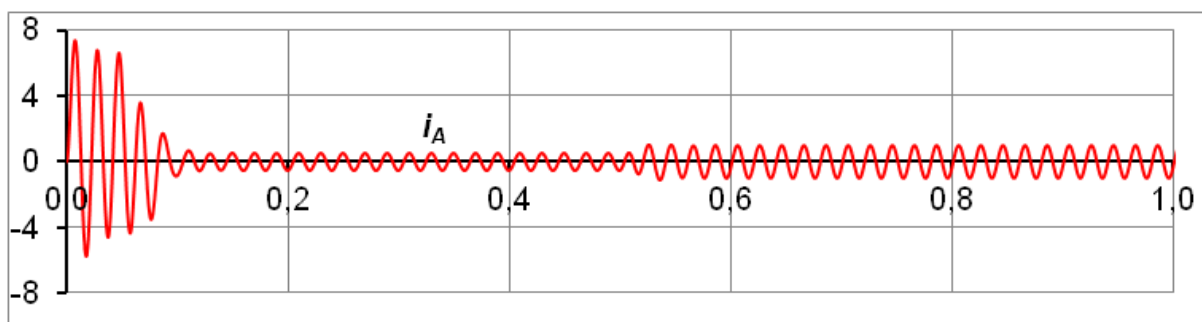
c)



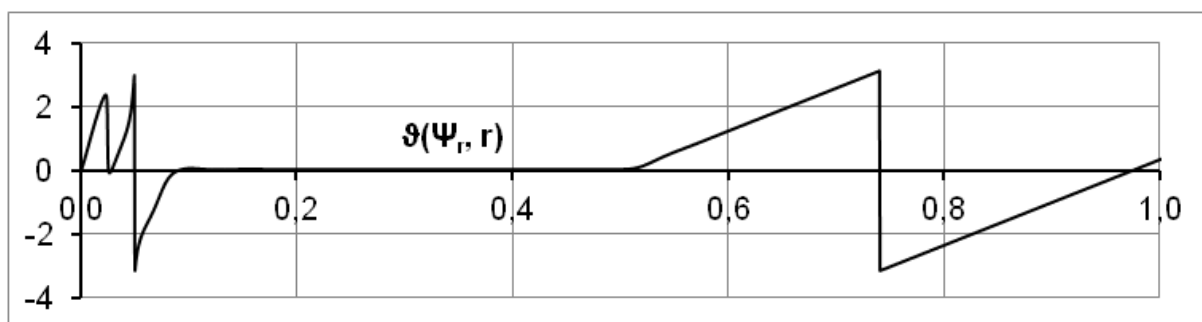
d)



e)

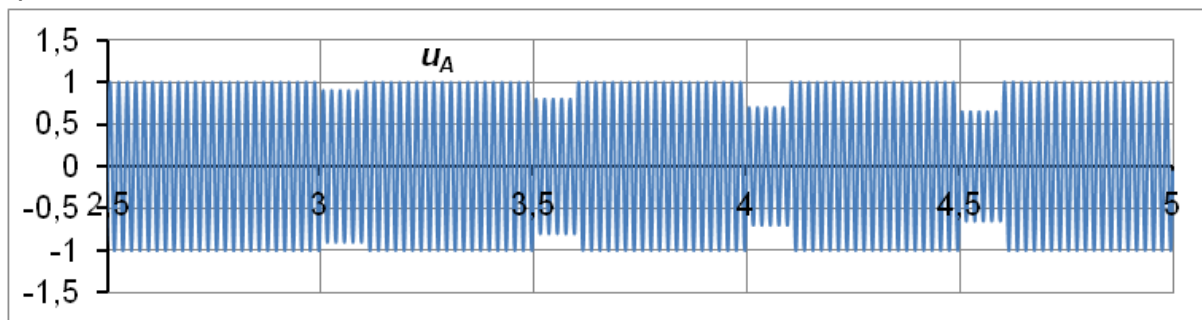


f)

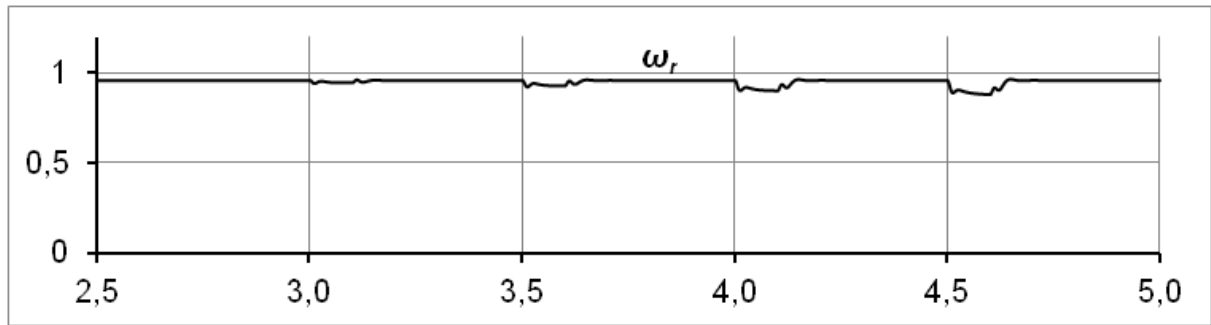


Rys.2.15. Przebiegi u_A , ω_r , Ψ_r , i_A , $\vartheta(\Psi_r, r)$ z silnikiem indukcyjnym bezpośrednio zasilanym z sieci, podczas rozruchu

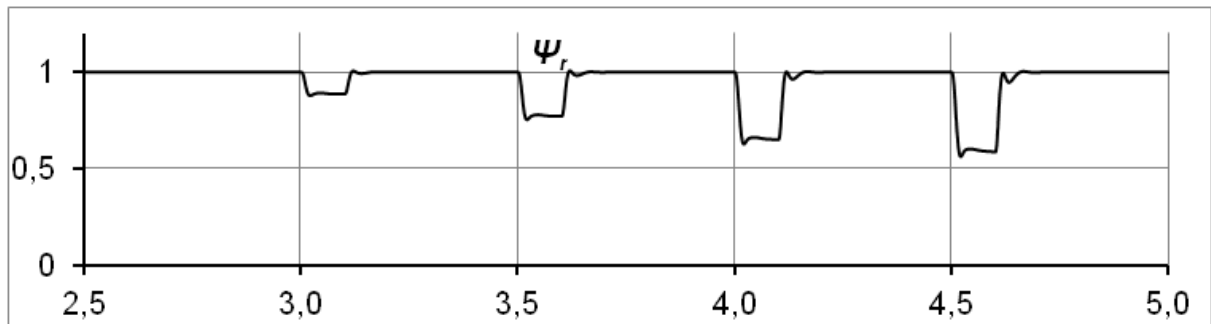
a)



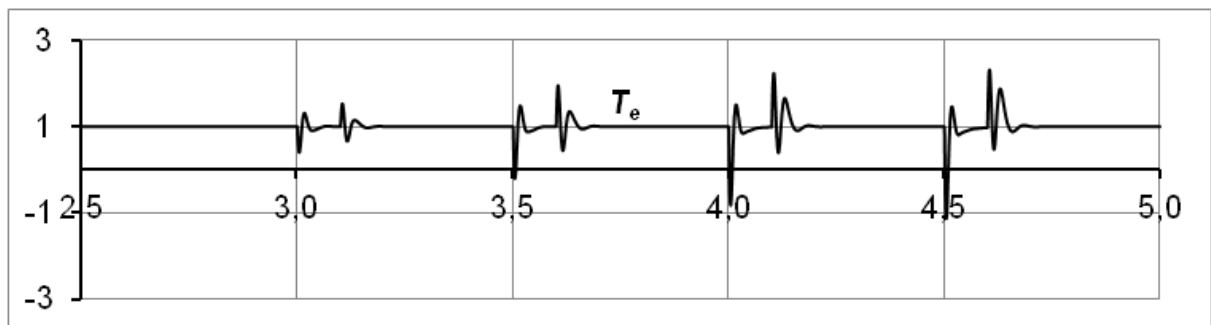
b)



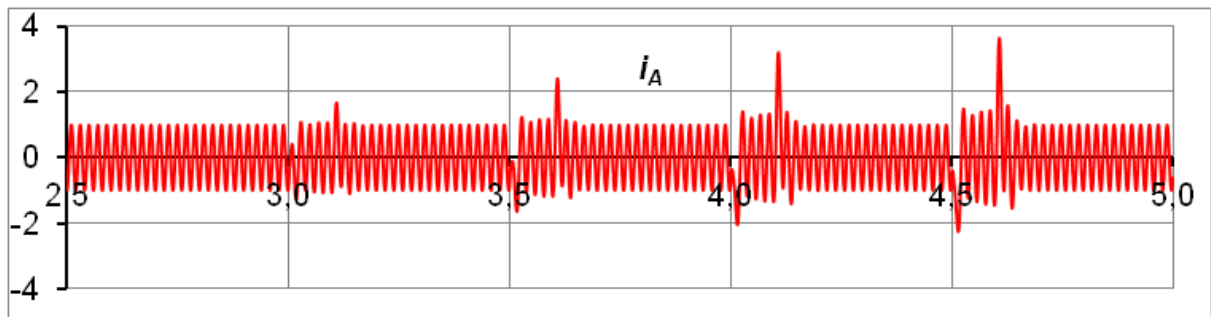
c)



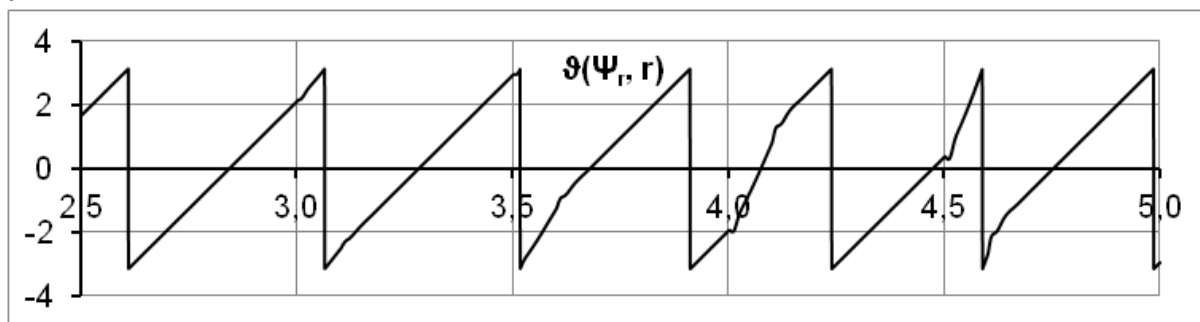
d)



e)

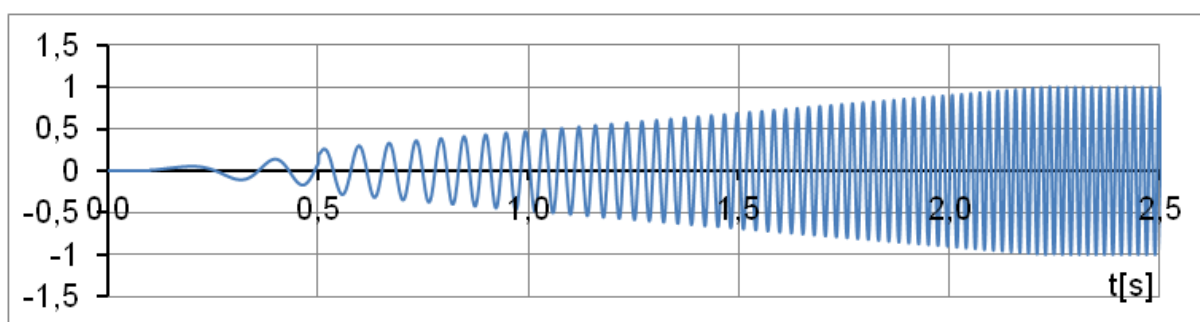


f)

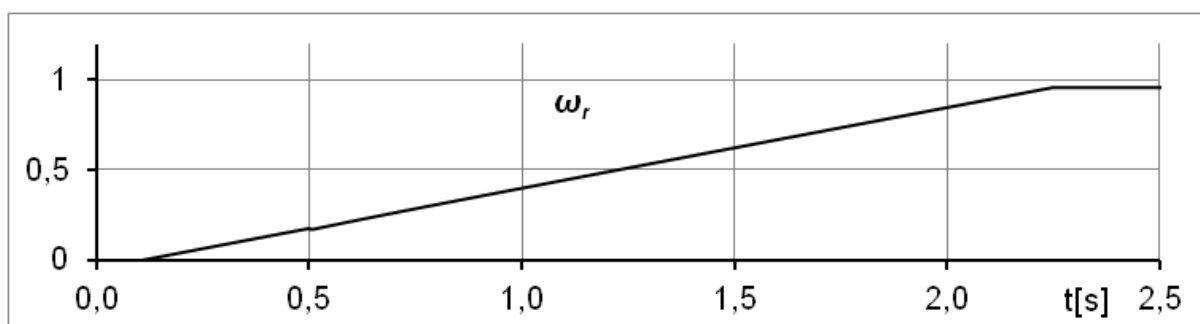


Rys.2.16. Przebiegi u_A , ω_r , Ψ_r , i_A , $\vartheta(\Psi_r, r)$ z silnikiem indukcyjnym bezpośrednio zasilanym z sieci, podczas zapadów napięcia typu A

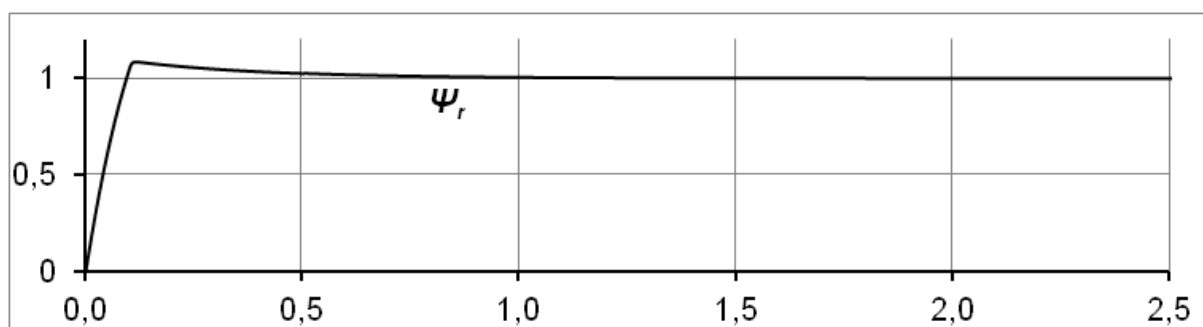
a)



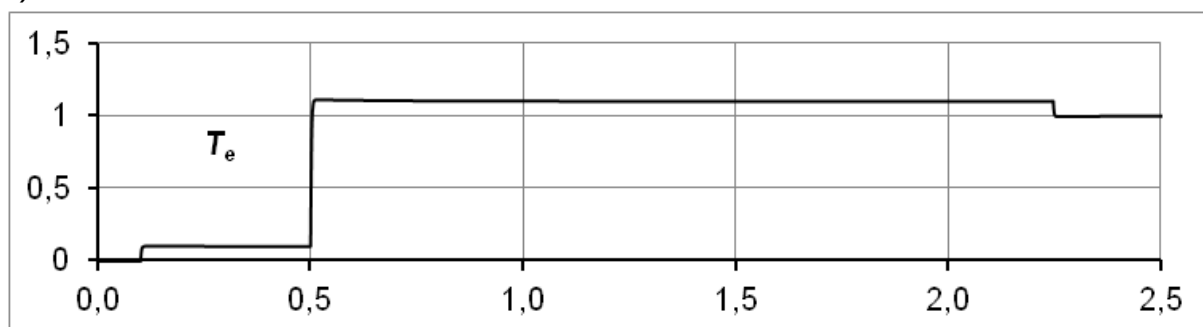
b)



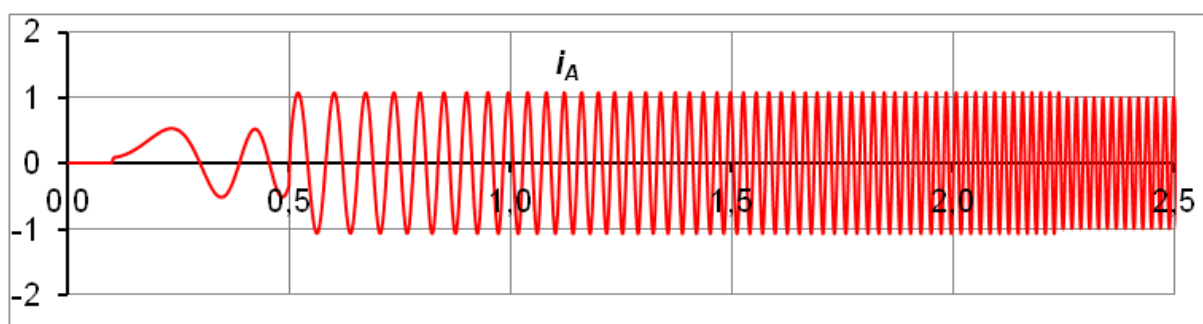
c)



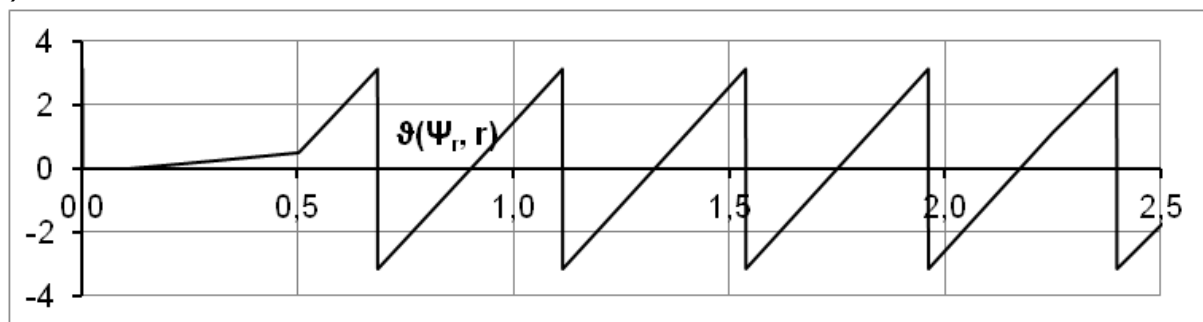
d)



e)

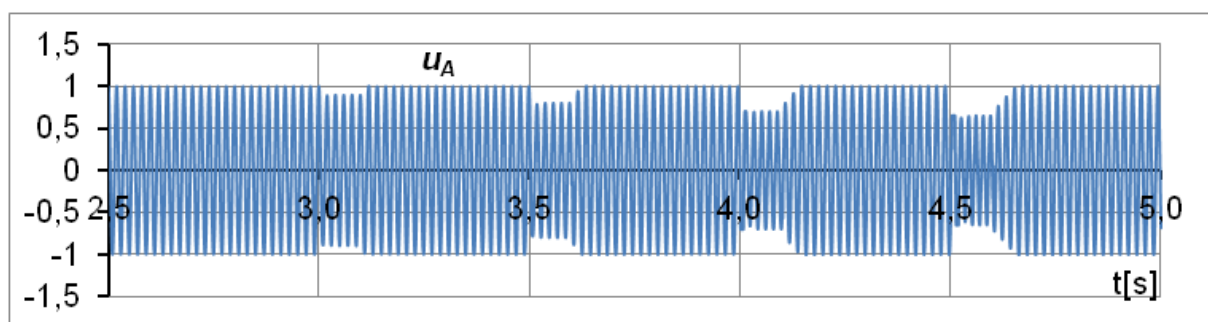


f)

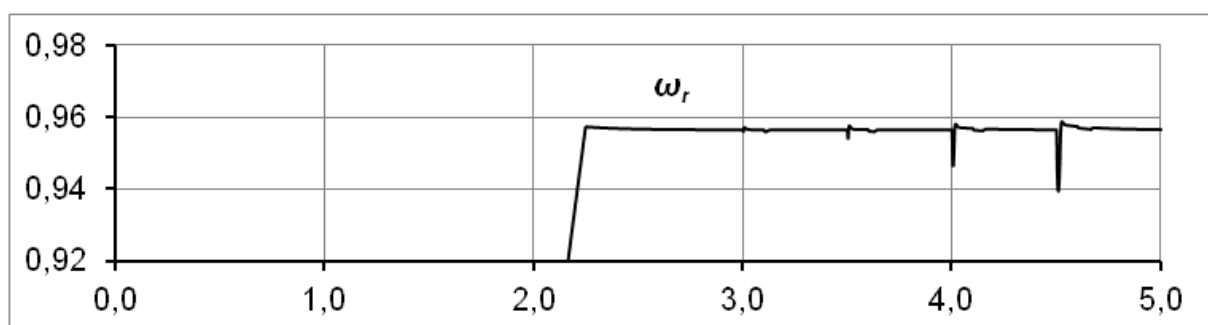


Rys.2.17. Przebiegi u_A , ω_r , ψ_r , i_A , $\theta(\psi_r, r)$ z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez idealne źródło napięciowe, podczas rozruchu

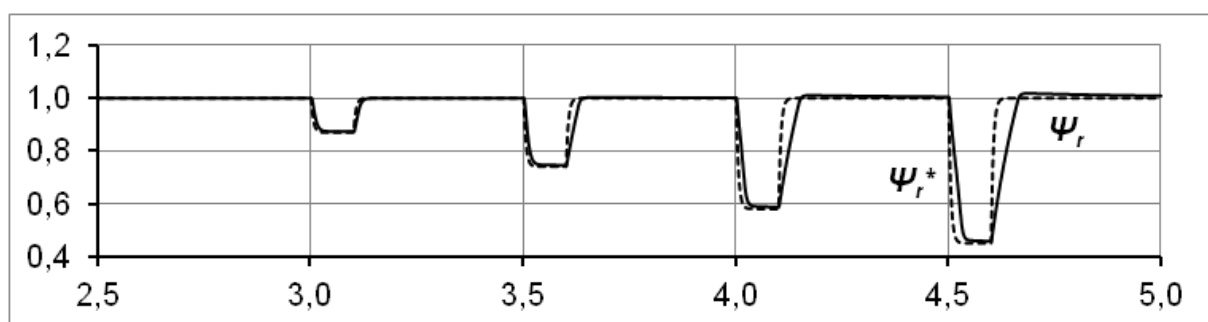
a)



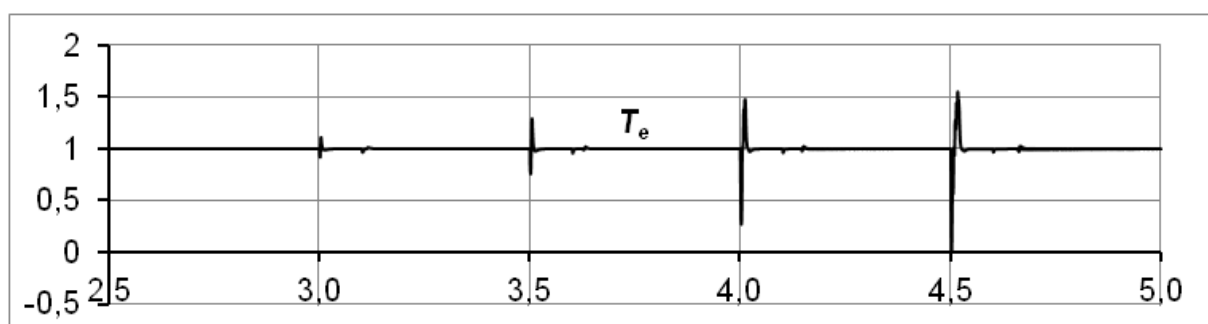
b)



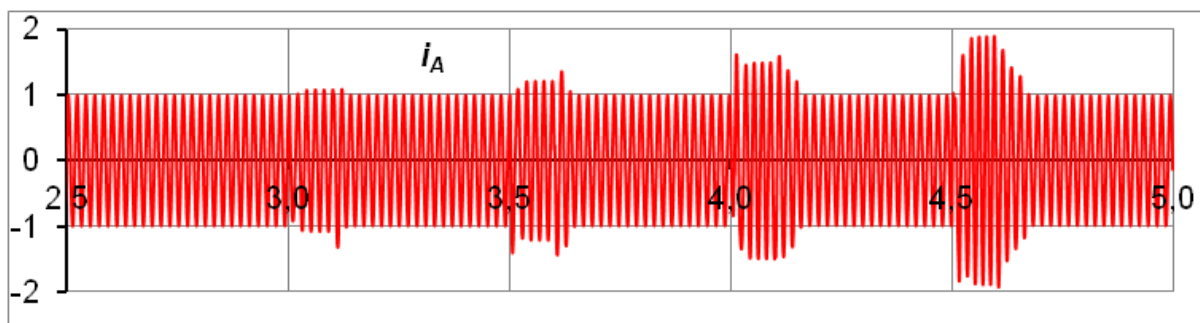
c)



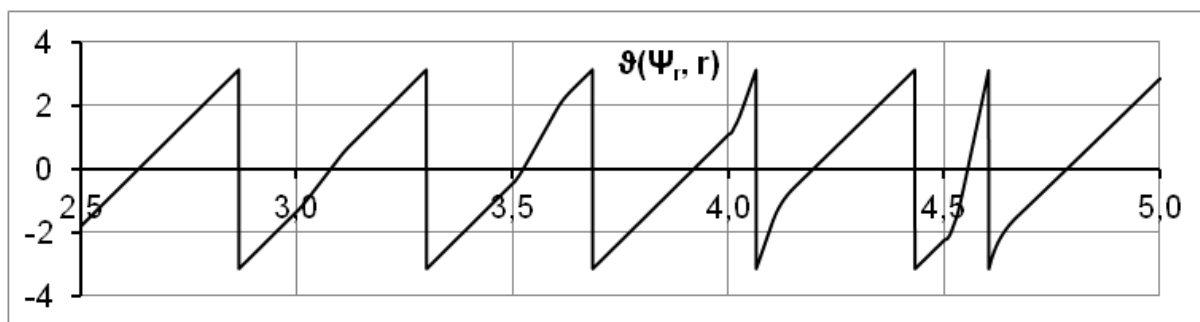
d)



e)

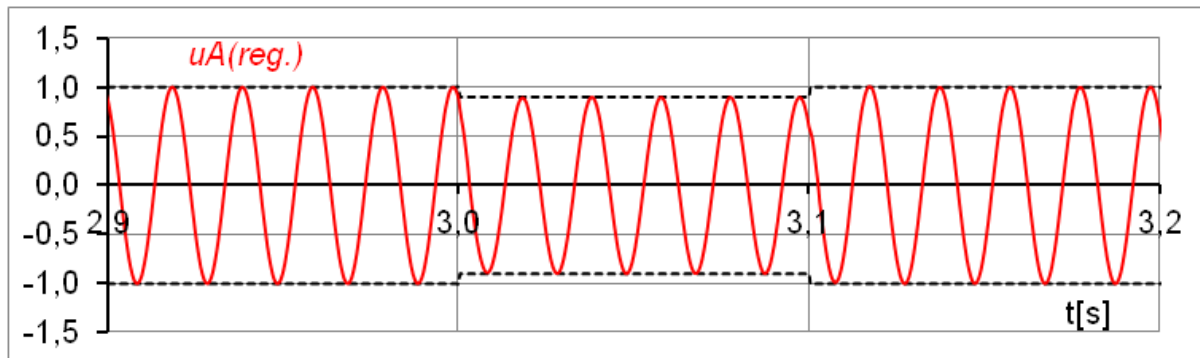


f)

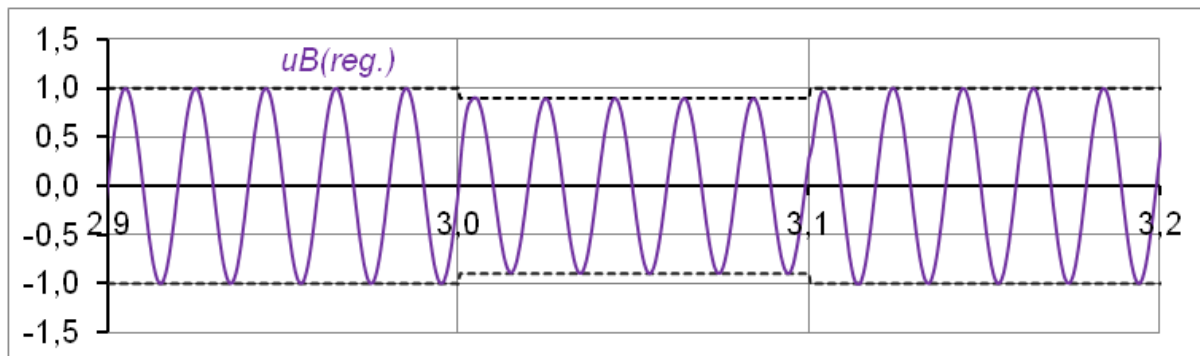


Rys.2.18. Przebiegi u_A , ω_r , Ψ_r , i_A , $\vartheta(\Psi_r, r)$ z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez idealne źródło napięciowe, podczas zapadów napięcia typu A. Wartość Ψ_r^* wg skorygowanej funkcji amplitudy napięcia zasilania

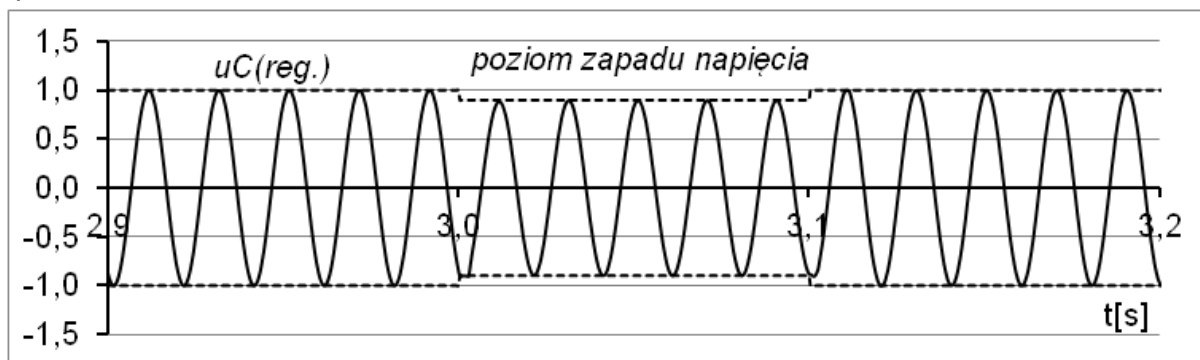
a)



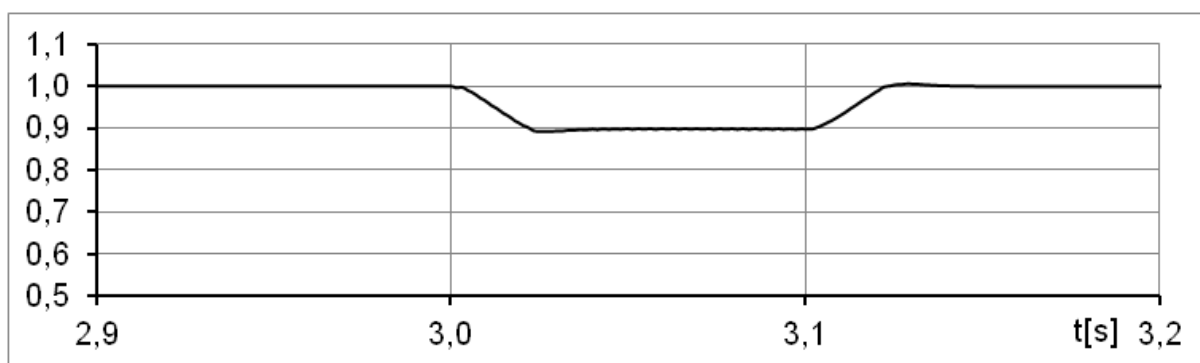
b)



c)



d)

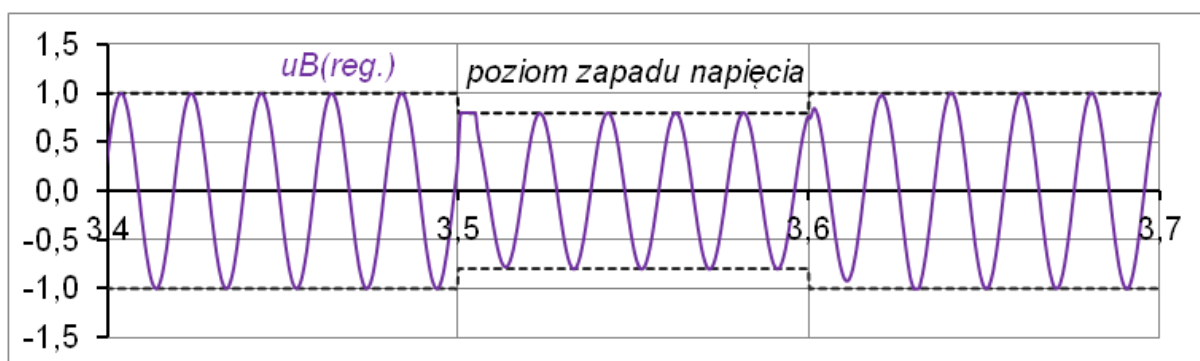


Rys.2.19. Przebiegi u_A , u_B , u_C , u_{DC} układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez idealne źródło napięciowe, podczas zapadów napięcia typu A 90%. Wartość Ψ_r^* wg skorygowanej funkcji amplitudy napięcia zasilania

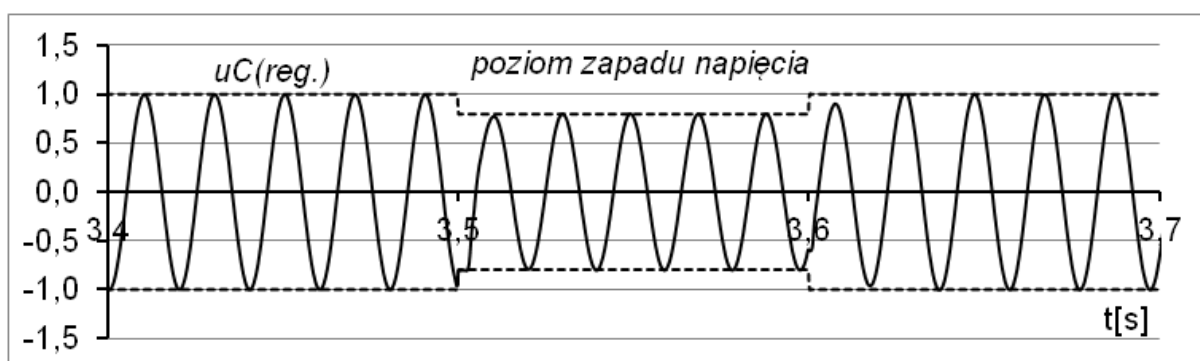
a)



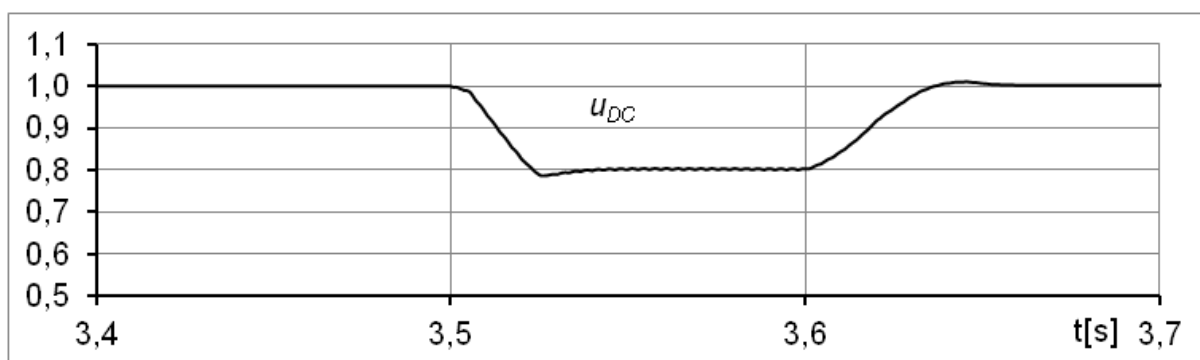
b)



c)



d)

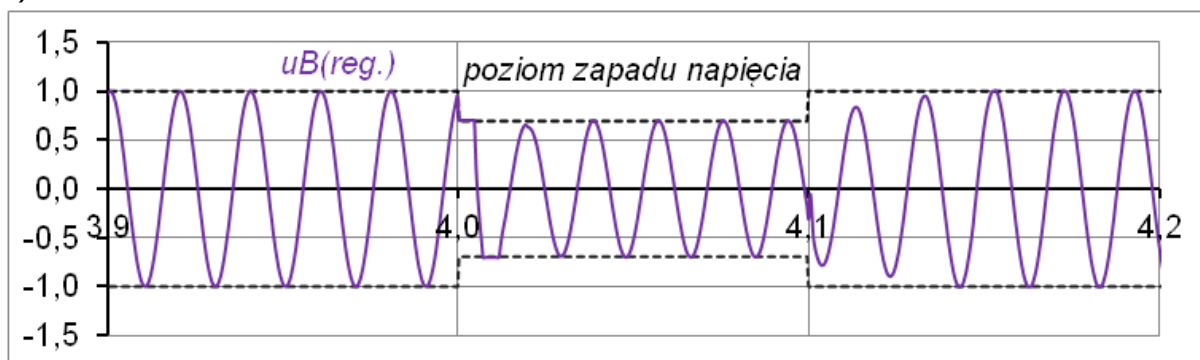


Rys.2.20. Przebiegi u_A , u_B , u_C , u_{DC} układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez idealne źródło napięciowe, podczas zapadów napięcia typu A 80%. Wartość Ψ_r^* wg skorygowanej funkcji amplitudy napięcia zasilania

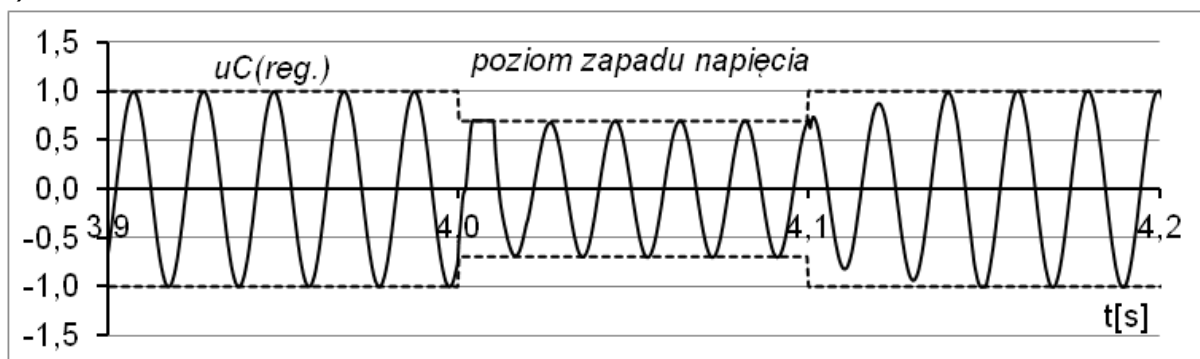
a)



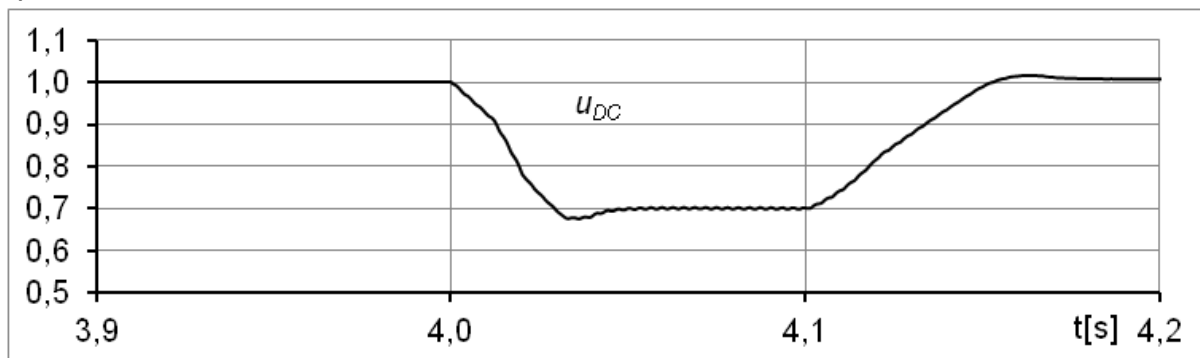
b)



c)



d)

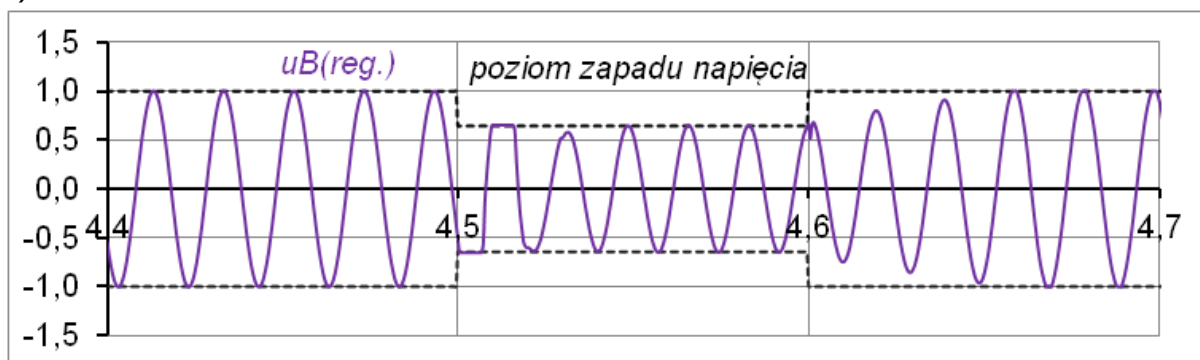


Rys.2.21. Przebiegi u_A , u_B , u_C , u_{DC} układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez idealne źródło napięciowe, podczas zapadów napięcia typu A 70%. Wartość Ψ_r^* wg skorygowanej funkcji amplitudy napięcia zasilania

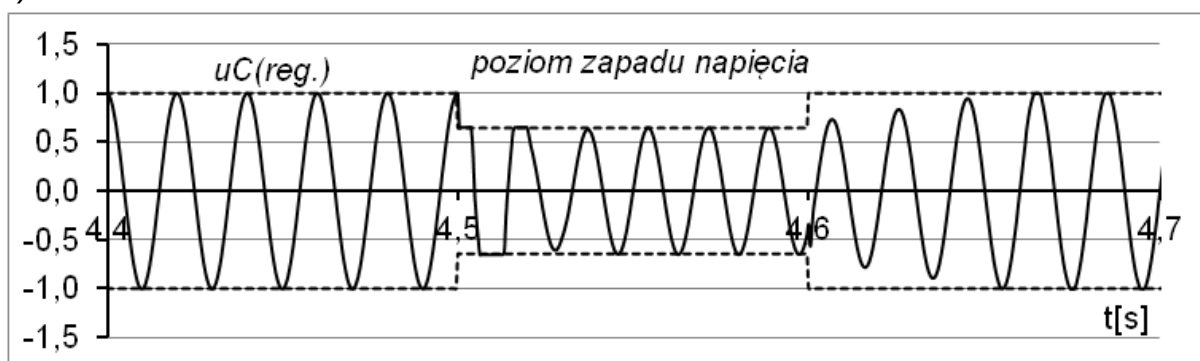
a)



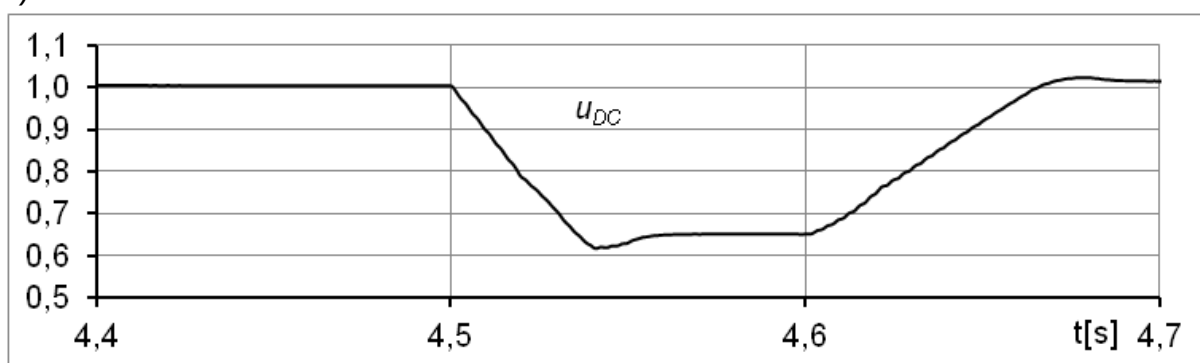
b)



c)



d)

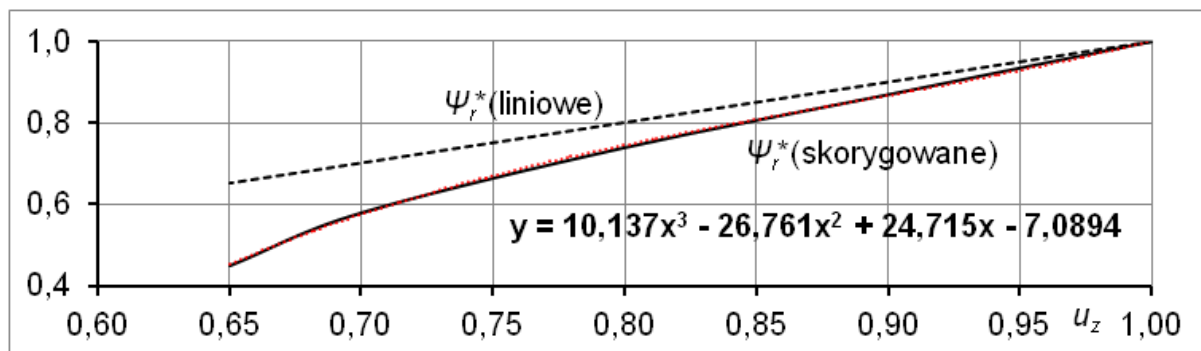


Rys.2.22. Przebiegi u_A , u_B , u_C , u_{DC} układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez idealne źródło napięciowe, podczas zapadów napięcia typu A 65%. Wartość Ψ_r^* wg skorygowanej funkcji amplitudy napięcia zasilania

Analizę przeprowadzono dla silnika indukcyjnego wg załącznika 1.

Określenie zależności $u_z = f(\Psi_r)$ dla warunków znamionowych $T_L = T_N$ oraz $\omega_r^* = \omega_N^*$ przedstawiono na rysunku 2.23, dla dwóch wariantów zadawania strumienia Ψ_r^* :

- liniowo zależny od napięcia zasilania,
- skoordynowany tzn. wartość zadana obniża się dodatkowo, tak aby uzyskać lepsze własności dynamiczne układu elektromechanicznego, m.in. mniejszy uchyb prędkości podczas wystąpienia zapadu napięcia oraz by napięcie regulowane nie przekroczyło aktualnej wartości napięcia zdeterminowanej warunkami zapadu.



Rysunku 2.23. Wartość zadana Ψ_r^* skorygowana tak by napięcie zasilania nie przekraczało napięcia sieci podczas zapadów napięcia. Wartość Ψ_r^* wg skorygowanej funkcji amplitudy napięcia zasilania

Wnioski.

Przeprowadzono symulacje przy idealnym źródle napięciowym, tj. przyjęto, że wartość napięcia zasilania silnika jest proporcjonalna do wartości napięć zadanych U_{stABC} .

Potwierdzono skuteczność metody w układzie wyidealizowanym dla przypadku zapadów napięcia na poziomie 90%, 80%, 70% oraz 65%.

Zastosowanie idealnego źródła napięcia pozwoliło określić maksymalnie możliwości reakcji układu regulacji w sytuacji zapadu napięcia, celem podtrzymania momentu obrotowego silnika i tym samym zapewnienie wymaganej prędkości obrotowej.

2.4. Badania symulacyjne - przy uwzględnieniu zapadu napięcia sieci zasilającej oraz przemiennika częstotliwości VSI (PMW) - dla zapadów napięcia typu A – G oraz przerw w zasilaniu

Podczas badań symulacyjnych określono reakcje układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym zasilanym przez przemiennik częstotliwości VSI, na zapady napięcia typu A – G oraz przerwy w zasilaniu P.

Porównano następujące przypadki zasilania i sterowania:

0 - bezpośrednie zasilanie z sieci,

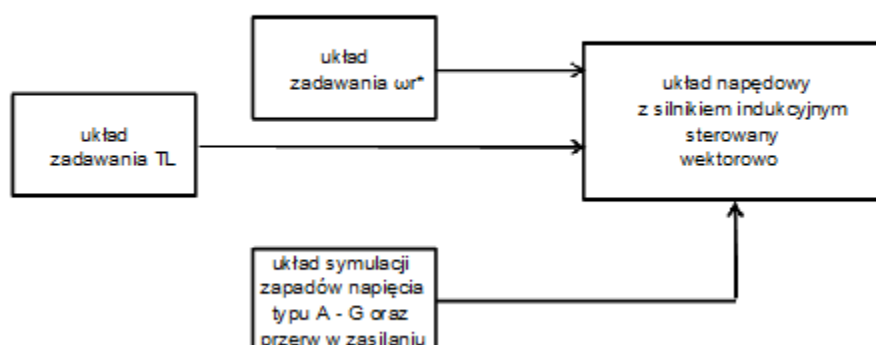
1 - zadawanie $u_s/f_s = f(u_{DC})$,

4 - zadawanie $\psi_r^* = f(u_{DC})$,

Przypadek 1 dotyczy sterowania uproszczonego amplitudowo – częstotliwościowego funkcji poziomu napięcia zasilania.

Wyniki symulacji dla tego przypadku mają odpowiedzieć jak dalece można osiągnąć poprawę w utrzymaniu prędkości silnika podczas zapadu, bez zastosowania złożonego układu regulacji i sterowania w przypadku 4 .

Dla badań symulacyjnych zastosowano model przedstawiony na rysunku 2.24 .



Rys.2.24. Model układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wimika

Wyniki symulacji układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym w warunkach:

- zapadu napięcia typu A przedstawiono na rysunku 2.25 oraz rysunku 2.26,
- zapadu napięcia typu B przedstawiono na rysunku 2.27 oraz rysunku 2.28,

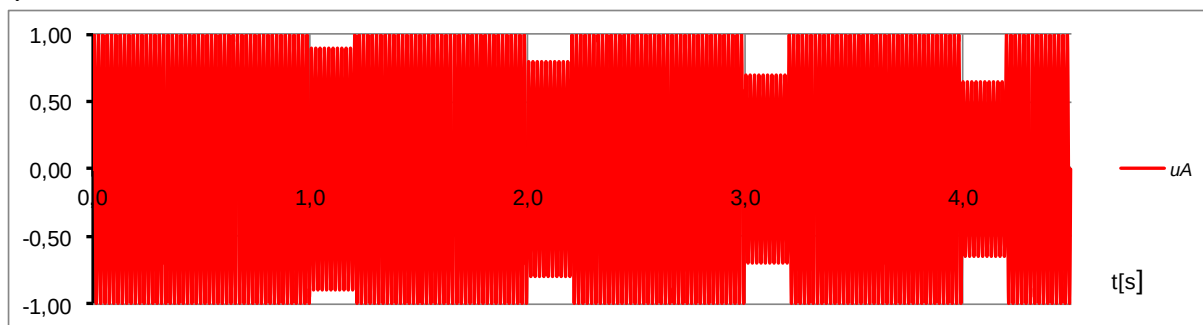
- zapadu napięcia typu C przedstawiono na rysunku 2.29 oraz rysunku 2.30,
- zapadu napięcia typu D przedstawiono na rysunku 2.31 oraz rysunku 2.32,
- zapadu napięcia typu E przedstawiono na rysunku 2.33 oraz rysunku 2.34,
- zapadu napięcia typu F przedstawiono na rysunku 2.35 oraz rysunku 2.36,
- zapadu napięcia typu G przedstawiono na rysunku 2.37 oraz rysunku 2.38,
- przerwy w zasilaniu P przedstawiono na rysunku 2.39 oraz rysunku 2.40 .

Dla przypadków 0, 1 oraz 4 porównano w warunkach zapadu napięcia oraz przerw w zasilaniu przebiegi czasowe następujących wielkości:

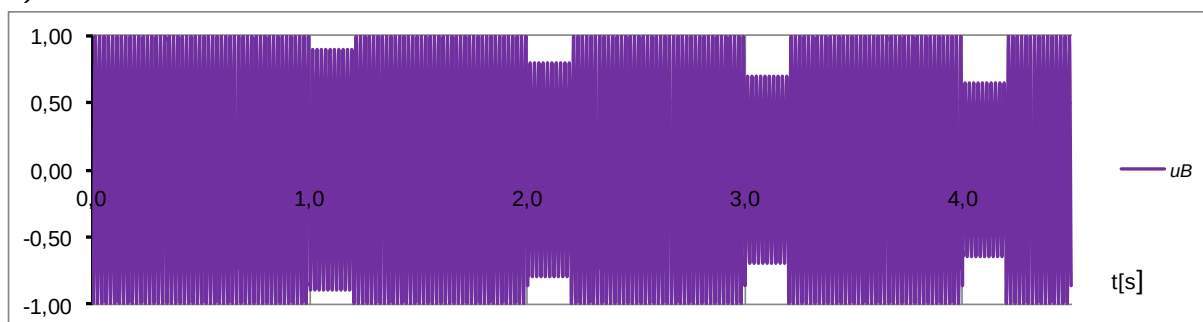
- a) napięcie zasilania przemiennika częstotliwości ,
- b) napięcie u_{DC} ,
- c) prędkości ω_m , w szczególności porównując prędkość przy zasilaniu bezpośrednim z sieci oraz przez przemiennik częstotliwości VSI,
- d) wartości skutecznej prądów silnika, w szczególności porównując wartości chwilowe prądów zasilania silnika przy zasilaniu bezpośrednio z sieci oraz przez przemiennik częstotliwości VSI,
- e) strumieni sprzężonych z uzwojeniem wirnika, w szczególności porównując wartości strumienia silnika przy zasilaniu bezpośrednio z sieci oraz przez przemiennik częstotliwości VSI.

2.4.1. Zapad napięcia typu A

a)



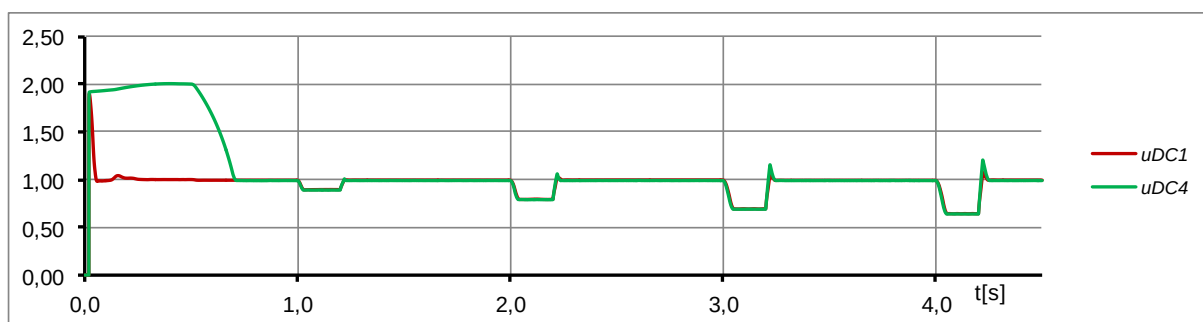
b)



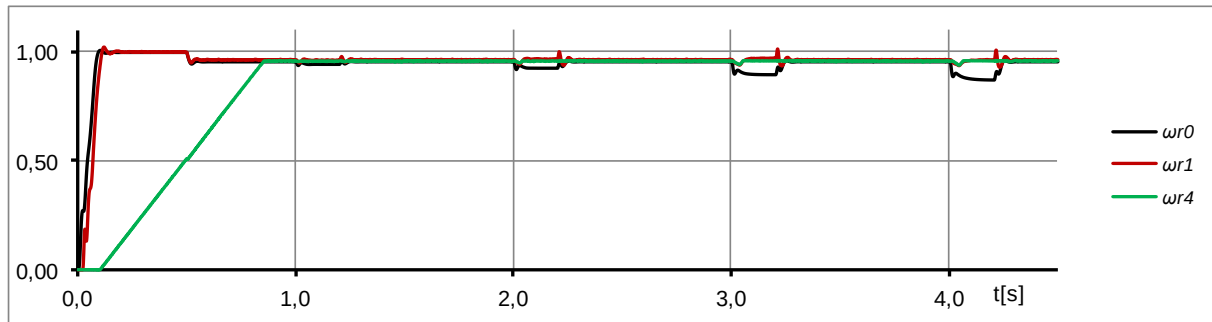
c)



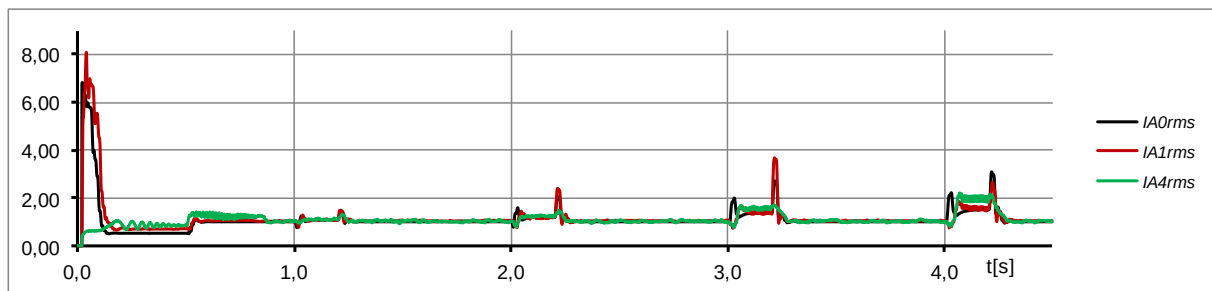
d)



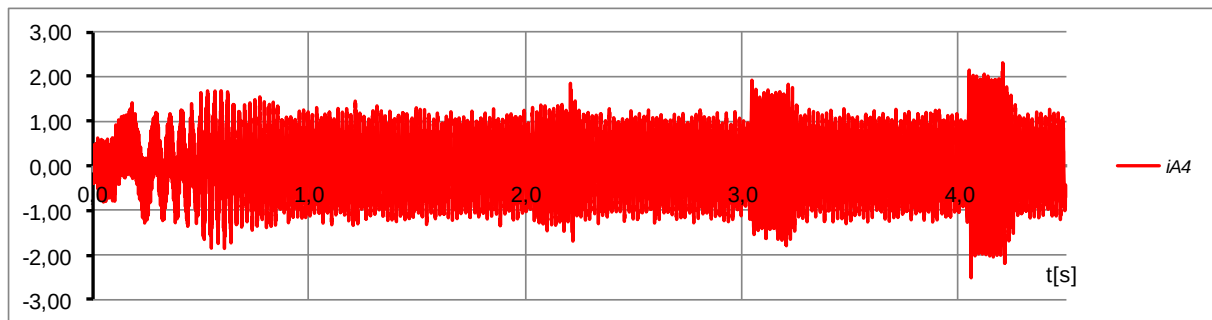
e)



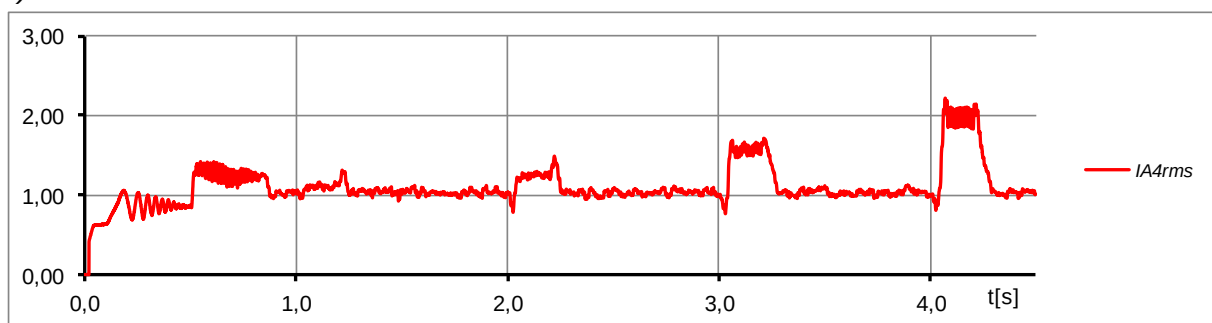
f)



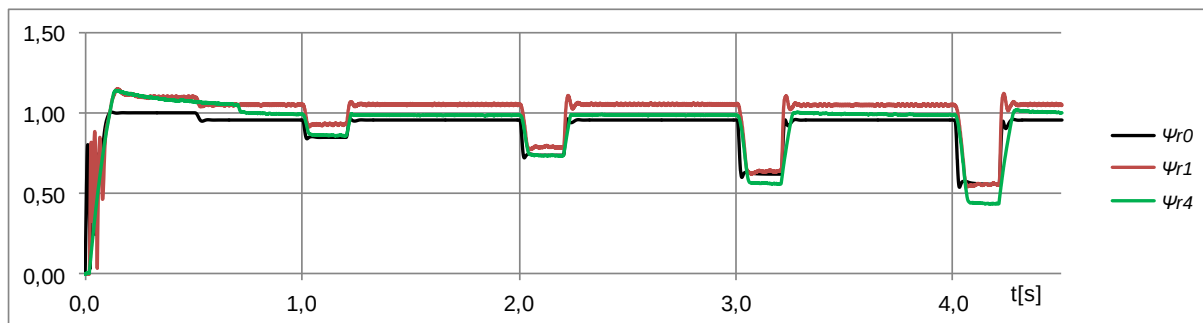
g)



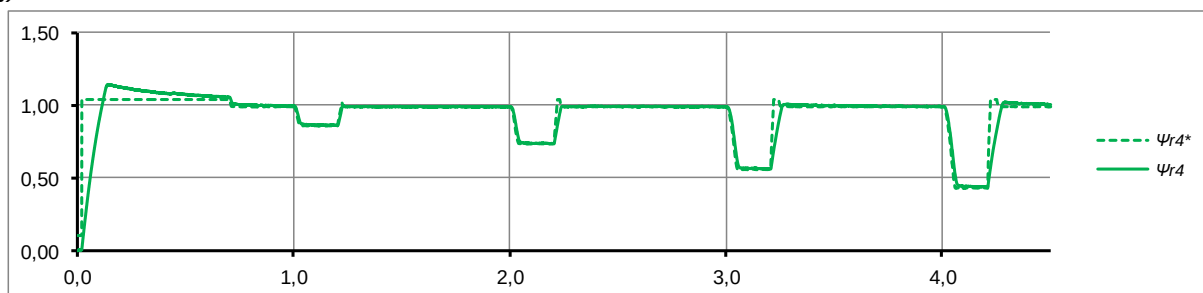
h)



i)

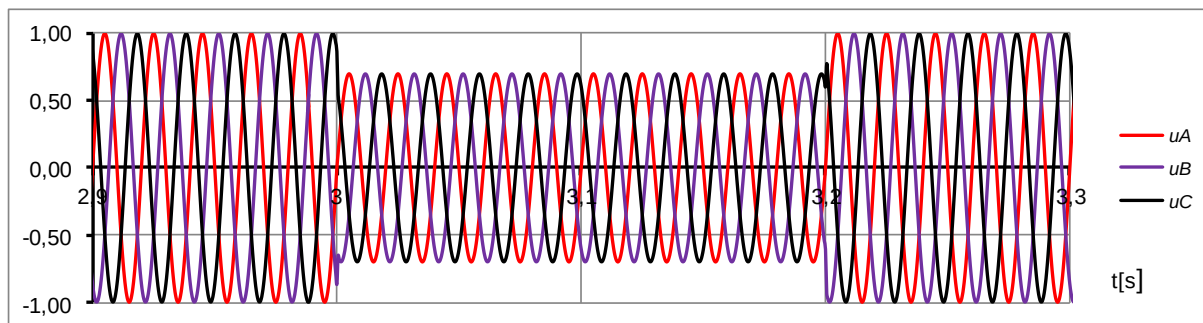


j)

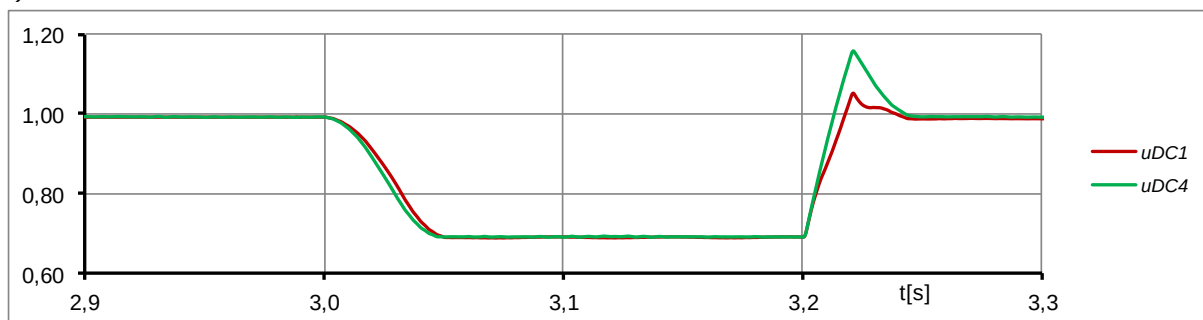


Rys.2.25. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Ams} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu A

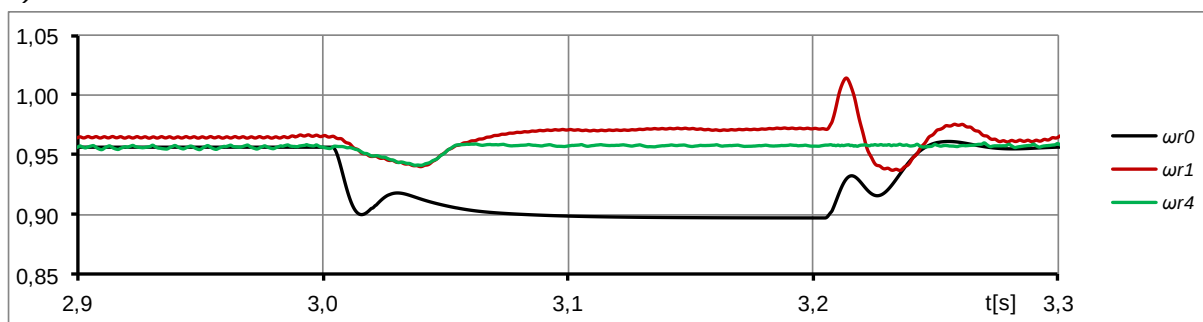
a)



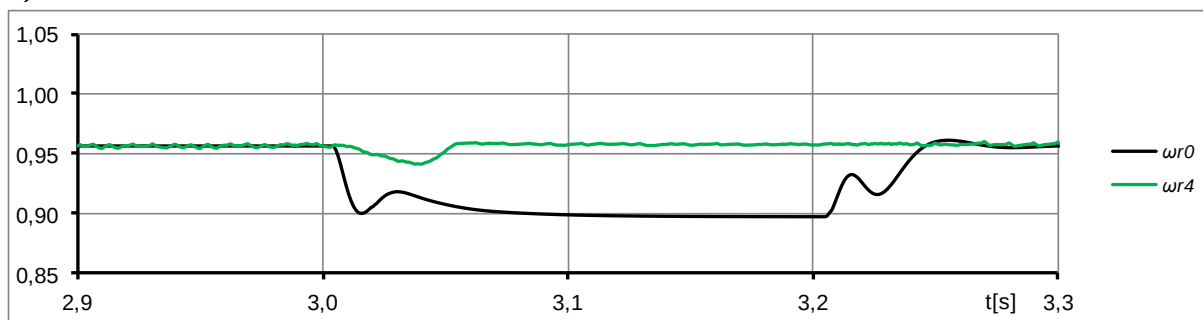
b)



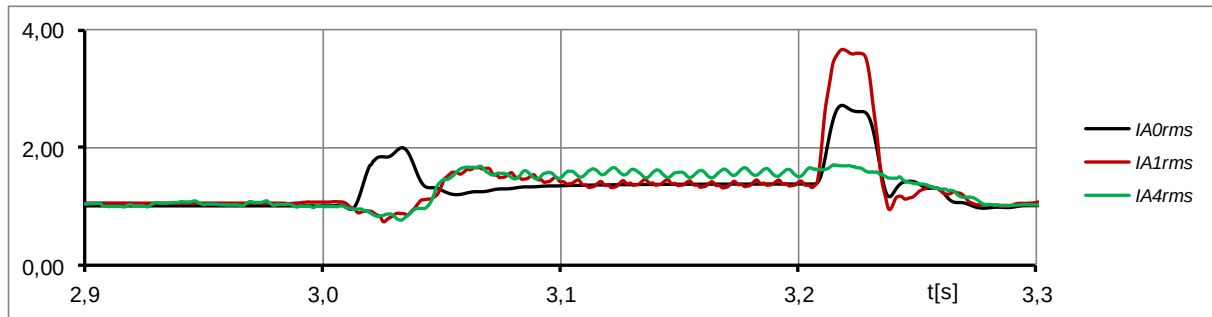
c)



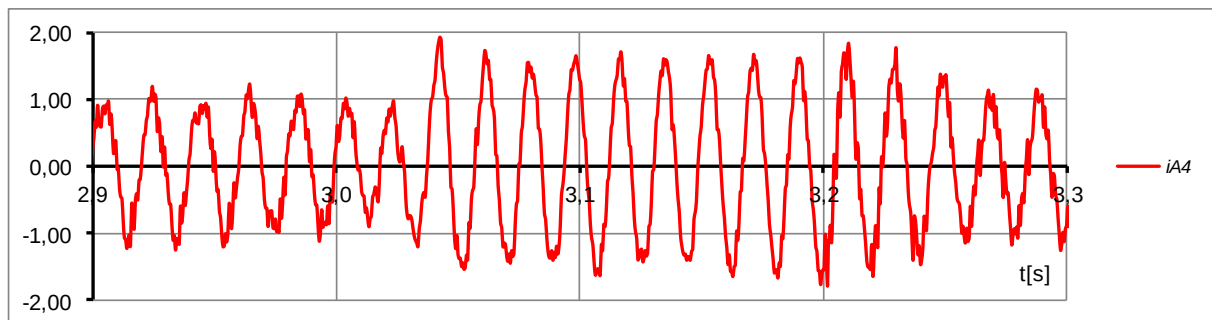
d)



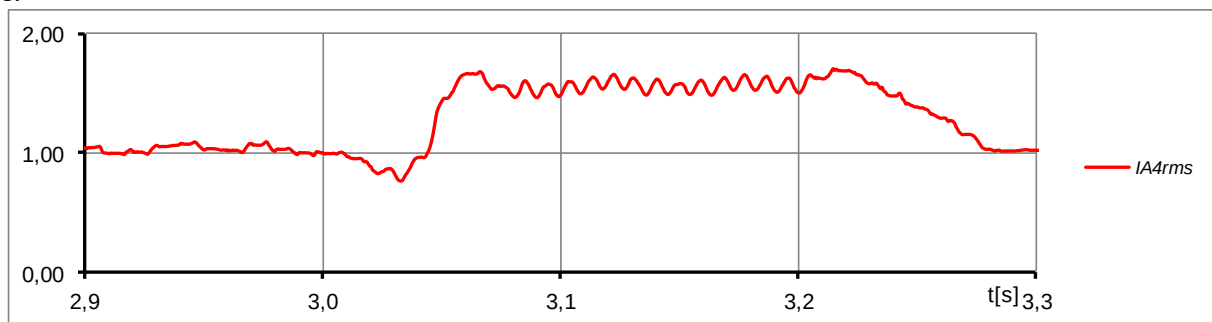
e)



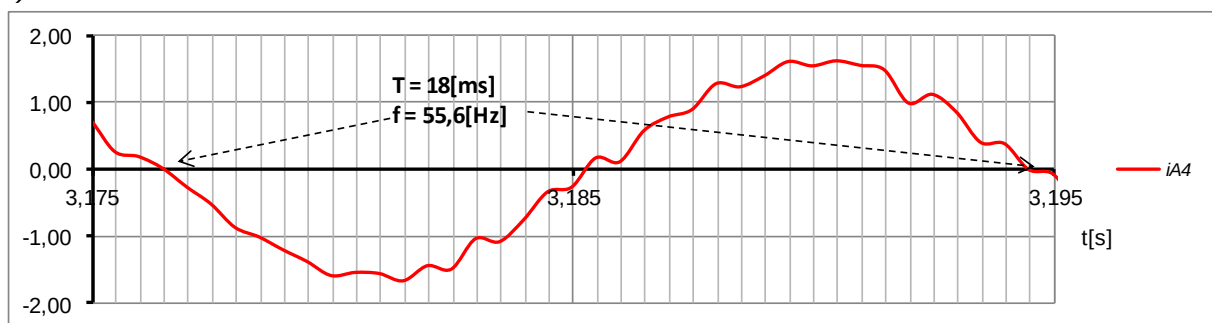
f)



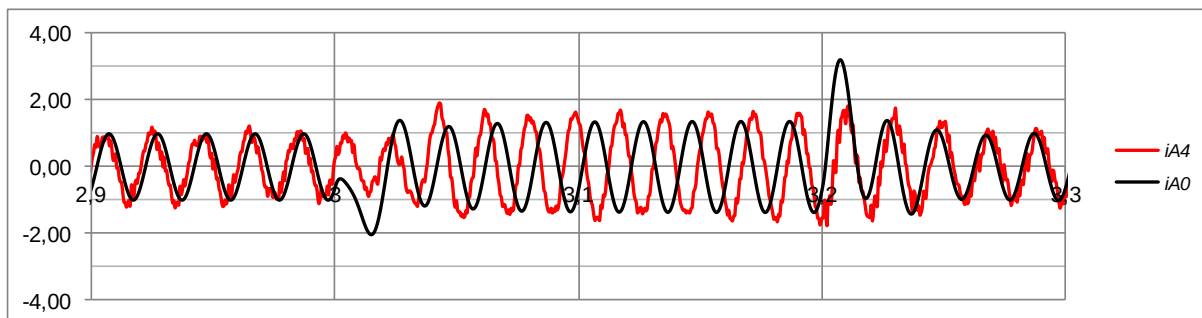
g)



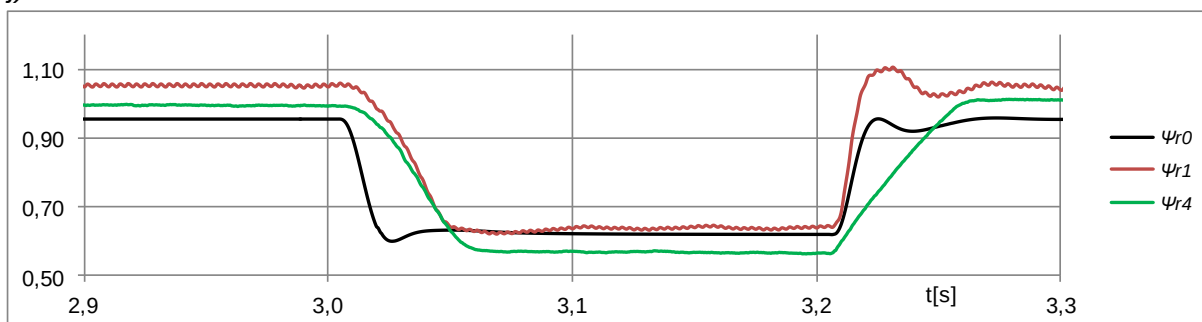
h)



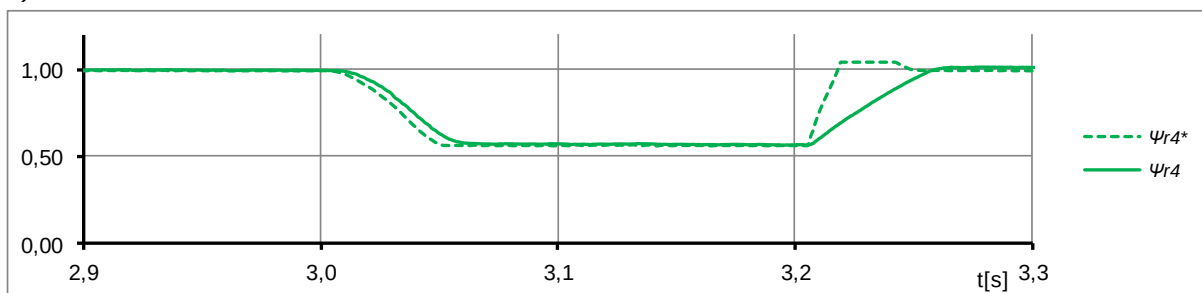
i)



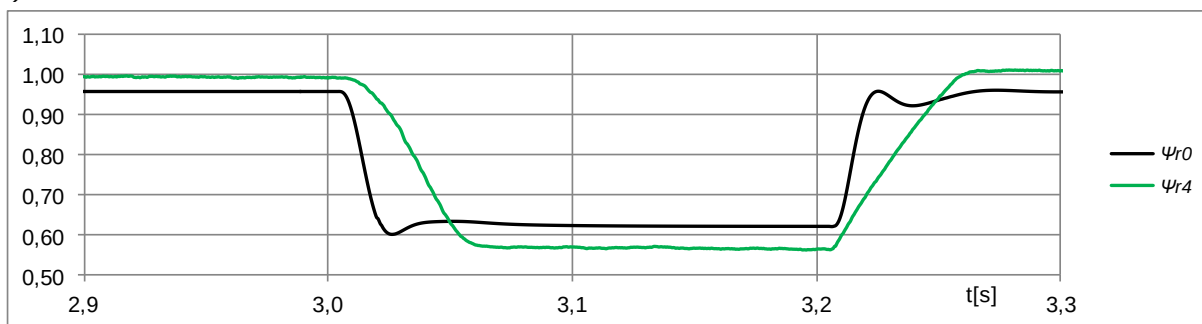
j)



k)



l)



Rys.2.26. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu A , inna skala czasu

Zapad napięcia typu A jest zapadem symetrycznym najbardziej trudnym dla układu elektromechanicznego. Na rysunku 2.25e oraz rysunku 2.26c wyraźnie widać różnice

między prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

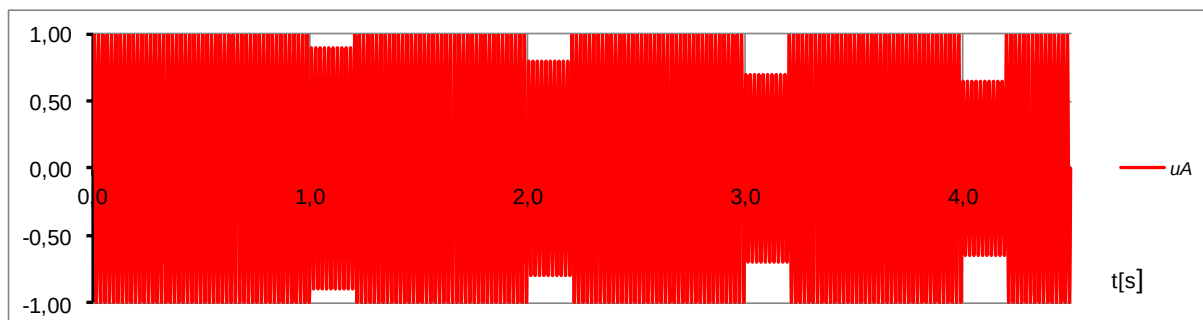
Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość czterokrotnie większą od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 poniżej dwukrotnej wartości znamionowej (rysunek 2.25f oraz rysunek 2.26e).

W czasie zapadu napięcia zwiększyła się częstotliwość napięcia zasilania silnika do około 55,6 [Hz] (rysunek 2.26h).

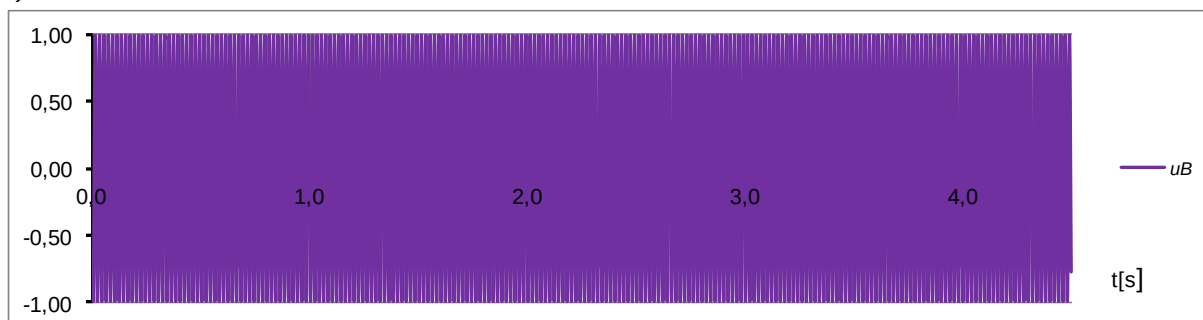
W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana na początku i końcu zapadu napięcia (rysunek 2.26i).

2.4.2. Zapad napięcia typu B

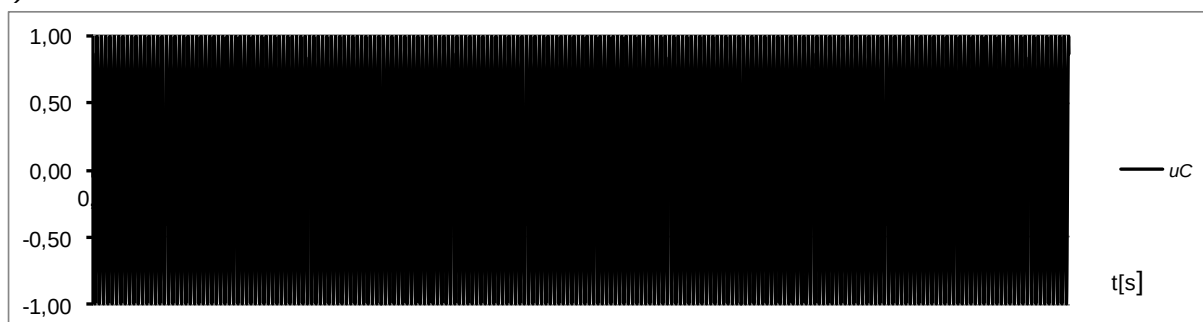
a)



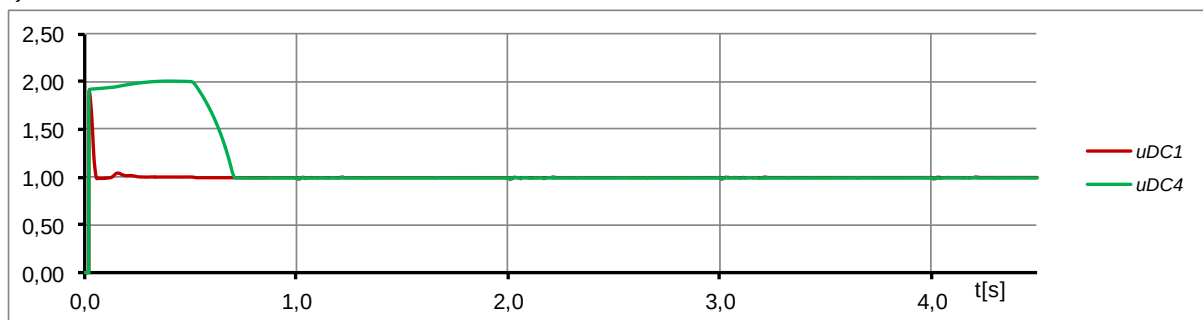
b)



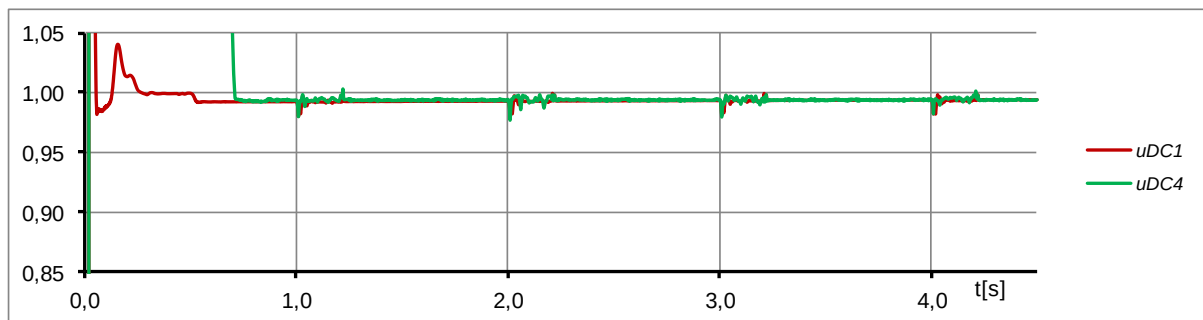
c)



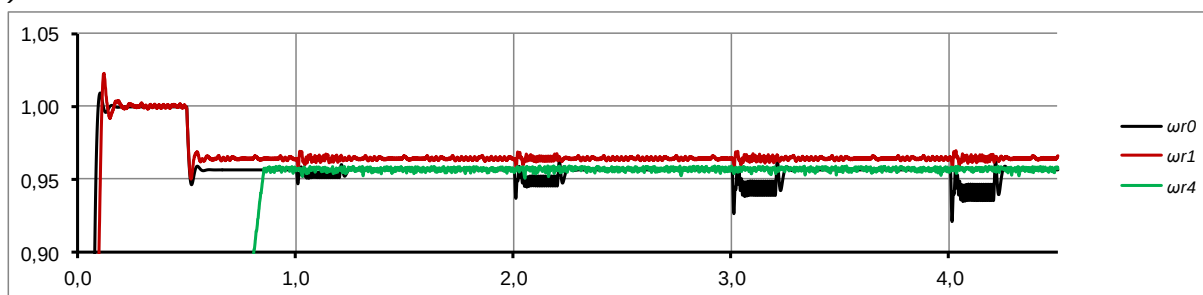
d)



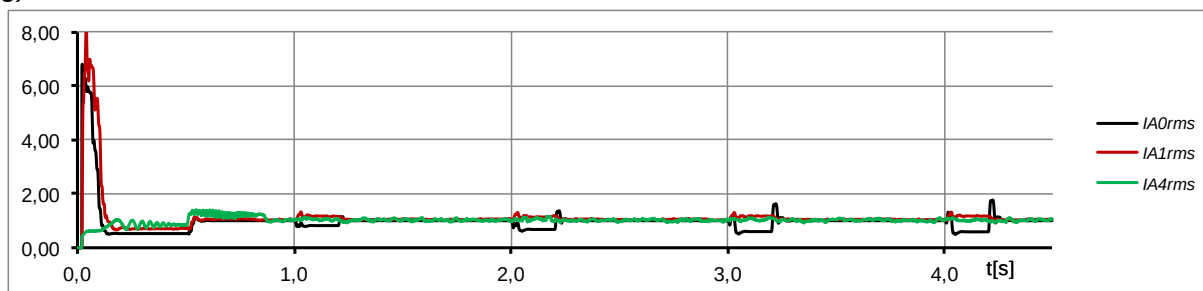
e)



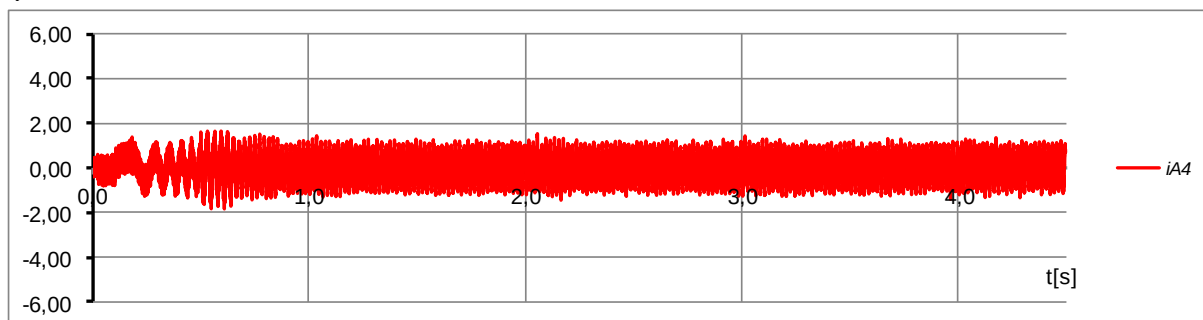
f)



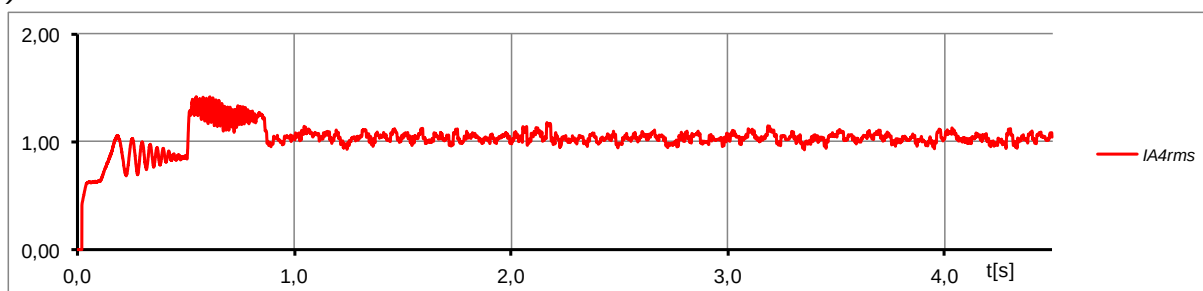
g)



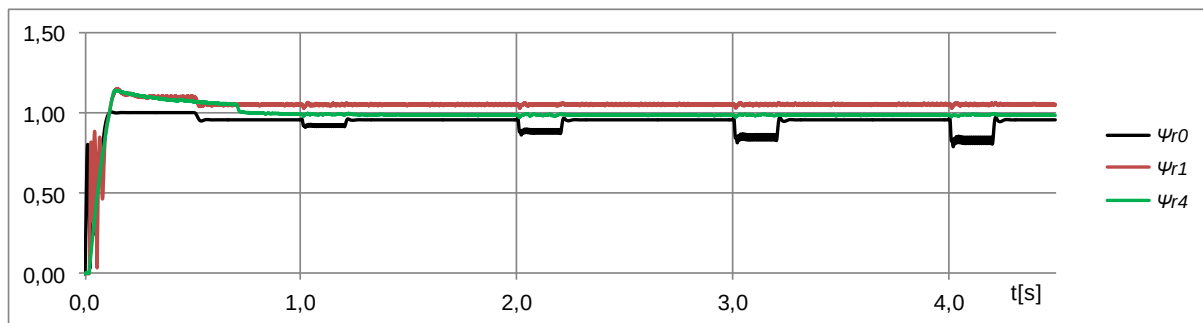
h)



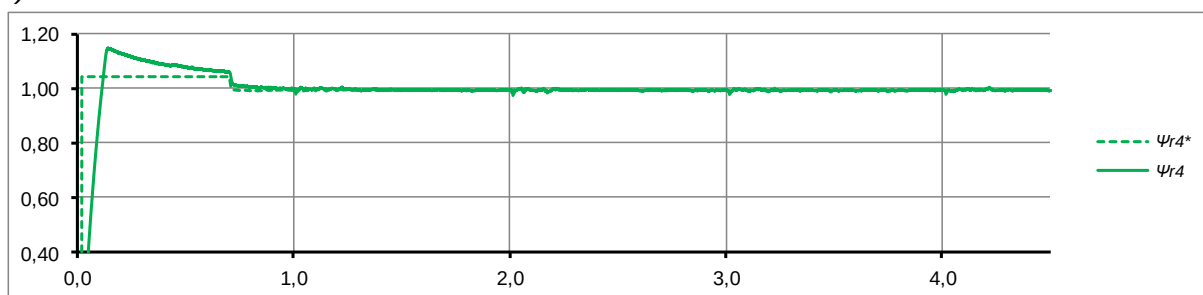
i)



j)

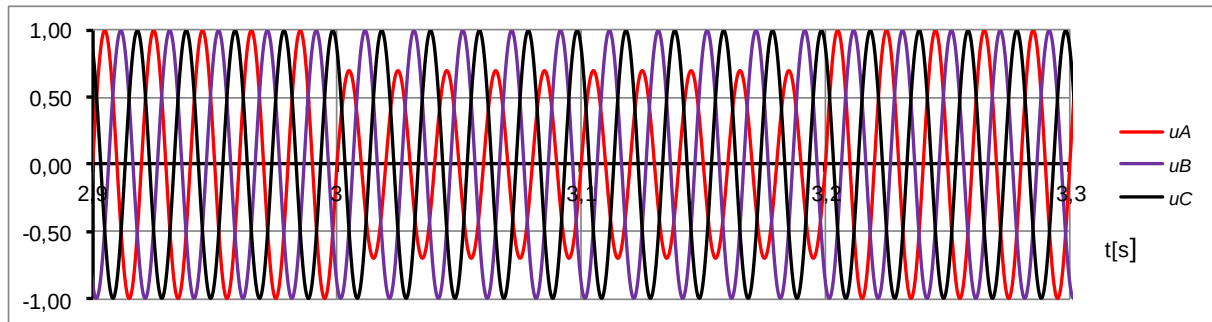


k)

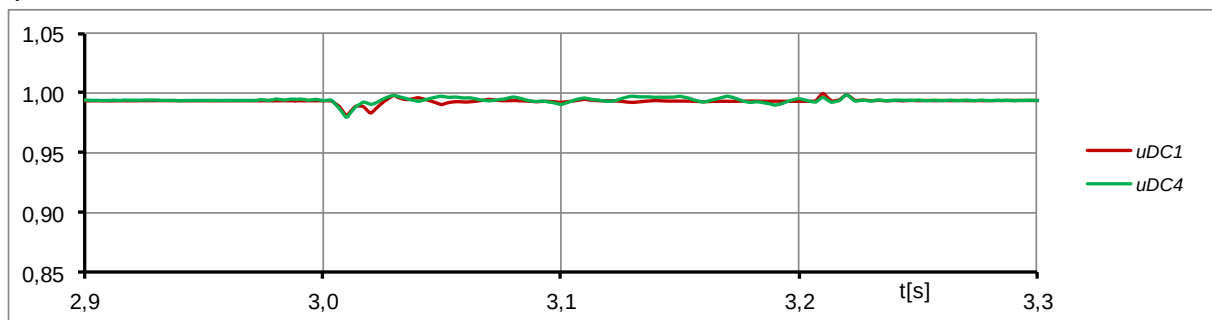


Rys.2.27. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu B

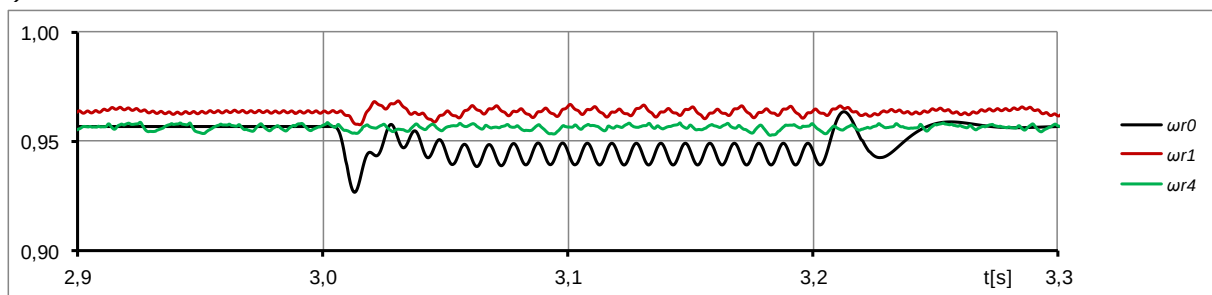
a)



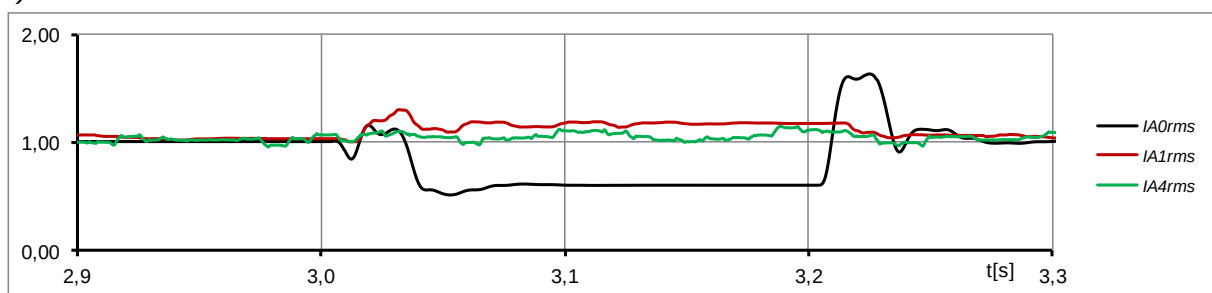
b)



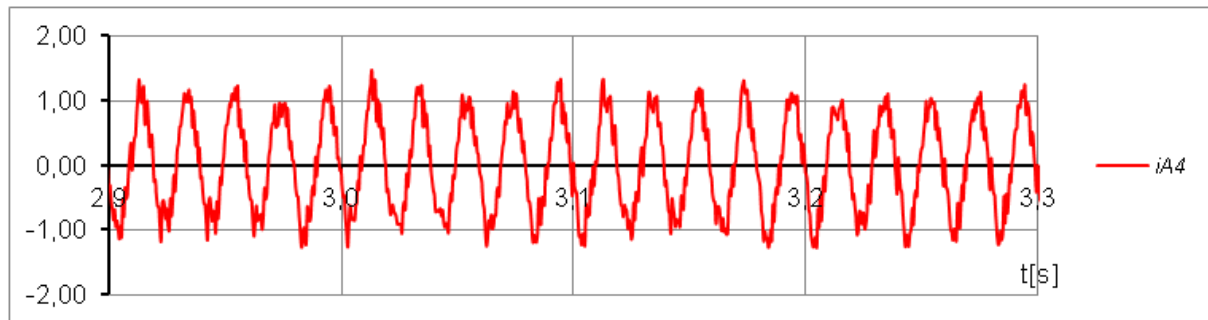
c)



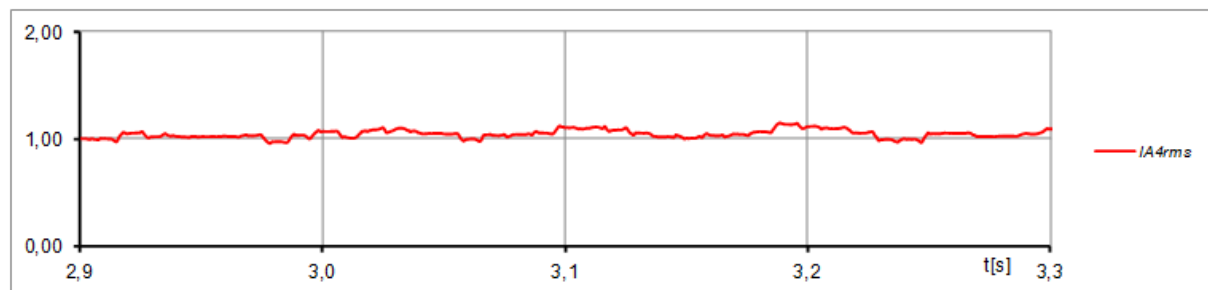
d)



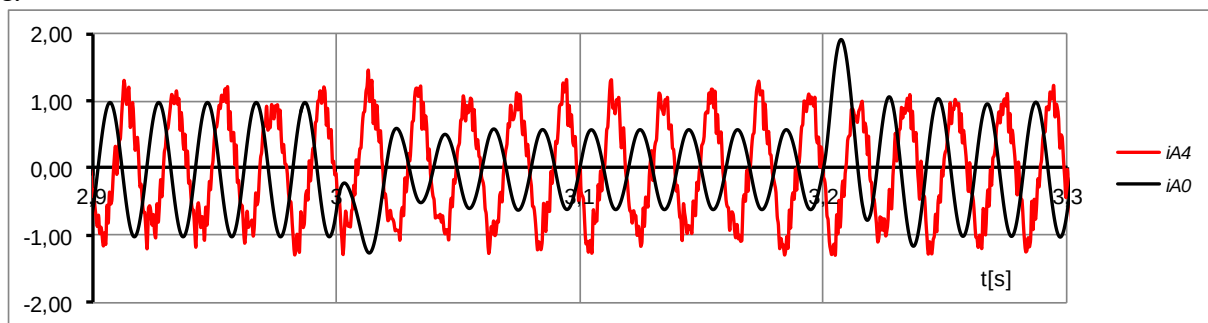
e)



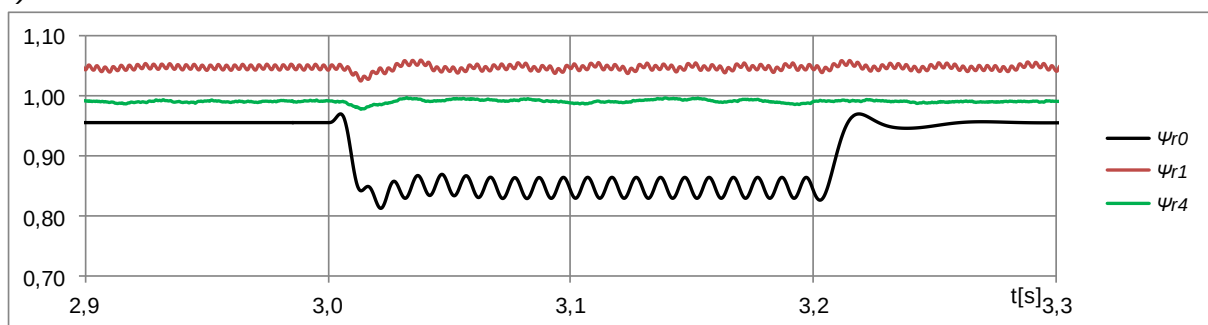
f)



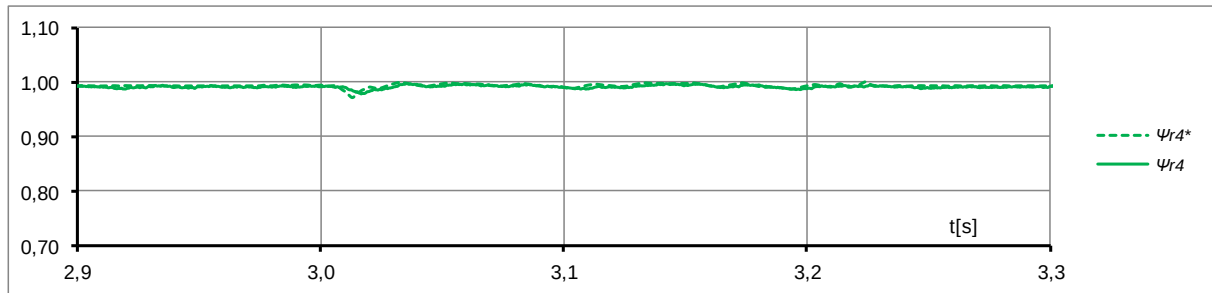
g)



h)



i)



Rys.2.28. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu B, inna skala czasu

Zapad napięcia typu B jest zapadem niesymetrycznym, dużo łagodniejszym dla układu elektromechanicznego w porównaniu z zapadem napięcia typu A.

Na rysunku 2.27e oraz rysunku 2.28c wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

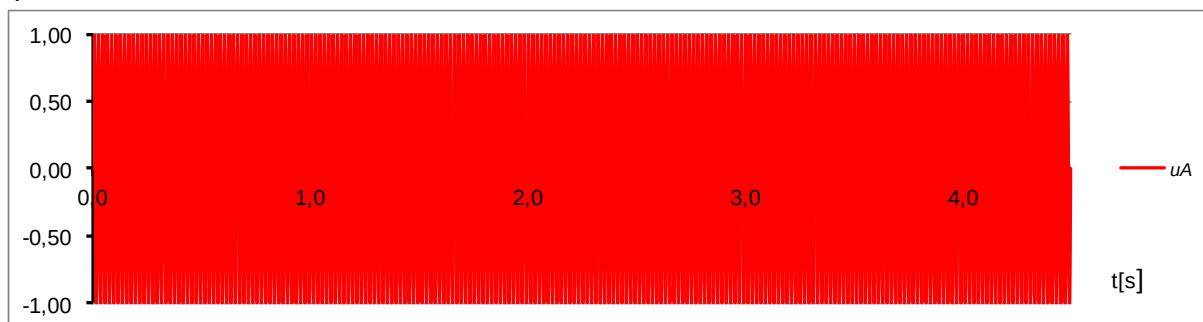
Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość dwukrotnie większą od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 około wartości znamionowej (rysunek 2.27g oraz rysunek 2.28d).

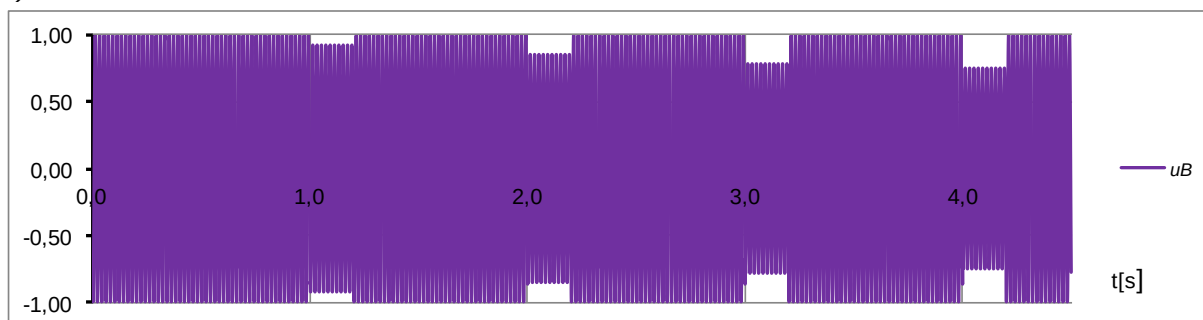
W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana na początku i końcu zapadu napięcia (rysunek 2.28g).

2.4.3. Zapad napięcia typu C

a)



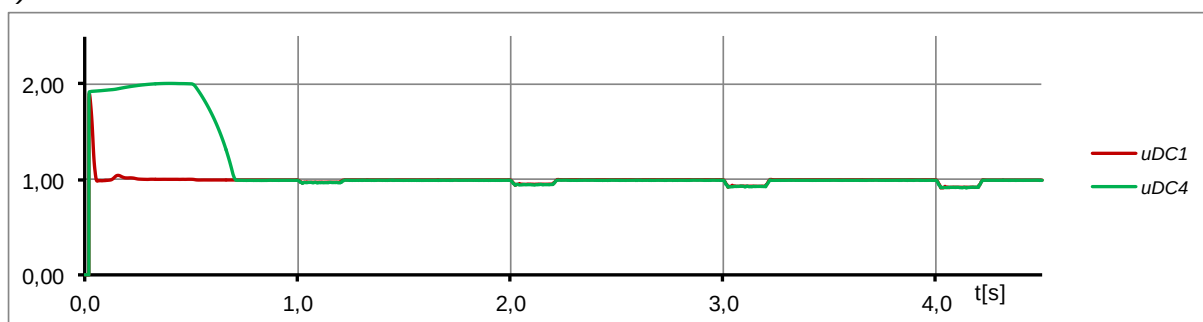
b)



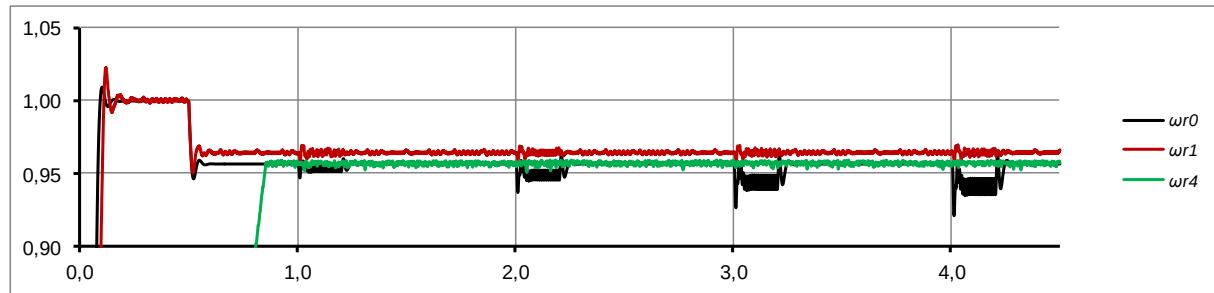
c)



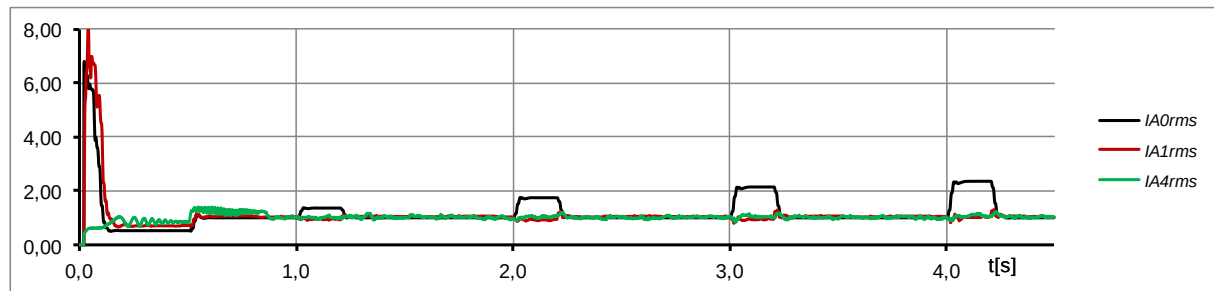
d)



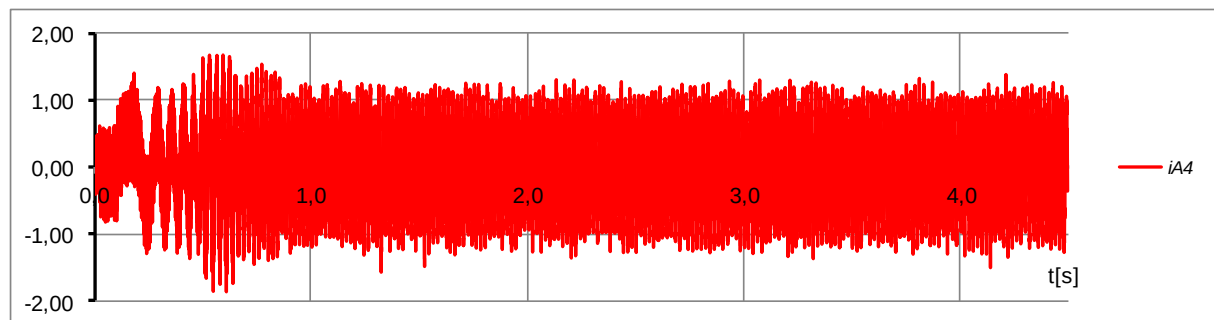
e)



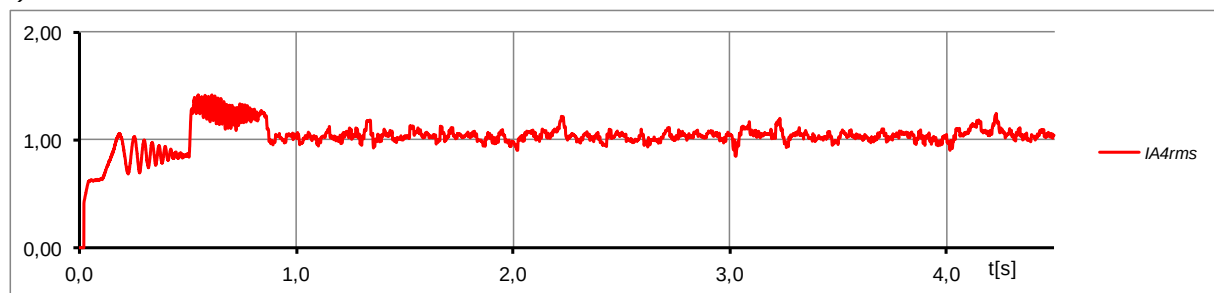
f)



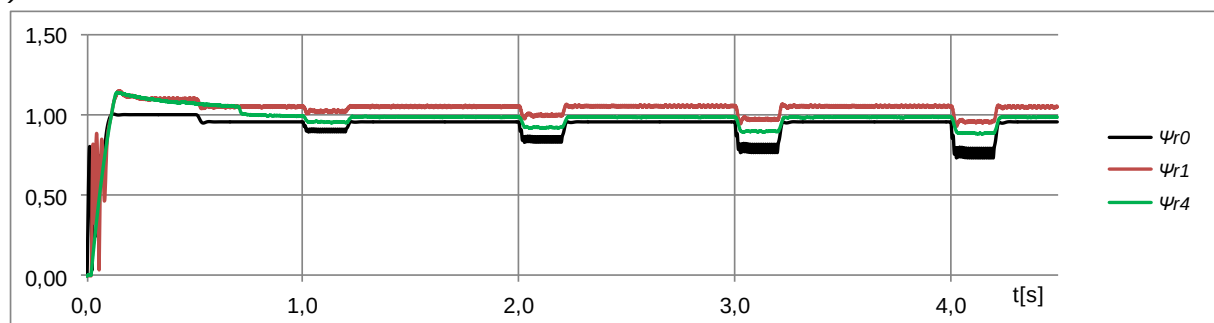
g)



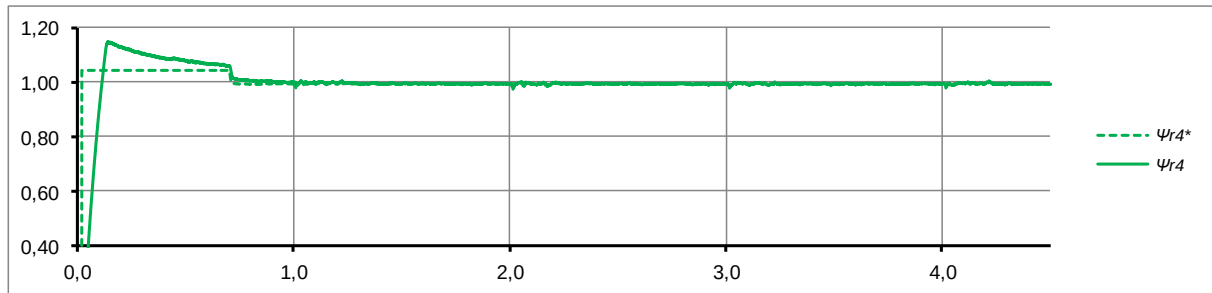
h)



i)

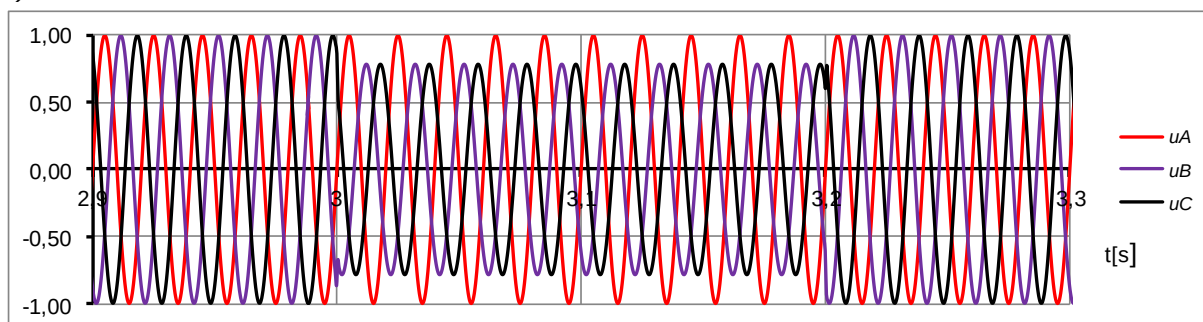


j)

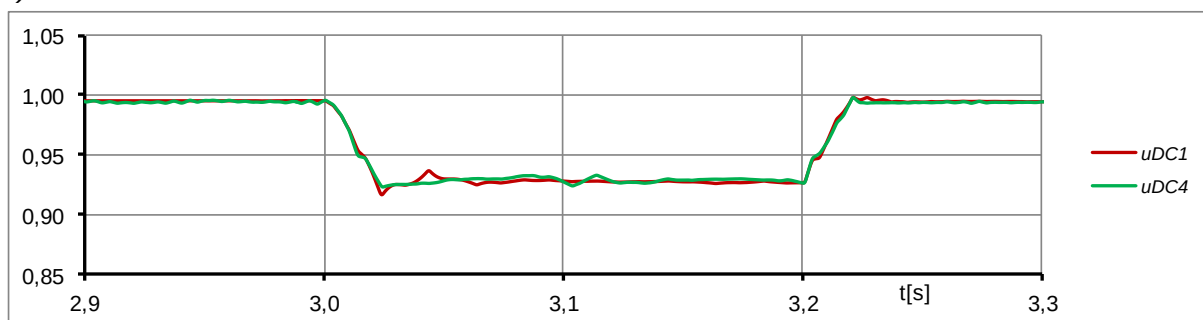


Rys.2.29. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu C

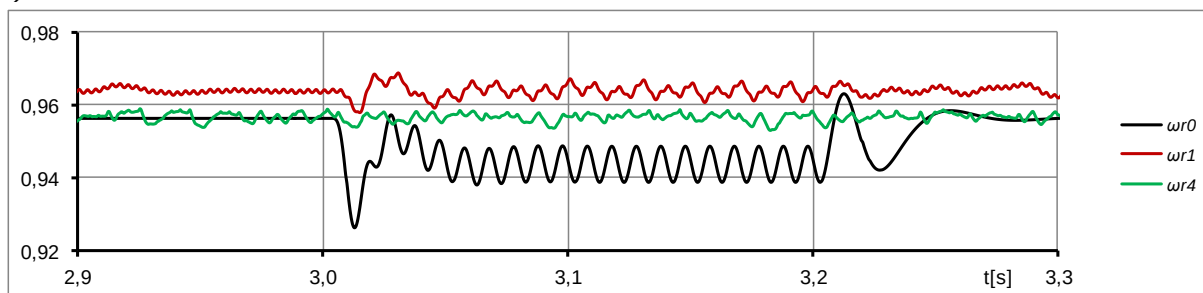
a)



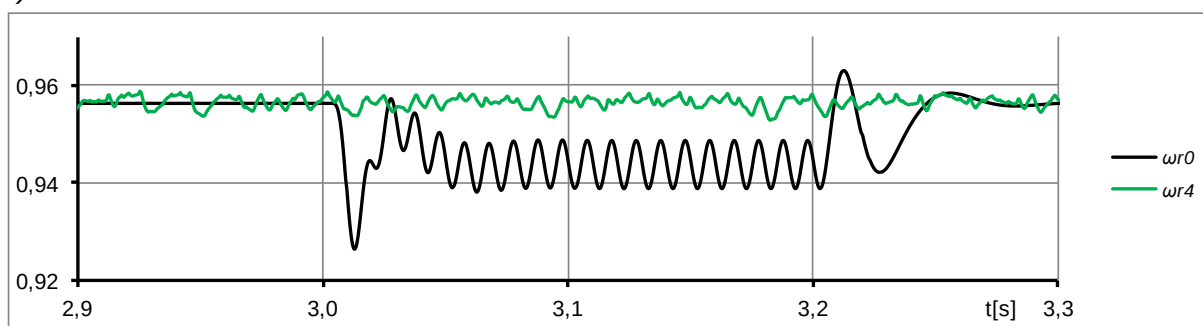
b)



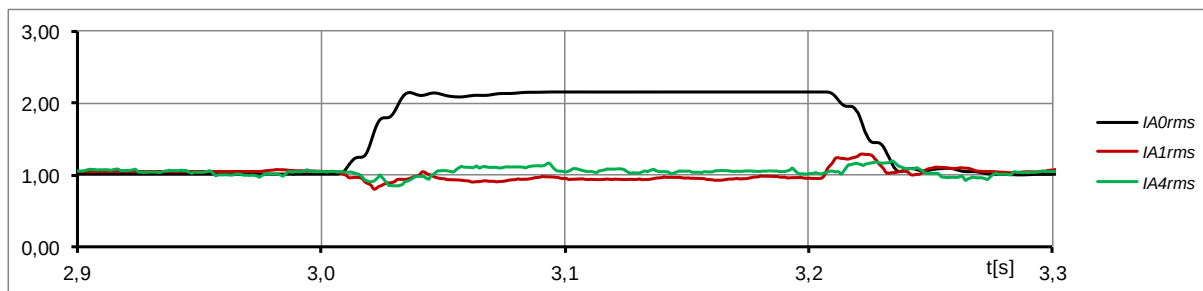
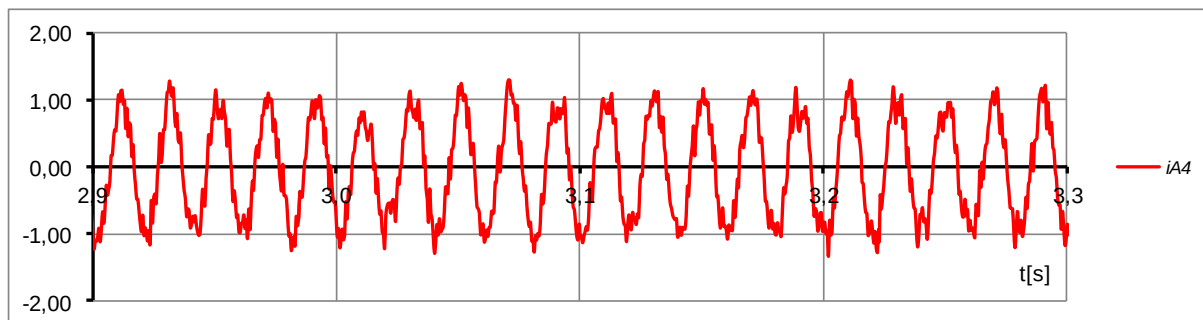
c)



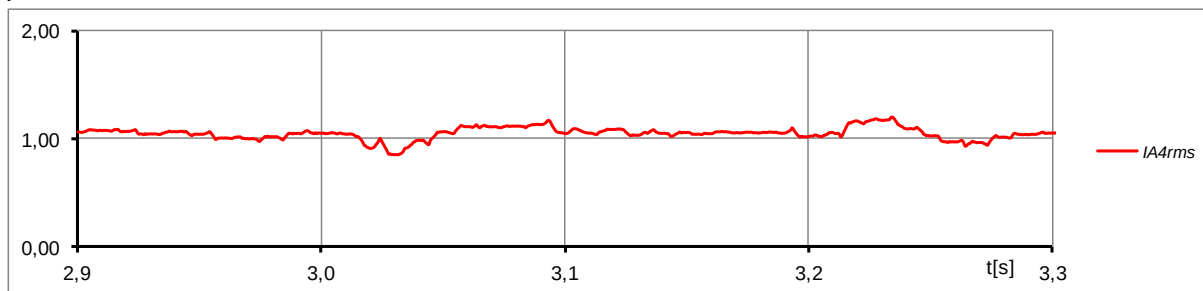
d)



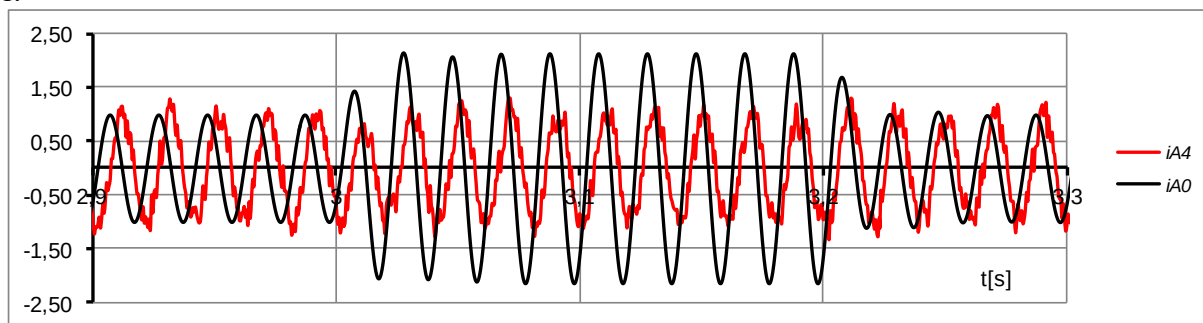
e)



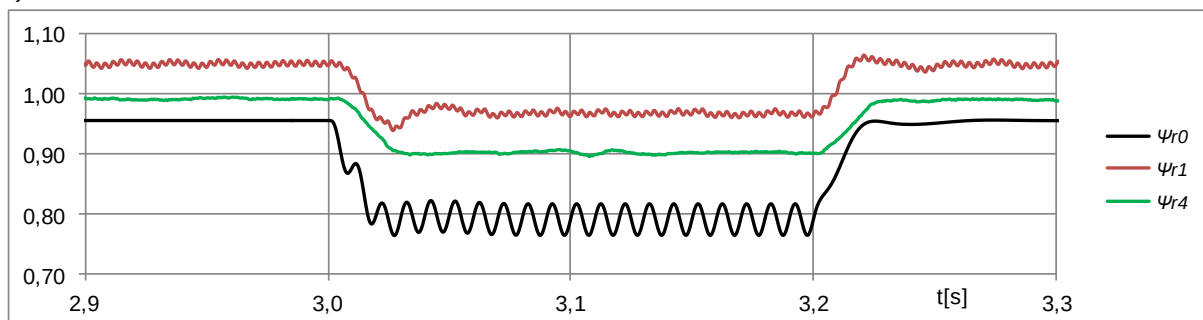
f)



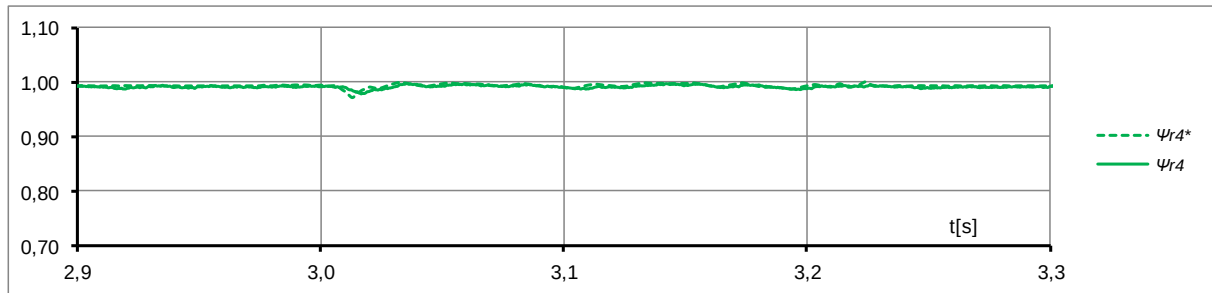
g)



h)



i)



Rys.2.30. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu C, inna skala czasu

Zapad napięcia typu C jest zapadem niesymetrycznym, dużo łagodniejszym dla układu elektromechanicznego w porównaniu z zapadem napięcia typu A.

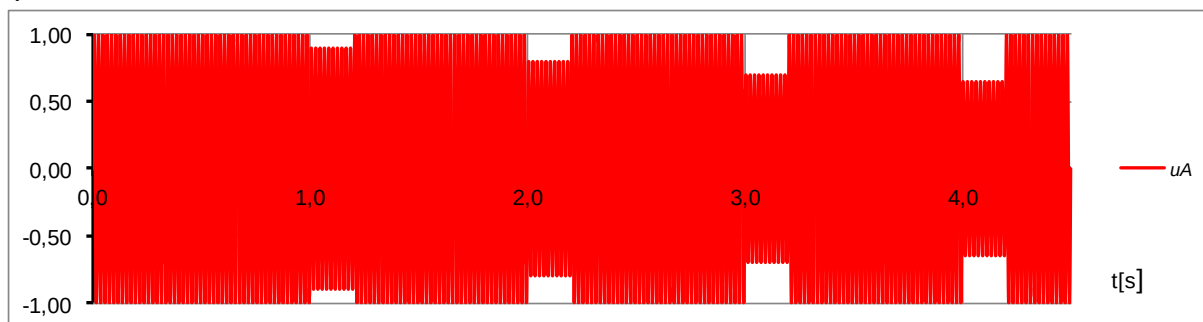
Na rysunku 2.29e oraz rysunku 2.30c wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\psi_r^* = f(u_{DC})$.

Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\psi_r^* = f(u_{DC})$.

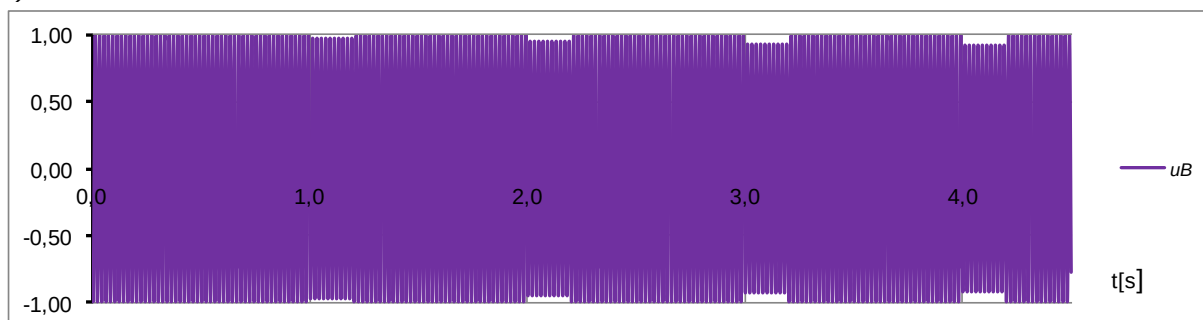
Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość około dwukrotnie większej od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 około wartości znamionowej (rysunek 2.29f oraz rysunek 2.30g).

2.4.4. Zapad napięcia typu D

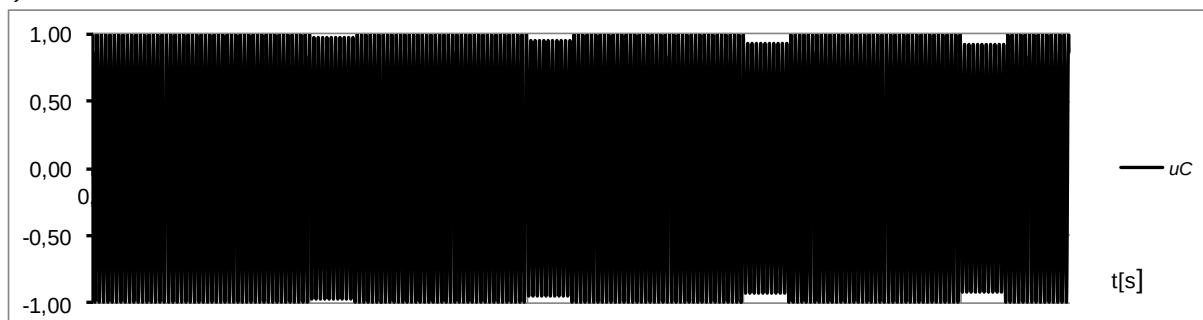
a)



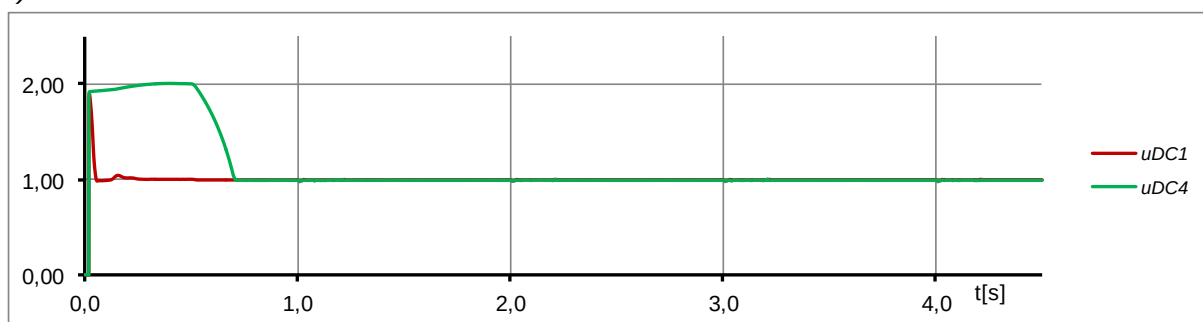
b)



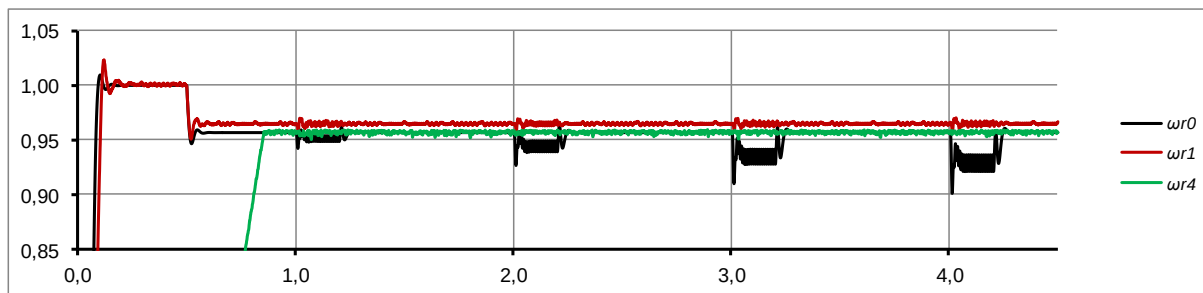
c)



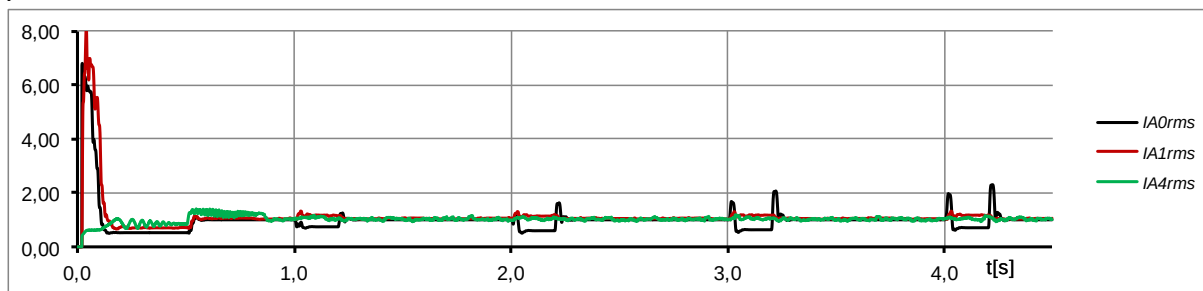
d)



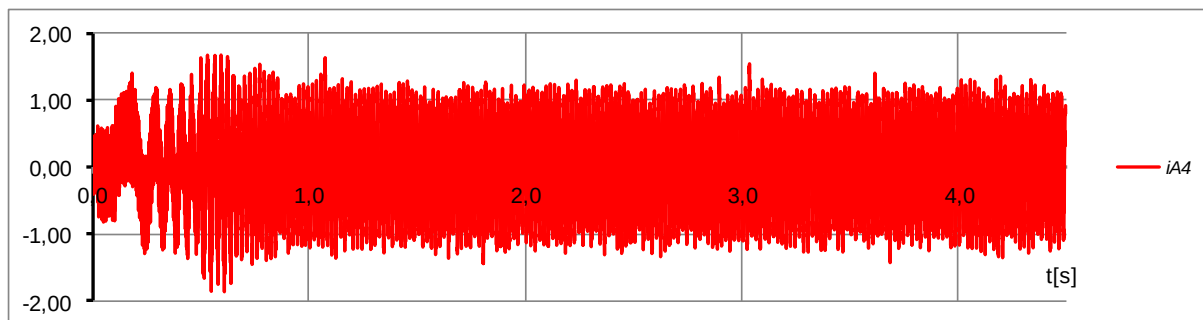
e)



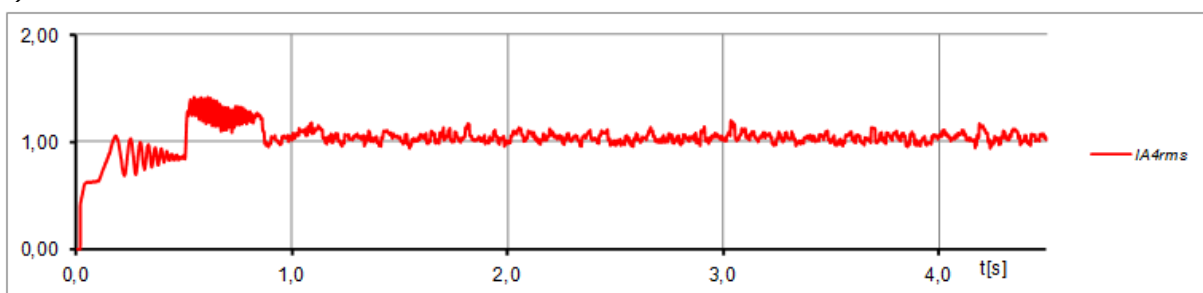
f)



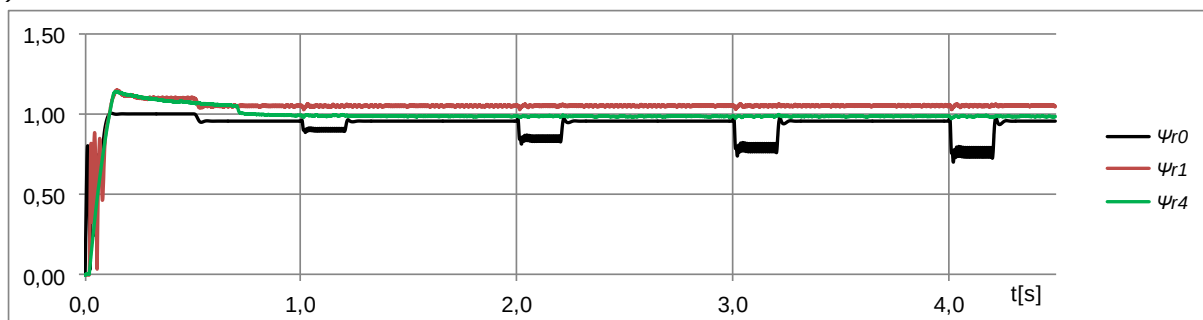
g)



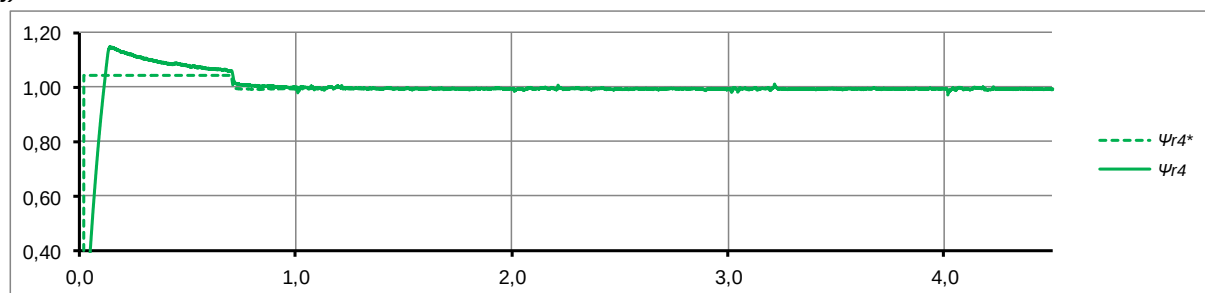
h)



i)

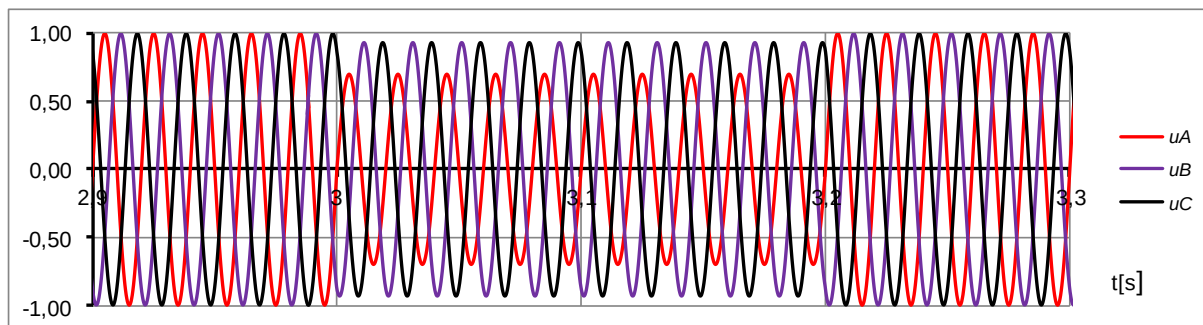


j)

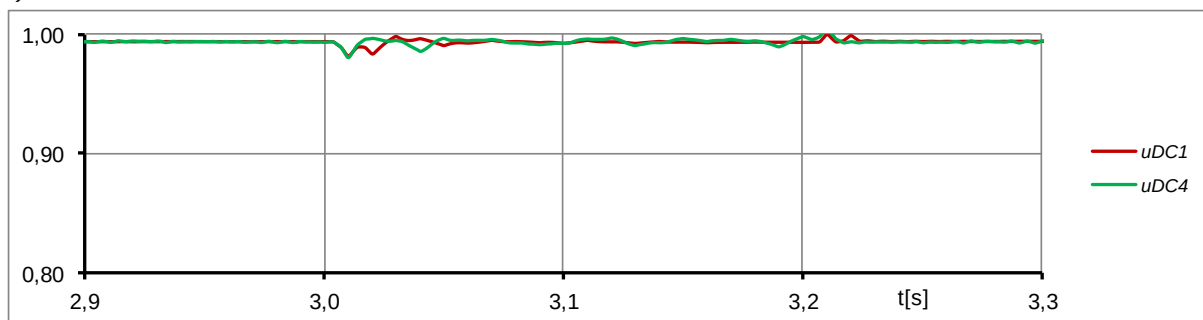


Rys.2.31. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu D

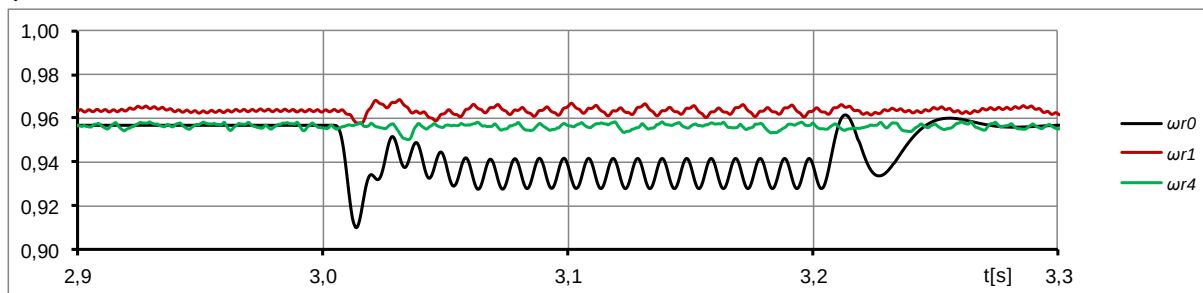
a)



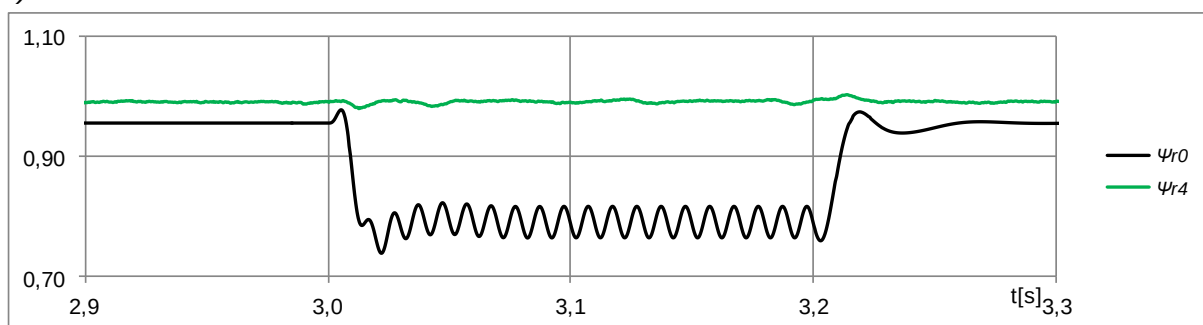
b)



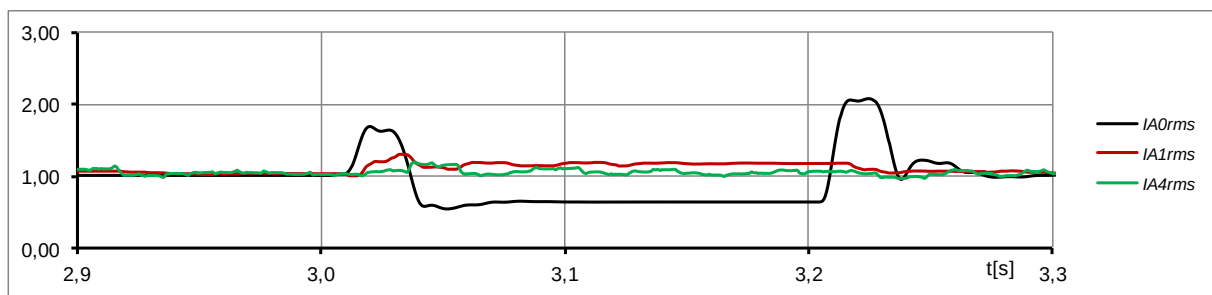
c)



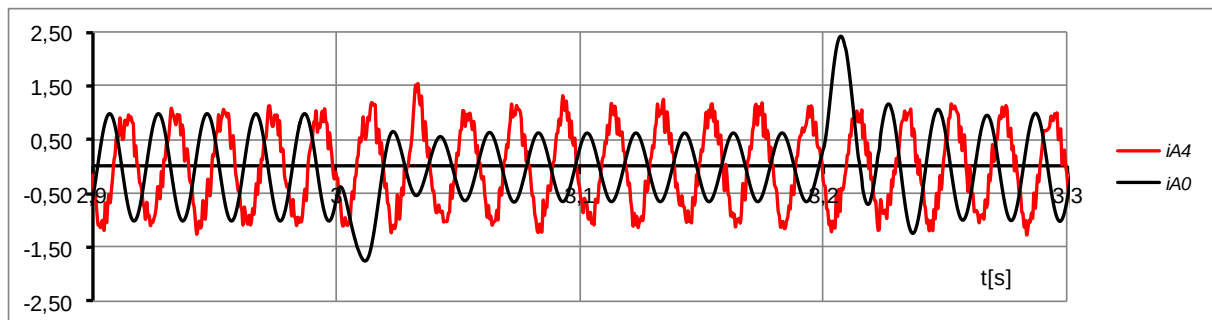
d)



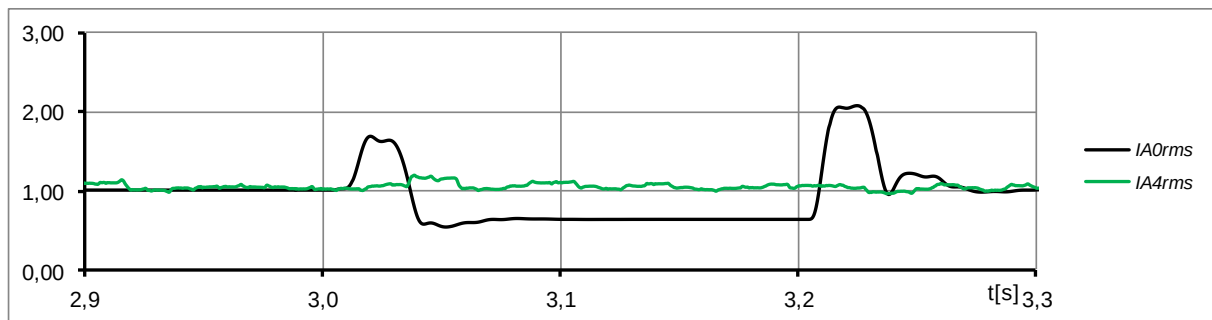
e)



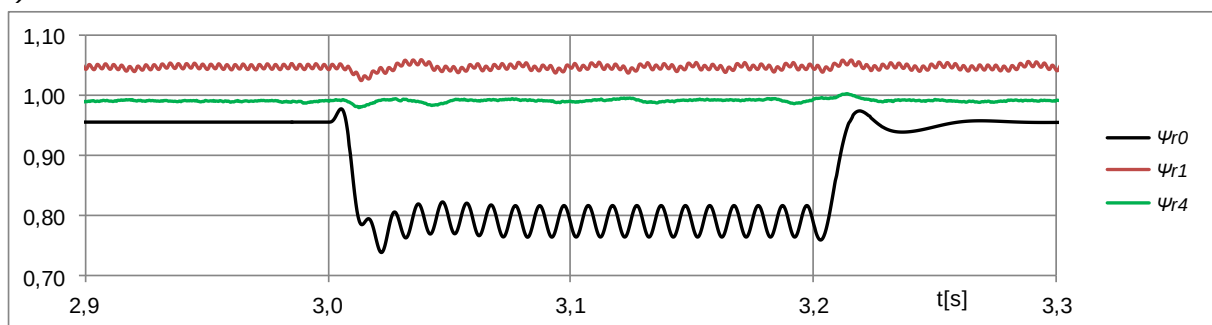
f)



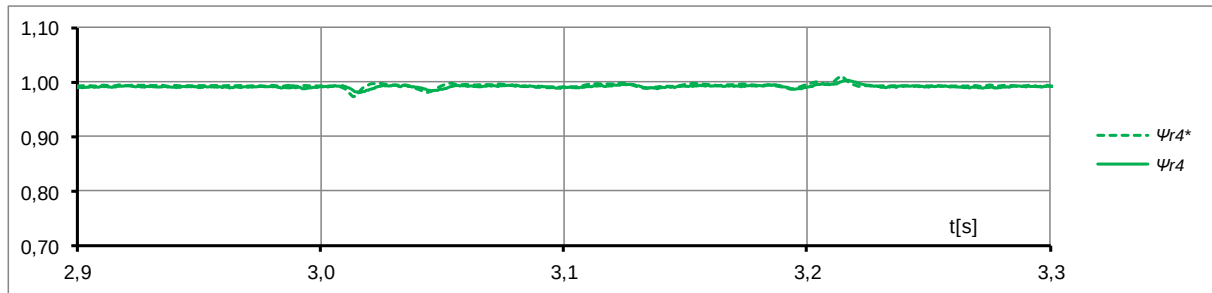
g)



h)



i)



Rys.2.32. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Ams} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu D, inna skala czasu

Zapad napięcia typu D jest zapadem niesymetrycznym, dużo łagodniejszym dla układu elektromechanicznego w porównaniu z zapadem napięcia typu A.

Na rysunku 2.31e oraz rysunku 2.32c wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

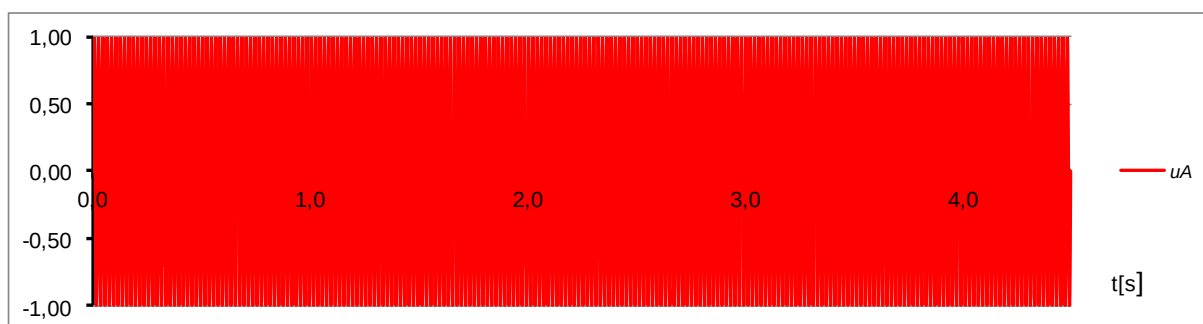
Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość dwukrotnie większą od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 około wartości znamionowej (rysunek 2.31g oraz rysunek 2.32d).

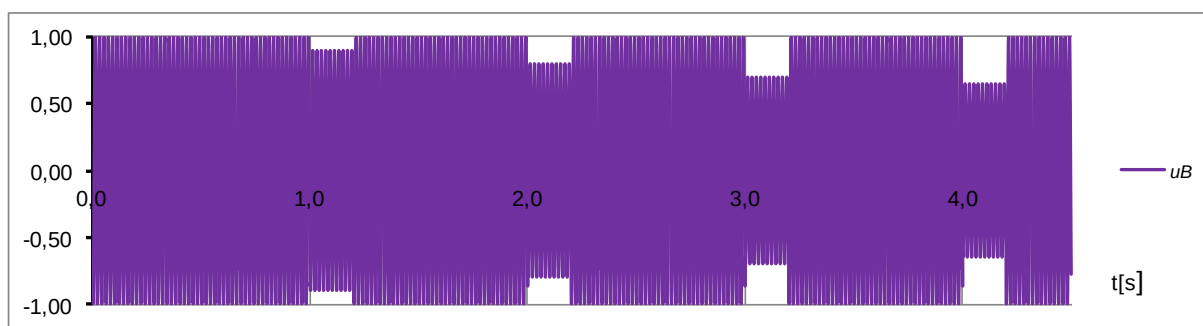
W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana na początku i końcu zapadu napięcia (rysunek 2.32f).

2.4.5. Zapad napięcia typu E

a)



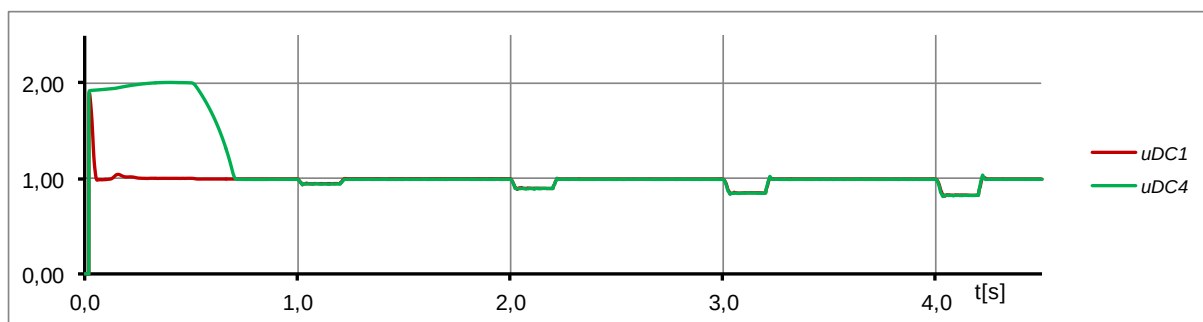
b)



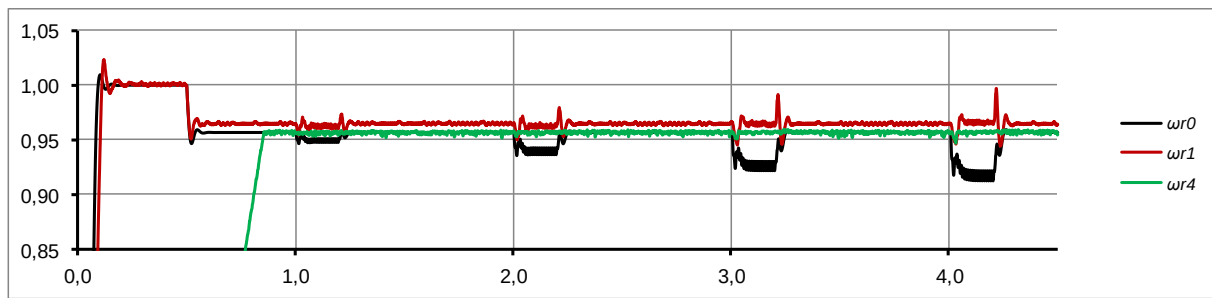
c)



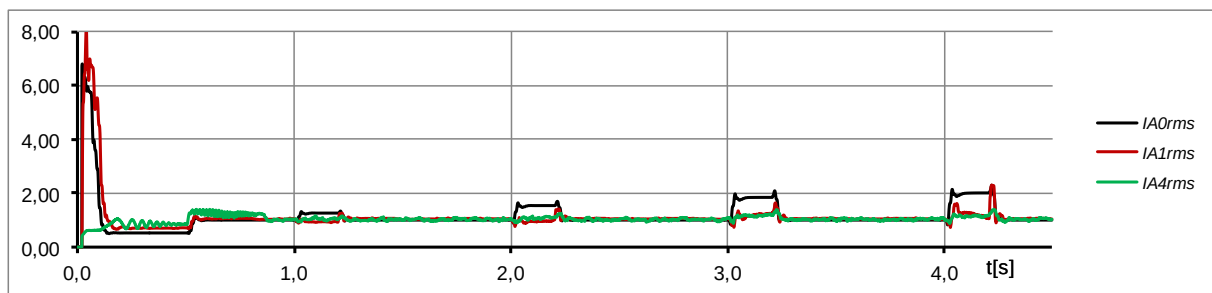
d)



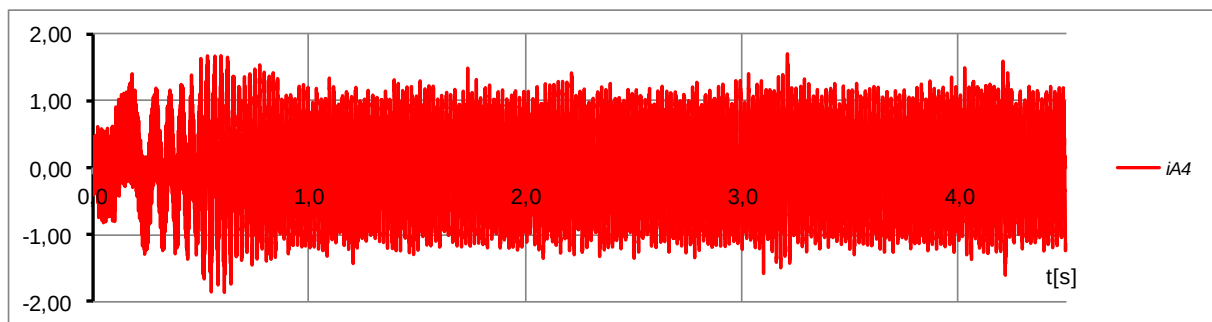
e)



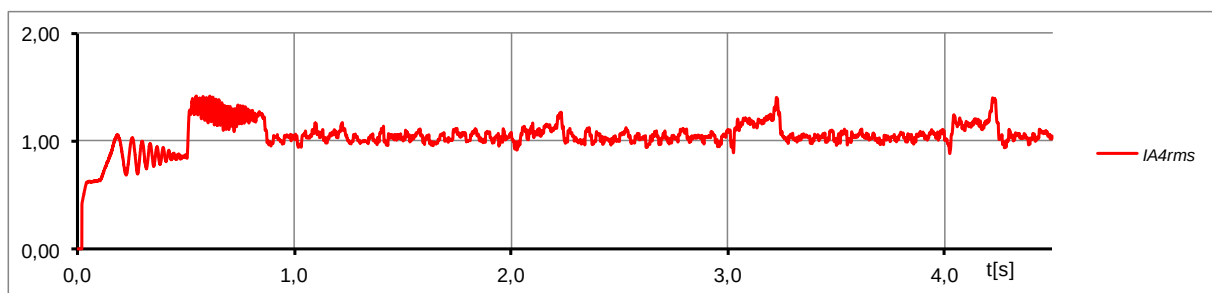
f)



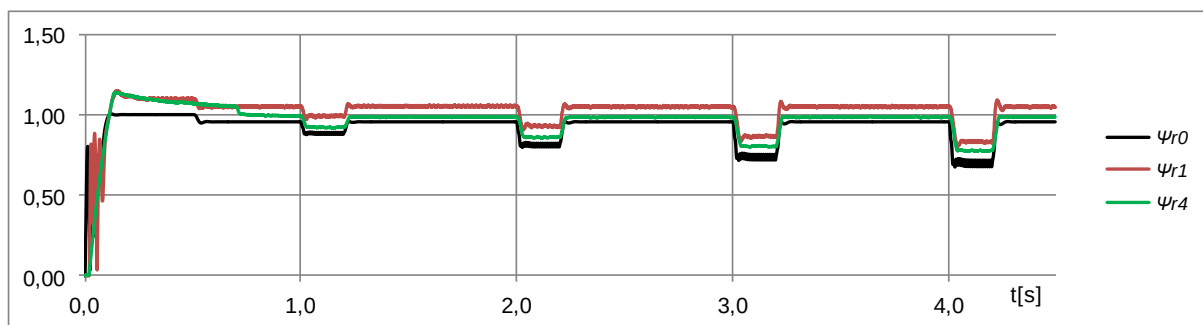
g)



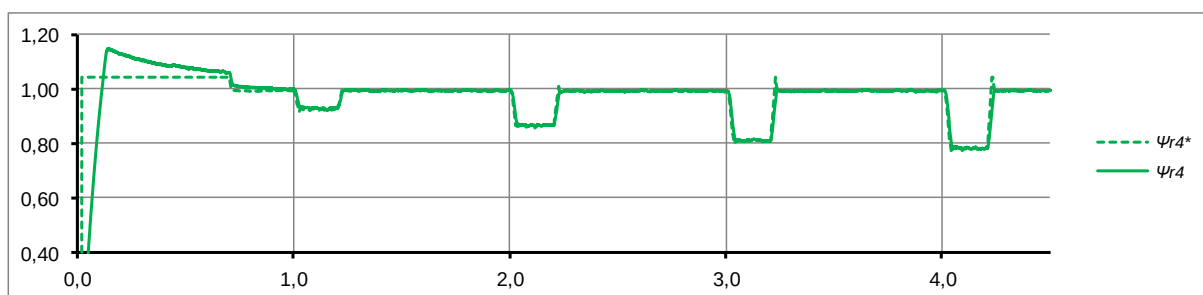
h)



i)

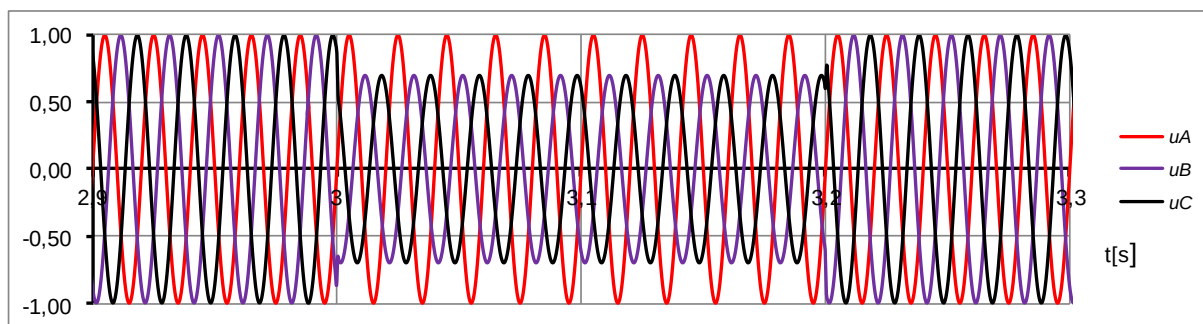


i)

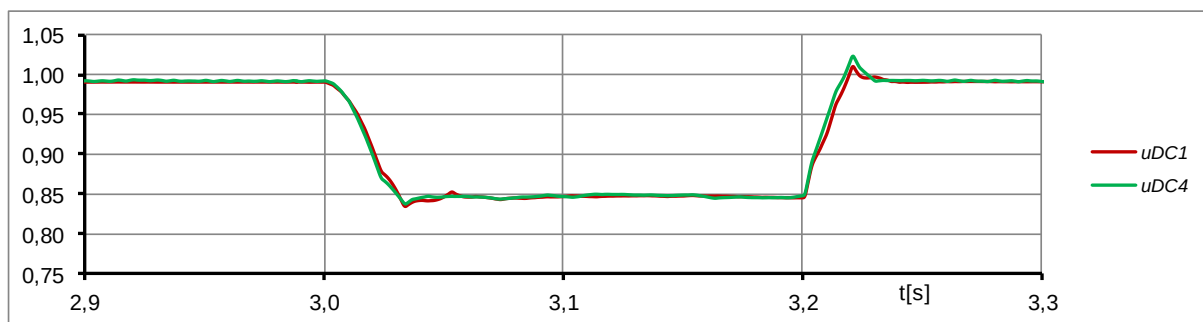


Rys.2.33. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Ams} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu E

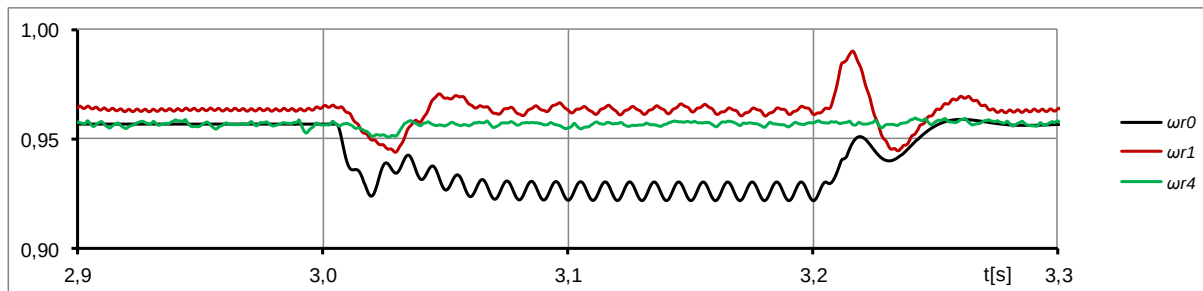
a)



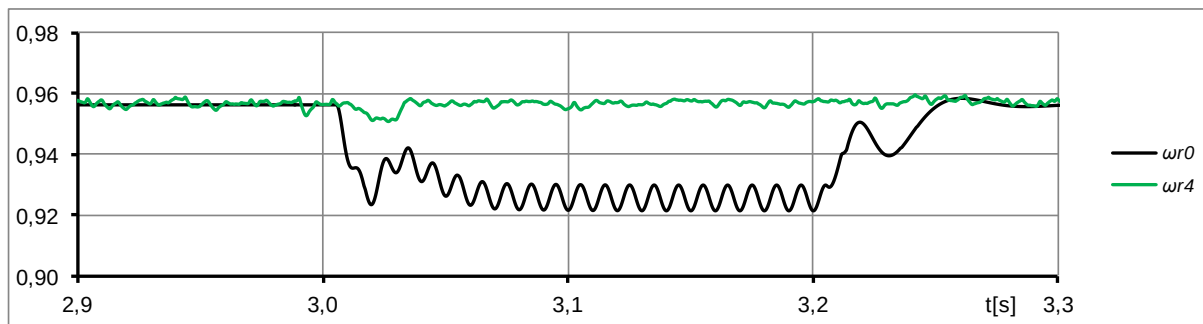
b)



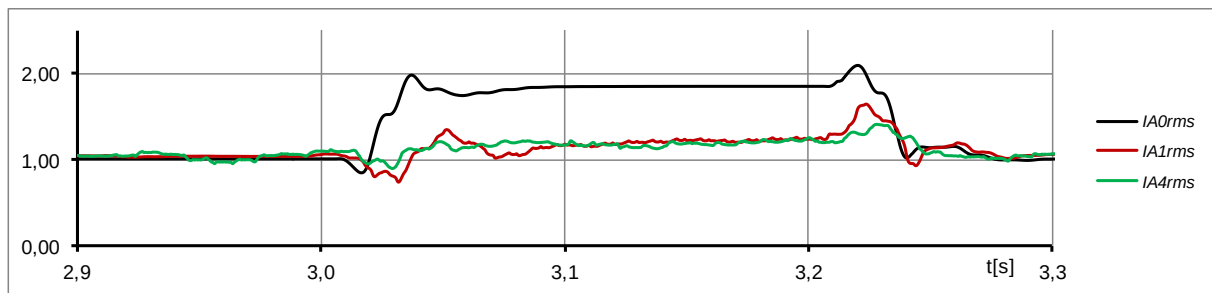
c)



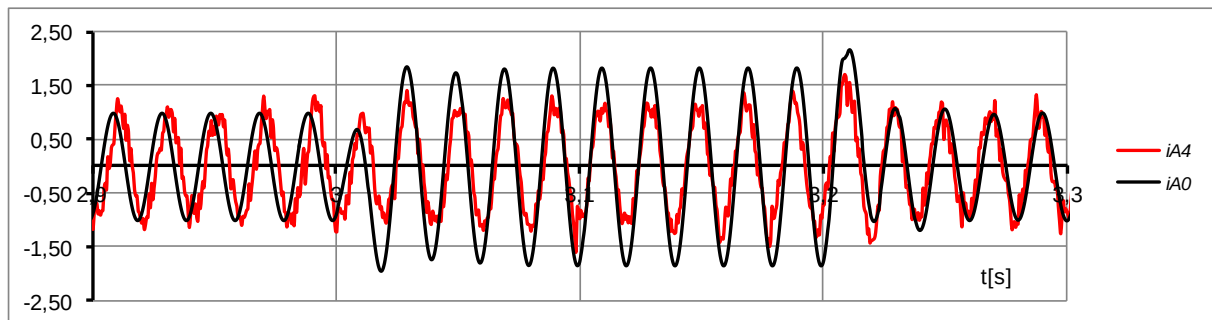
d)



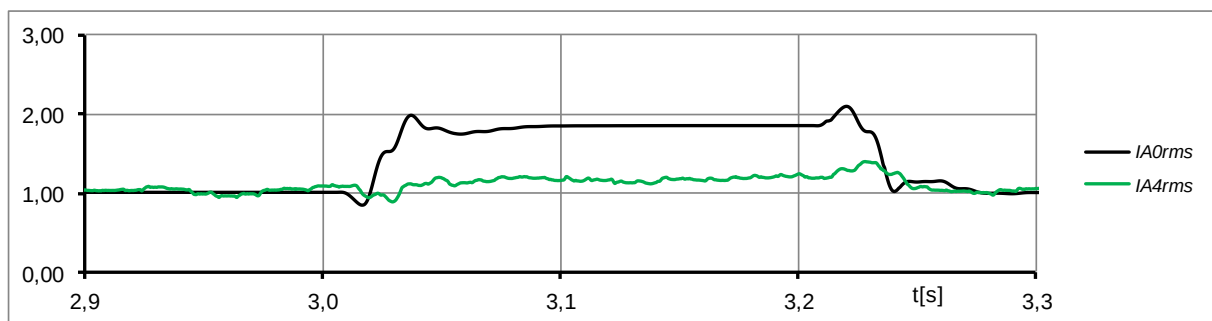
e)



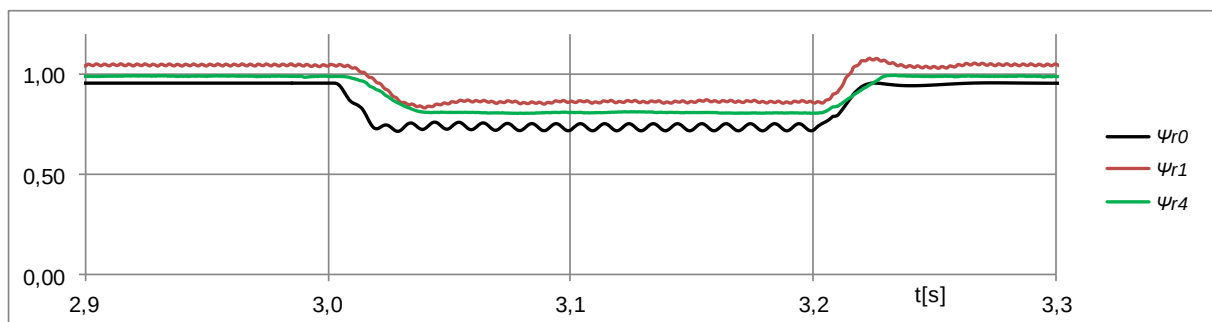
f)



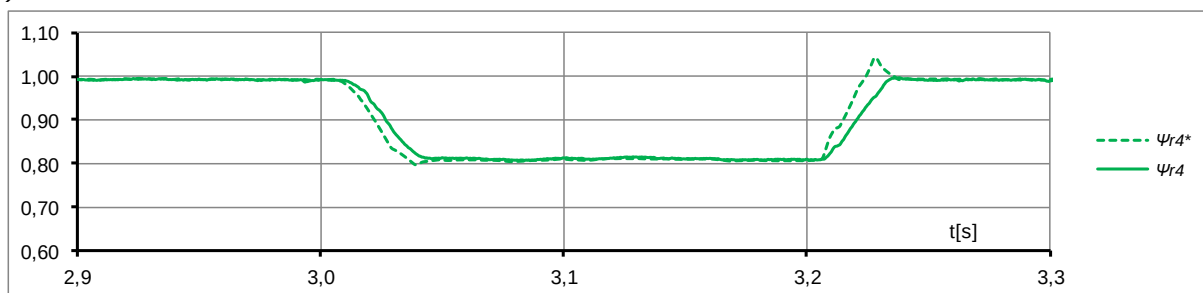
g)



h)



i)



Rys.2.34. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu E, inna skala czasu

Zapad napięcia typu E jest zapadem niesymetrycznym, łagodniejszym dla układu elektromechanicznego w porównaniu z zapadem napięcia typu A.

Na rysunku 2.33e oraz rysunku 2.34c wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

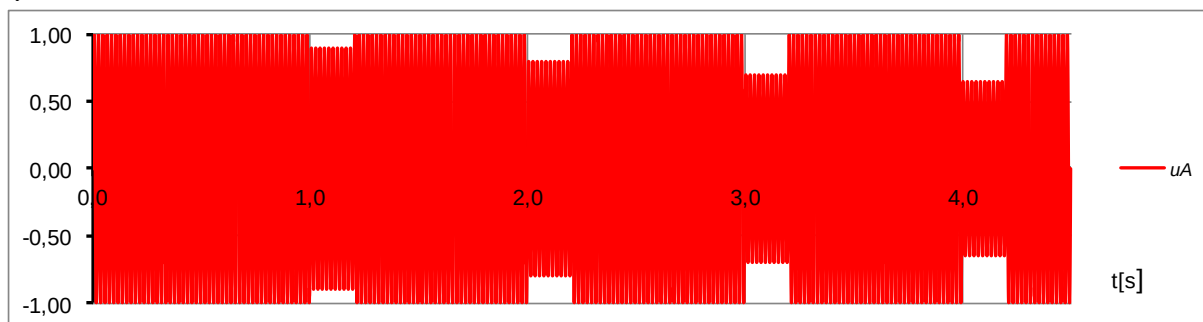
Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość dwukrotnie większą od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 około wartości znamionowej (rysunek 2.33g oraz rysunek 2.34d).

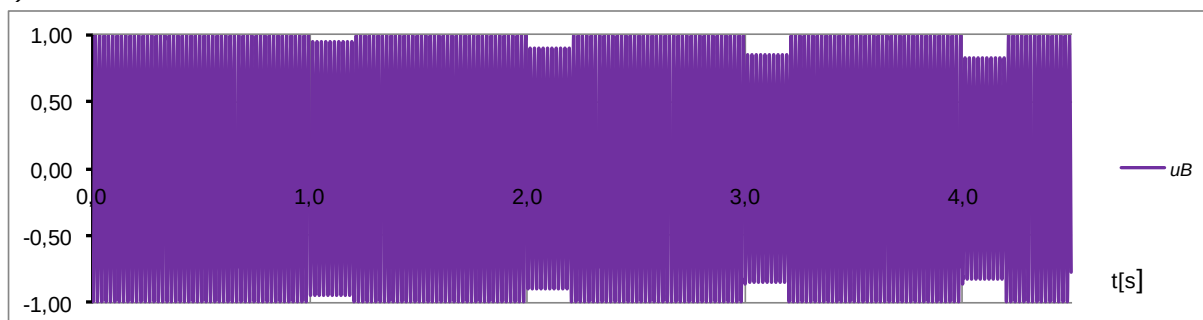
W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana na końcu zapadu napięcia (rysunek 2.34f).

4.4.5. Zapad napięcia typu F

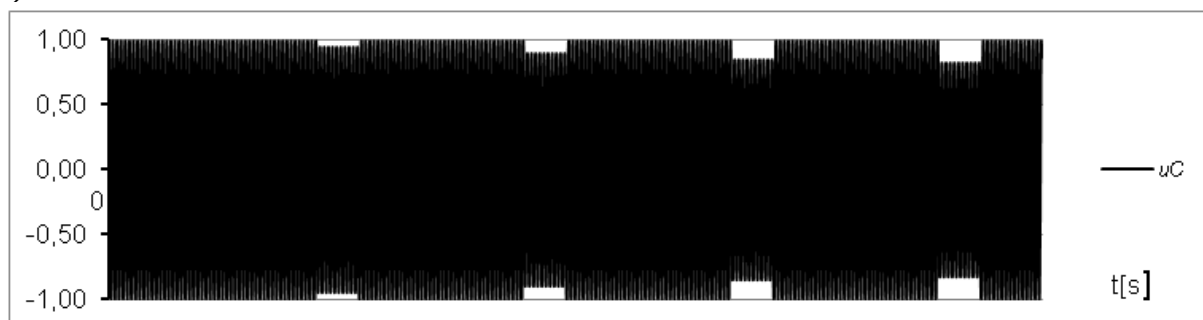
a)



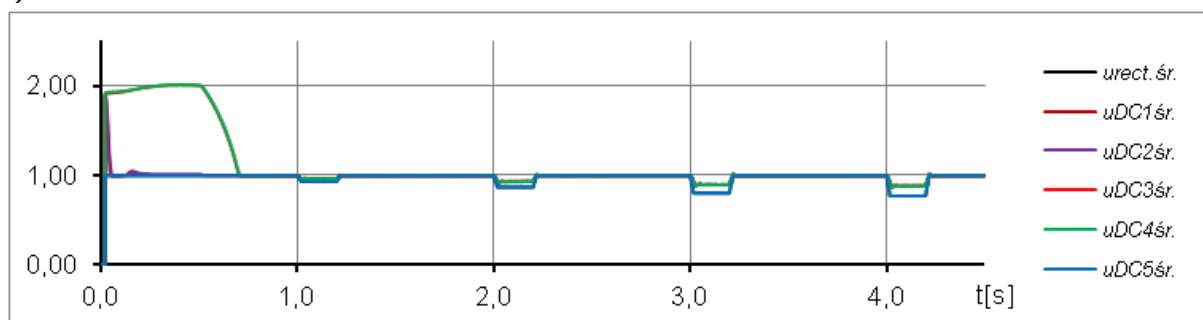
b)



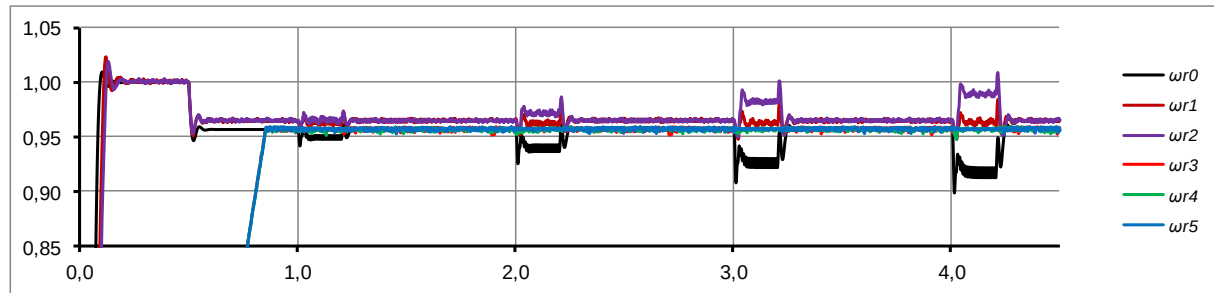
c)



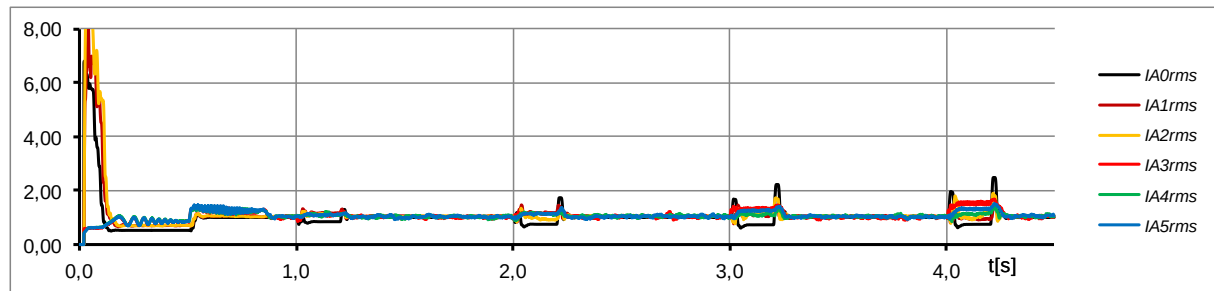
d)



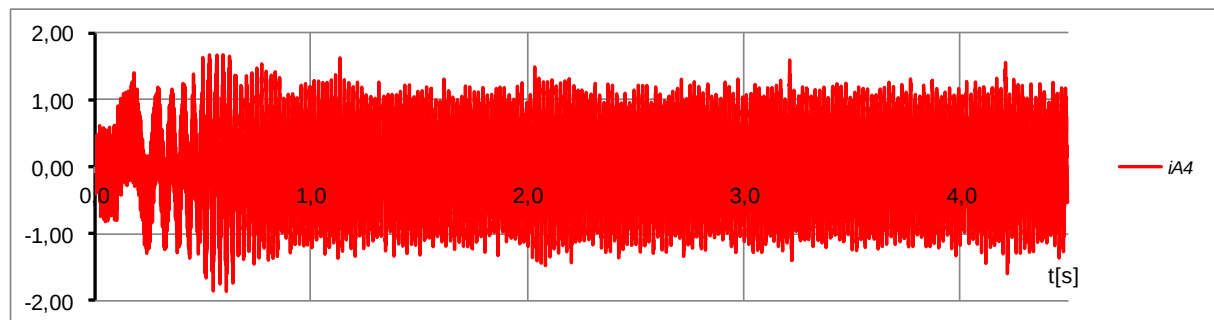
e)



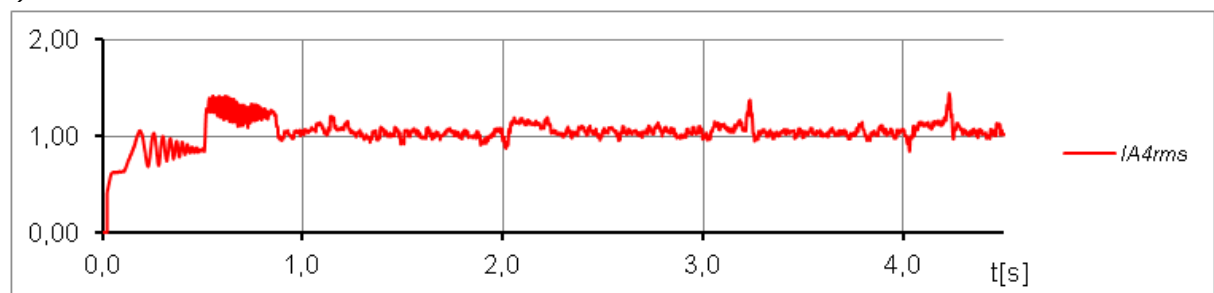
f)



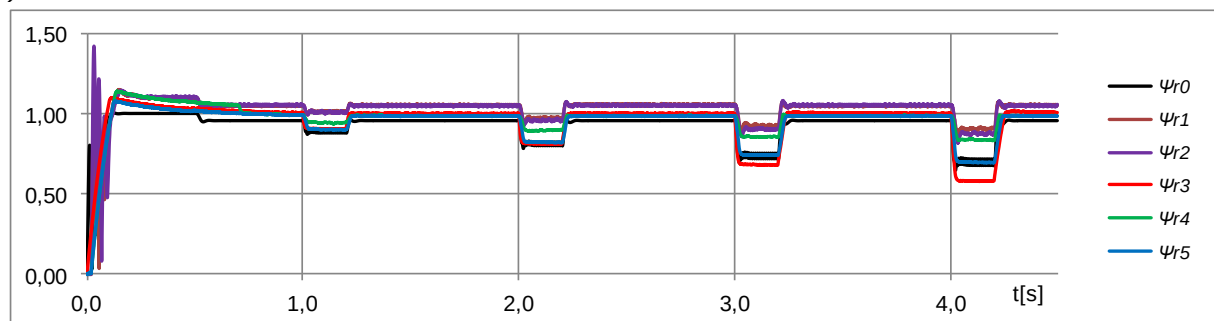
g)



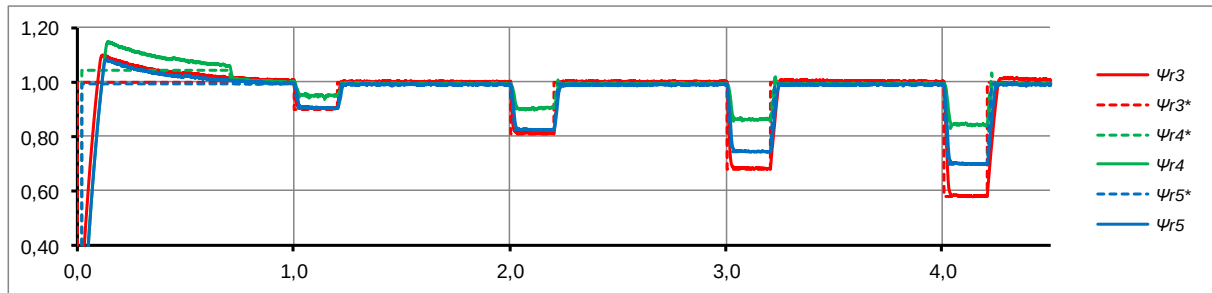
h)



i)

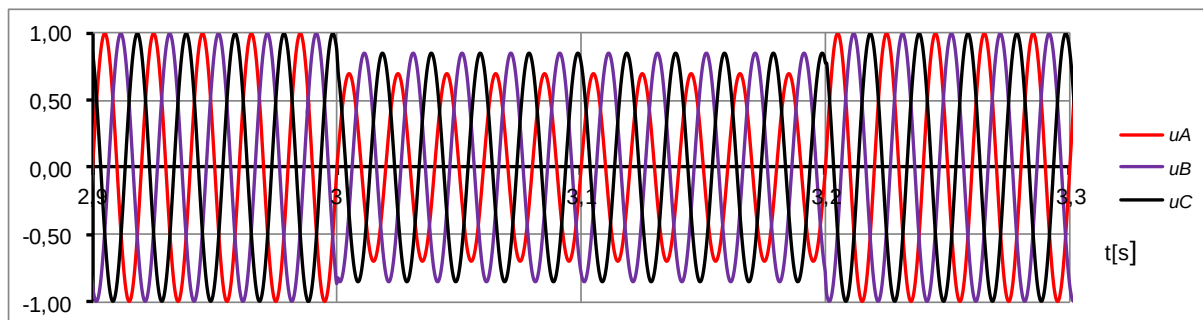


j)

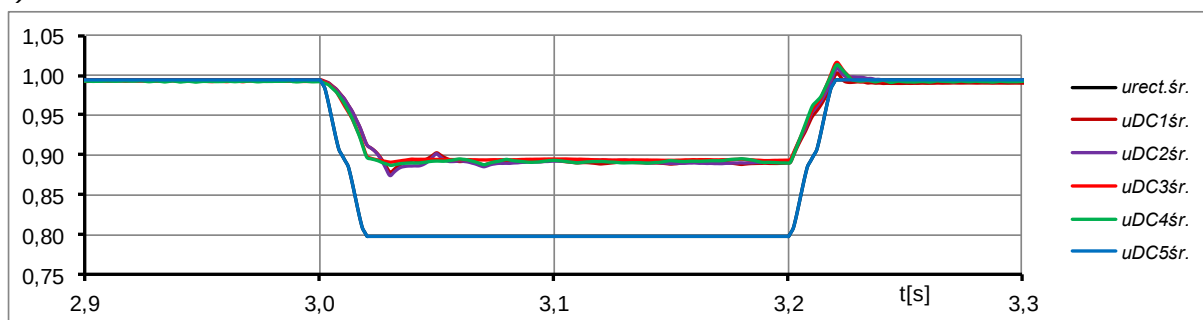


Rys. 2.35. Przebiegi u_{ABC} , $u_{rect.}$, u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu F

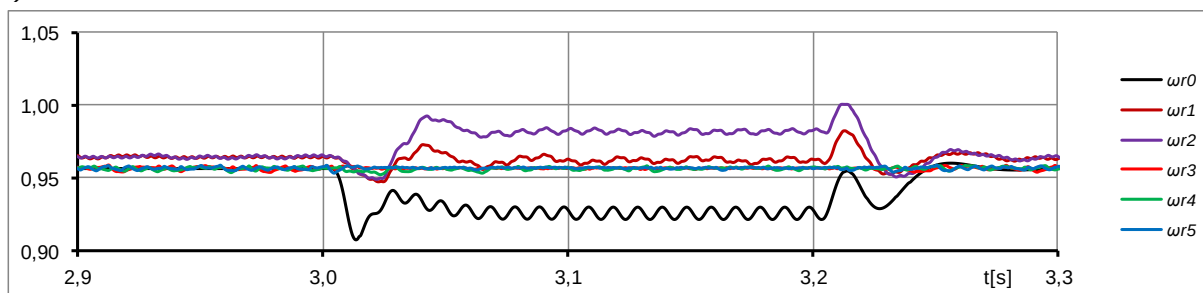
a)



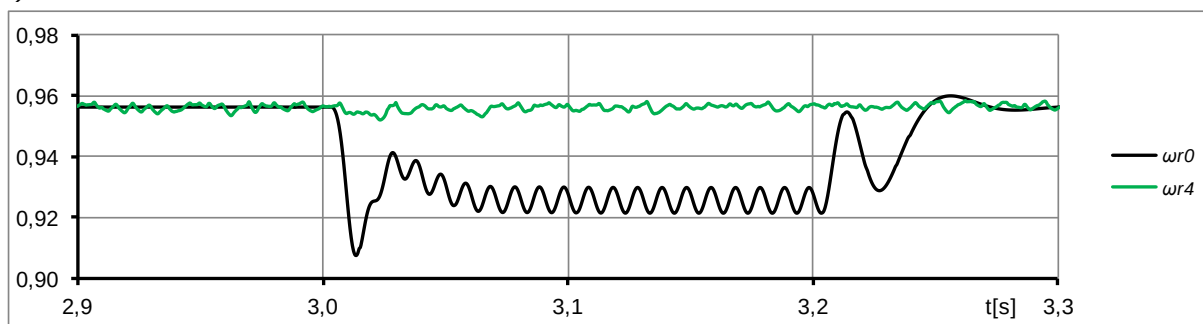
b)



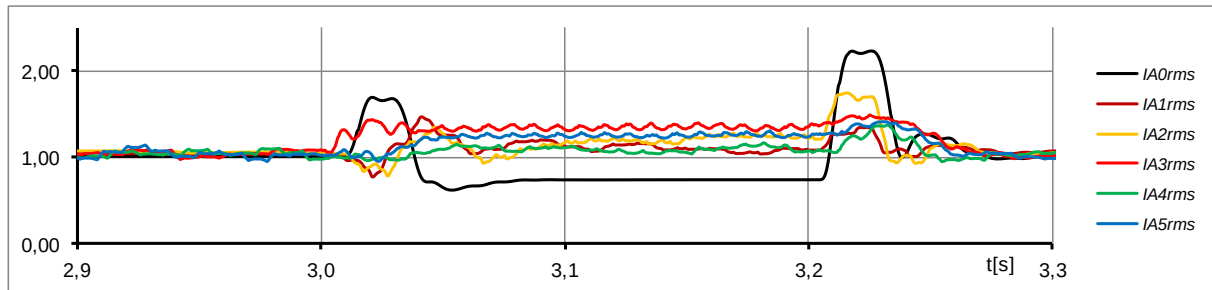
c)



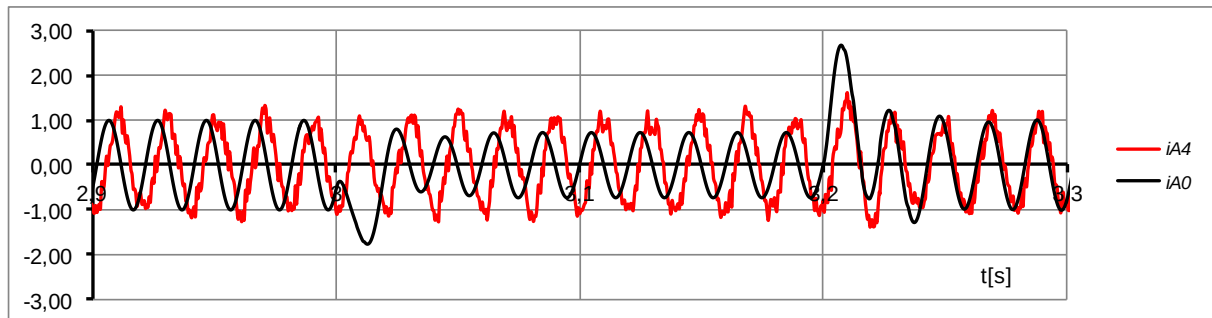
d)



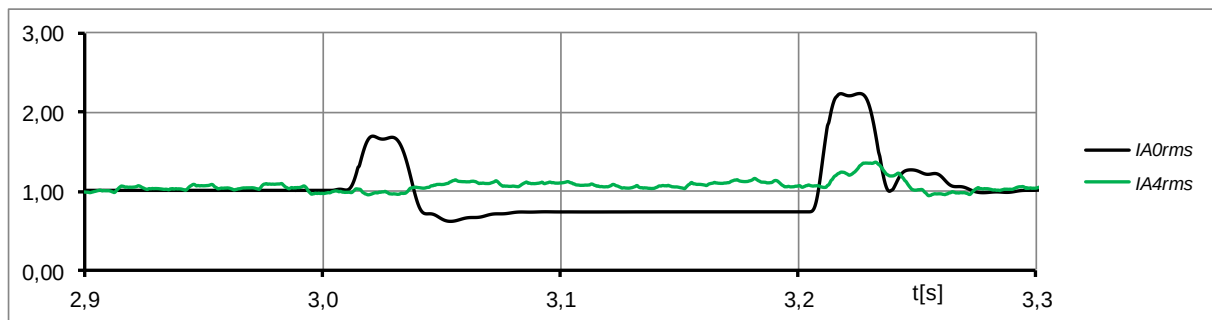
e)



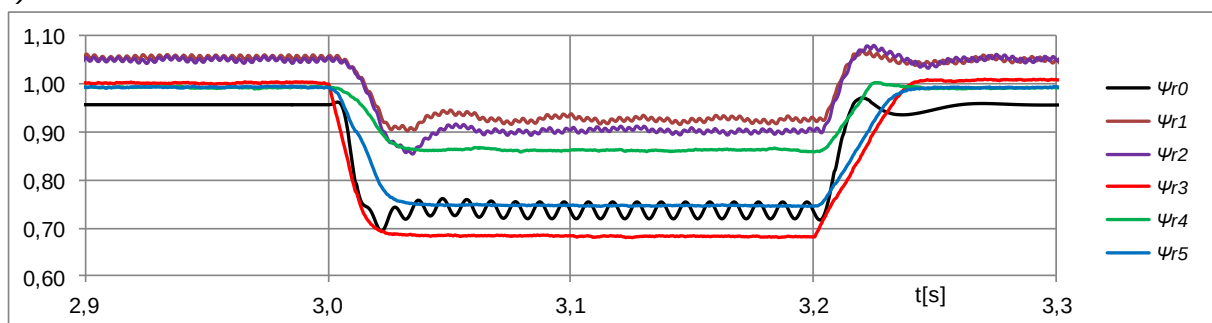
f)



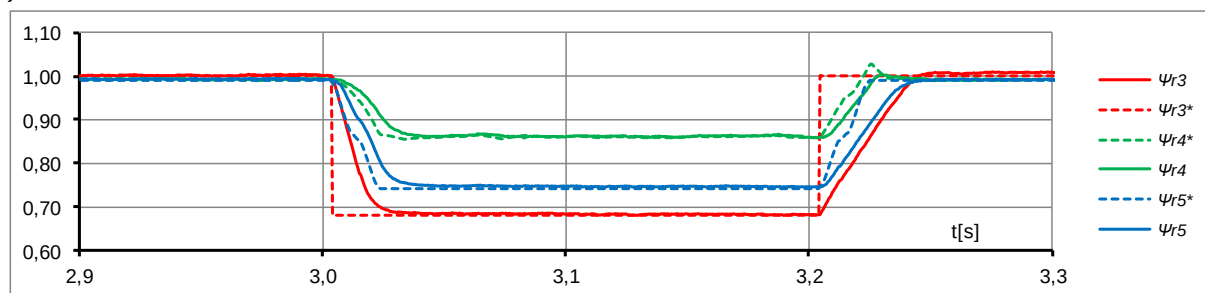
g)



h)



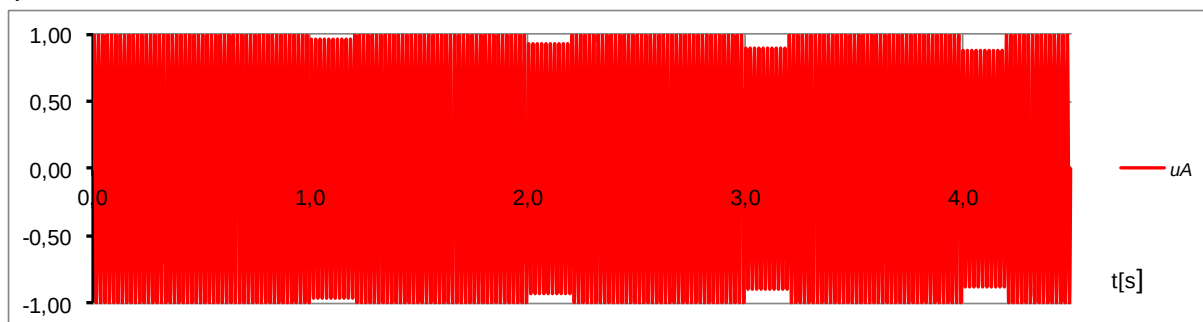
i)



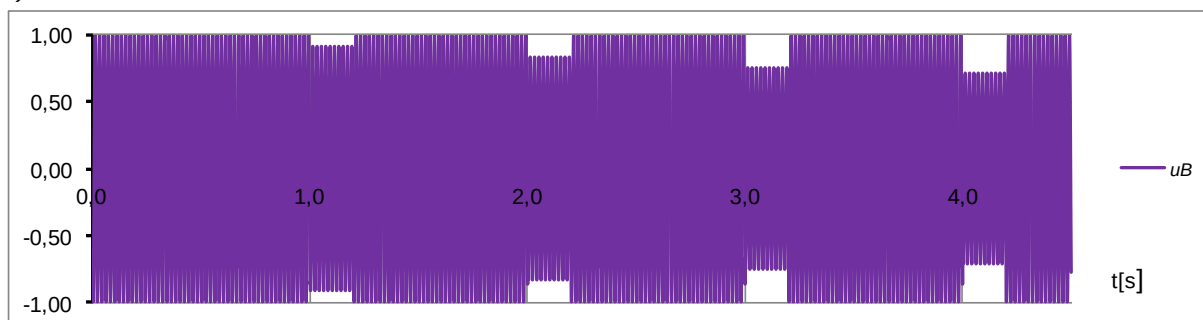
Rys. 2.36. Przebiegi u_{ABC} , $u_{rect.}$, u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu F, inna skala czasu

2.4.7. Zapad napięcia typu G

a)



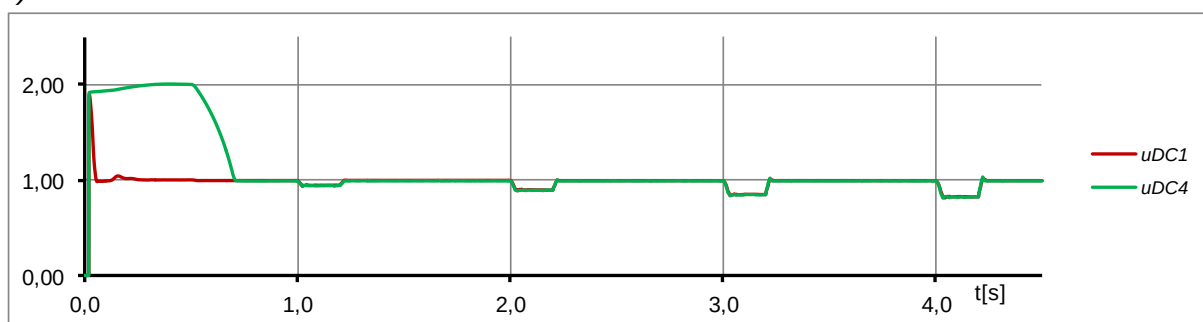
b)



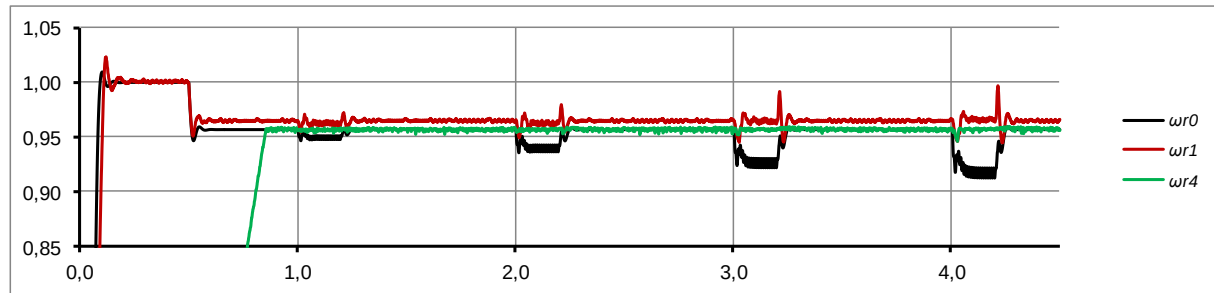
c)



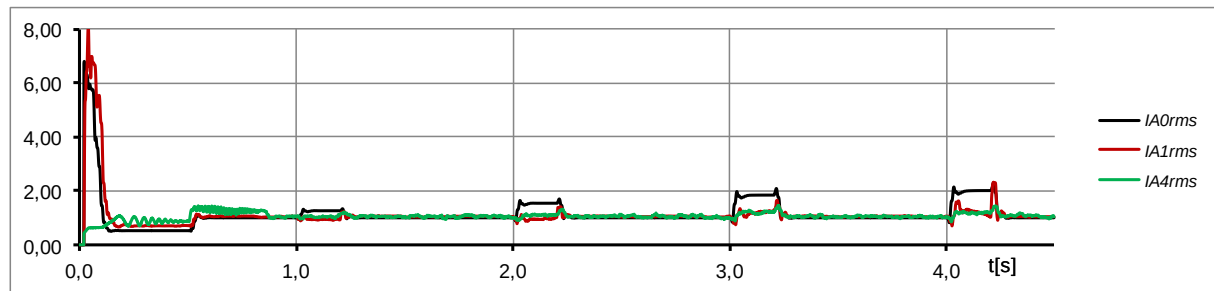
d)



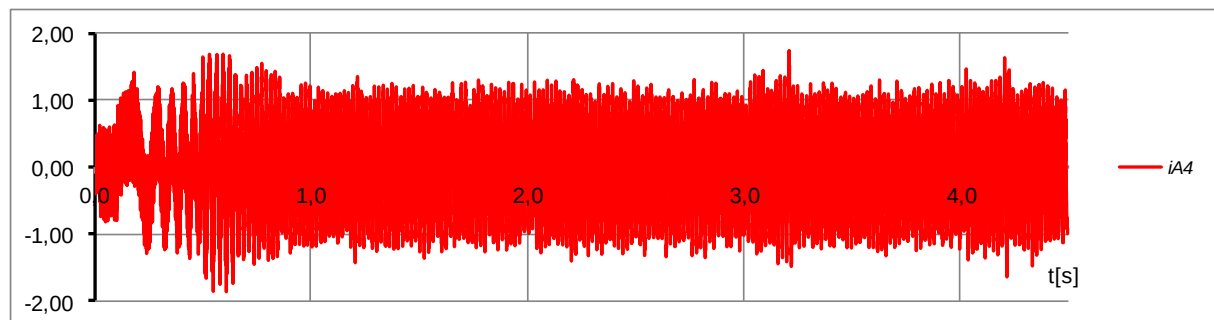
e)



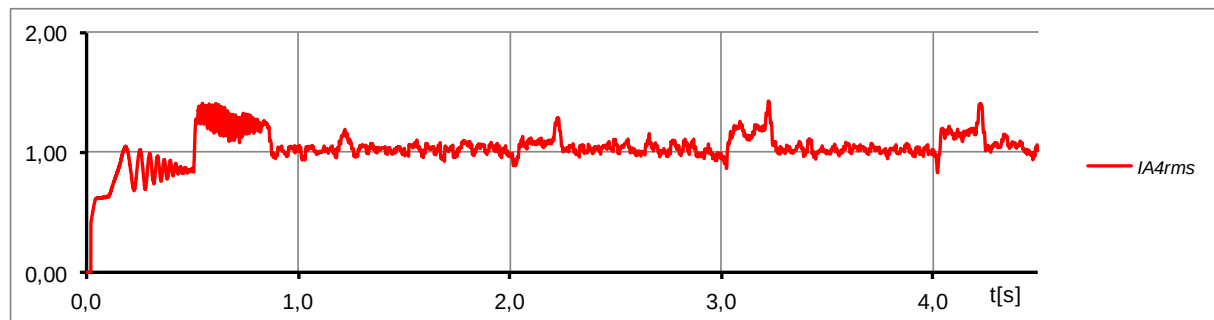
f)



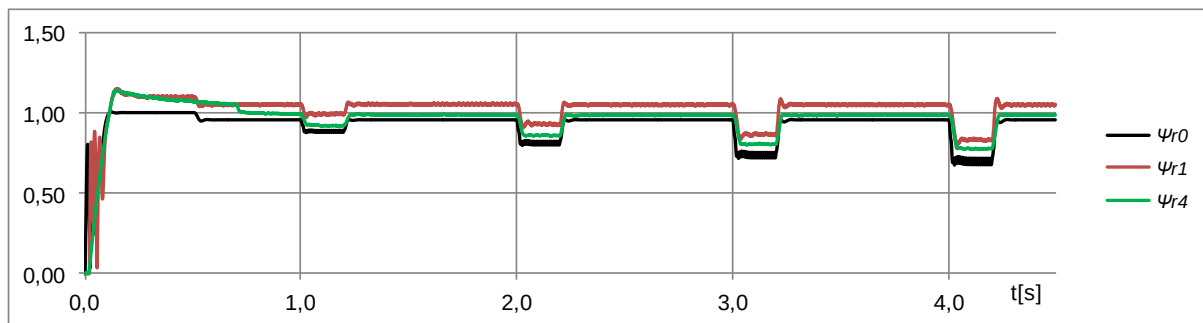
g)



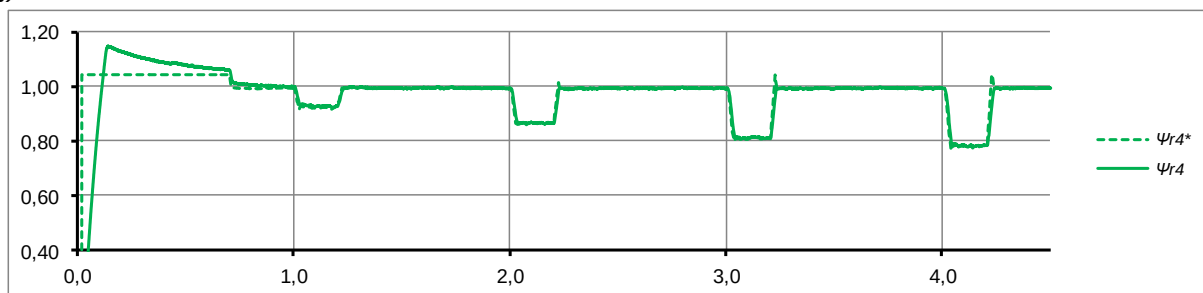
h)



i)

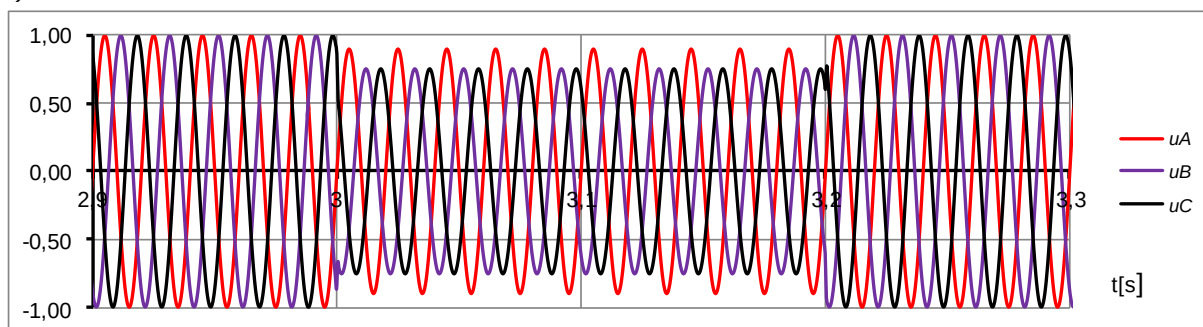


j)

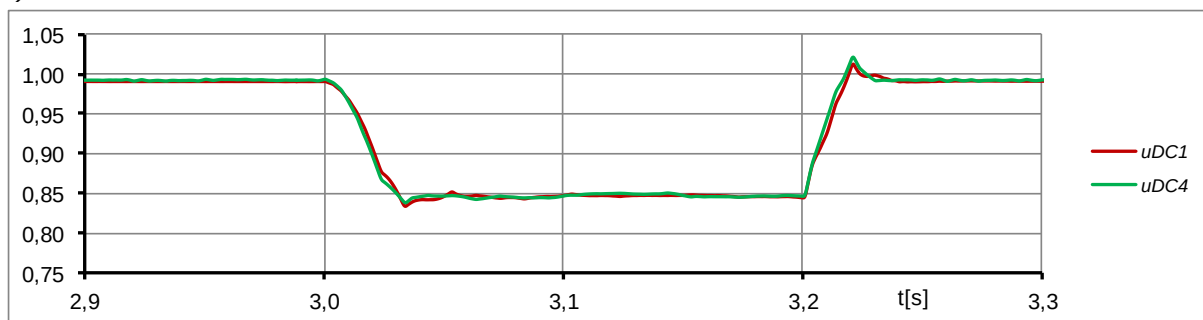


Rys.2.37. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu G

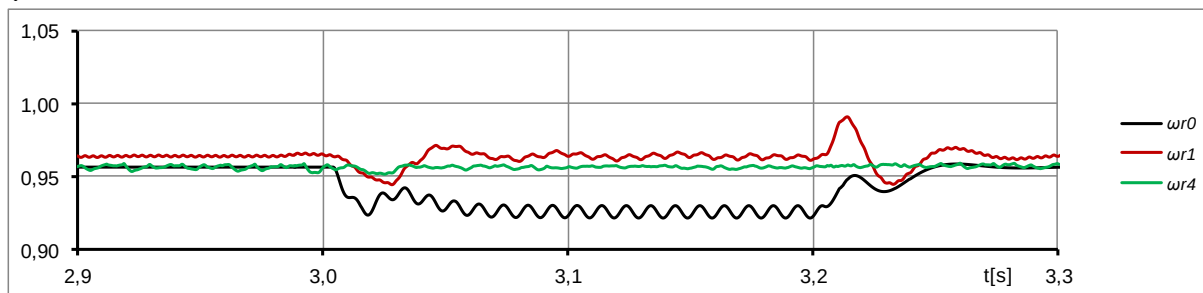
a)



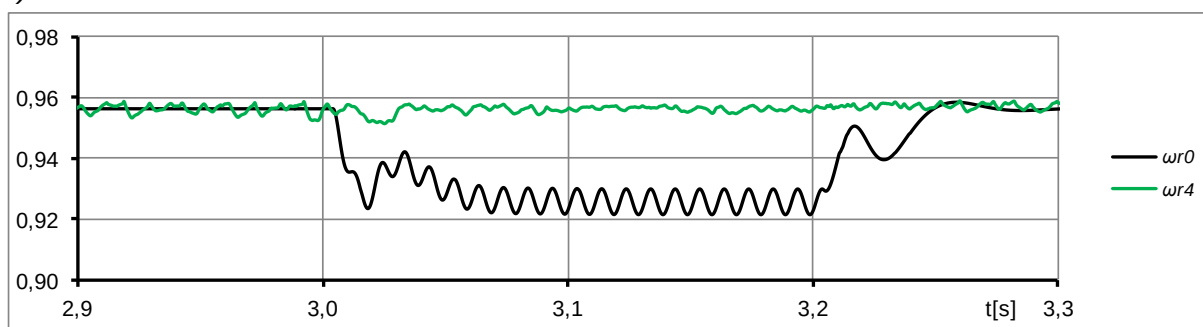
b)



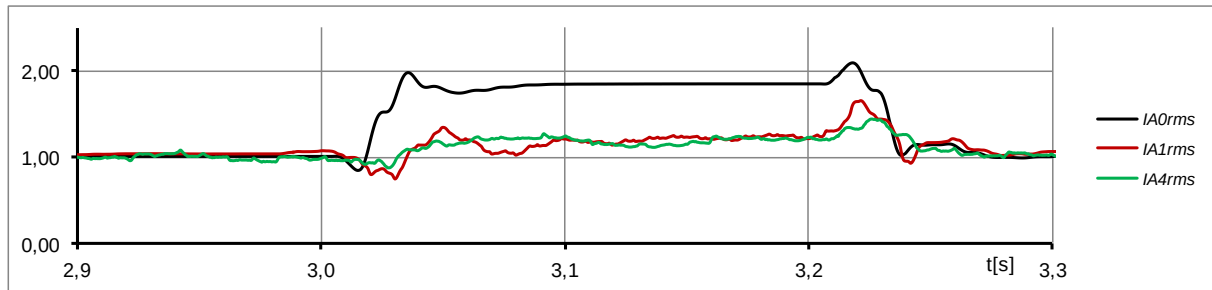
c)



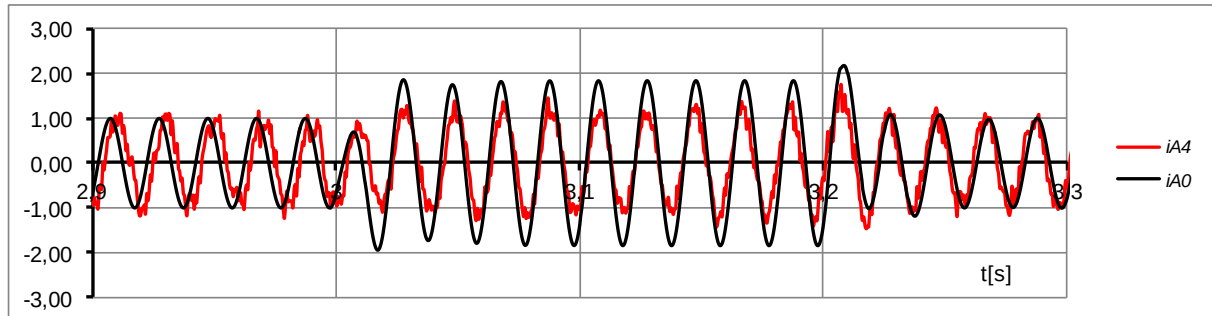
d)



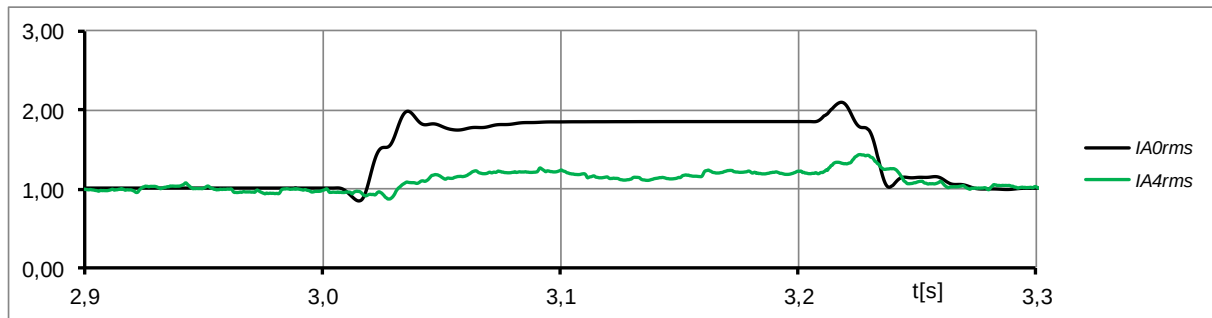
e)



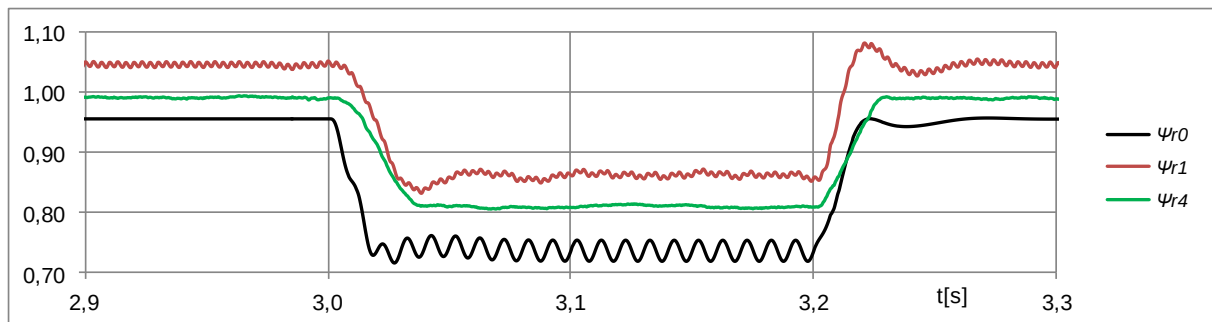
f)



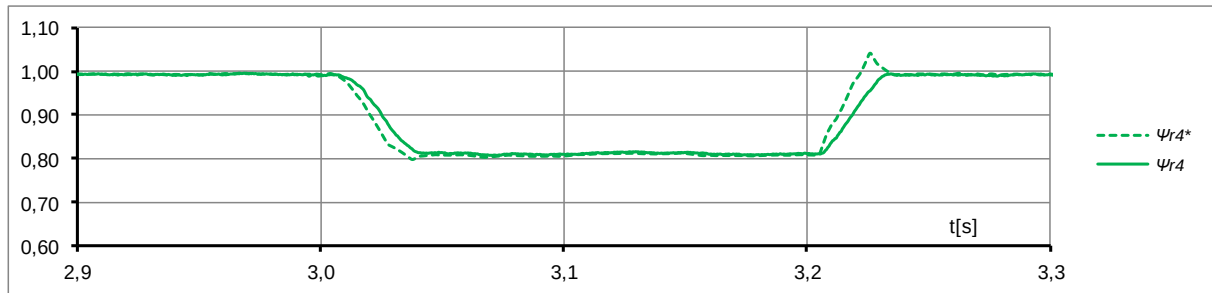
g)



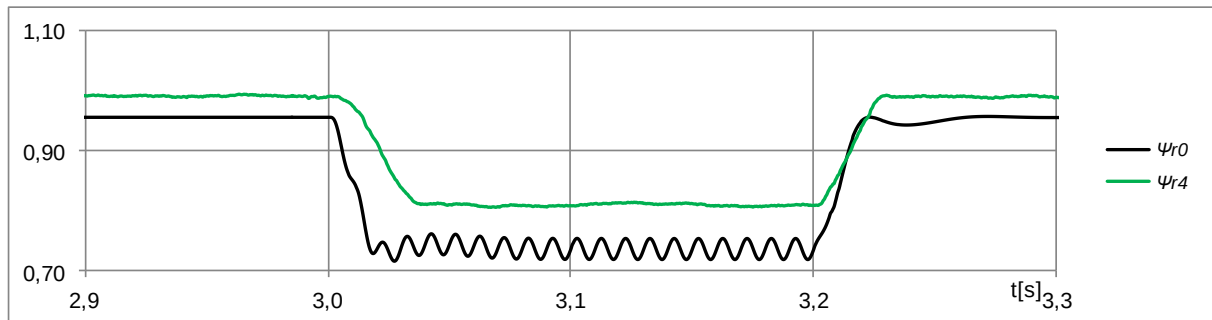
h)



i)



j)



Rys.2.38. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas zapadu napięcia typu G, inna skala czasu

Zapad napięcia typu G jest zapadem niesymetrycznym, łagodniejszym dla układu elektromechanicznego w porównaniu z zapadem napięcia typu A.

Na rysunku 2.37e oraz rysunku 2.38c wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\psi_r^* = f(u_{DC})$.

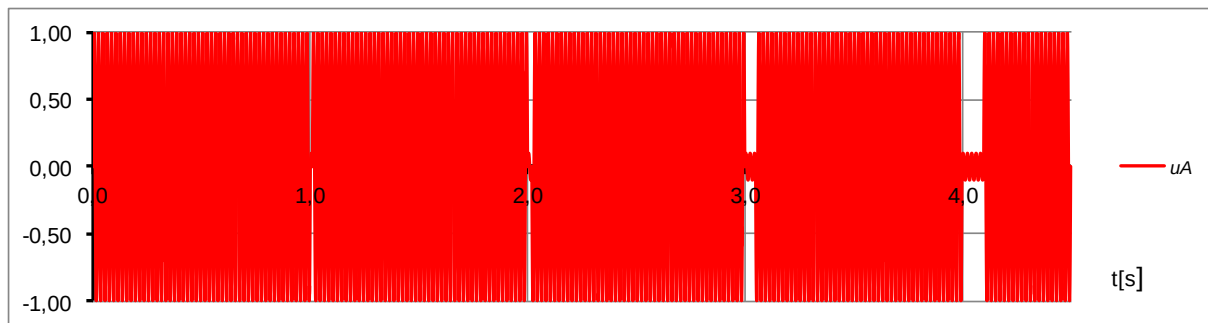
Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość dwukrotnie większą od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 około wartości znamionowej (rysunek 2.37g oraz rysunek 2.38d).

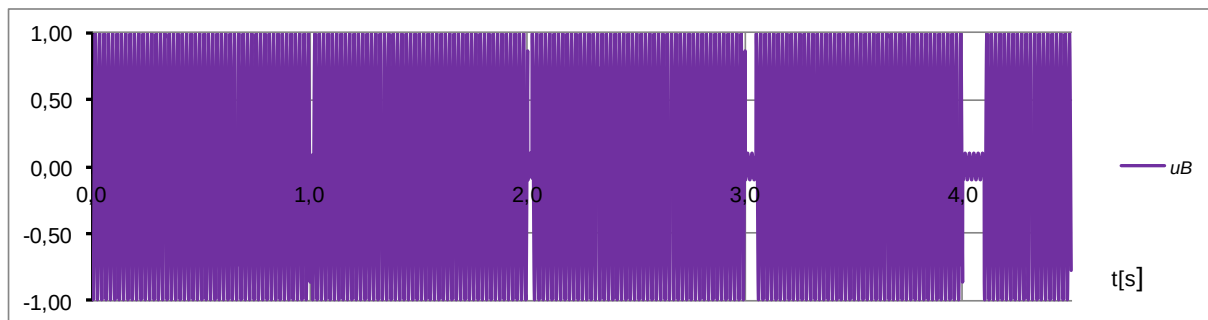
W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana na początku i na końcu zapadu napięcia (rysunek 2.38f).

2.4.8. Przerwy w zasilaniu P

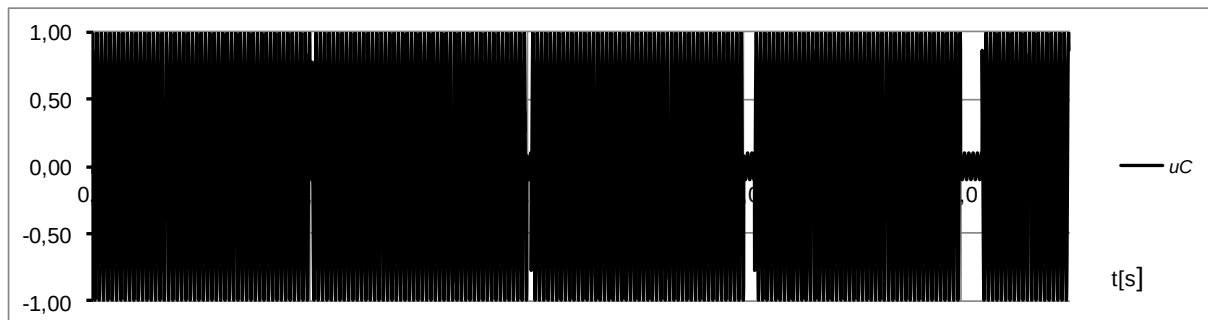
a)



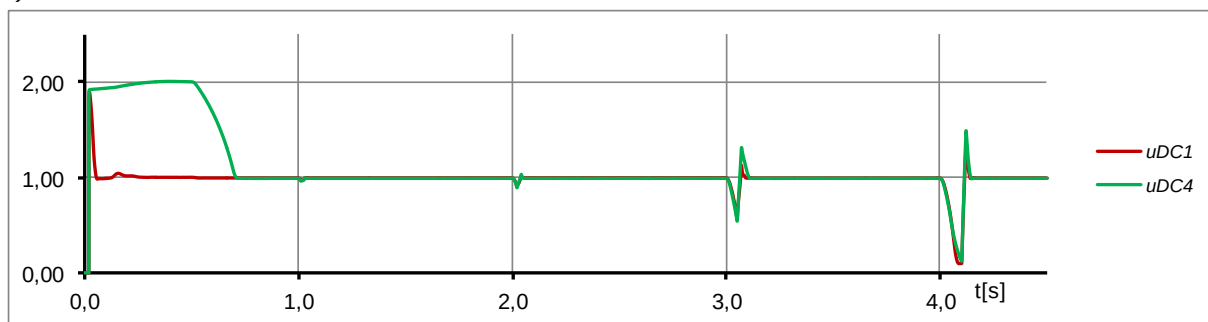
b)



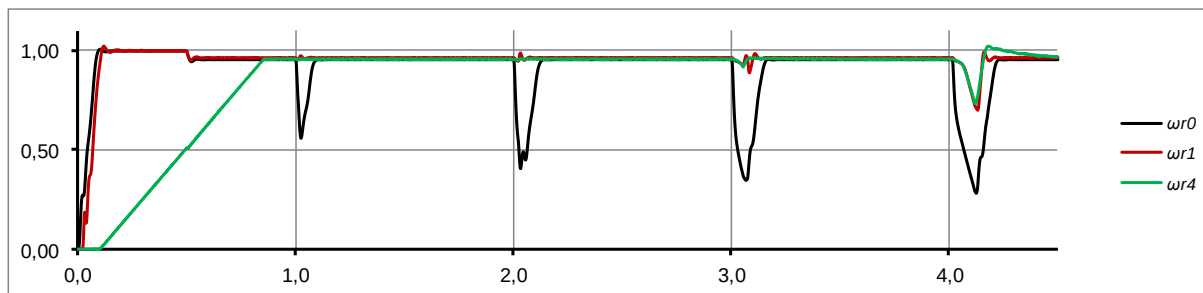
c)



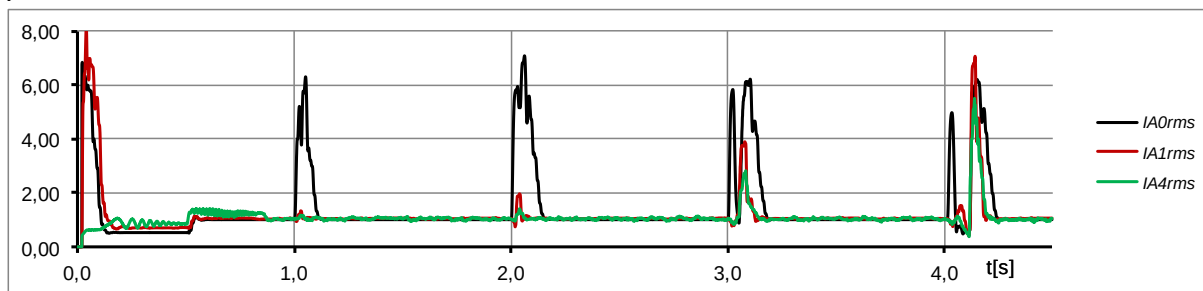
d)



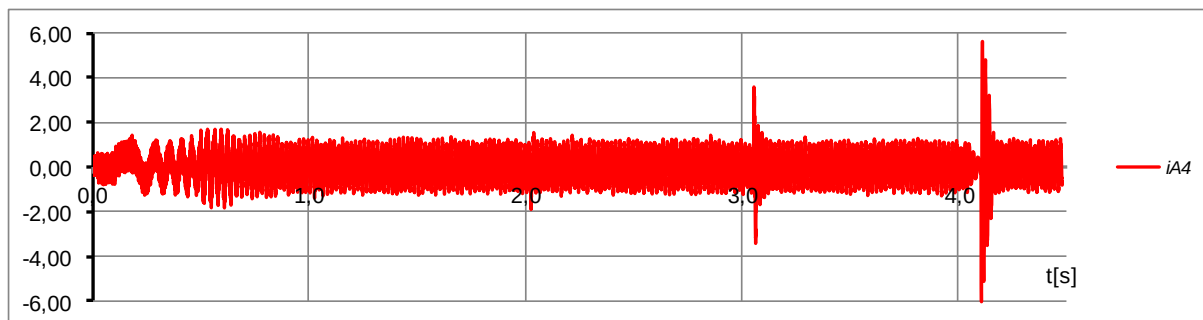
e)



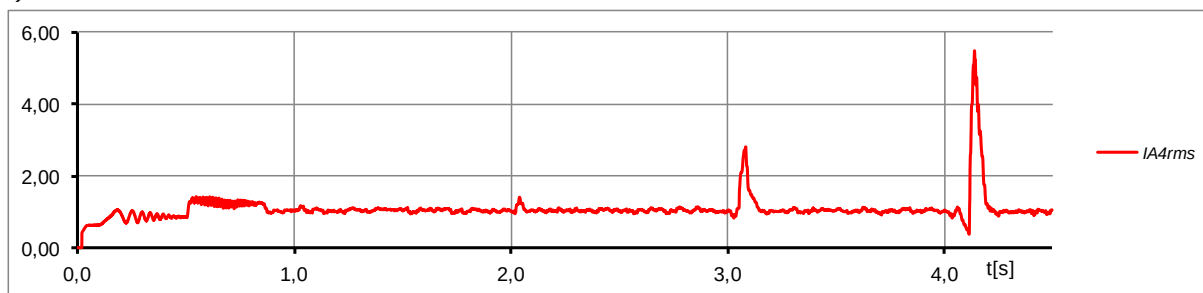
f)



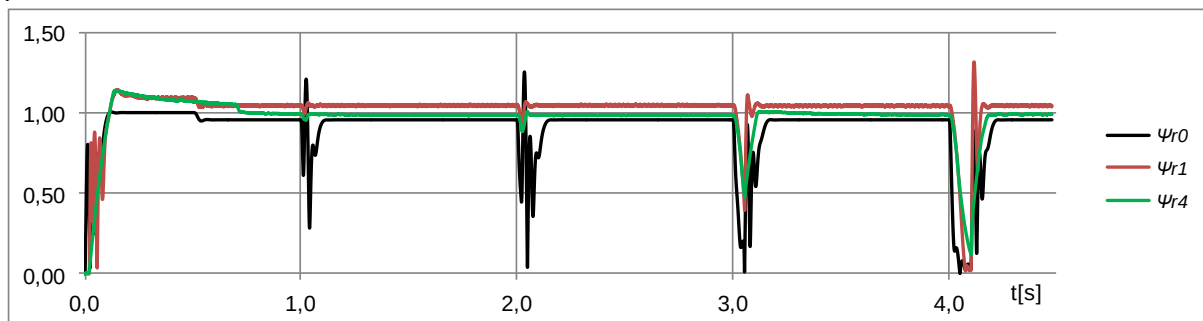
g)



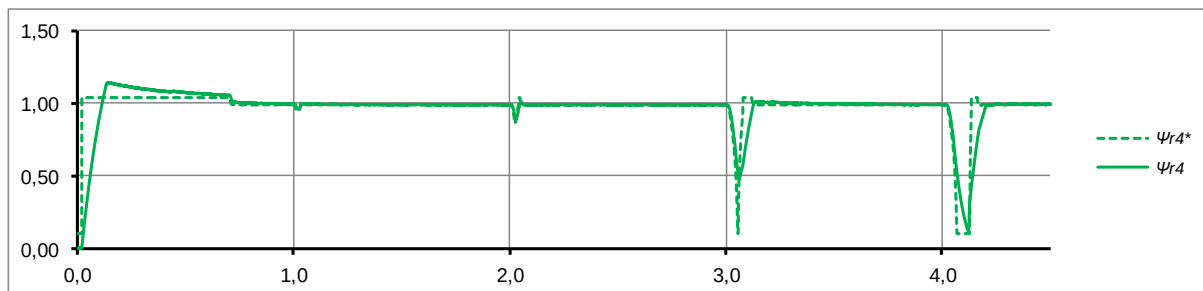
h)



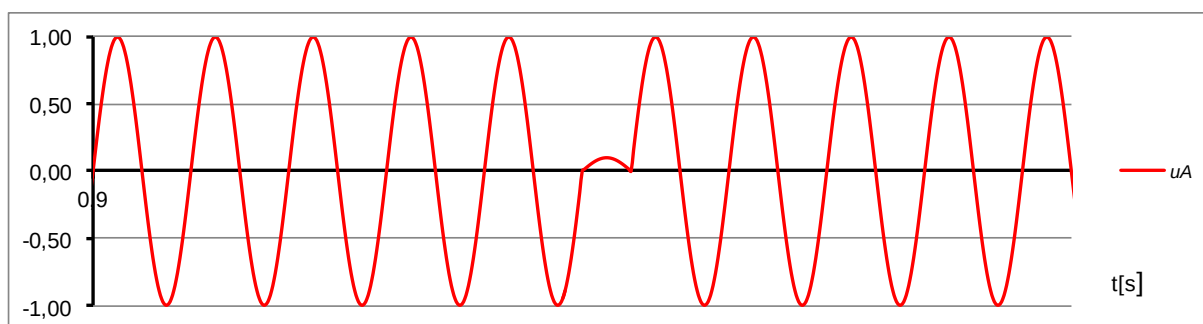
i)



j)

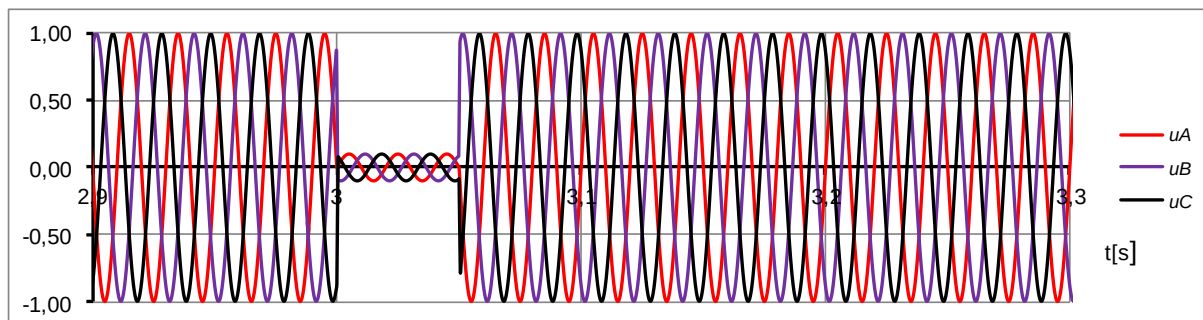


j)

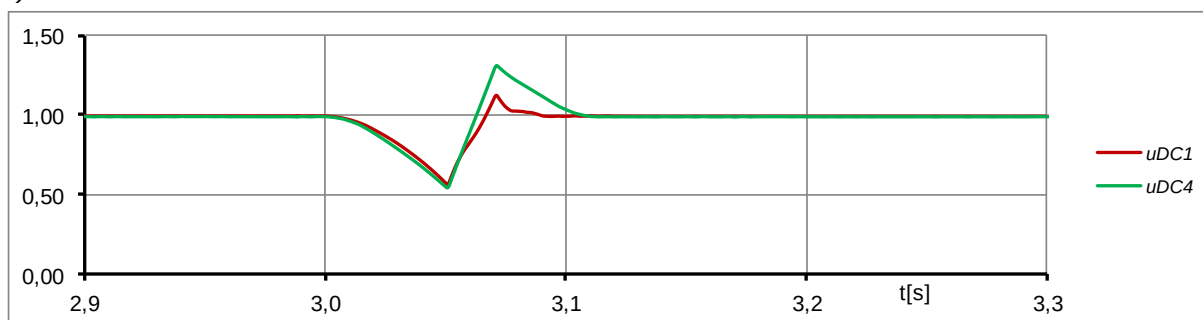


Rys.2.39. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , ψ_r , ψ_r^* podczas przerwy w zasilaniu P

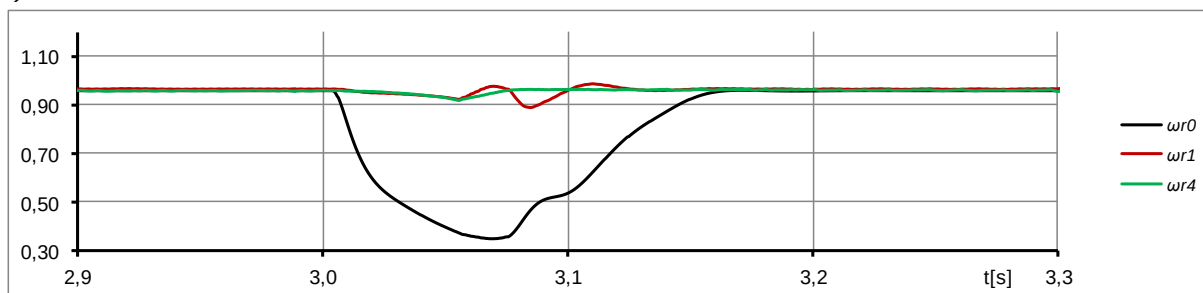
a)



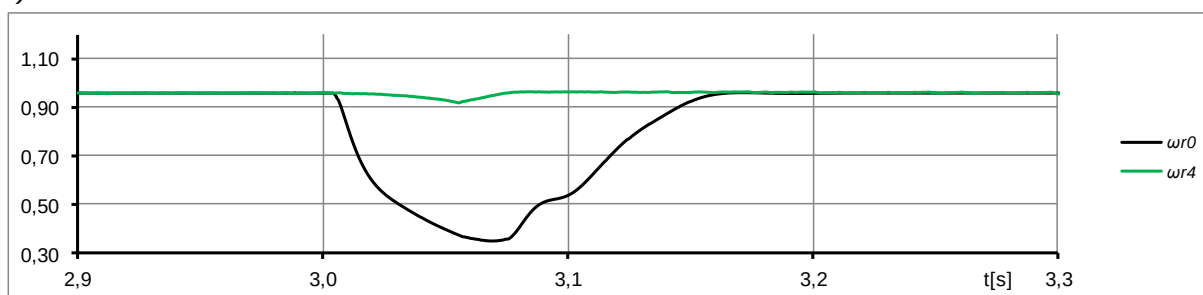
b)



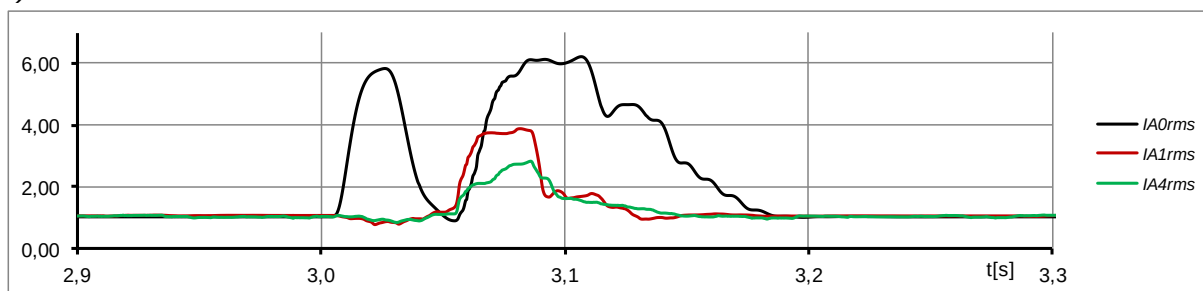
c)



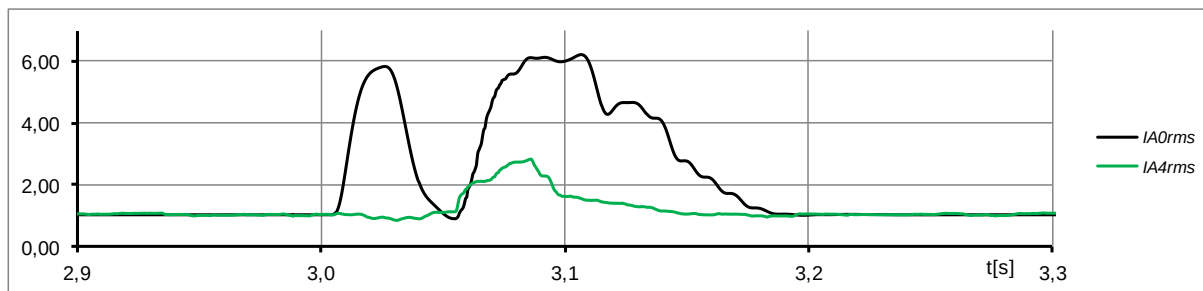
d)



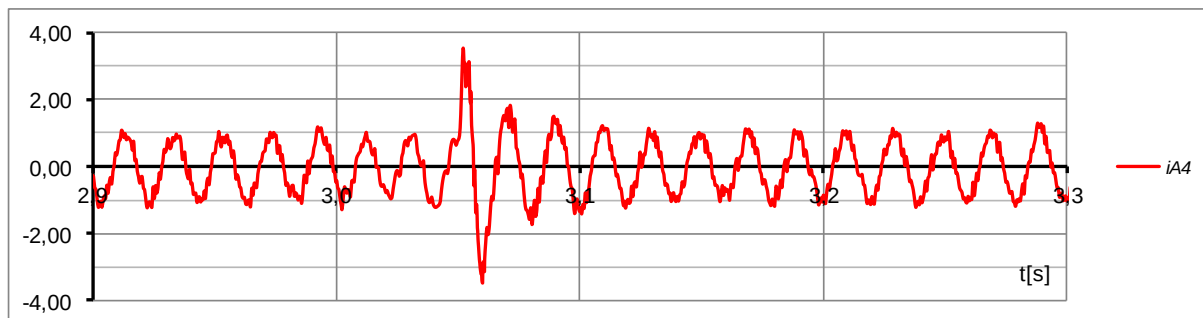
e)



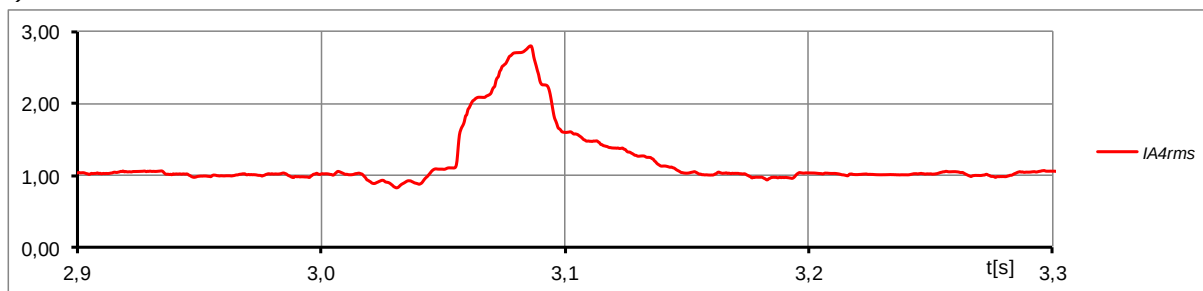
f)



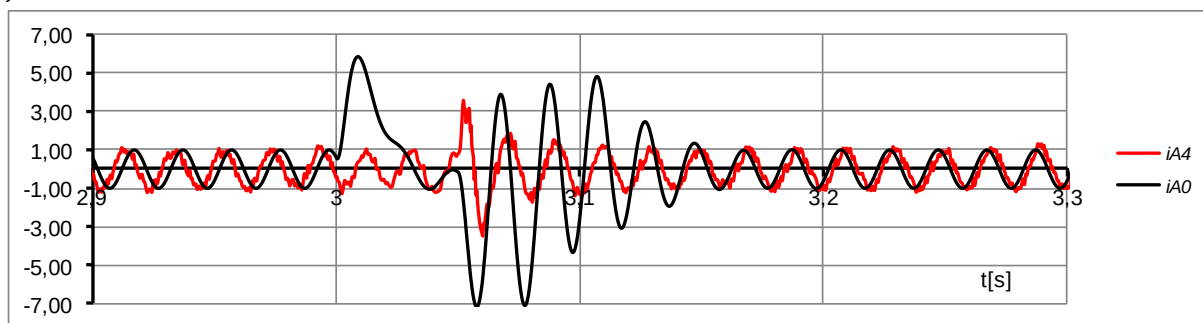
g)



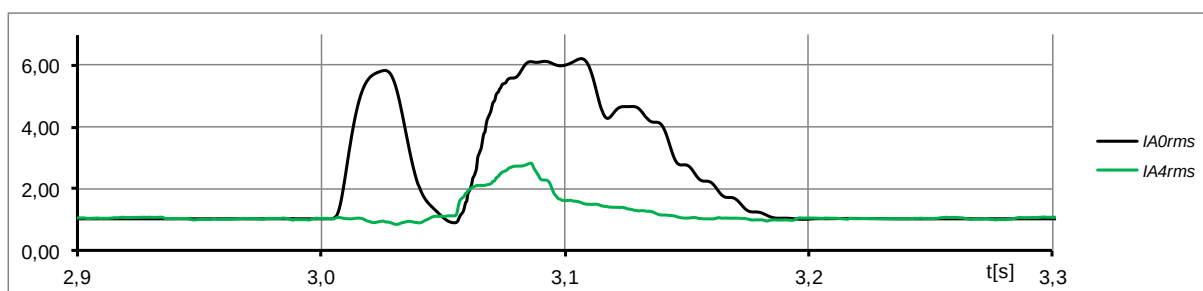
h)



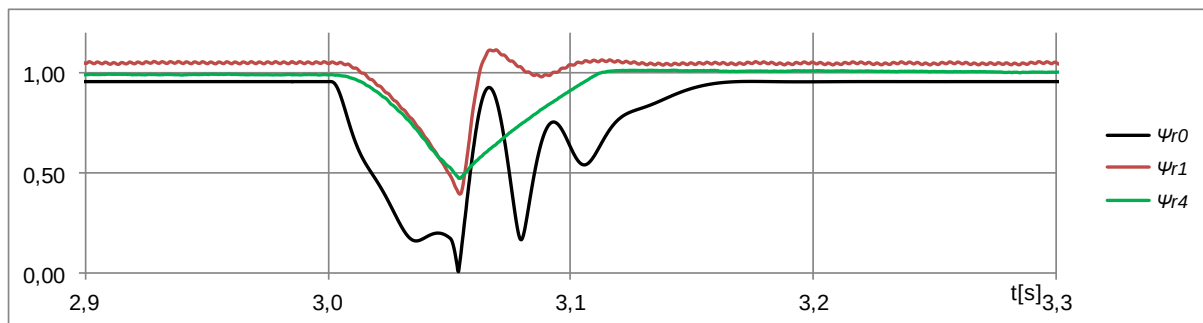
i)



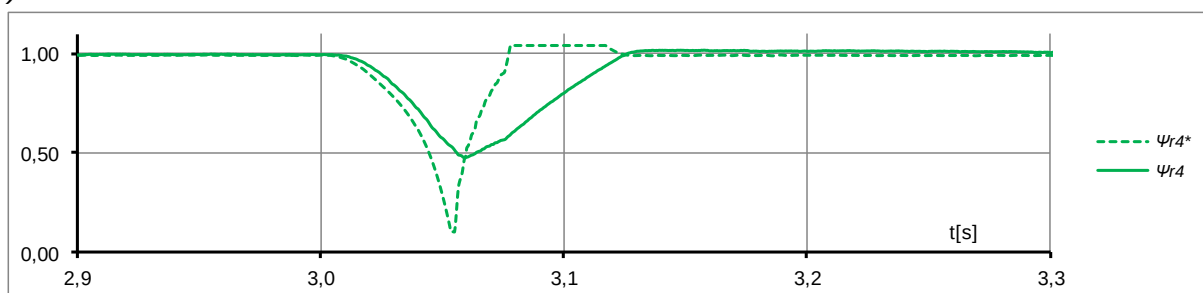
j)



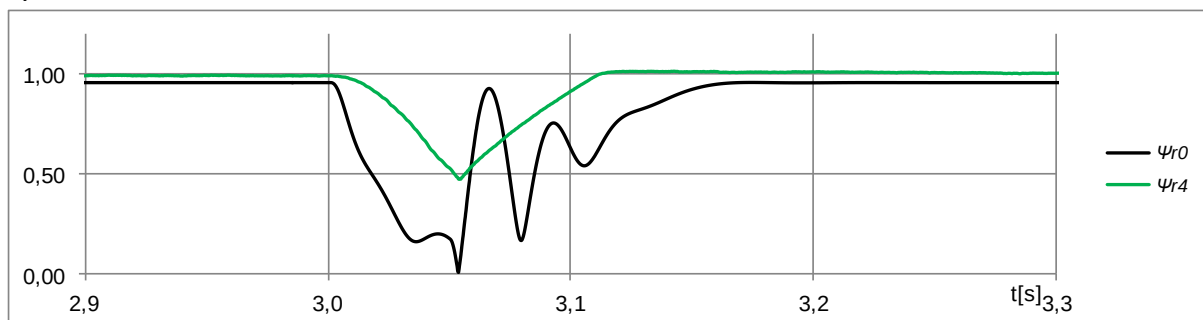
k)



l)



m)



Rys.2.40. Przebiegi u_{ABC} , u_{DC} , ω_r , i_{Arms} , i_{A0} , i_{A4} , Ψ_r , Ψ_r^* podczas przerwy w zasilaniu P, inna skala czasu

Przerwy w zasilaniu występują symetrycznie we wszystkich fazach.

Na rysunku 2.39e oraz rysunku 2.40c wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość sześciokrotnie większą od wartości znamionowej, zaś w przypadku 4 około dwukrotnie większą od wartości znamionowej (rysunek 2.39f oraz rysunek 2.40g).

W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana (rysunek 2.40i).

2.5. Wnioski

Zapad napięcia typu A jest zapadem symetrycznym, najbardziej trudnym dla układu elektromechanicznego. Każdy inny typ zapadu napięcia ma łagodniejszy wpływ na układ elektromechaniczny.

W każdym przypadku zapadu oraz krótkich przerw w zasilaniu wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

W każdym przypadku zapadu oraz krótkich przerw w zasilaniu najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie regulacji z zadawaniem $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość czterokrotnie większą od znamionowej, zaś w przypadku 4 poniżej dwukrotnej.

W czasie zapadu napięcia zwiększa się częstotliwość napięcia zasilania silnika, przykładowo w przypadku zapadu typu A (70%, 200 [ms]) do około 55,6 [Hz].

W przypadku zasilania bezpośrednio z sieci następuje mocne przeregulowanie prądu stojana na początku i końcu zapadu napięcia.

Również podczas przerw w zasilaniu wyraźnie widać różnice pomiędzy prędkościami w przypadku zasilania bezpośredniego i w przypadku zasilania przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Najbardziej korzystne jest zasilanie przez przemiennik częstotliwości VSI w układzie zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$.

Wartość prądu stojana w przypadku zasilania bezpośredniego osiąga wartość sześciokrotnie większą od znamionowej, zaś w przypadku 4 około dwukrotnie większą od znamionowej.

3. Pomiary laboratoryjne odporności układu elektromechanicznego z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, w warunkach zapadu napięcia i krótkich przerw w zasilaniu

3.1. Opis stanowiska laboratoryjnego

Laboratoryjny układ pomiarowy (rysunek 3.1 oraz rysunek 3.2) zrealizowany wg schematu przedstawionego rysunku 3.3 składa się :

- z układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, zasilanym przez przemiennik częstotliwości VSI,
- z układu regulacji i sterowania zrealizowanego w środowisku dSPACE, umożliwiającego symulacje w czasie rzeczywistym, po wcześniejszym przygotowaniu programu w środowisku MATLAB – SIMULINK, następnie przeprowadzeniu kompilacji do środowiska dSPACE [22], [87] (rysunek 3.5 - 3.6),
- z obciążenia silnika momentem zrealizowanego przy pomocy generatora prądu stałego.

Dane znamionowe silnika :

$$P_N = 5,5 \text{ [kW]}$$

$$U_N = 380/220 \text{ [V]}, 50 \text{ [Hz]}$$

$$I_N = 11/19 \text{ [A]}$$

$$n_N = 1450 \text{ [obr/min]}$$

$$\cos\varphi = 0,86$$

Dane znamionowe generatora prądu stałego:

$$P_N = 3,5 \text{ [kW]}$$

$$U_N = 115 \text{ [V]}$$

$$I_N = 30,4 \text{ [A]}$$

$$n_N = 1450 \text{ [obr/min]}$$

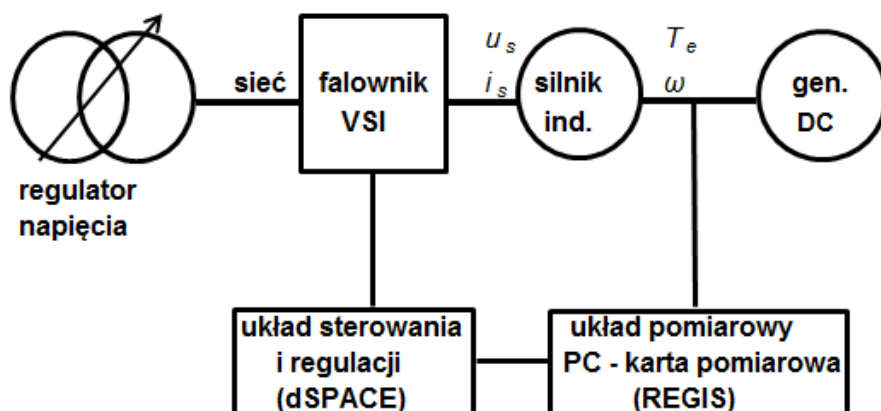
$$I_w = 1,45 \text{ [A]}$$



Rys.3.1. Stanowisko pomiarowe układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym

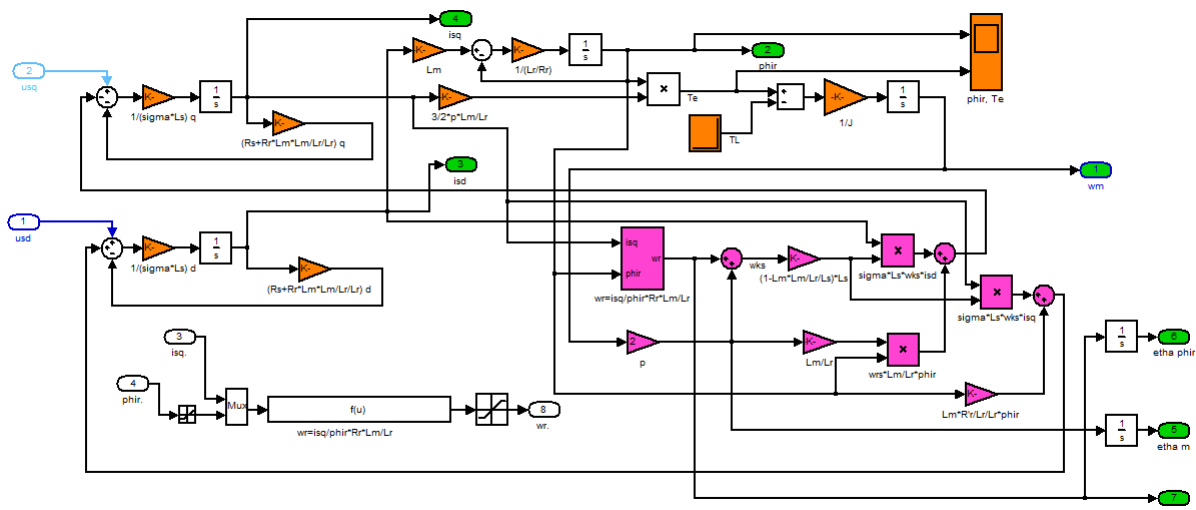


Rys.3.2. Generator CHROMA wykorzystany do symulacji zapadów napięcia typów A – G wg klasyfikacji Bollena oraz przerw w zasilaniu



Rys.3.3. Laboratoryjny układ pomiarowy z silnikiem indukcyjnym

Wykorzystano model silnika indukcyjnego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika (rysunek 3.4), w środowisku MATLAB SIMULINK, który przedstawiono na rysunku 3.4 .

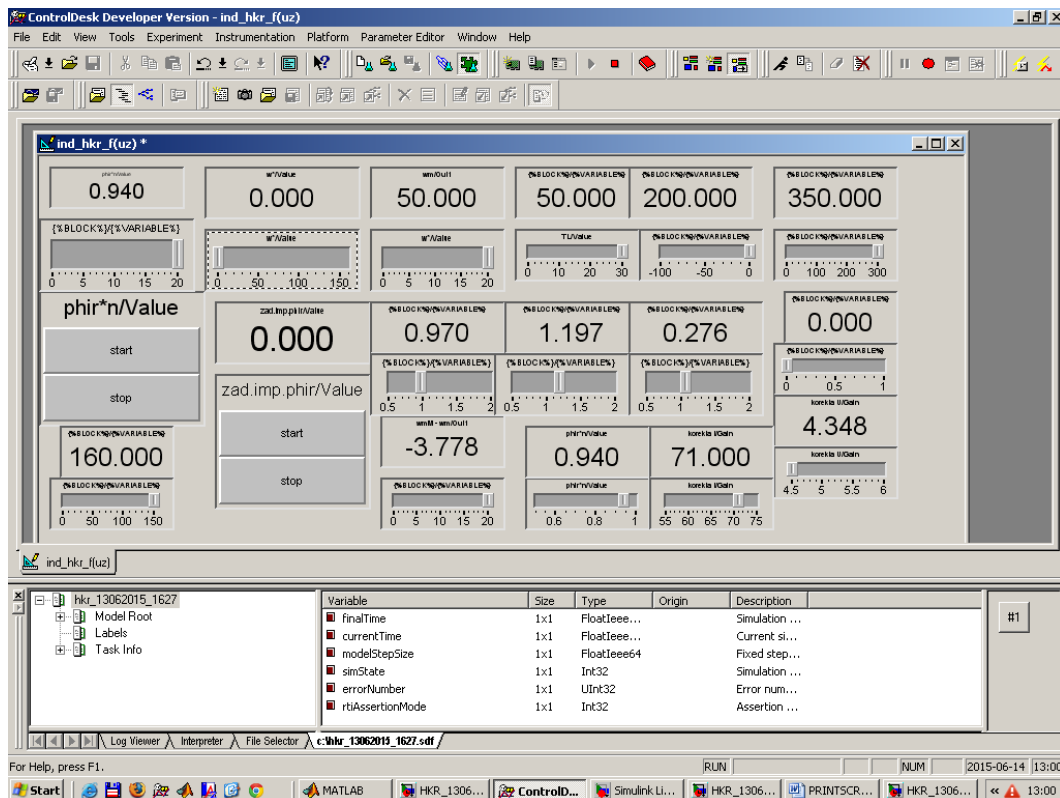


Rys.3.4. Model silnika indukcyjnego we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnikiem, w środowisku MATLAB SIMULINK

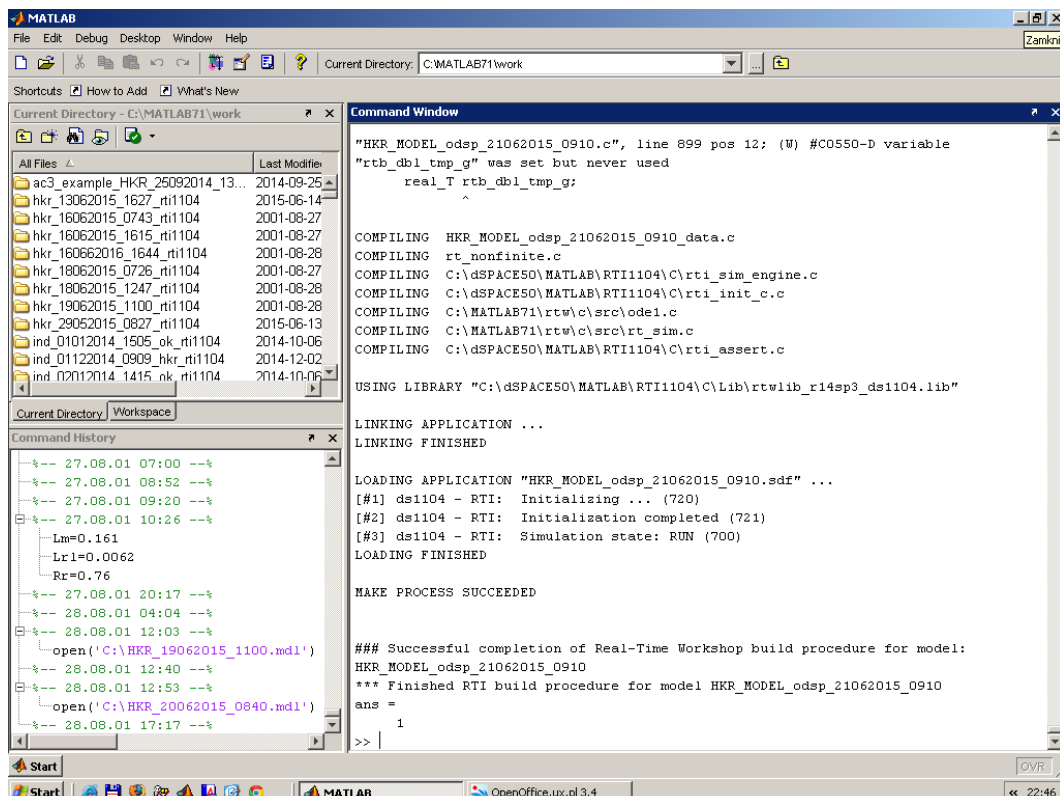
Podczas pomiarów laboratoryjnych zastosowano model równoległy silnika we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika, z korektą napięć $u_{sd} = f(u_{DC})$ oraz $u_{sq} = f(u_{DC})$ – co w sposób pośredni informuje model silnika indukcyjnego o aktualnym poziomie napięcia sieci zasilającej przemiennik częstotliwości.

W tym celu skorzystano z obliczeń przedstawionych w punkcie 2.1 .

Wielkości pomiarowe zapisywano przy pomocy karty pomiarowej podłączonej do komputera z wykorzystaniem programu REGIS [64] .



Rys.3.5. Przykładowy ControlDesk do obsługi dSPACE



Rys.3.6. Komunikat potwierdzający poprawność przeprowadzonej kompilacji MATLAB – SIMULINK -> dSPACE

Zaprogramowanie (załącznik 3) zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu, celem wykorzystania do pomiarów laboratoryjnych (alternatywne zasilanie przemiennika częstotliwości) przeprowadzono na generatorze CHROMA [63] (rysunek 3.2) .

3.2. Wstępne testy zaproponowanego układu regulacji w środowisku dSPACE

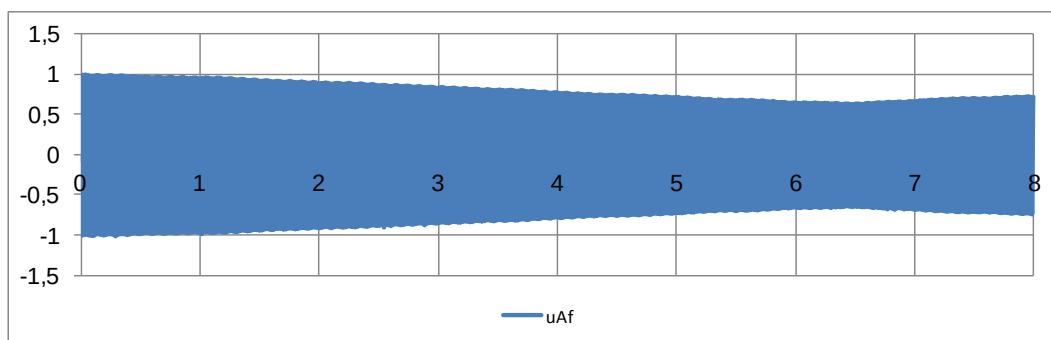
Strumień Ψ_{rN}^* określono wstępnie wg [44], następnie zweryfikowano praktycznie w następujących warunkach: zadając oszacowaną wartość strumienia Ψ_r^* sprawdzano czy częstotliwość zasilania 50 [Hz], napięcie zasilania 380 [V], obroty 1450 [obr/min] oraz prąd odpowiadający obciążeniu 60% T_N .

Przed przełączeniem zasilania przemiennika częstotliwości na zasilanie z generatora CHROMA sprawdzono wstępnie zachowanie układu regulacji i sterowania, z korektą napięć u_{sd} oraz u_{sq} dla modelu równoległego, na zmianę amplitudy napięcia zasilania (rysunek 3.7).

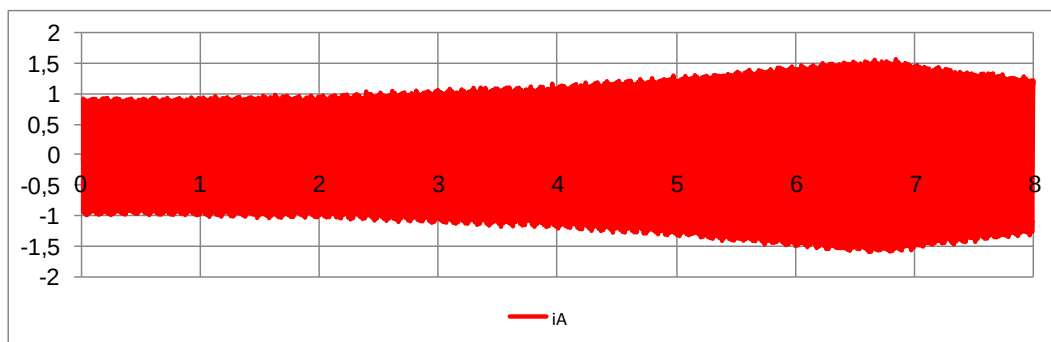
Zmiana amplitudy napięcia zasilania w sposób ciągły powoduje obniżenie wartości napięcia u_{DC} i tym samym wartości zadanej strumienia Ψ_r^* . Układ zapewnia stały moment obrotowy i utrzymuje prędkość obrotową silnika podwyższając prąd stojana. Przeprowadzony test potwierdza prawidłowość reakcji układu regulacji.

Sprawdzono również reakcję układu na skokową zmianę wartości zadanej strumienia Ψ_r^* , przy stałym napięciu zasilania (rysunek 3.8). Na zmianę wartości zadanej strumienia Ψ_r^* , układ obniża amplitudę napięcia zasilania silnika, jednocześnie zwiększając częstotliwość tak, aby zapewnić potrzebny moment obrotowy i zapewnić wymaganą prędkość obrotową silnika. Odbywa się to kosztem zwiększenia prądu stojana. W chwili powrotu wartości zadanej Ψ_r^* do wartości poprzedniej zauważa się lekkie przeregulowanie prądu.

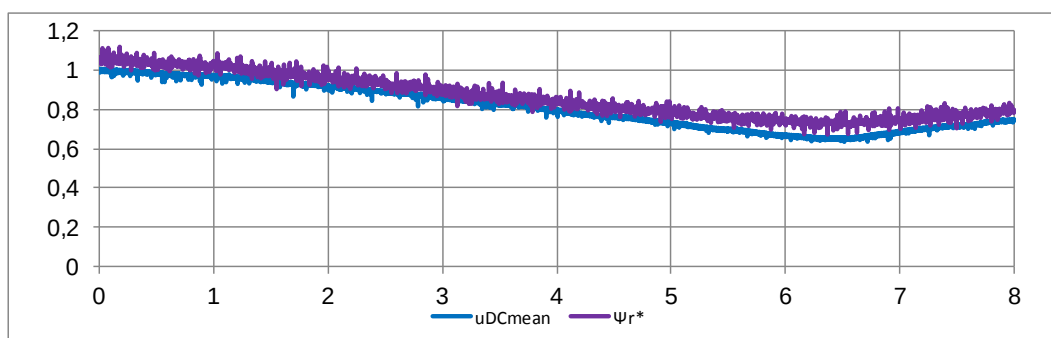
a)



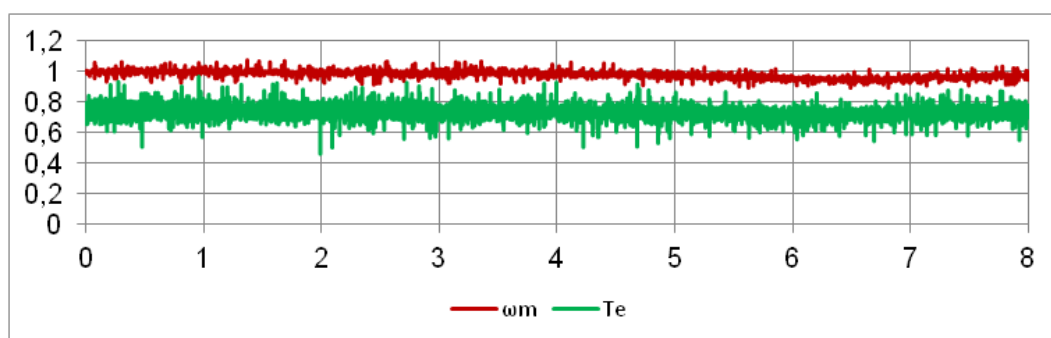
b)



c)

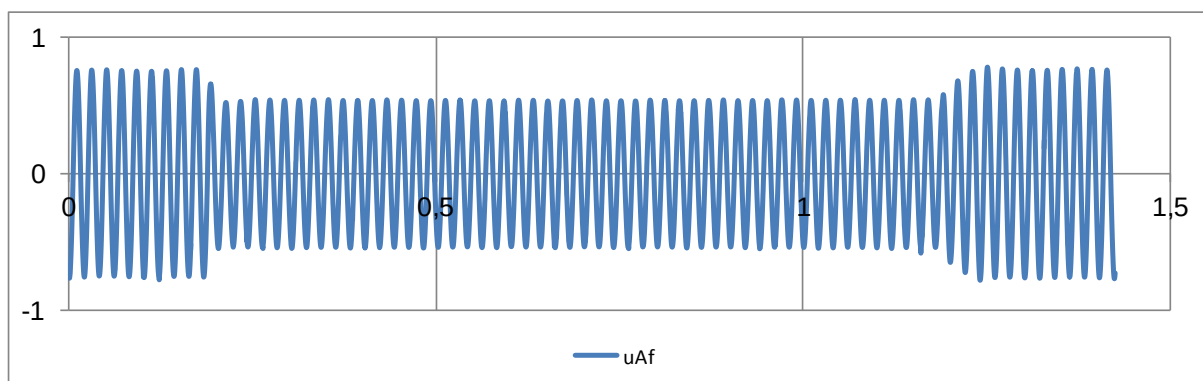


d)

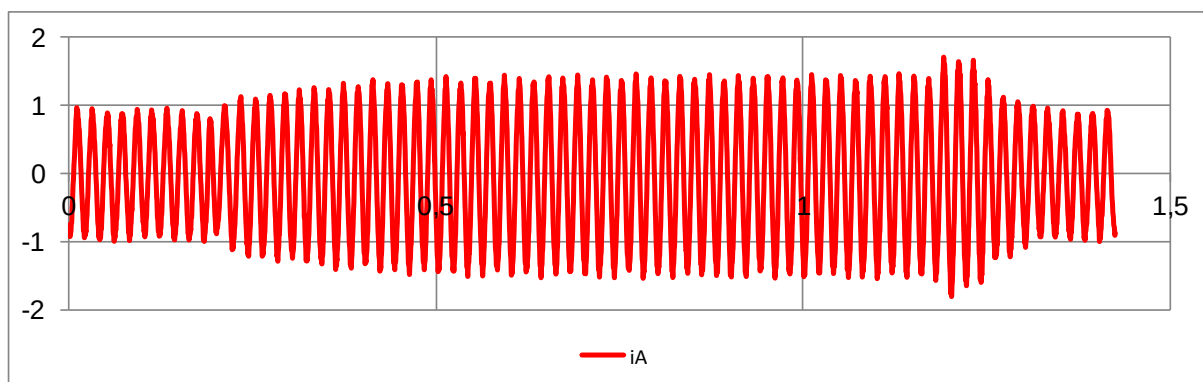


Rys.3.7. Przebiegi czasowe u_A , i_A , Ψ_r^* , u_{DC} , ω_m , T_e w układzie elektromechanicznym z silnikiem zasilanym przez przemiennik częstotliwości ze zmodyfikowanym sterowaniem wektorowym $\Psi_r^* = f(u_{DC})$, w warunkach zmiany amplitudy napięcia zasilania przemiennika częstotliwości, częstotliwość zasilania sieci 50 [Hz].

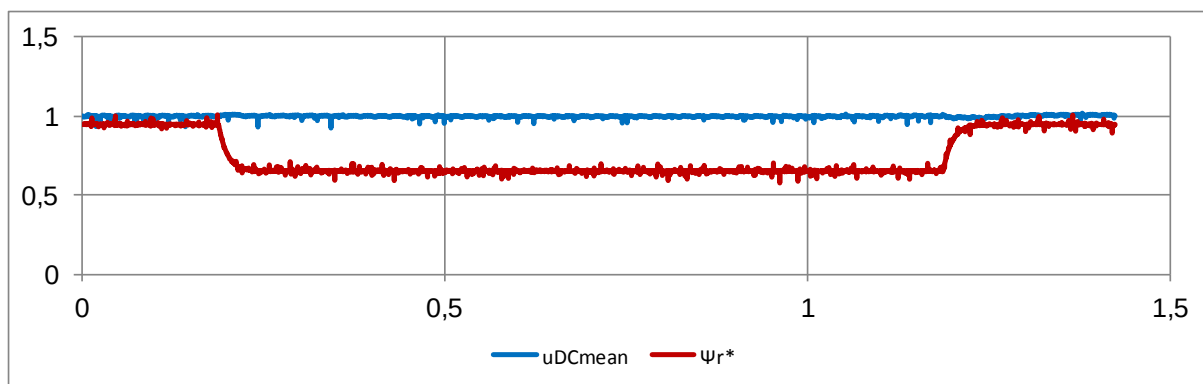
a)



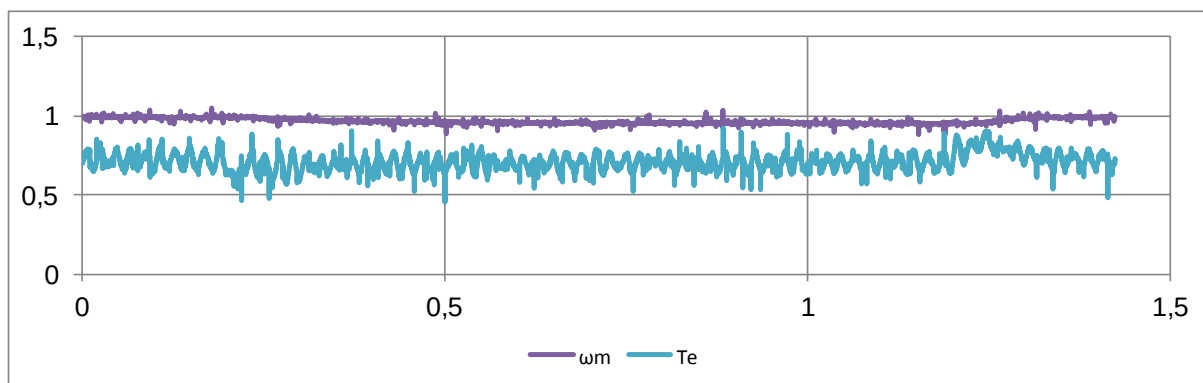
b)



c)



d)



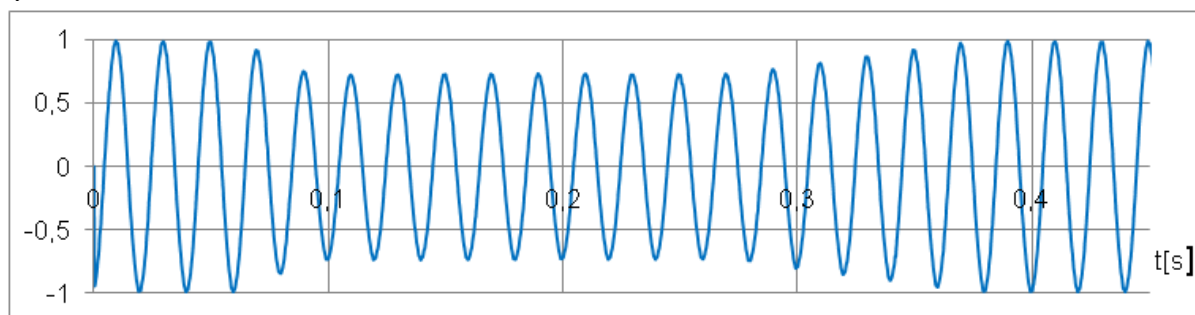
Rys.3.8. Przebiegi czasowe i_B , u_{DC} , n , T_e - reakcja układu na skokową zmianę wartości zadanej strumienia ψ_r^* (w przypadku zastosowania modelu równoległego silnika)

3.3. Pomiary z wykorzystaniem uproszczonego sterowania amplitudowo-częstotliwościowego $u_s/f_s = f(u_{DC})$

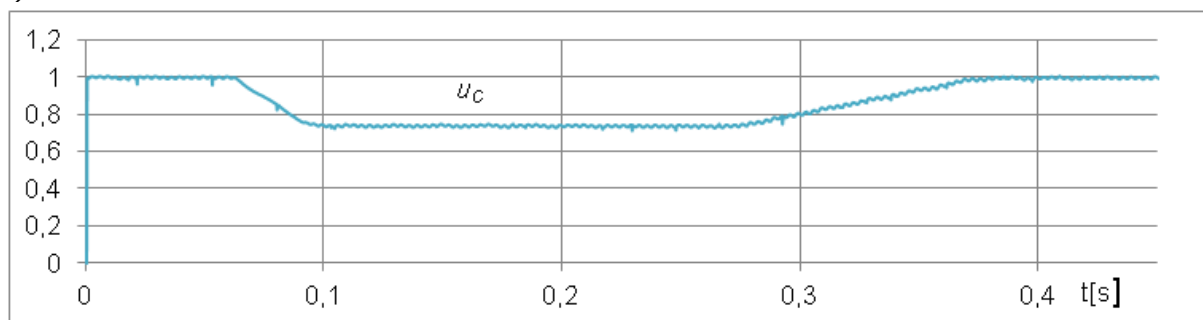
Jako alternatywę do pełnego zmodyfikowanego wektorowego układu regulacji i sterowania układem elektromechanicznym w warunkach zapadu zaproponowano uproszczone sterowanie amplitudowo – częstotliwościowe .

Przykładowe pomiary u_{Af} , u_{DC} , i_A , ω_m w przypadku zastosowania uproszczonego sterowania amplitudowo-częstotliwościowego przedstawiono na rysunku 3.9 oraz na rysunku 3.10 .

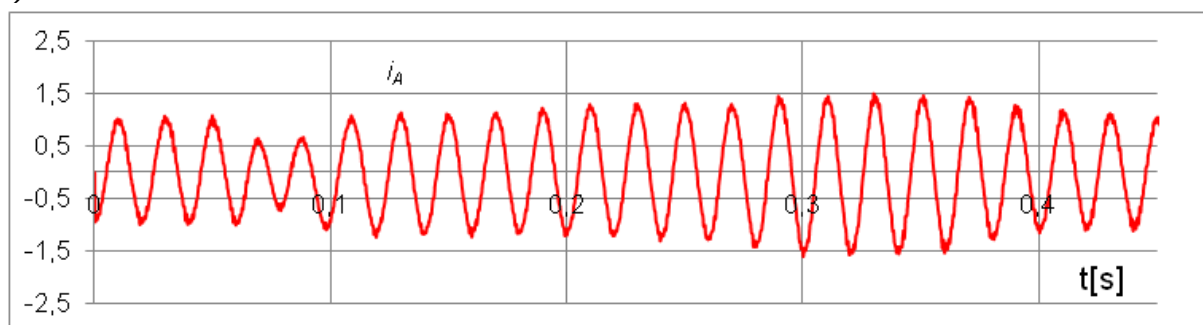
a)



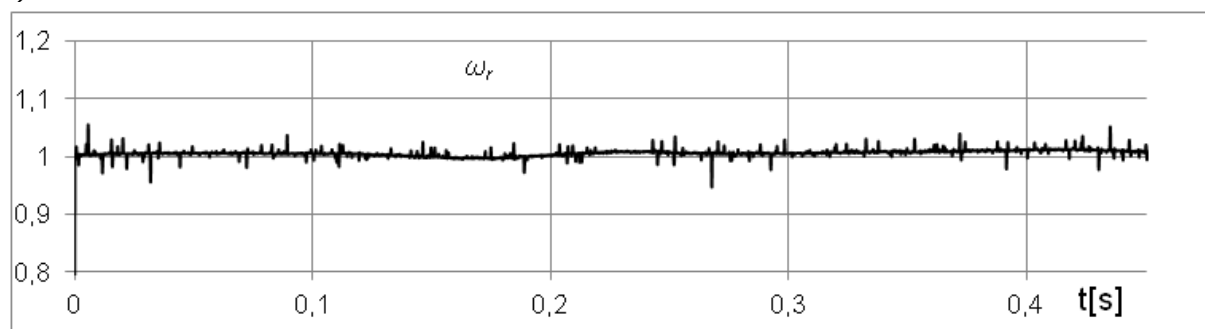
b)



c)

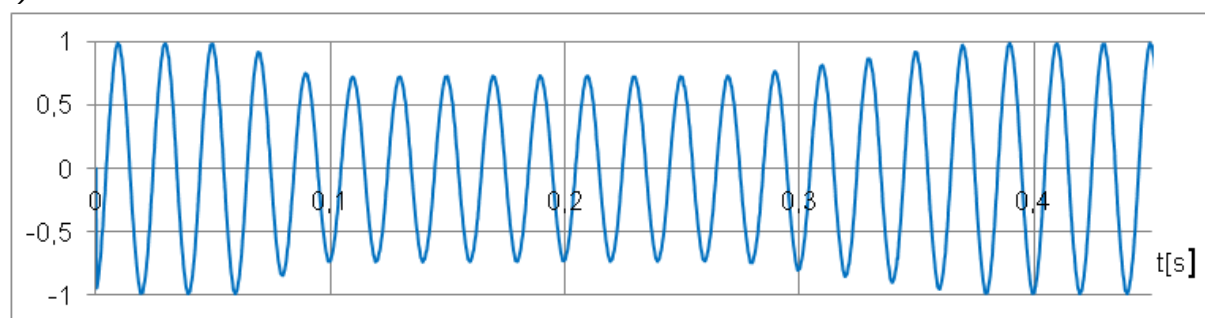


d)

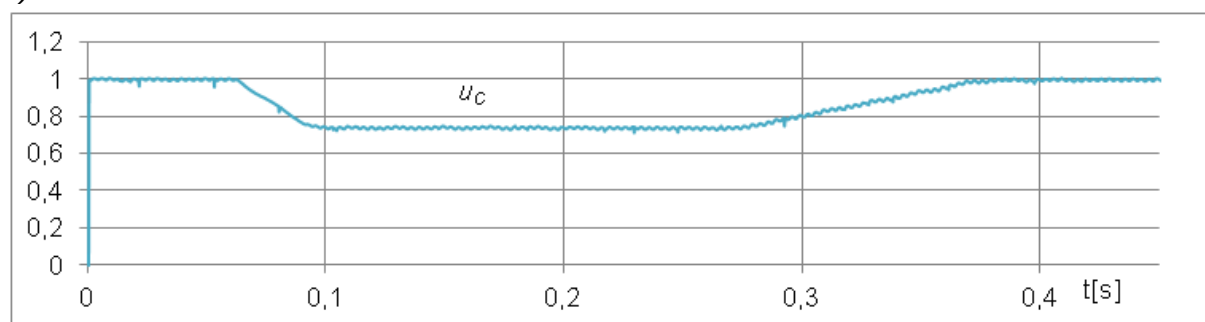


Rys.3.9. Przebiegi u_A , i_A , ω_r , u_{DC} dla sterowania częstotliwościowego z korektą wartości zadanej częstotliwości $u_s^*/f_s^* = f(u_{DC})$

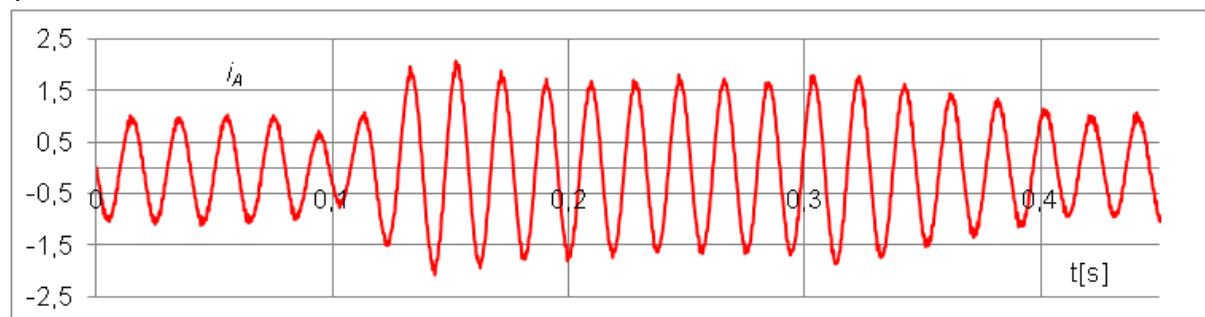
a)



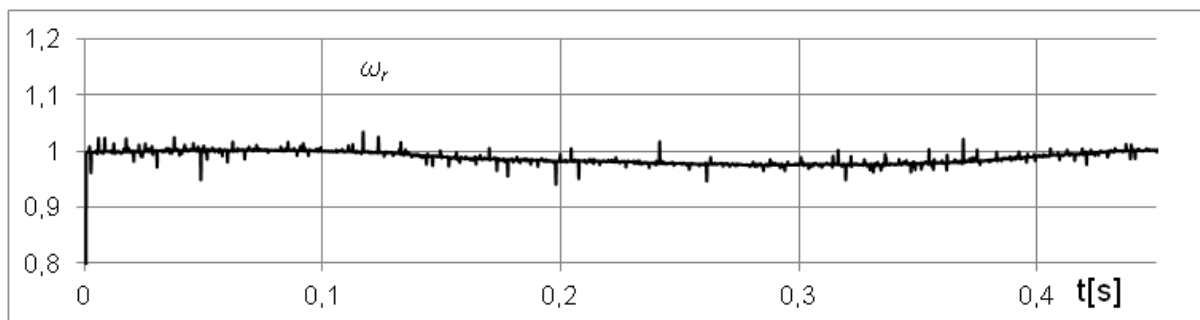
b)



c)



d)



Rys.3.10. Przebiegi u_A , i_A , ω_r , u_{DC} dla sterowania częstotliwościowego bez korekty wartości zadanej częstotliwości $u_s^*/f_s^* = f(u_{DC})$

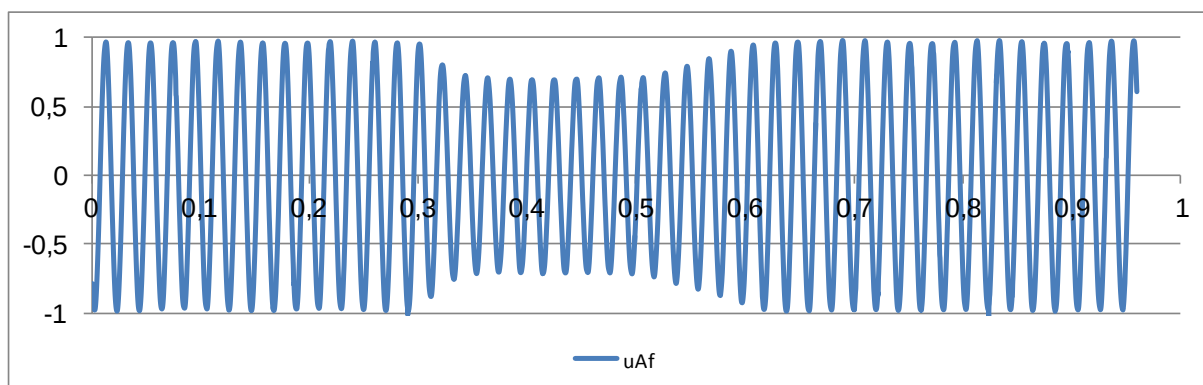
Porównując przebiegi prędkości można stwierdzić poprawę w zachowaniu prędkości silnika w sytuacji zapadu napięcia w przypadku zastosowania korekty wartości zadanej $u_s^*/f_s^* = f(u_{DC})$.

W przypadku bez korekty występują większe wartości prądu stojana ale podtrzymanie prędkości jest znacznie gorsze, spowodowane jest to tym, że częstotliwość napięcia zasilania silnika nie ulega zmianie – nie zwiększa się.

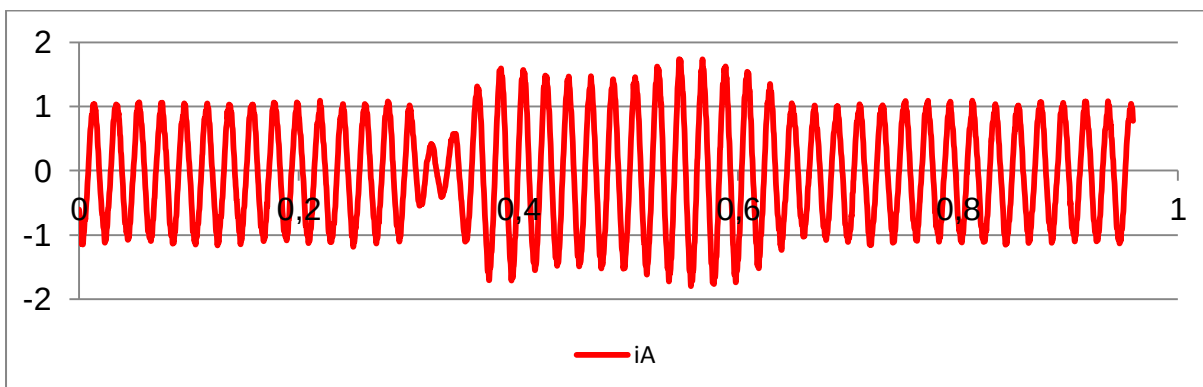
3.4. Pomiary z zastosowaniem zmodyfikowanego wektorowego układu regulacji, przy zadawaniu strumienia $\Psi_r^* = f(u_{DC})$

Na rysunkach 3.11 - 3.18 przedstawiono przebiegi czasowe (skala czasu t [s]) u_{Af} , i_A , Ψ_r^* , u_{DCm} , ω_m , T_e w układzie elektromechanicznym z silnikiem indukcyjnym klatkowym zasilanym przez przemiennik częstotliwości ze zmodyfikowanym sterowaniem wektorowym $\Psi_r^* = f(u_{DC})$, w warunkach zapadów napięcia i przerwy w zasilaniu.

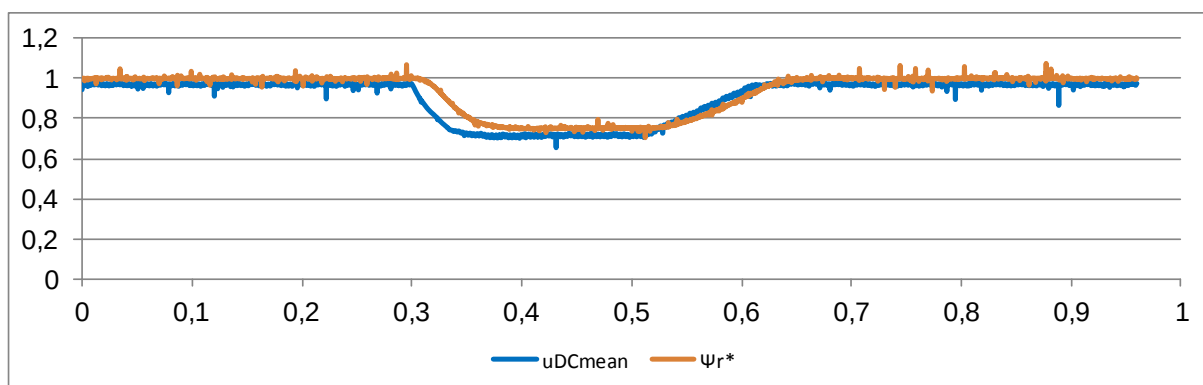
a)



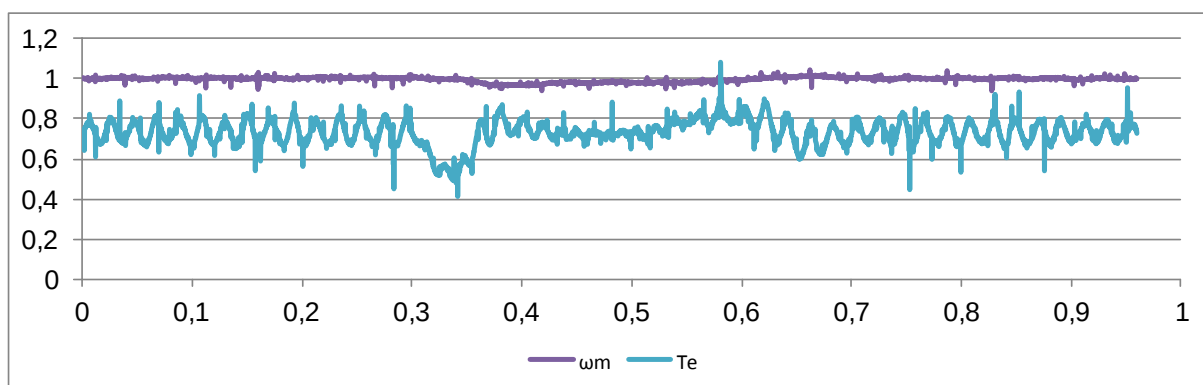
b)



c)

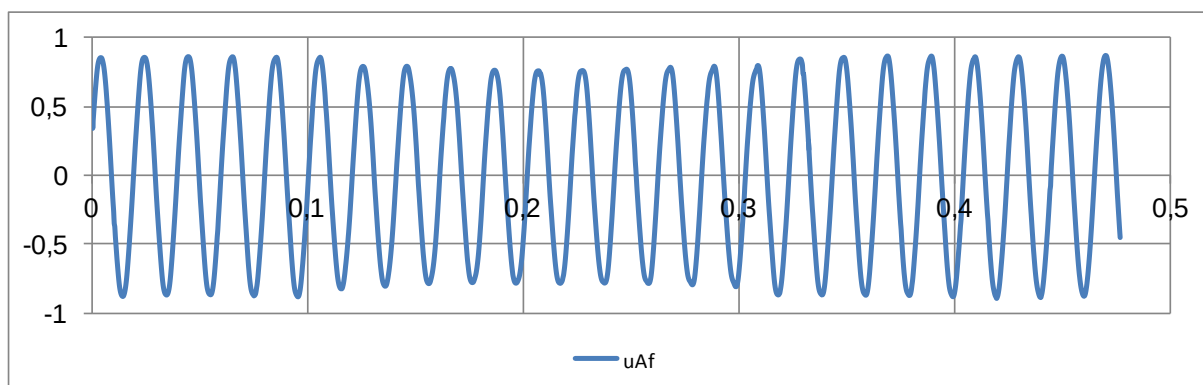


d)

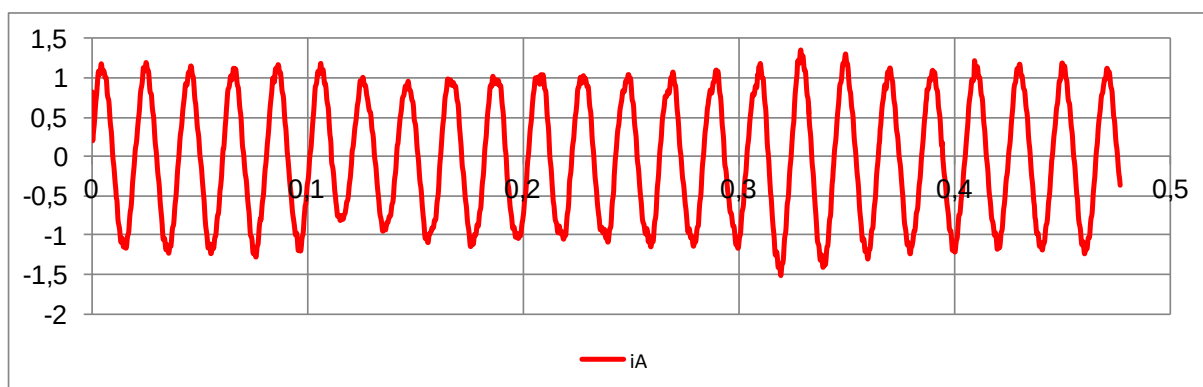


Rys.3.11. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu A

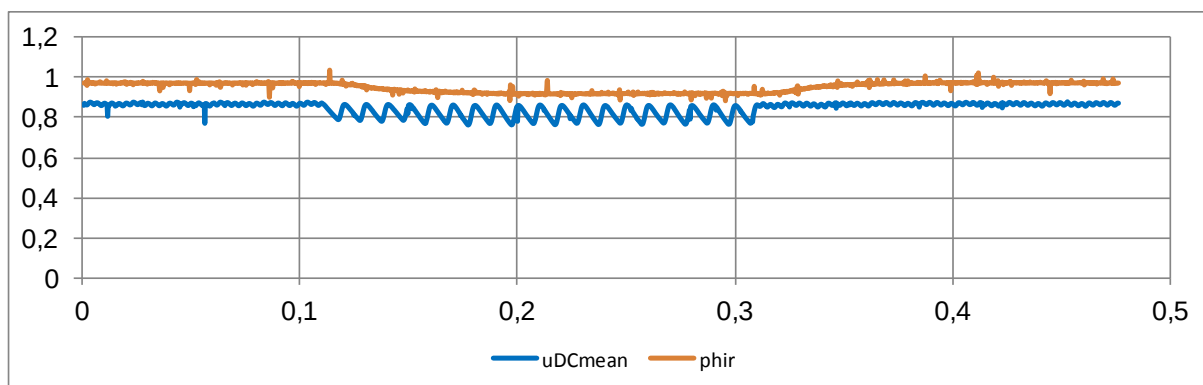
a)



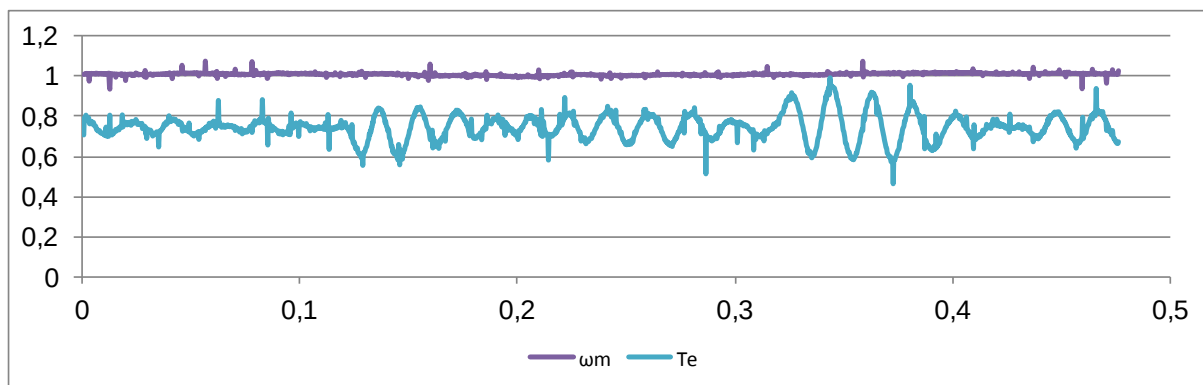
b)



c)

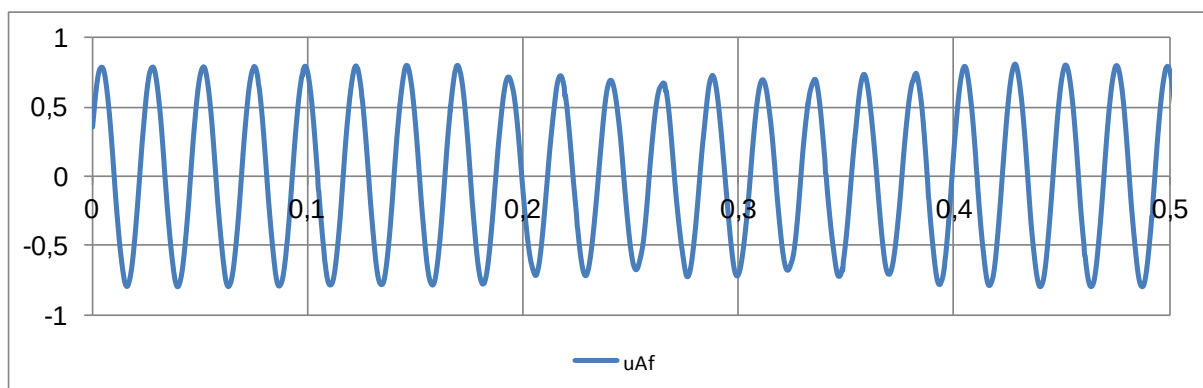


d)

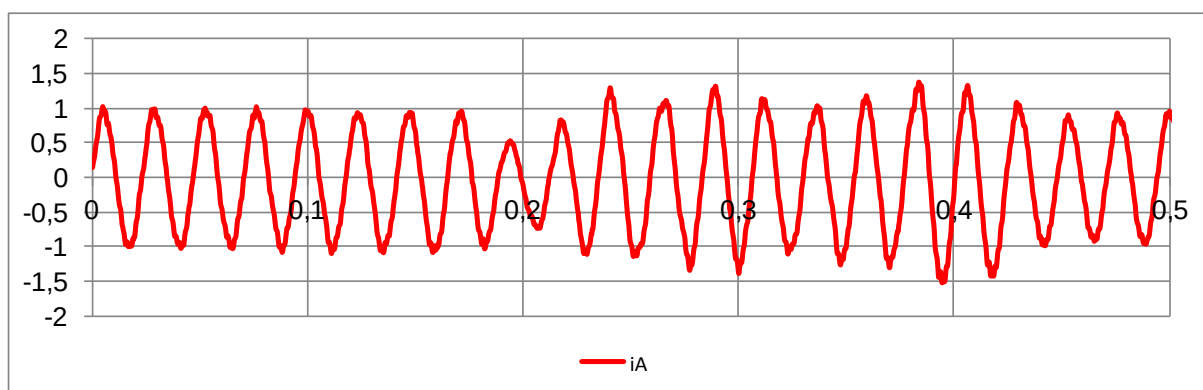


Rys.3.12. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , Ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu B

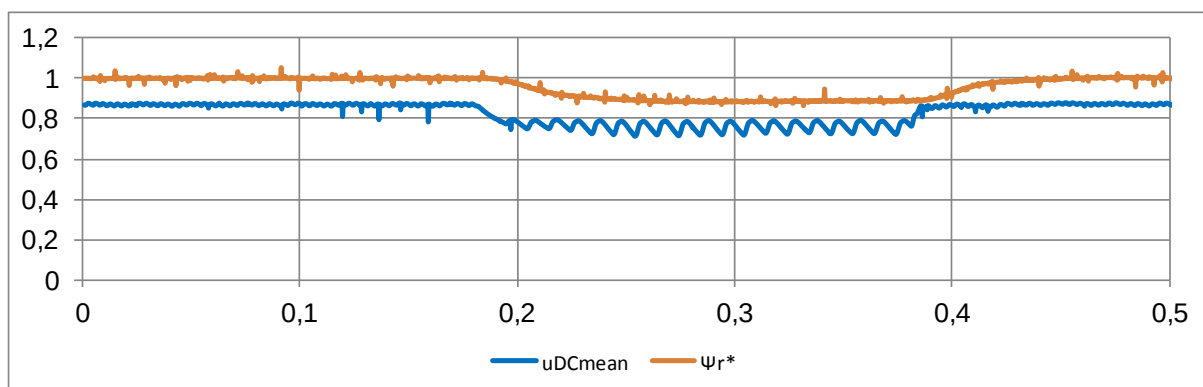
a)



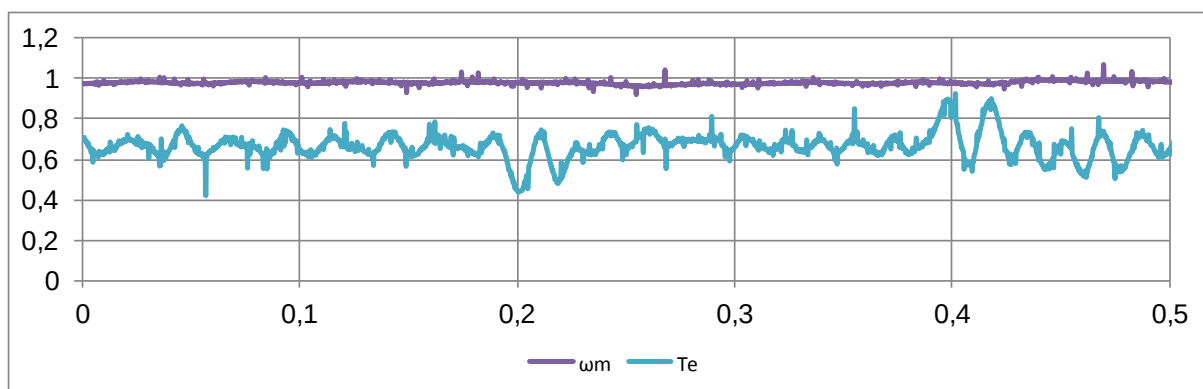
b)



c)

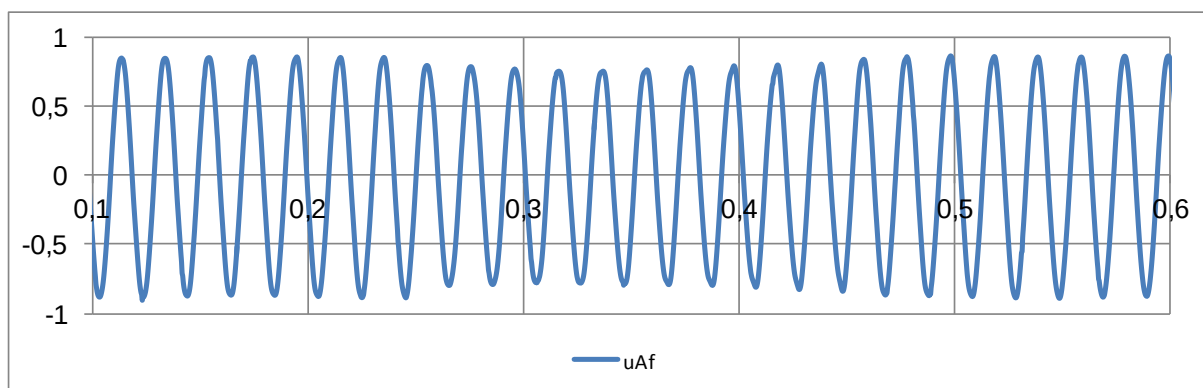


d)

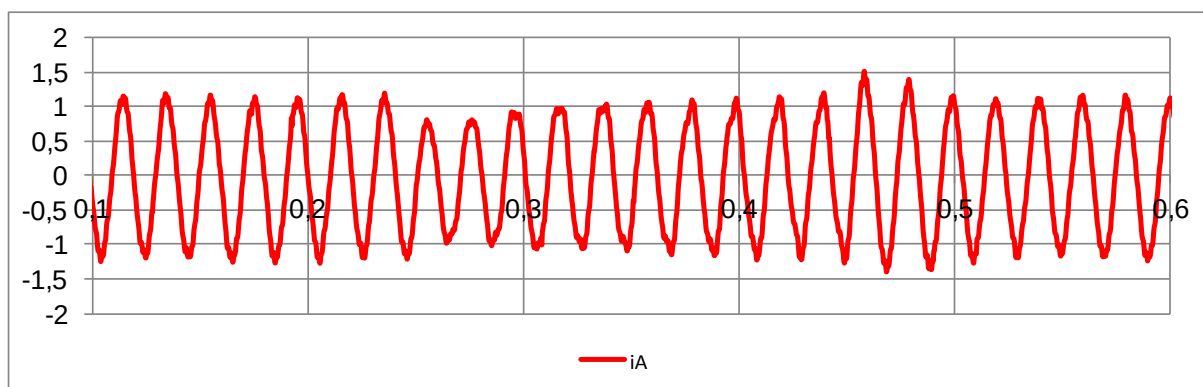


Rys.3.13. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu C

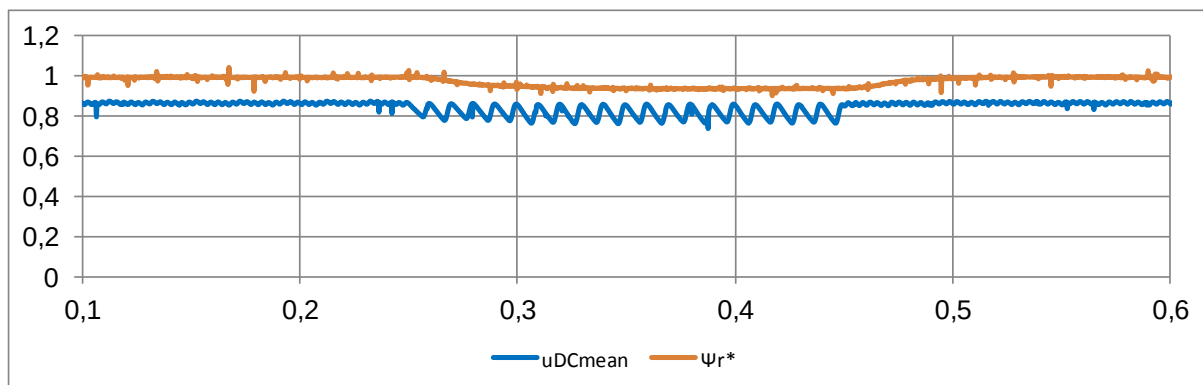
a)



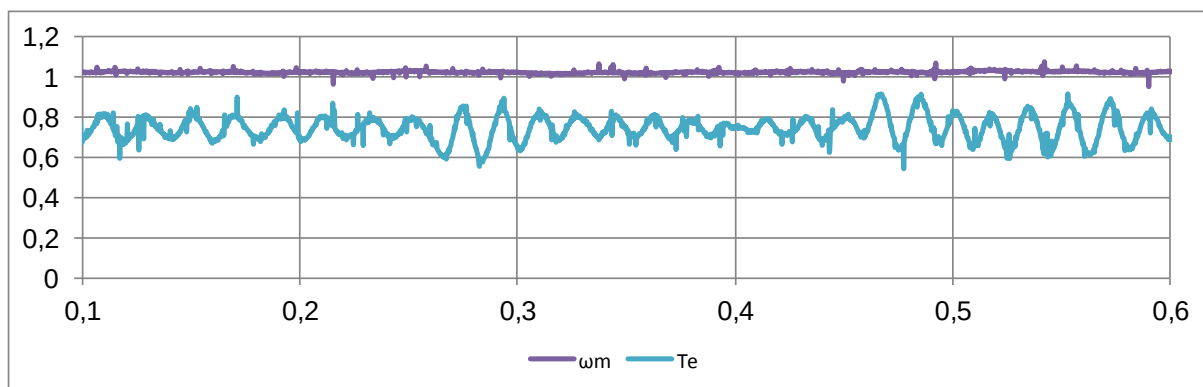
b)



c)

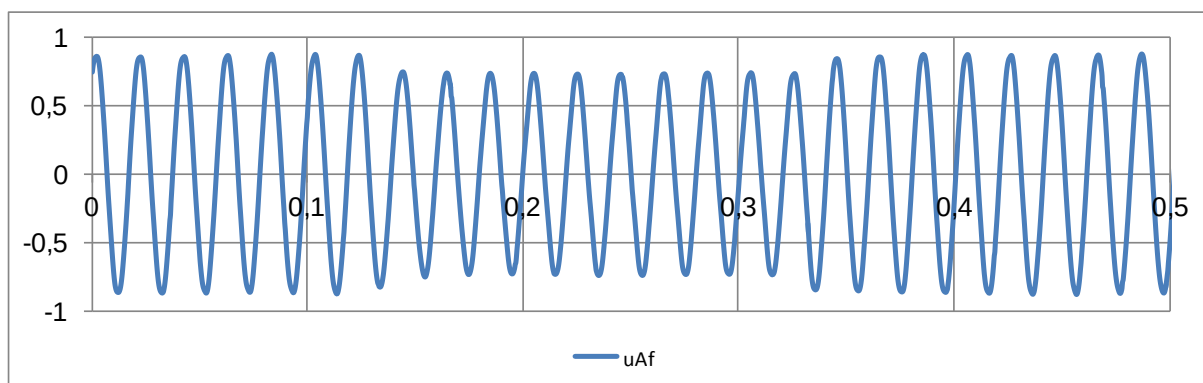


d)

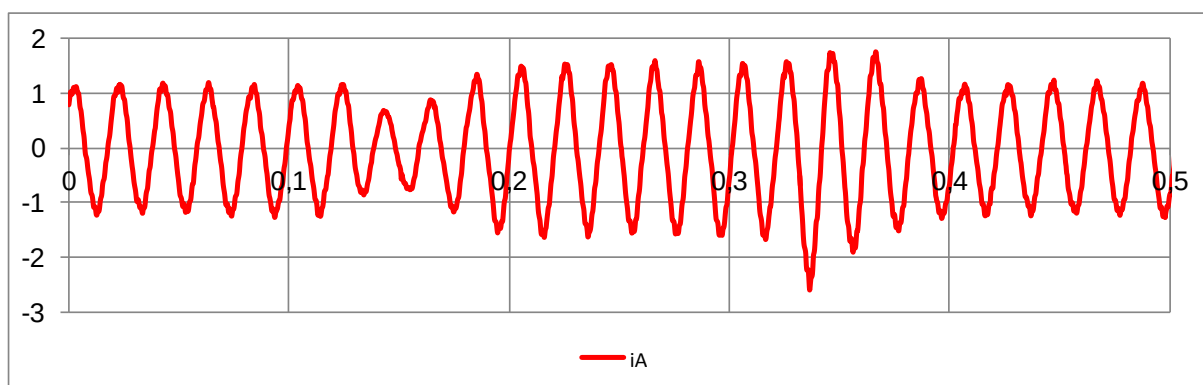


Rys.3.14. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu D

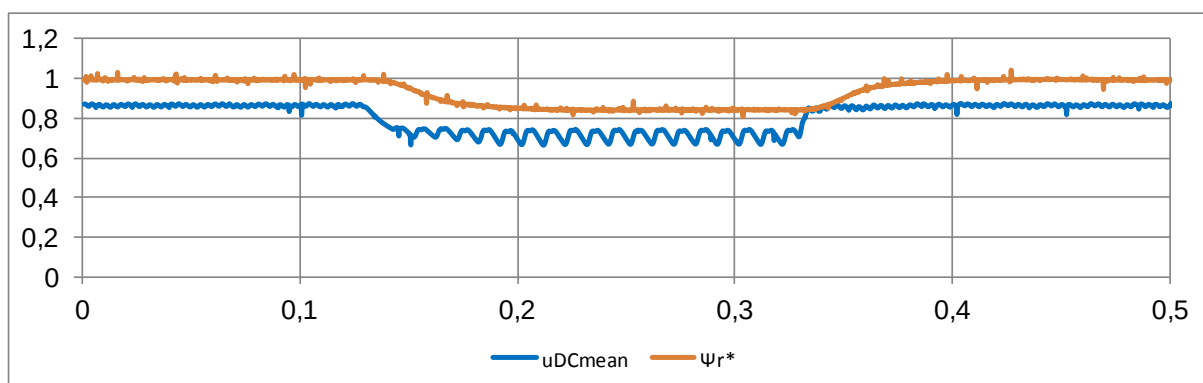
a)



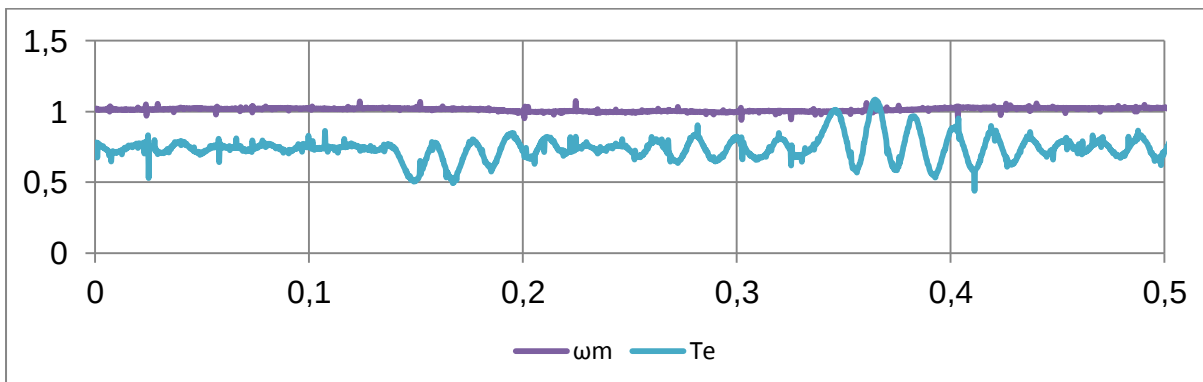
b)



c)

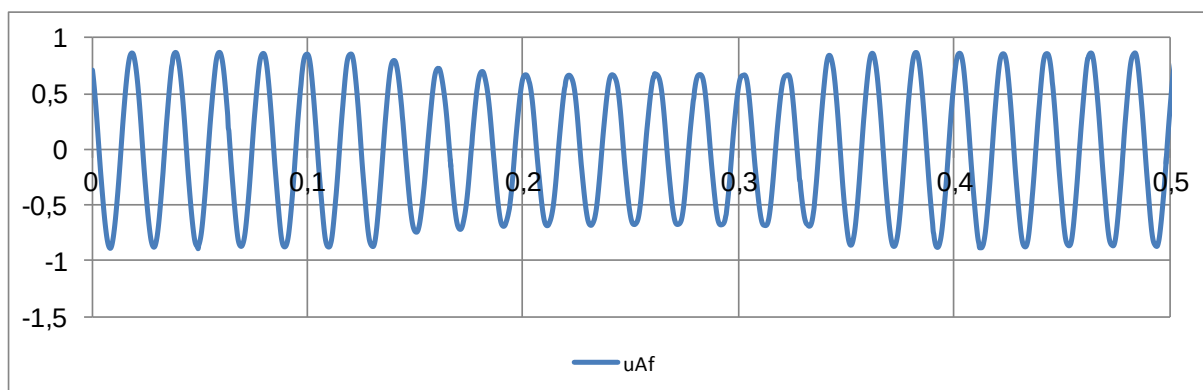


d)

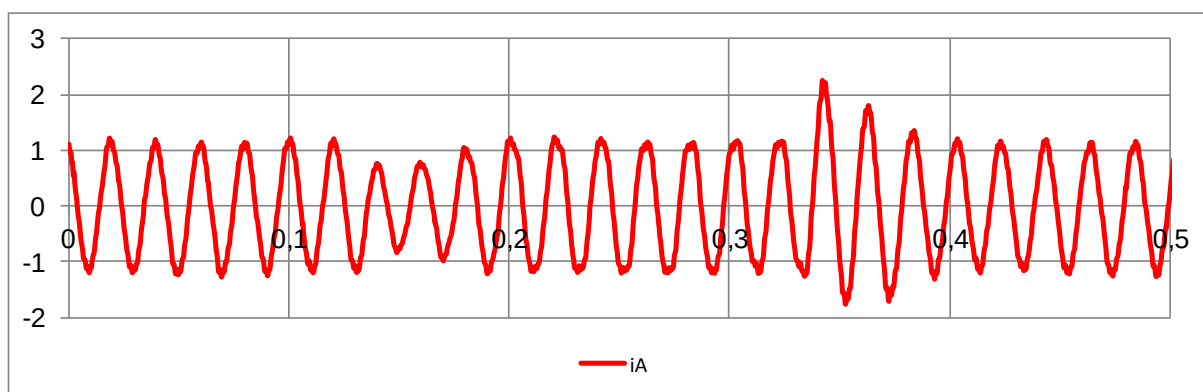


Rys.3.15. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , Ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu E

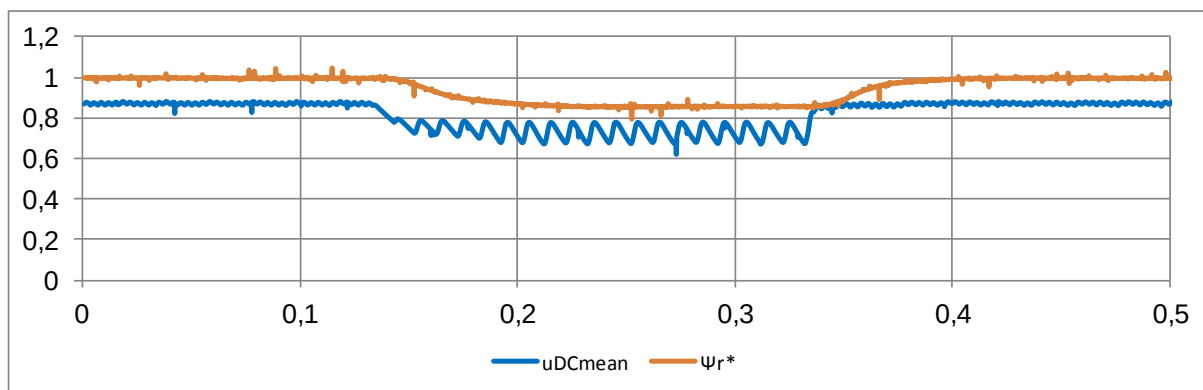
a)



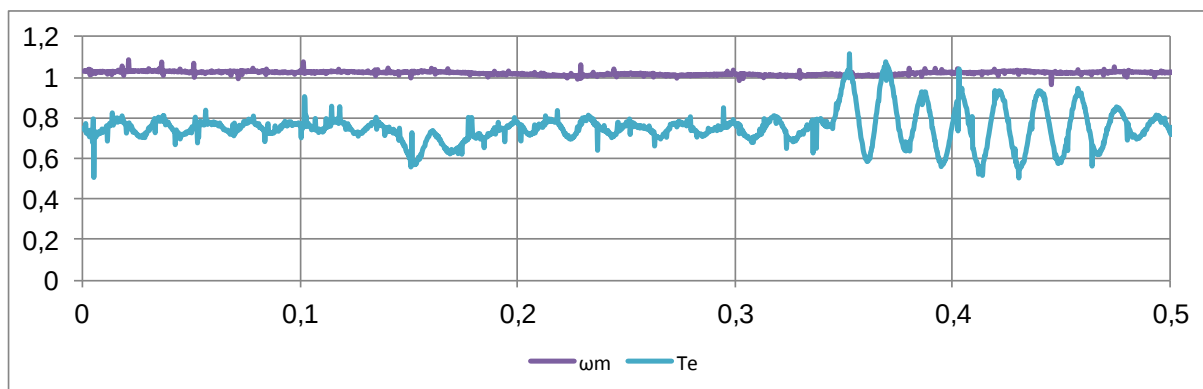
b)



c)

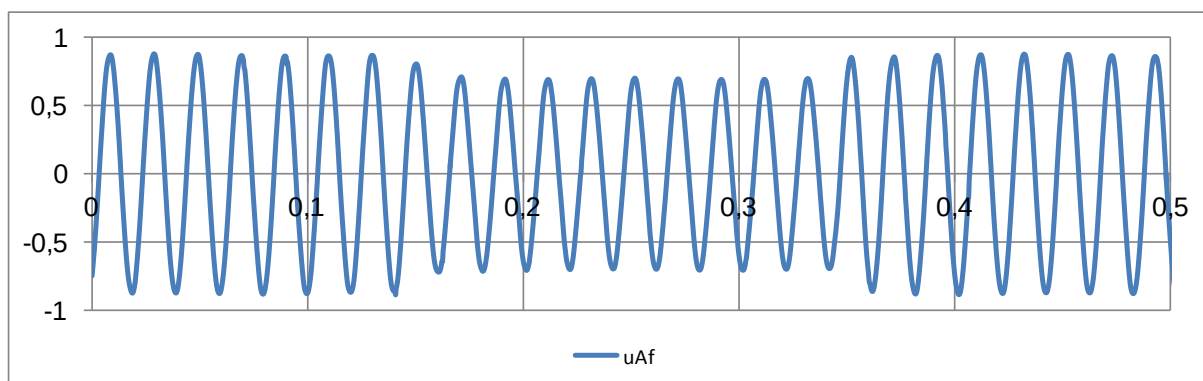


d)

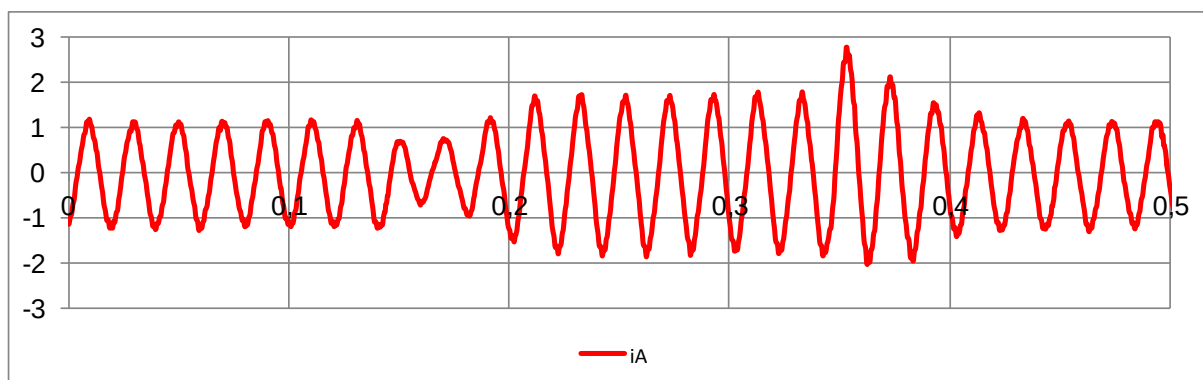


Rys.3.16. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu F

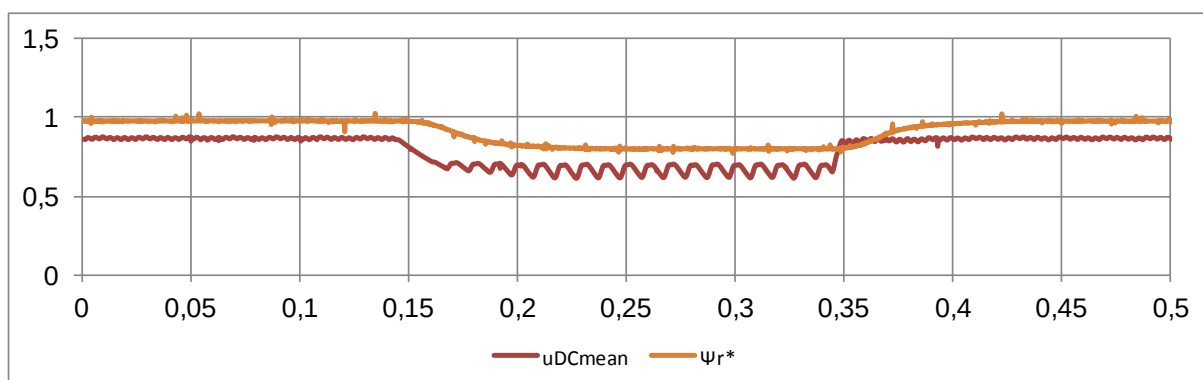
a)



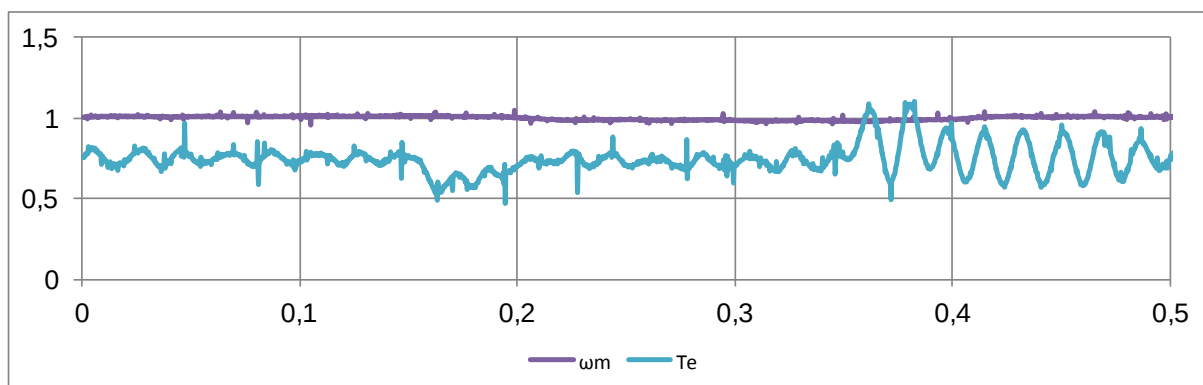
b)



c)

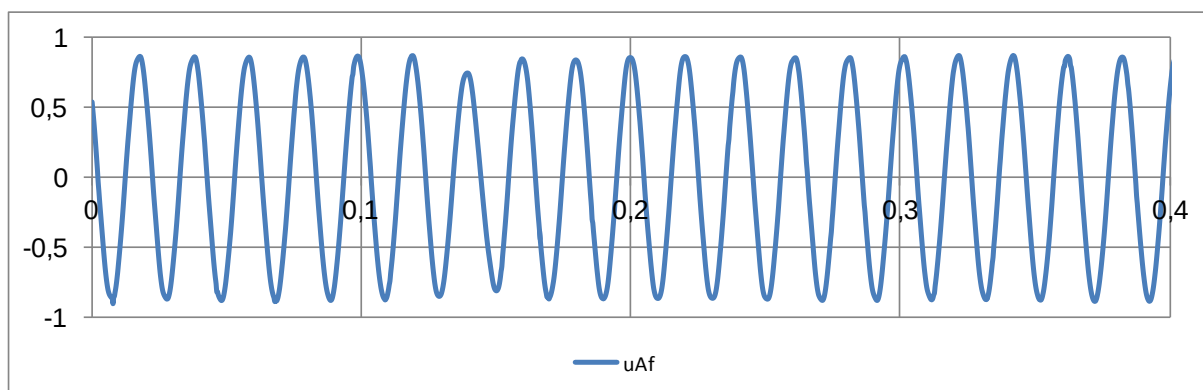


d)

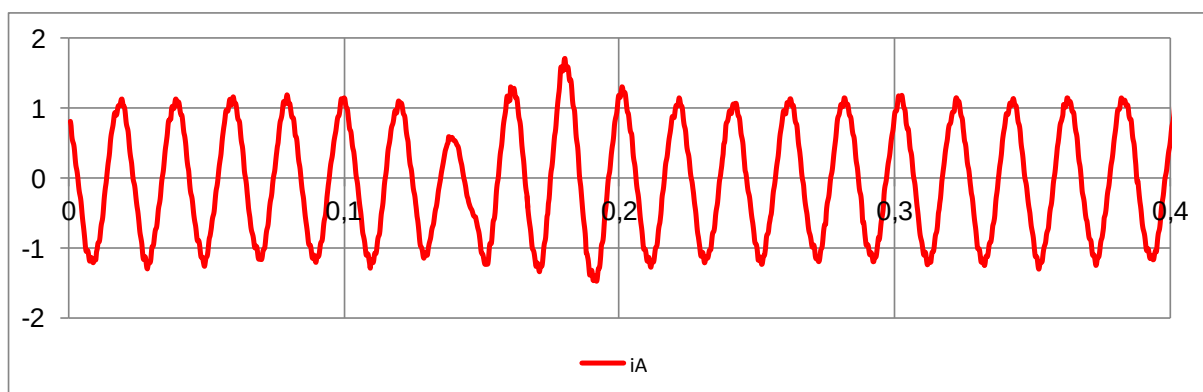


Rys.3.17. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , Ψ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na zapad napięcia typu G

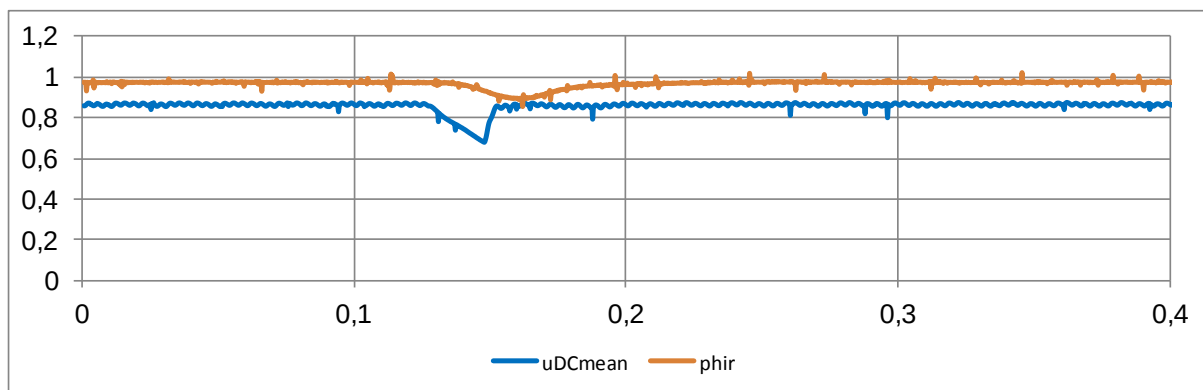
a)



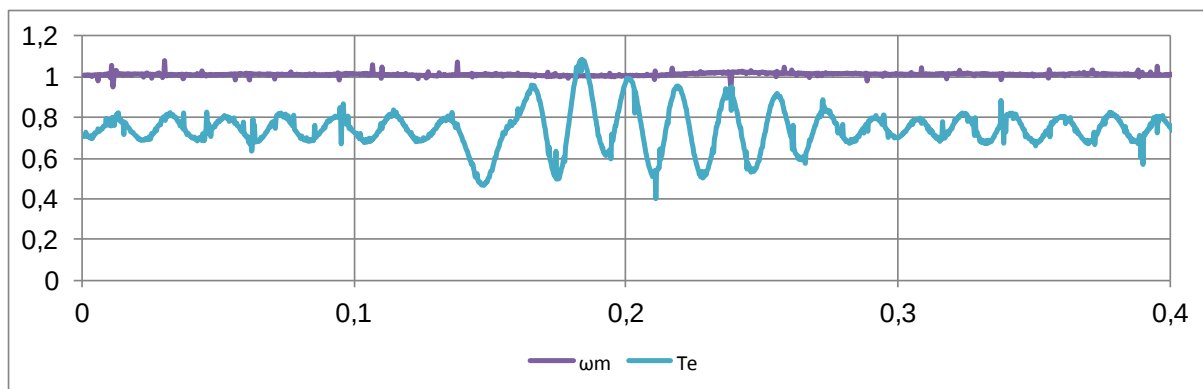
b)



c)



d)



Rys.3.18. Przebiegi czasowe u_{Af} , i_A , u_{DC} , φ_r^* , ω_m , T_e - reakcja układu na przerwę w zasilaniu

3.5. Wnioski

Najtrudniejszym przypadkiem dla układu elektromechanicznego jest zapad napięcia typu A (napięcie u_{DC} maleje do około 70%), w przypadku pozostałych zapadów warunki zasilania dla układu napędowego są dużo korzystniejsze. Wobec tego można ograniczyć się do analizy reakcji układu elektromechanicznego na zapad typu A. Ale by odpowiedzieć na pytanie o głębokość zapadu napięcia trzeba przeanalizować dokładnie wszystkie typy zapadów.

Należy zaznaczyć, że wielkość u_{Af} jest mierzona z wykorzystaniem podwójnego filtra RC, wskutek czego amplituda napięcia jest o kilka procent niższa, oraz występują kilkustopniowe opóźnienia w przebiegu wartości chwilowych.

Zastosowano obciążenie momentem na poziomie 60% T_N , bo takie było możliwe do uzyskania w zestawie laboratoryjnym.

W przypadku zapadu napięcia typu F i typu G pojawiło się na końcu zapadu znaczne przeregulowanie prądu. Spowodowane jest to tym, że powrót napięcia sieci następuje skokowo, napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości zależy proporcjonalnie od napięcia zasilania (u_{DC}) zaś regulator prądu nie jest w stanie dostatecznie szybko zareagować na skok napięcia.

Reasumując reakcja układu regulacji w warunkach zapadu napięcia była prawidłowa, zapewniła utrzymanie zadanej prędkości.

Również reakcja na krótką przerwę w zasilaniu, dzięki zastosowaniu zmodyfikowanego układu zadawania $\Psi_r^* = f(u_{DC})$, była dużo korzystniejsza.

Dzięki chwilowemu obniżeniu wartości zadanej strumienia Ψ_r^* prędkość obrotowa silnika zmalała ale nie tak dużo jak w przypadku zasilania bezpośredniego względnie zasilania poprzez przemiennik częstotliwości VSI bez korekty zadawania strumienia Ψ_r^* .

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

4.1. Potwierdzenie tezy pracy

Realizacja układu zadawania strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika wymaga zastosowania bardzo złożonych układów, dlatego w zastosowaniach praktycznych, w których realizowana jest zasada $U/f = \text{const}$ zaproponowano uproszczoną metodę sterowania częstotliwościowego. W przypadku przemiennika częstotliwości VSI napięcie wyjściowe z przemiennika obniża się proporcjonalnie do napięcia wtedy wystarczy tylko zadawać częstotliwość. Jest to metoda alternatywna, która znacznie poprawia odporność układu elektromechanicznego na zapady napięcia.

Jednak dla osiągnięcia możliwie maksymalnego wzrostu odporności układu elektromechanicznego na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu konieczne jest zastosowanie zaproponowanego w punkcie 2.2 układu regulacji z korektą zadawania wartości strumienia Ψ_r^* od napięcia u_{DC} .

Dla określenia wartości strumienia oraz składowych prądu we współrzędnych związanych z wektorem strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika zastosowano model równoległy silnika z korektą wartości u_{sd} i u_{sq} od napięcia u_{DC} (rysunek 2.13b).

Przetestowano na etapie symulacji i pomiarów laboratoryjnych odporność układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym klatkowym na zapady napięcia wszystkich typów A – G oraz na krótkie przerwy w zasilaniu.

Zarówno badania symulacyjne jak pomiary laboratoryjne potwierdziły postawioną tezę tj. *możliwe jest podwyższenie odporności układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym przez zmniejszenie wartości zadanej strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika.*

Również wprowadzenie modyfikacji we wcześniej rozpatrywanym modelu AC3 (rysunek 1.9) tj. uzależnienie zadawanej wartości strumienia sprzężonego z uzwojeniem wirnika silnika indukcyjnego od wartości napięcia u_{DC} znacznie *podwyższyło odporność układu elektromechanicznego na zapady napięcia.*

4.2. Kierunki dalszych badań

Warunkiem przepływu energii i tym samym możliwości sterowania i regulacji układu elektromechanicznego jest to aby odpowiednia składowa SEM (analogicznie do napędów prądu stałego) była mniejsza niż przynależna składowa napięcie zasilania [13], [14], [15], [16].

W przypadku układu elektromechanicznego z silnikiem indukcyjnym, zaproponowano metodę polegającą na zmniejszeniu strumienia magnetycznego Ψ_r silnika indukcyjnego podczas zapadu napięcia, co spowoduje obniżenie odpowiedniej składowej SEM tak by zachować nadal możliwość skutecznej regulacji prądu.

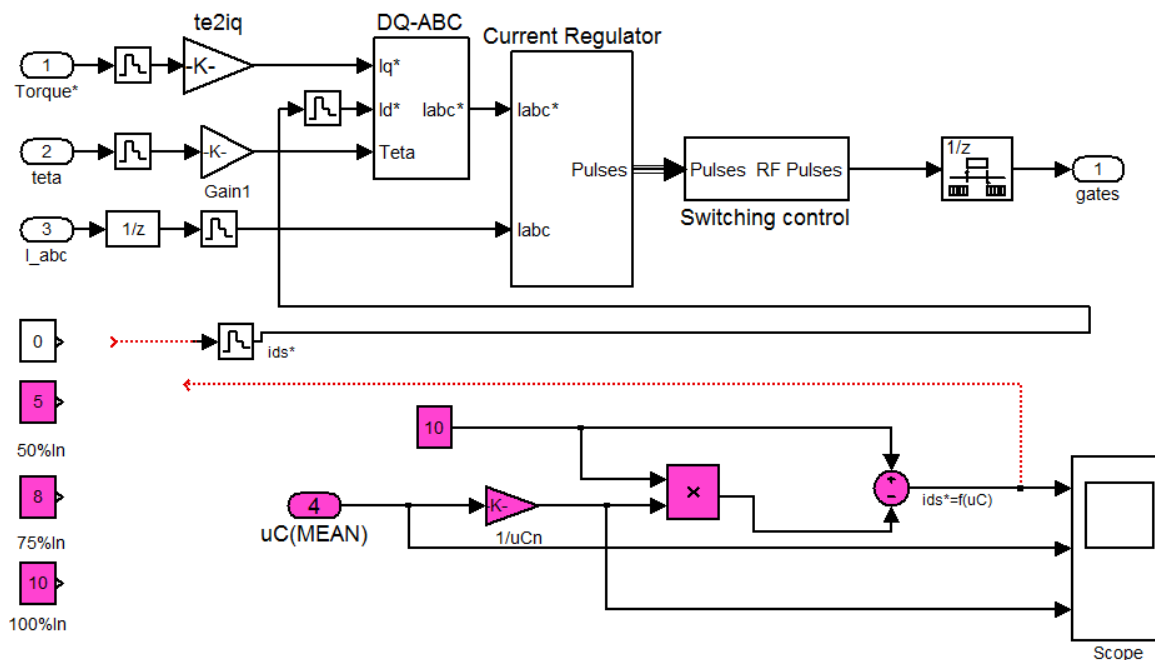
W celu zapewnienia wymaganego momentu obrotowego, utrzymanie zadanych obrotów silnika, przy obniżonym strumieniu magnetycznym silnika, konieczne jest zwiększenie odpowiedniej składowej prądu stojana - umożliwi to dalsze, bez przerw technologicznych prowadzenie procesu produkcyjnego.

Wskazane jest rozszerzenie proponowanej metody na układy elektromechaniczne z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych [29].

W tym przypadku dotyczy to modyfikacji sposobu zadawania wartości składowej prądu i_{sd}^* silnika synchronicznego o magnesach trwałych.

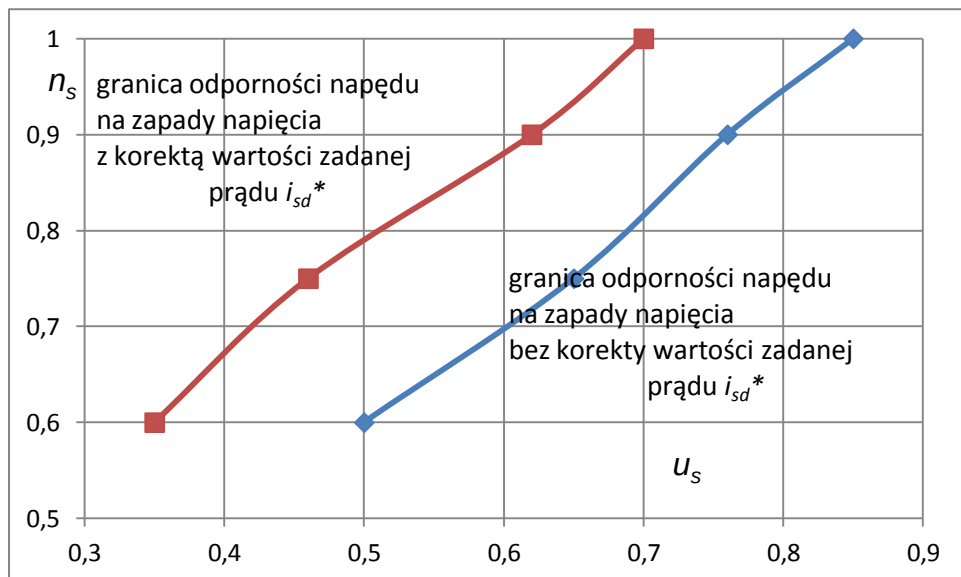
Należy zadawać ujemną wartość składowej i_{sd} prądu silnika w funkcji u_{DC} , standardowo zadaje się wartość $i_{sd}^* = 0$.

Wtedy zadawanie wartości składowej prądu i_{ds}^* może być bezpośrednie, bądź z korektą od aktualnej wartości napięcia (rysunek 4.1).



Rys.4.1. Model sterowanego wektorowo układu elektromechanicznego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych w środowisku MATLAB SIMULINK

W oparciu o wyniki przeprowadzonych symulacji układu elektromechanicznego AC6-PM zaczerpniętego z biblioteki MATLAB – SIMULINK [4], na rysunku 4.2 przedstawiono charakterystykę odporności układu elektromechanicznego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych na zapady napięcia.



Rys.4.2. Charakterystyka odporności układu elektromechanicznego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych na zapady napięcia, $T_L = 100\% T_N$

Widać wyraźną poprawę odporności układu elektromechanicznego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych na zapady napięcia, w przypadku zadanej prędkości znamionowej przy obciążeniu momentem znamionowym:

- granica odporności napędu na zapady napięcia bez korekty wartości zadanej Ψ_r^* występuje przy napięciu zasilania przemiennika $85\% U_N$,
- granica odporności napędu na zapady napięcia z korektą wartości zadanej Ψ_{rk}^* występuje przy napięciu zasilania przemiennika $70\% U_N$.

Załączniki

Załącznik 1

Parametry silnika indukcyjnego zaczerpniętego z biblioteki MATLAB SIMULINK [4] :

$$P_N = 4 \text{ [kW]}$$

$$U_N = 400 \text{ [V]}, 50 \text{ [Hz]}$$

$$n_N = 1430 \text{ [obr/min]}$$

$$J = 0,0131 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

$$R_s = 1,405 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$L_{\sigma s} = 0,005839 \text{ [H]}$$

$$R_r = 1,395 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$L_{\sigma r} = 0,005839 \text{ [H]}$$

$$L_m = 0,1722 \text{ [H]}$$

Załącznik 2

Parametry silnika indukcyjnego wykorzystanego podczas pomiarów w laboratorium

$$P_N = 5,5 \text{ [kW]},$$

$$U_N = 380/220 \text{ [V]}, 50 \text{ [Hz]},$$

$$I_N = 11/19 \text{ [A]}$$

$$n_N = 1450 \text{ [obr/min]}$$

$$\cos \varphi = 0,86$$

oraz parametrach :

$$R_s = 0,78 \text{ [}\Omega\text{]},$$

$$R_r = 0,76 \text{ [}\Omega\text{]},$$

$$L_{\sigma s} = 0,0062 \text{ [H]},$$

$$L_{\sigma r} = 0,0062 \text{ [H]},$$

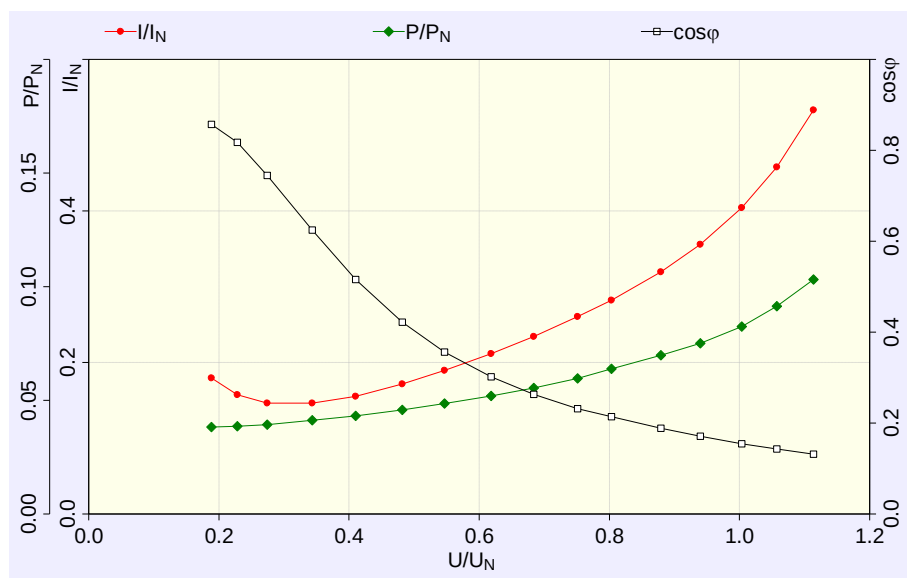
$$L_\mu = 0,161 \text{ [H]}.$$

Parametry silnika indukcyjnego określono na podstawie pomiarów stanów biegu jałowego, zwarcia oraz obciążenia silnika indukcyjnego .

Podczas pomiarów skorzystano z programu LABMOT AGH [65], [66].

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresów i tabel:

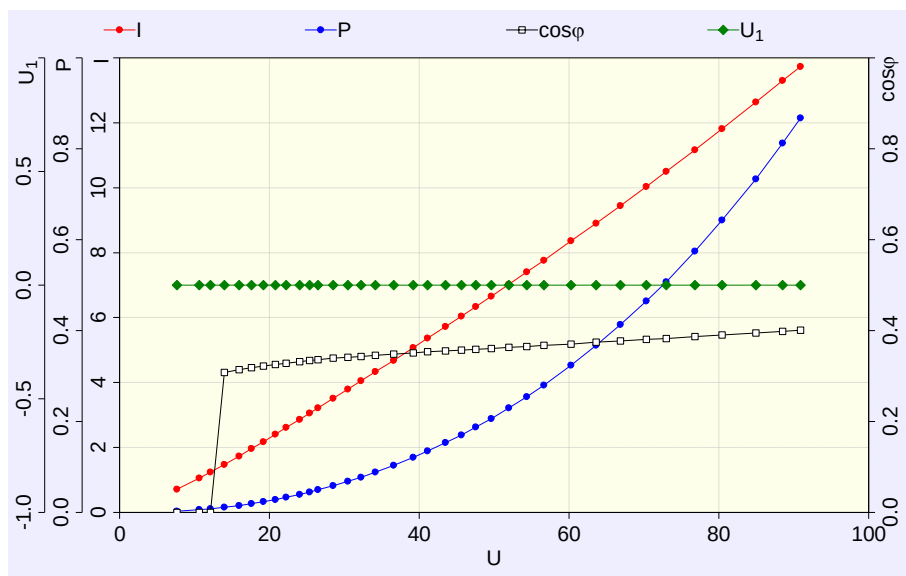
- dla biegu jałowego na rysunku 5.1 oraz tabeli 5.1 ,
- dla stanu zwarcia na rysunku 5.2 oraz tabeli 5.2 ,
- dla obciążenia na rysunku 5.3 oraz tabeli 5.3 .



Rys.5.1. Zależności $I/I_N = f(U/U_N)$, $P/P_N = f(U/U_N)$, $\cos\varphi = f(U/U_N)$ dla biegu jałowego

Tabela 5.1.

U/U_N	I/I_N	P/P_N	$\cos\varphi$
0,188492	0,179539	0,038162	0,856652
0,228105	0,157354	0,038622	0,817421
0,274367	0,146234	0,039352	0,745092
0,34318	0,146161	0,041217	0,62423
0,409969	0,155396	0,043221	0,515389
0,481592	0,171539	0,045846	0,421581
0,546966	0,189337	0,048573	0,356308
0,618627	0,211698	0,051947	0,301328
0,68358	0,234029	0,055368	0,262921
0,751221	0,260488	0,059595	0,231356
0,80322	0,28191	0,06379	0,21401
0,879017	0,319249	0,069805	0,188968
0,939792	0,355539	0,075059	0,17065
1,003533	0,40433	0,082413	0,154296
1,057378	0,45773	0,091363	0,143403
1,113405	0,532997	0,1031	0,13198

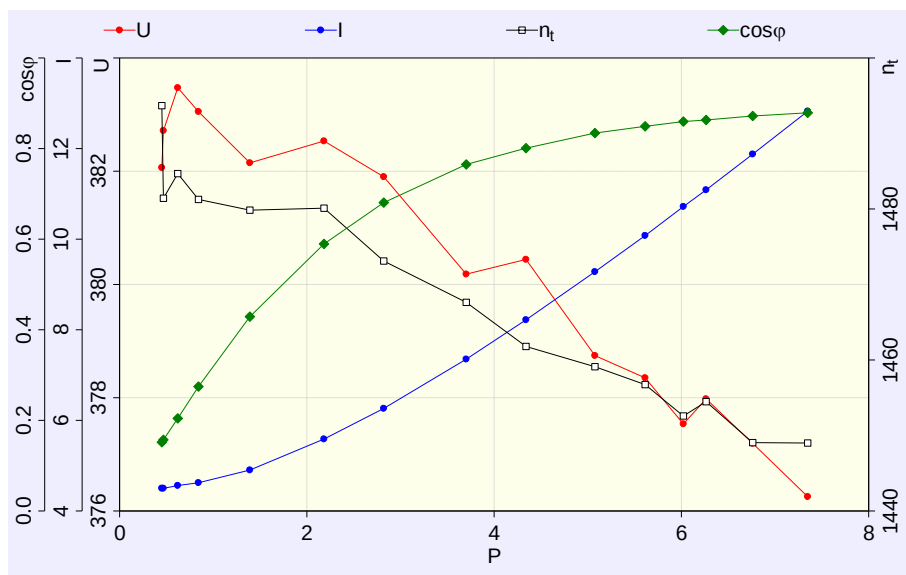


Rys.5.2. Zależności $I = f(U)$, $P = f(U)$, $\cos\varphi = f(U)$ dla stanu zwarcia

Tabela 5.2.

U	I	P	cosφ	U ₁
7,645048	0,7081	0,002746	0	0
10,64928	1,052313	0,005822	0	0
12,12176	1,235538	0,00787	0	0
13,99005	1,476761	0,011016	0,307857	0
15,95677	1,737402	0,015095	0,314368	0
17,62073	1,963651	0,019068	0,318166	0
19,1802	2,179689	0,023297	0,321727	0
20,79733	2,404809	0,028157	0,325041	0
22,25592	2,609769	0,033031	0,328328	0
24,06431	2,866748	0,039652	0,331846	0
25,3677	3,052868	0,044873	0,33453	0
26,49782	3,217515	0,049613	0,335976	0
28,51861	3,507436	0,058839	0,339614	0
30,46128	3,789285	0,068258	0,341421	0
32,21058	4,04675	0,077381	0,342743	0
34,15899	4,331868	0,088483	0,345236	0
36,57517	4,685068	0,103349	0,348211	0
39,21858	5,076878	0,12113	0,351237	0
41,13943	5,368419	0,135119	0,353225	0
43,50529	5,722289	0,153256	0,355421	0
45,61487	6,044054	0,17061	0,35728	0
47,57785	6,341788	0,187366	0,358521	0
49,62077	6,658917	0,206395	0,360639	0
51,96424	7,024393	0,229405	0,362852	0
54,34651	7,401564	0,254511	0,365301	0
56,63718	7,764302	0,279818	0,367376	0
60,28915	8,359785	0,323457	0,370528	0
63,62199	8,907358	0,367361	0,374262	0
66,86747	9,447964	0,413145	0,377562	0
70,30454	10,032	0,464649	0,380359	0
72,96547	10,49691	0,507391	0,382475	0

76,80976	11,16643	0,574804	0,386927	0
80,45173	11,81847	0,642808	0,390323	0
84,94864	12,63234	0,73369	0,394741	0
88,50982	13,29538	0,811915	0,398344	0
90,88841	13,73531	0,867294	0,401105	0



Rys.5.3. Zależności $U = f(P)$, $I = f(P)$, $n_t = f(P)$, $\cos\varphi = f(P)$ dla stanu obciążenia

Tabela 5.3.

P	U	I	n_t	cos#v\
0,4517	382,0649	4,499459	1493,692	0,151702
0,468099	382,7137	4,500196	1481,398	0,156917
0,619966	383,4706	4,560518	1484,697	0,204673
0,841138	383,0526	4,621875	1481,261	0,274303
1,391835	382,1507	4,901049	1479,816	0,429046
2,182363	382,5348	5,588404	1480,114	0,589397
2,821866	381,9044	6,266147	1473,103	0,680802
3,702649	380,1851	7,352685	1467,623	0,764735
4,338769	380,4426	8,221038	1461,763	0,800922
5,07766	378,7431	9,283355	1459,084	0,833783
5,611302	378,3502	10,08195	1456,76	0,849307
6,022682	377,5344	10,71902	1452,563	0,859247
6,265266	377,9761	11,08707	1454,452	0,863173
6,762507	377,19	11,87373	1449,038	0,871766
7,349337	376,255	12,82715	1449,018	0,879175

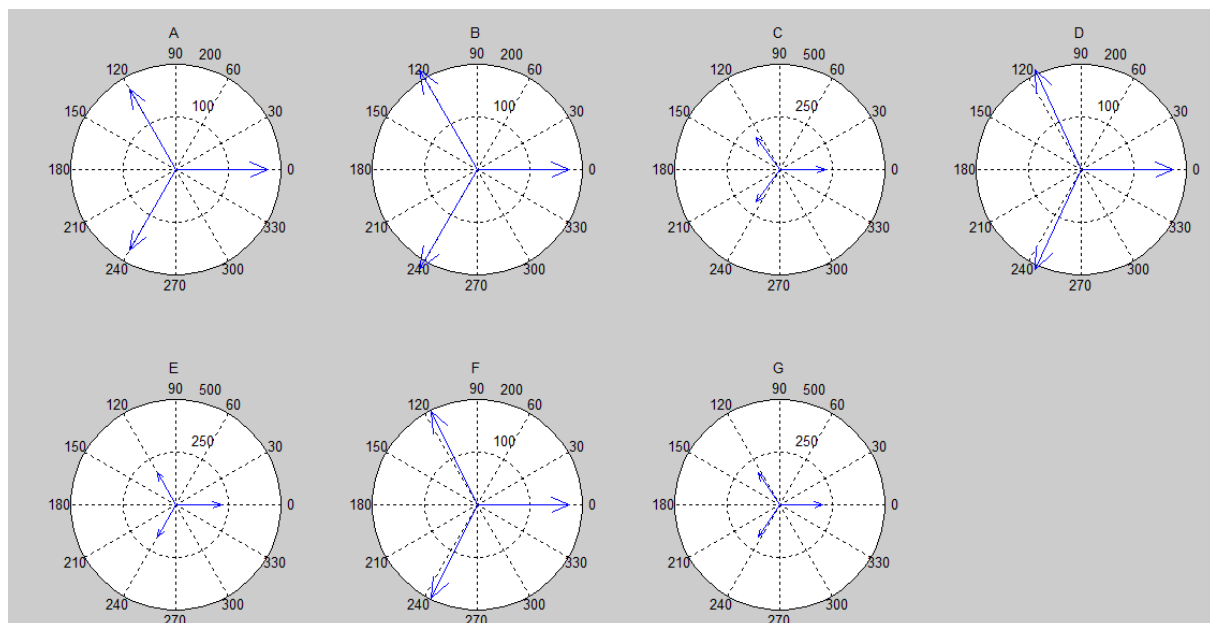
Załącznik 3

Zaprogramowanie zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu, przy założeniu, że zmiana występuje skokowo zmiana przy przejściu napięcia przez zero.

Do zaprogramowania zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu wykorzystano obliczenia zgodnie z klasyfikacją Bollena wg [7], [10] przedstawione w tabeli 5.4 :

Tabela 5.4.

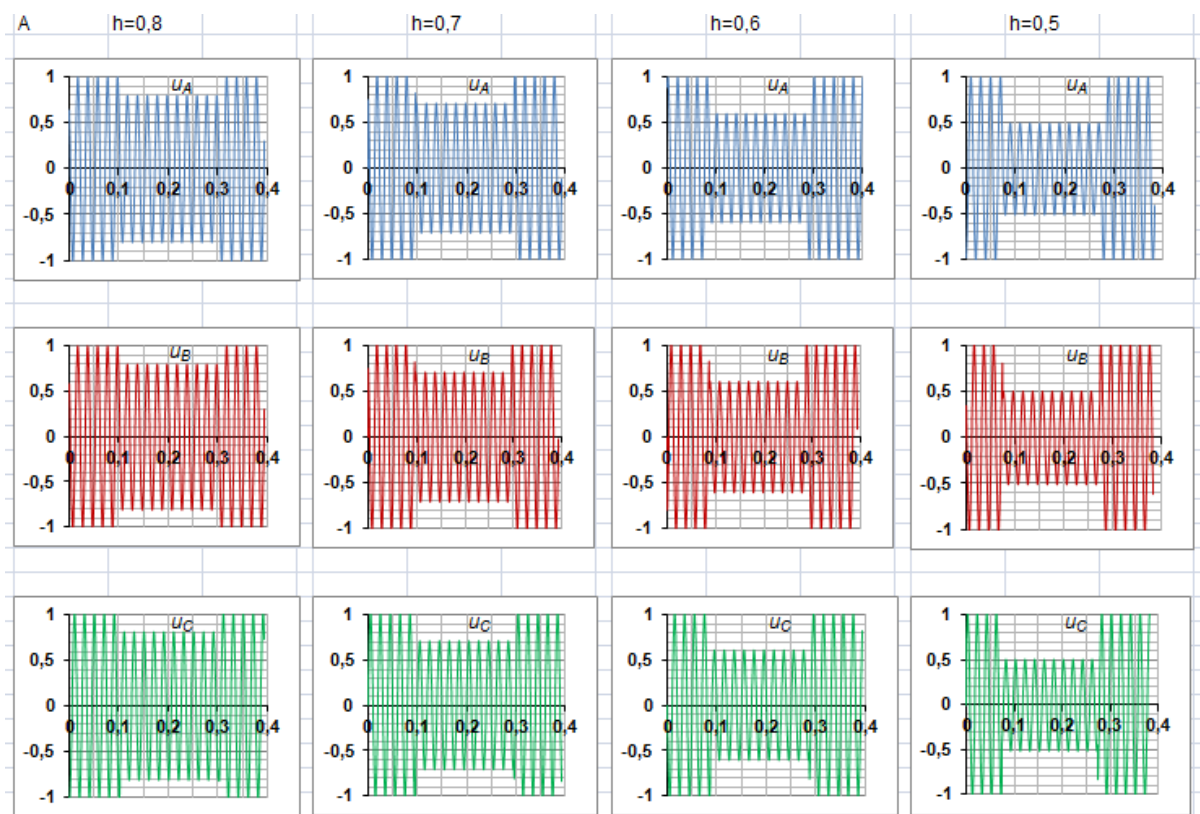
obliczenia zapadów wg klasyfikacji Bollena										$AU_A = h \cdot U$ $AU_B = -1/2 \cdot h \cdot U \cdot j^{*1,73 \cdot h \cdot U}$ $AU_C = -1/2 \cdot h \cdot U \cdot j^{*1,73 \cdot h \cdot U}$											
typy zapadów w formie równań																					
h 0,8 U[V] 230					h 0,7 U[V] 230					h 0,6 U[V] 230					h 0,5 U[V] 230						
re	im	ampli	kąt	u	re	im	ampli	kąt	u	re	im	ampli	kąt	u	re	im	ampli	kąt	u		
AU _A	184	0	184	0	0,8	AU _A	161	0	161	0	0,7	AU _A	138	0	138	0	115	0	115		
AU _B	-92	-159	184	240	0,8	AU _B	-81	-139	161	240	0,7	AU _B	-69	-120	138	240	0,6	115	240	0,5	
AU _C	-92	159	184	120	0,8	AU _C	-81	139	161	120	0,7	AU _C	-69	120	138	120	0,6	115	120	0,5	
BU _A	184	0	184	0	0,8	BU _A	161	0	161	0	0,7	BU _A	138	0	138	0	115	0	115	0	0,5
BU _B	-115	-199	230	240	1	BU _B	-115	-199	230	240	1	BU _B	-115	-199	230	240	1	115	240	1	
BU _C	-115	199	230	120	1	BU _C	-115	199	230	120	1	BU _C	-115	199	230	120	1	115	120	1	
CU _A	230	0	230	0	1	CU _A	230	0	230	0	1	CU _A	230	0	230	0	230	0	230	0	1
CU _B	-92	-127	157	234	0,68	CU _B	-81	-98	127	230	0,55	CU _B	-69	-72	100	226	0,43	76	221	0,33	
CU _C	-92	127	157	126	0,68	CU _C	-81	98	127	130	0,55	CU _C	-69	72	100	134	0,43	76	139	0,33	
DU _A	184	0	184	0	0,8	DU _A	161	0	161	0	0,7	DU _A	138	0	138	0	115	0	115	0	0,5
DU _B	-92	-199	219	245	0,95	DU _B	-81	-199	215	248	0,93	DU _B	-69	-199	211	251	0,92	207	254	0,9	
DU _C	-92	199	219	115	0,95	DU _C	-81	199	215	112	0,93	DU _C	-69	199	211	109	0,92	207	106	0,9	
EU _A	230	0	230	0	1	EU _A	230	0	230	0	1	EU _A	230	0	230	0	230	0	230	0	1
EU _B	-92	-159	184	240	0,8	EU _B	-81	-139	161	240	0,7	EU _B	-69	-120	138	240	0,6	115	240	0,5	
EU _C	-92	159	184	120	0,8	EU _C	-81	139	161	120	0,7	EU _C	-69	120	138	120	0,6	115	120	0,5	
FU _A	184	0	184	0	0,8	FU _A	161	0	161	0	0,7	FU _A	138	0	138	0	115	0	115	0	0,5
FU _B	-92	-186	207	244	0,9	FU _B	-81	-179	197	246	0,85	FU _B	-69	-173	186	248	0,81	176	251	0,76	
FU _C	-92	186	207	116	0,9	FU _C	-81	179	197	114	0,85	FU _C	-69	173	186	112	0,81	176	109	0,76	
GU _A	215	0	215	0	0,93	GU _A	207	0	207	0	0,9	GU _A	199	0	199	0	192	0	192	0	0,83
GU _B	-107	-159	192	236	0,84	GU _B	-104	-139	174	233	0,75	GU _B	-100	-120	156	230	0,68	138	226	0,6	
GU _C	-107	159	192	124	0,84	GU _C	-104	139	174	127	0,75	GU _C	-100	120	156	130	0,68	138	134	0,6	



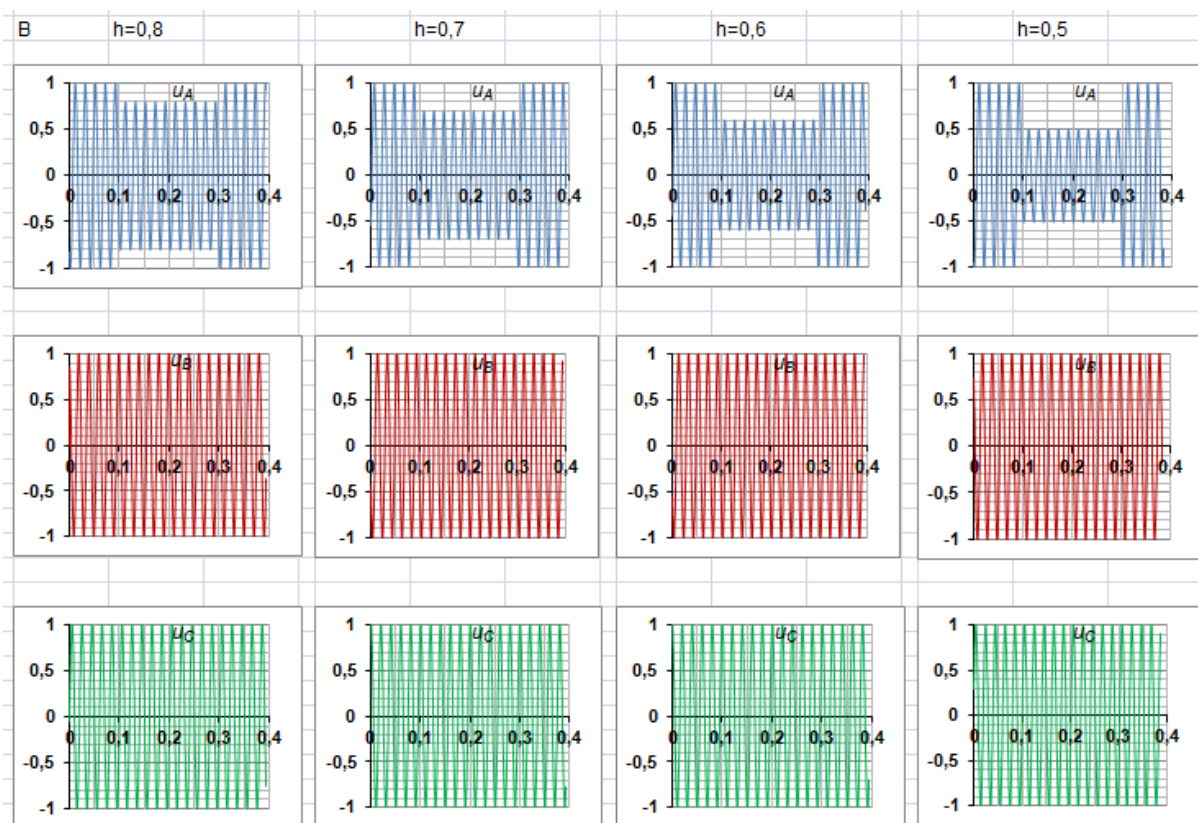
Rys.5.4. Typy zapadów napięcia wg Bollena (wykres z MATLAB SIMULINK)

Zaprogramowane przebiegi napięć podczas symulacji zapadów na generatorze napięć CHROMA [87] zostały zweryfikowane pomiarowo – wyniki przedstawiono na rysunkach 5.5a – 5.5p.

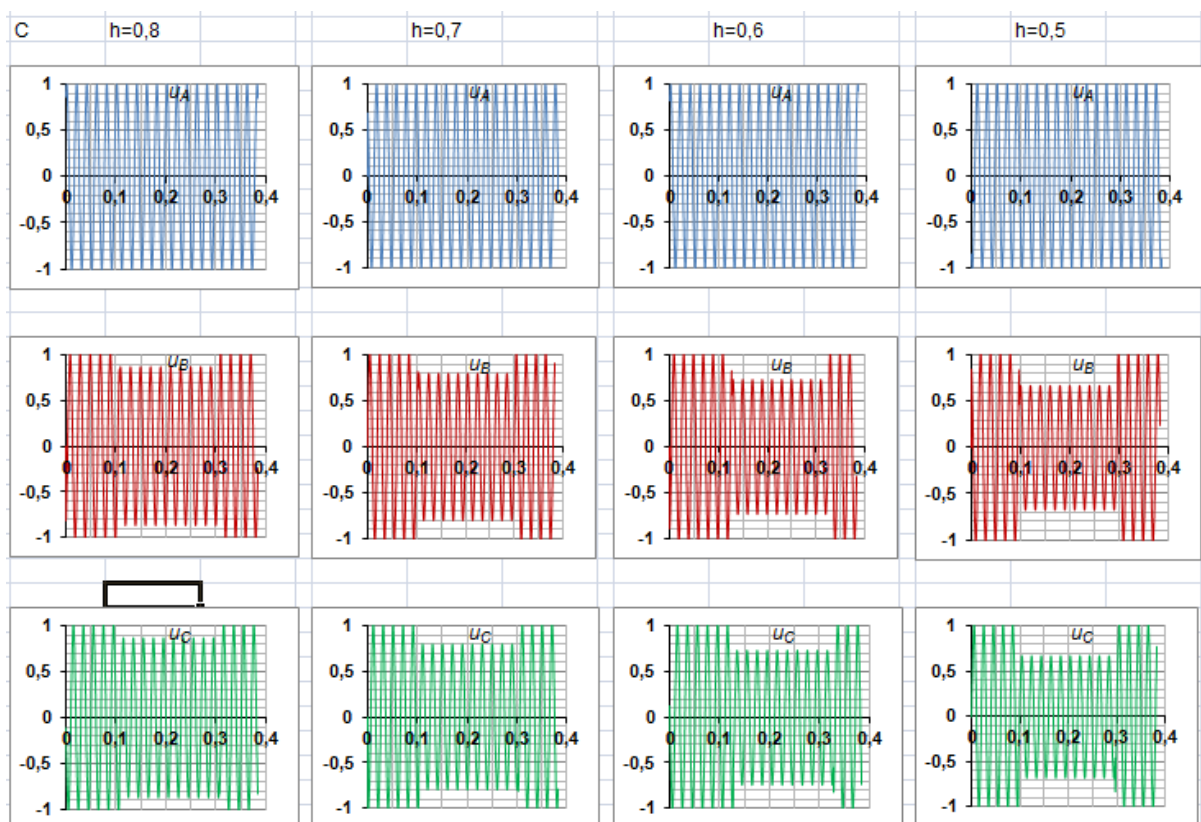
Tak przygotowane zapady napięć wykorzystano podczas pomiarów laboratoryjnych.



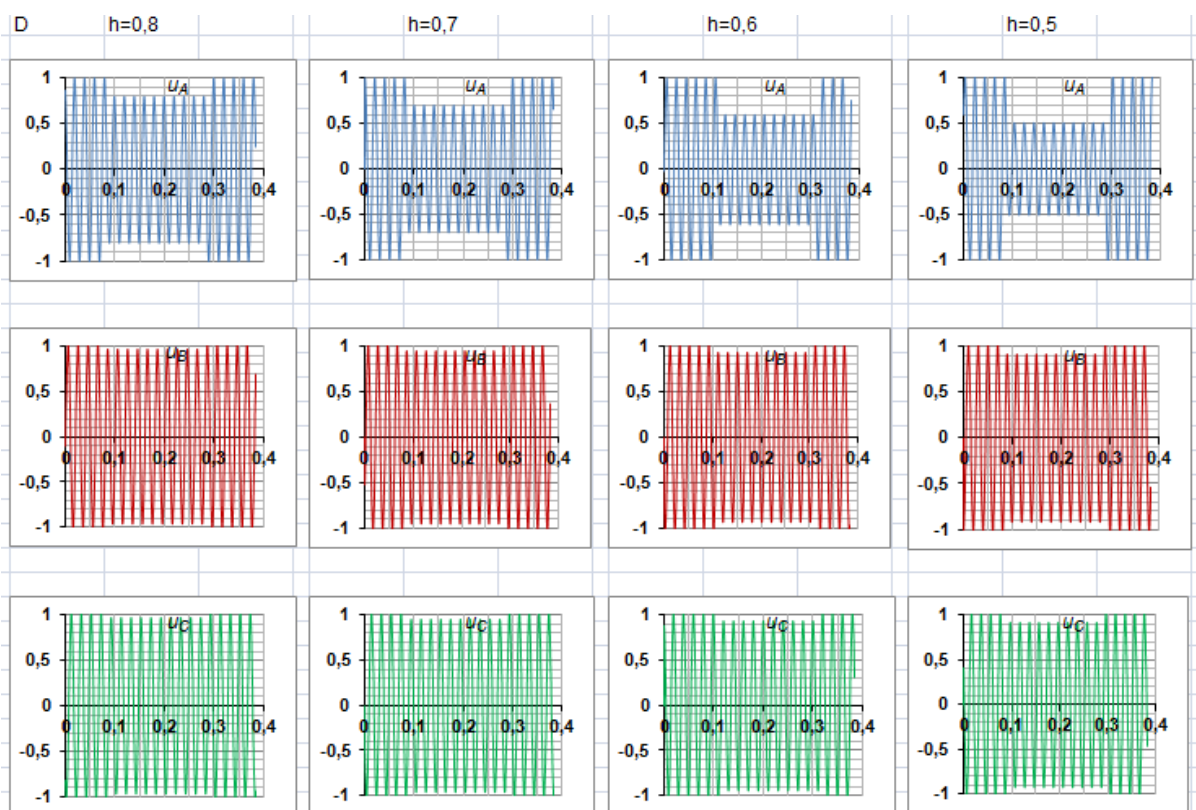
Rys.5.5a. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu A, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



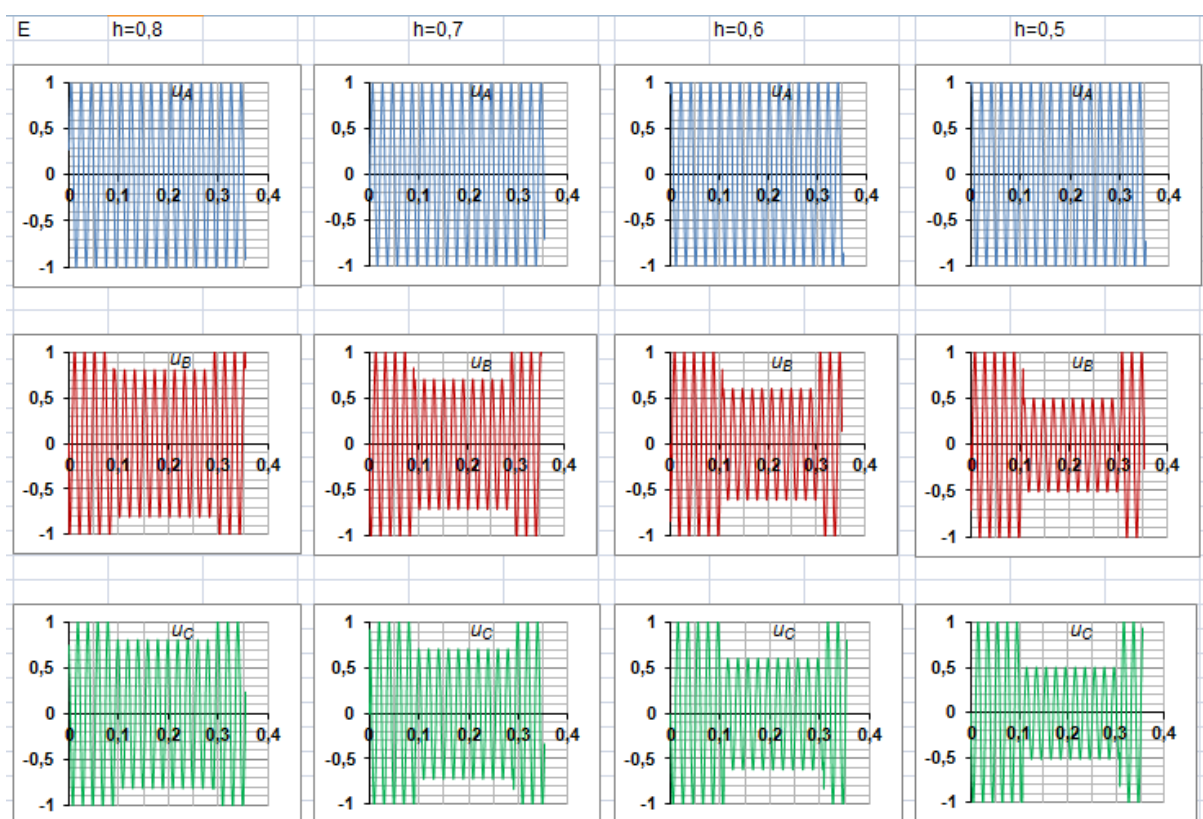
Rys.5.5b. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu B, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



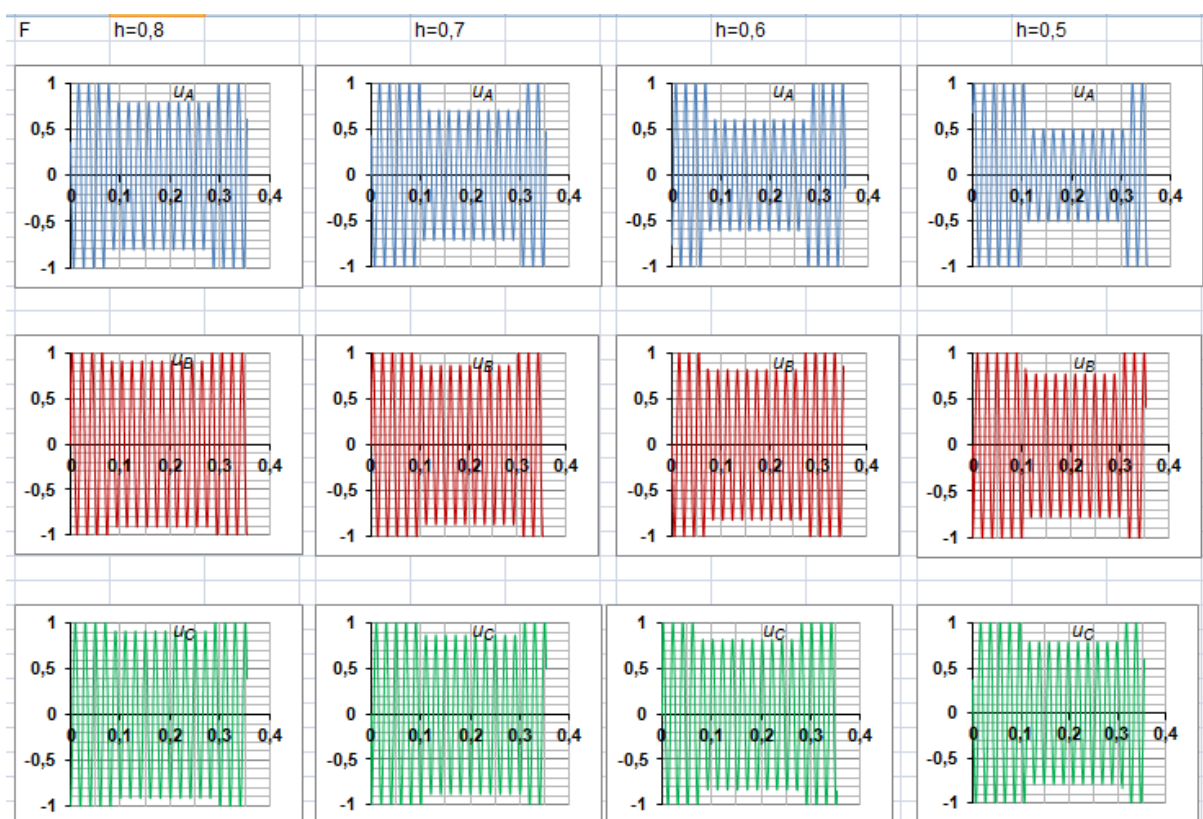
Rys.5.5c. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu C, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



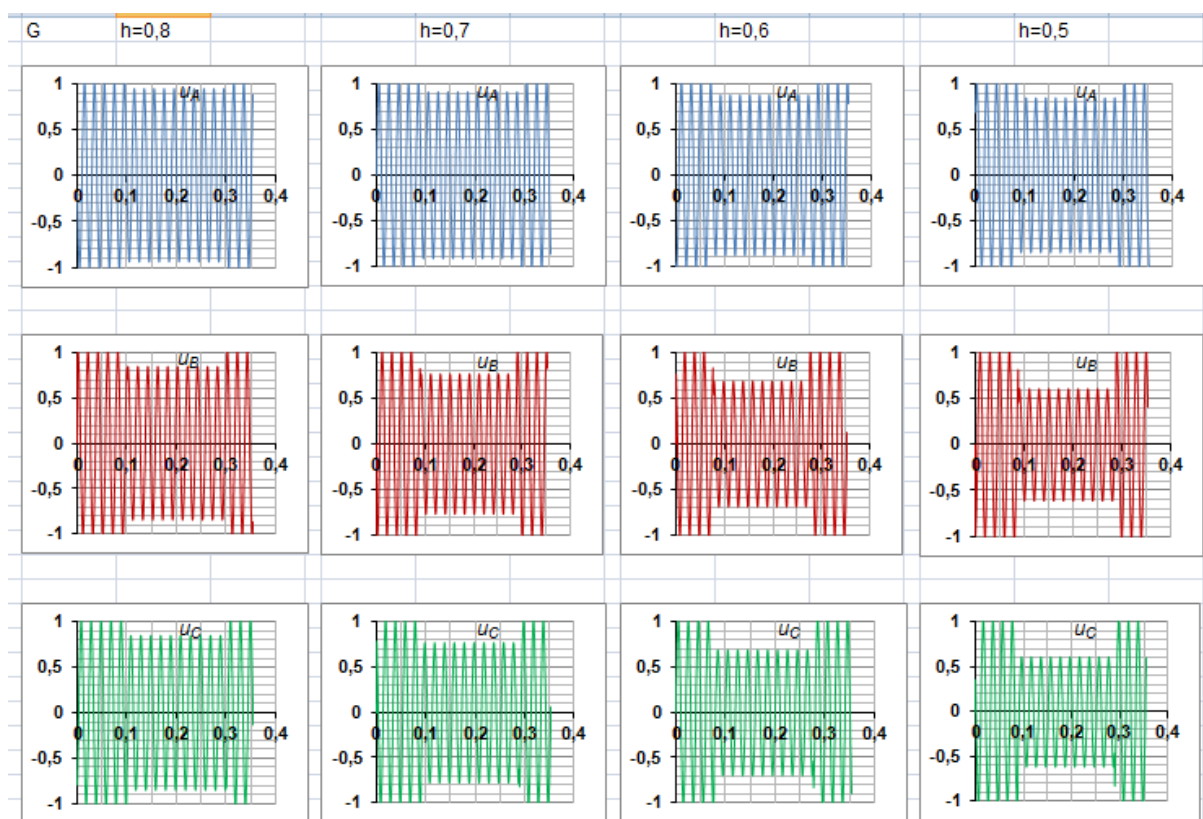
Rys.5.5d. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu D, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



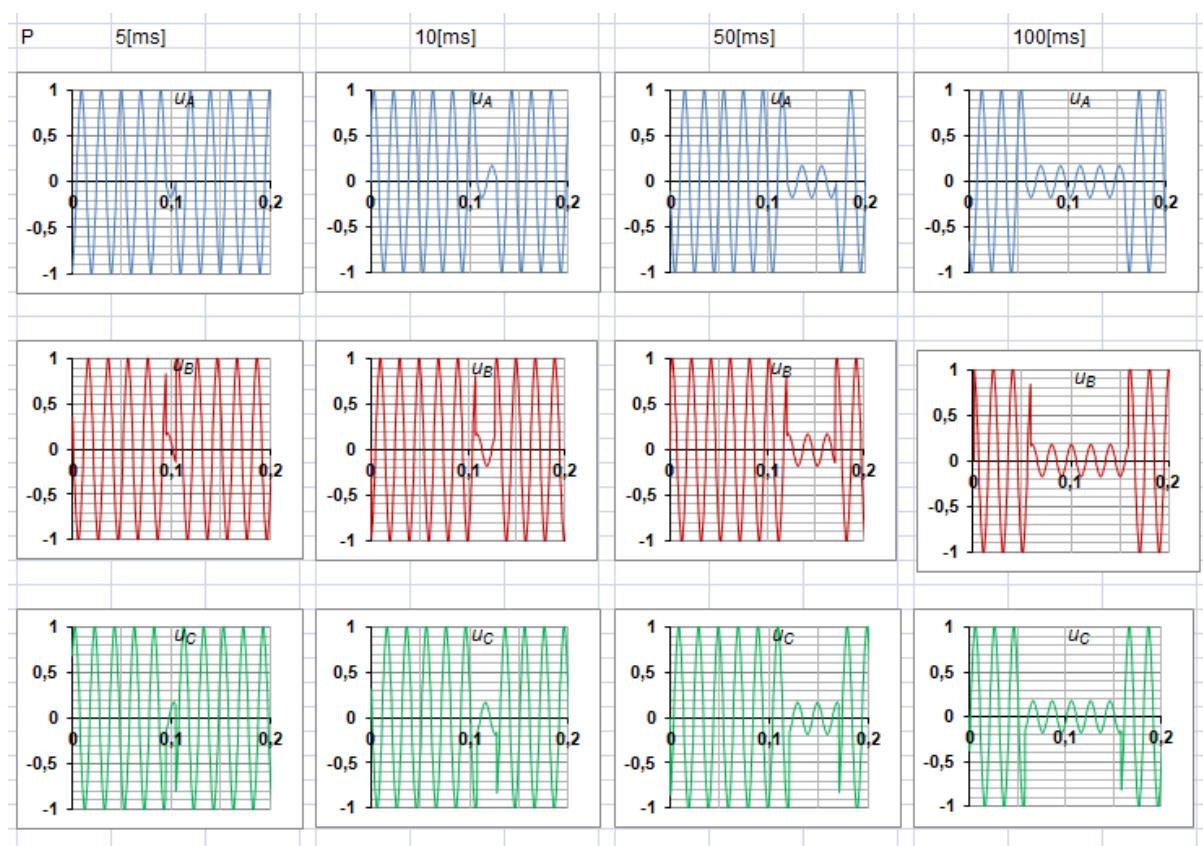
Rys.5.5e. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu E, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



Rys.5.5f. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu F, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



Rys.5.5g. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas zapadu typu G, czas trwania zapadu 200 [ms], amplituda obniżona kolejno o 20%, 30%, 40%, 50%



Rys.5.5p. Przebiegi napięć fazowych A, B, C podczas przerwy w zasilaniu, czas trwania przerwy 5 [ms], 10 [ms], 50 [ms], 100 [ms]

Literatura

- [1] Baggini A., Bua F., Analiza inwestycyjna rozwiązań w dziedzinie jakości zasilania – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [2] Balawender P., Analiza porównawcza własności metrologicznych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej - detekcja oraz agregacja zdarzeń – Praca Dyplomowa AGH, 2012.
- [3] Banach H., Badanie sprawności układu przemiennik częstotliwości – indukcyjny silnik klatkowy - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2014, Nr 103/3, 253-258.
- [4] Biblioteka programu MATLAB SIMULINK Version 7.9.0. (R2009b)
- [5] Bień A., Systemy Pomiarowe w Elektroenergetyce – Wydawnictwa AGH Kraków 2013
- [6] Bisztyga K., Sterowanie i regulacja silników elektrycznych – Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1989
- [7] Bollen M., Characterisation of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drives – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, 1997
- [8] Bollen M., The Influence of Motor Re-Acceleration on Voltage Sags – IEEE Transactions of Industry Applications Vol. 31, No. 4, 1995
- [9] Bolsens B., De Brabandere K., Van den Keybus J., Driesen J., Belmans R., Model-based generation of low distortion currents in grid-coupled PWM inverters using LCL filter – IEEE Transactions on power electronics, Vol. 21, No. 4, 2006
- [10] Bollen M. H. J., Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York: IEEE Press, 2000.
- [11] Böcker J., Geregelte Drehstromantriebe, Universität Paderborn, 2013.
- [12] Bradley D., Diagnostyka predykcyjna – klucz do jakości energii – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [13] Chapman D., Zapady napięcia – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [14] Collins E., Mansoor A., Effects of Voltage Sags on AC Motor Drives, Proc. IEEE Textile May 1997.
- [15] Das J. C., Effects of momentary voltage dips on the operation of induction and synchronous motors – transactions on Industry Applications Vol 26, No. 4, 1990
- [16] Deswal S. S., Dahiya R., Jain D. K., Ride-Through Topology for Adjustable Speed Drives (ASD's) During Power systems Faults – Journal of Computer Science, Informatics and Electrical Engineering Vol. 2, 2008
- [17] Deswal S. S., Dahiya R., Jain D. K., Effect of Voltage Unbalance on Adjustable Speed Drives and its Mitigation Using Supercapacitor – Int. Journal of Electronics Communications and Electrical Engineering Vol. 3, 2013
- [18] Dembowski A., Chudzik P., Osłabianie strumienia magnetycznego w trakcyjnych silnikach indukcyjnych Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2008, Nr 80/2, 39-44.
- [19] Dębowski A., Nowak R., Wygładzanie charakterystyki zadawania strumienia w napędach elektrycznych z osłabieniem pola - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2012, Nr 96, 147-152.
- [20] Djokic S. Z., Stockman K., Milanovic J. V., Desmet J. J. M., Belmans R., Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, 2005
- [21] Driesen J., Van Craenenbroeck T., Zaburzenia napięcia – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [22] dSPACE Embedded Success Catalog 2009 – www.dspace.com
- [23] Dubey G. K., Adjustable Speed Drives with Ride Through Capability against Voltage Sags and Swells and under Voltage – IE(I) Journal-EI 2005
- [24] Dugan R. C., Brooks D. L., Sundaram A., Using Voltage sag and Interruption Indices in Distribution Planning – IEEE 1998
- [25] Dybowski P., Lerch T., Milej W., Rams W., Skwarczyński J., Układy elektromechaniczne i transformatory. Obliczenia i zadania – Wydawnictwa AGH Kraków 2010.
- [26] Dybowski P., Krawiec H., Milej W., Diagnostyka silnika indukcyjnego napędu wentylatora spalin - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2014, Nr 104/4, 167-173.
- [27] Farahbakhsh A., Jalilian A., Operation of Induction Motor-Drive under Different Voltage Sag Conditions –
- [28] Gieras J., Gieras I., Electrical Energy Utilization, Publishing House Adam Marszałek, 1998.
- [29] Głowacz Z., Krawiec H., Analiza pracy silnika synchronicznego z magnesami trwałymi w warunkach zapadu napięcia - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2014, Nr 104/4, 89-95.
- [30] Głowacz Z., Krawiec H., Analiza pracy silnika indukcyjnego w warunkach zapadu napięcia - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2014, Nr 104/4, 167-173.
- [31] Głowacz Z., Krawiec H., Poprawa odporności regulowanych układów napędowych z silnikami indukcyjnymi na zapady napięcia – Konferencja Myczkowce 2013
- [32] Gołębowski L., Mazur D. (Editors), Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems – Springer International Publishing Switzerland 2015
- [33] Grunwald Z., Napęd elektryczny – Wydawnictwa Naukowo - Techniczne 1987
- [34] Guasch L., Corcoles F., Pedra J., Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19 No.2, 2004
- [35] Hartman M., Zimmermann K., Adjustable Speed Electrical Drives Immunity Test to Voltage Dips and Short Interruptions- Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej - Zeszyt 1/2 Rok 2004
- [36] Hanzelka Z., Jakość Energii Elektrycznej cz.2 – Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu – wpływ na pracę napędów elektrycznych o regulowanej prędkości.
- [37] Hanzelka Z., Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu – Seminarium Polskie Partnerstwo Jakości Zasilania Łódź 2003
- [38] Hanzelka Z., Jakość Dostawy Energii Elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia- Wydawnictwa AGH Kraków 2013
- [39] Hanzelka Z., jakość energii elektrycznej – www.twelvee.com, www.lpqj.org
- [40] Jakość zasilania – poradnik, Polskie Centrum Promocji Miedzi Wrocław 2001
- [41] Kaźmierkowski M., Malesani L., Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Sources PWM Converters” A Survey – IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 45, No. 5, October 1998
- [42] Kealenaer H., D., Poradnik samodzielnej oceny jakości zasilania – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [43] Klempka R., Sikora-Iliew R., Stankiewicz A., Świątek B., Modelowanie i symulacja układów elektrycznych w MATLABIE. Przykłady – Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Kraków
- [44] Leonard W., Control of Electrical Drives – Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1996
- [45] Lis J., Orłowska-Kowalska T., Kowalski C., Application of the Fixed-Point Full-Order Flux Observer in the Sensorless SFVC Induction Motor Drive – Przegląd Elektrotechniczny R. 83, NR 10/2007
- [46] Łukaniszyn M.: Podstawy elektromagnetyzmu. Oficyna Wydawnicza PO, Opole 2003

- [47] Mansoor A., Collins E. R., Morgan R. L., Effects on Unsymmetrical Voltage Sags on Adjustable Speed Drives – http://www.ece.clemson.edu/power/pqia/publications/Images/ASD_voltagesags.pdf
- [48] Marshall G., Chapman D., Odporność, niezawodność i redundancja – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [49] McGranaghan M., Mueller D., Samotij M., Voltage Sags in Industrial Systems – IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993
- [50] Mrozek B., Mrozek Z., MATLAB i SIMULINK wyd.2, Helion 2004
- [51] Narayanan R., Platt D., Perera S., Improvements to Voltage Sag Ride-Through Performance of AC Variable Speed Drives – University of Wollongong 2000
- [52] Newman G., Perera S., Gosbell V., Smith V., Voltage Sag Ride Through Improvement of Modern AC Drives: Review of Methods and Case Study – University of Wollongong 2000
- [53] Norma PN-EN 61000-4-11 Metody badań i pomiarów. Badania odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia
- [54] Orcajo G. A., Cano R., Rojas C. H., Melero M. G., Cabanas M. F., Pedrayes F., <http://www.icrepq.com/full-paper-icrep/278-alonso.pdf>
- [55] Pedra J., Sainz L., Corcoles F., Effects of Symmetrical Voltage Sags on Squirrel-Cage Induction motors – Electrical Power Systems Research 77 (2007) 1672-1680
- [56] Petronijević M., Jeftenić B., Mitrović N., Kostić V., Voltage Sag Drop in Speed Minimization in Modern Adjustable Speed Drives, Ser. Elec. Energ. Vol.16, Dec. 2006, pp. 231-337.
- [57] Pichai A., Effects of Large Induction Motors on Voltage Sag – Power and Energy Engineering Conference 2012
- [58] Piątek K., Zastosowanie aktywnych układów szeregowych do poprawy jakości energii elektrycznej – Rozprawa doktorska AGH 2012
- [59] Pierz P., Identyfikacja i klasyfikacja zakłóceń jakości energii elektrycznej – VII Konferencja Naukowo – Techniczna Sieci 2012
- [60] Pietiläinen K., Voltage sag ride-through of AC drives: control and analysis – Dissertation KTH Stockholm 2005
- [61] Piróg S., Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej – Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków 2006.
- [62] Plamitzer A., Maszyny elektryczne – Wydawnictwa Naukowo - Techniczne 1986
- [63] Programmable AC Source 61511/61512 User's Manual CHROMA version 1.1 2009 - www.chromaate.com
- [64] Program REGIS wersja 08, AGH 2005
- [65] Program LABMOT wersja 1.2, AGH 2010
- [66] Rams W., Skwarczyński J., Laboratorium Maszyn Elektrycznych – Wydawnictwa AGH 2009
- [67] Sarmiento H., Estrada E., A Voltage Sag Study in an Industry with Adjustable Speed Drives – IEEE Industry Applications Magazine 1996
- [68] Schönfeld R., Die Technik der Elektrischen Antriebe – Grundlagen, VEB Verlag Technik, Berlin 1986
- [69] Sieklucki G., Automatyka Napędu – Wydawnictwa AGH Kraków 2009
- [70] Sieklucki G., Bisztyga B., Zdrojewski A., Orzechowski T., Sykulski R. – Modele i zasady sterowania napędami elektrycznymi – Wydawnictwa AGH Kraków 2014
- [71] Sieklucki G., Orzechowski T., Sykulski R., Model matematyczny napędu z silnikiem indukcyjnym – metoda DTC-SVM – Elektrotechnika i Elektronika 1-2, 33-40
- [72] Shi K., L., Chan T. F., Wong Y. K., Ho S. L., Modelling and Simulation of the Three-Phase Induction Motor using SIMULINK – Int. J. Elect. Enging. Educ. Vol.36, pp. 163-172, 1999
- [73] Skwarczyński J., Wykłady z maszyn elektrycznych – Instytut Politechniczny Tarnów 2007
- [74] Słupski P., Lokalizacja źródeł zapadów napięcia w systemie elektroenergetycznym – Praca Dyplomowa AGH, 2010.
- [75] Short Duration Voltage Sags can Cause Disruptions – Pacific Gas and Electric Company June 2000
- [76] Solutions to voltage sags and interruptions – Schneider Electric Industries S.A. - 09/2009
- [77] Stephens M., Jakość zasilania w ciągłych procesach produkcyjnych – Polskie Centrum Promocji Miedzi, maj 2002.
- [78] Stockman K., D'hulster F., Desmet J., Belmans R., Torque behavior of a field oriented induction motor drive towards voltage sag conditions.
- [79] Strzałka-Goluszka K., Strzałka J., Jakość energii elektrycznej i jej wpływ na pracę urządzeń elektrycznych – materiały SEP Kraków
- [80] Thasananutariya T., Chatratana S., McGranaghan M., Economic Evaluation of Solution Alternatives for Voltage Sags and Momentary Interruptions – Electrical Power Quality and Utilisation, Magazine Vol. 1, No. 2, 2005
- [81] Tunaboylu N. S., Collins E. R., Ride-Through Compensation of an Industrial Mixer Drive Subjected to Voltage Sags -
- [82] Tunia H., Kaźmierkowski M., Automatyka napędu przekształtnikowego – Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa 1987
- [83] Umrichter SINAMICS V20 – Katalog SIEMENS 02/2013
- [84] Weitendorf N., Direkte Rotorfluss- und Drehmomentregelung mit adaptiver Schalttafel fuer industrielle Asynchronantriebe – Dissertation TU Berlin 2008
- [85] Winkelkemper M., Reduzierung von Zwischenkreis Kapazitaeten in Frequenzumrichtern fuer Niederspannungsantriebe – Dissertation TU Berlin 2005
- [86] Van Zyl A., Spee R., Faveluke A., Bhowmik S., Voltage Sag Ride-Trough for Adjustable-Speed Drives with Active Rectifiers – IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, NO. 6, November/December 1998
- [87] VCFP Demo Release 4.0 – August 2003 dSPACE
- [88] Vegunta S.C., Anaya-Lara O., Milanovic J. V., Jenkins N., Sensitivity of active front-end ASDs and DFIGs to voltage sags and short interruptions – IEEE
- [89] Vu Van T., Driesen J., Belmans R., Power Quality and voltage stability of distribution system with distributed energy resources – International journal of distributed energy resources Vol. 1, No. 3, 2005.
- [90] Yalcinkaya G., Boolean H. J., Crossley P. A., Characterization of Voltage sags in Industrial Distribution Systems - IEEE