



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW PRZETWARZANIA ENERGII

Praca dyplomowa magisterska

*Ocena wpływu asymetrii trójfazowych napięć przemiennych na
sprawność silnika indukcyjnego - pomiary laboratoryjne.
Evaluation of the impact of three-phase AC voltage unbalance on
induction motor efficiency - laboratory measurements.*

Autor:

Kierunek studiów:

Opiekun pracy:

Arkadiusz Radoń

Elektrotechnika

dr inż. Michał Rad

Kraków, 2016

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631

z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Spis treści

1.	Wstęp	4
1.1.	Wprowadzenie	4
1.2.	Cel i zakres pracy	4
2.	Maszyna indukcyjna	5
2.1.	Konstrukcja maszyny indukcyjnej.....	5
2.2.	Zasada działania maszyny indukcyjnej	6
2.3.	Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej	8
2.4.	Charakterystyka mechaniczna i stany pracy	9
2.5.	Rozruch i regulacja prędkości.....	11
2.6.	Straty mocy i sprawność maszyny indukcyjnej	14
3.	Asymetria napięć i prądów.....	17
3.1.	Ogólna charakterystyka.....	17
3.2.	Współczynniki asymetrii.....	19
3.3.	Skutki asymetrii	19
4.	Pomiary laboratoryjne.....	20
4.1.	Dane znamionowe, oraz schemat układu pomiarowego	20
4.2.	Wykonanie pomiarów i obliczenia	22
4.3.	Wyniki obliczeń.....	24
5.	Podsumowanie i wnioski	33
6.	Bibliografia.....	34
	Spis tabel	34
	Spis rysunków.....	34
	Dodatek – algorytm obliczeń.....	36

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Silniki indukcyjne są najbardziej rozpowszechnionymi odbiornikami energii elektrycznej. Ich szerokie zastosowanie jak i tanie wykonanie powodują, że stanowią liczną grupę maszyn stosowanych w przemyśle, oraz w artykułach gospodarstwa domowego. Budowane są na napięcia od 100V do nawet 15kV, a moce maszyn indukcyjnych znajdują się w granicach od kilku kilowatów do kilku megawatów.

Silniki asynchroniczne ulegają ciągłym zmianom, gdyż wraz z rozwojem technologii wzrastają wymagania dotyczące ich sprawności. Zła jakość energii elektrycznej powoduje spadek sprawności, dlatego tak ważne jest ciągłe usprawnianie maszyn elektrycznych.

Sytuacjami odbiegającymi od warunków znamionowych, oznaczającymi się pogorszeniem jakości energii elektrycznej jest zasilanie silników napięciem odbiegającym od trójfazowego układu napięć symetrycznych. Asymetria napięciowa może powodować większe straty mocy na uzwojeniach maszyny indukcyjnej niż w przypadku zasilania z symetrycznej sieci, co skutkuje wzrostem wydzielania ciepła na zwojeniach tej maszyny. W najgorszym przypadku nadmierne nagrzewanie się maszyny może spowodować jej uszkodzeniem.

Asymetria napięciowa powoduje również wzrost prądów biernych, co przy dużej liczbie odbiorników w postaci silników indukcyjnych skutkuje większymi stratami ekonomicznymi.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy dyplomowej było wykonanie badań laboratoryjnych wpływu asymetrii napięć zasilających na sprawność silnika indukcyjnego obciążonego.

W poniższych rozdziałach zostały podane podstawowe informacje na temat maszyn indukcyjnych, ich budowy, zasady działania, strat mocy, oraz skutki zasilania silników asymetrycznym układem napięć. Kolejne części pracy dyplomowej przedstawiają wyniki pomiarów laboratoryjnych, oraz wnioski z zaobserwowanych wyliczeń.

2. Maszyna indukcyjna

Maszyna indukcyjna, najczęściej stosowana jako trójfazowy silnik indukcyjny ma prostą budowę i jest mniej zawodna od innych rodzajów maszyn elektrycznych. Charakteryzuje się również łatwością obsługi, oraz tanim kosztem jej wykonania.

Swoją nazwę „maszyna indukcyjna” zawdzięcza temu, że w wyniku działania indukcji elektromagnetycznej wytworzonej przez prądy wirnika, oraz stojana maszyna jest wprowadzana w ruch obrotowy. Szczegółowa zasada działania tej maszyny opisana jest w podrozdziale 2.2.

2.1. Konstrukcja maszyny indukcyjnej

Silnik indukcyjny składa się ze stojana i wirującego w nim wirnika [7]. Rdzenie obu części składają się z pakietowanych blach, izolowane papierem, lub lakierem izolacyjnym w celu zmniejszenia strat związanych z prądami wirowymi. W rdzeniu stojana, oraz wirnika wycięte są żłobki w celu umieszczenia w nich uzwojenia. Żłobki wirnika mają różne kształty dzięki czemu silniki mają różne właściwości rozruchowe.

Uzwojenia stojana maszyny asynchronicznej są trójfazowe symetryczne i pracują w układzie gwiazdy lub trójkąta. Aby użytkownik mógł korzystać z obu tych układów końce uzwojeń są wyprowadzone na tabliczkę zaciskową.

Silnik indukcyjny jest maszyną bezkomutatorową, w której zasilane jest tylko jedno uzwojenie. Z powodu braku komutatora jedyną częścią maszyny indukcyjnej podlegającą zużyciu są łożyska.

Wirniki małych maszyn osadzone są bezpośrednio na wale, natomiast dużych maszyn na piaście. Ze względu na sposób wykonania wirnika rozróżnia się dwa typy maszyny indukcyjnej: klatkową i pierścieniową.

Wirnik maszyny klatkowej, jak sama nazwa wskazuje składa się z uzwojenia w postaci klatki o nieizolowanych prętach zwartych na swoich końcach pierścieniami. Klatkę tą można traktować jako uzwojenie wielofazowe o liczbie faz równej ilości prętów klatki. Uzwojenie to osadzone jest w żłobkach wirnika. Najczęściej odlewane jest z aluminium, lub miedzi, natomiast dla większych silników klatka może być wykonana ze spawanych mosiężnych prętów.

W silnikach pierścieniowych uzwojenie wirnika przypomina uzwojenie stojana. Z reguły jest trójfazowe, wykonane z przewodów izolowanych. Początki uzwojeń są ze sobą zwarte, natomiast końce uzwojeń są wyprowadzone na pierścień ślizgowe, dzięki którym możliwe jest połączenie urządzeń rozruchowych i regulacyjnych.

Silnik pierścieniowy charakteryzuje się większą możliwością w zakresie regulacji, oraz możliwością łagodnego rozruchu (regulacja poślizgiem) przy stałym napięciu i częstotliwości, natomiast silnik klatkowy jest prosty w budowie i tani.

Istnieją również modyfikacje silników klatkowych, które charakteryzują się lepszymi parametrami rozruchowymi od zwykłych silników klatkowych. Są to silniki dwuklatkowe i głębokożłobkowe.

W silnikach dwuklatkowych występuje wirnik w postaci dwóch klatek. Jedna klatka (zewnątrzna) posiada pręty o mniejszym przekroju i nazywana jest klatką rozruchową, natomiast druga klatka, znajdująca się wewnątrz klatki rozruchowej posiada pręty o większym przekroju. Klatka wewnętrzna nazywana jest klatką roboczą, lub klatką pracy.

W wirnikach głębokożłobkowych zasadniczą rolę odgrywa kształt prętów klatki. W silniku dwuklatkowym jak i głębokożłobkowym występuje zjawisko wypierania prądu powodujące zmniejszenie prądu rozruchowego. Zjawisko to polega na tym, że w czasie rozruchu prądy płyną jedynie zewnętrznymi częściami prętów wirnika.

W silniku dwuklatkowym w początkowej fazie rozruchu wartość poślizgu jest duża, a w wirniku występują prądy o dużej częstotliwości. Reaktancja rozproszenia (która jest zależna od poślizgu) klatki roboczej jest tak duża, że można przyjąć, że prąd płynie klatką rozruchową. Po rozruchu, gdy poślizg i częstotliwość prądu w klatce jest mała, zmniejsza się wartość reaktancji. Prąd płynie głównie klatką roboczą, która ze względu na duży przekrój posiada małą rezystancję. Dla silników głębokożłobkowych rozruch jak i zjawisko wypierania prądu przebiega analogicznie jak w przypadku silnika dwuklatkowego.

Istotnym czynnikiem pracy maszyny indukcyjnej jest, aby szczelina pomiędzy wirnikiem, a stojanem była jak najmniejsza. Dzięki temu uzyskuje się duży współczynnik mocy, oraz mały prąd biegu jałowego.

2.2. Zasada działania maszyny indukcyjnej

Trójfazowe symetryczne uzwojenie zasilone napięciem trójfazowym symetrycznym powoduje powstanie strumieni magnetycznych. Wypadkowa strumieni pochodząca od 3 faz powoduje powstanie kołowego pola wirującego obracającego się z prędkością synchroniczną:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

Gdzie:

n_1 – prędkość wirowania pola stojana

f_1 – częstotliwość napięcia zasilającego obwód stojana

p – liczba par biegunów

W wyniku przecinania się przez pręty uzwojenia wirnika linii sił pola magnetycznego indukują się w tych prętach siły elektromotoryczne. Siły te wymuszają przepływ prądu w uzwojeniach. Prądy te wytwarzają pole elektromagnetyczne, które oddziaływując na pole stojane wytwarza moment elektromagnetyczny T_e . Gdy moment ten jest większy od momentu obciążenia T_m maszyna zacznie się rozpędzać, aż do chwili gdy moment elektromagnetyczny silnika T_e zrówna się z wartością momentu obciążenia T_m . Gdy momenty się zrównoważą silnik będzie pracować w stanie ustalonym. Prędkość wirowania wirnika będzie dążyć do uzyskania prędkości bliskiej prędkości wirowania pola stojana. Wirnik nie może osiągnąć prędkości synchronicznej, gdyż jakby tak się stało to pole wytworzone w stojanie nie przecinałoby prętów wirnika, a to powodowałoby brak wytwarzania pola w uzwojeniu wirnika, czego wynikiem byłby zerowy moment elektryczny $T_e=0$. Z tego względu maszyny indukcyjne mogą pracować dla prędkości różnych niż prędkość synchroniczna, stąd również ich druga nazwa to maszyny asynchroniczne.

Silniki asynchroniczne charakteryzują się występowaniem poślizgu. Jest to różnica prędkości wirnika od prędkości synchronicznej:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad (2.2)$$

Gdzie:

n_1 – prędkość obrotowa wirowania pola stojana (prędkość synchroniczna)

n – prędkość obrotowa wirnika

ω_1 – prędkość kątowna pola stojana

ω – prędkość kątowna wirnika

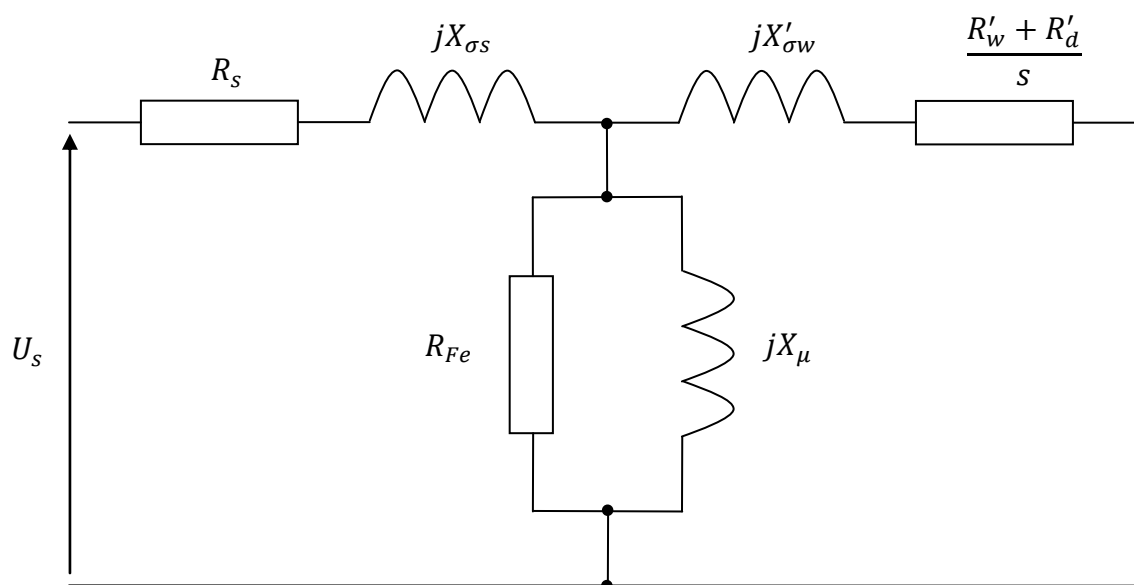
Z tego względu częstotliwość napięcia w uzwojeniu wirnika wynosi:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (2.3)$$

W typowych silnikach indukcyjnych wartość poślizgu mieści się w granicach $0,02 \div 0,04$. Dla tak małych wartości poślizgu, częstotliwość w uzwojeniach wirnika jest bardzo mała dlatego straty w rdzeniu wirnika są na tyle małe, że wirnik nie musiałby być wykonany z pakietu blach. Niemniej jednak występowanie stanów tj. rozruch, regulacja prędkością, czy praca hamulcowa powoduje, że konieczne jest pakietowanie blach wirnika.

2.3. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej

Ze względu na fakt, że częstotliwość napięcia po stronie stojana i po stronie wirnika nie są sobie równe jak zostało to przedstawione we wcześniejszym podrozdziale (2.3), niemożliwe jest przedstawienie obwodu stojana i wirnika połączonych razem na schemacie zastępczym. Aby jednak to zrobić należy sprowadzić obwód wirnika na stronę stojana co przedstawia rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej.

Gdzie:

U_s – napięcie na uzwojeniu stojana

R_s – rezystancja uzwojenia stojana

$X_{\sigma s}$ – reaktancja rozproszenia stojana

X_{μ} – reaktancja magnesująca

$X'_{\sigma w}$ – reaktancja rozproszenia wirnika

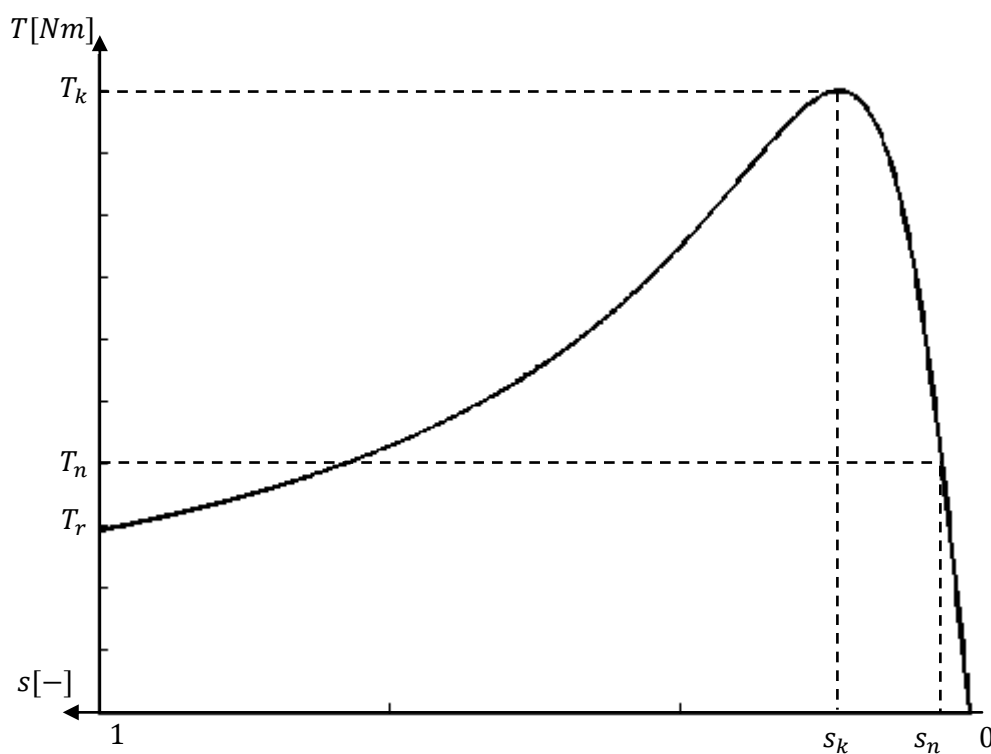
R'_w – rezystancja uzwojenia wirnika

R'_d – rezystancja dodatkowa (dla silnika klatkowego $R_d = 0$)

Przedstawiony schemat jest uproszczony. Uwzględnia podstawową harmoniczną pola, zakłada liniowość obwodu magnetycznego. Nie uwzględnia natomiast strat w izolacji i prądów pojemnościowych.

2.4. Charakterystyka mechaniczna i stany pracy

Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego przedstawiona na rysunku 2.2 jest zależnością momentu na wale silnika do jego prędkości.



Rys. 2.2. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego.

Obszar stabilnej pracy występuje dla wartości poślizgów mniejszych od poślizgu krytycznego i większych od poślizgu $s=0$. Jak można również zauważyć na rysunku 2.2 moment rozruchowy (dla $s=1$) jest ponad 3 razy mniejszy od momentu krytycznego. Mała jego wartość oznacza, że silnik ten nie może ruszyć gdy silnik obciążony jest większym momentem.

Charakterystykę tą można wyrazić za pomocą wzoru Klossa:

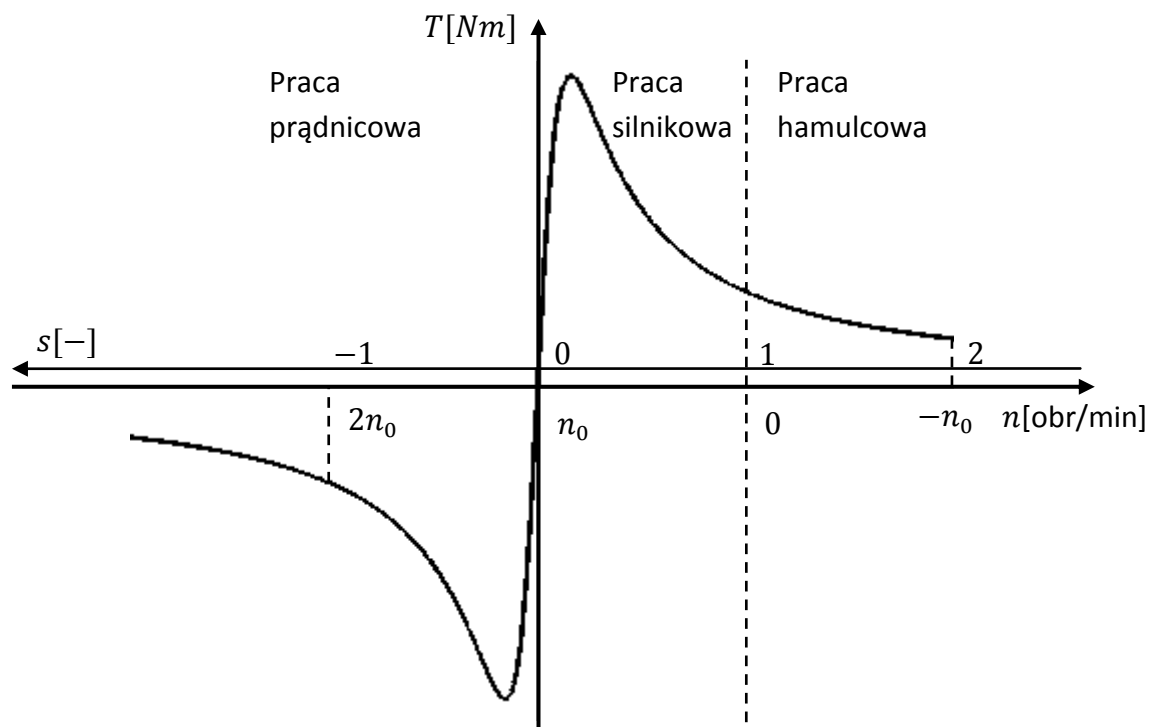
$$T = \frac{2 \cdot T_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.4)$$

Gdzie:

T_k - moment krytyczny (maksymalny)

s_k - poślizg krytyczny

Rysunek 2.2 przedstawia charakterystykę mechaniczną dla pracy silnikowej (tj. maszyna pobiera energię elektryczną, a oddaje energię mechaniczną). Pełną charakterystykę mechaniczną dla maszyny indukcyjnej z podziałem na typy pracy przedstawia rysunek 2.3.



Rys.2.3. Charakterystyka mechaniczna maszyny indukcyjnej z podziałem na typy pracy.

Powyższą charakterystykę można podzielić na 3 części. Pierwsza część należąca do wartości poślizgów mniejszych od zera jest charakterystyką dla pracy prądnicowej. W tym przypadku maszyna oddaje energię czynną do sieci, a wirnik napędzany jest przez zewnętrzny napęd. Pomimo, że maszyna oddaje moc czynną do sieci nie zmienia to faktu, iż potrzebuje ona do prawidłowego działania zasilania energią bierną. Maszyna indukcyjna jest odbiornikiem indukcyjnym, dlatego przy pracy prądnicowej aby maszyna została wzbudzona do wydawania energii czynnej do sieci, przyłączone są do uzwojenia stojana źródła energii biernej np. kondensatory.

Wirnik dla pracy prądnicowej obraca się w kierunku wirowania pola stojana, jednak jego prędkość jest większa od prędkości synchronicznej, toteż wartości poślizgu są ujemne.

Drugą częścią charakterystyki mechanicznej z rysunku 2.3 jest charakterystyka dla pracy silnikowej. W tym przypadku, tak jak było to opisane powyżej maszyna pobiera energię elektryczną z sieci a wydaje w postaci ruchu obrotowego wirnika. Podobnie jak w przypadku pracy prądnicowej wirnik obraca się w tym samym kierunku co pole stojana. Jednakże prędkość wirnika jest mniejsza od prędkości synchronicznej.

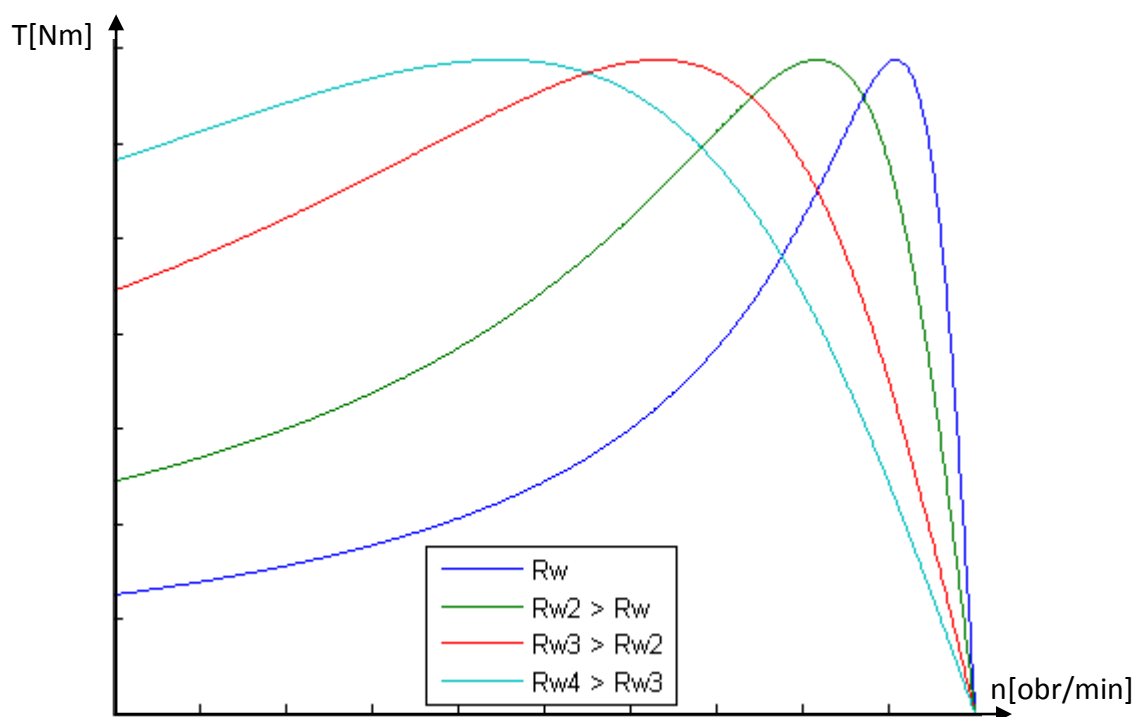
Trzecim charakterem pracy maszyny indukcyjnej jest praca hamulcowa. W tym przypadku wirnik obraca się w kierunku przeciwnym do wirowania pola stojana.

Występuje również stan, w którym maszyna indukcyjna pracuje jako transformator. Jest to możliwe dla silnika pierścieniowego, gdyż ma on wyprowadzone końce uzwojeń wirnika. Prędkość obrotowa wirnika przy pracy transformatorowej jest równa zero.

2.5. Rozruch i regulacja prędkością

Rozruch jest to przejście ze stanu w którym wirnik jest zatrzymany do stanu pracy ustalonej przy danych warunkach zasilania i obciążenia. Rozruch może być dokonany na kilka możliwych sposobów:

- Rozruch bezpośredni – Polega na bezpośrednim przyłączeniu do uzwojeń stojana napięcia sieciowego. Wartości prądów pobieranych przez silnik są 4÷8 krotnie większe od wartości prądu znamionowego. Jest to dość niebezpieczne dla dużych maszyn, gdyż może to spowodować uszkodzenie cieplne maszyny, jak i również doprowadzić do zapadów i kołysań napięcia w sieci zasilającej. Rozruch bezpośredni stosowany jest w małych nieobciążonych maszynach.
- Rozruch za pomocą autotransformatora – metoda ta polega na obniżeniu napięcia zasilającego obwód stojana. Dzięki temu również zmniejsza się wartość prądu co chroni przed uszkodzeniem maszyny. Jednak obniżenie wartości napięcia powoduje również zmniejszeniem się wartości momentu elektromagnetycznego gdyż ($T_k \sim U^2$). Przy małej wartości momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu możliwe jest wystąpienie utknięcia maszyny dlatego konieczne jest, aby maszyna była nieobciążona.
- Rozruch za pomocą przełącznika gwiazda-trójkąt – Przy połączeniu uzwojeń silnika w gwiazdę dla takiego samego napięcia zasilającego z sieci, napięcia na poszczególnych fazach uzwojeń stojana są o $\sqrt{3}$ mniejsze niż przy połączeniu w trójkąt. Prąd przy połączeniu w gwiazdę jest zatem 3-krotnie mniejszy co zmniejsza zagrożenie uszkodzenia cieplnego maszyny. Jednakże wraz ze zmniejszeniem napięcia na uzwojeniach stojana mniejsza się również moment elektromagnetyczny tak jak było to opisane przy rozruchu za pomocą autotransformatora. Ten rodzaj rozruchu stosowany jest w nieobciążonych maszynach małych i średnich mocy.
- Rozruch przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika – ta metoda dostępna jest tylko dla silników pierścieniowych, gdyż w silnikach klatkowych nie ma dostępu do uzwojeń wirnika. Do pierścieni ślizgowych wirnika dołączany jest rozrusznik (układ o skokowej zmianie rezystancji). Rozruch rozpoczyna się dla największej rezystancji w obwodzie wirnika. Co pewien czas rezystancja ta przez rozrusznik zostaje zmniejszana aż do momentu zwarcia ze sobą pierścieni ślizgowych. Dzięki takiej operacji moment rozruchowy jest dostatecznie duży aby maszyna bez większych oporów rozpędziła się do prędkości ustalonej. Na poniższym rysunku została przedstawiona charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych wartości rezystancji dodatkowej w obwodzie wirnika.



Rys. 2.4. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych wartości rezystancji uzwojenia wirnika.

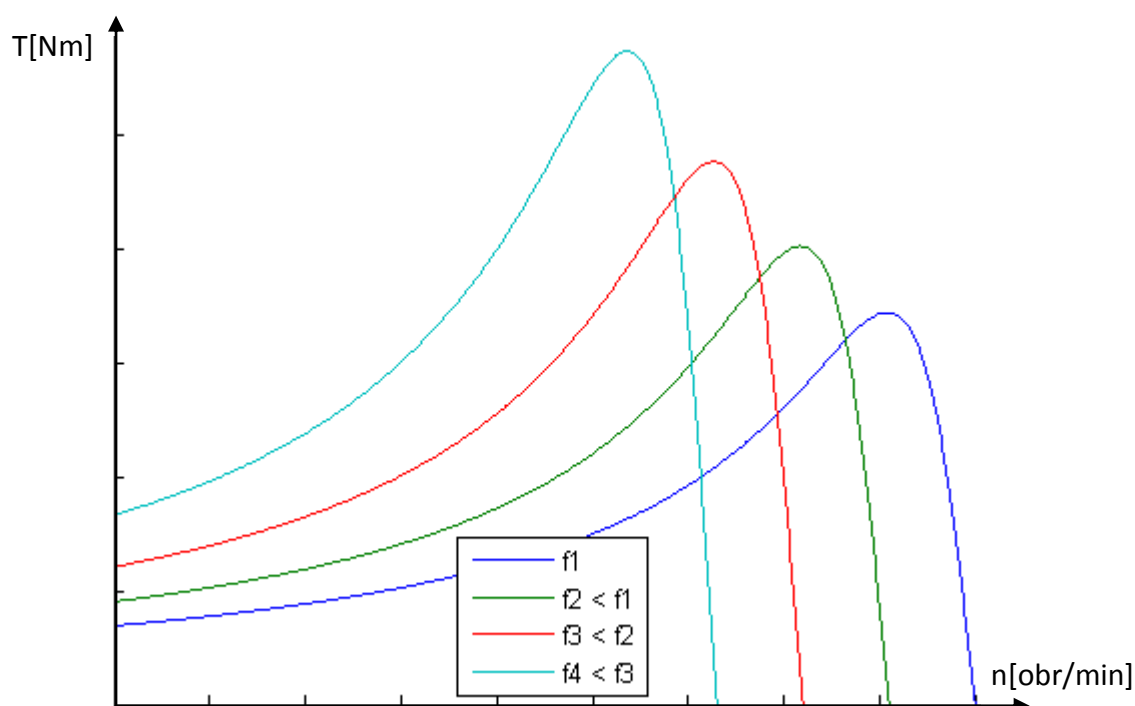
- Rozruch za pomocą falownika – dzięki rozwojowi urządzeń energoelektronicznych możliwa jest zmiana wartości napięcia na uzwojeniu stojana przy zachowaniu stałej wartości strumienia elektromagnetycznego. Aby moment był stały należy regulować jednocześnie napięciem i częstotliwością w obwodzie stojana zgodnie z zależnością $\left(\frac{U}{f}\right)^2 \sim T_k$. Ta metoda jest coraz częściej wykorzystywana do rozruchu maszyn indukcyjnych.

Metody regulacji prędkości obrotową silnika indukcyjnego:

- Regulacja częstotliwością

Jak wynika ze 2.1 prędkość wirowania pola stojana jest proporcjonalna do częstotliwości napięcia zasilającego. Na rysunku 2.5 została przedstawiona charakterystyka mechaniczna dla różnych wartości częstotliwości napięcia zasilającego obwód stojana. Jak można zauważyć na poniższej charakterystyce wraz ze wzrostem częstotliwości nie tylko wzrasta prędkość obrotowa maszyny ale także zmniejsza się moment elektromagnetyczny. Może to doprowadzić do utknięcia maszyny gdy ten moment będzie mniejszy od momentu obciążenia. Również zmniejszanie częstotliwości może doprowadzić do niekorzystnych warunków, ponieważ może to doprowadzić do nadmiernego nasycenia się obwodu. Ze względu na te dwa negatywne warunki sposób regulacji prędkości przez zmianę wyłącznie częstotliwości nie jest wykorzystywana. Jednak przy jednoczesnych zmianach częstotliwości i

napięcia jest możliwa i coraz częściej stosowana regulacja prędkości przy stałym momencie elektromagnetycznym. Regulacja ta odbywa się za pomocą falowników.



Rys. 2.5. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych wartości częstotliwości napięcia zasilającego obwód stojana.

- Regulacja liczbą par biegunów

Ten typ regulacji nie jest możliwy dla typowych silników klatkowych czy pierścieniowych, gdyż dla każdej fazy występują tylko dwa końce uzwojeń. Wykorzystywane jest to jednak w silnikach wielobiegowych gdzie uzwojenia stojana są dzielone i na każdą fazę przypada minimum 3 końce uzwojeń. Najprostszym przykładem jest silnik dwubiegowy, który w połączeniu w trójkąt ma dwukrotnie większą liczbę par biegunów niż w połączeniu w podwójną gwiazdę.

- Regulacja poślizgiem

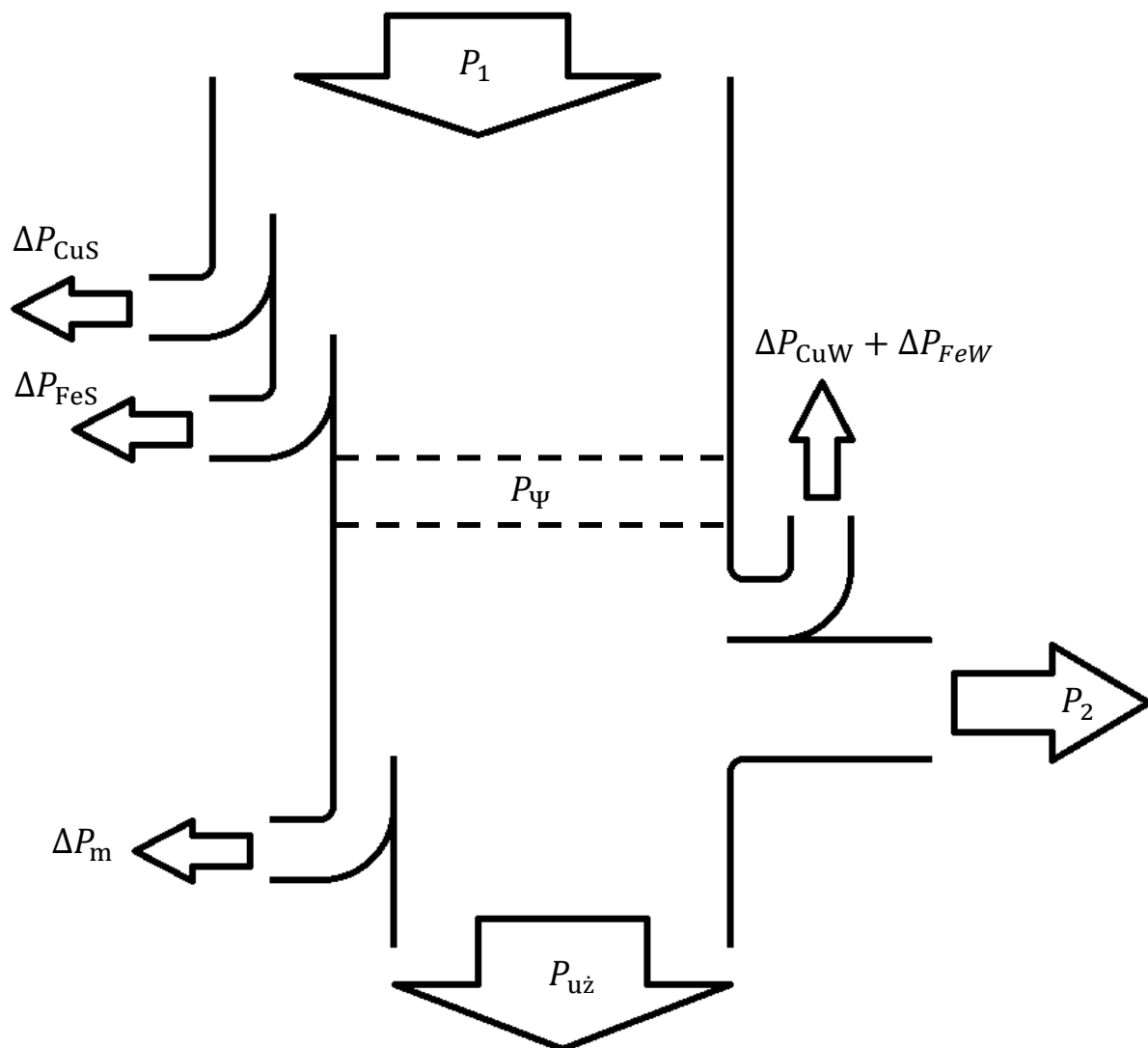
Metoda ta została opisana wcześniej dla rozruchu maszyny indukcyjnej, a charakterystykę mechaniczną takiej regulacji przedstawia rysunek 2.4. Wraz ze wzrostem rezystancji dodatkowej dołączonej do obwodu wirnika silnika pierścieniowego zwiększa się poślizg tej maszyny. Tym samym dla stałego momentu obciążenia możliwa jest zmiana prędkości obrotowej wirnika maszyny.

2.6. Straty mocy i sprawność maszyny indukcyjnej

Aby wiedzieć jak wpływa stopień asymetrii napięciowej na wartość sprawności silnika indukcyjnego trzeba wiedzieć co to jest sprawność jak się definiuje i co wchodzi w skład sprawności. Dlatego w tym rozdziale zostało przedstawione jak rozplywa się moc w maszynie asynchronicznej. Jak w każdej maszynie część mocy dostarczonej z sieci do silnika jest wprowadzona w postaci strat. Straty te można podzielić na:

- Straty w uzwojeniu stojana ΔP_{CuS}
- Straty w uzwojeniu wirnika ΔP_{CuW}
- Straty w rdzeniu stojana ΔP_{FeS}
- Straty w rdzeniu wirnika ΔP_{FeW}
- Straty mechaniczne ΔP_m

Poniżej został przedstawiony bilans mocy w silniku asynchronicznym [1].



Rys. 2.6. Bilans mocy maszyny asynchronicznej pierścieniowej.

Gdzie:

P_1 – moc elektryczna dostarczona z sieci

P_Ψ – moc pola wirującego

$$P_\Psi = P_1 - \Delta P_{CuS} - \Delta P_{FeS} \quad (2.5)$$

$$P_\Psi = P_m + P_e \quad (2.6)$$

P_m – moc mechaniczna

$$P_m = P_\Psi \cdot (1 - s) \quad (2.7)$$

$$P_m = P_{u\dot{z}} + \Delta P_m \quad (2.8)$$

$P_{u\dot{z}}$ – moc użyteczna, moc mechaniczna wydawana do napędzanej maszyny

P_e – moc elektryczna dostarczona do obwodu wirnika

$$P_e = P_\Psi \cdot s \quad (2.9)$$

$$P_e = P_2 + \Delta P_{CuW} + \Delta P_{FeW} \quad (2.10)$$

P_2 – moc dostarczona do pierścieni ślizgowych wirnika

Straty w rdzeniu wirnika ΔP_{FeW} przy pracy silnikowej są pomijalnie małe gdyż występuje w uzwojeniu bardzo mała częstotliwość prądu (2.3), (2.12). W silniku pierścieniowym występuje możliwość podłączenia do uzwojenia wirnika odbiornika mocy dlatego na rysunku została wyszczególniona moc P_2 . W przypadku zwarcia pierścieni ślizgowych moc $P_2 = 0$, więc cała moc elektryczna dostarczona do obwodu wirnika jest wydawana w postaci strat.

Straty mocy w uzwojeniach stojana i wirnika wywołane są przepływem prądu przez materiał przewodzący stanowiący uzwojenie. Straty te wyznacza się z zależności:

$$\Delta P_{Cu} = R \cdot I^2 \quad (2.11)$$

Gdzie:

R - rezystancja uzwojenia (stojana lub wirnika) w danej temperaturze

I - skuteczna wartość prądu

O ile w przypadku silnika pierścieniowego straty są łatwe do wyznaczenia, gdyż jest możliwość dołączenia przyrządów do wirnika, o tyle w przypadku silnika klatkowego może to stanowić pewne komplikacje. Dla takich silników wykonuje się pomiar w stanie zwarcia przyjmując pewne założenia.

Straty w rdzeniu silnika wywołane są z zastosowanego materiału na obwód magnetyczny maszyny. O ile straty mocy w uzwojeniach zależały bezpośrednio od skutecznej wartości prądu tak straty w rdzeniu silnika zależą bezpośrednio od napięcia zasilania tego silnika. Straty w żelazie są proporcjonalne do kwadratu indukcji magnetycznej oraz do częstotliwości o wykładniku potęgi równym w przybliżeniu 1,3 (2.12). Straty w rdzeniu dzieli się na dwie składowe: straty na prądy wirowe, oraz straty na histerezę.

$$\Delta P_{Fe} = k_t \cdot \Delta p_{b,f} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{B}{B_p}\right)^2 \cdot m_{Fe} \quad (2.12)$$

Gdzie:

k_t - współczynnik uwzględniający wpływ czynników konstrukcyjno-technologicznych

$\Delta p_{b,f}$ - stratność, w [W/kg], mierzona przy indukcji B_p i częstotliwości f_p

f_p, B_p - częstotliwość i indukcja występująca przy pomiarze stratności $\Delta p_{b,f}$

m_{Fe} - masa rdzenia

Straty mechaniczne wywołane są tarciem w łożyskach (tocznych – dla silników małej i średniej mocy, ślizgowych – dla silników dużej mocy), oraz oporami powietrza występującymi przez zastosowanie w silnikach wentylatora poprawiającego chłodzenie maszyny.

Sprawność maszyny asynchronicznej jest stosunkiem mocy oddanej do mocy pobranej. Dla pracy silnikowej sprawność opisuje poniższy wzór:

$$\eta = \frac{P_{u\dot{z}}}{P_1} \quad (2.13)$$

Gdzie:

$$P_1 = P_{u\dot{z}} + \Delta P$$

ΔP - całkowite straty maszyny

Natomiast dla pracy prądnicowej:

$$\eta = \frac{P_1}{P_{u\dot{z}}} \quad (2.14)$$

Gdzie:

$$P_{u\dot{z}} = P_1 + \Delta P$$

Sprawność można wyznaczyć na podstawie pomiaru bezpośredniego, mierząc wartość mocy pobieranej przez silnik w obwodzie stojana, oraz moment i prędkość uzyskaną na wale wirnika. Moc wydawana jest iloczynem prędkości kątowej wirnika i momentu:

$$P_{u\dot{z}} = \omega \cdot T \quad (2.15)$$

Można również osadzić na wspólnym wale maszynę obcowzbudną prądu stałego. Suma strat maszyny prądu stałego i mocy na tworniku jest mocą na wale wydawana przez silnik indukcyjny.

Inną z bezpośrednich pomiarów sprawności maszyny asynchronicznej jest sprzężenie mechaniczne dwóch identycznych maszyn, z czego jedna pracuje jako silnik, a druga jako prądnica. Mierząc wartości mocy w uzwojeniach stojana można wyznaczyć sprawność pojedynczej maszyny z poniższej zależności:

$$\eta = \frac{P_S + P_G}{2 \cdot P_S} \quad (2.16)$$

Gdzie:

P_S – moc maszyny pracującej jako silnik

P_G – moc maszyny pracującej jako generator

Oprócz metod opisanych powyżej możliwe jest wyznaczenie sprawności metodami pośrednimi. Aby wyznaczyć sprawność tą metoda znane muszą być: moc wejściowa lub wyjściowa, oraz całkowite straty mocy silnika.

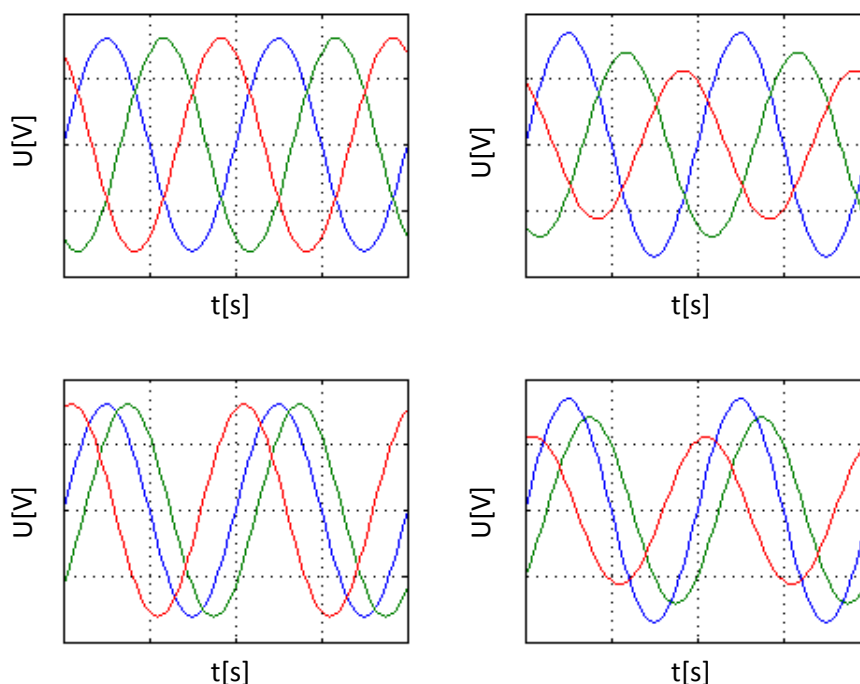
3. Asymetria napięć i prądów

3.1. Ogólna charakterystyka

System zasilający jest symetryczny, jeżeli moduły wartości napięć i/lub prądów są takie same, oraz kąty fazowe pomiędzy tymi napięciami (prądami) wynoszą 120° [2]. Gdy choć jeden z powyższych warunków nie jest spełniony to w systemie występuje asymetria.

System elektroenergetyczny nigdy nie będzie idealnie symetryczny, gdyż jest to bardzo trudne do uzyskania, natomiast dąży się do tego aby asymetria nie przekraczała dopuszczalnych norm.

Na poniższym rysunku zostały przedstawione przebiegi napięć w przypadku symetrii układu, jak i również w trzech przypadkach asymetrii: różne wartości modułów napięć, różne wartości kątów fazowych, różne wartości modułów napięć i kątów fazowych.

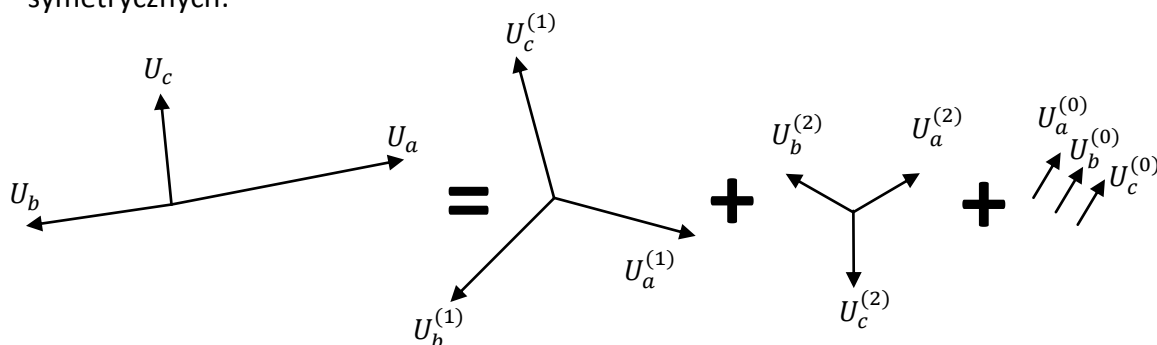


Rys. 3.1. Przebiegi napięć trójfazowych: a) w układzie symetrycznym, b) asymetria – różne wartości modułów, c) asymetria – różne wartości kątów fazowych, d) asymetria – różne wartości modułów i kątów fazowych.

Do analizy układów asymetrycznych stosuje się metodę składowych symetrycznych. Wektory trzech napięć niesymetrycznych U_a, U_b, U_c zastępuje się trzema układami zmiennych symetrycznych: układ kolejności zerowej $U_a^{(0)}, U_b^{(0)}, U_c^{(0)}$, zgodnej $U_a^{(1)}, U_b^{(1)}, U_c^{(1)}$, oraz przeciwnej $U_a^{(2)}, U_b^{(2)}, U_c^{(2)}$.

W każdym z tych układów wartości modułów napięć są takie same dla każdych z trzech faz, oraz kąty przesunięcia fazowego pomiędzy napięciami są takie same (dla kolejności zgodnej i przeciwnej o 120° , natomiast dla kolejności zerowej o 0°).

Za pomocą wektorów można przedstawić układ asymetryczny jako suma 3 układów symetrycznych:



Rys. 3.2. Postać wektorowa układu asymetrycznego jako sumy trzech układów symetrycznych.

Przyjmując operatory obrotu:

$$a = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.1)$$

$$a^2 = e^{-j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.2)$$

wartości napięć na poszczególnych fazach układów symetrycznych wynoszą odpowiednio:

Kolejność zgodna

$$\begin{aligned} U_a^{(1)} &= U^{(1)} \\ U_b^{(1)} &= a^2 \cdot U^{(1)} \\ U_c^{(1)} &= a \cdot U^{(1)} \end{aligned}$$

Kolejność przeciwna

$$\begin{aligned} U_a^{(2)} &= U^{(2)} \\ U_b^{(2)} &= a \cdot U^{(2)} \\ U_c^{(2)} &= a^2 \cdot U^{(2)} \end{aligned}$$

Kolejność zerowa

$$\begin{aligned} U_a^{(0)} &= U^{(0)} \\ U_b^{(0)} &= U^{(0)} \\ U_c^{(0)} &= U^{(0)} \end{aligned}$$

Powyższe zależności można zapisać w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U^{(0)} \\ U^{(1)} \\ U^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Transformacja odwrotna, służąca do wyznaczenia napięć składowych symetrycznych przedstawiona jest w poniższym równaniu:

$$\begin{bmatrix} U^{(0)} \\ U^{(1)} \\ U^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.2. Współczynniki asymetrii

Jako, że uzwojenie stojana jest połączone w trójkąt, lub gwiazdę z izolowanym punktem neutralnym to składowa zerowa nie wpływa na pracę silnika. Dlatego do wyznaczenia stopnia asymetrii stosuje się współczynnik asymetrii składowej przeciwnej:

$$K_{2U} = \frac{U^{(2)}}{U^{(1)}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Współczynnik asymetrii powinno się wyznaczać według normy PN EN 61000-4-30, na podstawie pomiaru składowej podstawowej zależności:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (3.6)$$

Gdzie:

$$\beta = \frac{U_{RMS,L12}^4 + U_{RMS,L23}^4 + U_{RMS,L31}^4}{(U_{RMS,L12}^2 + U_{RMS,L23}^2 + U_{RMS,L31}^2)^2} \quad (3.7)$$

$U_{RMS,L12}$ – zmierzona wartość skuteczna napięcia między fazami L_1 i L_2 .

3.3. Skutki asymetrii

Składowa przeciwna wytwarza strumień wirujący przeciwnie do strumienia wytworzonego przez składową zgodną napięcia trójfazowego. Strumień składowej przeciwnej powoduje:

- Powstanie momentu elektromagnetycznego T_{e2} działającego w przeciwnym kierunku niż moment T_{e1} . Całkowity moment wytwarzany przez maszyny jest wypadkową pochodzącą od obu strumieni składowych. Jako, że strumienie te działają w przeciwnych kierunkach to wypadkowa momentu będzie mniejsza, niż w przypadku zasilania silnika z symetrycznej sieci. Przy wysokim stopniu asymetrii możliwe jest utknięcie maszyny przy znamionowym momencie obciążenia.
- Zwiększone nagrzewanie uzwojeń stojana wywołane bardzo małą impedancją dla składowej przeciwnej (impedancja składowej przeciwnej rzędu impedancji rozruchowej). Prądy w fazach mogą znacząco różnić się pomiędzy sobą, a duża wartość prądu w jednej fazie może doprowadzić do przerwy w uzwojeniu tej fazy i uszkodzenia maszyny.
- Indukowanie się dodatkowych prądów w uzwojeniach i rdzeniu wirnika co skutkuje wzrostem całkowitych strat.
- Wibracje silnika.

4. Pomiary laboratoryjne

Zgodnie z celem pracy zostały wykonane pomiary laboratoryjne, a następnie w programie Matlab wyniki pomiarów zostały poddane obliczeniom, aby uzyskać wartości sprawności dla zadanych stopni asymetrii. Wyniki obliczeń zostały pokazane w tym dziale jako wykresy sprawności indukcyjnego silnika klatkowego.

4.1. Dane znamionowe, oraz schemat układu pomiarowego

Tabela 4.1 przedstawia parametry znamionowe silnika indukcyjnego, dla którego zostały wykonane pomiary, oraz parametry znamionowe maszyny prądu stałego obciążającej badany silnik indukcyjny.

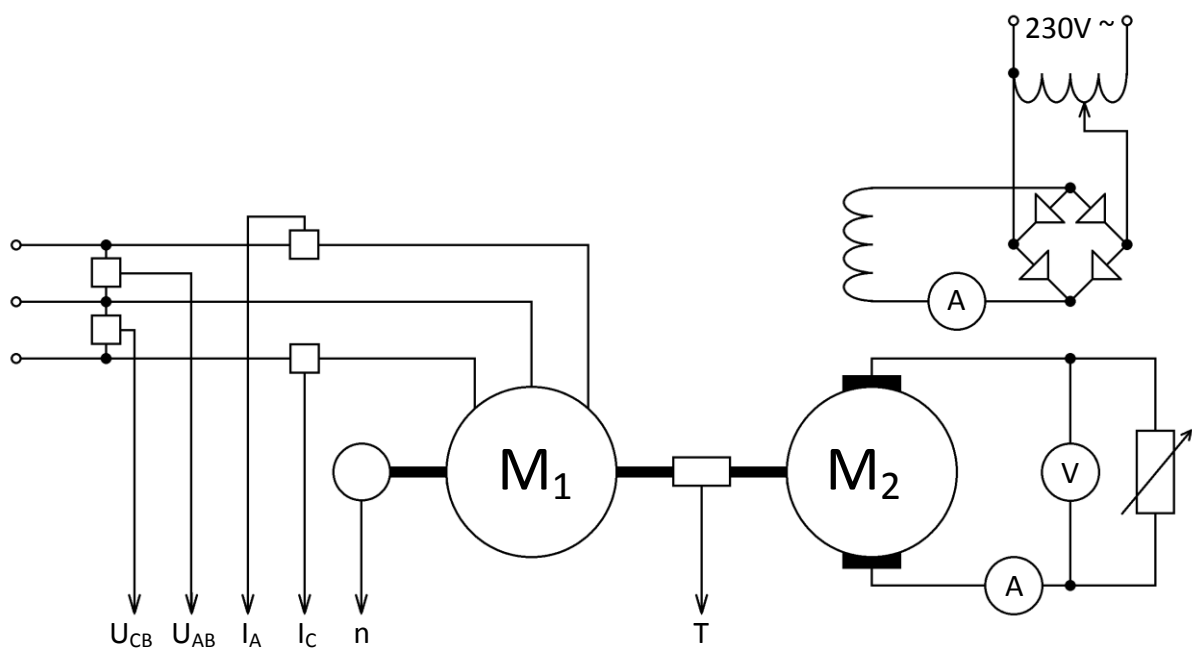
Tabela 4.1. Parametry znamionowe maszyny indukcyjnej i maszyny prądu stałego.

Maszyna indukcyjna							
Typ	Nr	P_N [kW]	U_N [V]	n_N [obr/min]	f [Hz]	I_N [A]	$\cos(\phi)$
VZ132 S4	408925	5,5	380/220	1450	50	11/19	0,86
Maszyna prądu stałego							
Typ	Nr	P_N [kW]	U_N [V]	n_N [obr/min]	I_N [A]	I_w [A]	
PZMb 54a	573887	3,5	115	1450	30,4	1,45	

Poniżej na rysunku 4.1 został umieszczony schemat układu pomiarowego, dla którego przeprowadzono pomiary sprawności silnika dla 4 stopni asymetrii. Tabela 4.2 przedstawia wartości napięć fazowych, wartości składowej zgodnej i przeciwnej, oraz stopień asymetrii dla 4 serii pomiarowych. Stopień asymetrii wyznaczany był ze wzoru (3.5).

Tabela 4.2. Parametry zasilania silnika indukcyjnego dla 4 serii pomiarowych.

Seria	U_a [V]	U_b [V]	U_c [V]	f [Hz]	$U^{(1)}$ [V]	$U^{(2)}$ [V]	K_u [%]
S	$230e^{j0^\circ}$	$230e^{-j120^\circ}$	$230e^{j120^\circ}$	50	230	0	0
B	$295,5e^{j0^\circ}$	$230e^{-j120^\circ}$	$230e^{j120^\circ}$	50	218,5	11,5	5,26
C	$207e^{j0^\circ}$	$230e^{-j120^\circ}$	$230e^{j120^\circ}$	50	222,33	7,67	3,45
D	$218,5e^{j0^\circ}$	$230e^{-j120^\circ}$	$230e^{j120^\circ}$	50	226,17	3,83	1,69



Rys. 4.1. Schemat układu do pomiaru sprawności silnika indukcyjnego M_1 obciążonego maszyną prądu stałego M_2 .

Podczas pomiarów silnik indukcyjny M_1 (rys. 4.1) zasilany był za pomocą programowalnego źródła napięcia AC – Chroma 61512. Za pomocą tego urządzenia możliwa była regulacja wartością modułu, lub kąta fazowego dowolnego napięcia fazowego. W tabeli 4.3. zostały podane parametry znamionowe programowalnego źródła napięcia.

Tabela 4.3. Parametry znamionowe programowalnego źródła napięcia.

S_{\max} [kVA]	U_f [V]	I_{\max} [A]	f [Hz]
18	0 - 300	24	15 - 1500

4.2. Wykonanie pomiarów i obliczenia

Część laboratoryjna składała się z 4 serii pomiarowych, w których stojan silnika indukcyjnego został zasilony napięciami o wartościach podanych w tabeli 4.2. W każdej serii dokonano kilkunastu pomiarów, w których zmieniano moment obciążenia za pomocą prądu wzbudzenia maszyny prądu stałego.

Pomiary napięć i prądów wykonano przy pomocy przetworników LEM dzięki czemu uzyskano niskonapięciowe sygnały analogowe, który zostały wysyłane do komputera za pomocą karty pomiarowej. Pomiar momentu T (rys. 4.1) odbywał się za pomocą umieszczonego na wale silnika momentomierza. Sygnały napięciowe wysyłane z momentomierza były filtrowane, a następnie wysyłane na kartę pomiarową. Pomiar prędkości obrotowej silnika n (rys. 4.1) odbywał się za pomocą prądnicy tachometrycznej umieszczonej na wale.

Sygnały próbkowano z częstotliwością 4kHz, a w jednym pliku liczba próbek wynosiła 10000. Wszystkie sygnały należało przeskalować według poniższej tabeli.

Tabela 4.4. Wzmocnienia kanałów na karcie pomiarowej.

Kanał	Mierzona wielkość	Wzmocnienie kanału
1	Napięcie U_{AB}	500[V] – 2,64[V]
2	Prąd I_A	25[A] – 5,14[V]
3	Napięcie U_{CB}	500[V] – 2,67[V]
4	Prąd I_C	25[A] – 5,25[V]
5	Moment T	14[Nm] – 1[V]
6	Prędkość obrotowa n	220[obr/min] – 1[V]

Po uwzględnieniu wzmocnień z powyższych sygnałów wyznaczono moc chwilową:

$$p = u_{ab} \cdot i_a + u_{cb} \cdot i_c \quad (4.1)$$

Następnie dokonano uśrednienia mocy w całym przedziale próbkowania:

$$P_1 = \frac{\sum_{k=1}^{k=l} p_k}{l} \quad (4.2)$$

Gdzie:

P_1 – moc czynna dostarczona do silnika

l – liczba próbek pomiarowych

p_k – moc czynna chwilowa (dla danej próbki)

Podobnych operacji dokonano także dla wartości momentu i prędkości obrotowej na wale silnika:

$$T = \frac{\sum_{k=1}^{k=l} T_k}{l} \quad (4.3)$$

$$n = \frac{\sum_{k=1}^{k=l} n_k}{l} \quad (4.4)$$

Z prędkości obrotowej została wyznaczona prędkość kątowna:

$$\omega = \frac{\pi}{30} \cdot n \quad (4.5)$$

A następnie moc obciążenia:

$$P_{obc} = \omega \cdot T \quad (4.6)$$

Mając wyznaczoną moc użyteczną, oraz moc dostarczoną do silnika można wyznaczyć sprawność z zależności:

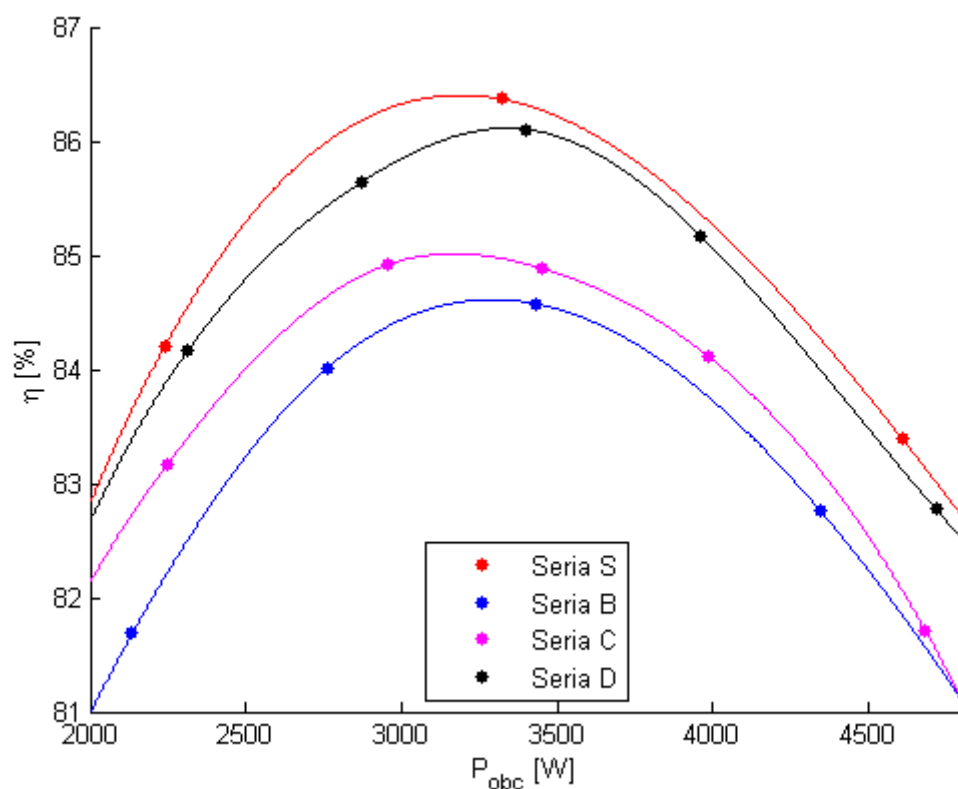
$$\eta = \frac{P_{obc}}{P_1} \quad (4.7)$$

Dla każdego pliku z danymi pomiarowymi zostały wykonane te same obliczenia. Algorytm obliczeń użyty w programie Matlab został przedstawiony w dodatku na końcu tej pracy.

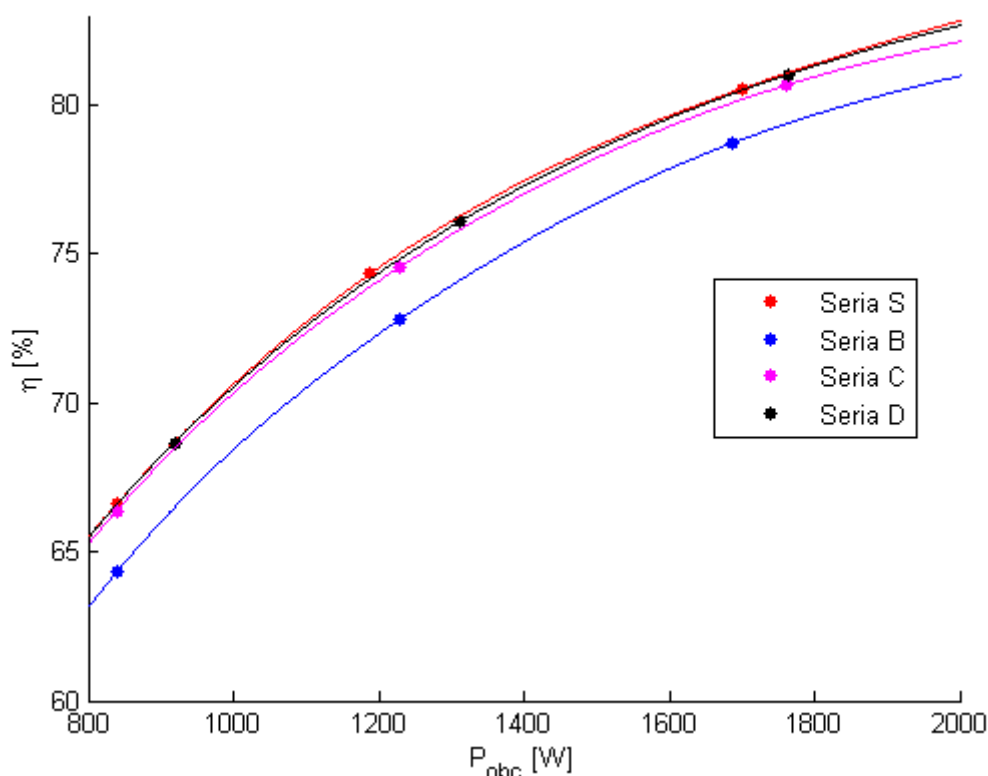
4.3. Wyniki obliczeń

Efektym końcowym obliczeń w programie Matlab są wykresy prędkości obrotowej, strat mocy, oraz sprawności maszyny indukcyjnej w zależności od stopnia niesymetrii napięcia zasilającego silnik.

W pierwszej kolejności przedstawione zostały wykresy sprawności η w funkcji mocy obciążenia P_{obc} wału wirnika dla 4 serii pomiarowych. W celu przejrzystego ukazania wykres $\eta(P_{obc})$ został przedstawiony na dwóch rysunkach, w których jeden rysunek przedstawia wykres sprawności dla mocy obciążenia większej od 2kW (rys. 4.2), natomiast drugi dla mocy mniejszej od 2kW (rys. 4.3).



Rys. 4.2. Sprawność silnika indukcyjnego funkcji $\eta(P_{obc})$ dla mocy obciążenia większych niż 2kW.



Rys. 4.3. Sprawność silnika indukcyjnego funkcji $\eta(P_{obc})$ dla mocy obciążenia mniejszych niż 2kW.

Jak można stwierdzić z powyższych rysunków wzrost współczynnika K_U określającego stopień asymetrii do wartości 5,25%, oznacza spadek sprawności silnika o 2%.

Podczas badań w laboratorium odnotowano także wzrost prądu, który dla serii B był o ok. 25% większy od prądu w stanie symetrycznego zasilania silnika.

Starano się również wykonać pomiary dla asymetrii o większym współczynniku niż te opisane w tabeli 4.2, jednak asymetria była tak duża, że zasilanie z programowalnego źródła napięcia Chroma zostało przerywane.

Zaobserwowano również, że podczas zwiększania stopnia asymetrii dla stałego obciążenia szum wywołany przez silnik jest o coraz niższym tonie, tak jakby maszyna była coraz bardziej obciążana.

Na kolejnych rysunkach zostały przedstawione wykresy:

- Stosunku strat do wartości mocy znamionowej ($\frac{P_1 - P_{obc}}{P_n}$) w funkcji współczynnika asymetrii K_U (rys. 4.4)
- Stosunku strat do wartości mocy wydawanej ($\frac{P_1 - P_{obc}}{P_{obc}}$) w funkcji współczynnika asymetrii K_U (rys. 4.6)
- Prędkości obrotowej n w funkcji współczynnika asymetrii K_U (rys. 4.8)
- Sprawności η w funkcji współczynnika asymetrii K_U (rys. 4.10)

Każdy z wymienionych wykresów został sporządzony dla silnika obciążonego mocą $P=3\text{kW}$, gdyż jak można zauważyć z rysunku 4.2. dla takiej mocy obciążenia wartości sprawności osiągają wartości maksymalne.

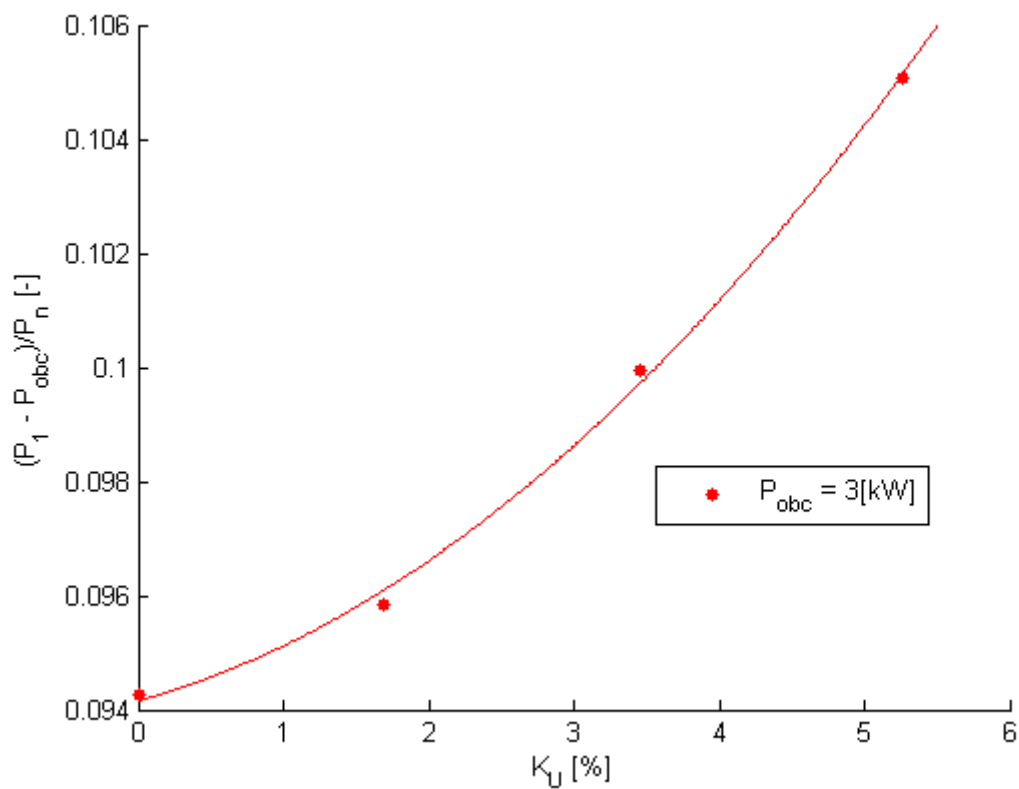
Dodatkowo korzystając z wyników symulacji komputerowej pracy inżynierskiej [5] zostały przedstawione w celu porównania wykresy strat, prędkości i sprawności (rys. 4.5, 4.7, 4.9, 4.11). Parametry symulowanego silnika przedstawia poniższa tabela.

Tabela 4.5. Parametry znamionowe maszyny indukcyjnej pierścieniowej symulowanej komputerowo.

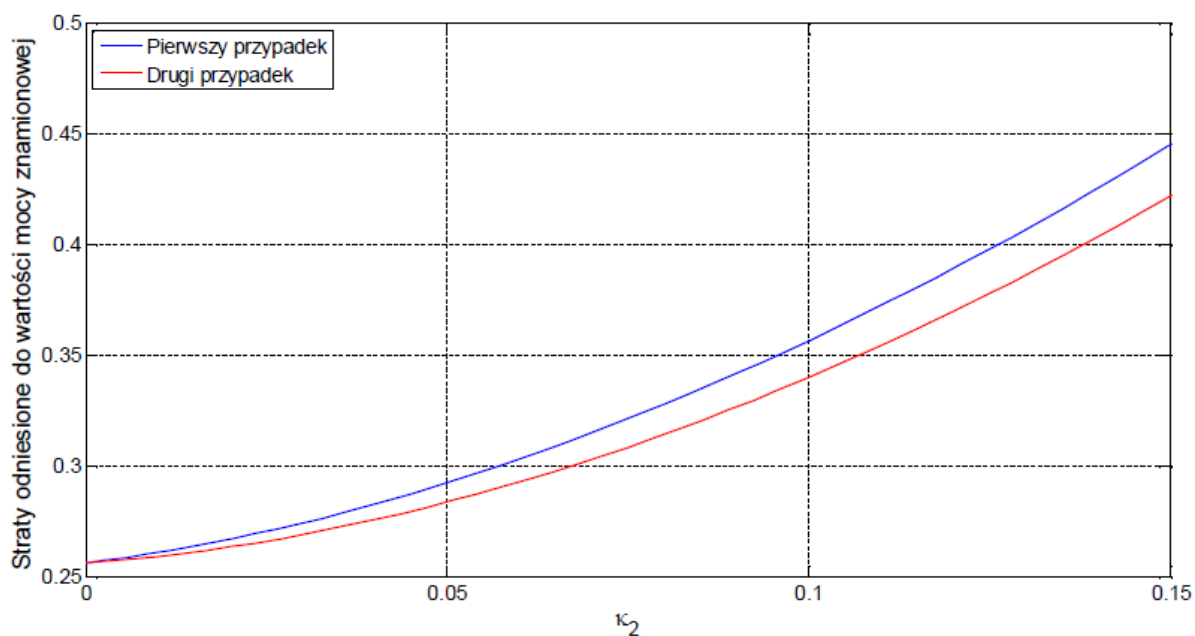
Parametr	Oznaczenie	Stojan	Wirnik
Moc znamionowa	P_n	6,3 kW	
Częstotliwość	f_n	50 Hz	
Napięcie znamionowe	U_n	400 V	150 V
Prąd znamionowy	I_n	13 A	26,6 A
Moment znamionowy	M	42,98 Nm	
Moment maksymalny	M_{\max}	250% M	
$\cos\phi$	$\cos\phi$	0,84	
Liczba par biegunów	p	2	
Prędkość obrotowa znamionowa	ω_n	1400 obr/min	
Sprawność	η	83%	

Na rysunkach z pracy inżynierskiej [5] brane są pod uwagę wykresy oznaczone jako „pierwszy przypadek”, gdyż oznacza to, że analizowany jest przypadek dla wirnika napędzanego dla składowej zgodnej, natomiast „drugi przypadek” jest dla wirnika napędzanego dla składowej przeciwnej.

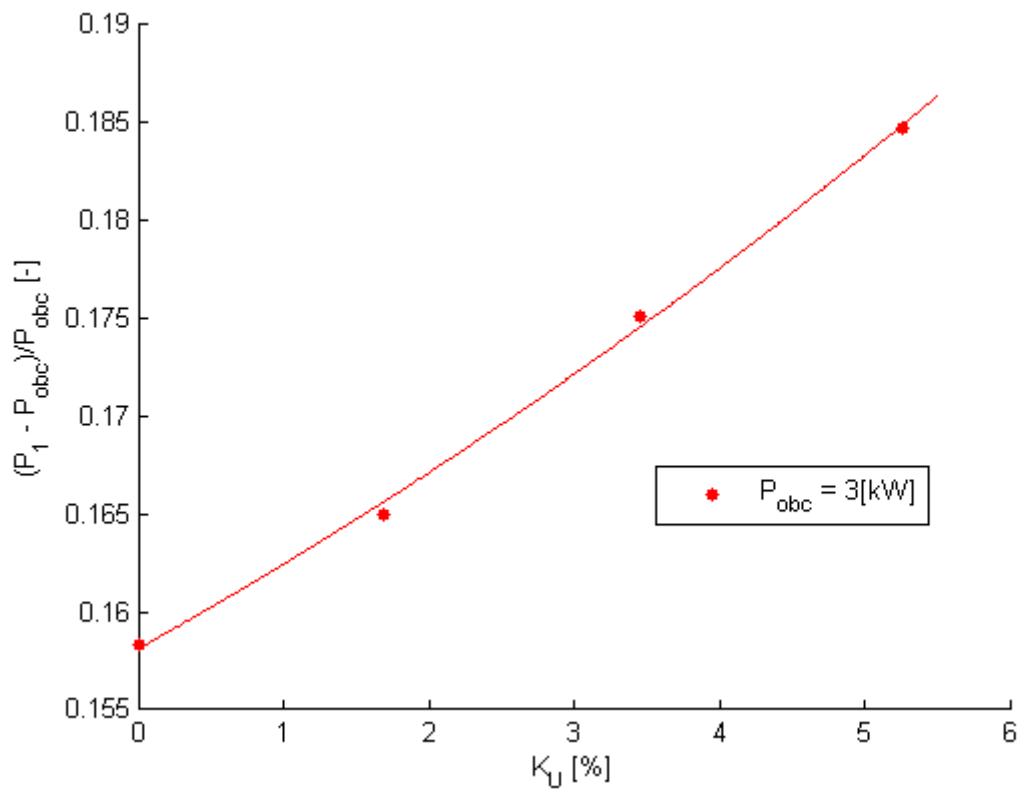
Dodatkowo współczynnik asymetrii z wykresów symulacyjnych równy jest $K_2 = K_u$ (3.5).



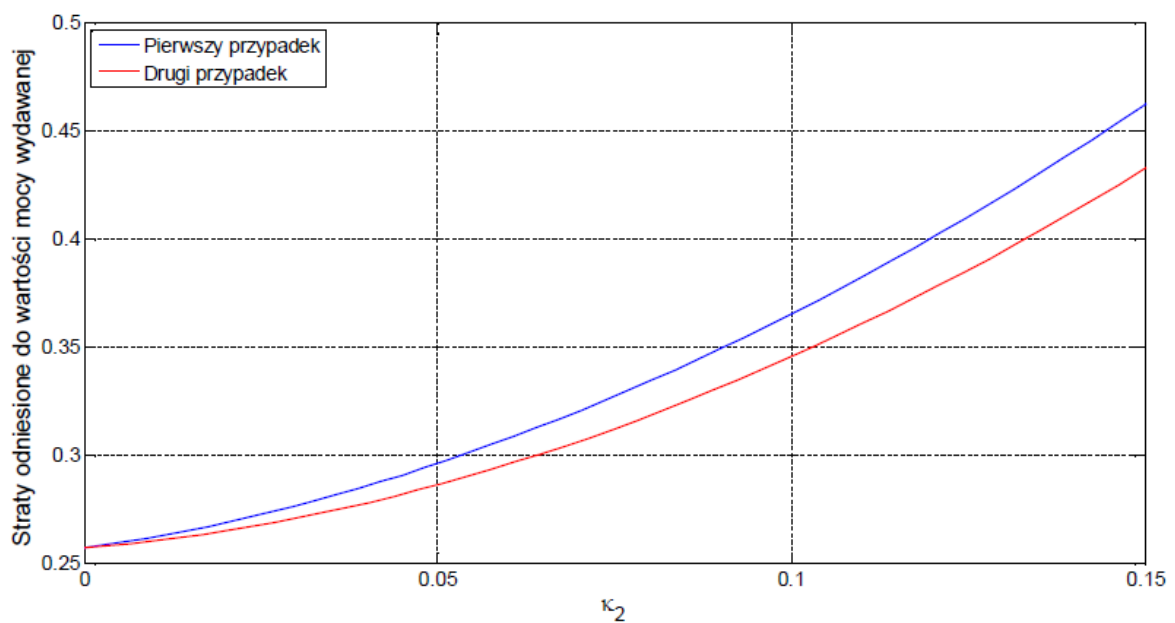
Rys. 4.4. Stosunek strat do wartości mocy znamionowej $(\frac{P_1 - P_{obc}}{P_n})$ w funkcji współczynnika asymetrii K_U .



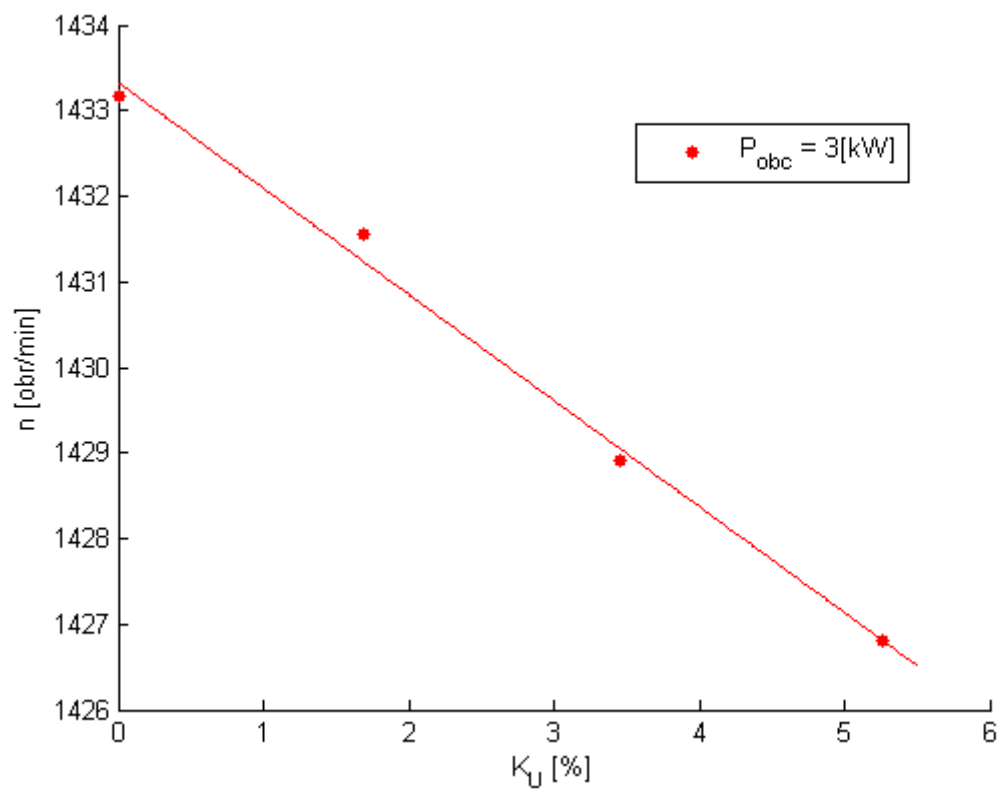
Rys. 4.5. Zależność względnych strat odniesionych do mocy znamionowej w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.



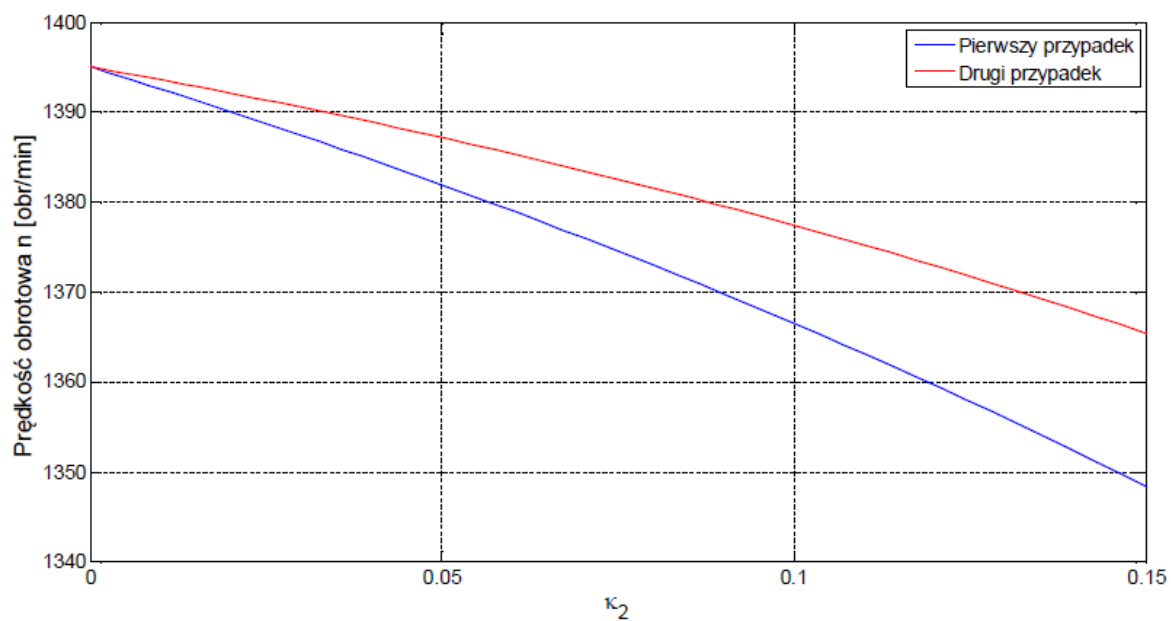
Rys. 4.6. Stosunek strat do wartości mocy wydawanej ($\frac{P_1 - P_{obc}}{P_{obc}}$) w funkcji współczynnika asymetrii K_U .



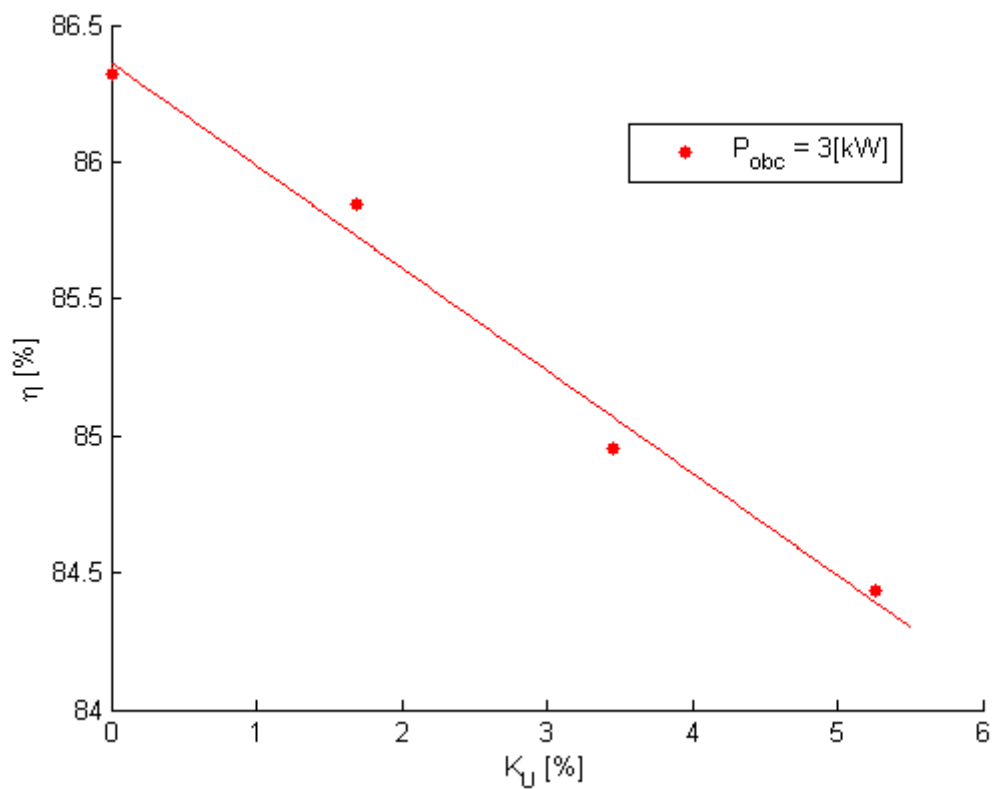
Rys. 4.7. Zależność względnych strat odniesionych do mocy wydawanej w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.



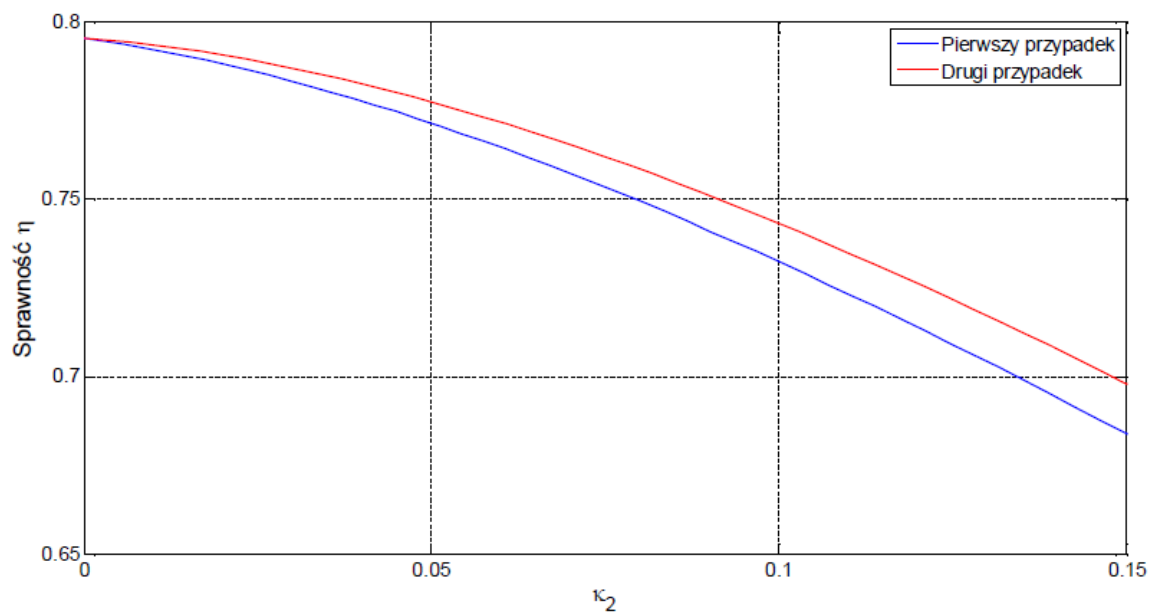
Rys. 4.8. Prędkość obrotowa n w funkcji współczynnika asymetrii K_U .



Rys. 4.9. Zależność prędkości obrotowej maszyny w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.



Rys. 4.10. Sprawność η w funkcji współczynnika asymetrii K_U .

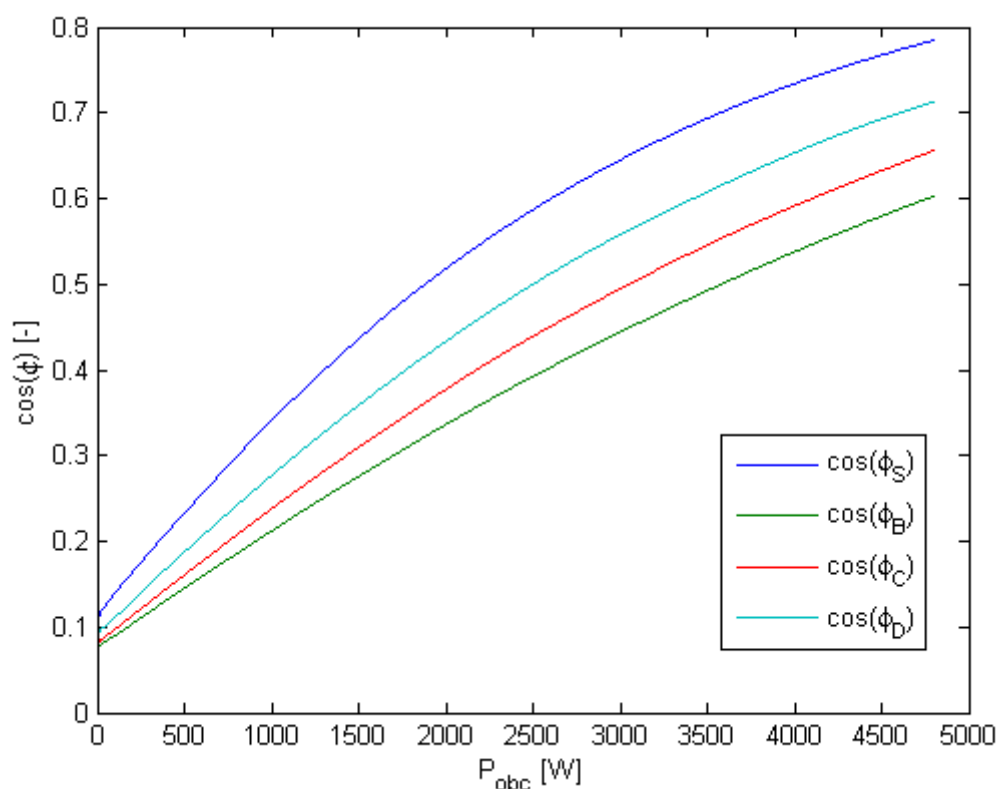


Rys. 4.11. Zależność sprawności maszyny w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.

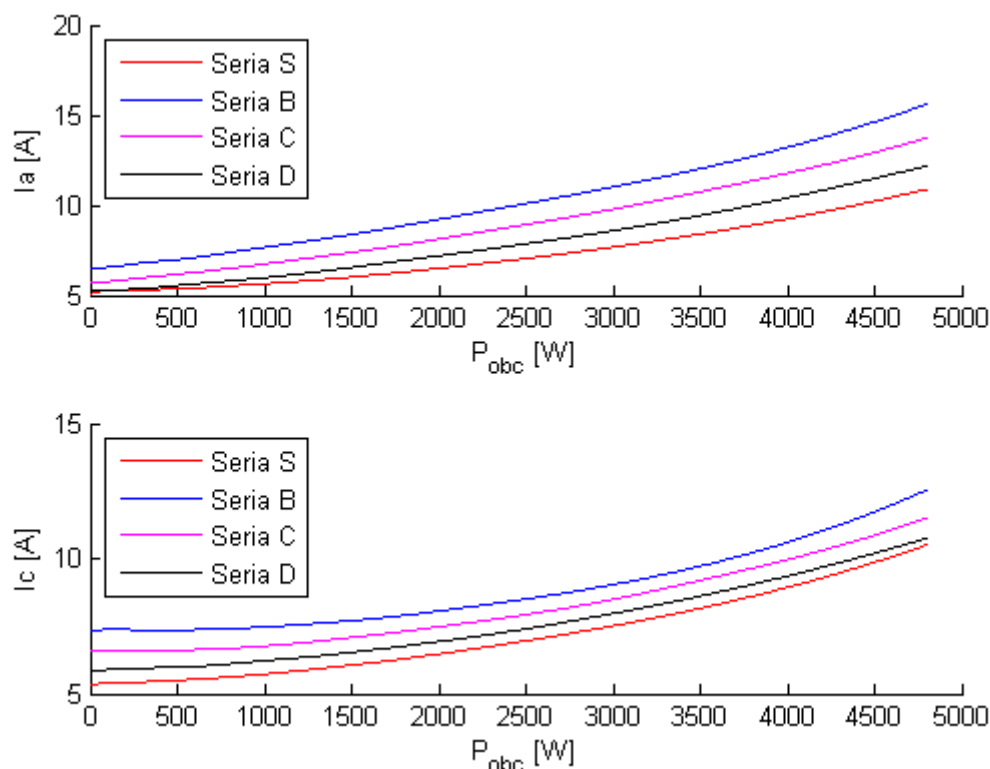
Dla sprawności wyznaczonej drogą symulacji komputerowej charakterystyka nie jest liniowa (rys. 4.11), natomiast w przypadku pomiarów laboratoryjnych charakterystyka jest niemal liniowa (rys. 4.10). Wykres sprawności dla pomiarów laboratoryjnych obarczony jest błędami pomiarów, jednak dla obu wykresów zauważalny jest taki sam nieduży spadek sprawności ok. 2% (dla silnika 5,5kW typowa wartość sprawności zawiera się w przedziale 80-90% [1]), przy takim samym współczynniku asymetrii 5%. Wartość współczynnika asymetrii jest dość duża i wywołana w celach pomiarowych. Wartość współczynnika asymetrii nie osiąga takiej wartości w energetyce, gdyż zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. Nr 93, poz. 623 z dnia 29 maja 2007) [6] współczynnik asymetrii nie może przekroczyć 2%.

Wykresy stosunku strat do mocy znamionowej (rys. 4.4 i rys. 4.5), oraz do mocy wydawanej (rys. 4.6 i rys. 4.7) w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej w przypadku pomiarów laboratoryjnych, jak i również symulacji komputerowych wykazują się w przybliżeniu funkcją kwadratową.

Wykres prędkości obrotowej w funkcji współczynnika asymetrii dla pomiarów laboratoryjnych (rys. 4.8) wykazuje się liniową charakterystyką. W przypadku symulacji komputerowej wykres prędkości (rys. 4.9) dla współczynnika asymetrii $0 < K_U < 0,05$ zachowuje liniowy charakter, natomiast biorąc szerszy zakres asymetrii można zauważyć, że wykres zaczyna odbiegać od liniowości.



Rys. 4.12. Wykres współczynnika mocy $\cos(\varphi)$ do wartości mocy obciążenia P_{obc} .



Rys. 4.13. Wykres wartości skutecznych prądów przewodowych I_a i I_c w zależności od obciążenia P_{obc} .

Tabela 4.6. Wartości skuteczne prądów I_a i I_c , oraz ich części czynne(rzeczywiste) I_{a-cz} , I_{c-cz} .

	$\cos(\phi)$	I_a	I_{a-cz}	I_c	I_{c-cz}
	-	A	A	A	A
Bieg jałowy					
Seria S	0.120	5,160	0,619	5,350	0,642
Seria B	0.080	6,530	0,522	7,330	0,586
Seria C	0.086	5,700	0,490	6,560	0,478
Seria D	0.098	5,250	0,515	5,830	0,571
$P_{obc} = 3kW$					
Seria S	0,644	7,680	4,946	7,510	4,836
Seria B	0,444	11,000	4,884	9,040	4,014
Seria C	0,494	9,780	4,831	8,490	4,194
Seria D	0,557	8,580	4,779	7,970	4,439

Dla silnika obciążonego mocą 3kW można zauważyć niewielkie zmiany wartości czynnych(rzeczywistych) prądów przewodowych, dla różnych stanów asymetrii. Można przyjąć, że przy wzroście asymetrii część czynna prądu się nie zmienia. Jako, że część czynna jest stała, a prąd w stojanie wzrasta wraz ze wzrostem asymetrii, oznacza, że wzrost asymetrii napięcia dla stałej wartości obciążenia powoduje wzrost tylko części biernej prądu.

5. Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy wykonano pomiary za pomocą indukcyjnego silnika klatkowego o znamionowej mocy $P_N = 5.5\text{kW}$, sprzężonego mechanicznie z obcowzbudną maszyną prądu stałego, stanowiącą obciążenie dla badanego silnika indukcyjnego.

Silnik ten został zasilany z programowalnego źródła napięcia AC – Chroma 61512, za pomocą którego zmieniano wartość napięcia jednej fazy, co doprowadzało do powstawania asymetrii napięcia zasilającego stojan silnika.

W wyniku dokonanych pomiarów zebrane dane posłużyły obliczeniom w programie Matlab do wykreślenia charakterystyk sprawności silnika co doprowadziło do stwierdzenia pewnych wniosków:

- Wzrost asymetrii napięcia zasilania silnika indukcyjnego charakteryzuje się spadkiem sprawności tegoż silnika przy jednoczesnym wzroście prądu. Spadek sprawności nie jest jednak wielki, w związku z czym nabiera on znaczenia dla dużych maszyn.
- Z ekonomicznego punktu widzenia pogorszenie się jakości zasilania spowoduje wzrost kosztów energii pobieranej przez silnik dla takiej samej pracy jaką ten silnik wykonał, gdyż moc elektryczna pobierana przez silnik jest sumą mocy: wydawanej, strat mocy na silniku i dodatkowo mocy pola wirującego dla składowej przeciwnej.
- Asymetria powoduje też zmiany wartości współczynnika mocy. Im większa jest asymetria napięcia zasilającego tym mniejsza jest wartość $\cos(\phi)$, a tym samym większa jest wartość prądu przepływającego przez uzwojenia stojana, gdyż wartość prądu zależy bezpośrednio od współczynnika mocy.
- Także wcześniej wspomniany wzrost prądu należy do negatywnych skutków asymetrii, gdyż w jego wyniku nagrzewają się uzwojenia silnika, co może przyspieszać starzenie się izolacji lub w skrajnych wypadkach do przebicia izolacji, co z kolei skutkuje naprawą lub wymianą uszkodzonych elementów.
- Dla współczynnika asymetrii $K_U = 5,26\%$ wzrost prądów przewodowych wynosi ok. 30%.

6. Bibliografia

- [1] Plamitzer A. M.: *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1976.
- [2] Hanzelka Z.: *Jakość dostawy energii elektrycznej*. „Rozdział 5: Asymetria napięć i prądów” Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.
- [3] Skwarczyński J., Tertil Z.: *Maszyny Elektryczne*. „Część pierwsza: Teoria” Wydawnictwo AGH, Kraków 1995.
- [4] Skwarczyński J., Tertil Z.: *Maszyny Elektryczne*. „Część czwarta: Podstawowe pomiary laboratoryjne” Wydawnictwo AGH, Kraków 1994.
- [5] Wojciechowicz A.: *Ocena wpływu asymetrii trójfazowych napięć przemiennych na sprawność silnika indukcyjnego pierścieniowego – symulacje komputerowe*. Praca dyplomowa – inżynierska, AGH, Kraków 2013.
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. Nr 93, poz. 623 z dnia 29 maja 2007),
dostępny: http://www.ure.gov.pl/ftp/prawo/rozporzadzenia/rozp-dzu93poz623_29-05-2007.pdf
- [7] Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1998.
- [8] Latek W.: *Zarys maszyn elektrycznych*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1974.

Spis tabel

Tabela 4.1.	Parametry znamionowe maszyny indukcyjnej i maszyny prądu stałego.	20
Tabela 4.2.	Parametry zasilania silnika indukcyjnego dla 4 serii pomiarowych.	20
Tabela 4.3.	Parametry znamionowe programowalnego źródła napięcia.	21
Tabela 4.4.	Wzmocnienia kanałów na karcie pomiarowej.	22
Tabela 4.5.	Parametry znamionowe maszyny indukcyjnej pierścieniowej symulowanej komputerowo.	26
Tabela 4.6.	Wartości skuteczne prądów I_a i I_σ oraz ich części czynne(rzeczywiste) I_{a-cz} $I_{\sigma-cz}$	32

Spis rysunków

Rys. 2.1.	Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej.	8
Rys. 2.2.	Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego.	9
Rys.2.3.	Charakterystyka mechaniczna maszyny indukcyjnej z podziałem na typy pracy.	10
Rys. 2.4.	Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych wartości rezystancji uzwojenia wirnika.	12

Rys. 2.5.	Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych wartości częstotliwości napięcia zasilającego obwód stojana.	13
Rys. 2.6.	Bilans mocy maszyny asynchronicznej pierścieniowej.	14
Rys. 3.1.	Przebiegi napięć trójfazowych.	17
Rys. 3.2.	Postać wektorowa układu asymetrycznego jako sumy trzech układów symetrycznych.	18
Rys. 4.1.	Schemat układu do pomiaru sprawności silnika indukcyjnego M_1 obciążonego maszyną prądu stałego M_2 .	21
Rys. 4.2.	Sprawność silnika indukcyjnego funkcji $\eta(P_{obc})$ dla mocy obciążenia większych niż 2kW.	24
Rys. 4.3.	Sprawność silnika indukcyjnego funkcji $\eta(P_{obc})$ dla mocy obciążenia mniejszych niż 2kW.	25
Rys. 4.4.	Rys. 4.4. Stosunek strat do wartości mocy znamionowej ($\frac{P_1 - P_{obc}}{P_n}$) w funkcji współczynnika asymetrii K_U .	27
Rys. 4.5.	Zależność względnych strat odniesionych do mocy znamionowej w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.	27
Rys. 4.6.	Stosunek strat do wartości mocy wydawanej ($\frac{P_1 - P_{obc}}{P_{obc}}$) w funkcji współczynnika asymetrii K_U .	28
Rys. 4.7.	Zależność względnych strat odniesionych do mocy wydawanej w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.	28
Rys. 4.8.	Prędkość obrotowa n w funkcji współczynnika asymetrii K_U .	29
Rys. 4.9.	Zależność prędkości obrotowej maszyny w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.	29
Rys. 4.10.	Sprawność η w funkcji współczynnika asymetrii K_U .	30
Rys. 4.11.	Zależność sprawności maszyny w funkcji stosunku składowej przeciwnej do składowej zgodnej napięcia zasilającego – wykres symulacji komputerowej.	30
Rys. 4.12.	Wykres współczynnika mocy $\cos(\varphi)$ do wartości mocy obciążenia P_{obc} .	31
Rys. 4.13.	Wykres wartości skutecznych prądów przewodowych I_a i I_c w zależności od obciążenia P_{obc} .	32

Dodatek – algorytm obliczeń

Poniżej został umieszczony zapis skryptu programu Matlab służący do wyznaczenia charakterystyk sprawności silnika indukcyjnego.

```
clear all
clc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dane podstawowe
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

l_p = 10000;           % liczba probek

% wzmocnienia kanalow
k_n = 220;
k_T = 14;
k_Uab = 500/2.64;
k_Ucb = 500/2.67;
k_Ia = 25/5.14;
k_Ic = 25/5.25;

Pn = 5500;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Symetryczne zasilanie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wczytanie danych

load s1.dat

t_s1 = s1(:,1);
Uab_s1 = s1(:,2)*k_Uab;
Ia_s1 = s1(:,3)*k_Ia;
Ucb_s1 = s1(:,4)*k_Ucb;
Ic_s1 = s1(:,5)*k_Ic;
T_s1 = -s1(:,6)*k_T;
n_s1 = s1(:,7)*k_n;

load s2.dat

t_s2 = s2(:,1);
Uab_s2 = s2(:,2)*k_Uab;
Ia_s2 = s2(:,3)*k_Ia;
Ucb_s2 = s2(:,4)*k_Ucb;
Ic_s2 = s2(:,5)*k_Ic;
T_s2 = -s2(:,6)*k_T;
n_s2 = s2(:,7)*k_n;

load s3.dat

t_s3 = s3(:,1);
Uab_s3 = s3(:,2)*k_Uab;
Ia_s3 = s3(:,3)*k_Ia;
```

```

Ucb_s3 = s3(:,4)*k_Ucb;
Ic_s3 = s3(:,5)*k_Ic;
T_s3 = -s3(:,6)*k_T;
n_s3 = s3(:,7)*k_n;

```

load s4.dat

```

t_s4 = s4(:,1);
Uab_s4 = s4(:,2)*k_Uab;
Ia_s4 = s4(:,3)*k_Ia;
Ucb_s4 = s4(:,4)*k_Ucb;
Ic_s4 = s4(:,5)*k_Ic;
T_s4 = -s4(:,6)*k_T;
n_s4 = s4(:,7)*k_n;

```

load s5.dat

```

t_s5 = s5(:,1);
Uab_s5 = s5(:,2)*k_Uab;
Ia_s5 = s5(:,3)*k_Ia;
Ucb_s5 = s5(:,4)*k_Ucb;
Ic_s5 = s5(:,5)*k_Ic;
T_s5 = -s5(:,6)*k_T;
n_s5 = s5(:,7)*k_n;

```

load s6.dat

```

t_s6 = s6(:,1);
Uab_s6 = s6(:,2)*k_Uab;
Ia_s6 = s6(:,3)*k_Ia;
Ucb_s6 = s6(:,4)*k_Ucb;
Ic_s6 = s6(:,5)*k_Ic;
T_s6 = -s6(:,6)*k_T;
n_s6 = s6(:,7)*k_n;

```

load s7.dat

```

t_s7 = s7(:,1);
Uab_s7 = s7(:,2)*k_Uab;
Ia_s7 = s7(:,3)*k_Ia;
Ucb_s7 = s7(:,4)*k_Ucb;
Ic_s7 = s7(:,5)*k_Ic;
T_s7 = -s7(:,6)*k_T;
n_s7 = s7(:,7)*k_n;

```

load s8.dat

```

t_s8 = s8(:,1);
Uab_s8 = s8(:,2)*k_Uab;
Ia_s8 = s8(:,3)*k_Ia;
Ucb_s8 = s8(:,4)*k_Ucb;
Ic_s8 = s8(:,5)*k_Ic;
T_s8 = -s8(:,6)*k_T;
n_s8 = s8(:,7)*k_n;

```

load s9.dat

```

t_s9 = s9(:,1);
Uab_s9 = s9(:,2)*k_Uab;

```

```

Ia_s9 = s9(:,3)*k_Ia;
Ucb_s9 = s9(:,4)*k_Ucb;
Ic_s9 = s9(:,5)*k_Ic;
T_s9 = -s9(:,6)*k_T;
n_s9 = s9(:,7)*k_n;

load s10.dat

t_s10 = s10(:,1);
Uab_s10 = s10(:,2)*k_Uab;
Ia_s10 = s10(:,3)*k_Ia;
Ucb_s10 = s10(:,4)*k_Ucb;
Ic_s10 = s10(:,5)*k_Ic;
T_s10 = -s10(:,6)*k_T;
n_s10 = s10(:,7)*k_n;

load s11.dat

t_s11 = s11(:,1);
Uab_s11 = s11(:,2)*k_Uab;
Ia_s11 = s11(:,3)*k_Ia;
Ucb_s11 = s11(:,4)*k_Ucb;
Ic_s11 = s11(:,5)*k_Ic;
T_s11 = -s11(:,6)*k_T;
n_s11 = s11(:,7)*k_n;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obliczenia

T_s1_s = sum(T_s1)/l_p;
n_s1_s = sum(n_s1)/l_p;
w_s1_s = n_s1_s * pi/30;
Pobc_s1 = T_s1_s * w_s1_s;
P_s1 = sum(Uab_s1 .* Ia_s1 + Ucb_s1 .* Ic_s1)/l_p;
Q_s1 = sqrt(3)*sum(Uab_s1 .* Ia_s1 - Ucb_s1 .* Ic_s1)/l_p;
fi_s1 = atan(Q_s1/P_s1);

T_s2_s = sum(T_s2)/l_p;
n_s2_s = sum(n_s2)/l_p;
w_s2_s = n_s2_s * pi/30;
Pobc_s2 = T_s2_s * w_s2_s;
P_s2 = sum(Uab_s2 .* Ia_s2 + Ucb_s2 .* Ic_s2)/l_p;
Q_s2 = sqrt(3)*sum(Uab_s2 .* Ia_s2 - Ucb_s2 .* Ic_s2)/l_p;
fi_s2 = atan(Q_s2/P_s2);

T_s3_s = sum(T_s3)/l_p;
n_s3_s = sum(n_s3)/l_p;
w_s3_s = n_s3_s * pi/30;
Pobc_s3 = T_s3_s * w_s3_s;
P_s3 = sum(Uab_s3 .* Ia_s3 + Ucb_s3 .* Ic_s3)/l_p;
Q_s3 = sqrt(3)*sum(Uab_s3 .* Ia_s3 - Ucb_s3 .* Ic_s3)/l_p;
fi_s3 = atan(Q_s3/P_s3);

T_s4_s = sum(T_s4)/l_p;
n_s4_s = sum(n_s4)/l_p;
w_s4_s = n_s4_s * pi/30;
Pobc_s4 = T_s4_s * w_s4_s;
P_s4 = sum(Uab_s4 .* Ia_s4 + Ucb_s4 .* Ic_s4)/l_p;
Q_s4 = sqrt(3)*sum(Uab_s4 .* Ia_s4 - Ucb_s4 .* Ic_s4)/l_p;
fi_s4 = atan(Q_s4/P_s4);

```

```

T_s5_s = sum(T_s5)/l_p;
n_s5_s = sum(n_s5)/l_p;
w_s5_s = n_s5_s * pi/30;
Pobc_s5 = T_s5_s * w_s5_s;
P_s5 = sum(Uab_s5 .* Ia_s5 + Ucb_s5 .* Ic_s5)/l_p;
Q_s5 = sqrt(3)*sum(Uab_s5 .* Ia_s5 - Ucb_s5 .* Ic_s5)/l_p;
fi_s5 = atan(Q_s5/P_s5);

T_s6_s = sum(T_s6)/l_p;
n_s6_s = sum(n_s6)/l_p;
w_s6_s = n_s6_s * pi/30;
Pobc_s6 = T_s6_s * w_s6_s;
P_s6 = sum(Uab_s6 .* Ia_s6 + Ucb_s6 .* Ic_s6)/l_p;
Q_s6 = sqrt(3)*sum(Uab_s6 .* Ia_s6 - Ucb_s6 .* Ic_s6)/l_p;
fi_s6 = atan(Q_s6/P_s6);

T_s7_s = sum(T_s7)/l_p;
n_s7_s = sum(n_s7)/l_p;
w_s7_s = n_s7_s * pi/30;
Pobc_s7 = T_s7_s * w_s7_s;
P_s7 = sum(Uab_s7 .* Ia_s7 + Ucb_s7 .* Ic_s7)/l_p;
Q_s7 = sqrt(3)*sum(Uab_s7 .* Ia_s7 - Ucb_s7 .* Ic_s7)/l_p;
fi_s7 = atan(Q_s7/P_s7);

T_s8_s = sum(T_s8)/l_p;
n_s8_s = sum(n_s8)/l_p;
w_s8_s = n_s8_s * pi/30;
Pobc_s8 = T_s8_s * w_s8_s;
P_s8 = sum(Uab_s8 .* Ia_s8 + Ucb_s8 .* Ic_s8)/l_p;
Q_s8 = sqrt(3)*sum(Uab_s8 .* Ia_s8 - Ucb_s8 .* Ic_s8)/l_p;
fi_s8 = atan(Q_s8/P_s8);

T_s9_s = sum(T_s9)/l_p;
n_s9_s = sum(n_s9)/l_p;
w_s9_s = n_s9_s * pi/30;
Pobc_s9 = T_s9_s * w_s9_s;
P_s9 = sum(Uab_s9 .* Ia_s9 + Ucb_s9 .* Ic_s9)/l_p;
Q_s9 = sqrt(3)*sum(Uab_s9 .* Ia_s9 - Ucb_s9 .* Ic_s9)/l_p;
fi_s9 = atan(Q_s9/P_s9);

T_s10_s = sum(T_s10)/l_p;
n_s10_s = sum(n_s10)/l_p;
w_s10_s = n_s10_s * pi/30;
Pobc_s10 = T_s10_s * w_s10_s;
P_s10 = sum(Uab_s10 .* Ia_s10 + Ucb_s10 .* Ic_s10)/l_p;
Q_s10 = sqrt(3)*sum(Uab_s10 .* Ia_s10 - Ucb_s10 .* Ic_s10)/l_p;
fi_s10 = atan(Q_s10/P_s10);

T_s11_s = sum(T_s11)/l_p;
n_s11_s = sum(n_s11)/l_p;
w_s11_s = n_s11_s * pi/30;
Pobc_s11 = T_s11_s * w_s11_s;
P_s11 = sum(Uab_s11 .* Ia_s11 + Ucb_s11 .* Ic_s11)/l_p;
Q_s11 = sqrt(3)*sum(Uab_s11 .* Ia_s11 - Ucb_s11 .* Ic_s11)/l_p;
fi_s11 = atan(Q_s11/P_s11);

Pobc_s = [Pobc_s1 Pobc_s2 Pobc_s3 Pobc_s4 Pobc_s5 Pobc_s6...
          Pobc_s7 Pobc_s8 Pobc_s9 Pobc_s10 Pobc_s11]';

```

```

P_s = [P_s1 P_s2 P_s3 P_s4 P_s5 P_s6 P_s7 P_s8 P_s9 P_s10...
        P_s11]';

teta_s = Pobc_s./P_s*100;

n_s = [n_s1_s n_s2_s n_s3_s n_s4_s n_s5_s n_s6_s n_s7_s...
        n_s8_s n_s9_s n_s10_s n_s11_s]';

strat_zna_s = (P_s - Pobc_s)./Pn;
strat_wyd_s = (P_s - Pobc_s)./Pobc_s;

fi_s = [fi_s1 fi_s2 fi_s3 fi_s4 fi_s5 fi_s6 fi_s7 fi_s8 fi_s9...
        fi_s10 fi_s11]';
cos_fi_s = cos(fi_s);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ua = 85% * Ub,Uc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wczytanie danych

load b1.dat

t_b1 = b1(:,1);
Uab_b1 = b1(:,2)*k_Uab;
Ia_b1 = b1(:,3)*k_Ia;
Ucb_b1 = b1(:,4)*k_Ucb;
Ic_b1 = b1(:,5)*k_Ic;
T_b1 = -b1(:,6)*k_T;
n_b1 = b1(:,7)*k_n;

load b2.dat

t_b2 = b2(:,1);
Uab_b2 = b2(:,2)*k_Uab;
Ia_b2 = b2(:,3)*k_Ia;
Ucb_b2 = b2(:,4)*k_Ucb;
Ic_b2 = b2(:,5)*k_Ic;
T_b2 = -b2(:,6)*k_T;
n_b2 = b2(:,7)*k_n;

load b3.dat

t_b3 = b3(:,1);
Uab_b3 = b3(:,2)*k_Uab;
Ia_b3 = b3(:,3)*k_Ia;
Ucb_b3 = b3(:,4)*k_Ucb;
Ic_b3 = b3(:,5)*k_Ic;
T_b3 = -b3(:,6)*k_T;
n_b3 = b3(:,7)*k_n;

load b4.dat

t_b4 = b4(:,1);
Uab_b4 = b4(:,2)*k_Uab;
Ia_b4 = b4(:,3)*k_Ia;
Ucb_b4 = b4(:,4)*k_Ucb;
Ic_b4 = b4(:,5)*k_Ic;

```



```

T_b4 = -b4(:,6)*k_T;
n_b4 = b4(:,7)*k_n;

load b5.dat

t_b5 = b5(:,1);
Uab_b5 = b5(:,2)*k_Uab;
Ia_b5 = b5(:,3)*k_Ia;
Ucb_b5 = b5(:,4)*k_Ucb;
Ic_b5 = b5(:,5)*k_Ic;
T_b5 = -b5(:,6)*k_T;
n_b5 = b5(:,7)*k_n;

load b6.dat

t_b6 = b6(:,1);
Uab_b6 = b6(:,2)*k_Uab;
Ia_b6 = b6(:,3)*k_Ia;
Ucb_b6 = b6(:,4)*k_Ucb;
Ic_b6 = b6(:,5)*k_Ic;
T_b6 = -b6(:,6)*k_T;
n_b6 = b6(:,7)*k_n;

load b7.dat

t_b7 = b7(:,1);
Uab_b7 = b7(:,2)*k_Uab;
Ia_b7 = b7(:,3)*k_Ia;
Ucb_b7 = b7(:,4)*k_Ucb;
Ic_b7 = b7(:,5)*k_Ic;
T_b7 = -b7(:,6)*k_T;
n_b7 = b7(:,7)*k_n;

load b8.dat

t_b8 = b8(:,1);
Uab_b8 = b8(:,2)*k_Uab;
Ia_b8 = b8(:,3)*k_Ia;
Ucb_b8 = b8(:,4)*k_Ucb;
Ic_b8 = b8(:,5)*k_Ic;
T_b8 = -b8(:,6)*k_T;
n_b8 = b8(:,7)*k_n;

load b9.dat

t_b9 = b9(:,1);
Uab_b9 = b9(:,2)*k_Uab;
Ia_b9 = b9(:,3)*k_Ia;
Ucb_b9 = b9(:,4)*k_Ucb;
Ic_b9 = b9(:,5)*k_Ic;
T_b9 = -b9(:,6)*k_T;
n_b9 = b9(:,7)*k_n;

load b10.dat

t_b10 = b10(:,1);
Uab_b10 = b10(:,2)*k_Uab;
Ia_b10 = b10(:,3)*k_Ia;
Ucb_b10 = b10(:,4)*k_Ucb;

```

```

Ic_b10 = b10(:,5)*k_Ic;
T_b10 = -b10(:,6)*k_T;
n_b10 = b10(:,7)*k_n;

load b11.dat

t_b11 = b11(:,1);
Uab_b11 = b11(:,2)*k_Uab;
Ia_b11 = b11(:,3)*k_Ia;
Ucb_b11 = b11(:,4)*k_Ucb;
Ic_b11 = b11(:,5)*k_Ic;
T_b11 = -b11(:,6)*k_T;
n_b11 = b11(:,7)*k_n;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obliczenia

T_b1_s = sum(T_b1)/l_p;
n_b1_s = sum(n_b1)/l_p;
w_b1_s = n_b1_s * pi/30;
Pobc_b1 = T_b1_s * w_b1_s;
P_b1 = sum(Uab_b1 .* Ia_b1 + Ucb_b1 .* Ic_b1)/l_p;
Q_b1 = sqrt(3)*sum(Uab_b1 .* Ia_b1 - Ucb_b1 .* Ic_b1)/l_p;
fi_b1 = atan(Q_b1/P_b1);

T_b2_s = sum(T_b2)/l_p;
n_b2_s = sum(n_b2)/l_p;
w_b2_s = n_b2_s * pi/30;
Pobc_b2 = T_b2_s * w_b2_s;
P_b2 = sum(Uab_b2 .* Ia_b2 + Ucb_b2 .* Ic_b2)/l_p;
Q_b2 = sqrt(3)*sum(Uab_b2 .* Ia_b2 - Ucb_b2 .* Ic_b2)/l_p;
fi_b2 = atan(Q_b2/P_b2);

T_b3_s = sum(T_b3)/l_p;
n_b3_s = sum(n_b3)/l_p;
w_b3_s = n_b3_s * pi/30;
Pobc_b3 = T_b3_s * w_b3_s;
P_b3 = sum(Uab_b3 .* Ia_b3 + Ucb_b3 .* Ic_b3)/l_p;
Q_b3 = sqrt(3)*sum(Uab_b3 .* Ia_b3 - Ucb_b3 .* Ic_b3)/l_p;
fi_b3 = atan(Q_b3/P_b3);

T_b4_s = sum(T_b4)/l_p;
n_b4_s = sum(n_b4)/l_p;
w_b4_s = n_b4_s * pi/30;
Pobc_b4 = T_b4_s * w_b4_s;
P_b4 = sum(Uab_b4 .* Ia_b4 + Ucb_b4 .* Ic_b4)/l_p;
Q_b4 = sqrt(3)*sum(Uab_b4 .* Ia_b4 - Ucb_b4 .* Ic_b4)/l_p;
fi_b4 = atan(Q_b4/P_b4);

T_b5_s = sum(T_b5)/l_p;
n_b5_s = sum(n_b5)/l_p;
w_b5_s = n_b5_s * pi/30;
Pobc_b5 = T_b5_s * w_b5_s;
P_b5 = sum(Uab_b5 .* Ia_b5 + Ucb_b5 .* Ic_b5)/l_p;
Q_b5 = sqrt(3)*sum(Uab_b5 .* Ia_b5 - Ucb_b5 .* Ic_b5)/l_p;
fi_b5 = atan(Q_b5/P_b5);

T_b6_s = sum(T_b6)/l_p;
n_b6_s = sum(n_b6)/l_p;
w_b6_s = n_b6_s * pi/30;

```

```

Pobc_b6 = T_b6_s * w_b6_s;
P_b6 = sum(Uab_b6 .* Ia_b6 + Ucb_b6 .* Ic_b6)/l_p;
Q_b6 = sqrt(3)*sum(Uab_b6 .* Ia_b6 - Ucb_b6 .* Ic_b6)/l_p;
fi_b6 = atan(Q_b6/P_b6);

T_b7_s = sum(T_b7)/l_p;
n_b7_s = sum(n_b7)/l_p;
w_b7_s = n_b7_s * pi/30;
Pobc_b7 = T_b7_s * w_b7_s;
P_b7 = sum(Uab_b7 .* Ia_b7 + Ucb_b7 .* Ic_b7)/l_p;
Q_b7 = sqrt(3)*sum(Uab_b7 .* Ia_b7 - Ucb_b7 .* Ic_b7)/l_p;
fi_b7 = atan(Q_b7/P_b7);

T_b8_s = sum(T_b8)/l_p;
n_b8_s = sum(n_b8)/l_p;
w_b8_s = n_b8_s * pi/30;
Pobc_b8 = T_b8_s * w_b8_s;
P_b8 = sum(Uab_b8 .* Ia_b8 + Ucb_b8 .* Ic_b8)/l_p;
Q_b8 = sqrt(3)*sum(Uab_b8 .* Ia_b8 - Ucb_b8 .* Ic_b8)/l_p;
fi_b8 = atan(Q_b8/P_b8);

T_b9_s = sum(T_b9)/l_p;
n_b9_s = sum(n_b9)/l_p;
w_b9_s = n_b9_s * pi/30;
Pobc_b9 = T_b9_s * w_b9_s;
P_b9 = sum(Uab_b9 .* Ia_b9 + Ucb_b9 .* Ic_b9)/l_p;
Q_b9 = sqrt(3)*sum(Uab_b9 .* Ia_b9 - Ucb_b9 .* Ic_b9)/l_p;
fi_b9 = atan(Q_b9/P_b9);

T_b10_s = sum(T_b10)/l_p;
n_b10_s = sum(n_b10)/l_p;
w_b10_s = n_b10_s * pi/30;
Pobc_b10 = T_b10_s * w_b10_s;
P_b10 = sum(Uab_b10 .* Ia_b10 + Ucb_b10 .* Ic_b10)/l_p;
Q_b10 = sqrt(3)*sum(Uab_b10 .* Ia_b10 - Ucb_b10 .* Ic_b10)/l_p;
fi_b10 = atan(Q_b10/P_b10);

T_b11_s = sum(T_b11)/l_p;
n_b11_s = sum(n_b11)/l_p;
w_b11_s = n_b11_s * pi/30;
Pobc_b11 = T_b11_s * w_b11_s;
P_b11 = sum(Uab_b11 .* Ia_b11 + Ucb_b11 .* Ic_b11)/l_p;
Q_b11 = sqrt(3)*sum(Uab_b11 .* Ia_b11 - Ucb_b11 .* Ic_b11)/l_p;
fi_b11 = atan(Q_b11/P_b11);

Pobc_b = [Pobc_b1 Pobc_b2 Pobc_b3 Pobc_b4 Pobc_b5 Pobc_b6...
          Pobc_b7 Pobc_b8 Pobc_b9 Pobc_b10 Pobc_b11]';

P_b = [P_b1 P_b2 P_b3 P_b4 P_b5 P_b6 P_b7 P_b8 P_b9...
        P_b10 P_b11]';

teta_b = Pobc_b./P_b*100;

n_b = [n_b1_s n_b2_s n_b3_s n_b4_s n_b5_s n_b6_s n_b7_s...
        n_b8_s n_b9_s n_b10_s n_b11_s]';

strat_zna_b = (P_b - Pobc_b)./Pn;
strat_wyd_b = (P_b - Pobc_b)./Pobc_b;

```

```

fi_b = [fi_b1 fi_b2 fi_b3 fi_b4 fi_b5 fi_b6 fi_b7 fi_b8 fi_b9...
        fi_b10 fi_b11]';
cos_fi_b = cos(fi_b);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ua = 90% * Ub,Uc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wczytanie danych

load c1.dat

t_c1 = c1(:,1);
Uab_c1 = c1(:,2)*k_Uab;
Ia_c1 = c1(:,3)*k_Ia;
Ucb_c1 = c1(:,4)*k_Ucb;
Ic_c1 = c1(:,5)*k_Ic;
T_c1 = -c1(:,6)*k_T;
n_c1 = c1(:,7)*k_n;

load c2.dat

t_c2 = c2(:,1);
Uab_c2 = c2(:,2)*k_Uab;
Ia_c2 = c2(:,3)*k_Ia;
Ucb_c2 = c2(:,4)*k_Ucb;
Ic_c2 = c2(:,5)*k_Ic;
T_c2 = -c2(:,6)*k_T;
n_c2 = c2(:,7)*k_n;

load c3.dat

t_c3 = c3(:,1);
Uab_c3 = c3(:,2)*k_Uab;
Ia_c3 = c3(:,3)*k_Ia;
Ucb_c3 = c3(:,4)*k_Ucb;
Ic_c3 = c3(:,5)*k_Ic;
T_c3 = -c3(:,6)*k_T;
n_c3 = c3(:,7)*k_n;

load c4.dat

t_c4 = c4(:,1);
Uab_c4 = c4(:,2)*k_Uab;
Ia_c4 = c4(:,3)*k_Ia;
Ucb_c4 = c4(:,4)*k_Ucb;
Ic_c4 = c4(:,5)*k_Ic;
T_c4 = -c4(:,6)*k_T;
n_c4 = c4(:,7)*k_n;

load c5.dat

t_c5 = c5(:,1);
Uab_c5 = c5(:,2)*k_Uab;
Ia_c5 = c5(:,3)*k_Ia;
Ucb_c5 = c5(:,4)*k_Ucb;
Ic_c5 = c5(:,5)*k_Ic;
T_c5 = -c5(:,6)*k_T;

```

```

n_c5 = c5(:,7)*k_n;

load c6.dat

t_c6 = c6(:,1);
Uab_c6 = c6(:,2)*k_Uab;
Ia_c6 = c6(:,3)*k_Ia;
Ucb_c6 = c6(:,4)*k_Ucb;
Ic_c6 = c6(:,5)*k_Ic;
T_c6 = -c6(:,6)*k_T;
n_c6 = c6(:,7)*k_n;

load c7.dat

t_c7 = c7(:,1);
Uab_c7 = c7(:,2)*k_Uab;
Ia_c7 = c7(:,3)*k_Ia;
Ucb_c7 = c7(:,4)*k_Ucb;
Ic_c7 = c7(:,5)*k_Ic;
T_c7 = -c7(:,6)*k_T;
n_c7 = c7(:,7)*k_n;

load c8.dat

t_c8 = c8(:,1);
Uab_c8 = c8(:,2)*k_Uab;
Ia_c8 = c8(:,3)*k_Ia;
Ucb_c8 = c8(:,4)*k_Ucb;
Ic_c8 = c8(:,5)*k_Ic;
T_c8 = -c8(:,6)*k_T;
n_c8 = c8(:,7)*k_n;

load c9.dat

t_c9 = c9(:,1);
Uab_c9 = c9(:,2)*k_Uab;
Ia_c9 = c9(:,3)*k_Ia;
Ucb_c9 = c9(:,4)*k_Ucb;
Ic_c9 = c9(:,5)*k_Ic;
T_c9 = -c9(:,6)*k_T;
n_c9 = c9(:,7)*k_n;

load c10.dat

t_c10 = c10(:,1);
Uab_c10 = c10(:,2)*k_Uab;
Ia_c10 = c10(:,3)*k_Ia;
Ucb_c10 = c10(:,4)*k_Ucb;
Ic_c10 = c10(:,5)*k_Ic;
T_c10 = -c10(:,6)*k_T;
n_c10 = c10(:,7)*k_n;

load c11.dat

t_c11 = c11(:,1);
Uab_c11 = c11(:,2)*k_Uab;
Ia_c11 = c11(:,3)*k_Ia;
Ucb_c11 = c11(:,4)*k_Ucb;
Ic_c11 = c11(:,5)*k_Ic;

```

```

T_c11 = -c11(:,6)*k_T;
n_c11 = c11(:,7)*k_n;

load c12.dat

t_c12 = c12(:,1);
Uab_c12 = c12(:,2)*k_Uab;
Ia_c12 = c12(:,3)*k_Ia;
Ucb_c12 = c12(:,4)*k_Ucb;
Ic_c12 = c12(:,5)*k_Ic;
T_c12 = -c12(:,6)*k_T;
n_c12 = c12(:,7)*k_n;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obliczenia

[m,n]=size(c1);

T_c1_s = sum(T_c1)/l_p;
n_c1_s = sum(n_c1)/l_p;
w_c1_s = n_c1_s * pi/30;
Pobc_c1 = T_c1_s * w_c1_s;
P_c1 = sum(Uab_c1 .* Ia_c1 + Ucb_c1 .* Ic_c1)/l_p;
Q_c1 = sqrt(3)*sum(Uab_c1 .* Ia_c1 - Ucb_c1 .* Ic_c1)/l_p;
fi_c1 = atan(Q_c1/P_c1);

T_c2_s = sum(T_c2)/l_p;
n_c2_s = sum(n_c2)/l_p;
w_c2_s = n_c2_s * pi/30;
Pobc_c2 = T_c2_s * w_c2_s;
P_c2 = sum(Uab_c2 .* Ia_c2 + Ucb_c2 .* Ic_c2)/l_p;
Q_c2 = sqrt(3)*sum(Uab_c2 .* Ia_c2 - Ucb_c2 .* Ic_c2)/l_p;
fi_c2 = atan(Q_c2/P_c2);

T_c3_s = sum(T_c3)/l_p;
n_c3_s = sum(n_c3)/l_p;
w_c3_s = n_c3_s * pi/30;
Pobc_c3 = T_c3_s * w_c3_s;
P_c3 = sum(Uab_c3 .* Ia_c3 + Ucb_c3 .* Ic_c3)/l_p;
Q_c3 = sqrt(3)*sum(Uab_c3 .* Ia_c3 - Ucb_c3 .* Ic_c3)/l_p;
fi_c3 = atan(Q_c3/P_c3);

T_c4_s = sum(T_c4)/l_p;
n_c4_s = sum(n_c4)/l_p;
w_c4_s = n_c4_s * pi/30;
Pobc_c4 = T_c4_s * w_c4_s;
P_c4 = sum(Uab_c4 .* Ia_c4 + Ucb_c4 .* Ic_c4)/l_p;
Q_c4 = sqrt(3)*sum(Uab_c4 .* Ia_c4 - Ucb_c4 .* Ic_c4)/l_p;
fi_c4 = atan(Q_c4/P_c4);

T_c5_s = sum(T_c5)/l_p;
n_c5_s = sum(n_c5)/l_p;
w_c5_s = n_c5_s * pi/30;
Pobc_c5 = T_c5_s * w_c5_s;
P_c5 = sum(Uab_c5 .* Ia_c5 + Ucb_c5 .* Ic_c5)/l_p;
Q_c5 = sqrt(3)*sum(Uab_c5 .* Ia_c5 - Ucb_c5 .* Ic_c5)/l_p;
fi_c5 = atan(Q_c5/P_c5);

T_c6_s = sum(T_c6)/l_p;

```

```

n_c6_s = sum(n_c6)/l_p;
w_c6_s = n_c6_s * pi/30;
Pobc_c6 = T_c6_s * w_c6_s;
P_c6 = sum(Uab_c6 .* Ia_c6 + Ucb_c6 .* Ic_c6)/l_p;
Q_c6 = sqrt(3)*sum(Uab_c6 .* Ia_c6 - Ucb_c6 .* Ic_c6)/l_p;
fi_c6 = atan(Q_c6/P_c6);

T_c7_s = sum(T_c7)/l_p;
n_c7_s = sum(n_c7)/l_p;
w_c7_s = n_c7_s * pi/30;
Pobc_c7 = T_c7_s * w_c7_s;
P_c7 = sum(Uab_c7 .* Ia_c7 + Ucb_c7 .* Ic_c7)/l_p;
Q_c7 = sqrt(3)*sum(Uab_c7 .* Ia_c7 - Ucb_c7 .* Ic_c7)/l_p;
fi_c7 = atan(Q_c7/P_c7);

T_c8_s = sum(T_c8)/l_p;
n_c8_s = sum(n_c8)/l_p;
w_c8_s = n_c8_s * pi/30;
Pobc_c8 = T_c8_s * w_c8_s;
P_c8 = sum(Uab_c8 .* Ia_c8 + Ucb_c8 .* Ic_c8)/l_p;
Q_c8 = sqrt(3)*sum(Uab_c8 .* Ia_c8 - Ucb_c8 .* Ic_c8)/l_p;
fi_c8 = atan(Q_c8/P_c8);

T_c9_s = sum(T_c9)/l_p;
n_c9_s = sum(n_c9)/l_p;
w_c9_s = n_c9_s * pi/30;
Pobc_c9 = T_c9_s * w_c9_s;
P_c9 = sum(Uab_c9 .* Ia_c9 + Ucb_c9 .* Ic_c9)/l_p;
Q_c9 = sqrt(3)*sum(Uab_c9 .* Ia_c9 - Ucb_c9 .* Ic_c9)/l_p;
fi_c9 = atan(Q_c9/P_c9);

T_c10_s = sum(T_c10)/l_p;
n_c10_s = sum(n_c10)/l_p;
w_c10_s = n_c10_s * pi/30;
Pobc_c10 = T_c10_s * w_c10_s;
P_c10 = sum(Uab_c10 .* Ia_c10 + Ucb_c10 .* Ic_c10)/l_p;
Q_c10 = sqrt(3)*sum(Uab_c10 .* Ia_c10 - Ucb_c10 .* Ic_c10)/l_p;
fi_c10 = atan(Q_c10/P_c10);

T_c11_s = sum(T_c11)/l_p;
n_c11_s = sum(n_c11)/l_p;
w_c11_s = n_c11_s * pi/30;
Pobc_c11 = T_c11_s * w_c11_s;
P_c11 = sum(Uab_c11 .* Ia_c11 + Ucb_c11 .* Ic_c11)/l_p;
Q_c11 = sqrt(3)*sum(Uab_c11 .* Ia_c11 - Ucb_c11 .* Ic_c11)/l_p;
fi_c11 = atan(Q_c11/P_c11);

T_c12_s = sum(T_c12)/l_p;
n_c12_s = sum(n_c12)/l_p;
w_c12_s = n_c12_s * pi/30;
Pobc_c12 = T_c12_s * w_c12_s;
P_c12 = sum(Uab_c12 .* Ia_c12 + Ucb_c12 .* Ic_c12)/l_p;
Q_c12 = sqrt(3)*sum(Uab_c12 .* Ia_c12 - Ucb_c12 .* Ic_c12)/l_p;
fi_c12 = atan(Q_c12/P_c12);

Pobc_c = [Pobc_c1 Pobc_c2 Pobc_c3 Pobc_c4 Pobc_c5 Pobc_c6...
Pobc_c7 Pobc_c8 Pobc_c9 Pobc_c10 Pobc_c11 Pobc_c12]';

P_c = [P_c1 P_c2 P_c3 P_c4 P_c5 P_c6 P_c7 P_c8 P_c9 P_c10...
P_c11 P_c12]';

```

```

teta_c = Pobc_c./P_c*100;

n_c = [n_c1_s n_c2_s n_c3_s n_c4_s n_c5_s n_c6_s n_c7_s...
        n_c8_s n_c9_s n_c10_s n_c11_s n_c12_s]';

strat_zna_c = (P_c - Pobc_c)./Pn;
strat_wyd_c = (P_c - Pobc_c)./Pobc_c;

fi_c = [fi_c1 fi_c2 fi_c3 fi_c4 fi_c5 fi_c6 fi_c7 fi_c8 fi_c9...
        fi_c10 fi_c11 fi_c12]';
cos_fi_c = cos(fi_c);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ua = 95% * Ub,Uc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wczytanie danych

load d1.dat

t_d1 = d1(:,1);
Uab_d1 = d1(:,2)*k_Uab;
Ia_d1 = d1(:,3)*k_Ia;
Ucb_d1 = d1(:,4)*k_Ucb;
Ic_d1 = d1(:,5)*k_Ic;
T_d1 = -d1(:,6)*k_T;
n_d1 = d1(:,7)*k_n;

load d2.dat

t_d2 = d2(:,1);
Uab_d2 = d2(:,2)*k_Uab;
Ia_d2 = d2(:,3)*k_Ia;
Ucb_d2 = d2(:,4)*k_Ucb;
Ic_d2 = d2(:,5)*k_Ic;
T_d2 = -d2(:,6)*k_T;
n_d2 = d2(:,7)*k_n;

load d3.dat

t_d3 = d3(:,1);
Uab_d3 = d3(:,2)*k_Uab;
Ia_d3 = d3(:,3)*k_Ia;
Ucb_d3 = d3(:,4)*k_Ucb;
Ic_d3 = d3(:,5)*k_Ic;
T_d3 = -d3(:,6)*k_T;
n_d3 = d3(:,7)*k_n;

load d4.dat

t_d4 = d4(:,1);
Uab_d4 = d4(:,2)*k_Uab;
Ia_d4 = d4(:,3)*k_Ia;
Ucb_d4 = d4(:,4)*k_Ucb;
Ic_d4 = d4(:,5)*k_Ic;
T_d4 = -d4(:,6)*k_T;
n_d4 = d4(:,7)*k_n;

```



```

load d5.dat

t_d5 = d5(:,1);
Uab_d5 = d5(:,2)*k_Uab;
Ia_d5 = d5(:,3)*k_Ia;
Ucb_d5 = d5(:,4)*k_Ucb;
Ic_d5 = d5(:,5)*k_Ic;
T_d5 = -d5(:,6)*k_T;
n_d5 = d5(:,7)*k_n;

load d6.dat

t_d6 = d6(:,1);
Uab_d6 = d6(:,2)*k_Uab;
Ia_d6 = d6(:,3)*k_Ia;
Ucb_d6 = d6(:,4)*k_Ucb;
Ic_d6 = d6(:,5)*k_Ic;
T_d6 = -d6(:,6)*k_T;
n_d6 = d6(:,7)*k_n;

load d7.dat

t_d7 = d7(:,1);
Uab_d7 = d7(:,2)*k_Uab;
Ia_d7 = d7(:,3)*k_Ia;
Ucb_d7 = d7(:,4)*k_Ucb;
Ic_d7 = d7(:,5)*k_Ic;
T_d7 = -d7(:,6)*k_T;
n_d7 = d7(:,7)*k_n;

load d8.dat

t_d8 = d8(:,1);
Uab_d8 = d8(:,2)*k_Uab;
Ia_d8 = d8(:,3)*k_Ia;
Ucb_d8 = d8(:,4)*k_Ucb;
Ic_d8 = d8(:,5)*k_Ic;
T_d8 = -d8(:,6)*k_T;
n_d8 = d8(:,7)*k_n;

load d9.dat

t_d9 = d9(:,1);
Uab_d9 = d9(:,2)*k_Uab;
Ia_d9 = d9(:,3)*k_Ia;
Ucb_d9 = d9(:,4)*k_Ucb;
Ic_d9 = d9(:,5)*k_Ic;
T_d9 = -d9(:,6)*k_T;
n_d9 = d9(:,7)*k_n;

load d10.dat

t_d10 = d10(:,1);
Uab_d10 = d10(:,2)*k_Uab;
Ia_d10 = d10(:,3)*k_Ia;
Ucb_d10 = d10(:,4)*k_Ucb;
Ic_d10 = d10(:,5)*k_Ic;
T_d10 = -d10(:,6)*k_T;

```

```

n_d10 = d10(:,7)*k_n;

load d11.dat

t_d11 = d11(:,1);
Uab_d11 = d11(:,2)*k_Uab;
Ia_d11 = d11(:,3)*k_Ia;
Ucb_d11 = d11(:,4)*k_Ucb;
Ic_d11 = d11(:,5)*k_Ic;
T_d11 = -d11(:,6)*k_T;
n_d11 = d11(:,7)*k_n;

load d12.dat

t_d12 = d12(:,1);
Uab_d12 = d12(:,2)*k_Uab;
Ia_d12 = d12(:,3)*k_Ia;
Ucb_d12 = d12(:,4)*k_Ucb;
Ic_d12 = d12(:,5)*k_Ic;
T_d12 = -d12(:,6)*k_T;
n_d12 = d12(:,7)*k_n;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obliczenia

T_d1_s = sum(T_d1)/l_p;
n_d1_s = sum(n_d1)/l_p;
w_d1_s = n_d1_s * pi/30;
Pobc_d1 = T_d1_s * w_d1_s;
P_d1 = sum(Uab_d1 .* Ia_d1 + Ucb_d1 .* Ic_d1)/l_p;
Q_d1 = sqrt(3)*sum(Uab_d1 .* Ia_d1 - Ucb_d1 .* Ic_d1)/l_p;
fi_d1 = atan(Q_d1/P_d1);

T_d2_s = sum(T_d2)/l_p;
n_d2_s = sum(n_d2)/l_p;
w_d2_s = n_d2_s * pi/30;
Pobc_d2 = T_d2_s * w_d2_s;
P_d2 = sum(Uab_d2 .* Ia_d2 + Ucb_d2 .* Ic_d2)/l_p;
Q_d2 = sqrt(3)*sum(Uab_d2 .* Ia_d2 - Ucb_d2 .* Ic_d2)/l_p;
fi_d2 = atan(Q_d2/P_d2);

T_d3_s = sum(T_d3)/l_p;
n_d3_s = sum(n_d3)/l_p;
w_d3_s = n_d3_s * pi/30;
Pobc_d3 = T_d3_s * w_d3_s;
P_d3 = sum(Uab_d3 .* Ia_d3 + Ucb_d3 .* Ic_d3)/l_p;
Q_d3 = sqrt(3)*sum(Uab_d3 .* Ia_d3 - Ucb_d3 .* Ic_d3)/l_p;
fi_d3 = atan(Q_d3/P_d3);

T_d4_s = sum(T_d4)/l_p;
n_d4_s = sum(n_d4)/l_p;
w_d4_s = n_d4_s * pi/30;
Pobc_d4 = T_d4_s * w_d4_s;
P_d4 = sum(Uab_d4 .* Ia_d4 + Ucb_d4 .* Ic_d4)/l_p;
Q_d4 = sqrt(3)*sum(Uab_d4 .* Ia_d4 - Ucb_d4 .* Ic_d4)/l_p;
fi_d4 = atan(Q_d4/P_d4);

T_d5_s = sum(T_d5)/l_p;
n_d5_s = sum(n_d5)/l_p;

```

```

w_d5_s = n_d5_s * pi/30;
Pobc_d5 = T_d5_s * w_d5_s;
P_d5 = sum(Uab_d5 .* Ia_d5 + Ucb_d5 .* Ic_d5)/l_p;
Q_d5 = sqrt(3)*sum(Uab_d5 .* Ia_d5 - Ucb_d5 .* Ic_d5)/l_p;
fi_d5 = atan(Q_d5/P_d5);

T_d6_s = sum(T_d6)/l_p;
n_d6_s = sum(n_d6)/l_p;
w_d6_s = n_d6_s * pi/30;
Pobc_d6 = T_d6_s * w_d6_s;
P_d6 = sum(Uab_d6 .* Ia_d6 + Ucb_d6 .* Ic_d6)/l_p;
Q_d6 = sqrt(3)*sum(Uab_d6 .* Ia_d6 - Ucb_d6 .* Ic_d6)/l_p;
fi_d6 = atan(Q_d6/P_d6);

T_d7_s = sum(T_d7)/l_p;
n_d7_s = sum(n_d7)/l_p;
w_d7_s = n_d7_s * pi/30;
Pobc_d7 = T_d7_s * w_d7_s;
P_d7 = sum(Uab_d7 .* Ia_d7 + Ucb_d7 .* Ic_d7)/l_p;
Q_d7 = sqrt(3)*sum(Uab_d7 .* Ia_d7 - Ucb_d7 .* Ic_d7)/l_p;
fi_d7 = atan(Q_d7/P_d7);

T_d8_s = sum(T_d8)/l_p;
n_d8_s = sum(n_d8)/l_p;
w_d8_s = n_d8_s * pi/30;
Pobc_d8 = T_d8_s * w_d8_s;
P_d8 = sum(Uab_d8 .* Ia_d8 + Ucb_d8 .* Ic_d8)/l_p;
Q_d8 = sqrt(3)*sum(Uab_d8 .* Ia_d8 - Ucb_d8 .* Ic_d8)/l_p;
fi_d8 = atan(Q_d8/P_d8);

T_d9_s = sum(T_d9)/l_p;
n_d9_s = sum(n_d9)/l_p;
w_d9_s = n_d9_s * pi/30;
Pobc_d9 = T_d9_s * w_d9_s;
P_d9 = sum(Uab_d9 .* Ia_d9 + Ucb_d9 .* Ic_d9)/l_p;
Q_d9 = sqrt(3)*sum(Uab_d9 .* Ia_d9 - Ucb_d9 .* Ic_d9)/l_p;
fi_d9 = atan(Q_d9/P_d9);

T_d10_s = sum(T_d10)/l_p;
n_d10_s = sum(n_d10)/l_p;
w_d10_s = n_d10_s * pi/30;
Pobc_d10 = T_d10_s * w_d10_s;
P_d10 = sum(Uab_d10 .* Ia_d10 + Ucb_d10 .* Ic_d10)/l_p;
Q_d10 = sqrt(3)*sum(Uab_d10 .* Ia_d10 - Ucb_d10 .* Ic_d10)/l_p;
fi_d10 = atan(Q_d10/P_d10);

T_d11_s = sum(T_d11)/l_p;
n_d11_s = sum(n_d11)/l_p;
w_d11_s = n_d11_s * pi/30;
Pobc_d11 = T_d11_s * w_d11_s;
P_d11 = sum(Uab_d11 .* Ia_d11 + Ucb_d11 .* Ic_d11)/l_p;
Q_d11 = sqrt(3)*sum(Uab_d11 .* Ia_d11 - Ucb_d11 .* Ic_d11)/l_p;
fi_d11 = atan(Q_d11/P_d11);

T_d12_s = sum(T_d12)/l_p;
n_d12_s = sum(n_d12)/l_p;
w_d12_s = n_d12_s * pi/30;
Pobc_d12 = T_d12_s * w_d12_s;
P_d12 = sum(Uab_d12 .* Ia_d12 + Ucb_d12 .* Ic_d12)/l_p;
Q_d12 = sqrt(3)*sum(Uab_d12 .* Ia_d12 - Ucb_d12 .* Ic_d12)/l_p;

```

```

fi_d12 = atan(Q_d12/P_d12);

Pobc_d = [Pobc_d1 Pobc_d2 Pobc_d3 Pobc_d4 Pobc_d5 Pobc_d6...
          Pobc_d7 Pobc_d8 Pobc_d9 Pobc_d10 Pobc_d11 Pobc_d12]';

P_d = ([P_d1 P_d2 P_d3 P_d4 P_d5 P_d6 P_d7 P_d8 P_d9 P_d10...
        P_d11 P_d12]');

teta_d = Pobc_d./P_d*100;

n_d = [n_d1_s n_d2_s n_d3_s n_d4_s n_d5_s n_d6_s n_d7_s...
        n_d8_s n_d9_s n_d10_s n_d11_s n_d12_s]';

strat_zna_d = (P_d - Pobc_d)./Pn;
strat_wyd_d = (P_d - Pobc_d)./Pobc_d;

fi_d = [fi_d1 fi_d2 fi_d3 fi_d4 fi_d5 fi_d6 fi_d7 fi_d8 fi_d9...
        fi_d10 fi_d11 fi_d12]';
cos_fi_d = cos(fi_d);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wspolczynnik asymetrii
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a = exp(1i*2/3*pi);
a2 = exp(-1i*2/3*pi);

S = 1/3*[1 1 1; 1 a a2; 1 a2 a];

U_s = [230; 230*a2; 230*a];
U_b = [195.5; 230*a2; 230*a];
U_c = [207; 230*a2; 230*a];
U_d = [218.5; 230*a2; 230*a];

Us_s = S*U_s;
Us_b = S*U_b;
Us_c = S*U_c;
Us_d = S*U_d;

Ku_s = abs(Us_s(3)/Us_s(2))*100;
Ku_b = abs(Us_b(3)/Us_b(2))*100;
Ku_c = abs(Us_c(3)/Us_c(2))*100;
Ku_d = abs(Us_d(3)/Us_d(2))*100;

Ku = ([Ku_s Ku_d Ku_c Ku_b])';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wykresy
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% dla sprawnosci

x_s = 0:4800;
x_b = 0:4800;
x_c = 0:4800;
x_d = 0:4800;

y_s = interp1(Pobc_s, teta_s, x_s, 'spline');

```

```

y_b = interp1(Pobc_b, teta_b, x_b, 'spline');
y_c = interp1(Pobc_c, teta_c, x_c, 'spline');
y_d = interp1(Pobc_d, teta_d, x_d, 'spline');

figure(1)
hold on
plot(Pobc_s,teta_s, '.r', Pobc_b,teta_b, '.b', Pobc_c,teta_c, '.m', ...
      Pobc_d,teta_d, '.k', 'MarkerSize',15)
leg2 = legend('Seria S', 'Seria B', 'Seria C', 'Seria D');
set(leg2, 'location', 'South' );
plot(x_s,y_s, 'r', x_b,y_b, 'b', x_c,y_c, 'm', x_d,y_d, 'k')
axis([2000 4800 81 87]);
ylabel('\eta [%]')
xlabel('P_{obc} [W]')

figure(2)
hold on
plot(Pobc_s,teta_s, '.r', Pobc_b,teta_b, '.b', Pobc_c,teta_c, '.m', ...
      Pobc_d,teta_d, '.k', 'MarkerSize',15)
leg2 = legend('Seria S', 'Seria B', 'Seria C', 'Seria D');
set(leg2, 'location', 'Best' );
plot(x_s,y_s, 'r', x_b,y_b, 'b', x_c,y_c, 'm', x_d,y_d, 'k')
axis([800 2000 60 83]);
ylabel('\eta [%]')
xlabel('P_{obc} [W]')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

teta3k = ([y_s(3001) y_d(3001) y_c(3001) y_b(3001)])';

x_ku3k = 0:0.01:5.5;
a_ku3k = polyfit(Ku, teta3k, 1);
y_ku3k = polyval(a_ku3k, x_ku3k);

figure(3)
hold on
plot(Ku,teta3k, '.r', 'MarkerSize',15)
leg2 = legend('P_{obc} = 3[kW]');
set(leg2, 'location', 'Best' );
plot(x_ku3k,y_ku3k, 'r')
ylabel('\eta [%]')
xlabel('K_U [%]')

% dla predkosci

an_s = polyfit(Pobc_s, n_s, 1);
yn_s = polyval(an_s, x_s);
an_b = polyfit(Pobc_b, n_b, 1);
yn_b = polyval(an_b, x_b);
an_c = polyfit(Pobc_c, n_c, 1);
yn_c = polyval(an_c, x_c);
an_d = polyfit(Pobc_d, n_d, 1);
yn_d = polyval(an_d, x_d);

n3k = ([yn_s(3001) yn_d(3001) yn_c(3001) yn_b(3001)])';

x_n3k = 0:0.01:5.5;
a_n3k = polyfit(Ku, n3k, 1);
y_n3k = polyval(a_n3k, x_n3k);

```

```

figure(4)
hold on
plot(Ku,n3k,'.r','MarkerSize',15)
leg2 = legend('P_{obc} = 3[kW]');
set(leg2,'location','Best');
plot(x_n3k,y_n3k,'r')
ylabel('n [obr/min]')
xlabel('K_U [%]')

% dla strat do mocy znamionowej

astrat_zna_s = polyfit(Pobc_s, strat_zna_s, 2);
ystrat_zna_s = polyval(astrat_zna_s, x_s);
astrat_zna_b = polyfit(Pobc_b, strat_zna_b, 2);
ystrat_zna_b = polyval(astrat_zna_b, x_b);
astrat_zna_c = polyfit(Pobc_c, strat_zna_c, 2);
ystrat_zna_c = polyval(astrat_zna_c, x_c);
astrat_zna_d = polyfit(Pobc_d, strat_zna_d, 2);
ystrat_zna_d = polyval(astrat_zna_d, x_d);

strat_zna3k = ([ystrat_zna_s(3001) ystrat_zna_d(3001)...
    ystrat_zna_c(3001) ystrat_zna_b(3001)])';

x_strat_zna3k = 0:0.01:5.5;
a_strat_zna3k = polyfit(Ku, strat_zna3k, 2);
y_strat_zna3k = polyval(a_strat_zna3k, x_strat_zna3k);

figure(5)
hold on
plot(Ku,strat_zna3k,'.r','MarkerSize',15)
leg2 = legend('P_{obc} = 3[kW]');
set(leg2,'location','Best');
plot(x_strat_zna3k,y_strat_zna3k,'r')
ylabel('(P_1 - P_{obc})/P_n [-]')
xlabel('K_U [%]')

% dla strat do mocy wydawanej

ystrat_wyd_s = interp1(Pobc_s, strat_wyd_s, x_s, 'spline');
ystrat_wyd_b = interp1(Pobc_b, strat_wyd_b, x_b, 'spline');
ystrat_wyd_c = interp1(Pobc_c, strat_wyd_c, x_c, 'spline');
ystrat_wyd_d = interp1(Pobc_d, strat_wyd_d, x_d, 'spline');

strat_wyd3k = ([ystrat_wyd_s(3001) ystrat_wyd_d(3001)...
    ystrat_wyd_c(3001) ystrat_wyd_b(3001)])';

x_strat_wyd3k = 0:0.01:5.5;
a_strat_wyd3k = polyfit(Ku, strat_wyd3k, 2);
y_strat_wyd3k = polyval(a_strat_wyd3k, x_strat_wyd3k);

figure(6)
hold on
plot(Ku,strat_wyd3k,'.r','MarkerSize',15)
leg2 = legend('P_{obc} = 3[kW]');
set(leg2,'location','Best');
plot(x_strat_wyd3k,y_strat_wyd3k,'r')
ylabel('(P_1 - P_{obc})/P_{obc} [-]')
xlabel('K_U [%]')

```

```

% cos fi i prad

ycos_fi_s = interp1(Pobc_s, cos_fi_s, x_s, 'spline');
ycos_fi_b = interp1(Pobc_b, cos_fi_b, x_b, 'spline');
ycos_fi_c = interp1(Pobc_c, cos_fi_c, x_c, 'spline');
ycos_fi_d = interp1(Pobc_d, cos_fi_d, x_d, 'spline');

figure(7)
plot(x_s,ycos_fi_s,x_b,ycos_fi_b,x_c,ycos_fi_c,x_d,ycos_fi_d)
leg2 = legend('cos(\phi_{S})','cos(\phi_{B})','cos(\phi_{C})',...
    'cos(\phi_{D})');
set(leg2,'location','Best');
xlabel('P_{obc} [W]')
ylabel('cos(\phi) [-]');

Ia_s = ([max(Ia_s1), max(Ia_s2), max(Ia_s3), max(Ia_s4),...
    max(Ia_s5), max(Ia_s6), max(Ia_s7), max(Ia_s8),...
    max(Ia_s9), max(Ia_s10), max(Ia_s11)])/sqrt(2);

Ia_b = ([max(Ia_b1), max(Ia_b2), max(Ia_b3), max(Ia_b4),...
    max(Ia_b5), max(Ia_b6), max(Ia_b7), max(Ia_b8),...
    max(Ia_b9), max(Ia_b10), max(Ia_b11)])/sqrt(2);

Ia_c = ([max(Ia_c1), max(Ia_c2), max(Ia_c3), max(Ia_c4),...
    max(Ia_c5), max(Ia_c6), max(Ia_c7), max(Ia_c8),...
    max(Ia_c9), max(Ia_c10), max(Ia_c11), max(Ia_c12)])/sqrt(2);

Ia_d = ([max(Ia_d1), max(Ia_d2), max(Ia_d3), max(Ia_d4),...
    max(Ia_d5), max(Ia_d6), max(Ia_d7), max(Ia_d8),...
    max(Ia_d9), max(Ia_d10), max(Ia_d11), max(Ia_d12)])/sqrt(2);

Ic_s = ([max(Ic_s1), max(Ic_s2), max(Ic_s3), max(Ic_s4),...
    max(Ic_s5), max(Ic_s6), max(Ic_s7), max(Ic_s8),...
    max(Ic_s9), max(Ic_s10), max(Ic_s11)])/sqrt(2);

Ic_b = ([max(Ic_b1), max(Ic_b2), max(Ic_b3), max(Ic_b4),...
    max(Ic_b5), max(Ic_b6), max(Ic_b7), max(Ic_b8),...
    max(Ic_b9), max(Ic_b10), max(Ic_b11)])/sqrt(2);

Ic_c = ([max(Ic_c1), max(Ic_c2), max(Ic_c3), max(Ic_c4),...
    max(Ic_c5), max(Ic_c6), max(Ic_c7), max(Ic_c8),...
    max(Ic_c9), max(Ic_c10), max(Ic_c11), max(Ic_c12)])/sqrt(2);

Ic_d = ([max(Ic_d1), max(Ic_d2), max(Ic_d3), max(Ic_d4),...
    max(Ic_d5), max(Ic_d6), max(Ic_d7), max(Ic_d8),...
    max(Ic_d9), max(Ic_d10), max(Ic_d11), max(Ic_d12)])/sqrt(2);

yIa_s = interp1(Pobc_s, Ia_s, x_s, 'spline');
yIa_b = interp1(Pobc_b, Ia_b, x_b, 'spline');
yIa_c = interp1(Pobc_c, Ia_c, x_c, 'spline');
yIa_d = interp1(Pobc_d, Ia_d, x_d, 'spline');

yIc_s = interp1(Pobc_s, Ic_s, x_s, 'spline');
yIc_b = interp1(Pobc_b, Ic_b, x_b, 'spline');
yIc_c = interp1(Pobc_c, Ic_c, x_c, 'spline');

```

```

yIc_d = interp1(Pobc_d, Ic_d, x_d, 'spline');

figure(8)
subplot(2,1,1)
hold on
plot(x_s,yIa_s,'r',x_b,yIa_b,'b',x_c,yIa_c,'m',x_d,yIa_d,'k')
leg2 = legend('Seria S','Seria B','Seria C','Seria D');
set(leg2,'location','NorthWest');
ylabel('Ia [A]')
xlabel('P_{obc} [W]')
subplot(2,1,2)
hold on
plot(x_s,yIc_s,'r',x_b,yIc_b,'b',x_c,yIc_c,'m',x_d,yIc_d,'k')
leg2 = legend('Seria S','Seria B','Seria C','Seria D');
set(leg2,'location','NorthWest');
ylabel('Ic [A]')
xlabel('P_{obc} [W]')

```