

Ćwiczenie: "Prądnicą prądu przemiennego"

Opracowane w ramach projektu: "Wirtualne Laboratoria Fizyczne nowoczesną metodą nauczania" realizowanego przez Warszawską Wyższą Szkołę Informatyki.

Zakres ćwiczenia:

- Zasada działania prądnicy prądu przemiennego
- Projektowanie modelu prądnicy synchronicznej
- Charakterystyki biegu jałowego prądnicy synchronicznej
- Charakterystyki zwarcia prądnicy synchronicznej
- Krzywe V (Mordeya)
- Charakterystyki obciążenia prądnicy synchronicznej
- Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej
- Synchronizacja prądnicy synchronicznej z siecią sztywną



Prądnicą prądu przemiennego

PRĄDNICA PRĄDU PRZEMIENNEGO

**WIRTUALNE
LABORATORIA
FIZYCZNE
NOWOCZESNĄ
METODĄ
NAUCZANIA**

Innowacyjny program nauczania fizyki w szkołach ponadgimnazjalnych

Projekt jest realizowany przez Warszawską Wyższą Szkołę Informatyki

Człowiek – najlepsza inwestycja

KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**WARSZAWSKA
WYŻSZA SZKOŁA
INFORMATYKI**

**EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY**

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Autor: Marcin Godziemba-Maliszewski

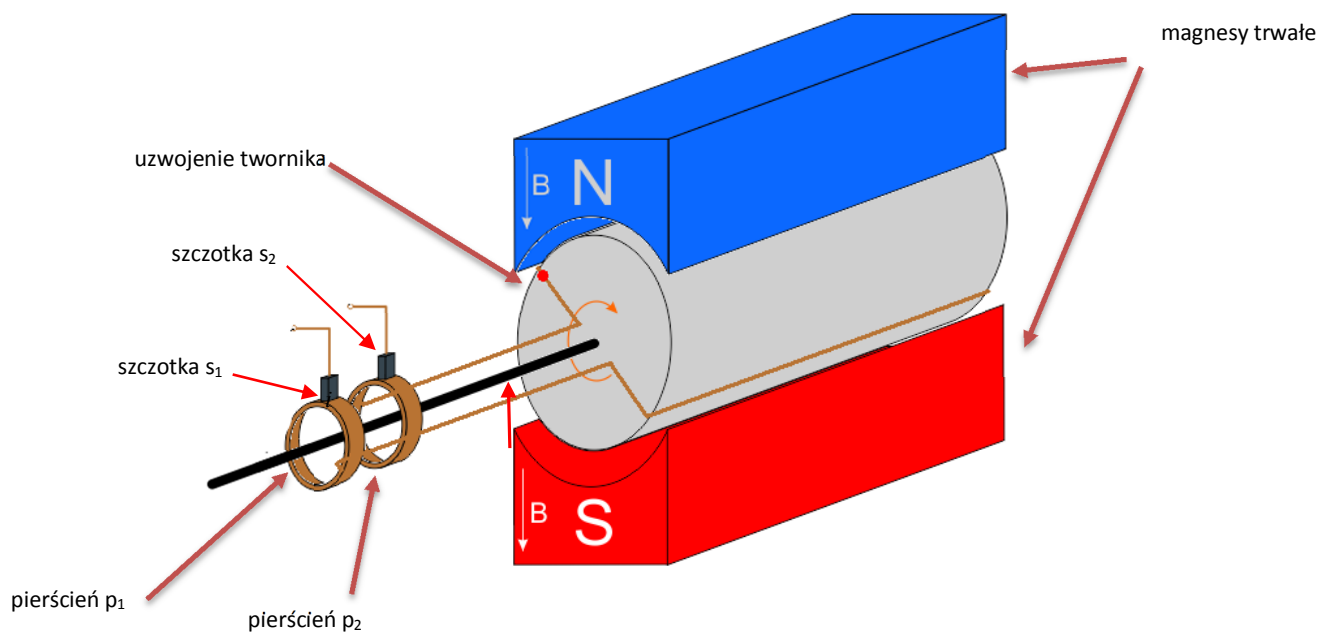
Radom 2013

Scenariusz prowadzenia ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z działaniem, właściwościami ruchowymi oraz ze sposobem wyznaczania podstawowych charakterystyk opisujących właściwości prądnicy prądu przemiennego.

Zasada działania prądnicy prądu przemiennego.

Celem modułu jest zapoznanie się z zasadą działania prądnicy prądu przemiennego oraz przebiegami indukcji magnetycznej w szczelinie i przebiegiem generowanego napięcia.



Rys.1. Model elementarnego silnika prądu stałego.

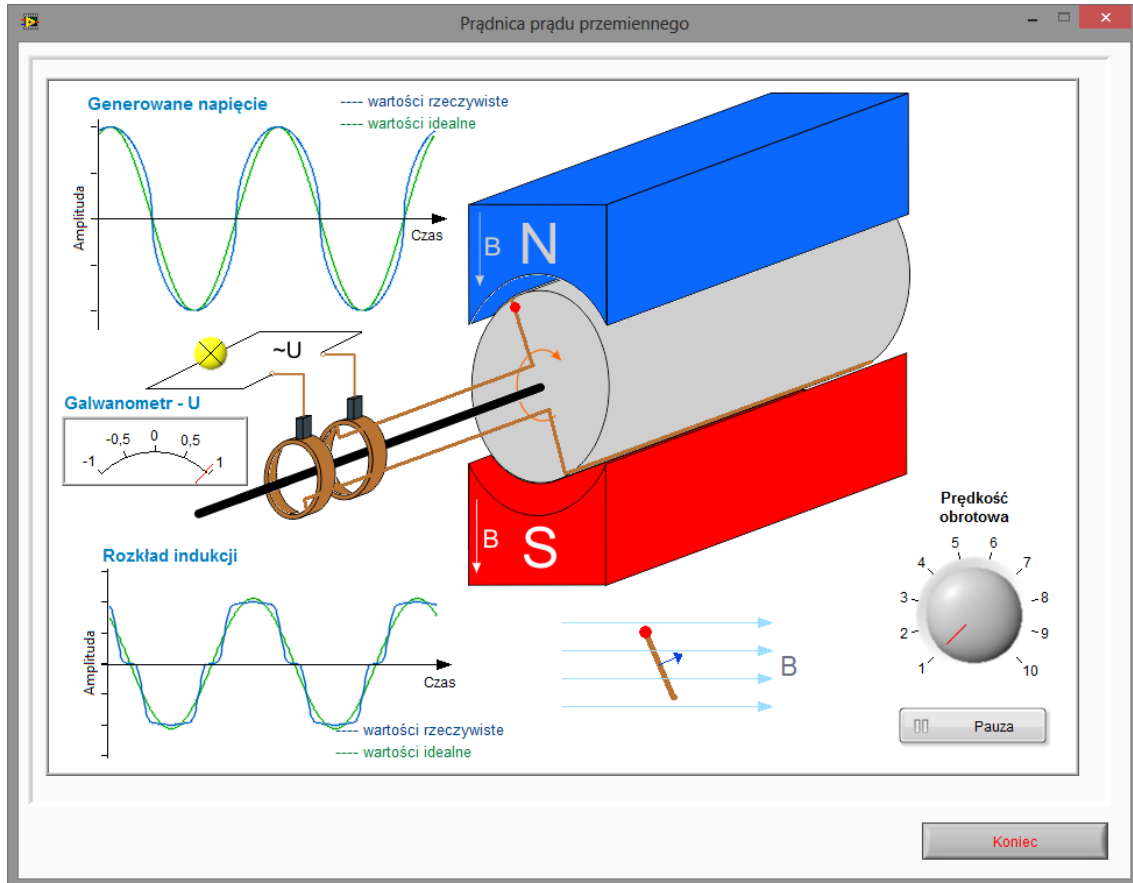
Na rysunku numer 1 przedstawiono uproszczony model prądnicy prądu przemiennego w oparciu, o którego zostanie omówiona istota działania maszyny elektrycznej. Jednofazowe prądnice prądu przemiennego popularnie nazywane są alternatorami, natomiast prądnice trójfazowe nazywane są generatorami. Największą grupą prądnic prądu przemiennego stanowią trójfazowe generatory synchroniczne z dużą ilością biegunów. Maszyną synchroniczną nazywamy maszynę prądu przemiennego, w której zachodzi związek pomiędzy częstotliwością f napięcia generowanego w uzwojeniach twornika a prędkością wirowania wirnika n . W przypadku maszyn wielobiegunowych liczba biegunów p wpływa wprost proporcjonalnie na częstotliwość generowanego napięcia. Wzór opisujący omówione związki został przedstawiony poniżej:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}$$

Nazwa maszyna synchroniczna wywodzi się z faktu, że zarówno wirnik jak i wypadkowe pole magnetyczne wytworzone przez uzwojenie wzbudzenia lub magnesy trwałe wiruje z tą samą prędkością – synchronicznie.

Działanie prądnicy prądu przemiennego mającej jedną parę biegunów oraz wirnik z uzwojeniem twornika składającego się z jednego zwoju przyłączonego do pierścieni ślizgowych p_1 i p_2 wraz ze szczotkami S_1 i S_2 ślizgającymi się po nich zostało zaprezentowane na rysunku nr 1. Uzwojenie twornika zostało umieszczone w walcu ferromagnetycznym zamykającym drogę strumienia magnetycznego. Jeżeli wirnik obraca się z prędkością v to w każdym przewodzie czynnym twornika indukuje się siła elektromotoryczna E o wartości proporcjonalnej do indukcji magnetycznej B , długości czynnej przewodu (będącego w polu magnetycznym) wyrażonym w metrach oraz od prędkości v , z jaką przewód przecina w kierunku prostopadłym linie sił pola magnetycznego. Kierunek sem określa reguła prawej dłoni bądź śruby prawoskrętnej natomiast wartość sem E opisana jest wzorem:

$$E = B \cdot l \cdot v \quad [V]$$

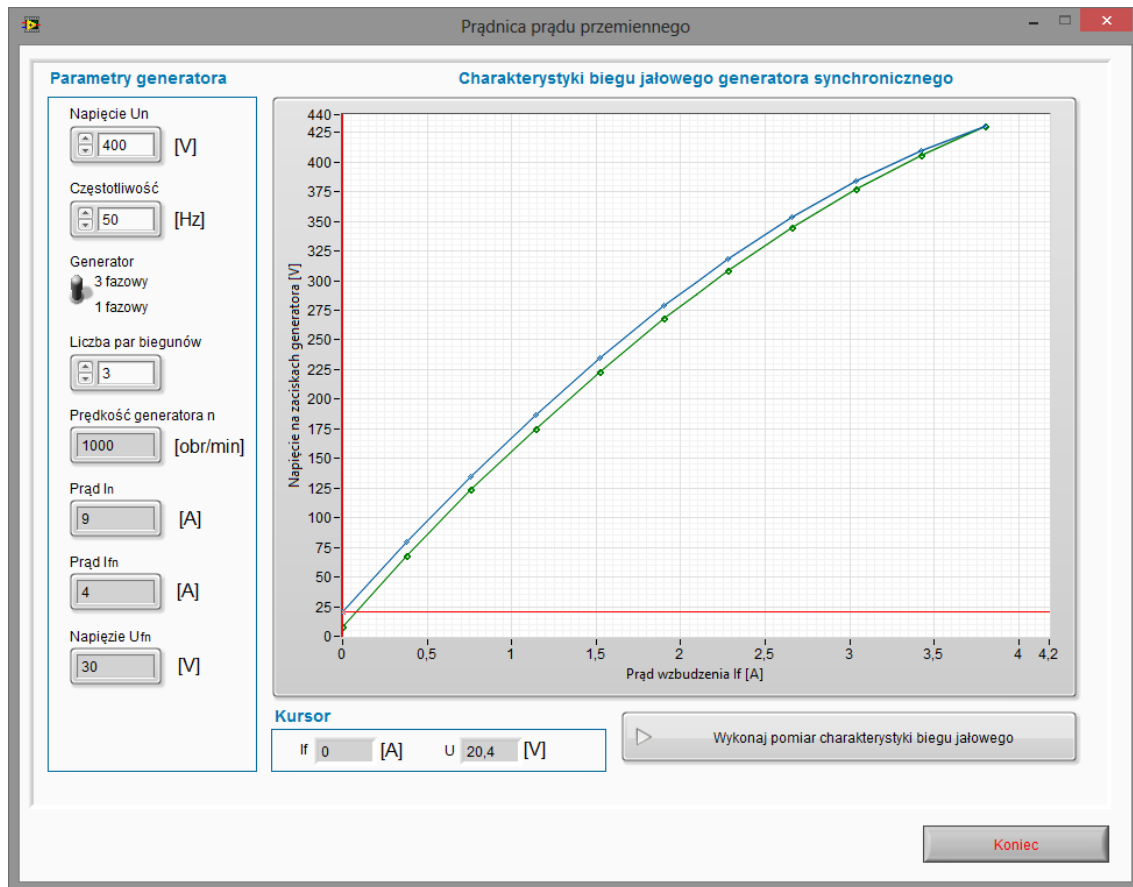


Rys. 2. Wizualizacja działania prądnicą prądu przemiennego.

W trakcie obrotu wirnika w uzwojeniach przecinających linie pola magnetycznego zostaje zaindukowane napięcie o wartości i zwrocie zależnym od kąta przecinania linii sił pola. Kształt napięcia został przedstawiony na rysunku nr 2 (Generowane napięcie). Wartość generowanego napięcia jest największa, gdy bok czynny uzwojenia przecina oś biegunów. W tym miejscu indukcja magnetyczna jest największa. Rozkład indukcji w szczelinie został przedstawiony na rysunku nr.2 (Rozkład indukcji). Wartość indukowanego napięcia jest równa zero dla położenia 90 stopni od osi biegunów. Uzwojenie twornika znajduje się w przestrzeni między biegunowej gdzie wartość strumienia a co za tym idzie wartość indukcji jest praktycznie zerowa. Przy jednej parze biegunów na jeden obrót wirnika przypada jeden okres indukowanego napięcia. Przedstawiony model prądnicą prądu przemiennego jest modelem uproszczonym i znacznie odbiega od budowy rzeczywistych generatorów synchronicznych. W rzeczywistości na wirniku znajduje się uzwojenie magnesujące zasilane prądem stałym generujące stałe pole magnetyczne. W generatorach trój fazowych na wirniku umieszczone są zazwyczaj trzy uzwojenia magnesujące przesunięte między sobą o kąt 120 stopni. Wirniki mogą występować w dwóch wariantach. Pierwszy z nich z biegunami utajonymi przeznaczonymi do wysoko obrotowych generatorów. Wymaga modelowania kształtu pola magnetycznego poprzez odpowiednie zaprojektowanie uzwojenia celem uzyskania w szczelinie rozkładu indukcji zbliżonej do sinusoidy. Drugim prostszym pod względem modelowania kształtu indukcji w szczelinie wykonaniem przeznaczonym do generatorów o małej prędkości obrotowej i dużej liczbie biegunów (średnice wirników rzędu kilku metrów!) jest wykonanie z tzw. biegunami wydatnymi. Poprzez kształt krzywizny bieguna można modelować rozkład indukcji w szczelinie, co przekłada się bezpośrednio na kształt napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika umieszczonego na stojanie.

Projektowanie modelu generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się z wpływem poszczególnych parametrów generatora na parametry generowanego napięcia.



Rys. 2. Wirtualny przyrząd pomiarowy umożliwiający modelowanie właściwości generatora synchronicznego.

Zadanie 1.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 2 należy zbadać wpływ poszczególnych parametrów generatora na jego właściwości eksploatacyjne:

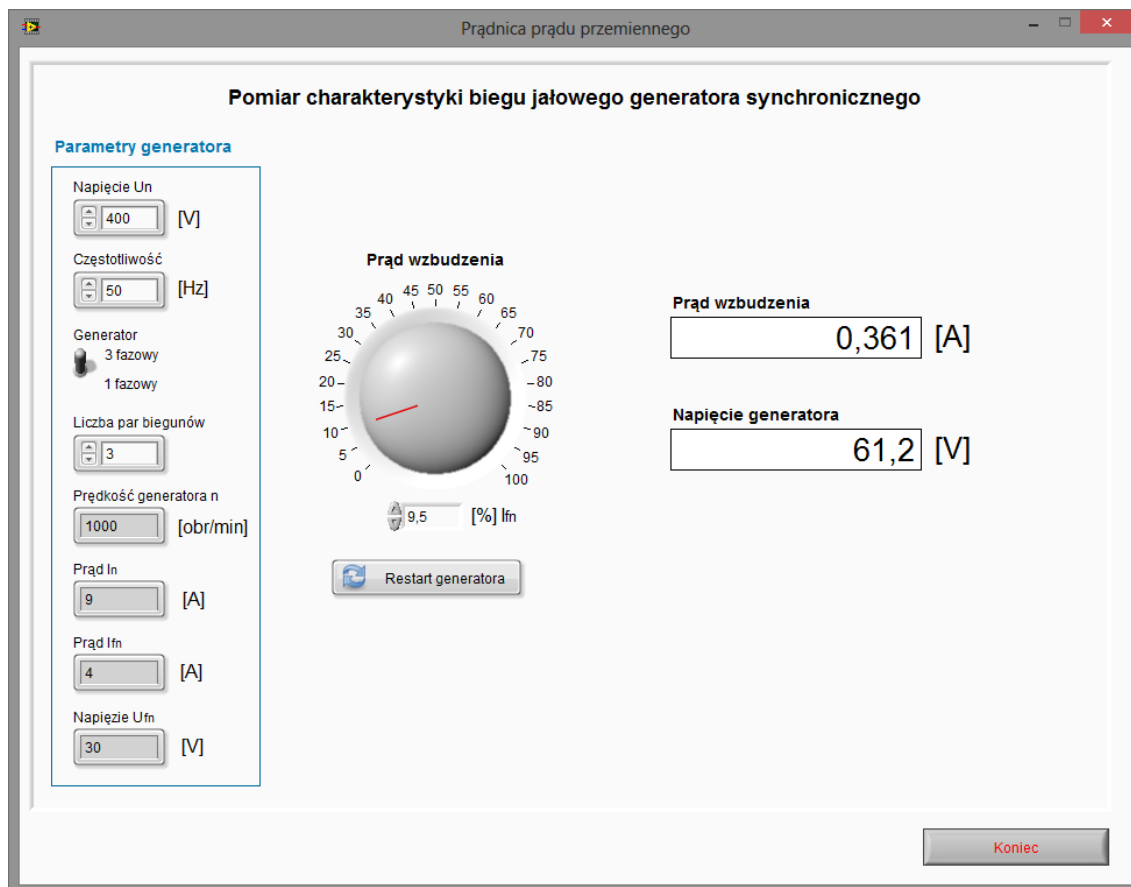
- Wpływ Częstotliwości na prędkość obrotową generatora
- Wpływ liczby par biegunów na prędkość obrotową generatora

Zadanie 2.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 2 należy zaprojektować generator synchroniczny do pracy z siecią sztywną (U_f 230 V, U_{mf} = 400 V, f = 50 Hz) z przeznaczeniem do np.: elektrowni wodnej (wolnoobrotowy generator o $n < 600$ obr/min), elektrowni węglowej (szybkoobrotowy generator do współpracy z turbinami parowymi $n > 2.5$ tys obr/min).

Pomiar charakterystyki biegu jałowego generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się ze sposobem wyznaczania i przebiegiem charakterystyki biegu jałowego generatora synchronicznego.



Rys. 3. Wirtualny przyrząd pomiarowy do wyznaczania charakterystyki biegu jałowego generatora synchronicznego.

Zadanie 3.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 3 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy przeprowadzić pomiar zależności siły elektromotorycznej E_f indukowanej w tworniku w zależności od prądu wzbudzenia I_f przy otwartym obwodzie twornika i stałej prędkości obrotowej. Charakterystyka $E_f = f(I_f)$ jest nazywana charakterystyką biegu jałowego generatora synchronicznego. Jej znajomość pozwala oceniać i porównywać budowę generatorów (w szczególności ich obwodów magnetycznych) oraz wraz z innymi charakterystykami omawianymi w dalszej części ćwiczenia wyznaczać metodami zastępczymi charakterystyki eksploatacyjne bez konieczności obciążania generatora oraz rozpędzania do prędkości znamionowej.

Pomiary charakterystyki biegu jałowego należy rozpocząć od wartości zerowej prądu wzbudzenia przy znamionowej prędkości obrotowej. Następnie stopniowo należy zwiększać prąd wzbudzenia aż do wartości znamionowej bądź do wartości, w której napięcie indukowane osiągnie maksymalnie 1.3 Wartości znamionowej. Po osiągnięciu szczytu należy stopniowo zmniejszać prąd wzbudzenia aż do wartości równej zero. Należy wykonać, co najmniej 10 pomiarów dla każdego z kierunków. Dane pomiarowe zapisać w tabeli pomiarowej nr 1. Symulator pokazuje wartość średnią z trzech faz generatora. Wartości i_f oraz e_f zostaną omówione przy okazji zadania nr 5.

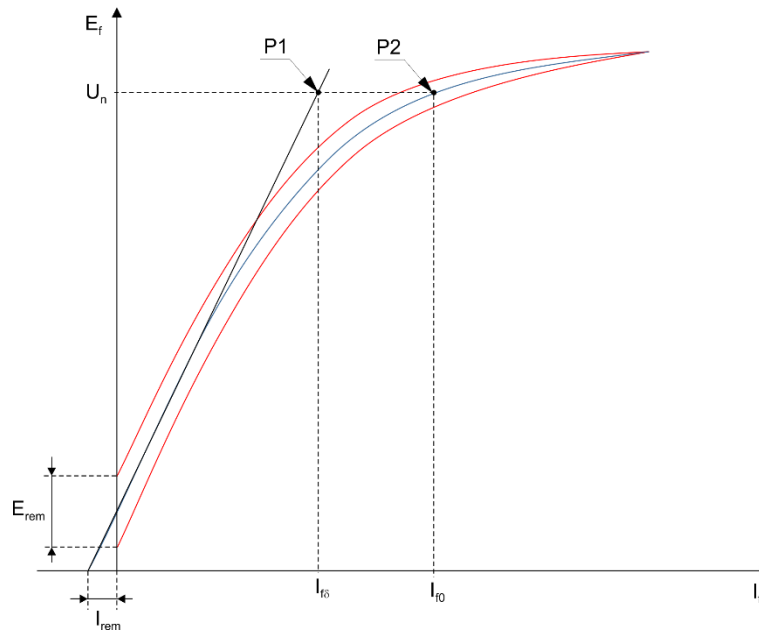
Tabela pomiarowa nr. 1

Lp.	n	I_f	i_f	E_{sr}	e_f	Uwagi
	obr/min	[A]	-	[V]	-	
						I_f - rośnie
						I_f - maleje



Zadanie 4.

Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych w zadaniu numer 3 należy wykreślić charakterystykę $E_f = f(I_f)$ dla wartości rosnącej jak i wartości malejącej. Na podstawie otrzymanych danych należy wykreślić charakterystykę średnią leżącą po środku wyznaczonej pętli. Na podstawie wykresu wartości średniej należy odczytać Wartości siły elektromotorycznej remanentu (często nazywanej sem szczątkową) E_{rem} oraz odpowiadającej jej wartości I_{rem} . Wartość I_{rem} określa się z przecięcia stycznej do wartości średniej z osią ox. Metoda wyznaczania została przedstawiona na poniższym rysunku:



Rys.4. Charakterystyka biegu jałowego oraz metoda graficznego wyznaczania wartości remanentu.

Wyznaczone wartości:

$E_{rem} = \dots\dots\dots V$

$I_{rem} = \dots\dots\dots A$

Przebieg charakterystyki biegu jałowego $E_f = f(I_f)$ jest odzwierciedleniem przebiegu zmian strumienia ϕ w funkcji prądu magnesowania $I_w \phi = f(I_f)$ gdyż zgodnie ze wzorem $E = 4.44 \cdot \phi \cdot f \cdot z \cdot k_1$ indukowane napięcie jest proporcjonalne do strumienia magnetycznego ϕ przy stałej prędkości obrotowej.

Na podstawie charakterystyki biegu jałowego wyznacza się współczynnik nasycenia obwodu magnetycznego maszyny:

$$k_{ns} = \frac{I_{rem} + I_{f0}}{I_{rem} + I_{f\delta}}$$

Zadanie 5.

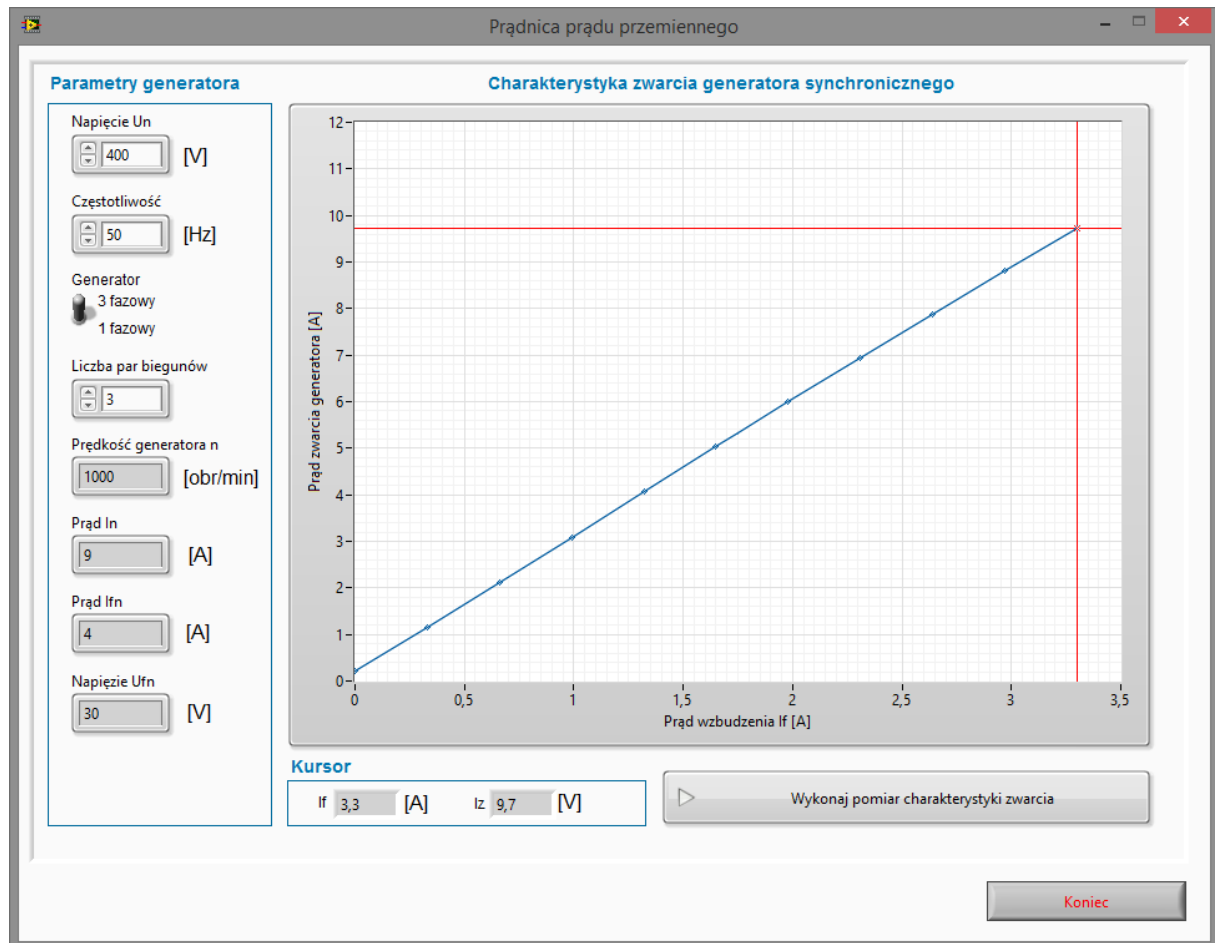
Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych w zadaniu numer 3 należy wykreślić charakterystykę $e_f = f(i_f)$ w jednostkach względnych dla wartości rosnącej jak i wartości malejącej.

$$e_f = \frac{E_f}{U_n}, i_f = \frac{I_f}{I_{f0}}$$



Charakterystyka zwarcia generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się z przebiegiem charakterystyki zwarcia generatora synchronicznego..



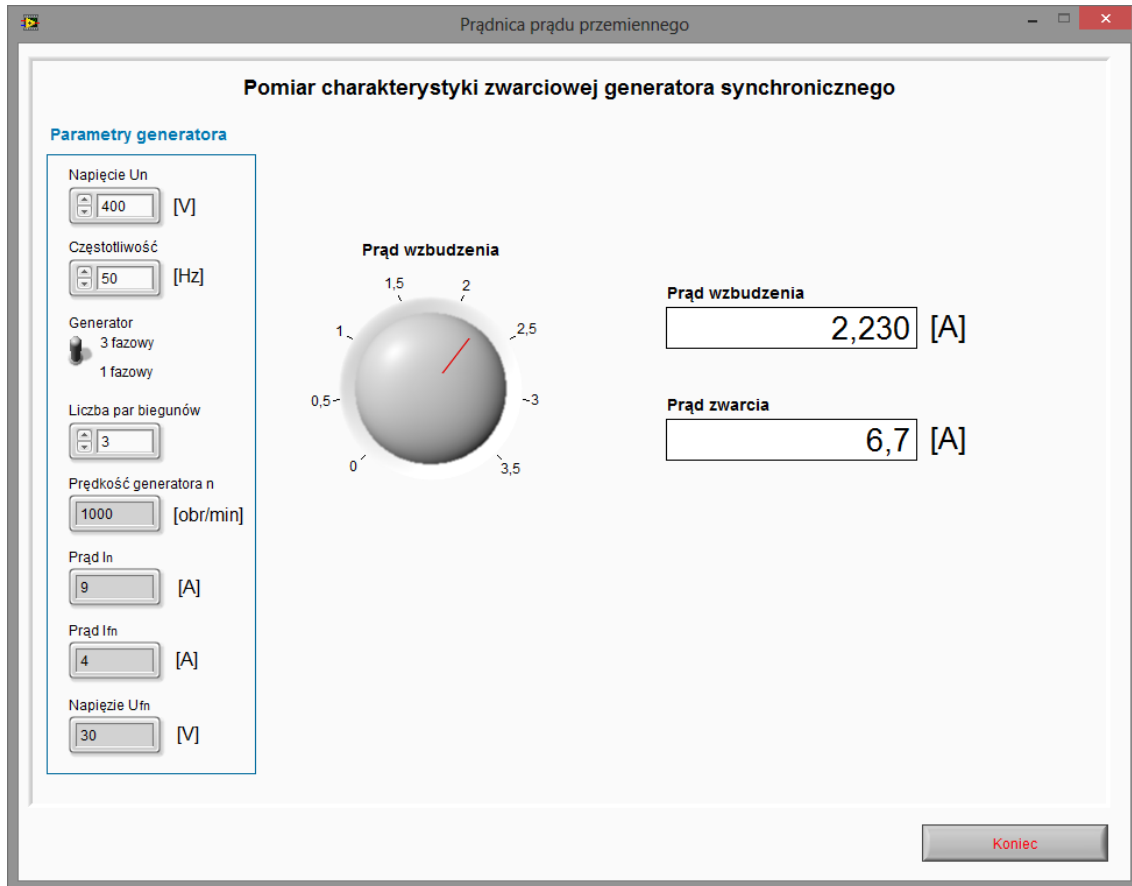
Rys. 5. Wirtualny przyrząd pomiarowy do wyznaczania rodziny charakterystyk mechanicznych.

Zadanie 6.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 5 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zapoznać się z przebiegiem charakterystyki zwarcia. Zmieniając wartości parametrów generatora należy określić, jakie z nich mają wpływ na przebieg charakterystyki zwarcia.

Pomiar charakterystyki zwarciowej generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się ze sposobem pomiaru charakterystyki symetrycznego zwarcia trójfazowego (jednofazowego) ustalonego generatora synchronicznego przy znamionowej prędkości znamionowej.



Rys. 6. Wirtualny przyrząd pomiarowy do wyznaczania charakterystyki zwarcia.

Zadanie 7.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 6 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy przeprowadzić pomiar charakterystyki symetrycznego zwarcia trójfazowego ustalonego. Pomiar charakterystyki zwarcia przeprowadza się przy prędkości znamionowej regulując napięcie wzbudzenia tak, aby w obwodzie twornika płynął prąd o wartości od $1.3 I_n$ do 0. Wyniki pomiarów należy zapisać w tabeli pomiarowej nr 2.

Tabela pomiarowa nr 2. $n_n = \dots\dots\dots$ [obr/min]

$Lp.$	I_f	i_f	I_z	i_z
	[A]	-	[A]	-

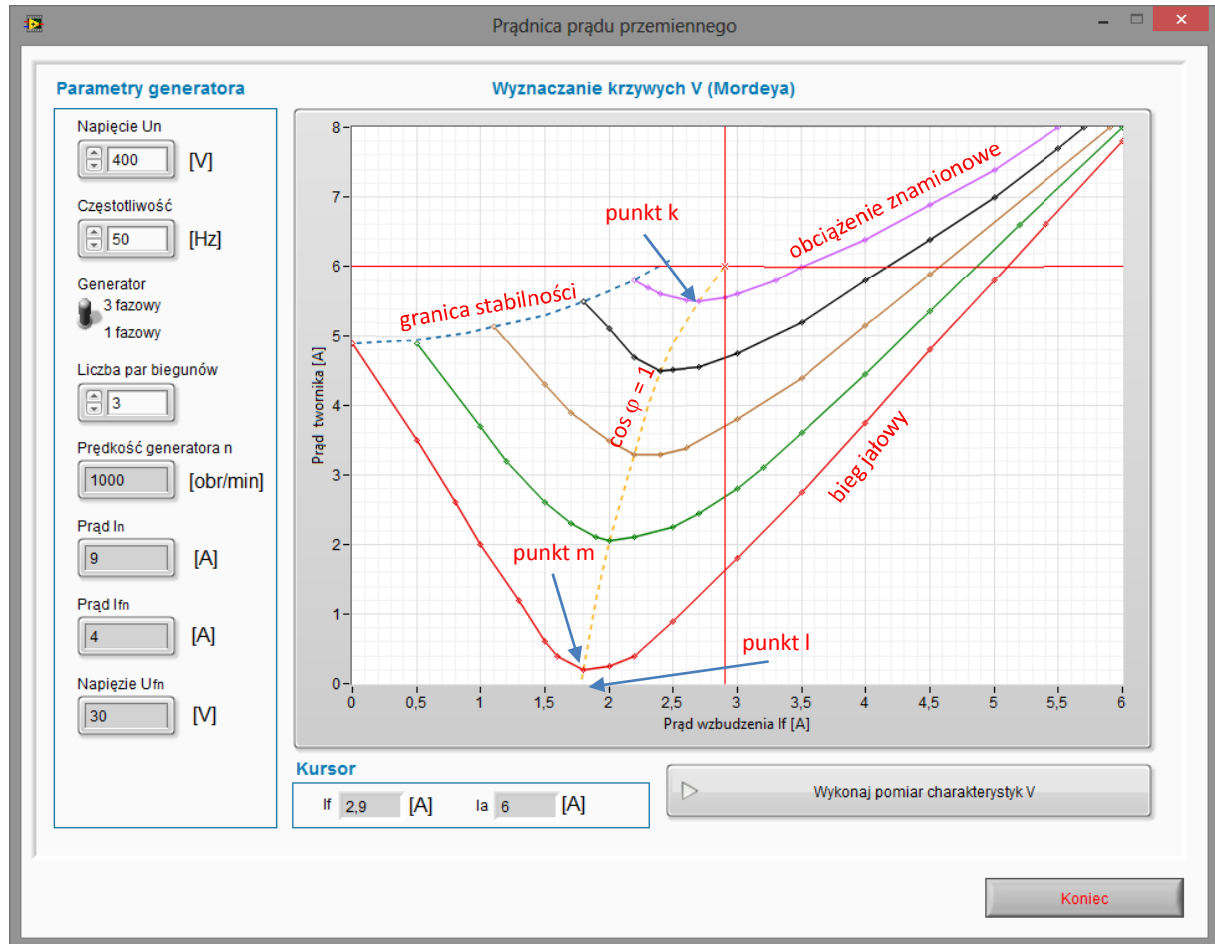
Zadanie 8.

Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych w zadaniu numer 8 należy nanieść wykres charakterystyki zwarciowej $i_{az} = f(i_f)$ na wykres charakterystyki $e_f = f(i_f)$ dla wartości średniej i przesuniętej osi ox o wartość prądu remanentu. Wykres charakterystyki zwarciowej należy wyrysować w jednostkach względnych.

$$i_z = \frac{I_z}{I_n}, i_f = \frac{I_f}{i_{f0}}$$

Wyznaczenie krzywych V (Mordeya).

Celem modułu jest zapoznanie się ze sposobem wyznaczania krzywych V przedstawiające zależność prądu twornika od prądu wzbudzenia $I = f(i_f)$ przy stałym napięciu generatora oraz stałej wartości mocy czynnej.



Rys. 7. Wirtualny przyrząd pomiarowy wyznaczania krzywych V generatora synchronicznego.

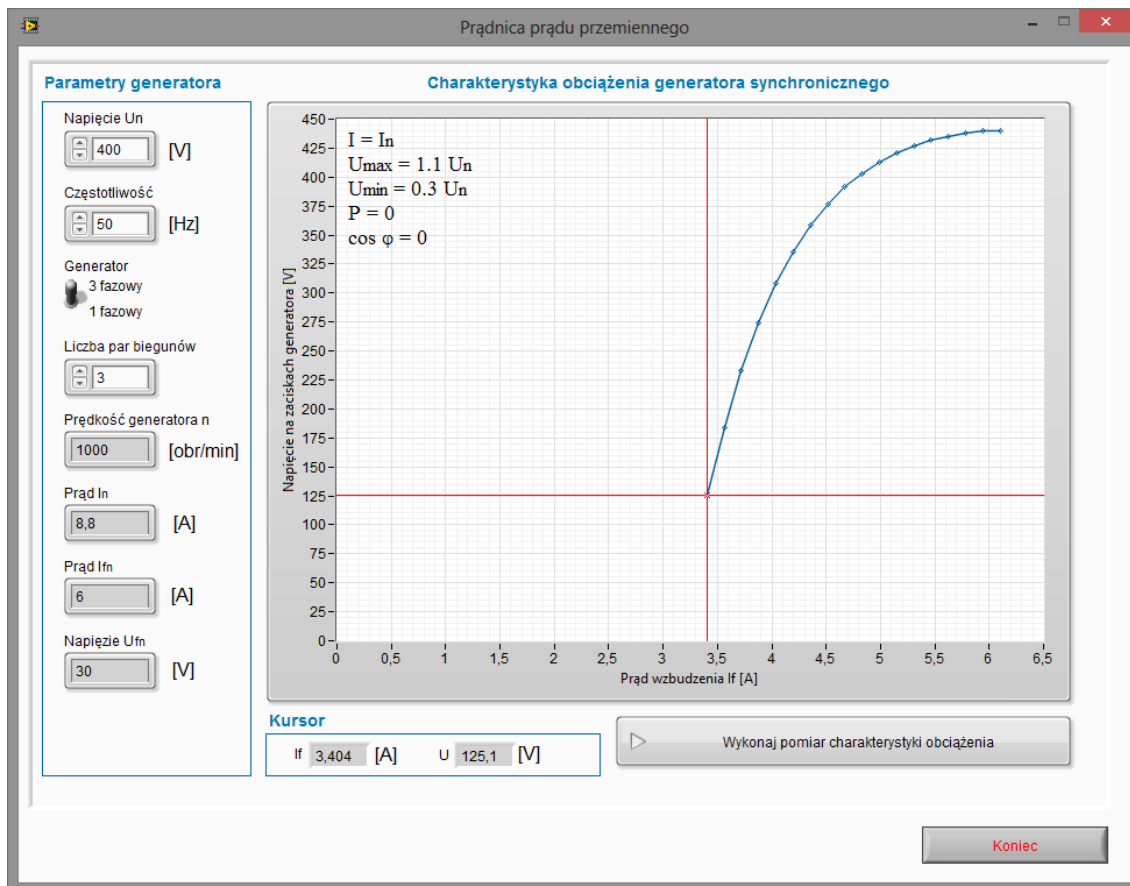
Poszczególne krzywe przedstawione na rysunku nr 9 opowiadają pracy generatora przy różnych obciążeniach od biegu jałowego aż do obciążenia znamionowego. Na krzywej biegu jałowego punkt M odpowiada najmniejszej wartości prądu twornika przy obciążeniu $\cos \varphi = 1$. Całkowity prąd jest prądem czynnym. Przedłużenie prostej z punktu m do punktu l odpowiada prądowi czynnemu jałowemu oddawanemu do sieci. Na prawo jak i na lewo od punktów l, m i k wartości prądów są większe ze względu na składową bierną. W zależności od zapotrzebowania sieci na dany typ energii biernej – pojemnościowej lub indukcyjnej można za pomocą wzbudzenia regulować typ energii oddawanej do sieci przez generator. Prze wzbudzenie generatora, czyli obszar na prawo od punktów l, m i k odpowiada oddawaniu mocy indukcyjnej do sieci. Obszar na lewo odpowiada nie dowzbudzeniu i oddawaniu do sieci mocy o charakterze pojemnościowym. Nadmierne zmniejszanie prądu wzbudzenia w tym obszarze pracy grozi wypadnięciem generatora z synchronizmu po przekroczeniu granicy stabilności. Prąd wzbudzenia odpowiadający przy danej wartości mocy P a określający granicę stabilności można oszacować ze wzoru:

$$I_{f \min} = 0.8 \cdot \frac{P}{P_n} \cdot I_{f0}$$



Charakterystyka obciążenia generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się z przebiegiem charakterystyki obciążenia generatora synchronicznego będącej zależnością napięcia twornika od prądu wzbudzenia przy stałej prędkości obrotowej, stałej wartości prądu twornika i stałym współczynniku mocy.



Rys. 8. Wirtualny przyrząd pomiarowy do wyznaczania charakterystyki obciążenia generatora synchronicznego.

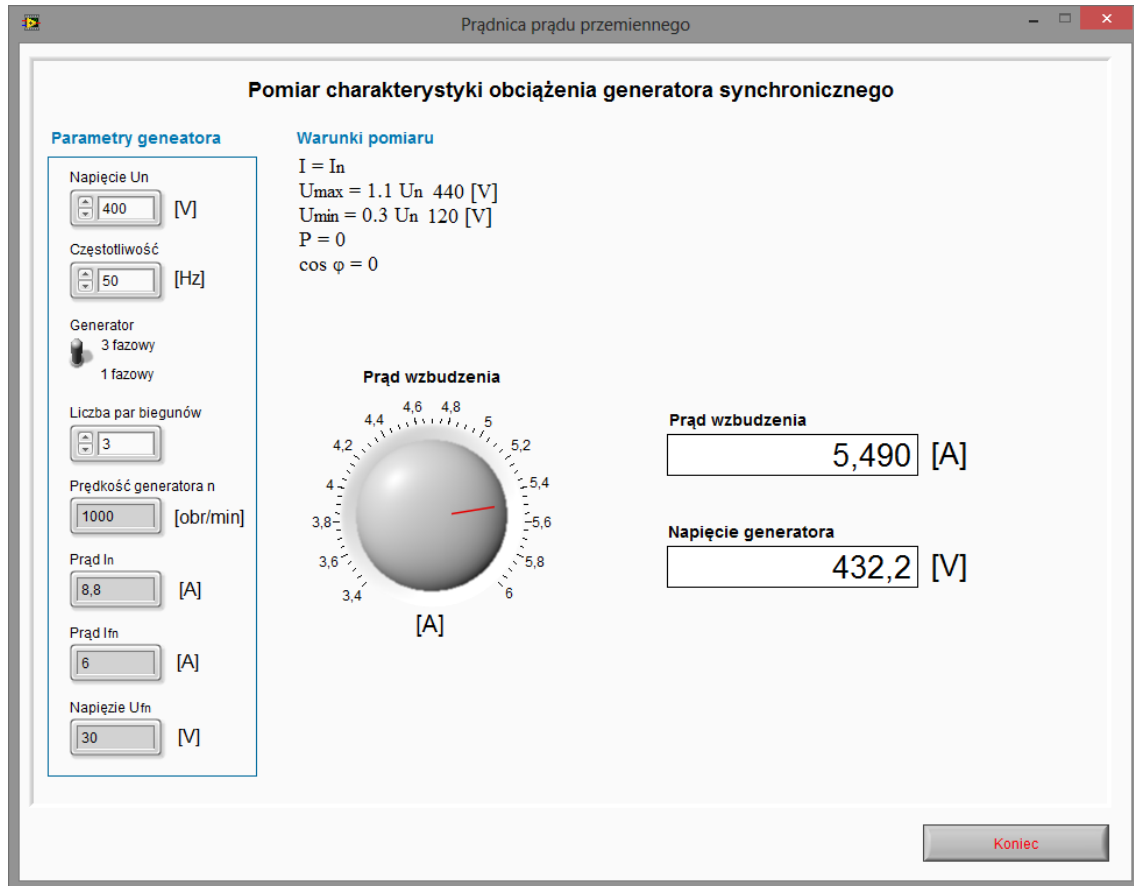
Zadanie 9.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 8 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zaobserwować przebieg zależności napięcia na zaciskach generatora w zależności od wartości prądu wzbudzenia.



Pomiar charakterystyki obciążenia generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się ze sposobem pomiaru charakterystyki obciążenia generatora synchronicznego oraz wyznaczeniu na jej podstawie przybliżenia reaktancji rozproszenia twornika poprzez określenie reaktancji Potiera.



Rys. 9. Wirtualny przyrząd pomiarowy do pomiaru charakterystyk mechanicznych silnika prądu stałego.

Zadanie 10.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 9 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy wyznaczyć charakterystykę obciążenia generatora synchronicznego. Symulator umożliwia automatyczny pomiar charakterystyki obciążenia bez konieczności regulowania napięcia na zaciskach i dobierania wartości obciążenia tak, aby moc czynna wynosiła zero. Pomiary przeprowadzić od wartości maksymalnej prądu wzbudzenia aż do momentu, gdy napięcie na zaciskach generatora osiągnie wartość w przybliżeniu 0,3 wartości napięcia znamionowego. Dane pomiarowe zapisać w tabeli pomiarowej nr 3

Tabela pomiarowa nr 3

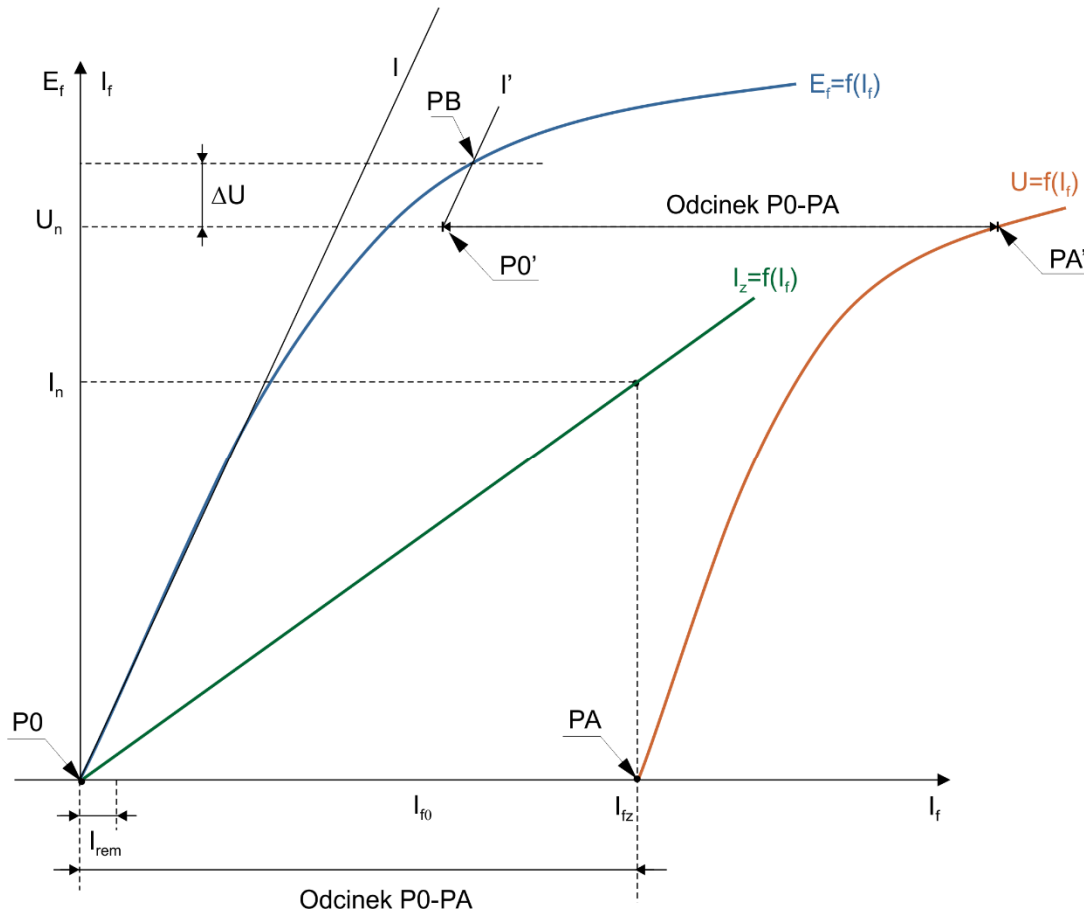
$Lp.$	I_f	U
	[A]	[V]

Zadanie 11.

Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych w zadaniu numer 10 należy wykreślić na wolnym wykresie średnią charakterystykę biegu jałowego $E_f = f(I_f)$ oraz na podstawie danych z tabeli pomiarowej nr 3 wykres charakterystyki



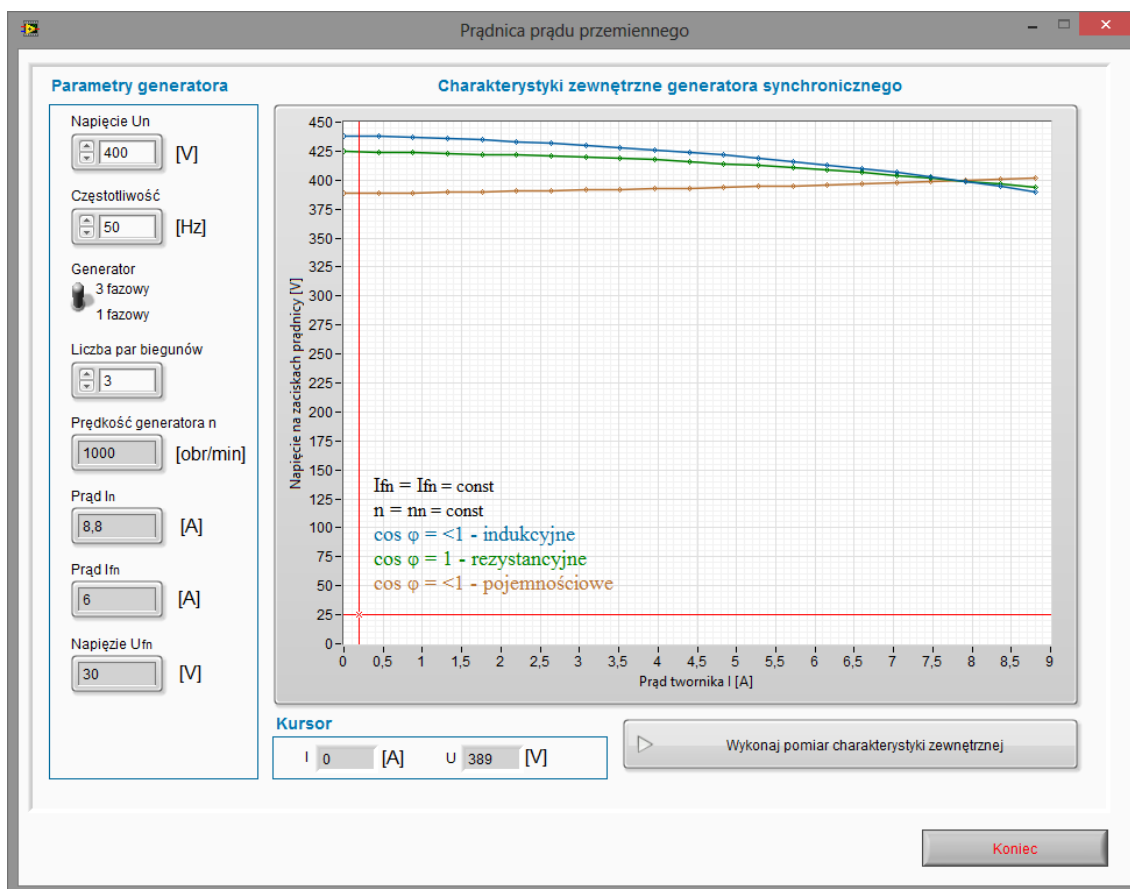
obciążenia $U = f(I_f)$. Wykorzystując metodę graficzną wyznaczania straty napięcia na reaktancji Potiera przedstawioną na rysunku nr 10 należy obliczyć wartość reaktancji Potiera : $X_p = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \dots\dots\dots [\Omega]$



Rys. 10. Graficzne wyznaczanie spadku napięcia na reaktancji Potiera.

Charakterystyki zewnętrzne generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się z przebiegiem charakterystyk zewnętrznych generatora synchronicznego.



Rys. 11. Wirtualny przyrząd pomiarowy do wyznaczania charakterystyk zewnętrznych generatora synchronicznego.

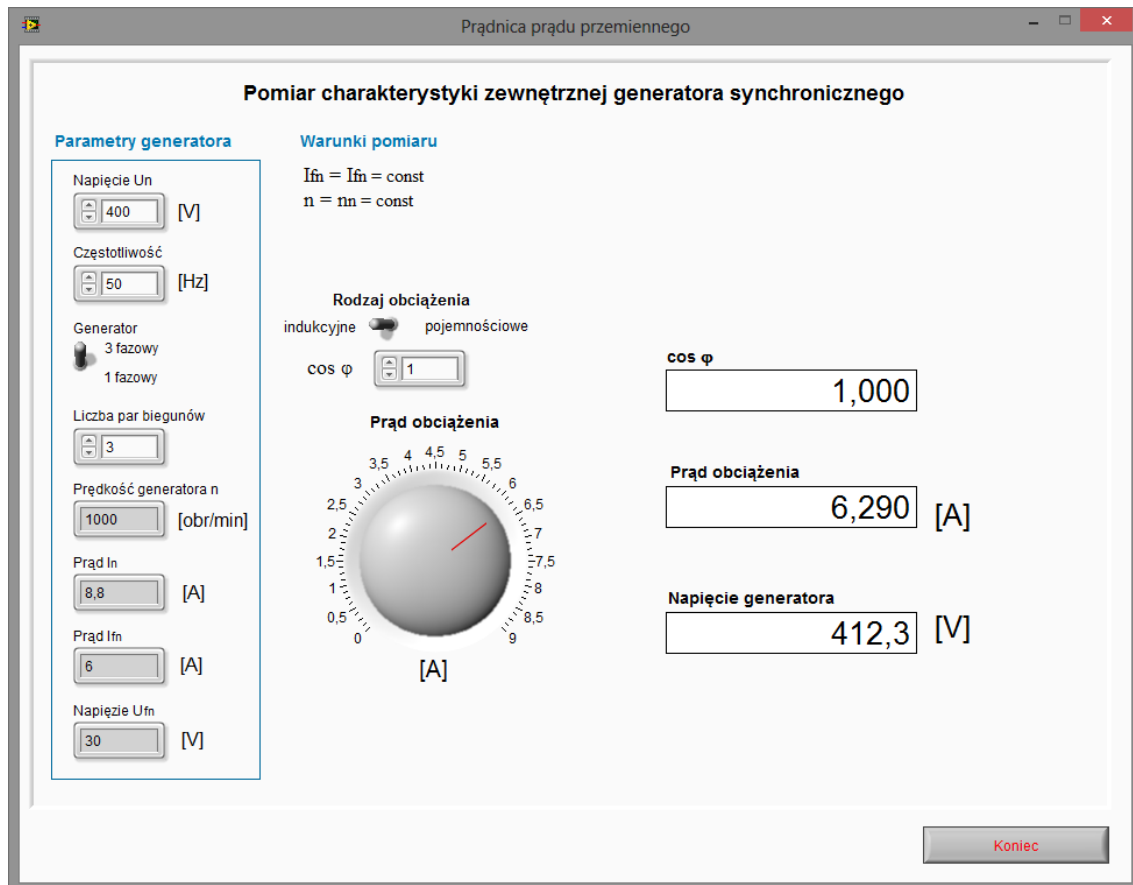
Zadanie 12.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 11 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zaobserwować przebieg charakterystyk zewnętrznych dla różnych typów obciążeń generatora synchronicznego.



Pomiar charakterystyki zewnętrznej generatora synchronicznego.

Celem modułu jest zapoznanie się ze sposobem pomiaru charakterystyki zewnętrznej generatora synchronicznego reprezentującej zmienność napięcia na zaciskach generatora w zależności od prądu obciążenia jak i typu obciążenia.



Rys. 12. Wirtualny przyrząd pomiarowy do pomiaru charakterystyk zewnętrznych generatora synchronicznego.

Zadanie 13.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 12 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zdjąć rodzinę charakterystyk zewnętrznych dla różnych typów obciążeń generatora synchronicznego. Wyniki pomiarów należy zapisać w tabeli pomiarowej nr 4. Pomiary należy przeprowadzić od maksymalnej wartości prądu obciążenia aż do wartości zerowej. Przykładowe profile rodziny charakterystyk:

- Obciążenie rezystancyjne: $\cos \varphi = 1$
- Obciążenie indukcyjne: $\cos \varphi = 0,9$
- Obciążenie indukcyjne: $\cos \varphi = 0,5$
- Obciążenie indukcyjne: $\cos \varphi = 0,3$
- Obciążenie pojemnościowe: $\cos \varphi = 0,9$
- Obciążenie pojemnościowe: $\cos \varphi = 0,5$
- Obciążenie pojemnościowe: $\cos \varphi = 0,3$

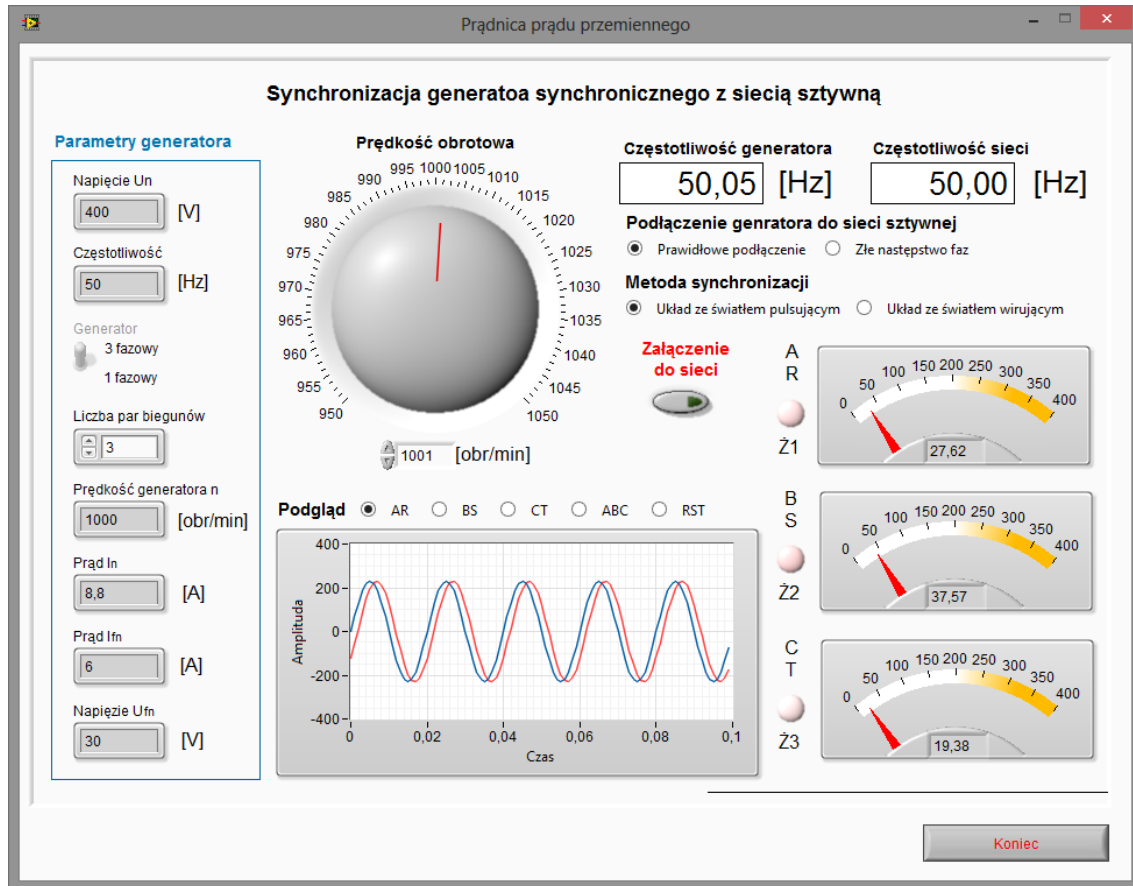
Tabela pomiarowa nr 4

Lp.	U	I	$\cos \varphi$	rodzaj obciążenia
	[V]	[A]		

Na podstawie danych z tabeli pomiarowej nr 4 należy wykreślić we wspólnym układzie współrzędnych wszystkie zdjęte charakterystyki.

Synchronizacja generatora z siecią sztywną.

Celem modułu jest zapoznanie się z metodami synchronizacji generatora synchronicznego z siecią sztywną z wykorzystaniem układu świateł pulsujących oraz wirujących.



Rys. 13. Wirtualny przyrząd pomiarowy do symulacji procesu synchronizacji generatora synchronicznego z siecią sztywną.

Zadanie 14.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 13 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zaobserwować wykorzystanie układu żarówek ze światłem pulsującym do wykonania synchronizacji generatora z siecią sztywną. W odpowiednim momencie należy zsynchronizować generator z siecią. Właściwe wykonanie procedury synchronizacji zostanie potwierdzone zapaleniem się diody z napisem „Prawidłowe”.

Zadanie 15.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 13 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zaobserwować wykorzystanie układu żarówek ze światłem wirującym do wykonania synchronizacji generatora z siecią sztywną. Właściwe wykonanie procedury synchronizacji zostanie potwierdzone zapaleniem się diody z napisem „Prawidłowe”.

Zadanie 16.

Wykorzystując wirtualny przyrząd pomiarowy przedstawiony na rysunku 13 dla parametrów zaprojektowanego generatora z zadania 2 należy zaobserwować zachowanie układu synchronizującego w przypadku złego następstwa faz pomiędzy generatorem synchronicznym a siecią sztywną.