

Arkadiusz NERĆ<sup>1</sup>

## ANALIZA OBCIĄŻEŃ PRĄDNIC SYNCHRONICZNYCH NA PROMIE PASAŻERSKIM

*Artykuł przedstawia pracę prądnic okrętowych na statku RO-RO PAX (prom pasażerski). Za pomocą programu Matlab-Simulink zaprojektowano uproszczoną sieć energetyczną z podstawowymi odbiorami, spotykanymi na jednostkach pływających. Moc badanej elektrowni (bez agregatu awaryjnego) wynosi 5280 kVA. Podczas przeprowadzanych symulacji możliwe jest zaobserwowanie stanów ustalonych i nieustalonych, wynikających ze zmian obciążeń prądnicy synchronicznej oraz ich dokładna analiza. Zaprojektowany model daje możliwość symulacji rozbudowanych układów energetycznych statku, a jej wyniki są zgodne z rzeczywistymi wartościami obciążeń prądnic.*

### 1 WPROWADZENIE

Praca oparta jest na zebranych danych z promu pasażerskiego (podstawowe dane: długość 150 m, pojemność brutto 18653 t, łączna moc maszyn 13482 kW, prędkość maksymalna 19,4 kn.) pływającego aktualnie po Morzu Bałtyckim. Jednostka przedstawiona jest na rys.1.



Rys.1. Obiekt badań

Wytwarzanie energii elektrycznej w stanach bezawaryjnych realizowane jest przez cztery prądnice synchroniczne, napędzane silnikami spalinowymi: 2x Mitsui 12V42M

---

<sup>1</sup> TROMS OFFSHORE, Strandceien 106, 9006 Tromsø, Norway, tel. (0)662261254,  
e-mail: arkus3@poczta.onet.pl

Diesel - agregaty prądotwórcze oraz 2x GMT Sulzer 8ZAL40S – silniki główne z prądnicami wałowymi. Układy napędowe pracują na stałych nastawach prędkości obrotowej, które dla układów prądotwórczych pomocniczych wynoszą 750 obr/min oraz dla prądnic głównych (poprzez przekładnię zębatą) 1000 obr/min. W systemie zastosowano parę prądnic typu 1FJ 4566 o parametrach: 425V, 50Hz, 1490 kVA,  $\cos\phi=0.8$  (zespoły główne) oraz parę prądnic typu 1FJ4636 o parametrach: 425V, 50Hz, 1150 kVA,  $\cos\phi=0.8$  (zespoły pomocnicze) [3].

## 2 CZĘŚĆ OPISOWA

### 2.1 Podział odbiorników energii elektrycznej na grupy

Poszczególne odbiorniki energii elektrycznej przydzielone do odpowiednich grup funkcjonalnych takich jak: mechanizmy silników głównych, mechanizmy pomocnicze siłowni, urządzenia kuchenne i gospodarcze, wentylacja i klimatyzacja, urządzenia pokładowe, urządzenia chłodni ładowni, oświetlenie, urządzenia radiowe i nawigacyjne oraz odbiory ciężkie (m.in. stery strumieniowe) przedstawiono w tabeli 1. Udziały procentowe oraz łączne moce urządzeń obliczane zostały na podstawie znamionowych mocy urządzeń odbiorczych[1].

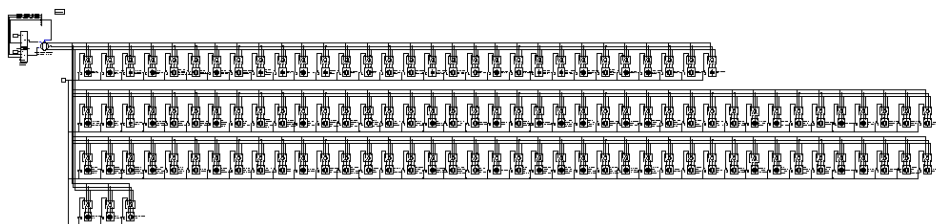
Tab. 1. Udział mocy grup odbiorników w całkowitej mocy zainstalowanej

Grupa	Udział %	Udział kW
Mechanizmy silnika głównego	9,24	483
Mechanizmy pomocnicze siłowni	24,84	1299
Urządzenia kuchenne i gospodarcze	2,56	134
Wentylacja i klimatyzacja	7,42	388
Urządzenia pokładowe	11,26	589
Urządzenia chłodni ładowni	0,57	30
Oświetlenie	1,02	53
Urządzenia radiowe i nawigacyjne	0,17	9
Odbiory ciężkie	42,91	2244

Na podstawie tabeli stwierdzić można, że największy udział procentowy ma grupa odbiorów ciężkich. Należą do nich dwa stery strumieniowe dziobowe oraz ster azymutalny znajdujący się w przedziale sterowym siłowni. W następnej kolejności znajdują się mechanizmy pomocnicze siłowni, a później dopiero urządzenia pokładowe.

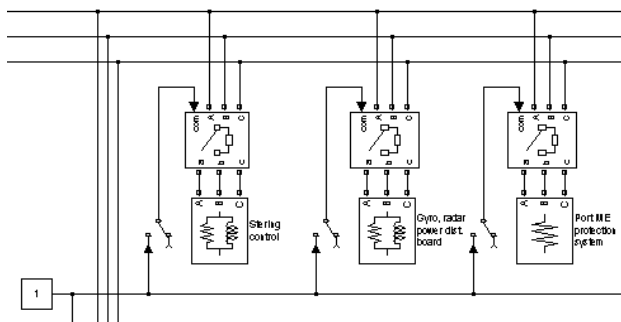
## 2.2 Model uproszczonej sieci energetycznej

W programie Matlab-Simulink zbudowano model okrętowej sieci energetycznej (osobno dla pracy prądnicy wałowej i prądnicy agregatu pomocniczego, różniące się jednak nieznacznie – dlatego też przedstawiono na rys.2. tylko model dla prądnicy wałowej) dla pracy w stanie postoju w porcie oraz podróży w morzu. W czasie rejsu dla wymienionych stanów pracy sieci energetycznej praca pojedynczej prądnicy (dla postoju w porcie jeden agregat prądotwórczy oraz dla podróży morskiej jedna prądnica wałowa) zapewniała wystarczającą ilość mocy dla załączonych odbiorów. Drugi agregat prądotwórczy załączany jest na sieć okrętową tylko na czas manewrów, których ten artykuł nie obejmuje. Dlatego też w przedstawianym modelu nie zaszła potrzeba stosowania większej ilości modeli prądnic. Korzystając z modelu sieci możliwe jest przeprowadzenie symulacji dla całodobowego czasu pracy systemu. Na potrzeby artykułu uwzględnione zostały jednak tylko obciążenia nocne, czyli głównie urządzenia zainstalowane w siłowni okrętowej. Podczas budowy modelu skorzystano z podstawowej biblioteki programu Simulink oraz biblioteki SimPowerSystems.



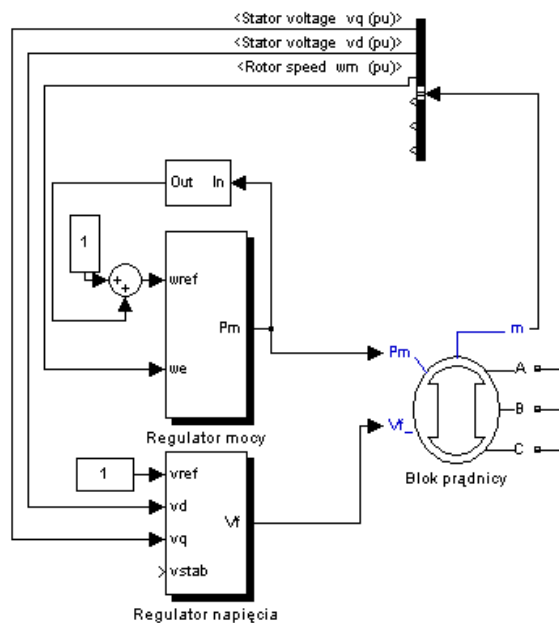
Rys.2. Uproszczony model sieci energetycznej statku

Model podzielono na dwie części. Pierwszą obejmującą odbiory w grupach: odbiory ważne, lewa i prawa szyna odbiorcza i odbiory ciężkie. Na rys.3. znajduje się wycinek obszaru odbiorów mocy.



Rys.3. Powiększony wycinek obszaru odbiorów

Drugą zawierającą blok prądnicy, bloki regulatorów mocy i napięcia oraz bloki pomiarowe. Model pracy portowej wyposażony jest dodatkowo w gałąź realizującą funkcje „speeddrop”. Omawiana część modelu widoczna jest na rys.4.

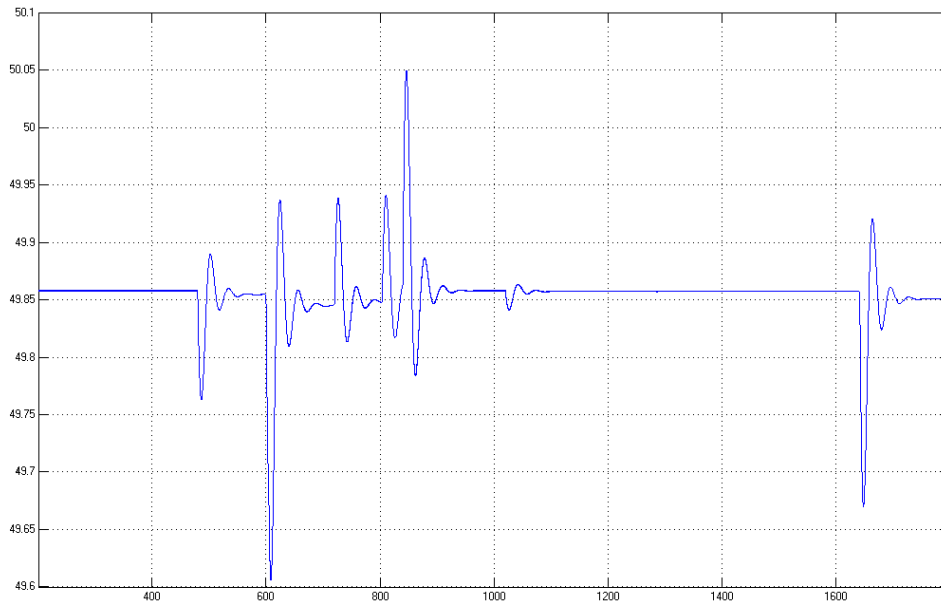


Rys.4. Blok prądnicy razem z regulatorami mocy i napięcia

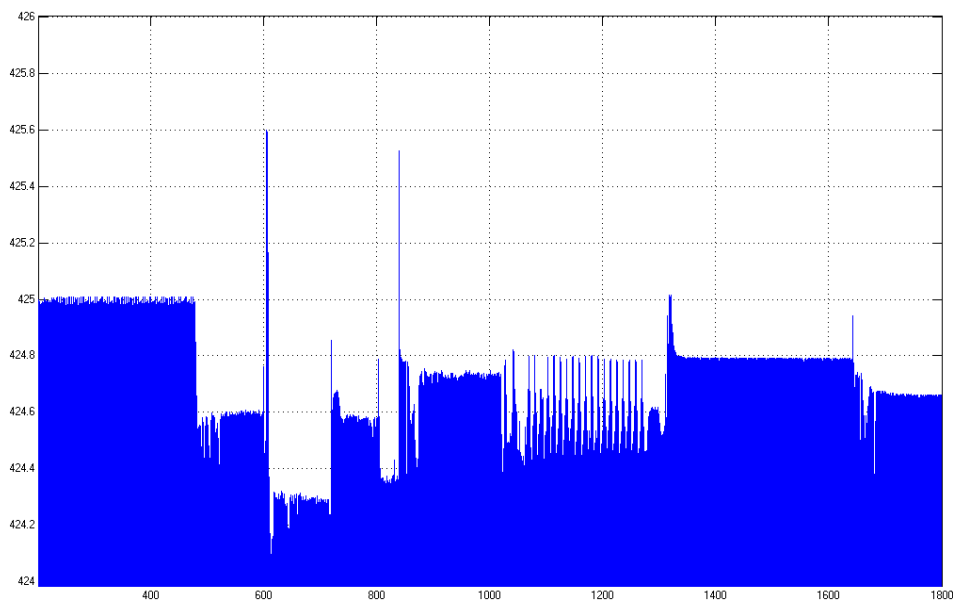
Regulatory mocy i napięcia spełniają podstawowe wymagania PRS co do jakości generowanego napięcia i prądu.

### 2.3 Wyniki symulacji

W symulacji użyta została metoda całkowania „ode23t” (metoda trapezoidalna). Całkowity czas symulacji wynosi 1800s, z wyłączeniem pierwszych 200s (pominięcie stanu przejściowego). Maksymalna wielkość kroku ustawiona została na 0,001s, minimalna natomiast na wartość auto. Prądnice poza odbiorami stałymi (np. pompy chłodzenia, oświetlenie siłowni i pokładu) obciążanie były odbiorami załączanymi zmiennie w czasie. Dla obu stanów pracy były to kolejno: sprężarka powietrza kontrolnego: 480s, 720s (czasy załączania i wyłączania urządzenia), sprężarka chłodni: 600s, 840s, sprężarka powietrza serwisowego: 605s, 804s, obciążenie typowe małego urządzenia warsztatowego: 1020s, 1800s, sprężarka powietrza rozruchowego: 1642s, 1800s. W stanie postoju w porcie dodano także obciążenie pompą systemu przechyłowego: 1350s, 1470s. Na załączonych poniższych wykresach przedstawiono wyniki symulacji dla podróży morskiej i postoju w porcie. Są to kolejno przebiegi częstotliwości sieci, napięcia międzyfazowego, prądu w jednej z faz, wyjścia regulatora mocy oraz napięcia, wykres mocy wyjściowej biernej oraz czynnej.

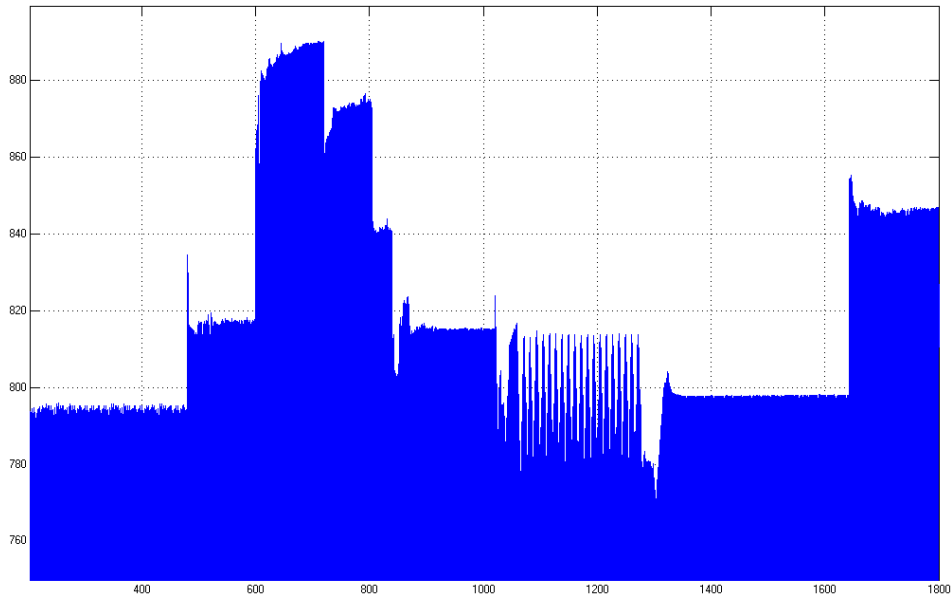


Wykres.1. Zmiany częstotliwości napięcia sieci podczas obciążania prądnicy [Hz]

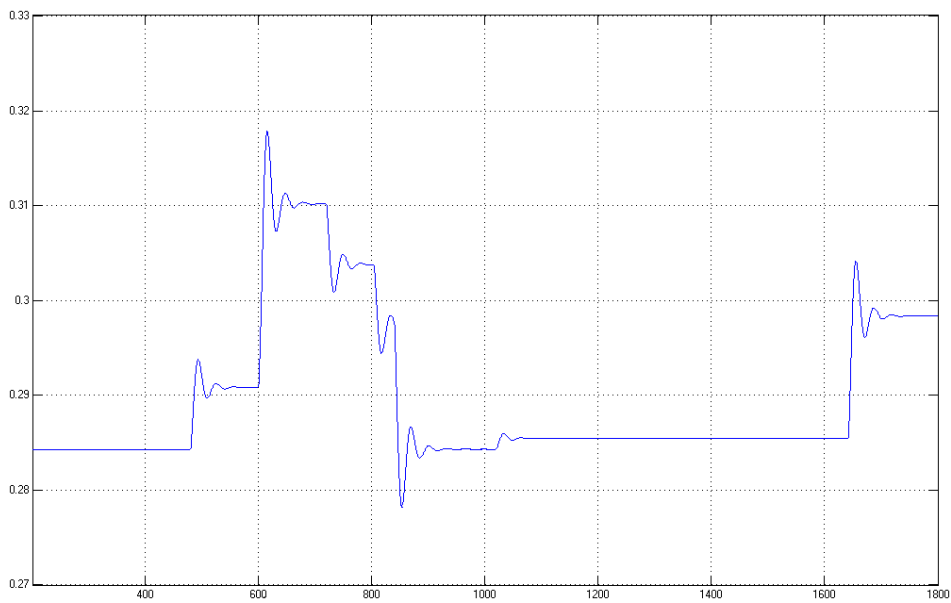


Wykres.2. Zmiany amplitudy napięcia sieci [V]

Zmiany częstotliwości uzależnione są od czasów załączania i odłączania dodatkowych odbiorów. Minimalna wartość częstotliwości wynosi 49,6 [Hz], maksymalna natomiast 50,05 [Hz]. Dla amplitudy napięcia wartości mieszczą się w granicach 426,6 do 424,1 [V].

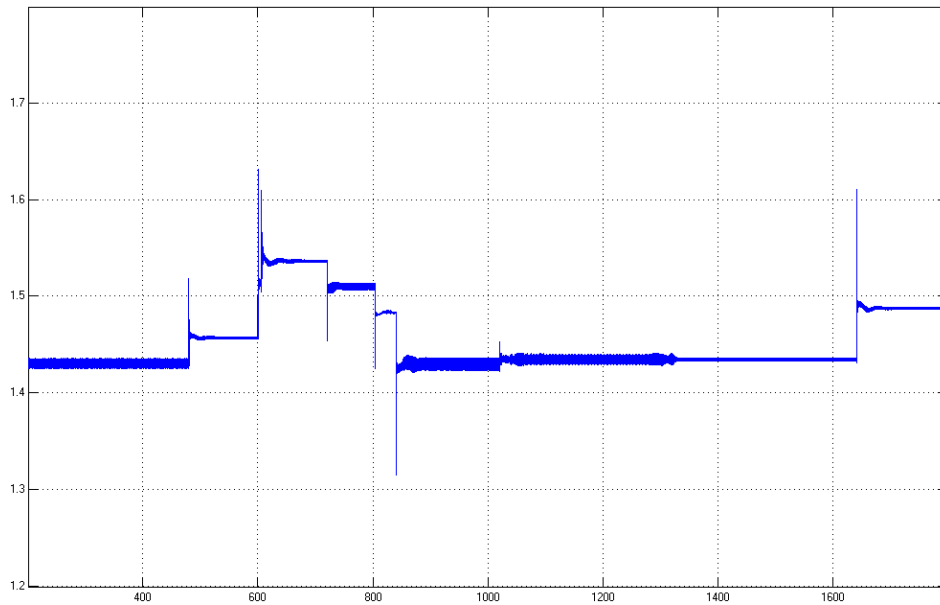


Wykres.3. Przebieg prądu w jednej z faz [A]

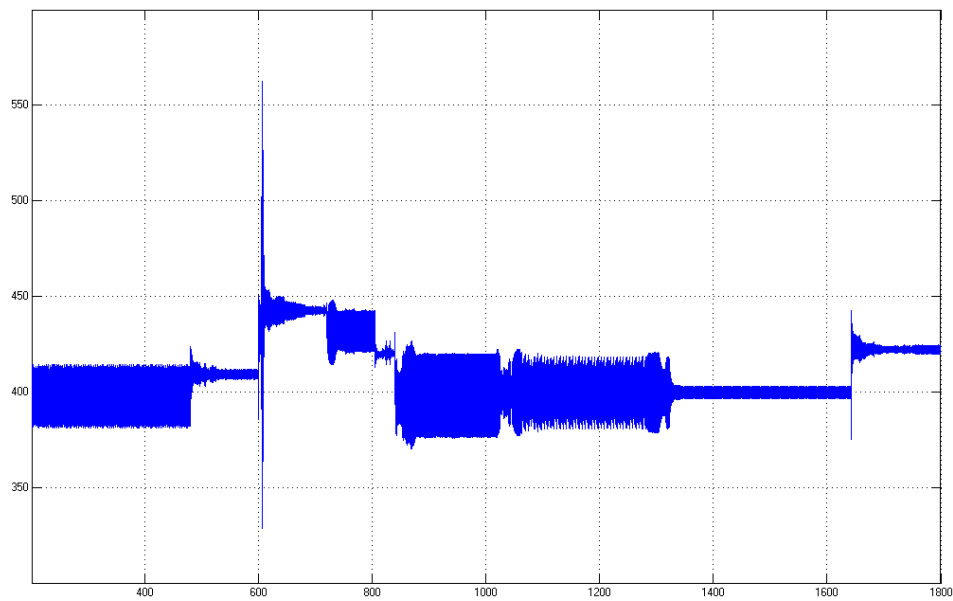


Wykres.4. Zmiany nastawy listwy paliwowej podczas obciążania prądnicy [pu]

Dla wykresu 3. minimum i maksimum wynosi 890 [A] i 770 [A]. Na wykresie 4. widoczna jest praca regulatora prędkości obrotowej. Wartości minimalne i maksymalne położenia listwy paliwowej wynoszą: 0,278 [pu] i 0,317 [pu].

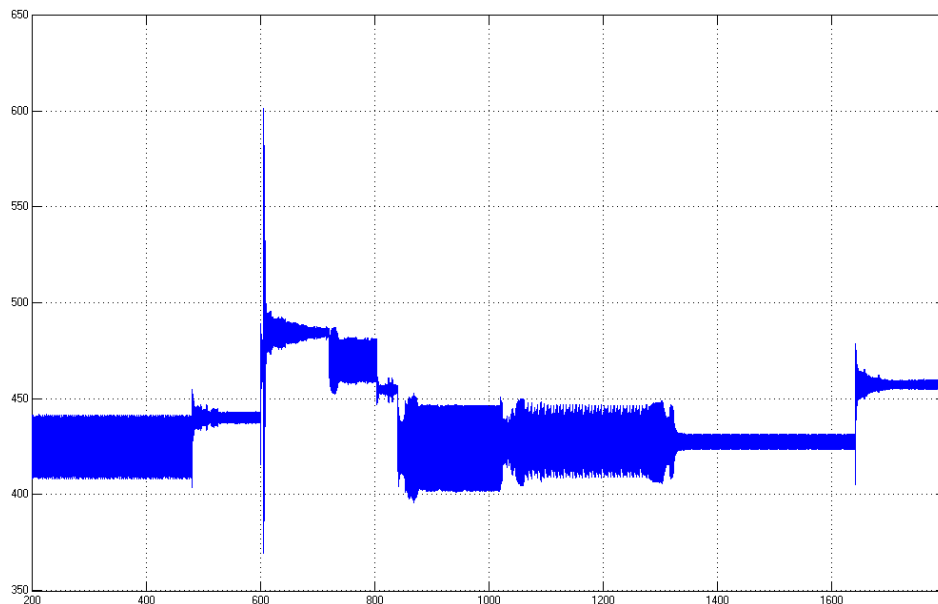


Wykres.5. Zmiany nastawy napięcia wzbudzenia prądnicy podczas jej obciążania [pu]

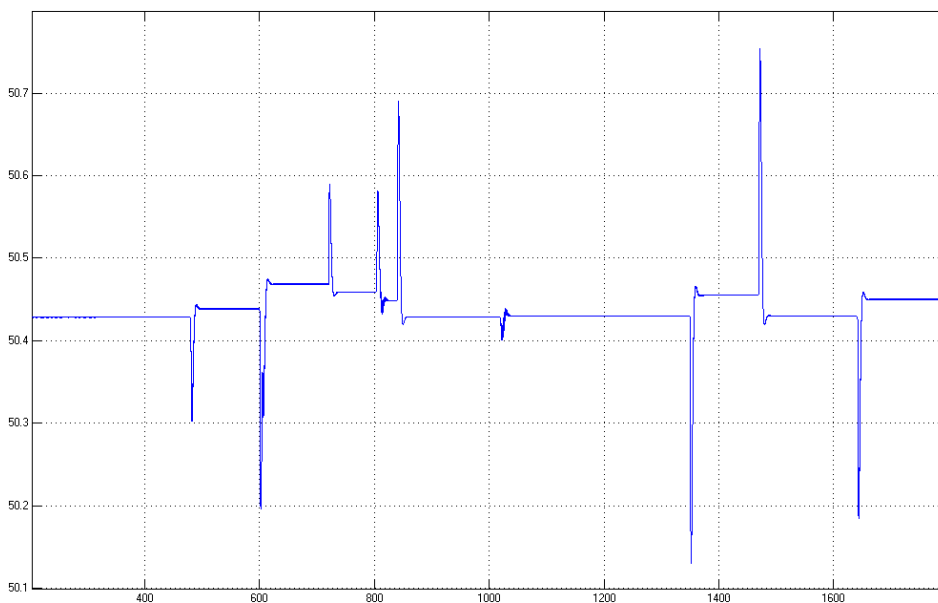


Wykres.6. Wykres mocy biernej wyjściowej [kVAr]

Kolejny wykres 5. przedstawia zmiany nastawy napięcia wzbudzenia (min, max): 1,32 [pu] oraz 1,63 [pu]. Wykres 6. natomiast wartości średnie mocy biernej wyjściowej która zmienia się w granicach od 395 do 443 [kVAr].



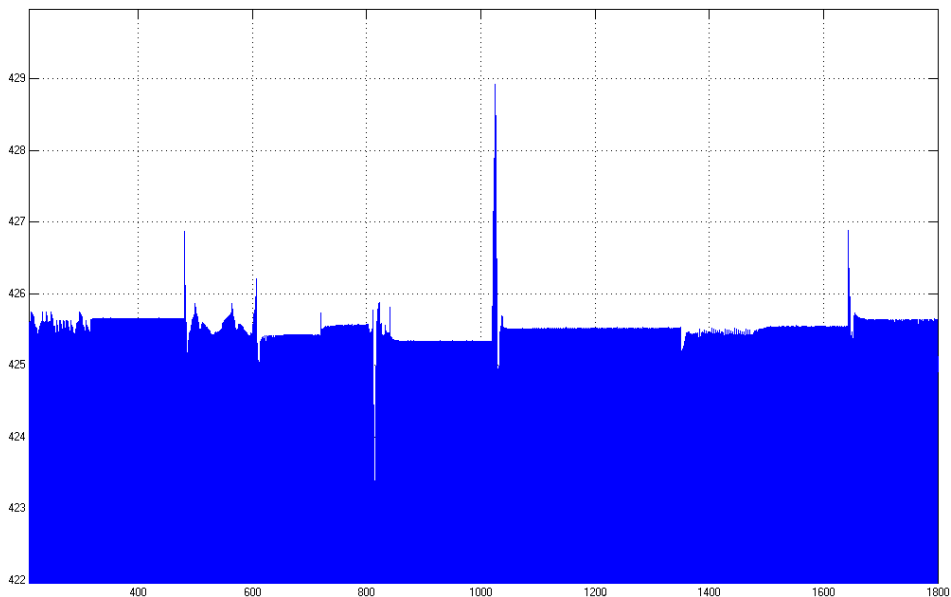
Wykres.7. Wykres mocy czynnej wyjściowej [kW]



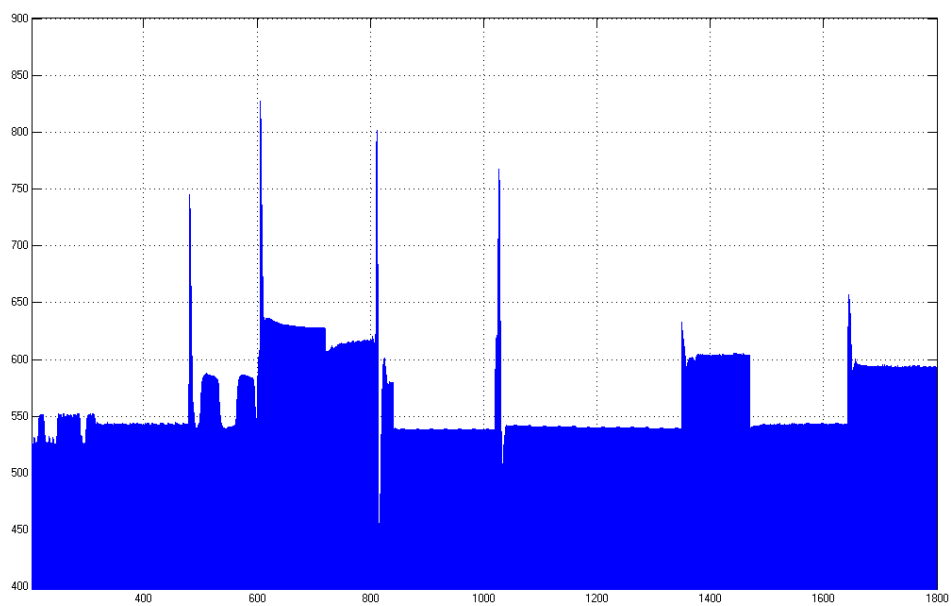
Wykres.8. Zmiany częstotliwości napięcia sieci podczas obciążania prądnicy [Hz]

Ostatnim wykresem dla pracy morskiej jest wykres mocy czynnej wyjściowej. Wartości minimalne i maksymalne uśrednione dla tego przypadku wynoszą 425 i 480 [kW]. Rzeczywiste obciążenia mocą czynną dla podróży morskiej wynosiły od 400 do 500 [kW]. Wykres 8. należy do pracy portowej (wart. min,max: : 50,13 i 50,76 [Hz]).



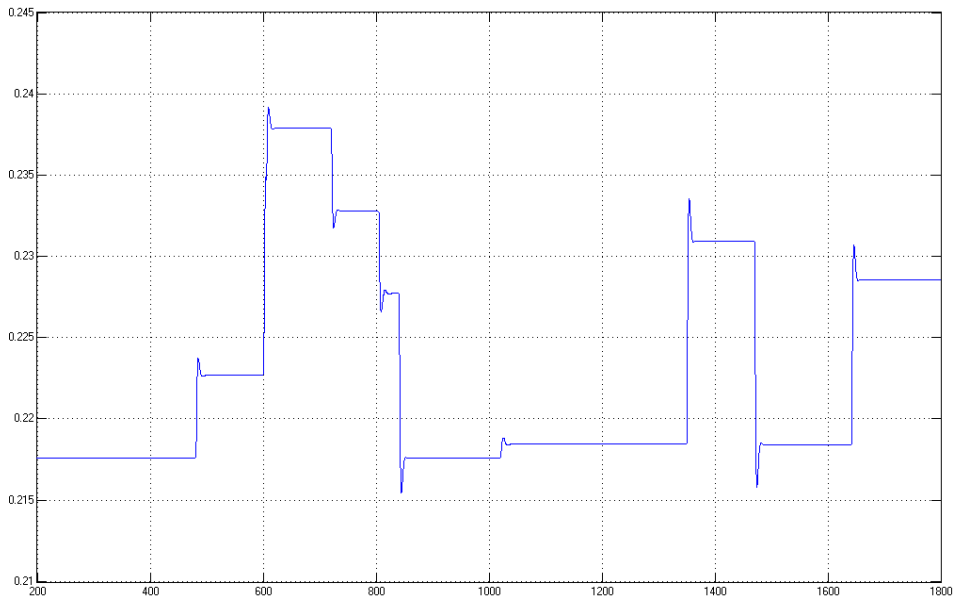


Wykres.9. Zmiany amplitudy napięcia sieci [V]

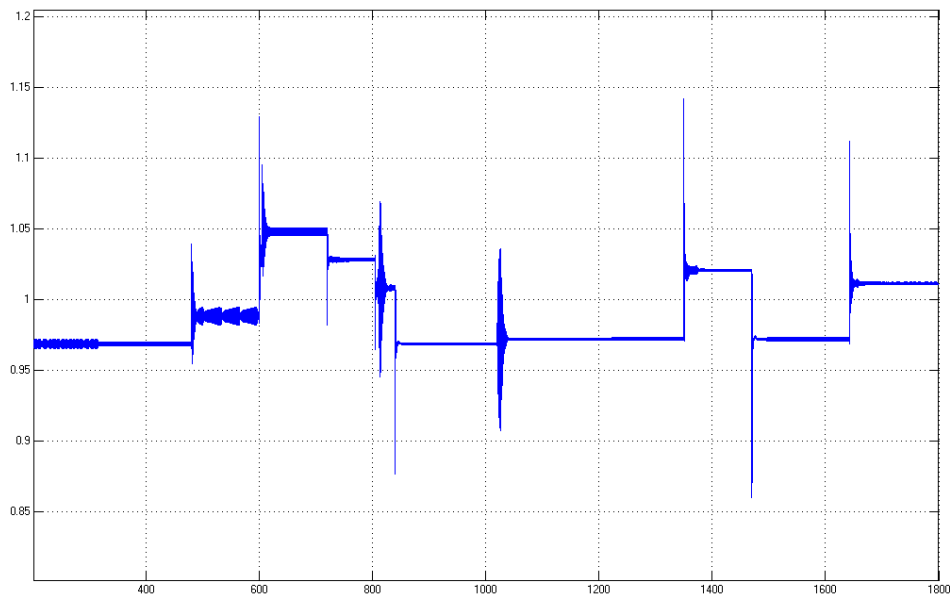


Wykres.10. Przebieg prądu w jednej z faz [A]

Na wykresach 9. oraz 10. wartości minimalne i maksymalne wynoszą: 423,3 [V] i 428,9 [V], 492 [A] i 833 [A].

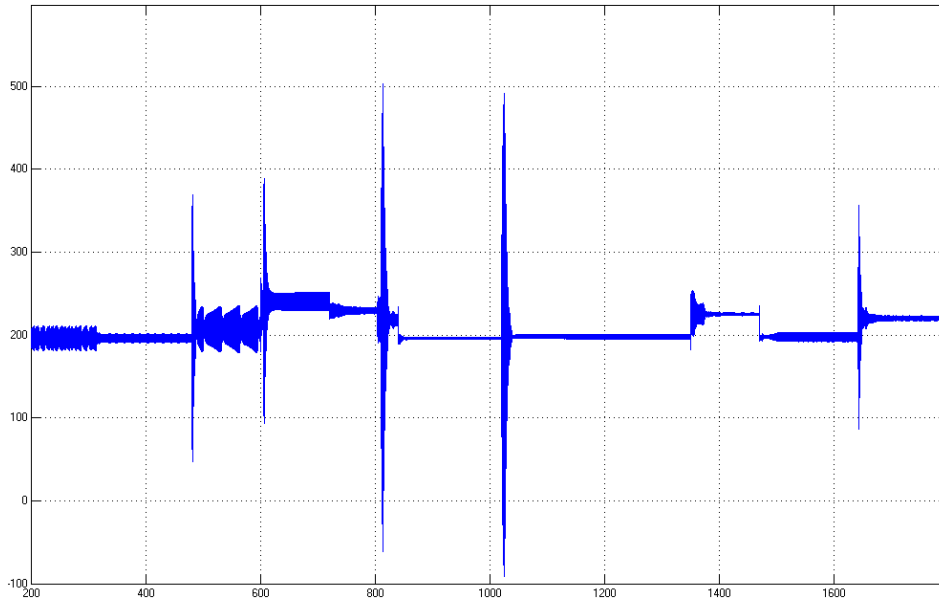


Wykres.11. Zmiany nastawy listwy paliwowej podczas obciążania prądnicy [pu]

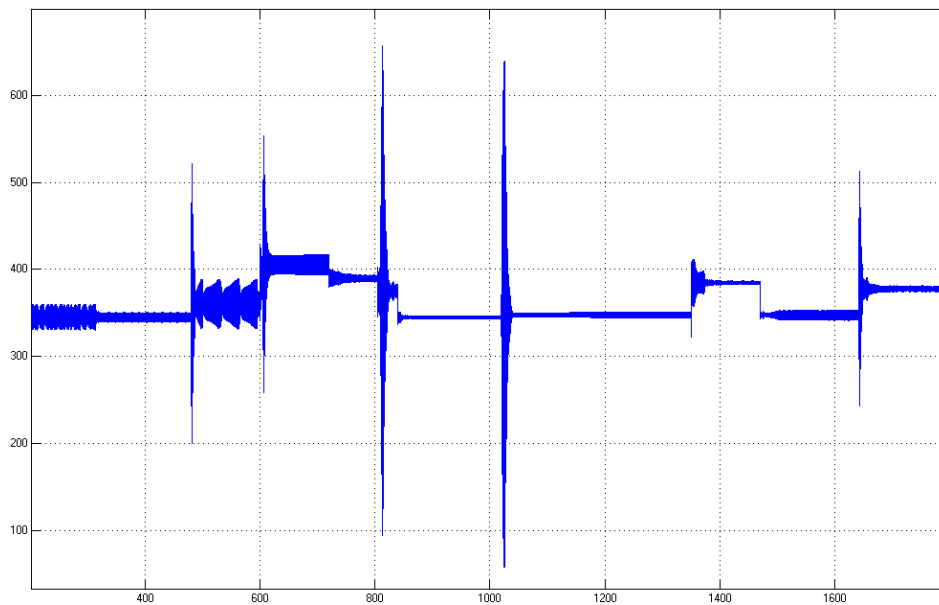


Wykres.12. Zmiany nastawy napięcia wzbudzenia prądnicy podczas jej obciążania [pu]

Zmiany nastawy regulator mocy i napięcia widoczne są na wykresach 11. oraz 12. Odchylenia mieszczą się w granicach: dla regulatora mocy: 0,217 [pu], 0,239 [pu] oraz dla regulatora napięcia: 0,87 [pu] i 1,14 [pu].



Wykres.13. Wykres mocy biernej wyjściowej [kVAr]



Wykres.14. Wykres mocy czynnej wyjściowej [kW]

Ostatnie wykres przedstawiają zależności mocy biernej oraz czynnej od czasu. Ukazują one zmiany mocy średniej biernej w granicach 201 [kVAr] do 239 [kVAr] oraz mocy średniej czynnej w granicach 343 [kW] do 408 [kW]. Rzeczywiste

obciążenia prądnicy okrętowej mocą czynną dla postoju w porcie mieściły się w zakresie mocy od 300 [kW] do 450 [kW].

### 3 PODSUMOWANIE

Ze względu na zastosowane w programie Matlab-Simulink obiekty układ równań opisujący zbudowany system jest bardzo nieliniowy. Rezultatem modelowania są wyniki zgodne z pomiarami przeprowadzonymi na obiekcie badań. Dlatego też omawiany model daje możliwości symulacji rozbudowanych sieci energetycznych spotykanych na statkach różnego typu, po odpowiednich zmianach parametrów poszczególnych odbiorów.

### 4 LITERATURA

1. Kuropatwiński S., Lipski T., Roszczyk S., Wierzejewski M.: *Energoelektryczne układy okrętowe*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1972 str. 107 - 109.

Inne publikacje:

2. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
3. Dokumentacja techniczno-ruchowa prądnic synchronicznych typu: 1FJ 4566, 1FJ 4636, Gdańsk 1995.

## LOAD ANALYSIS OF SYNCHRONOUS GENERATORS ON THE PASSENGER FERRY

*Article describes work of ship's generators on the RO-RO PAX vessel (passenger ferry). Simplified energetic system, which can be encountered on the sailing vessels, was designed with basic receivers, using the Matlab-Simulink program. Power of examined power plant (without emergency diesel generator) is 5280 kVA. During the simulations there is possibility to observe and analyse steady and unsteady states, that are results of changing synchronous generator load. Designed model gives opportunity to simulate expanded ship's energetic systems and results of simulations are in accordance with real value of generator loads.*