

Marek WRÓŃSKI, Krzysztof GŁUCH

STANOWISKO LABORATORYJNE DO BADANIA WOLNOOBROTOWEGO GENERATORA NAPIĘCIA SINUSOIDALNEGO MAŁEJ MOCY

Streszczenie

W artykule omówiono budowę, procedurę badawczą, oraz przedstawiono wnioski z badań przeprowadzonych z wykorzystaniem stanowiska laboratoryjnego do badania wolnoobrotowego generatora neodymowego napięcia trójfazowego pod kątem sprawności zamiany energii mechanicznej w elektryczną

WSTĘP

Zastosowanie osiągnięć inżynierii materiałowej pozwala na budowanie maszyn elektrycznych, które charakteryzują się dużą sprawnością i niezawodnością działania.

Opracowanie magnesów neodymowych charakteryzujących się bardzo silnym polem magnetycznym pozwoliło na budowę maszyn o lepszych parametrach niż w przypadku konstrukcji klasycznych. Przykładem zastosowania tej technologii jest wolnoobrotowy generator napięcia trójfazowego, który można wykorzystać, jako alternatywne źródło energii w małych gospodarstwach domowych. Prostota budowy jak i praktyczna bezobsługowość sprawia, iż znajdują coraz szersze zastosowanie.

1. OPIS STANOWISKA

Uproszczony schemat stanowiska przedstawia rys. 1. W skład stanowiska laboratoryjnego – badawczego wchodzi:

- zasilacz AC/DC,
- silnik tarczowy prądu stałego z magnesami trwałymi PTT20,
- momentomierz,
- generator napięcia trójfazowego,
- prostownik trójfazowy,
- obciążenie.

Całość stanowiska badawczego umieszczona jest na stalowej ramie konstrukcyjnej, do której umocowany jest badany generator neodymowy.

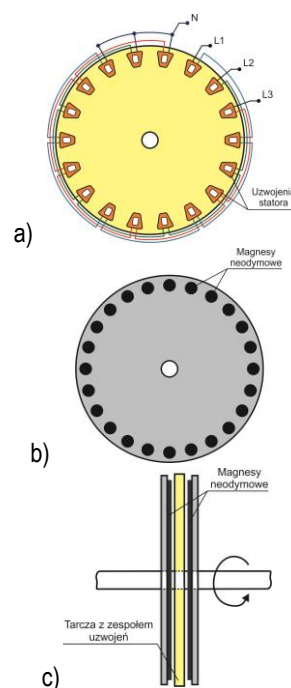
Silnik napędzający z magnesami trwałymi jest silnikiem prądu stałego zasilanym z zasilacza umożliwiającego regulację napięcia, a przez to zmianę prędkości obrotowej generatora. Silnik napędowy sprzęgnięty jest z badanym generatorem poprzez momentomierz i zestaw sprzęgieł.

Zastosowanie momentomierza w układzie pomiarowym umożliwiło dokładny pomiar prędkości obrotowej wału rotora oraz rzeczywistej mocy mechanicznej dostarczanej do generatora neodymowego.

1.1. Opis badanego generatora

Generator napięcia trójfazowego stanowi uzwojony stator w układzie symetrycznej gwiazdy (rys. 2a). Uzwojenia umieszczone

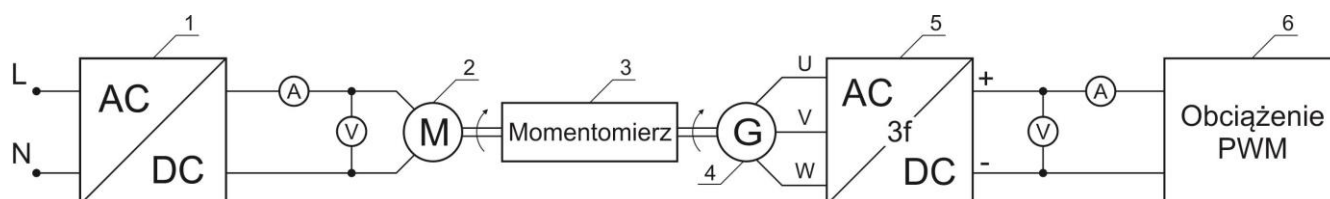
są na płaskiej tarczy z materiału niemagnetycznego a całość zalana jest żywicą epoksydową gwarantującą pewność i sztywność całej konstrukcji. Rotor stanowią dwie tarcze stalowe z umieszczonymi na nich magnesami neodymowymi po obu stronach statora (rys. 2b). Bieguny magnesów ułożone są naprzemiennie. Tarcze rotora osadzone są na ułożyskowanym wale w taki sposób, by istniała możliwość regulacji szczeliny powietrznej pomiędzy nimi a zespołem uzwojeń (rys. 2c).



Rys. 2. Budowa generatora napięcia trójfazowego: a) uzwojony stator, b) rotor z magnesami neodymowymi, c) rozmieszczenie tarcz

1.2. Obciążenie generatora

Do obciążania generatora podczas badań zastosowano regulowane obciążenie rezystancyjne z układem kluczowania PWM w obwodzie głównym. Umożliwia ono pełny zakres zadawanego prądowego obciążenia w sposób płynny przy zastosowaniu tylko jednej wartości rezystancji obciążenia dobranej, jako maksymalna w



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego: 1 – zasilacz regulowany, 2 – silnik napędzający DC, 3 – momentomierz, 4 – generator wolnoobrotowy, 5 – prostownik trójfazowy, 6 – regulowane obciążenie PWM

przeprowadzanych badaniach.

Zmieniając współczynnik wypełnienia impulsów kluczujących PWM w zakresie od 0 do 100% uzyskujemy regulację prądu obciążającego generator neodymowy w takim samym zakresie. Celem eliminacji zakłóceń powstających podczas kluczenia zastosowano filtr LC.

Zastosowanie obciążenia DC uprościło procedurę pomiaru mocy uzyskiwanej z generatora i jednocześnie wymusiło zastosowanie na jego wyjściu układu prostowania sześciopulsowego, gdyż wyjściowe napięcie generatora to przebieg trójfazowy, którego opomiarowanie było by bardziej rozbudowane.

2. WYNIKI I ANALIZA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

2.1. Opomiarowanie stanowiska

Odczyt uzyskiwanej mocy z generatora realizowany jest mierzniakami DC o klasie dokładności 0,5. Sprowadzenie napięcia trójfazowego do wartości DC uzyskano poprzez sześciopulsowe prostowanie w układzie klasycznym. Zastosowanie prostownika wprowadza minimalny błąd w odczycie rzeczywistej mocy uzyskiwanej z generatora, jednak jest to błąd na tyle mały, iż można go pominąć. Wartość momentu napędowego i prędkości obrotowej odczytywana jest ze wskazań modułu cyfrowego momentomierza i po ich przeliczeniu otrzymujemy rzeczywistą moc mechaniczną dostarczaną do badanego generatora.

2.2. Wyniki przeprowadzonych badań

Przeprowadzono badania charakterystyk obciążeniowych generatora neodymowego dla trzech różnych prędkości obrotowych i obciążeniu regulowanym od zera do wartości maksymalnej uwarunkowanej wytrzymałością prądową uzwojeń.

Zaobserwowano, iż napięcie wyjściowe uzyskiwane z generatora zmienia się w niewielkim zakresie w funkcji prądu obciążenia, co świadczy o właściwym doborze uzwojeń statora i uzyskaniu jego małej rezystancji wewnętrznej, co jest cechą pozytywną w przypadku źródeł zasilających.

Porównanie mocy uzyskanej z mocą dostarczoną do napędu pozwoliło na określenie sprawności przetwarzania generatora. Zawiera się ona na poziomie powyżej 90%, co stanowi bardzo dobry wynik. Nieco niższą sprawność uzyskano przy prędkości 500 obr./min., ale wynik na poziomie 85% można uznać za w pełni zadowalający. Zmniejszenie sprawności może wiązać się z uzyskiwanym niższym napięciem z generatora neodymowego, a co za tym idzie większym udziałem strat.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiają poniższe tabele.

Tab. 1. Wyniki pomiarów dla prędkości 500 obr./min.

| Lp. | M | P _M | I _{wyj.} | U _{wyj.} | P _{wyj.} | η |
|-----|------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| | [Nm] | [W] | [A] | [V] | [W] | [%] |
| 1 | 0,16 | 8,37 | 0,00 | 29,50 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0,22 | 3,14 | 0,10 | 28,00 | 2,80 | 89,23 |
| 3 | 0,29 | 6,80 | 0,22 | 27,90 | 6,14 | 90,28 |
| 4 | 0,35 | 9,94 | 0,34 | 27,50 | 9,35 | 94,09 |
| 5 | 0,43 | 14,12 | 0,46 | 27,30 | 12,56 | 88,93 |
| 6 | 0,49 | 17,26 | 0,56 | 27,00 | 15,12 | 87,61 |
| 7 | 0,58 | 21,97 | 0,73 | 26,90 | 19,64 | 89,40 |
| 8 | 0,66 | 26,15 | 0,86 | 26,50 | 22,79 | 87,15 |
| 9 | 0,72 | 29,29 | 0,96 | 26,40 | 25,34 | 86,53 |
| 10 | 0,87 | 37,13 | 1,24 | 26,20 | 32,49 | 87,49 |
| 11 | 0,93 | 40,27 | 1,34 | 26,00 | 34,84 | 86,51 |
| 12 | 0,98 | 42,89 | 1,44 | 25,80 | 37,15 | 86,63 |
| 13 | 1,03 | 45,50 | 1,56 | 25,80 | 40,25 | 88,46 |
| 14 | 1,16 | 52,30 | 1,77 | 25,60 | 45,31 | 86,64 |
| 15 | 1,34 | 61,71 | 2,08 | 25,20 | 52,42 | 84,93 |

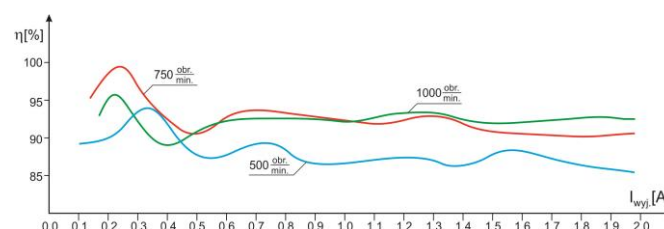
Tab. 2. Wyniki pomiarów dla prędkości 750 obr./min.

| Lp. | M | P _M | I _{wyj.} | U _{wyj.} | P _{wyj.} | η |
|-----|------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| | [Nm] | [W] | [A] | [V] | [W] | [%] |
| 1 | 0,22 | 17,3 | 0,00 | 43,80 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0,30 | 6,3 | 0,14 | 42,80 | 5,99 | 95,41 |
| 3 | 0,35 | 10,2 | 0,24 | 42,40 | 10,18 | 99,72 |
| 4 | 0,41 | 14,9 | 0,34 | 41,60 | 14,14 | 94,83 |
| 5 | 0,50 | 22,0 | 0,48 | 41,50 | 19,92 | 90,63 |
| 6 | 0,57 | 27,5 | 0,62 | 41,30 | 25,61 | 93,20 |
| 7 | 0,64 | 33,0 | 0,75 | 41,10 | 30,83 | 93,49 |
| 8 | 0,75 | 41,6 | 0,94 | 41,00 | 38,54 | 92,63 |
| 9 | 0,85 | 49,5 | 1,12 | 40,60 | 45,47 | 91,95 |
| 10 | 0,94 | 56,5 | 1,30 | 40,40 | 52,52 | 92,92 |
| 11 | 1,04 | 64,4 | 1,46 | 40,10 | 58,55 | 90,95 |
| 12 | 1,12 | 70,7 | 1,60 | 40,00 | 64,00 | 90,59 |
| 13 | 1,23 | 79,3 | 1,80 | 39,70 | 71,46 | 90,13 |
| 14 | 1,31 | 85,6 | 1,96 | 39,50 | 77,42 | 90,48 |
| 15 | 1,36 | 89,5 | 2,06 | 39,40 | 81,16 | 90,70 |

Tab. 3. Wyniki pomiarów dla prędkości 1000 obr./min.

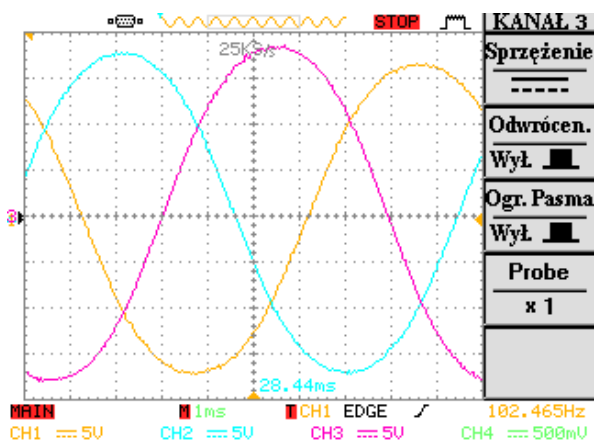
| Lp. | M | P _M | I _{wyj.} | U _{wyj.} | P _{wyj.} | η |
|-----|------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| | [Nm] | [W] | [A] | [V] | [W] | [%] |
| 1 | 0,27 | 28,3 | 0,00 | 58,90 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0,37 | 10,5 | 0,17 | 57,40 | 9,76 | 93,20 |
| 3 | 0,40 | 13,6 | 0,23 | 56,65 | 13,03 | 95,73 |
| 4 | 0,50 | 24,1 | 0,38 | 56,50 | 21,47 | 89,16 |
| 5 | 0,60 | 34,6 | 0,57 | 55,80 | 31,81 | 92,06 |
| 6 | 0,71 | 46,1 | 0,77 | 55,40 | 42,66 | 92,60 |
| 7 | 0,78 | 53,4 | 0,90 | 55,00 | 49,50 | 92,70 |
| 8 | 0,85 | 60,7 | 1,02 | 54,90 | 56,00 | 92,21 |
| 9 | 0,91 | 67,0 | 1,14 | 54,70 | 62,36 | 93,06 |
| 10 | 0,99 | 75,4 | 1,29 | 54,60 | 70,43 | 93,43 |
| 11 | 1,08 | 84,8 | 1,44 | 54,30 | 78,19 | 92,20 |
| 12 | 1,18 | 95,3 | 1,63 | 53,80 | 87,69 | 92,04 |
| 13 | 1,27 | 104,7 | 1,81 | 53,70 | 97,20 | 92,83 |
| 14 | 1,34 | 112,0 | 1,94 | 53,40 | 103,60 | 92,47 |
| 15 | 1,40 | 118,3 | 2,06 | 53,10 | 109,39 | 92,46 |

Charakterystyki sprawności generatora wolnoobrotowego dla różnych prędkości obrotowych zostały przedstawione na rys 3.

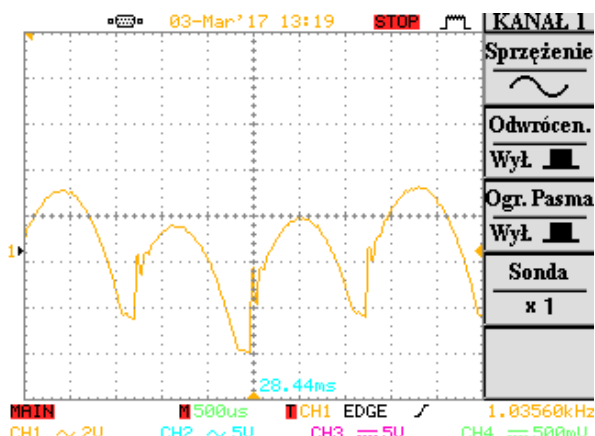


Rys. 3. Charakterystyki sprawności generatora wolnoobrotowego dla różnych prędkości obrotowych

Oscylogram na rys. 4 przedstawia przykładowy przebieg napięcia trójfazowego uzyskiwanego z uzwojeń generatora, natomiast rys. 5 pokazuje składową zmienną napięcia DC występującą po mostku prostowniczym.



Rys. 4. Przykładowy przebieg napięcia wyjściowego uzyskiwanego z generatora



Rys. 5. Zawartość składowej zmiennej po prostowaniu sześciopulsowym napięcia wyjściowego generatora

Energię elektryczną uzyskiwaną z wyżej opisanego generatora neodymowego można wykorzystać w różnorodny sposób. Uzyskanie napięcia DC umożliwia zastosowanie układu do współpracy z przetwornicami DC/DC celem uzyskania stabilnych parametrów napięciowych energii do zasilania urządzeń.

Dla poprawy tej stabilności celem wydawałoby się zastosowanie baterii akumulatorów gromadzących uzyskiwaną energię, gdyż w warunkach rzeczywistych przy zastosowaniu napędu turbiną wiatrową nie jest możliwe uzyskanie stałych w czasie parametrów roboczych generatora. Stosunkowo mała moc generatora może posłużyć, jako źródło zasilania alternatywnego np. do zasilania oświetlenia LED pracującego z napięciem 12V.

3. PRZETWARZANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ UZYSKANEJ Z GENERATORA WOLNOOBROTOWEGO

W codziennym życiu nie da się niemalże obyć bez zasilaczy, ponieważ żyjemy w świecie, który ogarnęła elektronika i nie da się tego uniknąć.

Do przetwarzania energii uzyskiwanej w sposób alternatywny najbardziej wskazanym było by zastosowanie zasilaczy impulsowych. Są one przystosowane do sprzętów powszechnego użytku. To właśnie je wybiera się do urządzeń, które znajdują się teraz we wszystkich gospodarstwach domowych. Dużą ich zaletą jest to, że są małe, lekkie, i cechuje je duża sprawność przetwarzania. Koszty budowy nie są wysokie, dlatego też zasilacze tego rodzaju uznawane są za jedne z tańszych. Chcąc jednak mieć gwarancję stałego napięcia, warto wybrać zasilacze buforowane zestawem akumulato-

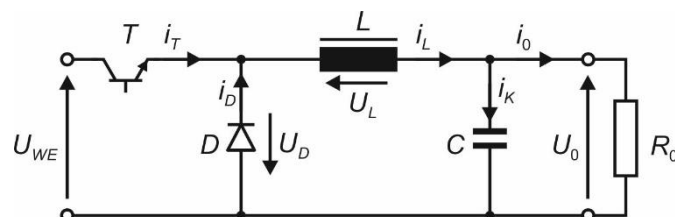
arów, są one przeznaczone właśnie do sprzętów, które wymagają stałego napięcia, a także zasilacza, który jest odporny na zwarcia i spadki napięcia.

Wyróżnia się następujące grupy zasilaczy impulsowych:

- FlyBack (dwutaktowy z gromadzeniem energii w rdzeniu), gdzie klucz tranzystorowy poprzez uzwojenie pierwotne ładuje rdzeń transformatora posiadającego szczelinę powietrzną. Kiedy tranzystor zostaje wyłączony rdzeń oddaje energię poprzez indukcyjność na uzwojenie wtórne. Częstotliwość ładowania jest stała, ale jego czas jest kontrolowany przez układ elektroniczny i jest zależny od obciążenia po stronie wtórnej. Topologia FlyBack wykorzystywana jest głównie w zasilaczach małej mocy np. w ładowarkach do telefonów komórkowych.
- Half bridge i Full bridge to układy pod względem konstrukcyjnym podobne do transformatora sieciowego, do działania potrzebują napięcia przemiennego na uzwojeniu pierwotnym, jednak przebieg napięcia nie jest sinusoidalny lecz prostokątny, generowany przez 2 (half-bridge) lub 4 (full-bridge) tranzystory, zmniejsza to także straty i upraszcza układ. Parametry przebiegu są regulowane przez układ scalony sterownika w celu utrzymania stałego napięcia po stronie wtórnej niezależnie od obciążenia.

Każde urządzenie elektroniczne podczas swojej pracy traci pewną moc, która przekształca się w ciepło. Jest to energia nieużyteczna generująca straty związane z przetwarzaniem energii. Zasilacze impulsowe cechują się dosyć wysoką sprawnością dochodzącą do 94% w zależności od mocy i konstrukcji.

Przy konwersji energii uzyskiwanej z generatora neodymowego celem staje się zastosowanie zasilacza obniżającego napięcie o szerokim spektrum napięcia wejściowego (rysunek 6).



Rys. 6. Schemat zasilacza obniżającego napięcie

Podstawowym podzespołem zasilaczy impulsowych są układy przekazywania energii. Składają się one z elementów kluczujących, umożliwiających przepływ energii między wejściem a wyjściem zasilacza.

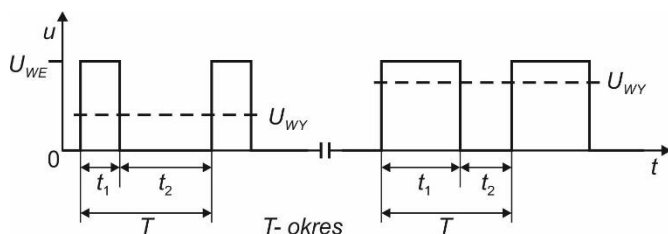
Do tego celu najlepiej nadają się tranzystory MOSFET, dzięki niskiemu napięciu nasycenia, co minimalizuje straty energii i łatwość sterowania.

Klucz tranzystorowy doprowadza energię do filtra indukcyjno-pojemnościowego, którego zadaniem jest wygładzenie napięcia wyjściowego, związanego z impulsowym charakterem pracy.

Indukcyjność magazynuje energię w jednym cyklu pracy (t_1), by w drugim (t_2) oddać ją do wyjścia.

Dioda zwrotna zapewnia przepływ energii tylko w jednym kierunku.

W czasie stanu załączenia klucza prąd płynie przez dławik i obciążenie, ładując jednocześnie kondensator. W stanie wyłączenia klucza prąd nie zmienia się skokowo, lecz płynie przez obciążenie i diodę zwrotną. W tym czasie energia do obciążenia jest przekazywana z kondensatora (rysunek 7).



Rys. 7. Kształtowanie napięcia wyjściowego poprzez modulację szerokości impulsu ($T = \text{const.}$)

Sterowanie klucza impulsami o zmiennej szerokości umożliwia regulację ilości przenoszonej energii, a tym samym regulację napięcia uzyskiwanego na wyjściu zasilacza.

$$U_{wy} = \frac{t_1}{T} U_{we} = \gamma U_{we} \quad (1)$$

gdzie:

$$\gamma = \frac{t_1}{T} - \text{współczynnik wypełnienia.}$$

Zastosowanie w układzie przetwarzania zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego zapewnia poprzez zmianę współczynnika γ stałość napięcia wyjściowego przy zmieniającym się napięciu wejściowym.

PODSUMOWANIE

Wykonane stanowisko do badania wolnoobrotowego generatora neodymowego pozwala na zapoznanie się studentów z budową, zasadą działania i wykorzystaniem alternatywnych źródeł energii mogących znaleźć zastosowanie w zasilaniu urządzeń elektrycznych małej mocy. Przejrzystość budowy stanowiska oraz możliwość przeprowadzania badań ubogaca proces dydaktyczny i ogólnopoznajaczy w dziedzinie odnawialnych źródeł energii z możliwością jej magazynowania i przekształcania.

Przeprowadzone badania pokazują przydatność i zalety prądnic z magnesami neodymowymi do budowy małych elektrowni wiatrowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Rossa R., Białas A., *Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi do przydomowych elektrowni wiatrowych*, XX Konfe-

rencia „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”. Rytyo 25–27 maja, 2011.

2. Goryca Z., *Wolnoobrotowy generator tarczowy do małej elektrowni wiatrowej*, XVI Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”. Rytyo, 28–30 maja, 2008.
3. Glinka T., *Autonomiczne elektrownie wiatrowe*, Materiały konferencyjne II Ogólnopolskiej Konferencji ETW 2004, Wyd. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2004.
4. Bernatt J., *Wykorzystanie prądnic synchronicznych do budowy małych elektrowni wiatrowych*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne. Nr 68/2004, Wyd. BOBRME Komel, Katowice 2004.
5. Lewandowski W.M., *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, Warszawa, WNT, 2002.
6. Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
7. Schoepp K., Zieliński P., *Wolnoobrotowy dwustopniowy generator synchroniczny z magneśnicą swobodną*, XXXVIII International Symposium on Electrical Machines, SME 2002, Cedzonia Kielce.

LABORATORY POSITION FOR FREE VOLUME SINUSOIDAL VOLTAGE POWER GENERATOR

Abstract

This article discusses the construction, testing procedure, and conclusions of a study conducted using a low-speed neodymium low voltage generator for the conversion of mechanical energy into electrical energy

Autorzy:

mgr inż. **Marek Wroński** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki
mgr inż. **Krzysztof Głuch** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki