

GENERATORY SYNCHRONICZNE DLA AUTONOMICZNYCH BEZPRZEKŁADNIOWYCH ELEKTROWNI WIATROWYCH

SYNCHRONOUS GENERATORS FOR INDEPENDENT DIRECT-DRIVE WIND POWER PLANTS

Abstract: For the correct definition of capital expenses and working costs, for the development of an autonomous wind power plant, it is necessary to take into account the features of the consumers of electric energy, modes of their work, time power diagrams of winds for the given district, and also, a whole series of other factors. The construction circuit of such electric station is considered. It is recommended to use the gearless stations that are equipped with low-speed synchronous generators with excitation from permanent magnets for the purpose of maximal use of energy small winds.

The front design of the synchronous generator is well coordinated with various kinds of wind wheel. The offered bloc-modular design of the electric machine provides an opportunity of manufacturing of generators with the capacity from 1 up to 10-15 kW from the unified elements and standard blocks.

The description of a design of the generator and its elements is given in this article.

Generators have good technical and economic parameters, high reliability, and practically do not demand service.

Wind power plants with offered generators can be used for various types of equipment such as drives of water pumps, air conditionings, heating of water, heating, and other economic needs. Generators can find applications in small hydro-power engineering.

1. Wstęp

Jednym z łatwo dostępnych źródeł energii, które ma praktycznie nieograniczone zasoby energetyczne, jest wiatr. Istniejące opracowania techniczne zapewniają łatwe przekształcenie energii strumienia powietrza w inne rodzaje energii, w szczególności, w energię elektryczną.

Nowoczesne elektrownie wiatrowe (EW) ze względu na sposób ich wykorzystania można rozdzielić na systemowe i autonomiczne:

- systemowe EW wykorzystują się w systemach elektrycznych dużej mocy, które przeznaczone są do produkcji energii elektrycznej na skalę przemysłową;
- autonomiczne EW przeznaczone są dla zasilania energią elektryczną jednego lub kilku odbiorców małej mocy.

Systemowe EW mogą składać się z jednej lub kilku instalacji wiatrowych (IW), ze wspólnym układem sterowania. Połączone są one z centralnym systemem energetycznym, w skład którego wchodzi EW lub inne rodzaje źródeł energii elektrycznej: elektrownie cieplne, atomowe lub wodne. Przeważnie, moc IW systemowych EW – jest wyższa od 100 kVA.

Autonomiczne EW wykorzystuje się dla zasilania urządzeń różnego rodzaju, napędów pomp wodnych, ogrzewania pomieszczeń, podgrzewania wody, klimatyzacji i innych potrzeb gospodarczych przy braku centralnego zasilania z systemu elektroenergetycznego. W autonomicznej energetyce wiatrowej wykorzystuje się EW o mocy od 30 W do 20-60 kW.

Autonomiczne EW o mocy od 30 W do 5 kW do zasilania aparatury łączności szeroko stosowane są w Australii, Japonii, USA, Kanadzie i Brazylii [1]. We Francji EW wykorzystuje się jako źródła energii latarni morskich i pław świetlnych, jak również do zasilania sygnalizacji kolejowej. EW małej mocy z sukcesem stosowane są dla zabezpieczenia katodowego przed korozją rurociągów.

Zainteresowanie energetyką wiatrową jest warunkowane nie tylko próbą rozwiązania problemów zaopatrzenia energetycznego i zwiększenia efektywności ekonomicznej produkcji, lecz również pilną potrzebą zmniejszenia negatywnego wpływu obiektów elektroenergetyki na środowisko naturalne.

2. Struktura autonomicznej elektrowni wiatrowej

Zasadniczymi czynnikami, które wyznaczają strukturę autonomicznej EW oraz wymagania techniczne jej elementów, są przeznaczenie i tryb pracy odbiorników, pobierających energię od danej siłowni. Oprócz tego, powinny być wyraźnie określone parametry techniczne tych odbiorów oraz wymagania co do stałości ich podtrzymywania; zasoby energii wiatru w miejscowości, gdzie instaluje się EW; ich rozkład przestrzenno-czasowy.

Optymalizacja struktury autonomicznej EW oraz wymogów technicznych elementów EW zapewnia minimalizację kosztów jej wytwarzania i eksploatacji.

Podstawowa różnica pomiędzy nowoczesnymi EW polega w rodzaju stosowanej prądnicy [2]. W elektrowniach wielkiej mocy energetyki systemowej, na ogół, wykorzystują się prądnice indukcyjne. Podstawową wadą tych elektrowni jest konieczność stosowania przekładni, komplikującej układ mechaniczny stabilizacji prędkości obrotowej oraz uniemożliwiającej pracę przy słabych podmuchach wiatru. Oprócz tego, autonomiczne EW o prądnicach indukcyjnych muszą mieć baterie kondensatorów wielkiej mocy niezbędne dla ich wzbudzenia. Biorąc pod uwagę powyżej wymienione, EW z takimi prądnicami nie wykorzystuje się w energetyce autonomicznej.

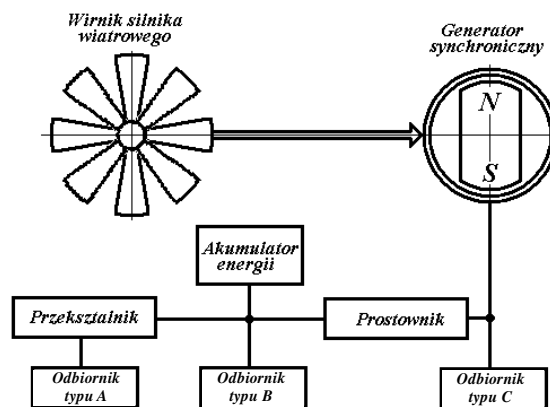
Wiele autonomicznych EW buduje się z wykorzystaniem komutatorowych generatorów prądu stałego. Jednak obecność komutatora i węzła szcztkowego istotnie obniża niezawodność takich elektrowni oraz utrudnia rozruch przy słabym wietrze. Również EW z prądnicami prądu stałego potrzebują częstszej i bardziej kwalifikowanej obsługi technicznej.

Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania stwierdzić można, że najlepszym wariantem konstrukcji autonomicznej EW jest elektrownia bazująca się na wolnoobrotowych prądnicach synchronicznych ze wzbudzeniem od magnesów trwałych [3-5].

Układ strukturalny jednego z możliwych wariantów autonomicznej EW przedstawiono na rys.1.

W takiej EW energia wiatru za pomocą wirnika silnika wiatrowego oraz połączonego z nim na stałe generatora synchronicznego przetwarzana jest na prąd przemienny, którego częstotliwość

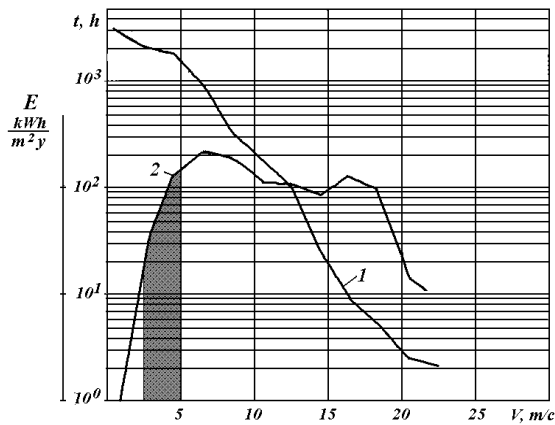
i napięcie zależy od prędkości obrotowej wirnika silnika wiatrowego.



Rys.1. Schemat strukturalny elektrowni wiatrowej

Taka energia może być bezpośrednio pobierana przez odbiorniki typu C, na przykład, różnego rodzaju grzejniki oraz napędy od których nie wymaga się sztywnych wymogów co do stabilności prędkości obrotowej. Napięcie przemiennie, otrzymywane z prądnicy, za pomocą prostownika przetwarza się na napięcie stałe, które dostarczane jest odbiornikom typu B, do których można zaliczyć baterie akumulatorów – element niezbędny dla zasilania odbiorów autonomicznej EW przy braku wiatru. Napięcie stałe za pomocą przetwornika przetwarzane jest na napięcie przemiennie o znormalizowanej częstotliwości i poziomie napięcia. Takim napięciem zasilani są odbiorcy typu A, funkcjonowanie których wymaga stałości wymienionych parametrów energii elektrycznej.

Do bezwzględnych przewag EW bezprzekładniowych należy zwiększony zakres prędkości wiatru, który zapewnia normalną pracę elektrowni. Skuteczność takiego zwiększenia przedstawia przykład wykorzystania energii wiatru w rejonie m. Stryj obwodu Lwowskiego. Na wykresie rozkładu prędkości wiatru (linia 1 na rys.2) i na odpowiednim wykresie energetycznym (linia 2 na rys.2) część zacieniona odzwierciedla potencjalną możliwość zwiększenia ilości energii, którą można uzyskać przy zmniejszeniu wykorzystywanej prędkości wiatru z 5 m/s do 2,5 m/s. W danym przypadku o 13% zwiększa się ilość energii, która może być wyprodukowana przez EW [6].

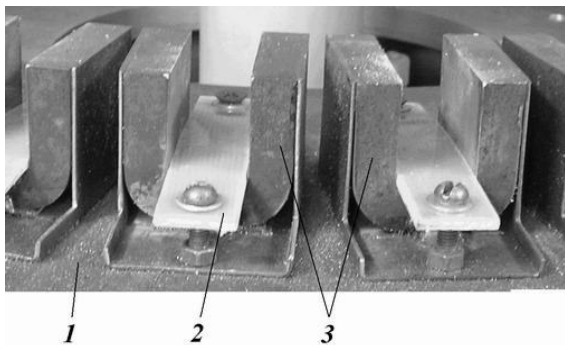


Rys.2. Wykres prędkości wiatru (1) oraz odpowiedni wykres energetyczny (2) dla rejonu m. Stryj obwodu Lwowskiego

Bezprzekładniowe EW mają wyższą sprawność, co tłumaczy się zmniejszeniem strat w transmisji mechanicznej i układzie stabilizacji prędkości obrotowej. Taka EW ma wyższą niezawodność i czas działania, jak również wymaga mniejszych nakładów na ich eksploatację.

3. Prądnice dla autonomicznych elektrowni wiatrowych

Autorzy artykułu są przekonani, że najlepszą konstrukcją prądnic dla bezprzekładniowych EW małej mocy są prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem od magnesów trwałych.

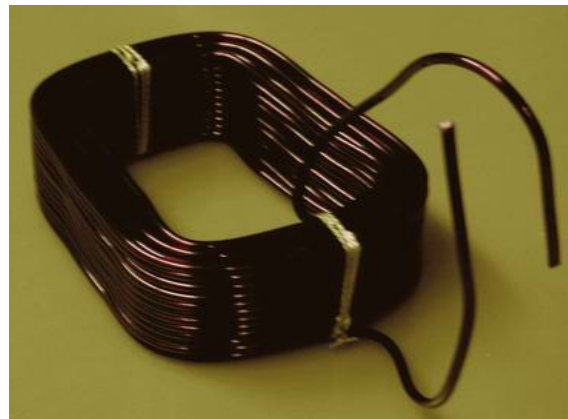


Rys.3. Fragment magnetowodu stojana w toku składania:

1 – tarcza oporowa; 2 – wstawka technologiczna; 3 – rdzeń nawijany w kształcie litery U

Wiadomo, że zwiększenie średnicy twornika maszyn elektrycznych przy zachowaniu niezmiennych wszystkich pozostałych uwarunkowań prowadzi do zwiększenia mocy w potęgze drugiej, a waga oraz wartość materiałów części czynnych wzrastają liniowo. W ten sposób, maksymalne zwiększenie średnicy twornika jest korzystne z ekonomicznego oraz technicznego punktu widzenia.

Porównanie maszyn elektrycznych o wirnikach walcowych i maszyn o wirnikach tarczowych, które mają osiową szczelinę powietrzną, wskazuje, że ta druga konstrukcja pozwala łatwiej zastosować blokowo-modułową zasadę budowy maszyn. Takie rozwiązanie techniczne stwarza możliwość unifikacji elementów maszyny, co pozwala produkować generatory dowolnych gabarytów i mocy. Przy tym ich opracowanie oraz produkcja stają się nadzwyczaj proste – zbliżają się po swej złożoności do układania zabawki dziecięcej „Lego”. Wtedy rozwiązuje się problem obniżenia cen generatorów, które w znacznym stopniu ograniczają intensywność wdrażania siłowni wiatrowych.

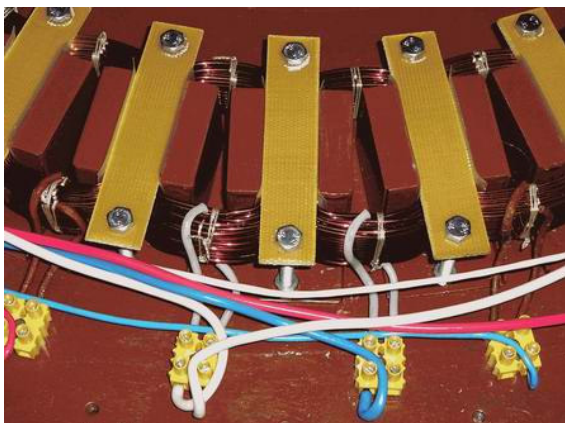


Rys.4. Cewka uzwojenia nie krzyżującego się

Z punktu widzenia na ułożenia uzwojeń twornika za najlepszą konstrukcją prądnic dla autonomicznych EW małej mocy trzeba uznać maszynę elektryczną z uzwojeniem nie krzyżującym się.

Takie uzwojenie daje możliwość wykonania magnetowodu stojana z rdzeni zwiniętych w kształcie litery U (rys.3), produkowanych ze stali elektrotechnicznej izotropowej walcowanej na zimno. Stosowanie tego typu materiału zapewnia znaczne obniżenie gabarytów i masy prądnicy oraz gwarantuje istotne zmniejszenie strat w stali.

Konstrukcja cewek, z których wykonuje się uzwojenie, jest bardzo prosta (rys.4). Takie cewki są łatwe do wykonania ze względów technologicznych, łatwo montują się w stojanie oraz zapewniają istotne podwyższenie niezawodności. Uzwojenia wyprodukowane z takich cewek nie stwarzają problemów przy ewentualnej naprawie. Fragment stojana prądnicy o uzwojeniu nie krzyżującym się, instalowanym w rdzeniach zwiniętych w kształcie litery U przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Fragment stojana prądnicy prądu przemiennego

W specjalnym biurze konstruktorskim systemów elektromechanicznych Uniwersytetu Narodowego „Politechnika Lwowska” opracowano oryginalne schematy uzwojeń wielofazowych, przeznaczone dla generatorów prądu przemiennego. Takie uzwojenia zapewnią wytwarzanie prądu sinusoidalnego o wysokiej jakości przy niezbyt wysokich wymaganiach co do rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

System wzbudzenia generatora składa się z tarczy oporowej na której zamocowane jest p bloków magnesów trwałych, z których każdy spełnia funkcję jednego bieguna induktora.

Bieguny induktora prądnic EW małej mocy mogą być wykonane z ferrytów baru lub ferrytów strontu. W tym celu można również stosować magnesy trwałe ze stopów samaru-kobaltu lub Ni-Fe-B. Przy zachowaniu stałych gabarytów części czynnych oraz parametrów uzwojenia wykorzystanie magnesów z ferrytów prowadzi do zmniejszenia mocy generatora, ale zmniejsza się również cena maszyny.

W celu obniżenia momentu hamującego, spowodowanego współdziałaniem zębatego ferromagnetycznego rdzenia stojana i biegunów układu wzbudzenia, prądnica musi być wykonana z określonym stosunkiem ilości zębów stojana oraz liczby par biegunów układu wzbudzenia. Oprócz tego, musi być uwzględniony optymalny stosunek wymiarów oraz ich powierzchni roboczych.

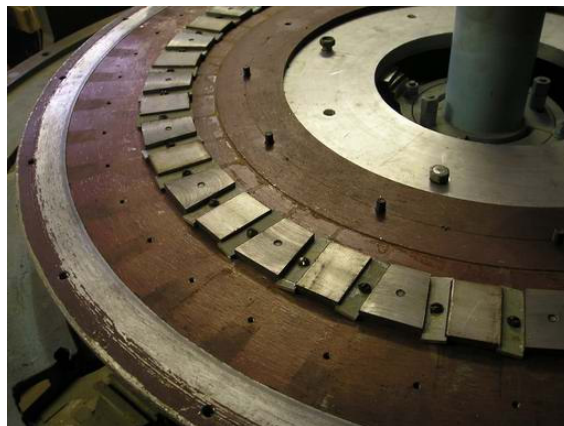
4. Praktyczne wykorzystanie proponowanych rozwiązań technicznych

Wszystkie wyżej przedstawione założenia zostały praktycznie zrealizowane w pełnym zakresie jako eksperymentalne wzorce elektrowni wiatrowych.

W szczególności wykonana została prądnica dla EW zasilania rezerwowego obwodowego radiotelewizyjnego ośrodka nadawczego w Czerniowcach.

Trójfazowe uzwojenie prądnicy składa się z 36 cewek, zamontowanych w rdzeniach U-podobnych (rys.5). Uzwojenie stojana wykonane jest z możliwością zmiany liczby gałęzi równoległych, co osiąga się poprzez zmianę schematu połączeń cewek. Takie rozwiązanie techniczne zapewnia możliwość wykorzystania danej prądnicy dla ładowania baterii akumulatorowych na 24, 36 oraz 48 V. Dokonując zmiany danych uzwojenia, bez żadnych zmian elementów konstrukcyjnych, prądnica może być wykonana na dowolny poziom napięcia.

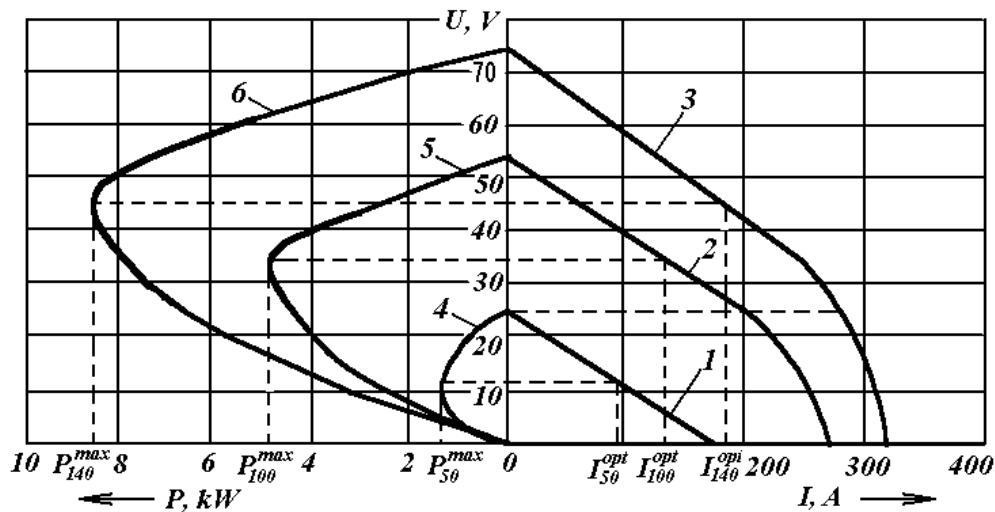
Wzbudzenie prądnicy dokonuje się za pomocą 44 magnesów trwałych typu 38SH, zamocowanych na tarczowym magnetowodzie wirnika (rys.6).



Rys.6. Wirnik prądnicy o magnesach trwałych

Prądnicy przedstawione były następujące wymagania:

- przekazywanie energii elektrycznej do odbiornika powinno odbywać się w układzie: generator-prostownik-akumulator-przekształtnik-obciążenie;
- moc prądnicy w reżimie ładowania akumulatora - najmniej 6 kW;
- napięcie akumulatora - 24 V;



Rys.7. Charakterystyki prądnicy: 1, 2, 3 – zewnętrzne; 4, 5, 6 – energetyczne

- znamionowa prędkość obrotowa wirnika prądnicy - 140 obr/min;
- zakres prędkości obrotowej - od 20 do 160 obr/min;
- minimalna prędkość wiatru, przy której wirnik silnika wiatrowego zaczyna się obracać - 2,5 m/s.

W toku badań eksperymentalnych generatora ustalone były jego charakterystyki zewnętrzne przy prędkościach obrotowych - 50, 100 i 140 obr/min, na podstawie których wykreślono odpowiednie charakterystyki energetyczne $P=f(U)$ (rys.7). Przedstawione na rys.7 zależności wykazują, że proces ładowania baterii akumulatorowej o napięciu 24 V zaczyna się już przy prędkości obrotowej wirnika silnika wiatrowego 50 obr/min.



Rys.8. Elektrownia wiatrowa z prądnicą tarczową

Przy prędkości obrotowej 100 obr/min prąd ładowania przekracza 200 A, a przy prędkości obrotowej 140 obr/min - osiąga 280 A [7].

Biorąc pod uwagę, że niezawodna praca EW w znacznym stopniu wyznaczona jest niezawodnością łożysk wirnika silnika wiatrowego, projektowane są one z uwzględnieniem dużego współczynnika pewności i bezpieczeństwa. Ponieważ obciążenie, wytwarzane przez wirnik silnika wiatrowego na łożyska i wał, wielokrotnie przekracza maksymalne obciążenia, które mogą powstawać pod działaniem prądnicy, może ona być zmontowana na tych samych elementach wsporczych, co znacznie upraszcza konstrukcję EW, obniża koszt instalacji oraz eksploatacji elektrowni.

Brak multiplikatora zwiększą niezawodność elektrowni i zapewnia możliwość pracy przy małych prędkościach wiatru.

Średnica wirnika silnika wiatrowego danej stacji wynosi 10 m, a zewnętrzna średnica prądnicy - 990 mm.

Wygląd wirnika silnika wiatrowego EW oraz zainstalowanej na tym samym wale prądnicy tarczowej przedstawiono na rys.8.

Długotrwała eksploatacja doświadczalna proponowanej konstrukcji EW potwierdza wysoką niezawodność prądnicy i całej elektrowni w ogóle w złożonych warunkach klimatycznych.

5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają wysnuć następujące wnioski:

- wykorzystanie autonomicznych EW pozwala rozwiązać problem zaopatrzenia energetycznego małych przedsiębiorstw i domostw, oddalonych od centralnej sieci elektroenergetycznej;
- przed rozpoczęciem budowy EW należy sprawdzić i ocenić potencjał energetyczny wiatru w danej lokalizacji;
- w celu obniżenia nakładów inwestycyjnych na budowę i wydatków eksploatacyjnych elektrowni, struktura EW musi być uzgodniona z realnymi potrzebami konkretnych odbiorców, zasilanych z elektrowni;
- wykorzystanie bezprzekładniowych EW istotnie zwiększa wydajność elektrowni autonomicznych, które są budowane w regionach o małej średniej prędkości wiatru;
- zastosowanie proponowanych prądnic zapewnia obniżenie cen EW, podnosi ich wydajność i obniża koszty eksploatacyjne, a jednocześnie również cen energii elektrycznej, którą produkuje elektrownia;
- opracowane rozwiązania techniczne mogą być także wykorzystane przy konstruowaniu wolnoobrotowych prądnic dla zaporowych i bezzaporowych elektrowni wodnych małej mocy.

5. Literatura

- [1]. *Ветроэнергетические установки: мировой рынок и цены*. М.: Изд-во консалтинга-исслед. фирмы "Экотранс", 1997. - 118с.
- [2]. *Ветроэнергетика* / Под ред. Д. Де Рензо. – Москва: Энергоатомиздат, 1982.- 272с.
- [3]. Artur Polak. *Wysokosprawna prądnica wzbudzana magnesami trwałymi – wyniki badań laboratoryjnych* / Zeszyty Problemowe BOBRME Komel nr 65/2003.
- [4]. P.Lampola. *Directly driven, low-speed permanent-magnet generation for windpower applications*, Espoo 2000 Finland.
- [5]. Jakub Bernatt. Wykorzystanie prądnic synchronicznych do budowy małych elektrowni wiatrowych Zeszyty Problemowe BOBRME Komel nr 68/2004.
- [6]. Чучман Ю., Пуцило В., Замська С. *Технічні та техногенні аспекти використання вітроелектростанцій в Карпатському регіоні* / Міжнар форум конферен. Еврорегіонів "Мир та безпека" 11-13.10.2000, м. Ів.-Франківськ // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія "Енергетика", Вип.37 (Том 9). Ів.-Франківськ, вид-во Ів.-Франк. держ техн.ун-т нафти і газу, 2000, - с.59-65.
- [7]. Чучман Ю. *Використання досвіду створення моментних двигунів при розробці генераторів для вітроелектростанцій*// Доповіді 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф. "Управління енерговикористанням", 3 червня 1997.- Львів, 1997.

Autorzy

Jurij Czuczman, prof. dr. hab. inż. д.т.н.;
 Myron Czerepanjak, inż.;
 Ivan Sczur, inż.;
 Philip Golubowsky, inż.

Specjalne biuro konstruktorskie systemów elektromechanicznych Uniwersytetu Narodowego „Politechnika Lwowska”,
 ul. Ak. F. Kolessy, 2 , 79000 Lwów Ukraina
 tel. : (+380-322) 722-962,
 tel./fax : (+380-322) 743-325,
 e-mail: jurchuch@polynet.lviv.ua