

Zdzisław KRZEMIEN

NOWA KONCEPCJA WZBUDZENIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO BEZSZCZOTKOWEJ MASZYNY SYNCHRONICZNEJ

STRESZCZENIE *Wzrastające ceny magnesów neodymowych doprowadziły do sytuacji, że maszyny elektryczne ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym stały się drogie. Celowym jest więc powrót do koncepcji bezszczotkowych maszyn synchronicznych o wzbudzeniu elektromagnetycznym. W maszynach o mocy kilku kilowatów wzbudnica umieszczona na wspólnym wale ma gabaryty porównywalne z maszyną główną co powoduje znaczne powiększenie wymiarów zespołu. Zbadano możliwość zastosowania jako wzbudnicy transformatora wirującego pracującego przy wysokiej częstotliwości, którego gabaryty są niewielkie. Wykonano model maszyny, wyniki przeprowadzonych badań wykazały poprawność działania układu.*

Słowa kluczowe: *maszyny synchroniczne, systemy wzbudzenia*

1. WSTĘP

Maszyna synchroniczna to maszyna prądu przemiennego, w której częstotliwość generowanego napięcia zależy od liczby par biegunów i prędkości obrotowej. Magnesy (wzbudzane) jest ona strumieniem magnetycznym wywołanym prądem stałym płynącym w uzwojeniu wzbudzenia lub magnesami trwałymi.

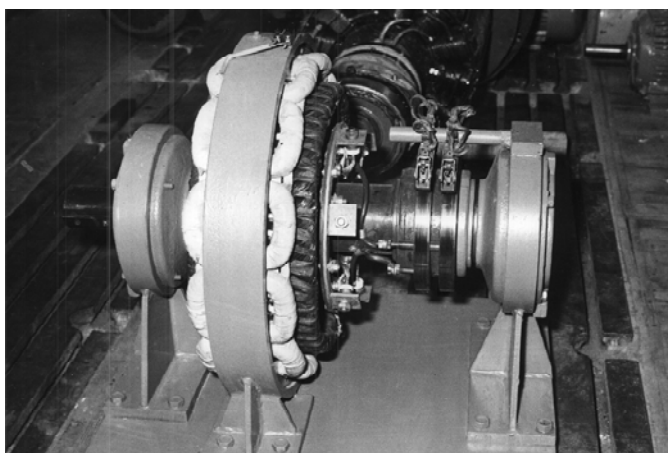
Typowa maszyna synchroniczna posiada uzwojenie twornika umieszczone w stojanie oraz uzwojenie wzbudzenia umieszczone na wirniku, które może być zasilane poprzez szczotki i pierścienie ślizgowe lub bezszczotkowo. Węzeł pierścienie – szczotki stanowi słaby punkt układu bowiem ulega częstym uszkodzeniom, wymaga okresowych przeglądów i dlatego nie projektuje się już nowych maszyn synchronicznych z takim rozwiązaniem.

dr inż. Zdzisław KRZEMIEN

e-mail: z.krzemien@iel.waw.pl

Zakład Napędów Elektrycznych,
Instytut Elektrotechniki,
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

W najczęściej spotykanych rozwiązaniach bezszczotkowego wzbudzenia maszyn synchronicznych na wspólnym wale umieszczone jest uzwojenie wzbudzenia maszyny synchronicznej oraz twornik wzbudnicy wraz z diodowym prostownikiem wirującym. Wzbudnica posiada uzwojenie wzbudzenia (sterujące) zasilane prądem stałym umieszczone w stojanie. Wzbudnica pełni również rolę wzmacniacza elektromaszynowego i moc wzbudzenia wzbudnicy (sterująca) ma stosunkowo niewielką wartość. Przykładowo: zaprojektowana w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku w Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEL bezszczotkowa prądnica synchroniczna typu GCe400M-12 o mocy 125 kVA w warunkach znamionowych miała moc wzbudzenia równą 2780 W, natomiast moc sterująca (wzbudzenia wzbudnicy) wynosiła tylko 280 W [1].



Rys. 1. Wzbudnica do prądnic typu GCe400 M-12 (na stojaku badawczym) [1]

2. SYSTEMY WZBUDZENIA MASZYN SYNCHRONICZNYCH

Zasadniczo można wyliczyć dwa systemy wzbudzenia maszyn synchronicznych różniące się zasadą działania i sposobem wykonania: systemy szczotkowe wymagające stosowania węzła szczotki – pierścienie ślizgowe oraz systemy bezszczotkowe.

2.1. Systemy szczotkowe

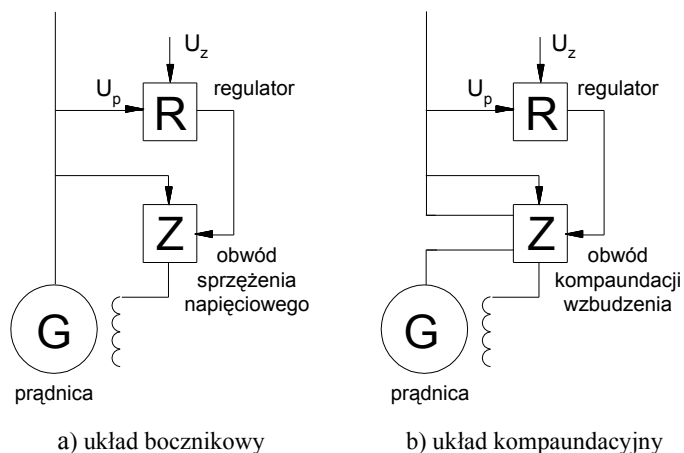
Systemy szczotkowe statyczne

W tych systemach energia potrzebna do wzbudzenia maszyny synchronicznej pobierana jest z zacisków twornika maszyny poprzez odpowiednio ukształtowaną pętlę sprzężenia zwrotnego.

Istnieje wiele statycznych systemów wzbudzenia różniących się rozwiązaniami konstrukcyjnymi, najczęściej spotykane to:

- układy bocznikowe zasilane równoległe z zacisków prądnicy poprzez prostownik i regulator. Systemy takie są stosunkowo lekkie i mają niewielkie gabaryty. Podstawową wadą takich rozwiązań jest zanikający do zera prąd zwarcioowy prądnicy co powoduje problemy w doborze zabezpieczeń i dlatego układy takie są rzadko stosowane;
- układy kompaundacyjne zasilane w sposób szeregowo – równoległy z zacisków prądnicy z wymuszeniem prądu wzbudzenia, który jest zależny od prądu obciążenia prądnicy. Systemy takie mają dobre własności regulacyjne, wadą ich jest duża masa i skomplikowana budowa.

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczone schematy statycznych układów wzbudzenia prądnicy synchronicznej.



Rys. 2. Schematy statycznych układów wzbudzenia i stabilizacji napięcia prądnicy synchronicznej. U_p – napięcie prądnicy; U_z – napięcie zadane

Systemy szczotkowe ze wzbudnicą:

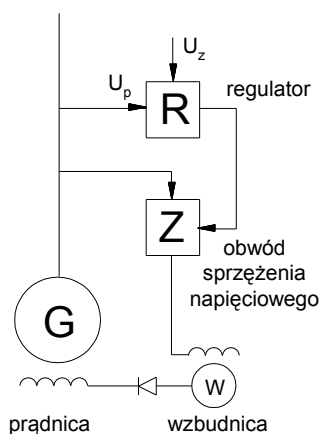
Możemy wymienić następujące rozwiązania:

- układ wzbudzenia z komutatorową wzbudnicą prądu stałego montowaną na końcu wału maszyn synchronicznej. Historycznie były one pierwszym źródłem wzbudzenia maszyn synchronicznych jednak ze względu na problemy eksploatacyjne komutatorów nie są już stosowane;
- układ wzbudzenia z komutatorową wzbudnicą prądu stałego z napędem niezależnym;
- układ wzbudzenia ze wzbudnicą prądu przemiennego z wielofazowym uzwojeniem twornika umieszczonym na stojanie i statycznym prostownikiem diodowym lub tyrystorowym.

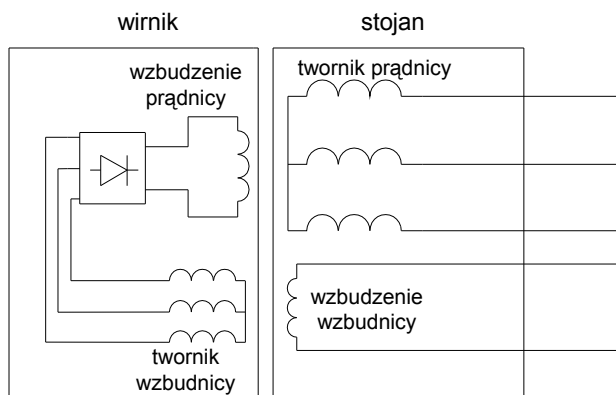
2.1. Systemy bezszczotkowe

Spotykane są następujące rozwiązania:

- układ wzbudzenia ze wzbudnicą prądu przemiennego z wielofazowym uzwojeniem twornika umieszczonym w wirniku z wirującym prostownikiem diodowym, z uzwojeniem sterującym (wzbudzenia wzbudnicy) umieszczonym na stojanie, uproszczony schemat takiego systemu przedstawiono na rysunku 3;



Rys. 3. Schemat bezszczotkowego układu wzbudzenia prądnicy synchronicznej ze wzbudnicą prądu przemiennego i prostownikiem wirującym



Rys. 4. Układ wzbudzenia ze wzbudnicą prądu przemiennego umieszczoną we wspólnym obwodzie magnetycznym z prądnicą

- układ wzbudzenia ze wzbudnicą prądu przemiennego z wielofazowym uzwojeniem twornika umieszczonym w wirniku z wirującym prostownikiem diodowym oraz z podwzbudnicą wzbudzaną magnesami trwałymi umieszczonymi w wirniku;

- interesującym rozwiązaniem jest układ wzbudzenia ze wzbudnicą prądu przemiennego umieszczoną we wspólnym obwodzie magnetycznym z prądnicą (w żłobkach stojana umieszczone jest uzwojenie twornika prądnicy oraz uzwojenie sterujące (wzbudzenia wzbudnicy)). W żłobkach wirnika umieszczone jest uzwojenie twornika wzbudnicy oraz uzwojenie wzbudzenia prądnicy. Ponadto w wirniku umieszczony jest wirujący prostownik, rysunek 4. Prądnicę o takiej konstrukcji zaprojektowano w roku 1979 w Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEl i przewidywana była do stosowania jako prądnica podwagonowa. Podstawową wadą takiej konstrukcji były problemy z regulacją napięcia prądnicy oraz znaczna zawartość harmonicznych w wyjściowym napięciu [2].

Powyższe rozwiązania wymagają stosowania prostownika wirującego, w którym zazwyczaj instaluje się diody lecz znane są też konstrukcje z wykorzystaniem tyrystorów wirujących: np. prądnice typu GF wytwarzane na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku przez firmę ASEA. Zastosowanie prostownika sterowanego poprawiało dynamikę wzbudnicy w stanach przejściowych. Jednak ze względu na zawodność rozwiązania zaniechano ich produkcji. Również w tamtym czasie w Zakładzie Maszyn Elektrycznych zbudowano model wzbudnicy tyrystorowej jednak ze względu na problemy regulacyjne prace przerwano, [3].

3. PRĄDNICE O WZBUDZENIU MAGNETOELEKTRYCZNYM

Rozwój technologii wytwarzania materiałów magnetycznych opartych o metale ziem rzadkich stworzył możliwość uzyskiwania dużych indukcji i w konsekwencji budowy maszyn elektrycznych konkurencyjnych pod względem parametrów eksploatacyjnych w porównaniu z maszynami o wzbudzeniu elektromagnetycznym.

Prądnice te posiadają prostą konstrukcję (bez uzwojenia w wirniku, bez wzbudnicy i regulatora wzbudzenia) i dużą niezawodność. Mogą pracować praktycznie bezobsługowo. Sprawność ich jest większa niż „klasycznych” prądnic synchronicznych. Do podstawowych wad należy zaliczyć: brak możliwości bezpośredniej regulacji napięcia wyjściowego i jego stabilizacji przy zmiennym obciążeniu, możliwość rozmagnesowania się wirnika wskutek zwarcia uzwojenia twornika lub zbyt wysokiej temperatury, występowanie momentu zaczepowego oraz cena magnesów.

Praktycznie światowy monopol Chin w produkcji magnesów neodymowych spowodował, że ich ceny w ostatnich latach szybko rosły. W chwili obecnej koszty magnesów stanowią istotną część kosztów prądnicy (silnika).

W ostatnich latach w Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEl zaprojektowano i wykonano szereg maszyn o wzbudzeniu magnetoelektrycznym: i tak w wolnoobrotowej prądnicy 1 kW wykonanej w roku 2008 magnesy neodymowe stanowiły 11% całkowitych kosztów, w silniku trakcyjnym 180 Nm wykonanym w roku 2011 udział magnesów wynosił już 32%, w podobnym silniku wykonanym w roku 2013 udział ten spadł do 22%, [4]. Wzrost cen magnesów może w przyszłości spowodować nieopłacalność budowy maszyn wykorzystujących magnesy.

Wzrastające koszty magnesów w budowie maszyn elektrycznych sprawiły, że celowy jest powrót do koncepcji bezszczotkowych maszyn synchronicznych o wzbudzeniu elektromagnetycznym: z klasycznym uzwojeniem wzbudzenia w wirniku.

Celem obniżenia kosztów przy projektowaniu należy przynajmniej na etapie modelu użytkowego wykorzystać elementy konstrukcyjne standardowych silników indukcyjnych pierścieniowych i zainstalować urządzenie wzbudzające wewnątrz kadłuba – w miejsce węzła szczotkotrzymacz – szczotki – pierścienie.

W oparciu o powyższe założenia w Zakładzie Maszyn Elektrycznych wykonano projekt prądnicy synchronicznej opartej o elementy konstrukcyjne silnika indukcyjnego pierścieniowego o mocy 5,5 kW i $2p = 4$ [4].

W pierwszym etapie zbadano możliwość zastosowania jako wzbudnicy odwróconej maszyny synchronicznej z wirującym prostownikiem. Przeprowadzone obliczenia projektowe wykazały jednak, że koncepcja taka jest niemożliwa do realizacji bowiem wzbudnica nie zmieści się w przestrzeni zajmowanej uprzednio przez pierścienie i szczotki.

Należało więc rozważyć możliwość zastosowania innego urządzenia które zapewni bezszczotkowość rozwiązania i będzie możliwe do wykonania.

4. TRANSFORMATORY WIRUJĄCE

Zasada działania transformatora wirującego jest taka sama co zwykłego transformatora, z tym że obwód magnetyczny jest podzielony na część ruchomą i nieruchomą, a pomiędzy nimi występuje szczelina powietrzna [5, 6].

Zasadniczo możemy wyróżnić dwa typy konstrukcji transformatora wirującego: w wykonaniu aksialnym (osiowym) i radialnym (promieniowym), rysunek 5.

Obwód magnetyczny z reguły wykonywany jest z ferrytu, a urządzenie zasilane jest napięciem o dużej częstotliwości co sprawia, że gabaryty urządzenia są stosunkowo niewielkie.

Moc przenoszona przez transformator wirujący jest opisana wzorem:

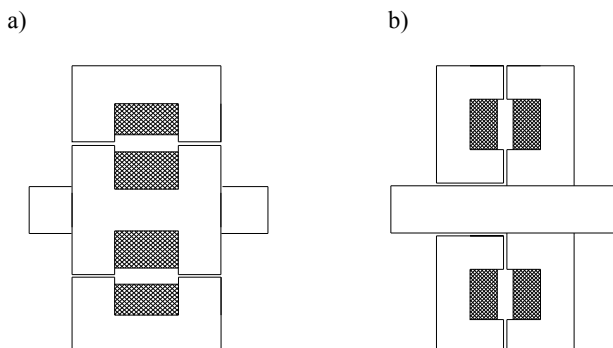
$$P = \pi \cdot J \cdot S \cdot k_{uz} \cdot f \cdot B_m \cdot A \quad (1)$$

gdzie:

- J – gęstość prądu;
- S – powierzchnia uzwojenia;
- k_{uz} – współczynnik wypełnienia uzwojenia;
- f – częstotliwość;
- B_m – maksymalna wartość indukcji;
- A – przekrój poprzeczny rdzenia wewnętrznego.

Powyższa zależność wskazuje, że moc przenoszona przez transformator wirujący jest zależna od geometrii obwodu magnetycznego, częstotliwości i indukcji.

Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym, wirującym zależy od przekładni uzwojeń transformatora.



Rys. 5. Transformator wirujący w wykonaniu aksjalnym (a) i radialnym (b)

4.1. Zastosowanie transformatorów wirujących

Jednym z bardziej popularnych przykładów zastosowania transformatora wirującego jest głowica nagrywająco – odtwarzająca magnetowidu gdzie przenoszony sygnał jest zapisany na taśmie. Moc przenoszona jest oczywiście znikoma.

Urządzenia takie stosuje się również w energetyce: w brazylijskim oddziale firmy WEG zaprojektowano i wykonano dwustronnie zasilaną prądnicę indukcyjną z trójfazowym transformatorem wirującym, który zastępuje węzeł szczotki-pierścienie zwiększając niezawodność maszyny. Maszyna ma moc 90 kW i przewidywana jest stosowania w siłowni wiatrowej [7].

Jak już wcześniej wspomniano w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w Zakładzie NME zaprojektowano i wykonano model wzbudnicy tyrystorowej do prądnicy synchronicznej. Sterowanie tyrystorami odbywało się za pomocą cztero-uzwojeniowego transformatora wirującego.

Nie znaleziono natomiast przykładów instalacji transformatorów wirujących w układach wzbudzenia maszyn synchronicznych. Zastosowanie ich w takich systemach wydaje się więc rozwiązaniem nowatorskim.

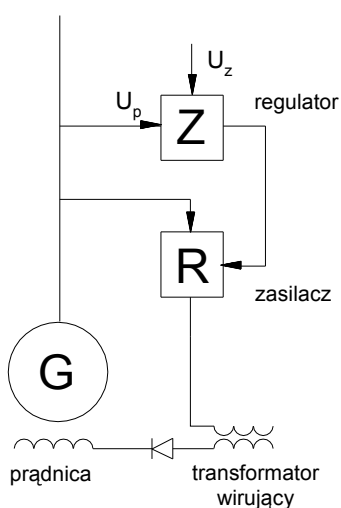
W Zakładzie Napędów Elektrycznych w latach ubiegłych prowadzone były prace związane z bezstykowym przesyłem energii. Transformator wirujący jest jednym z możliwych rozwiązań takich systemów.

4.2. Transformator wirujący przeznaczony do wzbudzenia prądnicy synchronicznej

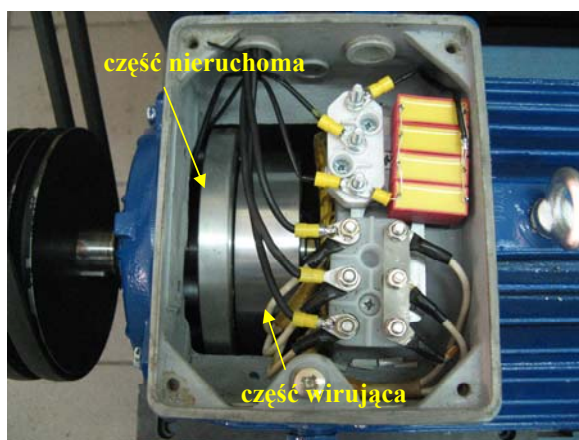
W oparciu o założenia dotyczące wymiarów i mocy transformowanej w Zakładzie Napędów Elektrycznych zaprojektowano i wykonano transformator wirujący przeznaczony do instalacji wewnątrz kadłuba prądnicy synchronicznej. Konstrukcja urządzenia jest tarczowa (radialna). Część nieruchoma transformatora przymocowana jest do tarczy łożyskowej, część wirująca zainstalowana jest na wale. Szczelina powietrzna pomiędzy

częścią nieruchomą (uzwojenie pierwotne) i częścią wirującą (uzwojenie wtórne) wynosi 2 mm, całkowita długość urządzenia 64 mm wobec ok. 150 mm długości obliczonej wzbudnicy (odwróconej prądnicy synchronicznej). Moc transformowana wynosi 200 W.

Uzwojenie pierwotne (nieruchome) transformatora podłączone jest do zasilacza energoelektronicznego generującego na wyjściu napięcie o wysokiej częstotliwości (45 kHz) i regulowanej amplitudzie. Na rysunku poniżej przedstawiono uproszczony schemat systemu wzbudzenia maszyny synchronicznej przy pomocy transformatora wirującego, a na rysunku 7 przedstawiono fotografię elementów konstrukcyjnych transformatora zainstalowanych w maszynie synchronicznej.



Rys. 6. Schemat układu wzbudzenia prądnicy synchronicznej z transformatorem wirującym



Rys. 7. Widok transformatora zainstalowanego w prądnicie

5. PODSUMOWANIE

Wyniki badań wykazują, że maszyna synchroniczna wzbudzana poprzez transformator wirujący i zasilacz charakteryzuje się dobrymi własnościami eksploatacyjnymi zarówno przy pracy prądnicowej przy obciążeniu rezystancyjnym i na sieć jak i przy pracy silnikowej [8].

System wzbudzenia maszyny synchronicznej przy pomocy transformatora wirującego należy uznać za rozwiązanie obiecujące. Konstrukcje szczotkowe maszyn synchronicznych praktycznie wychodzą z użycia, zastosowanie wzbudnicy (odwróconej prądnicy synchronicznej z prostownikiem wirującym) maszynach o małej lub średniej mocy jest kłopotliwe ze względu na wymiary wzbudnicy, które są często porównywalne z wymiarami maszyny głównej. Natomiast gabaryty transformatora wirującego są znacznie mniejsze. Koszty wykonania transformatora wirującego są niewielkie, znacznie niższe od kosztów magnesów (oczywiście do układu wzbudzenia należy doliczyć koszt zasilacza i regulatora).

Stosowany do badań zasilacz transformatora wirującego wymaga zasilania z sieci. Przewidywane zastosowania prądnic w małych elektrowniach współpracujących z odnawialnymi źródłami energii lub w zespołach spalinowo elektrycznych wymagają pracy autonomicznej bez konieczności współpracy z siecią. Konieczne jest więc opracowanie takiego zasilacza aby mógł on samodzielnie zasilać układ wzbudzający prądnicę pobierając potrzebną energię z zacisków prądnicy a proces wzbudzenia może zainicjowany poprzez zastosowanie odpowiedniej baterii.

Wadą transformatorowego systemu wzbudzenia maszyn synchronicznych jest konieczność transformowania pełnej mocy wzbudzenia – transformator nie jest wzmacniaczem elektromaszynowym jak to jest w przypadku klasycznej wzbudnicy synchronicznej. Powiększa to gabaryty zasilacza i regulatora.

Na rynku brak jest synchronicznych prądnic bezszczotkowych o mocy rzędu kilowatów i o wzbudzeniu elektromagnetycznym, które zapewnią sztywność napięcia wyjściowego, zaprojektowana prądnicą ze wzbudzeniem przy pomocy transformatora wirującego z powodzeniem może wypełnić tę lukę.

LITERATURA

1. Krzemień Z.: Sprawozdanie z badań modelowych prądnic synchronicznych typu GCe 355L-12 i GCe 400M-12 przeznaczonych dla MEW. Dokumentacja IEL, nr arch. 37/1989.
2. Kibler W., Bachan S., Krzemień Z.: Projekt wstępny modelu prądnicy wagonowej, bezszczotkowej ze wzbudnicą we wspólnym obwodzie magnetycznym. Dokumentacja IEL, nr arch. 65/1979.
3. Krzemień Z.: Koncepcja, obliczenie i zaprojektowanie wzbudnicy przekształtnikowej z wirującym układem tyrystorowym. Dokumentacja IEL, 1980.
4. Krzemień Z.: Nowa koncepcja bezszczotkowej prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem elektromagnetycznym Dokumentacja IEL, nr arch. 12/2013.

5. Smeets J., Encica L., Lomonova E.: Comparison of winding topologies in a pot core rotating transformer. Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, s. 103-110, maj 2010.
6. Smeets J., Krop D., Jansen W.: Optimal design of a pot core rotating transformer. Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, s. 4390-4397, wrzesień 2010.
7. Runcos F. i inni: Analysis and test results of a brushless doubly fed induction machine with rotary transformer. WEG Brazil, Technical Notes, październik 2012.
8. Krzemiń Z.: Badania prototypowej maszyny synchronicznej z transformatorem wirującym. Dokumentacja IEL, nr arch. 19/2014.

Rękopis dostarczono dnia 11.02.2015 r.

NEW CONCEPTION OF ELECTROMAGNETIC EXCITATION BRUSHLESS SYNCHRONOUS MACHINE

Zdzisław KRZEMIŃ

ABSTRACT *Increase of prices of neodymium magnets cause that machines with magnetolectric excitation become expensive. Therefore it is appropriate to return to the electromagnetic conception of the brushless excitation of synchronous machines. In the machines of the power of about several kilowatts, exciter placed on common shaft with the main machine has dimension comparable with the size of this main machine. It causes the considerable increase of the unit dimensions.*

The possibility to apply as an exciter a rotary transformer working with high frequency was tested. Small dimensions are an important advantage of this transformer. A device prototype has been made. Testing results confirm the correctness of the system operation.

Keywords: *synchronous machines, excitation systems*



Dr inż. Zdzisław KRZEMIŃ w latach 1975 – 2014 był pracownikiem Zakładu Maszyn Elektrycznych IEL, obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Zakładzie Napędów Elektrycznych. Zajmuje się problematyką maszyn elektrycznych przeznaczonych do współpracy z odnawialnymi źródłami energii.