

Tadeusz WRÓBEL

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

PRZEGLĄD ROZWOJU PRĄDNIC ZWIĘKSZONEJ CZĘSTOTLIWOŚCI TYPU INDUKTOROWEGO

Streszczenie. Po przeprowadzeniu podziału prądnic induktorowych zwiększonej częstotliwości przedstawiono przegląd rozwoju tych maszyn od ich wynalezienia do chwili obecnej i w perspektywie po dwutysięcznym roku. Zaprezentowano najważniejsze prace teoretyczne, doświadczalne i konstrukcyjne w tej dziedzinie z uwzględnieniem pozycji książkowych. Zwrócono uwagę na dorobek prof. Z. Gogolewskiego związany z prądnicami induktorowymi.

REVIEW OF THE DEVELOPMENT OF INDUCTOR -TYPE HIGH FREQUENCY ALTERNATORS

Summary. After reminding of classification of the inductor type high frequency alternators, the review of the development of them has been given, from the date of invention to present day and prospects for twenty-first century. The most important works in this field: theoretical, experimental and constructional including books, have been presented. Scientific achievements of Prof. Z. Gogolewski in subject of inductor-type alternators have been paid attention.

1. WPROWADZENIE

W materiałach XXXI Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych w Ustroaniu (20-23.09.1995) opublikowano wnikliwy i głęboki przegląd rozwoju maszyn synchronicznych [1], oparty na 159 pozycjach literatury cytowanej. Ze względu na tak olbrzymią skalę przedsięwzięcia - zapewne - w pracy tej znalazło się stosunkowo mało miejsca na prądnice zwiększonej częstotliwości, w tym maszyny typu induktorowego.

Z tego względu pragnę pokusić się o pewne rozwinięcie tematu, przedstawiając skrótowno, w miarę istniejącej możliwości objętościowej, zarys rozwoju prądnic induktorowych zwiększonej częstotliwości.

Ze względu na wartość częstotliwości prądnic synchroniczne (w tym również induktorowe) podzielić można na maszyny: małej (albo normalnej), średniej i wielkiej częstotliwości. Prądnice o częstotliwości większej niż normalna nazywa się umownie maszynami zwiększonej częstotliwości.

Prądnice małej częstotliwości obejmują zakres do 100 Hz włącznie. Jako zakres średniej częstotliwości przyjmuje się zwykle $100 \div 10\,000$ Hz. Za prądnice wielkiej częstotliwości można uważać maszyny o $f = 10\,000 \div 200\,000$ Hz. Do uzyskiwania tak znacznych częstotliwości służą prądnice induktorowe o specjalnej konstrukcji: prądnica Alexandersona i prądnica Thury'ego opisane w [2] i [3].

Częściowy podział prądnic zwiększonej częstotliwości ze względu na rodzaj konstrukcji i sposób wzbudzenia pojawił się w pracach [4, 5, 6]. Szczegółowy podział, aktualny do dziś, zaproponował autor niniejszego w [7].

Prądnice o biegunach stałych, zwane induktorowymi mogą być wzbudzone za pomocą elektromagnesów lub magnesów trwałych. Rozróżniamy ich dwa zasadnicze typy: prądnice różnobiegunową (heteropolarną) i jednakobiegunową (homopolarną). Każdy z tych rodzajów może mieć strukturę uzębienia typu Guya lub Lorentza - Schmidta.

2. ZARYS ROZWOJU PRĄDNIC INDUKTOROWYCH

Uważa się, że prądnica induktorowa pojawiła się po raz pierwszy w połowie XIX wieku. W 1854 r. opatentowano w Anglii maszynę, której zasada działania odpowiadała współczesnemu pojęciu maszyny induktorowej. W 1877 roku prądnice induktorową opatentował Paweł N. Jabłoczkow, urodzony w powiecie saratowskim w 1847 roku (francuski patent nr 119702).

Niektórzy autorzy nazywają taką maszynę prądnicą reluktancyjną [1, 8] od niemieckiego „der Reluktanz-Generator” [5, 9], lecz na całym świecie rozpowszechniła się nazwa, zbliżona do angielskiej „inductor type machine” [10] albo „inductor alternator” [6, 11, 12], lub odpowiednika rosyjskiego „generatory induktornogo tipa” [13], albo „indukturnyje generatory” [14, 15, 16], czy też „indukturnyje alternatory” [17]. Nazwa ta została też przyjęta w Polsce jako „prądnica induktorowa” [1, 3, 18, 19, 20].

Maszyna opatentowana przez Jabłoczkowa była już typową prądnicą induktorową - miała ona wirnik w postaci uzębionej tarczy. Zarówno uzwojenie wzbudzenia, jak i twornika znajdowały się na stojanie. W 1885 r. Aleksiej Klimenko uzyskał rosyjski patent na maszynę induktorową o dużej jak na owe czasy dla tego typu maszyny mocy 3,5 kW. Na tej samej zasadzie oparli również swoje rozwiązania Kingdon i Thompson.

Pracownik firmy AEG Michał O. Doliwo-Dobrowolski urodzony w Sankt Petersburgu (w 1862 r.) zajmował się badaniami prądnic induktorowych w celu porównania ich własności z własnościami klasycznych prądnic synchronicznych o biegunach zmiennych. W 1890 r.

Nicola Tesla urodzony w Smilan w Krocacji (w 1856 r.) opracował i zrealizował prądnicę induktorową o częstotliwości 15 000 Hz, prędkości obrotowej 2500 obr/min i mocy 1 kW. Nieco później, w latach 1893-1900 szereg prądnic induktorowych o częstotliwości 10 000 Hz i mocy 2 - 4 kW zrealizował Thury.

Sprzyjającym wydarzeniem dla dalszego rozwoju prądnic induktorowych było wynalezienie w 1895 r. radia. Zaistniała potrzeba uzyskania źródła dużej mocy o częstotliwości 50-60 kHz do zasilania obwodu antenowego radiostacji. Niemożliwe było uzyskanie tak dużej częstotliwości przez zwiększanie liczby par biegunów i prędkości obrotowej. Idealnie nadawała się do tego celu prądnicę induktorowa, w której wielką częstotliwość można było uzyskać przez zwiększenie liczby zębów wirnika, zgodnie ze wzorem $f = Z n / 60$ [Hz].

Uzyskiwanie znacznych częstotliwości w prądnicach induktorowych było możliwe dzięki wynalezieniu w 1901 r. przez Francuza Georgesa Guya (brytyjski patent nr 18027) struktury strefy czynnej prądnic induktorowej, polegającej na tym, że podziałka żłobkowa wirnika jest równa podziałce żłobkowej stojana. Jest to prądnicę ze zmiennym (pulsującym) strumieniem w zębach wirnika. W prądnicę Guya, uzwojenie twornika umieszczone jest w specjalnych, dużych żłobkach, które obejmują pewną liczbę małych zębów, odpowiadających zębom wirnika [5, 6, 10, 21, 22]. Do dziś struktura Guya służy do uzyskiwania największych częstotliwości.

Prądnicę induktorowa z praktycznie stałym co do wartości bezwzględnej strumieniem w zębach wirnika została wynaleziona przez Karla Schmidta i opracowana przez firmę C. Lorenz A.G. znacznie później, bo dopiero w okresie drugiej wojny światowej. Niewątpliwie dobrze zorientowany w tej sprawie G. Hagedorn [23] nazywa ją prądnicą Schmidta lub Schmidta-Lorenza. Jednak w literaturze światowej bardzo rozpowszechniła się nazwa prądnicę Lorenza [4, 24, 25]. W późniejszych latach stosowano nazwę struktura Lorenza-Schmidta [18, 26].

Na lata początkowe naszego stulecia przypada szereg osiągnięć konstrukcyjnych w dziedzinie prądnic induktorowych. Najpierw K. A. Steinmetz zrealizował prądnicę o niedużej mocy 300 V A na częstotliwość 50 kHz, a następnie w 1906 r. prądnicę o mocy 59 kW, również na częstotliwość 50 kHz.

Najwyższą z uzyskiwanych dotychczas częstotliwości prądnic induktorowych osiągnął w 1909 r. Alexanderson, który zrealizował najpierw prądnicę na $f = 100$ kHz, a następnie 200 kHz [27]. Były one przeznaczone do urządzeń telegrafii bezprzewodowej.

W. P. Wołogdin zrealizował w Rosji w 1912 r. prądnicę o mocy 2 kW, częstotliwości 6 kHz i prędkości obrotowej 20 000 obr/min, a później 150 kW i 600 kW, we wszystkich przypadkach na $f = 15 - 20$ kHz [15].

Równoległe z opracowaniem nowych konstrukcji rozwijały się prace nad doskonaleniem własności prądnic induktorowych. W 1920 r. Robert Pohl opracował dokładną metodę określania strat dodatkowych w miedzi [28]. W 1921 r. K. Schmidt pracował nad maszynami induktorowymi przeznaczonymi do telegrafii bezprzewodowej [29]. W 1923 r. F. Rosenberg opracował metodę określania (i ograniczania) strat w stali, przydatną w przypadku prądnic

induktorowych [30]. W 1924 r. S. Chiba opracował problem stosowania w prądnicach induktorowych uzwojeń m-fazowych i określania odpowiedniej w tym przypadku liczby żłobków stojana [31].

Podstawy do opracowania metod obliczania obwodów magnetycznych prądnic induktorowych dały prace K. Metzlera, na przykład z r. 1927 [32]. Natomiast K. Schmidt w 1928 r. zajmował się rodzajami budowy generatorów średniej i wielkiej częstotliwości [33]. C. M. Laffoon w 1924 r. [34], J. H. Walker w 1933 r. [35] oraz J. Tittel w 1937 r. [36] zwrócili uwagę na fakt, że jeden z najstarszych typów generatorów elektrycznych znów znalazł szerokie zastosowanie do generowania prądów zwiększonej częstotliwości, szczególnie dla telegrafii bezprzewodowej, a także dla pieców indukcyjnych do obróbki metali (topienie, spawanie, suszenie).

W latach czterdziestych, już w czasie drugiej wojny światowej i tuż po jej zakończeniu, prace nad maszynami zwiększonej częstotliwości typu induktorowego zaczęły się intensywnie rozwijać w związku z ich zastosowaniem w radiolokacji i lotnictwie. Z tego okresu pochodzą interesujące prace J. H. Walkera [4, 11]. Cenna praca [11] była dużym wkładem do rozwoju maszyn typu induktorowego. Dała ona teoretyczne podstawy do projektowania zarówno prądnic jednakobiegunowych, jak i różnobiegunowych. Walker przedstawił w niej różne typy uzwojeń twornika i opracował wzory, wykazujące, że niektóre rodzaje uzwojeń zapewniają mniejsze oddziaływanie twornika niż inne. Wykazał konieczność stosowania obwodów tłumiących w przypadku uzwojeń wielofazowych. Zwrócił uwagę na szkodliwe prądy łożyskowe w prądnicach różnobiegunowych.

W pracy [4] Walker preferuje prądnicę różnobiegunową jako najkorzystniejszą w celu uzyskiwania wielkiej częstotliwości (do 50 000 Hz) z przeznaczeniem do topienia metali i hartowania powierzchniowego stali. Przedstawia elementy teorii tej maszyny.

Niektóre odbiorniki prądu przemiennego, na przykład stosowane w instalacji pokładowej samolotu, wymagają zbliżonego do sinusoidy kształtu krzywej napięcia, co w prądnicach induktorowych jest trudne do uzyskania. Stało się więc zadaniem poprawy kształtu krzywej napięcia tej prądnicy. Uzyskać to można przez opracowanie najkorzystniejszej struktury strefy czynnej. Przez szerokie pojęcie struktury strefy czynnej rozumie się wybór rodzaju uzębienia prądnicy: typu Guya lub Lorenza - Schmidta, określenie właściwych proporcji oraz liczby zębów stojana i wirnika, ich wymiarów geometrycznych, a także najkorzystniejszego kształtu zęba wirnika. Zagadnienia te mogą być rozwiązane na drodze teoretycznej lub doświadczalnej, obejmującej badania rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Spośród prac doświadczalnych na uwagę zasługuje praca R. W. Wiesemanna [37]. Metoda Wiesemanna polegała na żmudnym odtwarzaniu obrazów pól magnetycznych dla różnych wymiarów zęba prostokątnego za pomocą metody graficznej Lehmana - Richtera.

Praca Wiesemanna ma jednak ograniczony zasięg, gdyż brany jest pod uwagę wyłącznie ząb prostokątny, a rozważania prowadzone są wyłącznie dla biegu jałowego. Wyniki badań Wiesemanna obarczone są ponadto dużym błędem ze względu na małą dokładność modelowania graficznego.

W pracach N. Ja. Alpera [38] i A. A. Terzjana [39] badano współczynniki charakterystyczne pola magnetycznego w szczelinie powietrznej prądnicy induktorowej przydatne przy obliczaniu maszyny, posługując się specjalną makietą statyczną. Wpływ żłobków stojana pominięto.

Niektórzy autorzy posługiwali się metodą analityczną. N. N. Hancock w pracy [40] z 1957 r. sceptycznie odnosi się do możliwości uzyskania sinusoidalnego przebiegu w prądnicy induktorowej. Podaje on szereg warunków, jakie muszą być spełnione w tym celu. Proponuje metodę matematyczną określenia najkorzystniejszej liczby zębów stojana i wirnika, jednak przydatną tylko dla niektórych, szczególnych typów prądnic induktorowych.

Analizę matematyczną, zmierzającą do określenia najkorzystniejszej liczby zębów wirnika trójfazowej prądnicy induktorowej, przedstawił w 1960 r. A. K. Das Gupta w swoich pracach [12, 41]. Analiza ta odnosi się jednak tylko do szczególnych typów prądnic induktorowych. Dopiero Ł. Česnak i R. Palka w 1965 r. opublikowali bardziej ogólną teorię, przydatną dla wszystkich typów jednofazowych prądnic induktorowych zarówno Lorenza - Schmidta, jak i Guya [26]. Metodą analityczną posłużył się również B. S. Zečichin do określenia rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej prądnicy induktorowej [42] oraz B. Oprendeck [43], który zajmował się określeniem optymalnych wymiarów zęba prostokątnego wirnika prądnicy jednakobiegunowej średniej częstotliwości przy biegu jałowym.

Ogólną cechą charakterystyczną tych opracowań jest przyjmowanie daleko idących założeń upraszczających, potrzebnych do otrzymania wymaganego rozwiązania analitycznego. Powierzchnia stojana przeważnie przyjmowana jest jako gładka (nie uzębiona) [43], badania analityczne dotyczą biegu jałowego, brany jest pod uwagę wyłącznie ząb o kształcie prostokątnym.

W 1964 r. została obroniona w Wojskowej Akademii Technicznej praca doktorska autora niniejszej publikacji pt. „Badania modelowe nad strukturą strefy czynnej jednofazowych prądnic induktorowych podwyższonej częstotliwości, wykonana pod promotorstwem prof. Zygmunta Gogolewskiego [44]. W pracy tej uwzględniono żłobkowanie stojana, badania prowadzono nie tylko przy biegu jałowym, lecz również pod obciążeniem, określono najkorzystniejsze kształty i proporcje zębów, opracowano i zrealizowano uniwersalny, ruchomy model fizyczny prądnicy induktorowej, według pomysłu prof. Z. Gogolewskiego [45], a także opracowano metodę modelowania fizycznego prądnic induktorowych za pomocą tego modelu oraz teoretyczne podstawy modelowania fizycznego tych prądnic, opierając się na teorii prawdopodobieństwa. Wyniki badań opublikowano w pracach wspólnych promotora i autora [18, 19, 46] oraz indywidualnych tego ostatniego [47, 48, 49].

Na lata sześćdziesiąte przypada okres intensyfikacji prac na temat prądnic induktorowych, wykonywanych w Akademii Nauk Łotewskiej SSR. Prace te dotyczą głównie badań pól magnetycznych w szczelinie powietrznej maszyny induktorowej w celu określenia jej podstawowych parametrów. Są to między innymi prace W. W. Apsita, Ł. E. Dombura i K. E. Skruzitisa.

Maszyna induktorowa małej mocy może również służyć jako prądnica tachometryczna z mostkowym układem prostowniczym i układem rewersji napięcia na wyjściu. Prądnicę taką opracował, zrealizował w WAT i przebadał autor niniejszego artykułu [50]. Ta jednopokietowa, jednakobiegunowa prądnica induktorowa o strukturze strefy czynnej typu Lorenza - - Schmidta z wyjściem stałoprądowym ma tę przewagę nad komutatorowymi prądnicami tachometrycznymi prądu stałego, że jest bezzestykowa, ma duże nachylenie charakterystyki i małe pulsacje napięcia.

3. PERSPEKTYWY ROZWOJOWE NA NAJBLIŻSZĄ PRZYSZŁOŚĆ I PO DWUTYSIĘCZNYM ROKU

Perspektywy rozwojowe prądnic induktorowych zwiększonej częstotliwości są duże, nie tylko ze względu na zastosowania w lotnictwie, lecz również z uwagi na ich przydatność w energetyce kosmicznej [51]. Rozpatrując podstawowe kierunki technicznego rozwoju kosmicznych systemów zasilania elektrycznego do roku 2000 i dalej, trzeba przewidywać gwałtowny wzrost wymaganej mocy elektrycznej systemów zasilania elektrycznego do 1000 MW.

W przyszłości przewiduje się wykorzystanie w systemach zasilania elektrycznego pojazdów kosmicznych prądu przemiennego o częstotliwości 20 kHz. Walory techniczne systemów zasilania elektrycznego przy tej częstotliwości podkreśla się w wielu pracach, a wśród nich [52].

Zastosowanie prądu przemiennego wielkiej częstotliwości umożliwia zmniejszenie masy układu zasilania elektrycznego wskutek zmniejszenia masy sieci rozdzielczej i ewentualnych przetwornic oraz zwiększenie sprawności i niezawodności systemu zasilania elektrycznego. W badaniach przeprowadzonych na zlecenie NASA stwierdzono, że system zasilania elektrycznego prądu przemiennego o $f = 20$ kHz ma w przybliżeniu o 30% mniejszą masę i o 5 - 10% większą sprawność w porównaniu z systemami prądu przemiennego na $f = 60$ Hz i $f = 400$ Hz, a także systemem zasilania prądu stałego [52].

Do zasilania wielu odbiorników urządzeń pokładowych niezbędne są źródła wysokiego napięcia, które uzyskiwano z udziałem transformatora podwyższającego. Jest korzystne zastosowanie w tym przypadku generatora wysokiego napięcia, którego zadanie najlepiej może spełnić prądnica induktorowa.

Prądnica przeznaczona do pracy w warunkach kosmicznych powinna mieć nie tylko dużą odporność na wysokie temperatury, lecz również na promieniowanie radioaktywne. Powinna mieć też odpowiednio długi czas pracy. Temperatura nagrzewania części maszyn elektrycznych stosowanych w kosmosie może dochodzić do 300°C. Ze względu na silne promieniowanie w maszynach tych stosuje się izolację ceramiczną i nie należy stosować typowych smarów. Stosuje się smarowanie ciekłymi metalami, najczęściej ciekłym potasem,

który służy jednocześnie jako czynnik chłodzący, konieczny by nie przekroczyć granicznej temperatury. Taką specjalną prądnicę induktorową opisano w [51].

LITERATURA

1. Dąbrowski M. I.: Przegląd rozwoju maszyn synchronicznych. Materiały konferencyjne : XXXI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych. Maszyny synchroniczne, Ustroń 20 - 23 września 1995, s. 33 - 54.
2. Minardi M.: Alternatori a ferro rotando a media e alta frequenza. Electrificazione, Milano, 1953.
3. Wróbel T.: O prądnicach średniej i wielkiej częstotliwości. Biuletyn WAT nr 10, 1960 s. 98 - 120.
4. Walker J. H.: High frequency alternators. Journal I.E.E. London nr 31, 1946, s.67 - 80.
5. Schmitz T.: Der Mittelfrequenzgenerator nach System Guy. ETZ - A, Berlin 1957, Bd 78 nr 10, s. 358 - 361.
6. Raby K. F.: High frequency inductor alternators. Electrical Times, London, 23 October 1958, s. 613 - 617.
7. Wróbel T.: Prądnice zwiększonej częstotliwości. Wyd MON, Warszawa 1972.
8. Straszewski A.: Układ zastępczy prądnicy reluktancyjnej średniej częstotliwości o polu tętniącym. Prace Instytutu Elektrotechniki nr 25, 1961.
9. Putz W.: Neuere Entwicklungen in Bau elektrischer Maschinen. ETZ - A, 1955.
10. Pohl R.: Theory of pulsating - field machines. Journal I.E.E. nr 31, London 1946, s. 37 - 47.
11. Walker J. H.: The theory of the inductor alternator. Journal I.E.E., 1942 s. 227 - 241.
12. Das Gupta A. K.: Mathematical analysis of inductor alternators. Transactions AIEE nr 50, 1960, s. 684 - 689.
13. Alper N. J.: Generatory induktornogo tipa. Vestnik elektropromyslennosti, Moskwa nr 8, 1957.
14. Szarow W. S.: Elektromaszinyje induktornyje generatory. Gosenergoizdat, 1961.
15. Alper N. Ja., Tierzjan A. A. : Induktornyje generatory. Energia, Moskwa 1970.
16. Żeżerin R. P.: Induktornyje generatory. Gosenergoizdat, Moskwa - Leningrad 1961.
17. Krasnoszapka M. M.: Induktornyje alternatory powyszzennoj czastoty. WWA im. Żukowskiego, 1948.
18. Gogolewski Z., Wróbel T.: Badania modelowe prądnic induktorowych na podwyższoną częstotliwość. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka nr 98, z. 17, 1964, s. 3 - 11.

19. Gogolewski Z., Wróbel T.: Geometria strefy czynnej prądniczy induktorowej typu Lorenza - Schmidta. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka nr 158, z. 20, 1966, s. 3 - 27.
20. Bajorek Z.: Elektromaszynowe elementy automatyki, WNT, Warszawa 1969.
21. Büssing W.: Das Betriebsverhalten der Guy - Maschine. E. u. M. Bd. 76 nr 9, 1959, s. 1 - 9.
22. Bunea V.: About the theory of Guy high frequency generator. Revue d'electrotechnique et d'energetique. 1962, nr 1: s. 57 - 77, nr 2: s. 249 - 277.
23. Hagedorn G.: Mittelfrequenz - Generatoren grösserer Leistung. Sonderbauformen Elektrischer Maschinen, GMBH Berlin 1958, s. 128 - 154.
24. Davies E., Pedersen N.: An experimental and theoretical study of the Lorenz - type inductor alternator under load. IEEE Transactions of Applications and Industry, nr 67, 1963, s. 174 - 178.
25. Aleksiejewa M. M.: Maszynnye generatory powyszennoj czastoty. Energia, Leningrad 1967.
26. Czesnak Ł., Palka R.: Obszczaja teoria odnofaznych induktornyh generatorow. Izw. Wuzow „Elektromechanika” nr 10, 1965 s. 1084 - 1095.
27. Aleksanderson: Hochfrequenzmaschinen für drahtlose Telegraphie. ETZ 1912.
28. Pohl R.: Eine einfache Theorie der zusätzlichen Verluste im Nutenkupfer von Wechselstrom - Maschinen. Elektrotechnische Zeitschrift 41, 1920, s. 908.
29. Schmidt K.: Die Maschinen für drahtlose Telegraphie. Elektrotechnische Zeitschrift 42, 1921, s. 245 i 280.
30. Rosenberg F.: Wirbelströme in massivem Eisen. Elektrotechnik und Maschinenbau, 41, 1923, s. 317.
31. Chiba S.: Notes on polyphase high - frequency alternators. Journal IEE, 62, 1924, s. 947.
32. Metzler K.: Die Magnetisierungscharakteristik der Gleichpol - Induktortype. Archiv für Elektrotechnik, 19, 1927, s. 57.
33. Schmidt K.: Fortschritte im Bau von Mittel - und Hochfrequenzmaschinen. Elektrotechnische Zeitschrift, 49, 1928, s. 1565.
34. Laffoon C. M.: High - frequency alternators. Electric Journal, 21, 1924, s. 416.
35. Walker J. H.: Recent developments in high - frequency alternators. BTH. Activities, 9, 1933, s. 81.
36. Tittel J.: Grenzleistungen im Bau von Mittel - und Hochfrequenzmaschinen. VDE Fachberichte 9, 1937, s. 65.
37. Wiesemann R. W.: Graphical determination of magnetic fields. Transactions AIEE, Febr. 1927.
38. Alper N. Ja.: Rasczet magnitnyh polej w zazorie induktornoj maszyny s postojannym potokom. Wiestnik Elektropromyslennosti nr 3, 1962.

39. Tierzjan A. A.: Magnitnoje pole w wozdusznom zazorie induktornych maszin s pulsirujuszczim potokom. Wiestnik Elektropromyslennosti nr 5, 1962.
40. Hancock N. N.: The production of a sinusoidal flux wave with particular reference to inductor - alternator. The Proceedings IEE nr 5, 1957, s. 167 - 173.
41. Das Gupta A. K.: Analitical method to find the best number of stator and rotor teeth of inductor alternator for 3 - phase sinusoidal voltage generation. AIEE Transactions v. 50, 1960, s. 674 - 679.
42. Zeczichin B. S.: Magnitnoje pole w zazorie induktornoj masziny s pulsirujuszczim potokom zubca rotora. Issledowanije specjalnych awjacionnych el. maszin. Oborongiz, Moskwa 1961.
43. Opredeck B.: Asupra determinarii formei optime a dentilor generatoarelor de medie freuenta de tip omopolar. Bull. Stint. si Tehn. Inst. Politehn. nr 2, 1957.
44. Wróbel T.: Badania modelowe nad strukturą strefy czynnej jednofazowych prądnic induktorowych podwyższonej częstotliwości. Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1964.
45. Gogolewski Z.: Analiza projektu wstępnego dla dokumentacji generatora synchronicznego jednofazowego 250 kV·A, 750/1000 V, 1960 okr/s. Gliwice 1952. Praca nie publikowana.
46. Gogolewski Z., Wróbel T.: Układ zastępczy modelu fizycznego, jako uniwersalny układ zastępczy prądnicy induktorowej. Biuletyn WAT nr 5, 1965, s. 85 - 100.
47. Wróbel T.: Wpływ trzeciej harmonicznej poprzecznego strumienia twornika na kształt fali napięcia homopolarnej prądnicy induktorowej. Biuletyn WAT nr 6, 1965, s. 67 - 79.
48. Wróbel T.: Zagadnienie proporcji zęba wirnika prądnicy induktorowej. Biuletyn WAT nr 12, 1966, s. 155 - 168.
49. Wróbel T.: Określenie liczby zębów stojana prądnicy induktorowej typu Lorenza-Schmidta. Biuletyn WAT nr 4, 1971, s. 115 - 123.
50. Wróbel T.: Induktorowa prądnica tachometryczna o wyjściu stałoprądowym ze zmniejszoną pulsacją napięcia. Rozprawy Elektrotechniczne z. 2, 1979, s. 613 - 631.
51. Wróbel T.: Militarne kosmiczne systemy energetyczne przyszłości. Przegląd Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej, 1991 cz.I: nr 3, s. 66 - 73, cz.II: nr 10, s. 59 - 65.
52. Aronson B. B.: High - frequency power for space. Mach. Design, nr 20, 32, 34, 36, 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Politechnika Śląska

Wpłynęło do Redakcji dnia 5 lutego 1996 r.

Abstract

The inductor-type alternators are classified according to the range of frequencies into small, medium and high frequency machines. The review of their development from the date of invention to present day and beyond year 2000 is presented. Some periods of rising interest in machines of this type are shown in the article. The first period (XIX century) was connected with a tendency to obtain a relatively high frequency up to 15 kHz and power up to 4 kW. The radio invention effected on the further, higher interest in inductor-type alternators at the end of XIX and the beginning of XX century. The frequency was within the range 50 - 60 kHz. The great construction achievements were observed in that time (Alexanderson 200 kHz.)

The further development of alternators is connected with the evolution of wireless telegraph and induction furnaces which took place in the twenties and the thirties. Many works which aimed at improving inductor-type alternators appeared in this period (R. Pohl, K. Schmidt, J. H. Walker).

After the Second World War the interest was caused by application inductor-type alternators in radiolocation and aviation. Many theoretical works appeared (N. N. Hancock, A. K. Das Gupta, W. W. Apsit, Z. E. Dombur). The inductor type alternators appeared as a tachogenerators in the seventies. They were commonly used in control systems.

The wider use of inductor type-alternators will be possible beyond 2000 year when the 20 kHz frequency will be implemented in space power systems.