ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1972

Seria: ELEKTRYKA z. 38 Nr kol. 357

ADAM RÓŻYCKI
MARIAN KOLMER
Instytut Metrologii i Maszyn Elektrycznych

PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA NISKICH TEMPERATUR W BUDOWIE MASZYN SYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W pracy podano krótką charakterystykę nadprzewodników i czystych metali stosowanych na uzwojenia kriogenicznych generatorów synchronicznych. Szczegółowo omówiono wpływ budowy na wskaźnik wykorzystania mocy z jednostki objętości.

1. Dotychczasowy stan zaawansowania prac nad zastosowaniem kriotechniki w maszynach elektrycznych

W ostatnim dziesięcioleciu obserwuje się wzrost zainteresowania wykorzystaniem nadprzewodników i czystych metali schładzanych do niskich temperatur w budowie urządzeń energetycznych a w tym i maszyn elektrycznych.

Maszyny elektryczne - kriogeniczne, charakteryzują się znacznie zmniejszonymi wymiarami i ciężarem a także większą sprawnością od maszyn budowy konwencjonalnej, tj. z uzwojeniami miedzianymi i stalowym obwodem ferromagnetycznym. Szczególnie intensywne są badania nad wykorzystaniem kriotechniki w budowie generatorów synchronicznych największych mocy. Dotychczasowe prace są prowadzone wielokierunkowo.

Jedne ośrodki badawcze, np. we Francji, pracują nad konstrukcjami turbogeneratorów z uzwojeniami wykonanymi z czystego aluminium schładzanego ciekłym wodorem (20,4°K), wyzyskując tym samym właściwości zmniejszania się rezystywności z temperaturą inne, jak np. w USA, ZSRR, NRD wykonały już modele doświadczalne maszyn bez obwodu magnetycznego ze stali z konwencjonalnym twornikiem o nadprzewodzącym uzwojeniu wzbudzenia, schładzanym ciekłym helem (4,2°K).

Najbardziej atrakcyjne byłoby zbudowanie całkowicie nadprzewodnikowego generatora synchronicznego, pozbawionego ferro-magnetycznego obwodu. Dla realizacji tego zamierzenia trzeba by było jednak dysponować nadprzewodnikami nie wykazującymi strat w przemiennym polu magnetycznym i cechującymi się wysoką wartością krytycznego pola magnetycznego.

Mimo, że udało się już zbudować w 1966 r. w USA nadprzewodnikowy generator synchroniczny o małej mocy znamionowej, duże straty dodatkowe, występujące w nadprzewodnikowym uzwojeniu twornika, spowodowały nieprzydatność praktyczną tego rozwiązania.

2. Materiały przewodzące stosowane na uzwojenia w maszynach elektrycznych kriogenicznych

Jak wynika z opisu maszyn opublikowanym w literaturze zagranicznej w maszynach synchronicznych kriogenicznych uzwojenia mogą być wykonane z materiałów nadprzewodzących i z czystych metali schładzanych do niskich temperatur.

Szerokie rozpowszechnienie znalazły szczególnie nadprzewodniki II rodzaju tzw. nadprzewodniki twarde, a mianowicie; stopy niobu z cyrkonem NbZr, niobu z tytanem NbTi i związki niobu z cyną Nb_3Sn, które przy schładzaniu do odpowiednio niskich temperatur tracą rezystywność mogąc przewodzić prąd bez strat elektrycznych. Nadprzewodniki te pozwalają na stosowanie dużych gęstości prądowych powyżej 1000 A/mm^2 i nie tracą nadprzewodnictwa w polach magnetycznych o wartości indukcji przekraczającej 5T.

W tabeli I zestawiono podstawowe własności tych nadprzewodników.

Ostatnio doniesiono o odkryciu nadprzewodnikowego układu niob-aluminium-german NbAlGe o temperaturze krytycznej powyżej 20°K.

Tabela I

Materiał	Temperatura krytyczna T_k [°K]	Krytyczna indukcja magnetyczna B_k [T]	Krytyczna gęstość prądowa j [A/mm^2] przy 4,2 [°K] B = 5 [T]
NbTi	9,5	12	2×10^3
NbZr	11	8	2×10^3
V_3 Ga	14	20	10
Nb_3 Sn	18,5	22	10^4

Utrata nadprzewodnictwa następuje bądź przy przekroczeniu temperatury krytycznej T_k, bądź przy przekroczeniu dopuszczalnej wartości prądu I_k lub przy przekroczeniu natężenia zewnętrznego pola magnetycznego H_k i to nawet wtedy, gdy nadprzewodnik ma temperaturę mniejszą od T_k.

Nadprzewodniki II rodzaju mają jednak wadę, która ogranicza ich zastosowanie w uzwojeniach prądu przemiennego.

Przemienne pole magnetyczne powoduje powstanie strat na prądy wirowe i histerezę, proporcjonalnych do wartości indukcji magnetycznej i częstotliwości. Graniczna wartość przemiennego pola przy częstotliwości przemysłowej 50 Hz wynosi około 0,5 ÷ 1 T. Stąd wykorzystanie nadprzewodników II rodzaju w maszynach synchronicznych jest ograniczone do uzwojeń wzbudzenia zasilanych prądem stałym.

Twornik można wykonać z miedzi względnie z czystych metali schładzanych do niskich temperatur.

Najbardziej nadającym się obecnie metalem jest aluminium o wysokiej czystości A-999, którego rezystywność w temperaturze ciekłego wodoru (20,4°K) jest przeszło 400 razy niższa niż w temperaturze pokojowej (295°K) i czysty beryl, który posiada dostatecznie niską rezystywność już w temperaturze ciekłego azotu (77,4°K).

Własności mechaniczne czystego berylu są znacznie gorsze niż czystego aluminium w niskich temperaturach.

Aluminium natomiast charakteryzuje się gorszymi własnościami mechanicznymi w temperaturze pokojowej co utrudnia tym samym wykonanie drutu (0,1 mm) i folii na uzwojenia.

W przeciwieństwie do berylu czyste aluminium nie wykazuje zmiany rezystywności w intensywnych polach magnetycznych.

3. Ciecze chłodzące w maszynach elektrycznych kriogenicznych

Wybór właściwego czynnika chłodzącego uzwojenie maszyn kriogenicznych uwarunkowany jest wieloma wskaźnikami technicznymi i ekonomicznymi.

Należą do nich własności cieczy (temperatura skroplenia, ciepło parowania, pojemność cieplna, lepkość) cena gazu, koszt skroplenia i parametry skraplarki.

Rachunek ekonomiczny przeprowadzony dla schładzanych czystych metali wykazał, że optymalna temperatura przy minimum sumy strat w uzwojeniu i mocy wydatkowanej na utrzymanie tej temperatury, waha się w granicach około 20 - 30°K.

Taką temperaturę może zapewnić ciekły wodór (20,4°K) względnie ciekły neon (27,07°K). Ciekły wodór mimo bardzo dobrych własności dielektrycznych (zbliżonych do oleju transformatorowego) ma ograniczone zastosowanie ze względów niebezpieczeństwa wybuchu.

Dla uzwojeń wykonanych z nadprzewodników temperatura pracy jest niższa i zastosowanie helu (4,2°K) jako czynnika chłodzącego okazuje się tutaj najskuteczniejsze. Hel posiada jednak kilka cech niekorzystnych do których zaliczyć należy małą wartość ciepła parowania (10-krotnie mniejszą od wodoru), co w konsekwencji zwiększa wydatek tego medium chłodzącego w maszynie dla utrzymania temperatury pracy.

Inną wadą jest mała sprawność skraplarki helowej. I tak np. dla odprowadzenia 1W strat cieplnych z kriostatu helowego trzeba zużyć 1,4 kW mocy w urządzeniu skraplającym, zaś odprowadzenie tej samej ilości strat z kriostatu azotowego (77,4°K) wymaga już tylko 20 W.

4. Wskaźniki techniczno-ekonomiczne kriogenicznych generatorów synchronicznych z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia

Wychodząc z podstawowej zależności

$$P = 0{,}116\ k_{uz}\ A\ B\ D^2\ L\ n\ 10^{-3},$$

gdzie

P – moc rozwijana przez maszynę [kVA]
k_{uz} – współczynnik uzwojenia dla podstawowej harmonicznej
A – obkład prądowy twornika [A/m]
B – indukcja w szczelinie [T]
D – średnica wewnętrzna stojana [m]
L – długość twornika [m]
n – prędkość obrotowa wirnika [obr/min]

otrzymuje się charakterystyczny wskaźnik ε wykorzystania mocy z jednostki objętości maszyny.

Przy stałej prędkości n wskaźnik

$$\varepsilon = \frac{P}{c\, D^2\, L} = A\, B,$$

gdzie

$$c = 0{,}116\, k_{uz}\, n\, 10^{-3}.$$

Im wskaźnik ten jest większy, tym generator synchroniczny jest lepiej wykorzystany.

Indukcja magnetyczna B w konwencjonalnym generatorze synchronicznym jest ograniczona przez nasycenie obwodu magnetycznego, zaś obkład prądowy A głównie możliwościami schładzania uzwojeń twornika.

Te obydwa parametry elektromagnetyczne można znacznie powiększyć w kriogenicznym generatorze synchronicznym. Zastosowanie nadprzewodników II rodzaju, jako materiału na uzwojenie wzbudzenia, umożliwia wytworzenie indukcji magnetycznej 5 T tj. około 5 ÷ 6 krotnie większej niż w generatorze budowy konwencjonalnej. Uzyskanie indukcji magnetycznej o takiej wartości osiąga się przy bardzo dużych gęstościach prądowych w stabilizowanym nadprzewodnikowym uzwojeniu wzbudzenia ($j > 100$ A/mm^2) praktycznie bez strat.

Konstrukcja generatora synchronicznego bez ferromagnetycznego obwodu z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia i normalnej budowy uzwojeń twornika z miedzi chłodzonej konwencjonalnie, może kilkakrotnie powiększyć moc generatora o niezmienionym gabarycie. Dalsze powiększenie wskaźnika ε jest możliwe przy zastosowaniu uzwojenia twornika z czystego metalu np. aluminium lub berylu, schładzanego do niskiej temperatury. Można wtedy 3 ÷ 5 krotnie powiększyć obkład prądowy A w stosunku do 1800 ÷ 2400 A/cm w generatorach z chłodzeniem wodorowym i wodnym. Teoretycznie jest możliwe blisko dwudziestokrotne zwiększenie wskaźnika ε.

Przy podejmowaniu decyzji o wartości indukcji magnetycznej B i obkładu prądowego A należy wziąć pod uwagę wartości reaktancji synchronicznej X oraz reaktancji przejściowej X'_d.

W ogólnym przypadku względne reaktancje $\underline{X}$ są związane z A i B relacją:

$$\underline{X} = o\,\lambda\,\frac{A}{B},$$

gdzie

λ – przewodność magnetyczna obwodu,
o – współczynnik proporcjonalności.

W maszynach kriogenicznych przewodność magnetyczna λ_{nad} może być kilkakrotnie mniejsza od przewodności dla maszyny konwencjonalnej, λ_{konw}. Zachodzi więc obawa czy zwiększenie stosunku $(\frac{A}{B})_{nad}$ możliwe do osiągnięcia w kriogenicznym generatorze synchronicznym potrafi skompensować mniejszą przewodność magnetyczną λ_{nad} dla utrzymania reaktancyj zbliżonych do wartości w konwencjonalnych generatorach. Przy silnie zmniejszonych wartościach reaktancji, przy równoczesnym zwiększeniu stosunku $(\frac{A}{B})_{nad}$ (a więc nadal przy powiększeniu współczynnika ε) istnieje niebezpieczeństwo czy zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne mocowania uzwojeń twornika, np. w maszynie bezżłobkowej będzie dostatecznie wytrzymałe dla przeciwstawienia się powiększonemu prądowi zwarcia.

Wskaźnik ε w kriogenicznych generatorach synchronicznych wynika z relacji:

$$\varepsilon_{nad} = \varepsilon_{konw}\,\frac{A_{nad}}{A_{konw}}\,\frac{B_{nad}}{B_{konw}}$$

Przy założeniu $B_{nad} = B_{konw}$ wskaźnik ε_{nad} jest wprost proporcjonalny do okładu prądowego twornika A_{nad}.

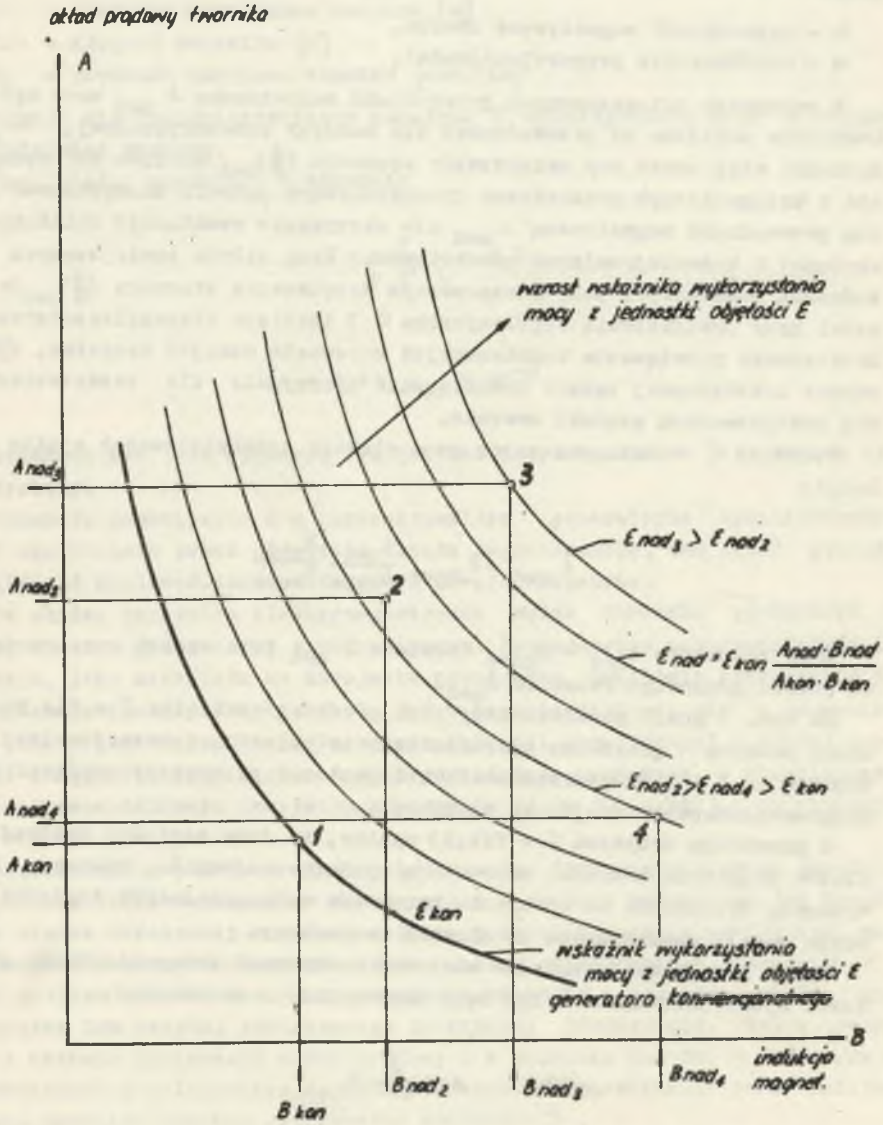
Na rys. 1 gdzie przedstawiony jest przebieg wskaźnika $\varepsilon = f(A,B)$ zaznaczono punktem 1 generator synchroniczny o budowie konwencjonalnej, zaś punktom 2, 3 i 4 przyporządkowano kriogeniczne generatory synchroniczne z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia.

Z przebiegu krzywych $\varepsilon = f(A,B)$ wynika, że duże wartości indukcji i okładów prądowych twornika zapewniają wysoki wskaźnik ε. Maszyny 2 i 3 wymagają stosowania na uzwojenia tworników nadprzewodników względnie czystych metali schładzanych do niskich temperatur.

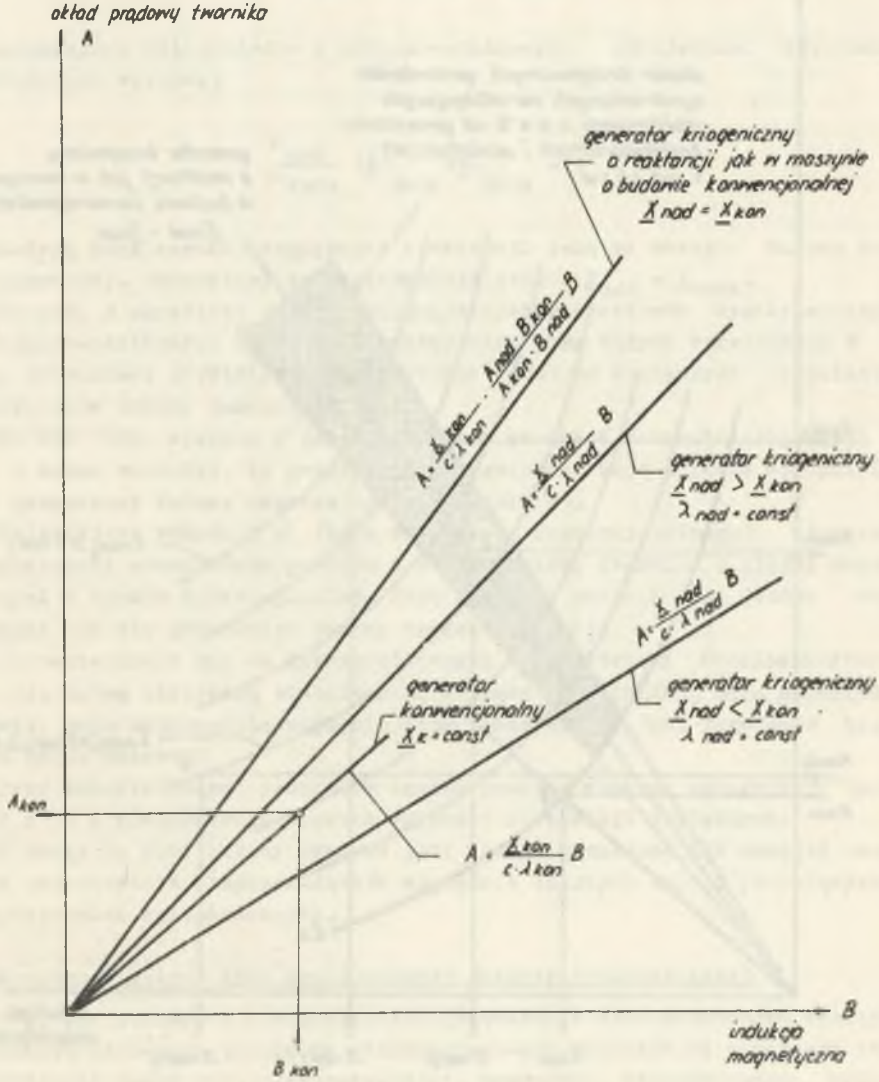
Można prześledzić względne wartości reaktancji kriogenicznych generatorów synchronicznych. W tym celu skorzystamy z zależności:

$$A = \frac{X}{o\lambda}\,B.$$

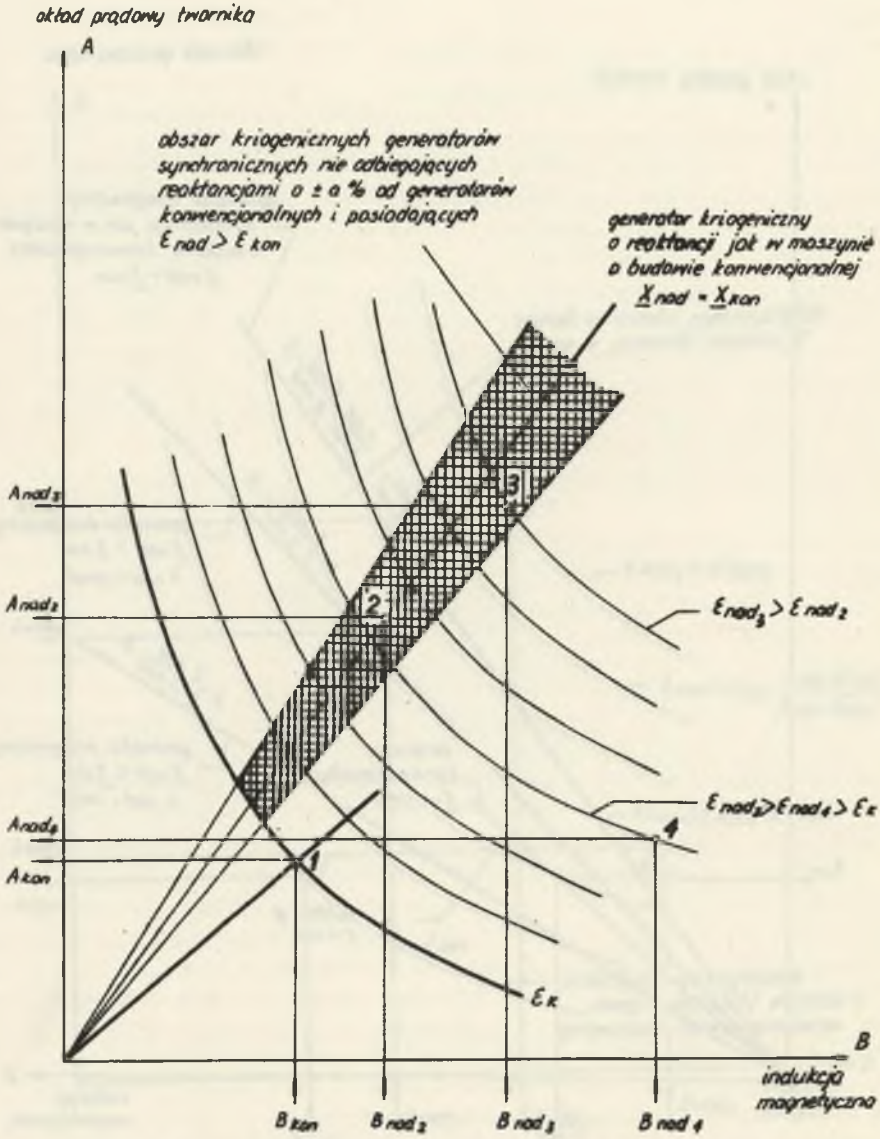
Jeżeli przyjmiemy, że generator synchroniczny o budowie konwencjonalnej posiada pewną określoną wartość λ_{konw} = const, to przy założeniu X_{konw} = const otrzymamy w układzie współrzędnych (A,B) zależność liniową.



Rys. 1. Wskaźnik wykorzystynia mocy z jednostki objętości $\mathcal{E} = f(A,B)$



Rys. 2. Krzywe generatorów synchronicznych o stałych reaktancjach X



Rys. 3. Obszar pracy kriogenicznych generatorów synchronicznych ze względu na korzystne wskaźniki ε oraz X

W podobny sposób wykreślono na rys. 2 pozostałe krzywe dla kriogenicznych generatorów z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia.

Ponieważ

$$X_{nad} = \frac{\lambda_{nad}}{\lambda_{konw}} \left(\frac{A}{B}\right)_{nad} \left(\frac{B}{A}\right)_{konw} X_{konw}$$

to generatory kriogeniczne z nadprzewodnikowymi uzwojeniami wzbudzenia spełniające warunek:

$$\frac{\lambda_{nad}}{\lambda_{konw}} \left(\frac{A}{B}\right)_{nad} \left(\frac{B}{A}\right)_{konw} = 1$$

posiadają taką wartość względnych reaktancji jaką ma maszyna budowy konwencjonalnej. Generatory te reprezentuje prosta $X_{nad} = X_{konw}$.

Na rys. 3 określono obszar kriogenicznych generatorów synchronicznych z nadprzewodnikowymi uzwojeniami wzbudzenia przy dużych wskaźnikach δ i przy stosunkowo niewielkich odchyleniach ($\pm a\%$) od względnych reaktancji generatorów budowy konwencjonalnej.

Na tle tego wykresu w szczególności w punktach charakterystycznych 2, 3 i 4 można zauważyć, że generatory kriogeniczne mają większe wskaźniki δ niż generatory budowy konwencjonalnej (punkt 1).

Najmniejszy wskaźnik δ (lecz większy od konwencjonalnego) odpowiada generatorowi oznaczonemu punktem 4 z uzwojeniami twornika z miedzi schładzanymi w sposób konwencjonalny. Jego stosunek zwarcia jest jednak dużo większy niż dla generatora budowy konwencjonalnej.

Charakteryzuje się on korzystniejszymi własnościami eksploatacyjnymi jak np. dobrą statyczną stabilnością w pracy równoległej, dużą przeciążalnością, małą zmiennością napięcia itp. Niekorzystna jest jego duża krotność prądu zwarcia.

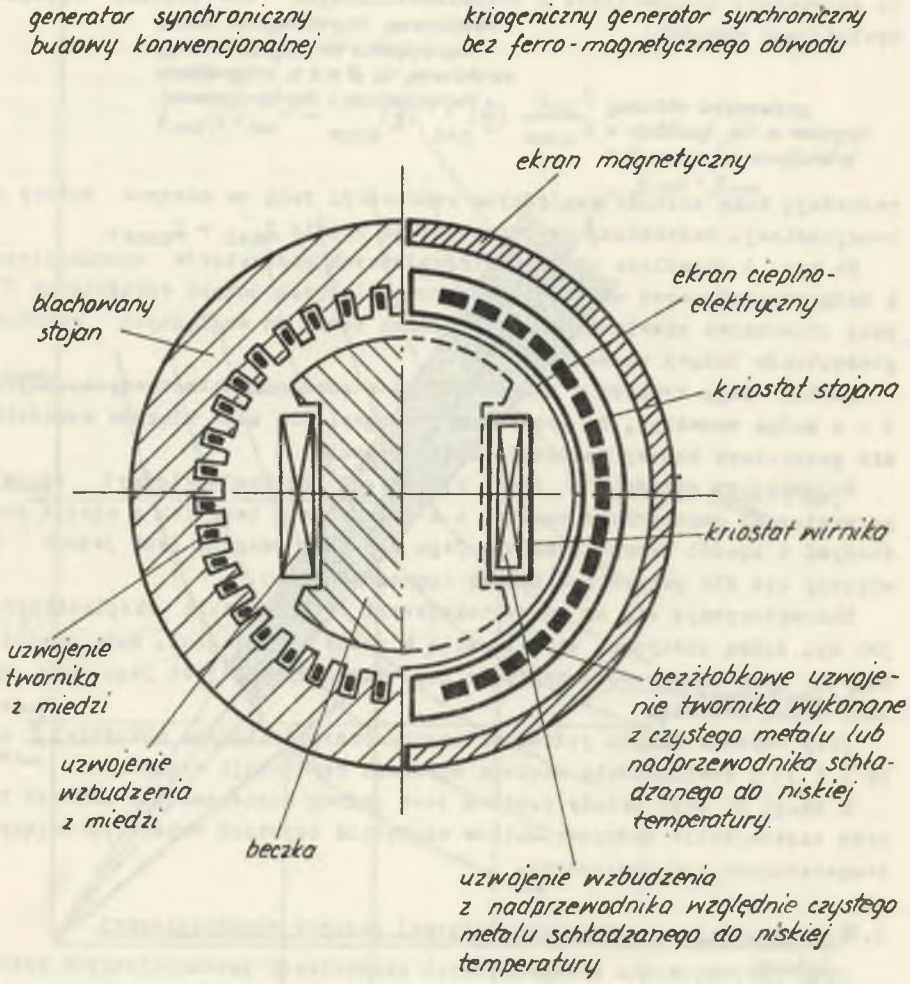
Przy budowie dużych jednostek trzeba przyjąć większe wskaźniki δ (punkty 2 i 3) i równocześnie większe wartości reaktancji względnych.

Z uwagi na duże obciążenia prądowe jest jednak konieczne dla uzwojeń twornika zastosowanie nadprzewodników względnie czystych metali pracujących w temperaturach kriogenicznych.

5. Koncepcja wyboru typu kriogenicznej maszyny synchronicznej

Przy projektowaniu kriogenicznych generatorów synchronicznych występuje szereg złożonych problemów obliczeniowo-konstrukcyjnych z zakresu wielu dziedzin nauki jak: elektrotechniki, mechaniki, termodynamiki, hydromechaniki i fizyki niskich temperatur.

Koncepcja wyboru maszyny kriogenicznej o optymalnych wskaźnikach techniczno-ekonomicznych jest uwarunkowana aktualnym stanem rozwoju nadprzewodników i postępem w budowie skraplarek.



Rys. 4. Budowa obwodu magnetycznego i elektrycznego kriogenicznego generatora synchronicznego (strona prawa) na tle generatora konwencjonalnego (strona lewa)

W świetle obecnego stanu techniki optymalne rozwiązania mają maszyny synchroniczne:

a) o budowie poziomej,
b) bez obwodu magnetycznego ze stali (za wyjątkiem zewnętrznego ekranu elektro-magnetycznego),
c) z wirującym nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia schładzanym ciekłym helem,
d) z bezżłobkowym uzwojeniem twornika, umieszczonym na zewnątrz wirującego uzwojenia wzbudzenia,
e) z uzwojeniem twornika wykonanym z miedzi bądź z czystego metalu schładzanego ciekłym wodorem, azotem względnie helem w stanie gazowym,
f) z oddzielnymi kriostatami dla wirnika i stojana,
g) z ekranem cieplno-elektrycznym umieszczonym pomiędzy uzwojeniem wzbudzenia a twornikiem,
h) z zamkniętym obiegiem kriogenicznym czynnika chłodzącego.

Na rys. 4 przedstawiono w sposób poglądowy budowę obwodu magnetycznego i elektrycznego kriogenicznego generatora synchronicznego z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzającym na tle analogicznej budowy generatora konwencjonalnego.

LITERATURA

1. Danilevič Ja. B., Dombrovskij V.V., Kazovskij E.Ja.: Parametry električeskich mašin peremennogo toka. Izdatelstvo Nauka 1965 r.
2. Anempodistova N.N., Dombrovskij V.V.: Vozmožnosti sozdanija električeskich kriomašin bolšoj moščnosti. Sb. Teoritečiskie i eksperimentalnye issledovanija turbo i gidrogeneratorov bolšoj moščnosti. Izdalelstvo Nauka 1968 r.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
В КОНСТРУКЦИИ СИНХРОННЫХ МАШИН

Р е з ю м е

В работе дана краткая характеристика сверхпроводников и чистых металлов применяемых при проектировании криогенных обмоток синхронных генераторов. Подробно описано влияние конструкции на коэффициент использования мощности с единицы объема.

PERSPECTIVE OF APPLICATION OF LOW-TEMPERATURES IN DESIGN OF THE SYNCHRONOUS MACHINES

S u m m a r y

A consise characteristic of superconductors and pure metals used for windings of the criogenic synchronous generators is presented. The power utilization factor from a volume unit is discussed in details.