ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 82 Elektryka z.16 1963

ZYGMUNT GOGOLEWSKI

Katedra Maszyn Elektrycznych

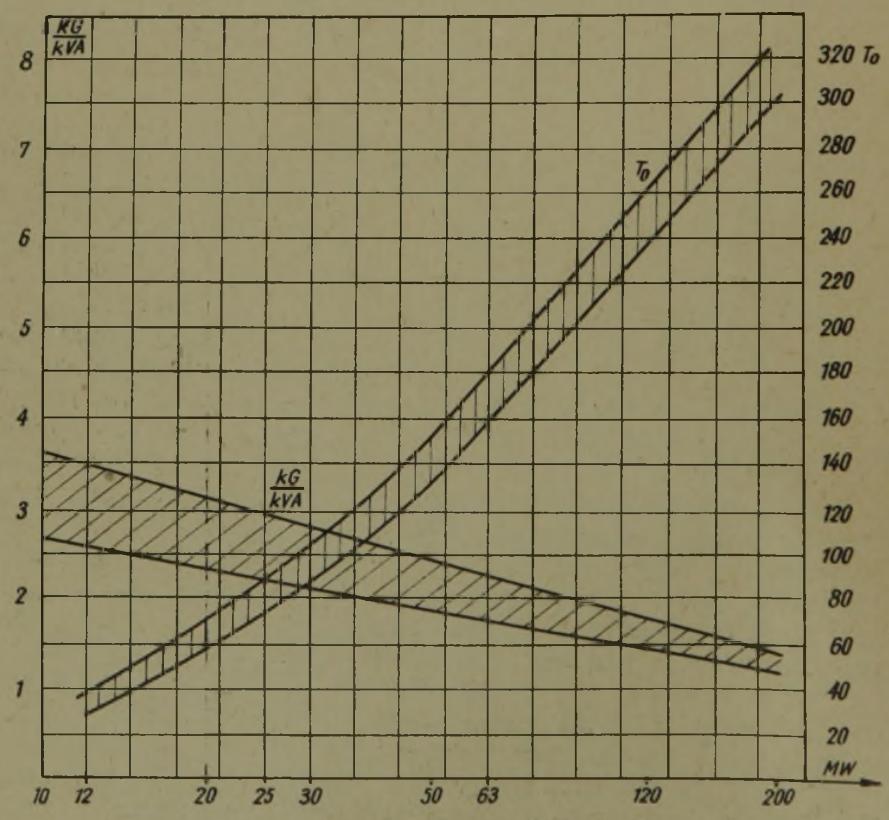
AKTUALNA PROBLEMATYKA TECHNIKI TURBOGENERATORÓW WIELKICH MOCY

Streszczenie. Autor zwraca uwagę na główne trudności konstrukcyjne w zakresie turbogeneratorów wielkich mocy i pomijając problemy wytrzymałościowe podaje cztery grupy zagadnień węzłowych: chłodzenie, izolacja, źródła wzbudzenia i siły dynamiczne. Każdą z nich omawia autor w skrócie syntetycznym i wyciąga wnioski dla przemysłu krajowego.

Rzut oka wstecz na rozwój techniki turbogeneratorowej doprowadza nas do przełomu wieku XIX i XX. Wprawdzie już w ostatnim dziesięcioleciu XIX w. budowano małe TG na moce do 1 MW, jednakże prototyp dzisiejszych TG na 3000 obr. z wirnikiem cylindrycznym pojawił się dopiero po roku 1902. W dalszych latach nastąpił szybki rozwój tej dziedziny, jednakże do roku 1914 moc jednostkowa TG, według moich danych nie przekraczała 30 MW. Lawinowy rozwój energetyki zmuszał przemysł konstrukcyjny do produkowania coraz większych maszyn na coraz większe moce jednostkowe. W chwili obecnej TG na moce 200 i 300 MW w skali światowej są już w wielu krajach z powodzeniem budowane i nie są konstrukcjami unikalnymi, wciąż jednak wielu specjalistów uważa je za "istoty nieznane" twierdząc że zasób doświadczeń z tymi mocami jest wciąż jeszcze niedostateczny. Trzeba nadmienić dla porządku, że w produkcji są już maszyny na 500 MW, zaś w studiach rozpatruje się możliwość budowy maszyn na 1000 MW.

Jak przedstawia się polska twórczość w dziedzinie turbogeneratorów na tle tego zawrotnego postępu techniki państw przodujących? Trzeba znów cofnąć się wstecz a mianowicie do lat 1932-38, w tym bowiem okresie zapadła decyzja uruchomienia w Polsce państwowego przemysłu turbin parowych i turbogeneratorów w oparciu o szwedzką licencję. Warto nadmienić,

że głównym inicjatorem rozpoczęcia produkcji TG w Polsce było wówczas nie Ministerstwo Przemysłu, lecz Ministerstwo Spraw Wojskowych, które traktowało problem jako związany z obronnością kraju. Po drugiej wojnie światowej z zamierzeń międzywojennych nie zostało nic, natomiast rozpoczęcie budowy turbin parowych i generatorów było sprawą przesądzoną już w pierwszych latach po przełomie 1945 r. Zapadła decyzja zlokalizowania fabryki turbin w Elblągu, zaś turbogeneratorów we Wrocławiu. W chwili obecnej program fabryki wrocławskiej obejmuje moce jednostkowe od 2 do 120 MW, poza tym przedziałem planuje się jeszcze maszynę na 200 MW i wreszcie na 300 MW, ponieważ takie moce jednostkowe przewiduje Energetyka w planach do roku 1970 i następnych. Asortyment TG w wykonaniu fabryki wrocławskiej nie stanowi właściwie konsekwentnej serii opartej o zasady normalizacji konstrukcyjnej i technologicznej, a raczej zespół zebrany dość przy-



Rys.1. Wskaźniki ciężarów

padkowo z różnych licencji, co niewątpliwie utrudnia produkcję i wpływa niekorzystnie na jakość wyrobu. Wysuwa się zatem zadanie uporządkowania całej serii, które należy połączyć z poprawieniem parametrów energetycznych i wskaźników ekonomicznych. Jak widać z wykresu rys.1 jednostkowe ciężary maszyn z różnych fabryk, przypadające na 1 kW mocy dadzą się objąć w obszar, ograniczony liniami prostymi. Niestety, produkowane w kraju maszyny mają wskaźniki skupiające się w górnej części obszaru. Zadanie obniżenia tych wskaźników byłoby więc ekonomicznie bardzo pożądane. Przedłużenie serii do 200 MW stanowi odrębne zadanie i jeśli nie obecnie, to w niedalekiej przyszłości będzie musiało być rozwiązane w sposób konsekwentny z punktu widzenia konstrukcyjnego i technologicznego. Wysunięte powyżej zadania związane są z poważnymi trudnościami konstrukcyjno-obliczeniowymi, które będą musiały być przez naszych konstruktorów pokonane. Aby bliżej wniknąć w tę problematykę rozpatrzmy kolejno wszystkie zagadnienia węzłowe.

1. Obliczenia elektromagnetyczne. W przypadku gdy ekstrapolujemy serię w kierunku większych mocy jednostkowych, kryją one w sobie istotne trudności. Pomijając na razie problem chłodzenia, można trudności obliczeniowe scharakteryzować w ten sposób, że są one obwarowane dodatkowymi kryteriami krępującymi projektanta. Opracowanie maszyny większej mocy nie sprowadza się więc do prostych przeliczeń wymiarów geometrycznych według wyprowadzonych zależności algebraicznych. Takim istotnym ograniczeniem jest przede wszystkim średnica wirnika. Ze względu na naprężenia w beczce wirnika wywołane siłami odśrodkowymi, nie jesteśmy w stanie przy obecnych możliwościach metalurgii, przekraczać wymiaru 1100-1180 mm dla średnicy wirnika. Zadanie polega więc na tym, aby mimo powiększenia zadanej mocy np. z 120 na 200 MW praktycznie średnica wirnika nie uległa zwiększeniu. Nasuwałoby się tutaj wyjście z kłopotu przez odpowiednie w stosunku do zwiększenia mocy podłużenie wirnika. Ale i tutaj występują ograniczenia i to bynajmniej nie ekonomicznej lecz czysto technicznej natury. Dwa względy techniczne przychodzą tu do głosu: przede wszystkim przy b. długich wirnikach i dużych zmianach temperatur wydłużenia cieplne miedzi wirników prowadzą do trwałych deformacji i do niedopuszczalnych naprężeń; po drugie: wydłużone wirniki powodują trudności z prędkościami krytycznymi. Wartości prędkości krytycznych możemy uważać za odwrotnie proporcjonalne do kwadratu długości wirników. Przy wydłużeniu wirników prędkości krytyczne maleją i druga prędkość krytyczna

zbliża się w stopniu niebezpiecznym do prędkości próbnej a nawet znamionowej. Wreszcie trzeci czynnik, zmuszający projektanta do przyjmowania jak najmniejszych długości wirnika - wykonalność beczki stalowej wirnika z jednolitej czy nawet składanej odkuwki.

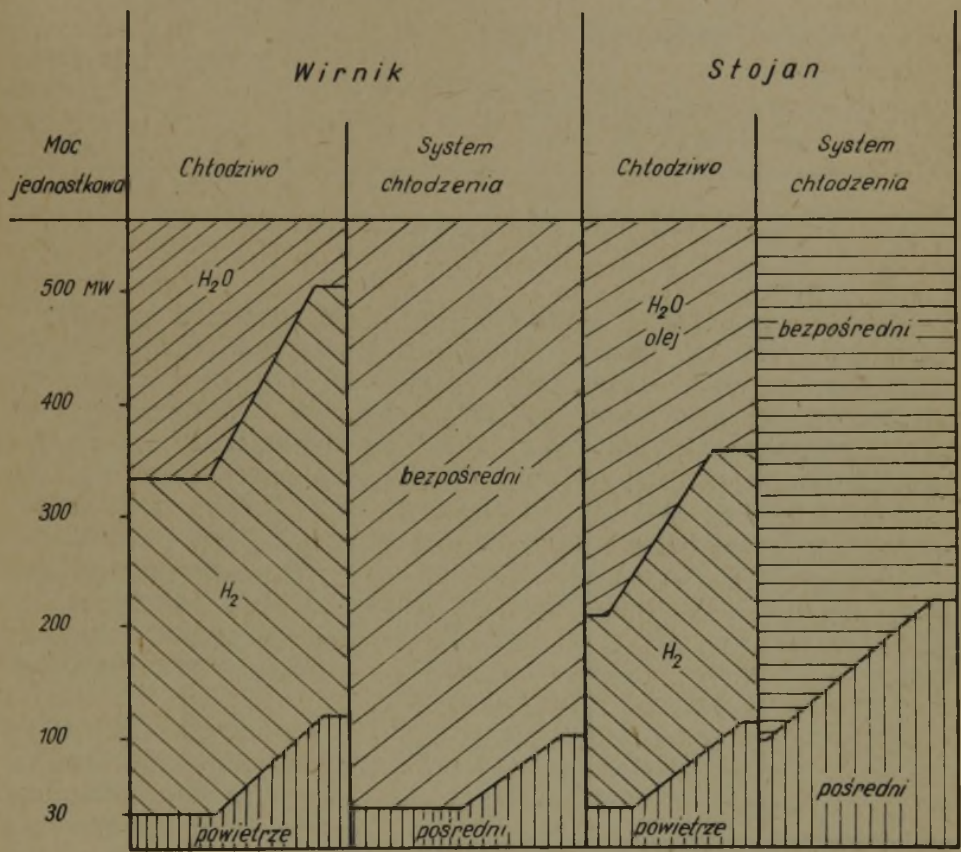
W ten sposób dochodzimy do wniosku, że obydwa wymiary główne: D i L maszyny podlegają przymusowym ograniczeniom. W jaki sposób uzyskać wobec tego zwiększenie mocy jednostkowych?. Można to zrobić tylko przez zwiększone współczynniki wykorzystania materiałów czynnych a więc indukcję w szczelinie B i okłady prądowe A oraz gęstości prądu w stojanie i w wirniku. I tu nowe ograniczenie: zjawisko nasycenia magnetycznego stali nie pozwala na podnoszenie B w szczelinie i B_z w zębach. Powoduje to, że indukcji B w szczelinie powyżej 8500 Gs nie dopuszczamy. Wobec powyższego nie pozostaje nic innego, jak podwyższenie gęstości i okładów prądowych.

Otrzymujemy więc wartości okładów dochodzące do 1800 A/cm dla stojana i 3000 A/cm dla wirnika, zaś dla gęstości 4,8 A/mm^2 - 6 A/mm^2 w stojanie i 8,0-9,0 A/mm^2 w wirniku. Dopiero przy takich współczynnikach wykorzystania miedzi okazały się wykonalne maszyny na 200, 300 MW i jeszcze większe moce jednostkowe.

Wykonalność ta jest realna tylko dzięki zastosowaniu nowych metod bardziej skutecznych odprowadzania ciepła ze strat w miedzi i stali turbogeneratorów. Chłodzenie i przewietrzanie stały się w ten sposób problemem nr 1 konstrukcji TG wielkich mocy. Można przy tym powiedzieć, że problem chłodzenia jest najostrzejszy dla wirnika, w którym występują większe przyrosty temperatur, poza tym zaś trudności konstrukcyjne są znacznie większe niż w stojanie. Od klasycznego chłodzenia przez przewietrzanie powietrzne tzw. pośrednie, tj. takie przy którym powietrze chłodzące nie styka się bezpośrednio z miedzią, lecz omywa tylko część powierzchni uzwojeń, przykrytą izolacją - trzeba było już powyżej mocy 30 MW bezpowrotnie odstąpić i przejść do chłodzenia bezpośredniego, a dalej do chłodzenia wodorowego i wreszcie wodnego lub alternatywnie olejowego.

Rozwiązań konstrukcyjnych chłodzenia jest bardzo wiele. Oceniać je należy pod kątem ich efektywności cieplnej, pracochłonności oraz pewności ruchu. Przy opracowywaniu projektu maszyny doświadczalnej o mocy 63 MW konstruktorzy fabryki M-5 we Wrocławiu mieli do wyboru co najmniej 4 warianty konstrukcyjne chłodzenia wodorowego uzwojenia wirnika. Wy-

brany został najodpowiedniejszy. Na rys.2 przedstawiony jest wykreślny obraz stosowania różnych rodzajów chłodzenia dla maszyn różnych mocy jednostkowych. Jak widać, dla niektórych wielkości stosowane są nadal dwa warianty chłodzenia.



Rys.2. Rodzaje chłodzenia
(dane z różnych wytwórni)

Problematyka chłodzenia TG wielkich mocy jest nadal w fazie rozwojowej i można się w tej dziedzinie spodziewać dalszych nowości. Tak np. w zagłębiach naftowych, gdzie metan jest bardzo tani i dostępny zaproponowane zostało przewietrzanie metanem. Własności tego gazu, decydujące o jego stosowalności do celów chłodzenia stawiają go między powietrzem a wodorem (rys.3).

Własności	Powietrze	Wodór	Metan
Przewodnictwo cieplne	1	6,69	1,29
Ciężar właściwy	1	0,07	0,554
Ciepło właściwe na jednostkę objętości	1	0,996	1,38
Współczynnik oddawania ciepła od powierzchni do gazu	1	1,51	1,43

Rys.3. Własności gazów (wg Komara)

Drugie zagadnienie rozwojowe, to wykorzystanie niskich temperatur w rozwiązaniu chłodzenia turbogeneratorów. Zagadnienie było analizowane przed kilku laty w naszym środowisku. Wydawałoby się, że jest ono interesujące z tego względu, że przy przejściu od temperatury 120° do temperatury - 40° straty w miedzi (pomijając straty dodatkowe) zmniejszają się do połowy. W ten sposób, o ile byśmy do sztucznego oziębienia zdołali zużywać mniej energii, niż odpowiadająca połowie strat w miedzi, urządzenie chłodnicze byłoby energetycznie uzasadnione. Moglibyśmy też postawić problem w ten sposób, żeby dla naszego przykładu zwiększyć gęstość prądu albo zmniejszyć przekrój miedzi o ok. 40% uzyskując przy oziębieniu te same straty co przy nagrzaniu.

Ostatnio znaleźliśmy informację, że na konferencji radzieckiego przemysłu elektrotechnicznego w roku 1958 inż. Piotrowski miał referat na temat sztucznego przechładzania TG. Niestety, nie zdołaliśmy do dziś uzyskać tej pracy w oryginale.

Problematyka nowoczesnego chłodzenia TG jest wybitnie kompleksowa. Składają się na nią zagadnienia materiałoznawcze, chemiczne, elektryczne, mechaniczne i fizyczne. W zakresie materiałoznawstwa konieczne jest ustalenie warunków, jakim mają odpowiadać chłodziwo, części konstrukcyjne i szczeliwa. Muszą być sprecyzowane warunki stawiane gazom i płynom chłodzącym, materiałom syntetycznym na rurki prowadzące płyn chłodzący i materiałom uszczelnień. Musi być brana pod uwagę korozja pod wpływem płynów chłodzących. Wreszcie konieczną jest rzeczą ustalenie dopuszczalnych granic przewodności elektrycznej płynów chłodzących i sposoby kontroli jej w ruchu oraz utrzymywania jej wartości w grani-

cach dopuszczalnych. Osobny dział zagadnień stanowią uszczelnienia, przede wszystkim zaś uszczelnienia wału. Należy zaznaczyć, że przy chłodzeniu wodorowym stosuje się ciśnienia gazu wynoszące 1,03-2 at. a nawet 3 at, ponieważ im większe ciśnienie tym większa ilość ciepła, która może być odprowadzona. Stąd wniosek, że uzyskanie pewnego i ekonomicznego uszczelnienia na wymienione ciśnienia daje możliwość podwyższenia mocy maszyny w tym samym gabarycie. Nic też dziwnego, że konstrukcji uszczelnień, znanych nam jest już kilkanaście i dotąd trudno przewidzieć, czy któraś z istniejących stanie się standardową...

Dalszym węzłowym problemem dużych TG jest izolacja uzwojeń. Zwróćmy uwagę, że przy powiększaniu mocy jednostkowych TG powstaje konieczność podwyższania napięć znamionowych do 13, 20, 22 a nawet 30 kV. Przy takich napięciach oczywiście izolacja musi być idealnie jednolita i nie może zawierać najmniejszych wtrącin powietrznych - ani w stanie początkowym po montażu, ani w czasie eksploatacji. Ten postulat potrafimy już zrealizować.

Ale nie tylko podwyższenie napięć - znamionowych komplikuje problem izolacyjny. Można raczej powiedzieć, że chodzi tu więcej o inne aspekty, niż o samą wytrzymałość dielektryczną próbki izolacji.

Przy dużych długościach maszyn chodzi o zachowanie się izolacji przy cyklicznych zmianach temperatury. Przy powrocie układu, złożonego z miedzi i izolacji w żłobku do temperatury początkowej - izolacja musi również powracać do stanu początkowego, bez zmian wymiarów i odkształceń, które by w stosunkowo krótkim czasie mogły doprowadzić do miejscowych osłabień izolacji i przebić. Ten postulat spełniają izolacje typu Thermalastic. W tych izolacjach jak i w konstrukcjach klasycznych mika jest składnikiem podstawowym, lecz istotnie ważne jest dla TG wielkich mocy lepiszcze. Lepiszcze to nadaje właśnie całości układu izolacyjnego cech termoelastyczności, przy których nie ma niebezpiecznego zjawiska "złuszczania" się czy po prostu przesuwania płatków mikowych w kierunku czół.

W ogóle postulaty, stawiane izolacji TG wielkich mocy można by podsumować jak następuje:

1) podwyższona wytrzymałość dielektryczna,

2) usunięcie wtrącin powietrznych,

3) duża wytrzymałość mechaniczna,

4) usunięcie zjawiska starzenia się,

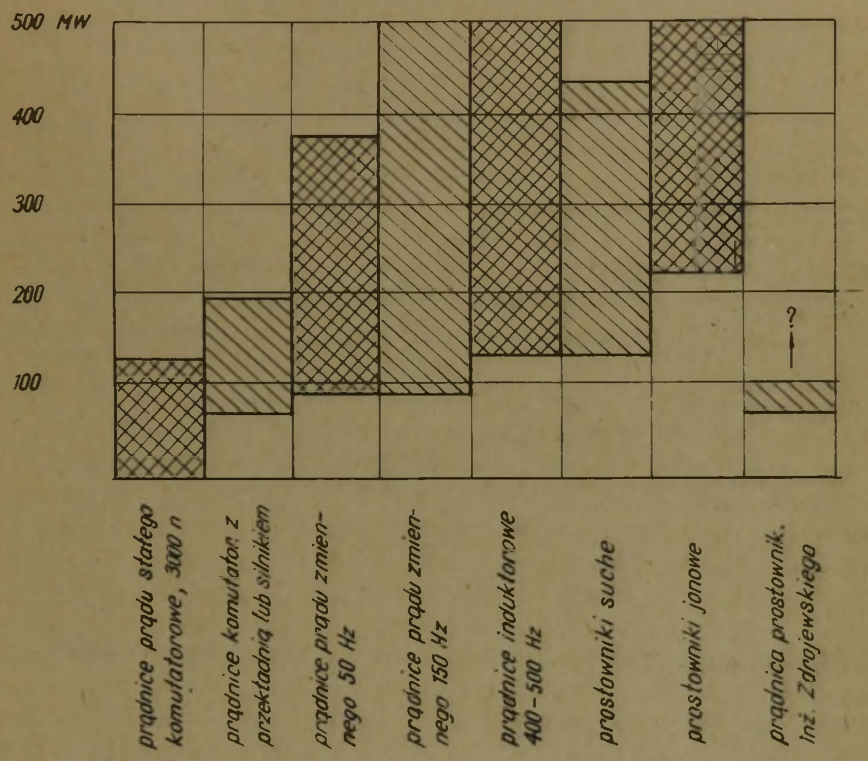
5) elastyczność termiczna.

Oddzielną grupę zagadnień stanowią zagadnienia związane z ogromnymi siłami dynamicznymi, których działanie występuje w TG przy zwarciach. Wprawdzie małe wartości stosunku zwarcia i duże reaktancje, występujące przy dużych mocach jednostkowych, a mianowicie k_z poniżej 0,45 oraz X'_d nas powyżej 0,25 wpływają ograniczająco na siły dynamiczne, to jednak z uwagi na duże prądy żłobkowe i duże okłady prądowe, wartości chwilowe tych sił wypadają bardzo duże i powodują uszkodzenia. Występujące zjawiska z trudnością poddają się interpretacji matematycznej bez wprowadzania szeregu założeń upraszczających. Stąd dziedzina ta jest raczej podatna na badania modelowe. Bardziej szczegółowo o siłach zwarciowych informuje wykład dr. Kowalowskiego.

Do problemów węzłowych dla TG wielkich mocy należą zagadnienia źródeł wzbudzenia. Dotychczasowe wzbudnice klasyczne prądu stałego, sprzężone bezpośrednio z turbogeneratorami zawodzą dla mocy wzbudzenia powyżej 500 kW. Spowodowane to jest trudnościami z komutacją i z budową niezawodnego komutatora. Wyjściem z tych trudności jest instalowanie wzbudnic dla mniejszych prędkości obrotowych, a więc napędzanych z wału TG przez przekładnię redukującą prędkość obrotową, bądź też instalowanie osobnych zespołów: silnik napędowy + wzbudnica. Żadne z tych rozwiązań nie jest uważane za zadowalające, poza tym są one nieprzydatne dla mocy powyżej 200-250 MW. Trzeba więc było sięgnąć do innych rozwiązań, a mianowicie prądnic prądu zmiennego z prostownikami. I tutaj spotykamy 3 warianty rozwiązania: 1) prądnica budowy klasycznej na 50 Hz, 2) prądnice na 150 Hz i 3) prądnice induktorowe na 400-500 Hz. Rozwiązania te nie weszły w rutynę, stosuje się bowiem ponadto prostowniki suche zasilane z zacisków TG lub z osobnej sieci a wreszcie prostowniki rtęciowe.

Należy również wymienić wzbudnicę prostownikową pomysłu inżyniera Zdrojewskiego z Inst. Elektrotechniki, która była referowana na CIGRÉ 1962 i wzbudziła duże zainteresowanie. Na rys.4 podane są różne rodzaje wzbudzenia dla różnych zakresów mocy jednostkowych TG. Wykres opracowano w oparciu o dane z wielu wytwórni. Należy go rozumieć w ten sposób, że dla niektórych przedziałów mocy jednostkowych stosuje się alternatywnie dwa rozwiązania. Na rys.5 podany jest schemat maszyny inż. Zdrojewskiego.

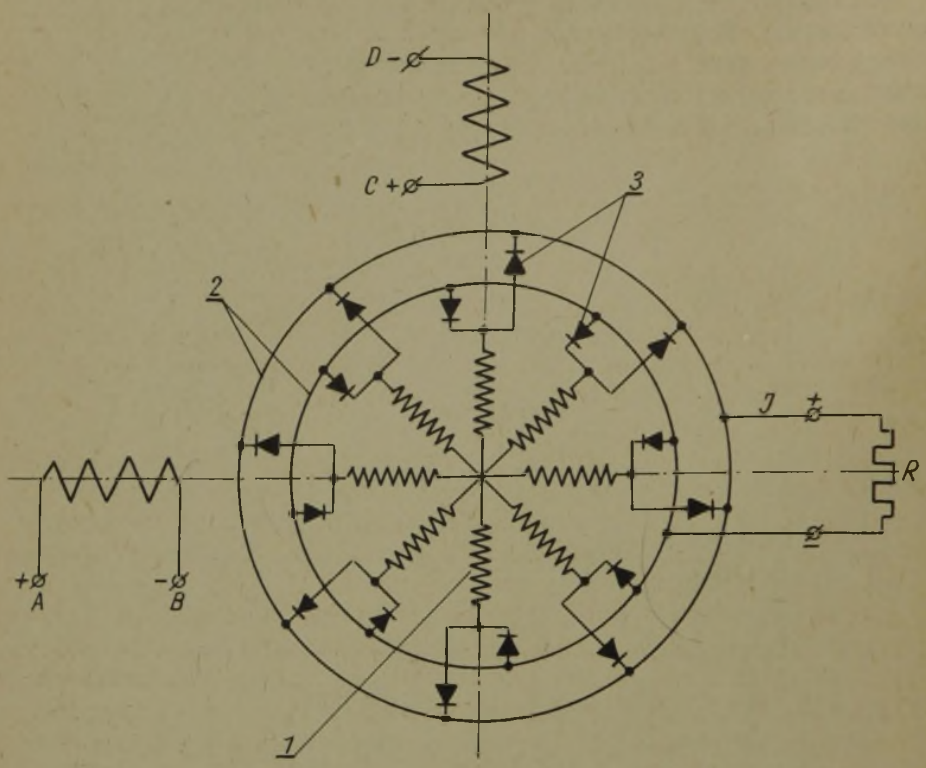
Rozwiązanie wzbudzenia wielkich turbogeneratorów napotyka na trudności doprowadzenia dużych prądów ze źródła do wirującego uzwojenia wirnika. Doprowadzenie to musi być wykonane poprzez pierścienie ślizgowe i szczotki, jeśli źródło jest nieruchome. Tak będzie w układzie przedstawionym na rys.6.



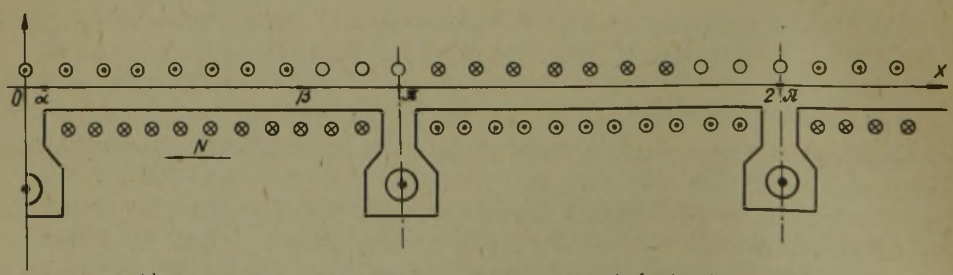
Rys.4. Różne źródła wzbudzenia turbogeneratorów (strefy celowego zastosowania)

Natomiast w przypadku sprzężenia TG ze wzbudnicą prądu zmiennego, która posiada twornik wirujący, zaś układ wzbudzenia nieruchomy, pierścienie ślizgowe nie są potrzebne. Twornik wirujący wzbudnicy łączy się przez układ prostowników wirujących wspólnie z twornikiem (rys.7). Prostowniki te są połączone bezpośrednio z uzwojeniem induktora.

Jak widać, jeśli ograniczymy się do wyszczególnionych problemów i wyłączymy problematykę wytrzymałościową, to wę-



a) Uzwojenia AB i CD wirnika. Stojan wielofazowy z prostownikami fazowymi



b) Schemat uzwojenia stojana i dwóch uzwojeń wirnika

Rys.5. Prądnica wirująca prądu zmiennego z prostownikami suchymi inż.Zdrojewskiego

złowe problemy TG dużych mocy da się uporządkować jak następuje:

1) chłodzenie uzwojeń wirnika i stojana,

2) izolacja uzwojeń,

3) źródła wzbudzenia,

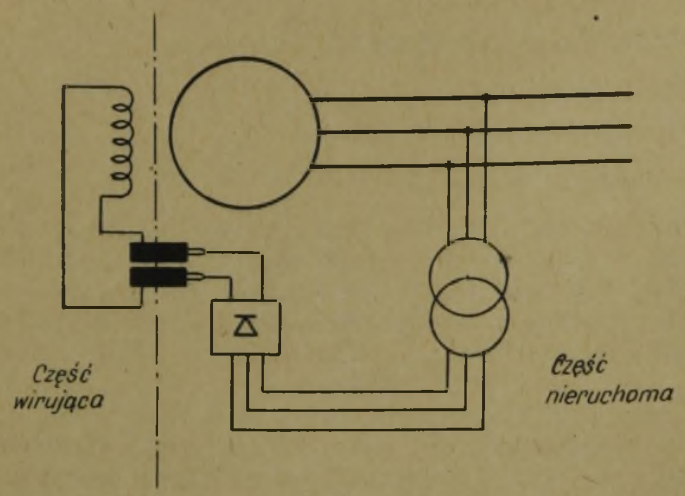
4) siły dynamiczne.

Rozwiązania tych problemów tak znacznie odbiegają od dotychczasowej rutyny, że muszą one wyraźnie wpływać na istniejące przepisy i normy. Można generalnie powiedzieć, że dotychczasowe przepisy i normy PNE zostały wyprzedzone przez postęp techniczny, wobec czego będą musiały być znowelizowane.

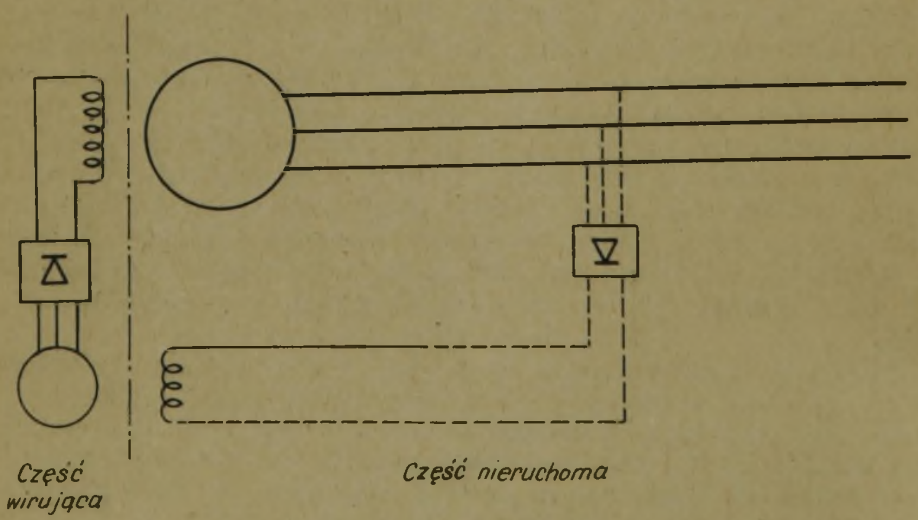
Wymienione problemy węzłowe mają zarówno aspekty konstrukcyjne jak i technologiczne, przy czym obydwie te strony są bardzo ściśle ze sobą związane. Wynika stąd, że wykonawcy muszą być bardzo gruntownie wtajemniczeni zarówno w technologię jak i konstrukcję.

Wykonawstwo nie może być nieświadome problemów z dziedziny konstrukcyjnej, nawet jeśli produkcja opiera się o licencję. Stąd imperatyw tworzenia własnej kadry konstruktorów i zlecenia im zadań, przy których rozwiązywaniu mogliby się rozwijać. Stąd wypływa dalej postulat opracowywania własnych konstrukcji i korzystania z licencji tylko na konstrukcje unikalne lub te tylko elementy konstrukcyjne, które już zostały rozwiązane w krajach zaawansowanych i których ponowne samodzielne rozwiązywanie byłoby ekonomicznie nieuzasadnione. Że to jest droga naturalnego rozwoju, świadczyć może przykład z przemysłu parowozowego. Przy starcie tego przemysłu pełną dokumentację zakupywano w całości za granicą. Po paru latach uważano to już za nonsens gospodarczy, projektowano własne typy parowozów i zakupywano licencje tylko na niektóre elementy, chronione patentami. Wydaje się, że podobna droga już dziś powinna być otwarta dla przemysłu turbogeneratorowego.

Trzeba jeszcze podkreślić, że ani obliczenia ani konstruowania TG nie można opierać o podręczniki, gdyż tych poprostu nie ma. Tych kilkanaście wielkich wytwórni światowych, produkujących TG wielkich mocy bynajmniej nie kwapi się z udostępnianiem konkurentom swoich osiągnięć w formie książek i źródłowych publikacji. Wbrew powyższemu my jednak mamy możliwości korzystania ze współpracy z przemysłami zaprzyjaź-



Rys.6. Wzbudzenie przez prostowniki nieruchome



Rys.7. Wzbudnica prądu zmiennego
z prostownikami wirującymi

nionymi w ramach RWPG i przyspieszania rozwoju technicznego naszych konstruktorów i technologów w oparciu o powyższą współpracę.

Rękopis złożono w redakcji w marcu 1963 r.

АКТУАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМАТИКА ТЕХНИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Автор обращает внимание на главние конструктивные трудности при праектировании и иеполнении турбогенераторов больших мощностей. Не касаясь проблем механической прочности автор устанавливает четыре группы главных проблем, а именно: охлаждение, изоляция, иеточники возбуждения, динамические силы. Каждая из них рассмотрена вкратце и сделаны заключения для отечественного трубогенераторостроения.

LES PROBLÉMES ACTUELS DE LA TECHNIQUE DES TURBOGÉNÉRATEURS DE GRANDE PUISSANCE

L'auteur met en evidence les difficultés fondamentales dans la technique des grands turbogénérateurs. En mettant à part les questions de la résistance mécanique il arrive à nommer les groupes des problemes principales: refroidissement, l'isolation, les sources d'excitations, les forces dynamiques. Il fait ensuite des conclusions pour l'industrie du pays.