

201888 L/1

INSTYTUT ENERGOELEKTRYKI POLITECHNIKI
WROCŁAWSKIEJ

Komunikat nr 318

Na prawach rękopisu

ZACHOWANIE SIĘ KRIOGENERATORA
W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZ-
NYM W PORÓWNANIU Z EKWIWALEN-
TNĄ MASZYNĄ KONWENCJONALNĄ

Stanisław Szkółka

Słowa kluczowe: generator synchroniczny, nadprzewodzące uzwo-
jenie wzbudzenia, praca ustalona, proces
przejściowy, zabezpieczenia.

WROCŁAW 1977

7803/401006

Mgr inż. Stanisław Szkółka
Instytut Energoelektryki
Politechniki Wrocławskiej
Wrocław, pl.Grunwaldzki 13.

Rozprawa doktorska

przedstawiona do oceny Radzie Naukowo-Dydaktycznej
Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej

W pracy przedstawiono analizę porównawczą zachowania się dwu ekwiwalentnych generatorów synchronicznych o nadprzewodzącym i konwencjonalnym uzwojeniu wzbudzenia w wybranych stanach pracy. Podano tendencje zmian podstawowych parametrów elektromagnetycznych obu rodzajów maszyn w funkcji ich mocy. Przedstawiono charakterystyki pracy ustalonej kriogeneratora i maszyny konwencjonalnej o mocy 1 GVA. Analizę stanów nieustalonych przeprowadzono w oparciu o numeryczne obliczenia różniczkowych równań Parka-Goriewa zastępując kriogenerator schematem zastępczym maszyny konwencjonalnej. Zaproponowano ogólną koncepcję zabezpieczenia kriobloku jak też samego wirnika kriogeneratora.

Promotor:

Prof. Jan T R O J A K

Komunikat wpłynął do Redakcji I-8 dn.29.czerwca.1977 r.

SPIS TREŚCI

	Str.
I. Wykaz oznaczeń	IV
II. ZAGADNIENIA WSTĘPNE	1
II A. Wprowadzenie	1
II B. Odmienność budowy i jej wpływ na podstawowe parametry kriogeneratora	1
II C. Aktualny stan znajomości zagadnienia w świecie	2
II D. Teza rozprawy i jej uzasadnienie; program pracy	6
CZĘŚĆ 1	
1.1 PARAMETRY CHARAKTERYSTYCZNE KRIOGENERATORÓW	9
1.1.1. Reaktancje	9
1.1.1.1. Reaktancja synchroniczna	9
1.1.1.2. Reaktancja rozproszona stojana X_{11} ; reaktancja podprzejściowa X_d''	10
1.1.1.3. Reaktancja przejściowa kriogeneratora X_d'	11
1.1.1.4. Reaktancje kriogeneratora w osi poprzecznej	12
1.1.2. Stałe czasowe kriogeneratora	12
1.1.2.1. Stała czasowa przejściowa T_{do}'	12
1.1.2.2. Stała czasowa podprzejściowa T_{do}''	13
1.1.3. Szacunkowe określenie zmian stałej inercji H krioge- neratora w porównaniu z maszyną konwencjonalną	13
1.2. Porównanie tendencji zmian niektórych parametrów w fun- kcji mocy dużych generatorów konwencjonalnych i krioge- nicznych	14
1.3. Wybór maszyn i określenie ich parametrów do analizy po- równawczej	20
1.3.1. Szacunkowe określenie wartości znamionowych napięcia i prądu rozpatrywanych maszyn	21
CZĘŚĆ 2	
PRACA USTALONA	
2.1 Założenia upraszczające	22
2.2 Charakterystyka zwarcia ustalonego; przeciążalność sta- tyczna	24
2.3. Praca kriogeneratora synchronicznego przy stałej warto- ści mocy czynnej i napięcia na zaciskach	28
2.4. Charakterystyki regulacyjne; charakterystyka zewnętrzna	31
2.5. Analiza czynników ograniczających obszar pracy kriogene- ratora	37

2.5.1. Wykres obciążalności kriogeneratora	38
2.6. Praca ustalona przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$	44
2.7. Stabilność statyczna	50
2.8. Wnioski i uwagi wynikające z analizy pracy ustalonej kriogeneratora	61
CZĘŚĆ 3	
STANY NIEUSTALONE KRIOGENERATORA	
3.1. Wybór metody badań	62
3.2. Schemat zastępczy i równania różniczkowe maszyny	63
3.3. Założenia upraszczające	66
3.4. Obliczenia	68
3.5. Zwarcie trójfazowe na zaciskach	69
3.5.1. Rozeznanie wpływu wartości reaktancji ekranu X_D , X_Q na przebiegi zwarcia	70
3.5.2. Analiza porównawcza zachowania się obu maszyn podczas zwarcia	73
3.5.2.1. Zwarcie w chwili $T_1 = 1,000$ s	73
3.5.2.2. Zwarcie w chwili $T_1 = 0,995$ s	78
3.5.2.2.1. Zwarcie trójfazowe przy $\cos \varphi = 0,2$ ind	85
3.6. Zwarcia niesymetryczne	85
3.6.1. Założenia upraszczające	85
3.6.2. Obliczenie parametrów elementów układu elektroenergety- cznego	86
3.6.3. Analiza wyników obliczeń	88
3.7. Problem utraty wzbudzenia kriogeneratora	90
3.7.1. Utrata wzbudzenia w kriogeneratorze 1 GVA	90
3.7.1.1. Wariant 1-szy obliczeń	91
3.7.1.1.1. Wyniki obliczeń na maszynie cyfrowej	91
3.7.1.2. Wariant 2-gi obliczeń	97
3.7.1.2.1. Wyniki obliczeń na maszynie cyfrowej	97
CZĘŚĆ 4	
4.1 ZABEZPIECZENIA KRIOGENERATORA PRZED SKUTKAMI ZAKŁÓCEŃ ...	102
4.1.1 Zakłócenia w pracy kriogeneratora i możliwość ich wystą- pienia	102
4.1.2. Prądy zwarcia i ich skutki	104
4.1.3. Ogólna koncepcja zabezpieczeń kriobloku w świetle roz- wiązań konwencjonalnych	105
4.2. Odwzbudzenie	110

4.2.1	Analiza możliwości zastosowania zwieraczy dla skrócenia czasu AGP kriogeneratora	113
	WNIOSKI KOŃCOWE	119
	LITERATURA	121
	Wykaz odbiorców	126
	Załączniki	127

I. Wykaz oznaczeń

D	- operator różniczkowania względem czasu,
$\cdot / DJ_{F\max}$	- krytyczna prędkość zmian prądu wzbudzenia,
$d_1 - d_{19}$	- współczynniki równań różniczkowych,
E_d	- sem. maszyny
$E_{d/Op/}$	- sem. maszyny przy $\cos = 0_{op}$,
$E_{d/Oi/}$	- sem. maszyny przy $\cos = 0_{ind}$,
E_K	- energia kinetyczna maszyny,
f_N	- częstotliwość znamionowa,
H	- stała inercji maszyny,
H_T	- stała inercji turbozespołu,
J	- prąd fazowy generatora,
J_d, J_q	- składowe prądu stojana w osiach "d" i "q",
J_p	- prąd podstawowy,
J_{FK}	krytyczna wartość prądu nadprzewodnika,
J_{FON}	- znamionowy prąd wzbudzenia biegu jałowego,
J_{FN}	- znamionowy prąd wzbudzenia,
J_{FZN}	- znamionowy prąd wzbudzenia przy zwarciu 3-fazowym,
J_b	- moment bezwładności,
K_p	- współczynnik zapasu równowagi statycznej,
K_z	- współczynnik zwarcia,
L_d	- indukcyjność synchroniczna,
L_{FF}	- indukcyjność własna obwodu wzbudzenia,
m	- moment elektromagnetyczny maszyny,
m_t	- moment turbiny,
N	- indeks oznaczający wielkość znamionową,
P	- moc czynna oddawana przez maszynę,
Q	- moc bierna oddawana przez maszynę,
R_a	- rezystancja stojana,
R_F	- rezystancja obwodu wzbudzenia,
R_D, R_Q	- rezystancje ekranu,
s	- poślizg,
S_N	- znamionowa moc pozorna maszyny,
T_a	- stała czasowa zaniku składowej aperiodycznej prądu stojana
T_{d0}	- przejściowa stała czasowa,
T_{d0}''	- podprzejściowa stała czasowa,
U	- napięcie fazowe maszyny,

u	- współczynnik przeciążalności statycznej,
U_N	- znamionowe napięcie generatora,
U_o	- napięcie biegu jałowego przy znamionowym prądzie wzbudz.,
U_p	- napięcie podstawowe,
U_{FN}	- znamionowe napięcie wzbudzenia,
U_s	- napięcie systemu sztywnego,
X_{ad}	- reaktancja oddziaływania twornika,
X_D, X_Q	- reaktancje ekranu,
X_d, X_d', X_d''	- reaktancje: synchroniczna, przejściowa i podprzejściowa,
X_{fl}	- reaktancja rozproszenia uzwojeń wzbudzenia,
X_L, X_s, X_t	- reaktancje zastępcze: linii, systemu, transformatora,
X_1, X_2, X_0	- reaktancje dla składowych: zgodnej, przeciwnej, zerowej,
X_{1l}	- reaktancja rozproszenia stojana,
Z_p	- impedancja podstawowa,
δ_1	- kąt rozchyłu napięcia generatora i napięcia systemu,
ϑ	- kąt obciążenia maszyny,
ψ_s	- kąt rozchyłu wskazów U_s i E_d ,
ψ_D, ψ_Q	- strumień skojarzony ekranu w osiach "d" i "q",
ψ_d, ψ_q	- strumień skojarzony uzwojeń stojana,
ψ_f	- strumień skojarzony z uzwojeniem wzbudzenia,
ω_N	- znamionowa prędkość kątowna wirnika.

II. ZAGADNIENIA WSTĘPNE

II A. Wprowadzenie

Celem sprostania tempu zużycia energii elektrycznej zachodzi potrzeba ciągłego zwiększania mocy jednostek generujących. Prognozy przewidują, że w latach 80-tych osiągnięta zostanie moc jednostki 2,2 - 2,5 GVA. Zwiększenie mocy jednostek konwencjonalnych ma swój prawdopodobny kres wynoszący ok. 8 GVA. Spowodowane jest to ograniczeniami wymiarowymi, wytrzymałościowymi oraz ograniczeniami wzrostu indukcji i chłodzenia. Możliwość uzyskania dużego przepływu wzbudzenia w małej objętości uzwojenia wzbudzenia oraz brak elementów ferromagnetycznych w obszarze uzwojeń, stawia kriogeneratory jako przyszłościowe maszyny, mogące bez większych ograniczeń osiągać moce rzędu 10 GVA. Oprócz tej podstawowej zalety, światowe zainteresowanie generatorami nadprzewodzącymi wywołały następujące korzyści:

- a/ zmniejszone rozmiary, ciężar i mniejsze koszty transportu,
- b/ zwiększona sprawność,
- c/ potencjalna możliwość uzyskania maszyn pracujących przy wyższym napięciu,
- d/ większa wartość współczynnika $J_2^2 t$,
- e/ eliminacja wodoru,
- f/ korzystniejsze spodziewane charakterystyki eksploatacyjne,
- g/ prawdopodobnie mniejsze koszty produkcji.

Rzeczywiste zyski ze spodziewanych korzyści są w chwili obecnej dyskusyjne. Do wyznaczenia niektórych z nich potrzeba analizy, której wyniki potwierdzi dopiero praktyka.

II B. Odmiennosć budowy i jej wpływ na podstawowe parametry kriogeneratora

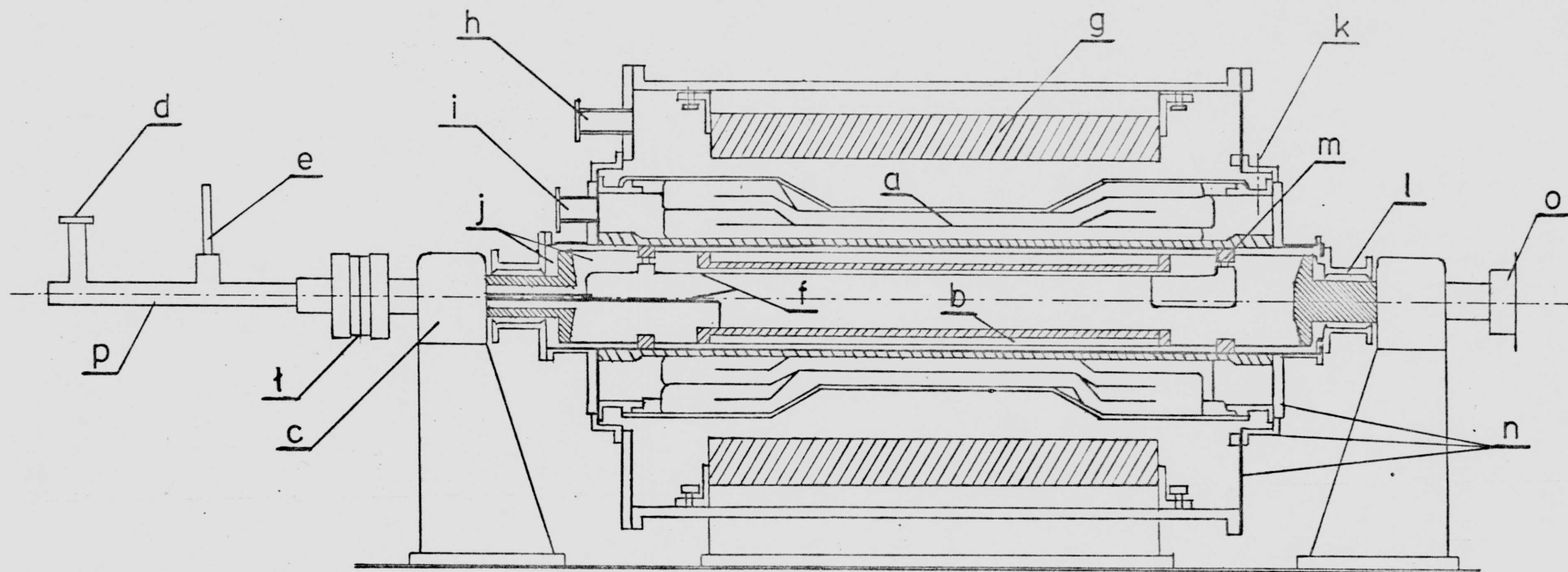
Rozwiązanie nadprzewodnikowego generatora oparto na zastosowaniu nadprzewodzącego, wirującego uzwojenia wzbudzenia i nieruchomego twornika pracującego w normalnej temperaturze. Sporządzenie kriogenicznego uzwojenia stojana nie daje wiele korzyści ekonomicznych. Wykonywane jest ono zazwyczaj jako bezżłobkowe o chłodzeniu konwencjonalnym.

Uzwojenie wirnika wykonane zazwyczaj ze stopu niobu i tytanu /Nb - Ti/, umieszczone jest w uszczelnionej obudowie próżniowej zwanej kriostatem. Wraz z wirnikiem wirują jeden lub dwa ekrany elektromagnetyczne, mające na celu m.in. ekranowanie uzwojenia wzbudzenia przed składową przeciwną pola, tłumienie ruchów oscylacyjnych wirnika oraz ekranowanie strefy kriogenicznej przed przenikaniem promieniowania cieplnego ze strefy ciepłej /stojan/. Należy tu nadmienić, że szereg wymogów jest sprzecznych i jednocześnie ich spełnienie napotyka na trudności, dodatkowo skomplikowane względami wytrzymałości mechanicznej. Powstaje wskutek tego poważny problem natury konstrukcyjnej, któremu, jak to wynika z literatury, poświęca się wiele miejsca.

Uzwojenie stojana jest otoczone jarzmem magnetycznym w celu zmniejszenia pól magnetycznych na zewnątrz maszyny. Nadmienić należy, że duże wartości indukcji w maszynie /ok. 5,5 T w uzwojeniu wzbudzenia i ok. 1,2 T w uzwojeniu twornika/ wykluczają zastosowanie materiałów ferromagnetycznych w obwodzie magnetycznym kriogeneratora ze względu na nasycenie. Odmienność budowy kriogeneratora od maszyny konwencjonalnej pociąga za sobą istotne zmiany niektórych parametrów elektromagnetycznych. Brak obwodu ferromagnetycznego dla strumienia głównego decydująco wpływa na zmianę reaktancji synchronicznej. Wartość reaktancji przejściowej i podprzejściowej kształtuje przede wszystkim obecność uzwojeń tłumiących w postaci wewnętrznych ekranów cieplno-elektrycznych miedzianych lub aluminiowych, umieszczonych pomiędzy twornikiem a wirnikiem, oraz zewnętrznego ekranu elektromagnetycznego. Wpływ tych ekranów na reaktancje kriogeneratora zależy głównie od ich wzajemnego usytuowania, rezystywności materiału, grubości ekranu, temperatury pracy, a także od innych czynników [2][3]. Wspólną cechą charakteryzującą wszystkie kriogeneratory jest duża stała czasowa obwodu wzbudzenia T_{do} wzrastająca teoretycznie do nieskończoności, co wynika z bliskiej zera wartości rezystancji uzwojenia wzbudzenia.

II C. Aktualny stan znajomości zagadnienia w świecie

Plan rozwoju kriogeneratorów w świecie nie jest jednoznacznie określony. W zależności od kraju, w którym przeprowadza się badania



Rys.1. Przekrój kriogeneratora 3 MVA ; 3600 obr./min wykonanego w Massachusetts Institut of Technology (USA),

a - uzwojenie stojana,
 b - uzwojenie wzbudzenia (nadprzewodzące),
 c - łożysko,
 d - dopływ helu,
 e - wypływ helu,
 f - instalacja wewnętrzna kriochłodziwa,
 g - ekran stalowy,
 h - dopływ oleju chłodzącego,
 i - wypływ oleju chłodzącego,
 j - próżnia,
 k - izolator przepustowy,
 l - uszczelnienie próżniowe,

ł - pierścienie ślizgowe,
 m - wymiennik ciepła,
 n - kołnierze końcowe,
 o - sprzęgło,
 p - połączenie przekazujące hel.

projektowe czy modelowe, obierane są różne drogi i koncepcje rozwoju tej dziedziny. Wynikłe różnice dotyczą wielkości prototypów, ich konstrukcji i innych bardzo ważnych problemów poprzedzających zbudowanie kriogeneratora dużej mocy. W chwili obecnej zaawansowanie prac w dziedzinie kriogeneratorów przedstawia się następująco: [32]

ZSRR: - Akademia Nauk zbudowała i przebadła dwa modele kriomaszyn o mocach 18 i 200 kW. Obecnie bada się kriogenerator o mocy 1,2 MW. W fazie projektowej jest maszyna 20 MW, a w przyszłości zbuduje się kriogeneratory o mocach kilku tysięcy MW.

USA: - MIT / Massachuttes Institute of Technology/ zbudował kriogenerator o mocy 3 MVA z wirującym kriostatem rys. 1, - Firma Westinghouse zbudowała maszynę 5 MVA. Obecnie USA zawarły z tymi ośrodkami kontrakt na studia projektowe kriogeneratorów 300 MW i 1200 MW.

JAPONIA: - w marcu 1977 r. rozpoczęto badania modelu o mocy 6 MW.

RFN: - Program badań: zbudowanie generatora bezżłobkowego i przeprowadzenie dwu wersji badań: 1/ z wirnikiem konwencjonalnym chłodzonym wodą /wysoki współczynnik obciążenia/, 2/ z wirnikiem o nadprzewodzącym uzwojeniu /w tym samym stojanie/.

SZWAJCARIA: - Wątpliwości odnośnie do wprowadzenia do eksploatacji kriogeneratorów budowanych wg. własnych koncepcji.

FRANCJA: - budowa kriogeneratorsa o średnicy ok. 1 m w celu analizy zjawisk mechanicznych i termicznych. Próby przewidziane w 1978/79 r. Możliwość zbudowania prototypu o mocy większej niż 100 MW w latach 79 - 83.

ANGLIA: - preferowanie konstrukcji z wirującym stojanem. Cena tego rozwiązania podobno o połowę mniejsza od ogólnie przyjętej koncepcji z wirującym wzbudzeniem.

Jak z powyższego widać, stan zaawansowania prac nad kriogeneratorami jest bardzo zróżnicowany. Większość obecnych problemów jest natury projektowo-konstrukcyjnej. Droga budowy coraz to większych modeli dąży się do udoskonalania konstrukcji, które w przyszłości staną się realnymi jednostkami generującymi [12,23,39,45].

W chwili obecnej prace koncentrują się w głównej mierze na problemach konstrukcyjnych [8] , [30]. Dużo miejsca poświęca się też analizie parametrów kriogeneratorów, w zależności od wymiarów obranej konstrukcji [2], [22]. W nielicznych publikacjach zagranicznych spotyka się ogólne rozważania na temat spodziewanych problemów, które trzeba będzie rozwiązać przed wprowadzeniem tych maszyn do eksploatacji /chłodzenie, napęd kriogeneratora, problemy regulacji, próby oszacowania sprawności i niezawodności/[18]. Bardzo mało miejsca poświęca się natomiast analizie zachowania się kriogeneratora podczas możliwych stanów pracy narzucanych przez eksploatację. Nieliczne publikacje dotyczą w głównej mierze problemów stabilności, które określa się przy pomocy maszyn analogowych lub cyfrowych, na przykładzie prostego systemu /generator, linia przesyłowa, szyny sztywnego napięcia/ [16], [25].

W przeprowadzanych na całym świecie badaniach nie analizuje się zachowania kriogeneratora pod kątem możliwych zakłóceń, sposobu ich likwidacji, możliwości adaptacji współczesnych układów zabezpieczeń do ochrony takiej maszyny, bądź opracowania nowych rodzajów zabezpieczeń. Brak też usystematyzowanego pokazania odmienności zachowania się krio-maszyny i ograniczeń narzucanych przez eksploatację i konstrukcję w odniesieniu do generatora konwencjonalnego tej samej mocy pracującego w podobnych warunkach. Bardzo mało miejsca poświęca się w literaturze przewidywanej możliwości pracy kriogeneratora z tzw. "zamrożonym strumieniem", tj. przy zaniku napięcia wzbudzenia i zwarcu zacisków uzwojenia wzbudzenia. Odnotowuje się też brak oceny ważności nowych problemów, które pojawią się w różnych stanach pracy kriogeneratora. W aspekcie możliwości realnej pracy w systemie elektroenergetycznym nie uwzględnia się faktu, że znaczna część zakłóceń przy niespełnieniu szeregu warunków dotyczących głównie konstrukcji wirnika i właściwości nadprzewodnika, może doprowadzić do utraty nadprzewodnictwa, a nawet do zniszczenia kriogeneratora. Należy tego stanowczo unikać. Towarzyszące zakłóceniom udary prądu wzbudzenia w postaci szybkich zmian jego wartości, mogą spowodować utratę nadprzewodnictwa [33], [9]. Powstaje pytanie, czy kriogenerator o parametrach znacznie odbiegających od wartości parametrów maszyn konwencjonalnych, może współpracować z systemem przy użyciu obecnie stosowanej aparatury rozdzielczej i kontrolno-pomiarowej

i jak taka maszyna będzie się zachowywać podczas pracy ustalonej i nieustalonej, oraz jakie problemy i zjawiska mogą wystąpić podczas przyszłej jej eksploatacji.

II D. Teza rozprawy i jej uzasadnienie; program pracy

Intensywny rozwój prac konstrukcyjnych w dziedzinie kriogeneratorów sprawia, że w bardzo szybkim tempie budowane są coraz to większe modele /prototypy/ tych maszyn. Jak to już wskazano poprzednio, wprowadzenie kriogeneratorów do normalnej eksploatacji wymaga rozwiązania problemów nie tylko natury konstrukcyjnej, lecz również zagadnień wynikających z warunków i stanów pracy takiej maszyny. Ten fakt, jak też wspomniany brak usystematyzowanej analizy porównawczej odmienności zachowania się obu rodzajów maszyn w aspekcie współpracy z systemem, uzasadnia celowość podjęcia niniejszej pracy w zakresie uwarunkowanym małą ilością danych o kriogeneratorach. Badania te są treścią niniejszej rozprawy. Opierając się na jej wynikach stawia się następującą tezę:

Przy spełnieniu warunków wynikających z wykonanych rozważań stanu pracy ustalonej i nieustalonej, kriogenerator może współpracować z systemem elektroenergetycznym, a skutki zakłóceń w odniesieniu do tej maszyny nie powinny być większe niż w przypadku maszyny konwencjonalnej tej samej mocy.

Praca składa się z czterech części.

W części pierwszej przeprowadzono ogólną analizę podstawowych parametrów kriogeneratora, jak: reaktancja synchroniczna X_d , reaktancja podprześciowa X_d'' , reaktancja przejściowa X_d' , stałych czasowych T_{do}' i T_{do}'' oraz stałej inercji H . Celem dokonania trafnego wyboru parametrów typowego kriogeneratora dużej mocy i przeprowadzenia poprawnej analizy jego pracy, porównano tendencje zmian podstawowych parametrów maszyn konwencjonalnych i kriogenicznych w funkcji mocy jednostki. Następnie według Einstein'a [14] przyjęto jako typowe parametry dwóch ekwiwalentnych maszyn: kriogenicznej i konwencjonalnej o mocy 1 GVA.

W części drugiej przeprowadzono analizę porównawczą pracy ustalonej kriogeneratora i generatora konwencjonalnego i obliczono szereg charakterystyk tego stanu pracy, jak:

- charakterystyki Mordey'a,
- charakterystyki zewnętrzne,
- charakterystyki regulacyjne,
- charakterystyki zwarcia ustalonego.

Określono też współczynnik zwarcia i przeciążalność statyczną. Ponadto przeprowadzono analizę czynników ograniczających obszar mocy pozornej maszyny oraz zbadano pracę przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$. Określono i porównano stabilność statyczną układu przesyłowego z kriogeneratorem i maszyną konwencjonalną.

Część trzecia dotyczy stanów nieustalonych kriogeneratora. Badania przeprowadzono zastępując kriogenerator schematem zastępczym maszyny konwencjonalnej, co jest słuszne w przypadku kriogeneratora z jednym ekranem elektromagnetycznym. Ekran pełni wówczas rolę klatki tłumiącej maszyny konwencjonalnej. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o równania różniczkowe Parka-Goriewa maszyny synchronicznej. Równania były rozwiązywane na maszynie cyfrowej metodą numerycznego całkowania nieliniowych równań różniczkowych, według algorytmu Rungego-Kutty. Z uwagi na brak danych o parametrach ekranu, potrzebne do obliczeń wielkości wyznaczono wychodząc z kryterium najmniejszej zawartości składowej przemiennej w prądzie wzbudzenia kriogeneratora dla zachowania warunków nadprzewodnictwa. Na przykładzie zwarcia trójfazowego określono wpływ reaktancji ekranu na charakter przebiegu prądów zwarciovych i zawartość składowej okresowej w prądzie wzbudzenia. W następnym etapie tej części rozwiązano kilka wariantów zwarc trójfazowych w warunkach pracy znamionowej, oraz zwarcia przy obciążeniu znamionową mocą pozorną S_N przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$. Następnie zajęto się zwarciami niesymetrycznymi. Przeanalizowano je przy pomocy składowych symetrycznych dla następujących przypadków: zwarcie 1-fazowe, 2-fazowe, 2-fazowe z ziemią - na szynach wysokiego napięcia, oraz dla porównania z wynikami otrzymanymi na maszynie cyfrowej, dla zwarcia 3-fazowego. Z kolei przeanalizowano przypadek utraty wzbudzenia w kriogeneratorze i porównano z podobnym przypadkiem maszyny konwencjonalnej. Przeprowadzono

następnie dwie odmiany symulacji zaniku napięcia wzbudzenia polegającej na rozwiązywaniu równań Parka-Goriewa na maszynie cyfrowej.

W części czwartej rozważono problem gaszenia magnetycznego pola kriogeneratora, jako głównego czynnika decydującego o rozmiarze zniszczeń w przypadku wystąpienia zwarcia w obrębie bloku. Przeanalizowano możliwość zastosowania zwieraczy dla ograniczenia uszkodzeń w obrębie kriobloku. W następnym etapie tej części, dotyczącym zabezpieczenia kriogeneratora przed skutkami zakłóceń, omówiono spodziewane zakłócenia występujące w pracy maszyny kriogenicznej i podano ogólną koncepcję zabezpieczeń kriobloku w porównaniu do ogólnie przyjętego układu zabezpieczeń bloków konwencjonalnych dużej mocy.

C Z Ę Ś Ć 1

1.1. PARAMETRY CHARAKTERYSTYCZNE KRIOGENERATORÓW

1.1.1. Reaktancje

1.1.1.1. Reaktancja synchroniczna

Wartość reaktancji synchronicznej X_d typowego kriogeneratora waha się w granicach 0,4 - 0,5 p.u. co w porównaniu z wartością X_d ok. 2 p.u. dużych turbogeneratorów konwencjonalnych, jest ona około pięciokrotnie mniejsza. Głównym powodem zmniejszenia wartości X_d kriogeneratorów jest zwiększenie reluktancji obwodu strumienia magnetycznego, spowodowane brakiem żelaza jako przewodnika strumienia. Dodatkowym powodem jest znacznie większa gęstość strumienia wywołana przez nadprzewodzące uzwojenie wzbudzenia. Reaktancja synchroniczna maszyny w [p.u.] jest proporcjonalna do indukcyjności synchronicznej L_d i odwrotnie proporcjonalna do napięcia na zaciskach /przy założeniu stałej wartości prądu stojana/ zależność /1.1./:

$$X_d \text{ [p.u.]} = \frac{\omega_N \cdot L_d \cdot J_N}{U_N} \quad . \quad /1.1./$$

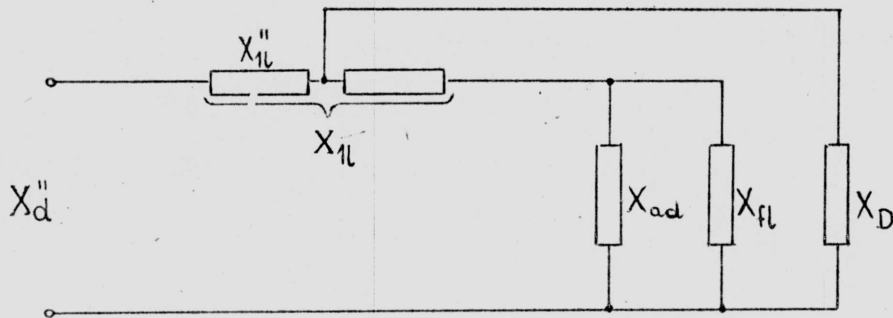
Usunięcie żelaza z obwodu magnetycznego redukuje odpowiednio indukcyjność L_d . Ponadto wzrostowi strumienia wzbudzenia towarzyszy prawie proporcjonalny wzrost napięcia na zaciskach /przy stałym prądzie stojana/. Tak więc, zmniejszenie przewodności magnetycznej obwodu i wzrost strumienia powodują znaczne zmniejszenie się reaktancji synchronicznej X_d w [p.u.] , czyniąc tym samym kriogenerator źródłem względnie sztywnego napięcia. Mała wartość X_d jest zatem jednym z głównych czynników decydujących o współpracy kriogeneratora z systemem, zarówno w pracy ustalonej jak i podczas stanów nieustalonych.

1.1.1.2. Reaktancja rozproszenia stojana X_{11} ;
reaktancja podprzejściowa X_d''

Reaktancja rozproszenia stojana X_{11} stanowi prawdopodobnie większą część reaktancji synchronicznej, czyli jest inaczej, aniżeli w przypadku generatora konwencjonalnego, a to z powodu wspomnianej już dużej wartości reluktancji obwodu według [14]. Jednakże, ze względu na małą wartość reaktancji X_d , wartość X_{11} w [p.u.] będzie mniejsza od wartości X_{11} podobnego generatora konwencjonalnego. Dokładne określenie reaktancji rozproszenia X_{11} jest możliwe na tyle, na ile dokładnie znamy wartość reaktancji oddziaływania X_{ad} . Analityczne określenie reaktancji X_{ad} na podstawie wymiarów i innych parametrów elektrycznych i magnetycznych kriogeneratora jest trudne z uwagi na duże zmiany indukcji na wysokości uzwojeń. W przypadku gdy ekran wirnika przylega bezpośrednio do uzwojenia wzbudzenia możemy napisać /1.2./ według [2] :

$$X_{ad} = X_d - X_d'' . \quad /1.2./$$

Przy takim założeniu pomija się reaktancję rozproszenia ekranu i wówczas $X_d'' = X_{11}$. W przypadku, gdy ekran nie przylega bezpośrednio do wirnika $X_{11} > X_{11}'' = X_d''$

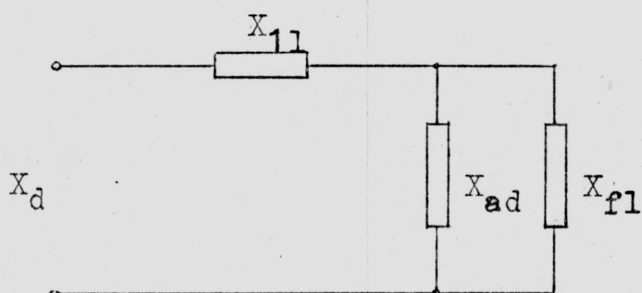


Rys. 1.1. Schemat zastępczy kriogeneratora dla określenia reaktancji podprzejściowej, gdzie X_D - reaktancja ekranu /w stanie nieustalonym $X_D = 0$ /; $X_d'' = X_{11}''$, X_{f1} - reaktancja rozproszenia uzwojenia wzbudzenia

Reaktancja podprześciowa typowego kriogeneratora waha się w granicach 0,10 - 0,15 p.u. . Jak już wcześniej wspomniano, na wartość reaktancji X_d'' wpływa obecność jednego lub dwu ekranów wewnętrznych, ich wymiary, wzajemne usytuowanie, materiał, oraz obecność zewnętrznego ekranu.

1.1.1.3. Reaktancja przejściowa kriogeneratora X_d'

Jak wspomniano, wartości reaktancji rozproszenia stojana X_{11} i reaktancji oddziaływania są znacznie mniejsze niż w maszynach konwencjonalnych. Reaktancja rozproszenia uzwojeń wzbudzenia X_{f1} w [p.u.] kriogeneratora jest większa niż w przypadku maszyn konwencjonalnych, ze względu na odmienną budowę tych maszyn. W ostatnio konstruowanych kriogeneratorach eksperymentalnych, reaktancja rozproszenia uzwojeń wzbudzenia X_{f1} w [p.u.] będzie porównywalna z wartością reaktancji synchronicznej a nawet większa według [14].



Rys. 1.2. Schemat zastępczy kriogeneratora dla określenia reaktancji przejściowej X_d'

Udział mniejszej reaktancji rozproszenia stojana X_{11} w reaktancji przejściowej X_d' redukuje w pewnym stopniu wzrost reaktancji rozproszenia uzwojenia wzbudzenia X_{f1} . W rezultacie tego, wartości reaktancji X_d' dla kriogeneratora i maszyny konwencjonalnej nie powinny się znacznie różnić. Szacuje się, że wartość reaktancji przejściowej X_d' będzie wynosiła 0,25 - 0,30 p.u.

1.1.1.4. Reaktancje kriogeneratora w osi poprzecznej

Z racji zachowania symetrii obwodu magnetycznego kriogenerato-
ra przyjmuje się, że wartości reaktancji w obu osiach "d" i "q" są
sobie równe, tj. $X_d = X_q$; $X_d' = X_q'$; $X_d'' = X_q''$.

1.1.2. Stałe czasowe kriogeneratora

1.1.2.1. Stała czasowa przejściowa T_{do}

Odmienność wykonania uzwojenia wzbudzenia, a szczególnie wyko-
rzystanie nadprzewodnictwa, pociąga za sobą istotną zmianę wartości
stałej czasowej przejściowej przy otwartym obwodzie stojana T_{do}' .

$$T_{do}' = \frac{L_{FF}}{R_F} [s] ,$$

gdzie:

L_{FF} - indukcyjność własna obwodu wzbudzenia w [H] ,
 R_F - rezystancja obwodu wzbudzenia w [Ω].

Rezystancja nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia ochłodzonego do
temperatury ok. 4,2°K przyjmuje wartość bliską zeru, jednakże z
uwagi na sposób zasilania, rezystancja obwodu wzbudzenia będzie
różna od zera, ze względu na rezystancje doprowadzeń, szczotek
i obwodów prostujących. Z uwagi na to, stała czasowa T_{do}' ma war-
tość skończoną, różną od nieskończoności. Wartości stałej T_{do}'
kriogeneratorów wahają się w granicach setek sekund, a więc róż-
nią się o dwa rzędy wielkości w odniesieniu do wartości T_{do}' ma-
szyn konwencjonalnych. Wartość tych ostatnich mieści się zazwyczaj
w przedziale /2 - 12/ s. Stała czasowa T_{do}' obok reaktancji syn-
chronicznej X_d kriogeneratora, jest drugim parametrem który różni
się zasadniczo od odpowiednich wartości tych parametrów maszyny
konwencjonalnej. Tak duża stała czasowa sprawia, że duże prądy
zwarciove oddziałują długo dynamicznie i cieplnie na kriogenera-
tor.

1.1.2.2. Stała czasowa podprzejściowa T_{do}''

Wartość stałej czasowej T_{do}'' zależy w głównej mierze od konstrukcji kriogeneratora, od układu masywnych cylindrycznych ekranów i ich wzajemnego usytuowania. Spodziewane wartości stałej T_{do}'' dla kriogeneratorów będą porównywalne do tych, które występują w przypadku generatorów konwencjonalnych.

1.1.3. Szacunkowe określenie zmian stałej inercji H kriogeneratora w porównaniu z maszyną konwencjonalną

Dokładne określenie zmian parametrów mechanicznych kriogeneratorów dużej mocy jest trudne z uwagi na niedostateczny stan zaawansowania prac nad kriomaszynami. Stałą inercji H maszyny określa zależność /1.2./ według [21] .

$$H = \frac{E_{KIN}}{S_N} [s] , \quad /1.2./$$

gdzie:

E_{KIN} - energia kinetyczna w [J] lub [MJ] ,

$$E_{KIN} = \frac{J_b \cdot \omega_N^2}{2g} [J] , \quad /1.3./$$

J_b - moment bezwładności w $[N \cdot m^2]$,

ω_N - znamionowa prędkość kątowna wirnika w $[rd \cdot s^{-1}]$,

g - przyspieszenie ziemskie w $[m \cdot s^{-2}]$,

S_N - znamionowa moc maszyny /jednostki odpowiednio, jak energia kinetyczna - w [VA] lub [MVA]/.

Ocenia się/według [18] /, że moment bezwładności J_b kriogeneratora o mocy 2 GVA i o prędkości obrotowej $n_N = 3600$ obr/min stanowi około 40 % wartości momentu bezwładności generatora konwencjonalnego tej samej mocy. Z zależności /1.3./ i /1.2./ wynika, że zmniejsz-

szenie momentu bezwładności J_b kriogeneratora pociąga za sobą proporcjonalne zmniejszenie stałej bezwładności H . Obniżenie momentu bezwładności będzie większe dla kriogeneratorów z dwoma parami biegunów. Jefferies [18] szacuje, że moment bezwładności tych maszyn będzie wynosić ok. 30 % tej wielkości maszyny konwencjonalnej. Ze względu na połączenie generatora z konwencjonalną turbiną, całkowite zmniejszenie się stałej bezwładności H_T krioturbozespołu będzie wobec tego odpowiednio mniejsze.

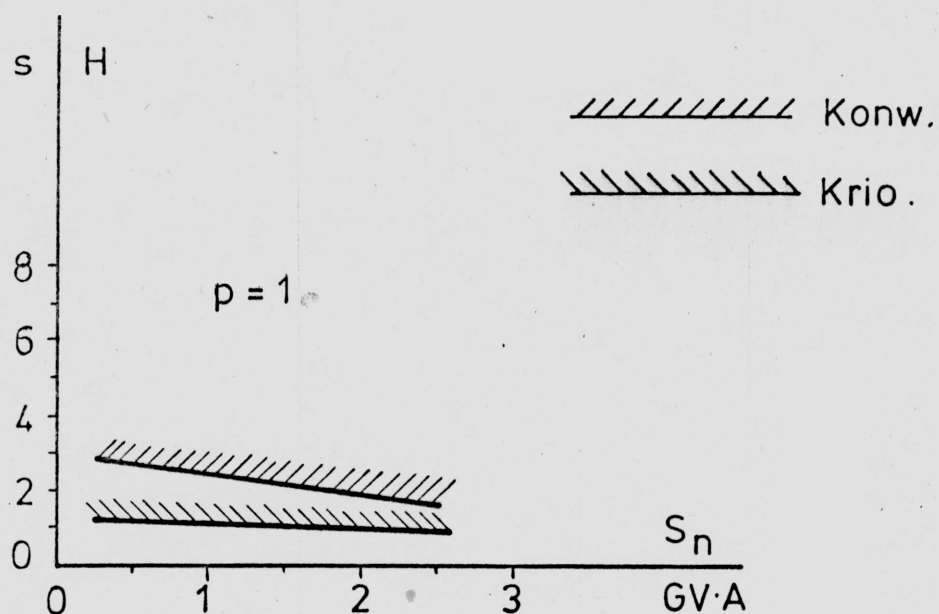
1.2 Porównanie tendencji zmian niektórych parametrów w funkcji mocy dużych generatorów konwencjonalnych i kriogenicznych

Zestawienie charakterystyk obszaru zmian podstawowych parametrów w funkcji mocy jednostki jest nieodzowne dla wyboru parametrów reprezentatywnego obiektu rozważań. Mimo, że na obecnym etapie znajomości zagadnienia dane konstrukcyjne kriomaszyn należy traktować jako szacunkowe, to zestawienie rozproszonych w literaturze informacji pozwala na uzyskanie ciekawego porównania parametrów obu rodzajów maszyn.

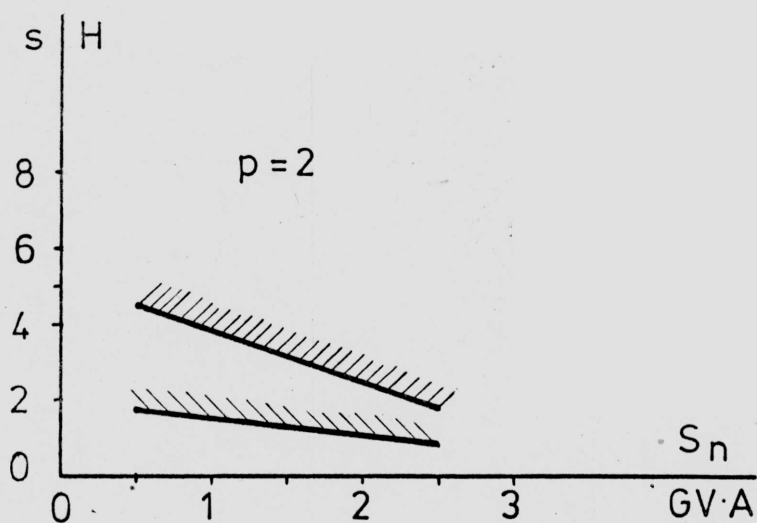
Na rys. 1.2. przedstawiono zależność stałej inercji H w funkcji mocy znamionowej S_N obu rodzajów generatorów. Charakterystyki $H = f/S_N$ rys. 1.3. i 1.4. dla kriogeneratorów wynikają z rozważań zawartych w p. 1.1.3. nin. pracy. Dane zaś dla maszyn konwencjonalnych podano za [37]. Interesujące jest porównanie tendencji zmian reaktancji synchronicznej X_d w funkcji mocy tych maszyn /rys. 1.5./. Z porównania wynika, że wielkość X_d kriogeneratorsa osiąga maksymalną wartość ok. 0,45 p.u. w zakresie mocy 4 - 10 GVA według [24][47]. Niektórzy autorzy podają nawet wartość $X_d = 0,52$ p.u. według [8].

Przewidywane wartości reaktancji X'_d generatorów konwencjonalnych i kriogenicznych ilustruje rysunek 1.6.

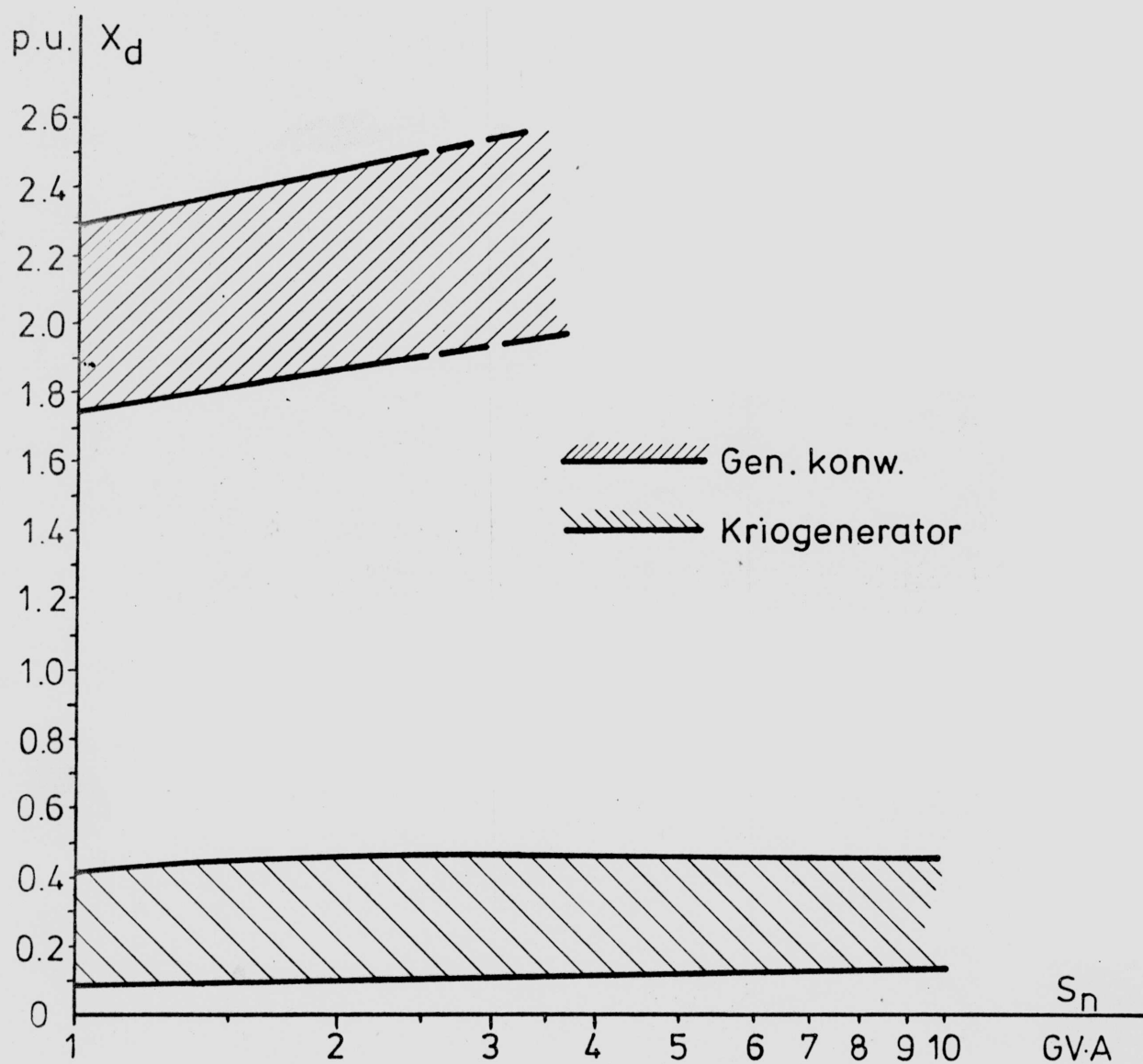
Przy większych gęstościach strumienia magnetycznego, straty w stojanie powinny zmaleć wskutek podzielenia prętów na dużą liczbę cienkich splotek. Taka konstrukcja pręta stojana kriogeneratorsa



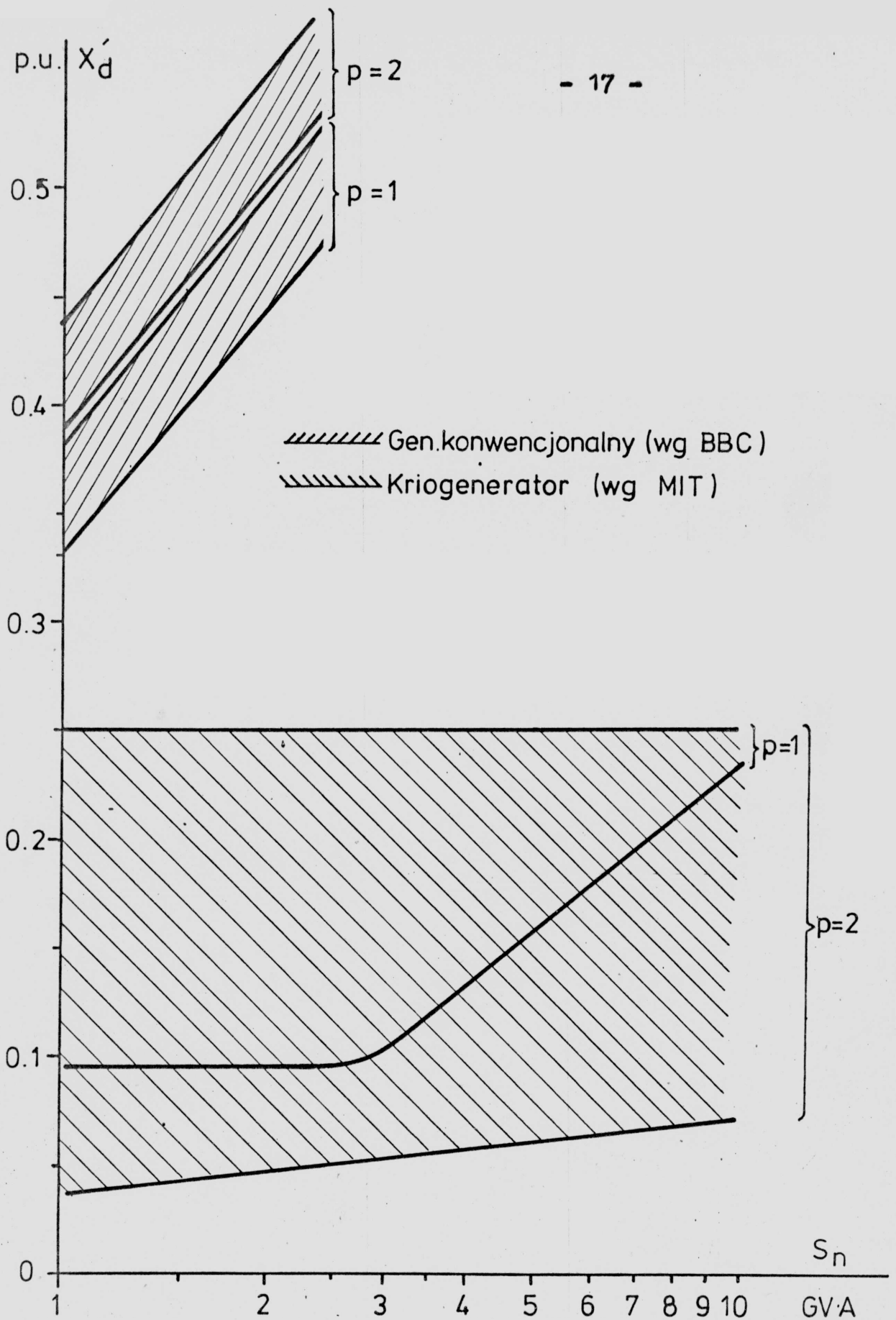
Rys. 1.3. Dolna granica stałej inercji H w funkcji mocy dla $p=1$ / p - liczba par biegunów /



Rys. 1.4. Dolna granica stałej H w funkcji mocy dla $p = 2$



Rys. 1.5. Porównanie tendencji zmian reaktancji synchronicznej X_d w funkcji mocy znamionowej



Rys. 1.6. Porównanie tendencji zmian reaktancji przejściowej X'_d w funkcji mocy

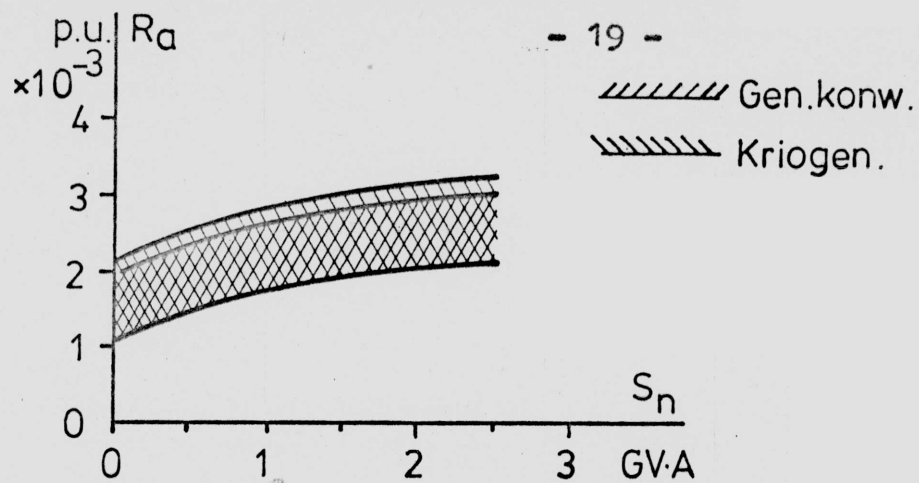
pociągnie za sobą niewielki wzrost rezystancji w stosunku do maszyny konwencjonalnej. Ponieważ uzwojenia stojana kriogeneratora nie są nadprzewodzącymi, przeto zmiana rezystancji tych uzwojeń w funkcji jego mocy przebiegać będzie podobnie jak w maszynie konwencjonalnej, co przedstawiono na rys. 1.7a. Tak więc, pominięcie tej wielkości przy rozważaniach pracy kriomaszyny wnosi błąd o wartości porównywalnej do błędu wynikłego z tego założenia w odniesieniu do maszyny konwencjonalnej.

Określenie zmian stałej czasowej T_d' w funkcji mocy dla kriogeneratorów jest trudne z uwagi na bliską zeru wartość rezystancji uzwojenia wzbudzenia. Z tego też względu spodziewane wartości stałej T_d' kriogeneratorów wynoszą około kilku minut. W przypadku, który przeanalizowano w następnych częściach nin. pracy, stała T_d' wynosi ok. 500 s. Ze wzrostem mocy kriojednostki, rezystancja nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia ulegnie mniejszej zmianie w stosunku do zwiększenia się indukcyjności własnej L_{FF} tego uzwojenia. Wzrostowi mocy jednostki musi towarzyszyć m.in. wzrost amperozwojów wzbudzenia. Jednakże, z uwagi na trudności doprowadzenia coraz to większych prądów do uzwojenia wzbudzenia, należy spodziewać się ograniczenia wartości tych prądów. Konieczny wzrost przepływu będzie najprawdopodobniej osiągnięty poprzez zwiększenie liczby zwojów, co z kolei pociągnie za sobą wzrost indukcyjności własnej uzwojenia i tym samym wzrost wartości stałych T_{d0}' i T_d' . Tak więc, zmiana wartości T_d' kriogeneratorów w funkcji mocy będzie miała podobny charakter do maszyn konwencjonalnych, lecz przy wiele wyższych wartościach. Charakterystykę $T_d' = f/S_N$ dla maszyn konwencjonalnych przedstawiono na rys. 1.7b.

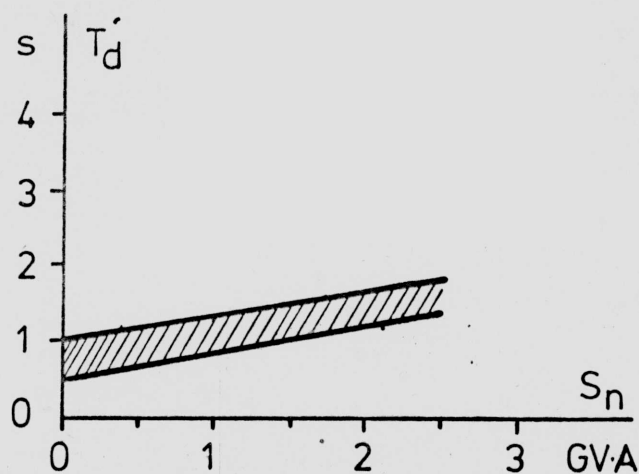
Jako uzupełnienie powyższych danych, rysunek 1.7c. pokazuje zmianę reaktancji X_T transformatora blokowego w funkcji jego mocy. Sprawą oczywistą jest, że energia wytwarzana przez maszynę konwencjonalną lub przez kriogeniczną będzie transformowana takimi samymi transformatorami.

Podsumowując powyższe rozważania stwierdza się, że największe różnice wartości parametrów występują dla: reaktancji synchronicznej X_d i stałej czasowej T_{d0}'/T_d' . One też będą w dużej mierze decydowały o odmienności zachowania się obu rodzajów maszyn w eksploatacji.

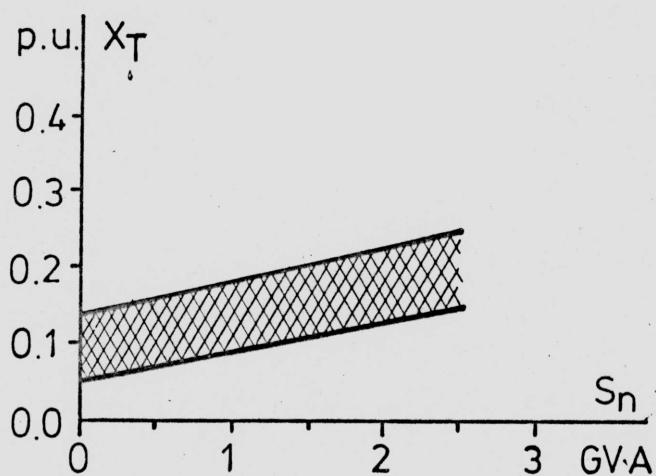
a)



b)



c)



Rys. 1.7. Zmiany parametrów w funkcji mocy
 a/ rezystancji stojana R_a
 b/ stałej czasowej T'_d
 c/ reaktancji X_T transformatora blokowego

1.3. Wybór maszyn i określenie ich parametrów do analizy porównawczej

Rozważania przeprowadzone w następnych częściach zawierają analizę porównawczą zachowania się maszyny o mocy 1 GVA w wykonaniu kriogenicznym i konwencjonalnym. Podstawowe dane tych generatorów zestawiono w tabeli 1 według [14]. Jak widać, wartości tych parametrów mieszczą się w przedziale ich granicznych wartości, które przedstawiano w punkcie 1.2. Z uwagi na zbyt małą liczbę danych, niektóre rozważania przeprowadzono przy dodatkowych założeniach upraszczających, które sformułowano dalej. Celem łatwiejszego porównania otrzymanych wyników przyjęto, że w warunkach pracy znamionowej $\cos \varphi_N = 0,85$, wartość napięcia fazowego stojana wynosi $U = 1$ p.u., zaś wartość prądu fazowego stojana przyjęto $J = 1$ p.u. Obliczenia parametrów pomocniczych umieszczono w załączniku 1.

Tabela 1

- Zestawienie parametrów

Wielkość	Jednostki	Generator konwencjonalny	Kriogenerator
1	2	3	4
S_N	MVA	1000	1000
X_d	p.u.	1,935	0,38
X_d'	p.u.	0,348	0,25
X_d''	p.u.	0,284	0,10
X_q	p.u.	1,898	0,38
X_q''	p.u.	0,279	0,10
T_{do}	s	5,65	750
T_{do}''	s	0,042	0,267
T_{qo}''	s	0,14	0,5

1	2	3	4
R_a	p.u.	0,0025	0,003
H	s	3,23	2,42
U_{FN}	p.u.	2,7	1,25
U_{FN}	V	340	6
J_{FN}	kA	6	6

Wartości napięć wzbudzenia podane w jednostkach względnych przy założeniu, że 1 p.u. odpowiada napięciu wzbudzenia przy biegu jałowym danej maszyny.

1.3.1. Szacunkowe określenie wartości znamionowych napięcia i prądu rozpatrywanych maszyn

W literaturze dotyczącej kriogeneratorów dużej mocy brak dokładniejszych informacji o wartościach przewidywanych napięć znamionowych. Jedną informacją jest wzmianka podana przez Jefferies'a według [18], że kriogeneratory mogą znaleźć zastosowanie jako maszyny wysokonapięciowe.

Celem wyrażenia, otrzymanych wyników w jednostkach mianowanych, wartość przemiennego napięcia znamionowego oparto na informacjach dotyczących dużych generatorów konwencjonalnych. Napięcia te zawierają się w przedziale 20 - 30 kV. Przykładowo generator konwencjonalny 1333 MVA, $\cos \varphi_N = 0,85$, ma napięcie znamionowe $U_N = 26$ kV według [17]. Jak wiadomo, wartość maksymalna napięcia znamionowego stojana turbogeneratora konwencjonalnego ograniczona jest względami izolacji głównej. W przypadku maszyn kriogenicznych, nieobecność żelaza na drodze strumienia głównego powoduje, że uzwojenie stojana umieszczone w żłobkach konstrukcji nośnej, niemagnetycznej, będącej jednocześnie specyficznym układem izolacyjnym, znajduje się w "dużej szczelinie powietrznej". Tak więc, ograniczenia pochodzące od izolacji głównej nie są tak ostre. W związku z tym istnieje realna możliwość znacznego podwyższenia napięć znamionowych kriogeneratorów.

Jako napięcie znamionowe generatora konwencjonalnego przyjęto wartość $U_N = 27$ kV. W przypadku kriogeneratora przyjęto dwa warianty: $U_{N1} = 27$ kV oraz $U_{N2} = 54$ kV. Przy zadanej wartości mocy obu jednostek $/S_N = 1$ GVA/, prądy znamionowe wynoszą odpowiednio: $J_{N1} = 21,38$ kA oraz $J_{N2} = 10,69$ kA. Założenie konkretnych wartości znamionowych pozwoli na urzeczywistnienie skali problemów związanych z awaryjną pracą kriogeneratora.

C Z Ę Ś Ć 2

PRACA USTALONA

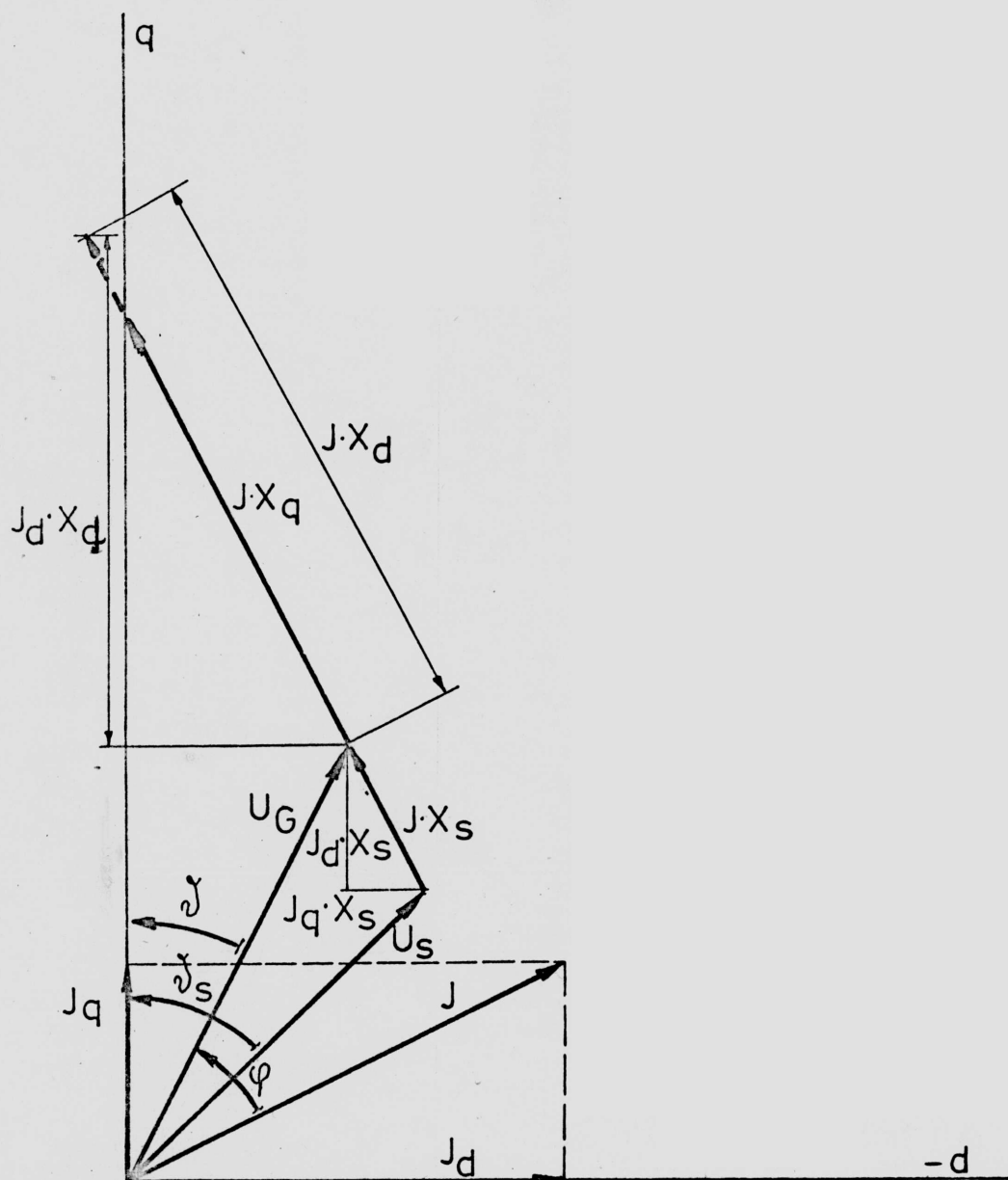
2.1. Założenia upraszczające

Analiza pracy ustalonej kriogeneratora pozwoli nie tylko na wychwycenie odmienności problemów i wynikających odmienności zachowania się kriogeneratora, lecz także na wskazanie nowych cech takiej maszyny, w porównaniu z konstrukcjami konwencjonalnymi.

Rozważania przeprowadzono przy następujących założeniach:

- maszyna jest obciążona symetrycznie,
- wszelkie rozważania dotyczą maszyny idealnej /pomija się wpływ nasycenia, rezystancję stojana itp./,
- przyjmuje się symetrię maszyny w obu osiach "d" i "q",
- maszyna współpracuje z systemem sztywnego napięcia poprzez reaktancję zastępczą X_s ,
- do obliczeń wykorzystuje się wykres wektorowy maszyny rys. 2.1.,
- moment napędowy turbiny i obroty turbozespołu są stałe.

Kriogenerator jest bliższy pojęciu maszyny idealnej aniżeli maszyna konwencjonalna, z uwagi na fakt, że problem nasycenia jego obwodu magnetycznego nie występuje.



Rys. 2.1. Wykres wektorowy stanu ustalonego maszyny

Z wykresu wektorowego stanu ustalonego maszyny /rys. 2.1./ wynikają zależności /2.1. - 2.6./

$$U_s = \sqrt{(U - J \cdot \sin \varphi \cdot X_s)^2 + (J \cdot \cos \varphi \cdot X_s)^2}, \quad /2.1./$$

$$\vartheta = \arctg \frac{J \cdot \cos \varphi}{\frac{U}{X_q} + J \cdot \sin \varphi}, \quad /2.2./$$

$$\psi_s = \arcsin \left[\frac{U / X_q + X_s}{U_s \cdot X_q} \cdot \sin \vartheta \right], \quad /2.3./$$

$$J_q = \frac{U \cdot \sin \psi_s}{X_q}, \quad /2.4./$$

$$J_d = \pm \sqrt{J^2 - J_q^2}, \quad /2.5./$$

$$E_d = U \cdot \cos \psi_s + J_d \cdot X_d, \quad /2.6./$$

gdzie:

- U_s - napięcie systemu przyjęte jako sztywne,
- X_s - reaktancja zastępcza systemu,
- φ - kąt między napięciem i prądem maszyny,
- ϑ - kąt między napięciem U na zaciskach i sem. E_d ,
- E_d - sem. maszyny w osi podłużnej,
- ψ_s - kąt między napięciem systemu U_s i sem. E_d ,
- $J_d; J_q$ - składowe prądu J w osi podłużnej i poprzecznej.

2.2. Charakterystyka zwarcia ustalonego; przeciążalność statyczna

Odmienność budowy kriogeneratora, a szczególnie brak żelaza na drodze strumienia głównego w istotny sposób wpływa na wartość stosunku zwarcia K_z . Jak wiadomo, stosunek zwarcia w znacznej mierze decyduje o zachowaniu się maszyny.

Może on być wyrażony następująco:

$$K_Z = \frac{J_{FON}}{J_{FZN}}, \quad /2.7./$$

gdzie:

J_{FON} - znamionowy prąd wzbudzenia biegu jałowego,
 J_{FZN} - znamionowy prąd wzbudzenia przy zwarcu trójfazowym
 /gdy prąd zwarciový stojana $J_Z = J_N$ /.

Konieczną do wyznaczenia K_Z wielkość J_{FZN} można określić z zależności:

$$J_{FZN} = J_{FN} \cdot \frac{\sin \psi_N}{\cos \varphi_N}, \quad /2.8./$$

wstawiając zależność /2.8./ do wyrażenia /2.7./ otrzymuje się:

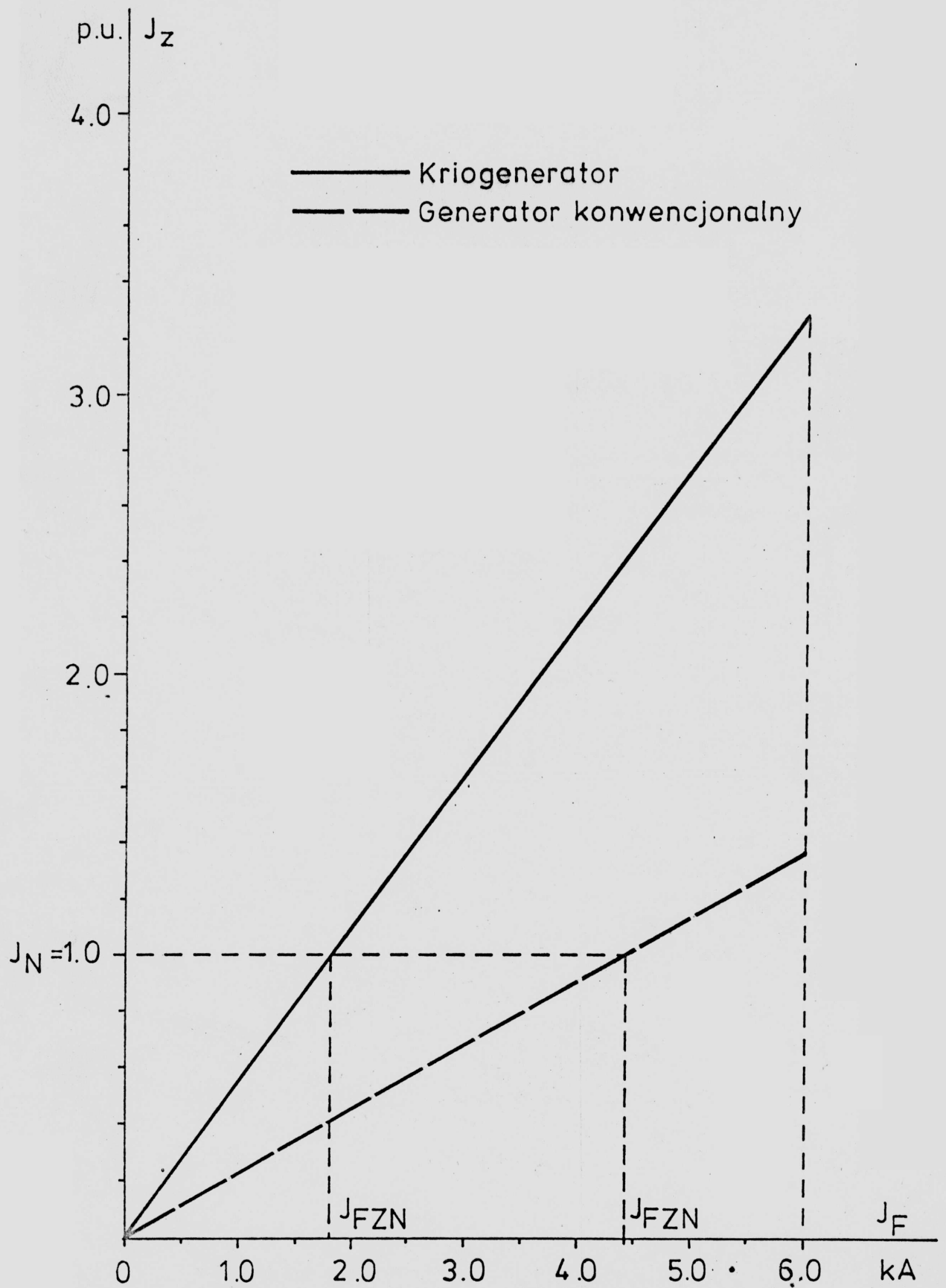
$$K_Z = \frac{J_{FON}}{J_{FN}} \cdot \frac{\cos \varphi_N}{\sin \psi_N}, \quad /2.9./$$

W tabeli 2.1. zestawiono wartości K_Z oraz wartości charakterystycznych wielkości prądu wzbudzenia dla obu maszyn.

Tabela 2.1.

Wielkość	Jednostki	Kriogenerator 1 GVA	Generator konw. 1 GVA
J_{FN}	kA	6,00	6,00
J_{FON}	kA	4,80	2,22
J_{FZN}	kA	1,83	4,43
N	o	15,09	33,9
K_Z	-	2,62	0,5

Z racji małego oddziaływania twornika w kriogeneratorze, znamionowy prąd wzbudzenia przy zwarciu ustalonym J_{FZN} jest co najmniej dwukrotnie mniejszy od prądu w maszynie konwencjonalnej. Zwiększenie reluktancji obwodu magnetycznego kriogeneratora pociąga za sobą konieczność znacznego zwiększenia prądu J_{FON} . Tak więc, jednoczesne zwiększenie



Rys. 2.2. Charakterystyka zwarcia symetrycznego ustalonego

szenie J_{FON} połączone ze zmniejszeniem wartości J_{FZN} sprawia, że stosunek zwarcia kriogeneratorów jest kilkakrotnie większy niż maszyn konwencjonalnych. Na podstawie uzyskanych danych wykreślono charakterystyki symetrycznego zwarcia ustalonego dla obu maszyn rys. 2.2. Znacznie większe wartości K_z wskazują na to, że kriogeneratory będą cechować: korzystniejsze charakterystyki stabilności statycznej, mniejsza zmienność napięcia i większe prądy zwarcia.

Mala wartość reaktancji synchronicznej kriogeneratora sprawia, że kąt obciążenia maszyny jest znacznie mniejszy niż w generatorze konwencjonalnym. Pociąga to za sobą zwiększenie współczynnika przeciążalności statycznej u , który wyraża się stosunkiem momentu krytycznego maszyny do momentu znamionowego:

$$u = \frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{1}{\sin \vartheta_N}, \quad /2.10./$$

gdzie:

$$M_n = c \frac{E_d \cdot U}{X_d} \cdot \sin \vartheta_N,$$

c - stała wynikająca z przyjętego układu jednostek.

Przekształcając zależność /2.2./ otrzymujemy:

$$\vartheta = \arctg \left[\operatorname{tg} \varphi + \frac{J}{U \cos \varphi} X_q \right] - \varphi. \quad /2.11./$$

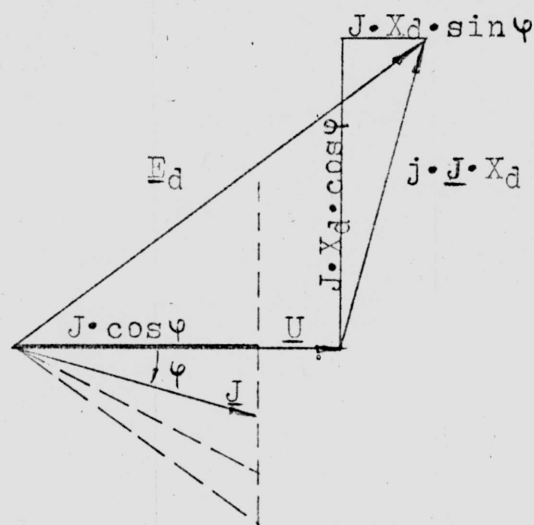
Po uwzględnieniu warunków pracy znamionowej $/U = J = 1 \text{ p.u.},$
 $= \cos \varphi /$ zależność /2.10./ przebiera następującą postać:

$$u = \frac{1}{\sin \left[\arctg \left[\operatorname{tg} \varphi_N + \frac{X_q}{\cos \varphi_N} \right] - \varphi_N \right]}. \quad /2.12./$$

Przy stałej wartości φ_N przeciążalność statyczna jest dość zawiłą funkcją reaktancji X_q . Wyliczony współczynnik przeciążalności kriogeneratora 1 GVA wynosi 3,86, a dla ekwiwalentnego generatora konwencjonalnego - 1,59. Z porównania obu wartości wynika, że przeciążalność kriogeneratora jest ok. 2,4 razy większa.

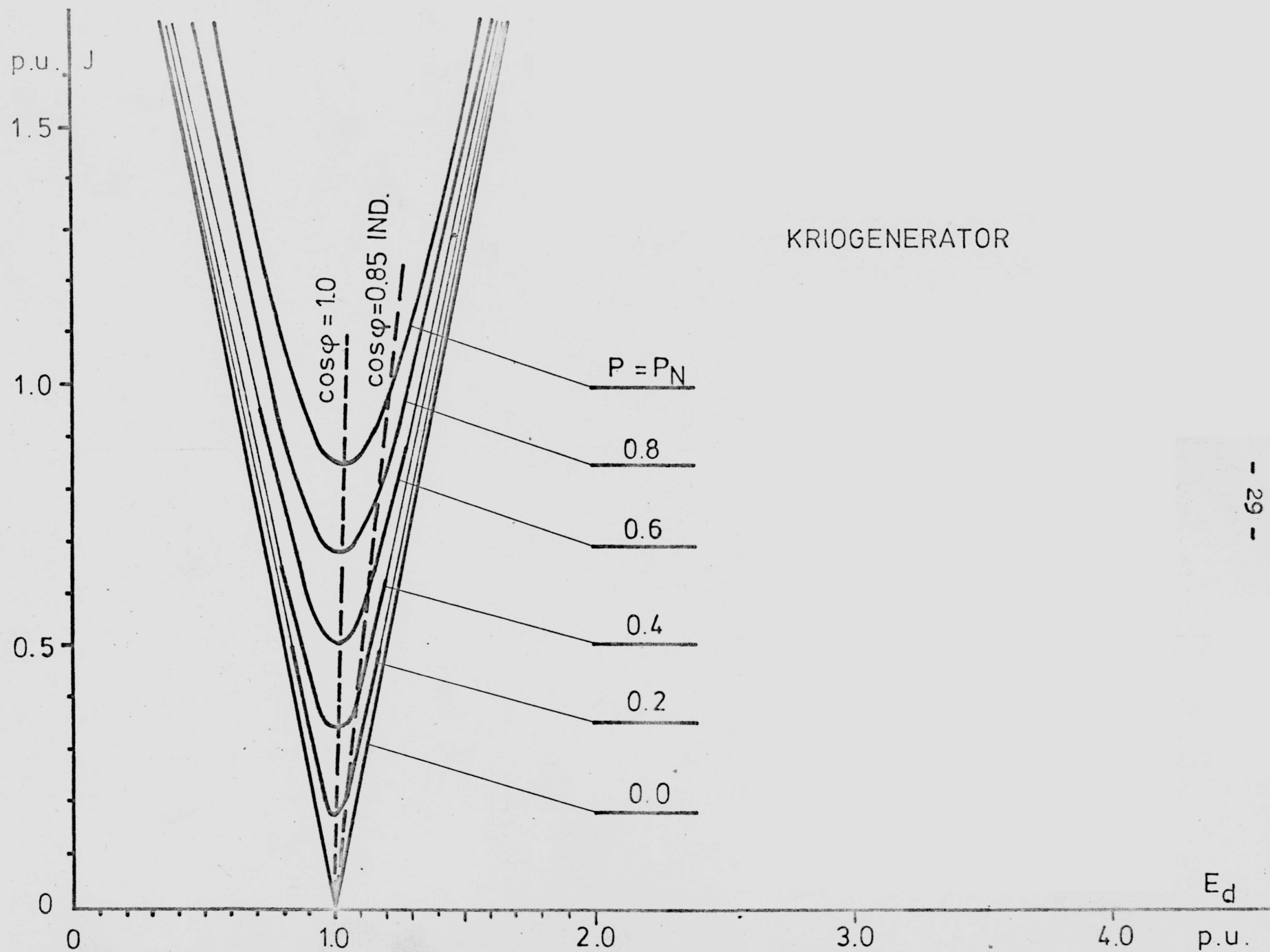
2.3. Praca kriogeneratora synchronicznego przy stałej wartości mocy czynnej i napięcia na zaciskach

Praca maszyny przy stałym napięciu $/U = \text{const}/$, stałej częstotliwości $/f = \text{const}/$ i stałej mocy czynnej $/P = \text{const}/$ występuje w warunkach ruchowych generatora przyłączonego do sieci sztywnej. Przy stałej wartości mocy czynnej, wartość składowej czynnej prądu twornika $J \cdot \cos \varphi$ jest stała. Rys. 2.3.

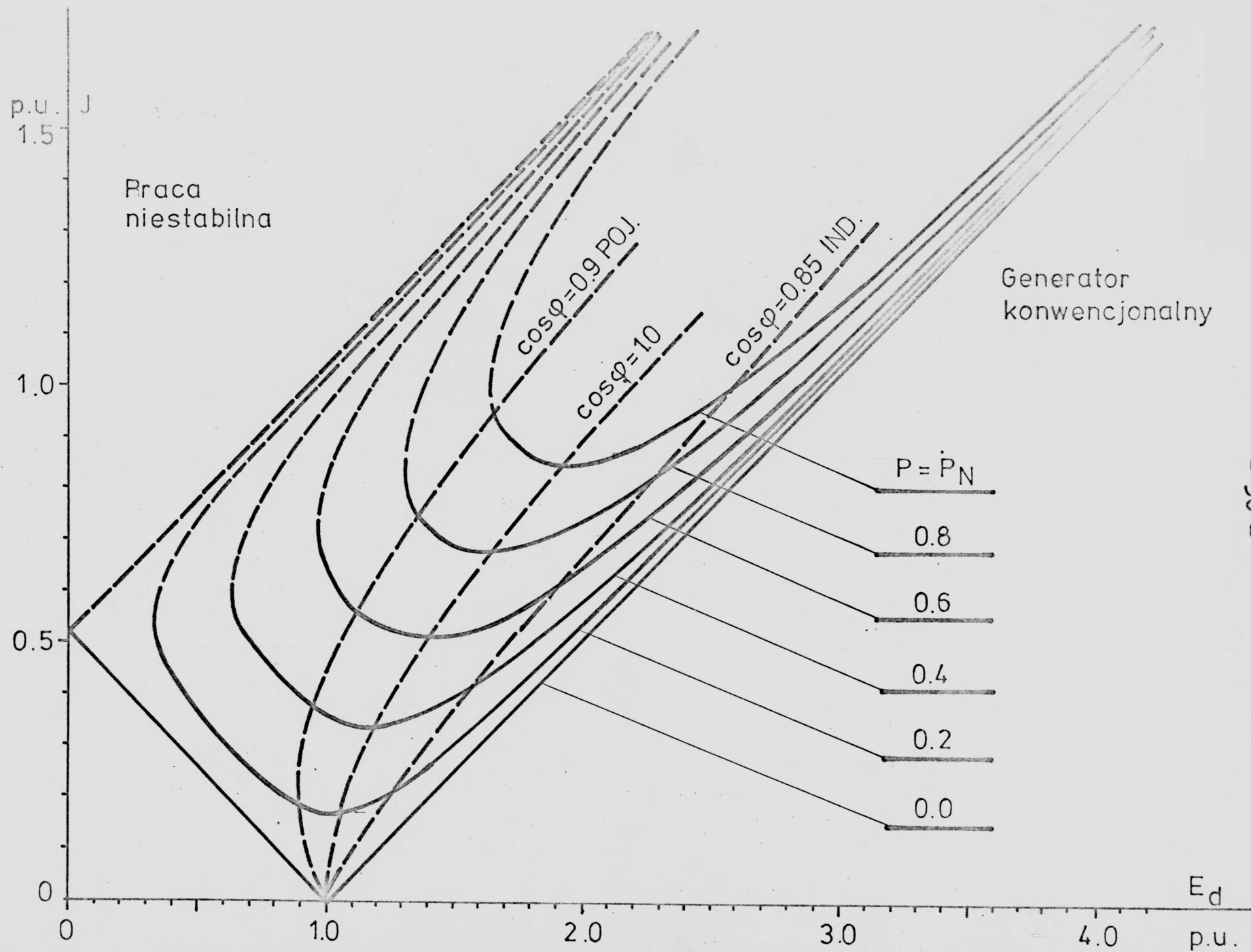


Rys. 2.3. Wykres pomocniczy do wyznaczenia charakterystyk Mordey'a

Otrzymujemy wówczas zależność prądu twornika od sem. E_d $/J = f/E_d//$, znaną pod nazwą krzywych "V" lub Mordey'a. Gdyby obwód magnetyczny maszyny konwencjonalnej nie ulegał nasyceniu, jak to ma miejsce w kriogeneratorze, to przebieg $J = f/E_d/$ byłby podobny do przebiegu $J = f/J_F/$. Jak wiadomo, na skutek nasycenia obwodu, krzywe "V" zostają odkształcone w obszarze przewzbudzenia rzeczywistej maszyny konwencjonalnej. Z uwagi na małą ilość szczegółowych danych maszyn o mocy 1 GVA i więcej, posłużono się uproszczonym modelem maszyny konwencjonalnej, nie ulegającej nasyceniu. Przy wyznaczaniu charakterystyk "V" kriogeneratora założenie takie jest zupełnie słuszne. Dla porównania charakteru przebiegów $J = f/E_d/$ obliczono te zależności dla kriogeneratora i maszyny konwencjonalnej. /Wyniki obliczeń zawiera załącznik 2/. Obliczenia przeprowadzono dla następujących mocy: $P = P_N$; $P = 0,8 P_N$; $P = 0,6 P_N$; $P = 0,4 P_N$; $P = 0,2 P_N$ i $P = 0$, a wykresy tych zależności



Rys. 2.4. Krzywe "V" kriogeneratora 1 GVA



Rys. 2.5. Krzywe "V" generatora konwencjonalnego 1 GVA

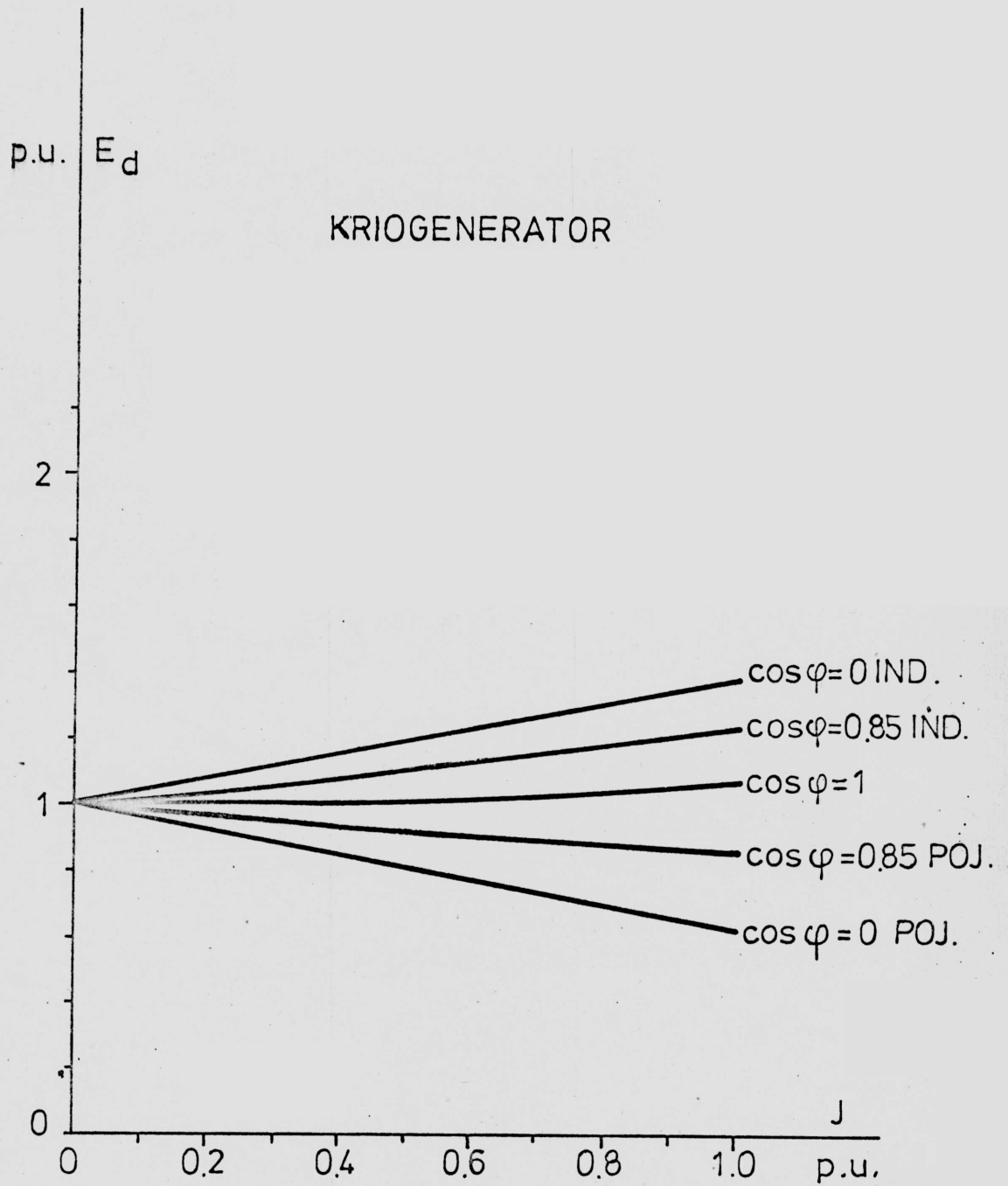
przedstawiono na rys. 2.4. i rys. 2.5. Obszar na prawo od linii $\cos \varphi = 1$ odpowiada pracy przy obciążeniu indukcyjnym /przewzbudzenie/, zaś na lewo - pracy przy obciążeniu pojemnościowym /niedowzbudzenie/. Stabilny zakres pracy maszyn zaznaczono liniami ciągłymi, zaś obszar pracy niestabilnej, gdzie $\vartheta > 90^\circ$, liniami przerywanymi. Porównując charakterystyki kriogeneratora i generatora konwencjonalnego, nie trudno zauważyć, że mniejsza wartość reaktancji X_d wywołuje bardzo stromy przebieg krzywych $J = f/E_d$ kriomaszyny. Tak więc, niewielkie zmiany prądu wzbudzenia wywołują duże zmiany prądu twornika. Ten fakt sprawia, że kriogenerator w rozpatrywanym zakresie pracy okazuje się dużo podatniejszym obiektem regulacji niż generator konwencjonalny. Szczególnie przy niedowzbudzeniu, kriogenerator nie wykracza poza obszar pracy stabilnej, co ma często miejsce w przypadku maszyn konwencjonalnych.

2.4. Charakterystyki regulacyjne; charakterystyka zewnętrzna

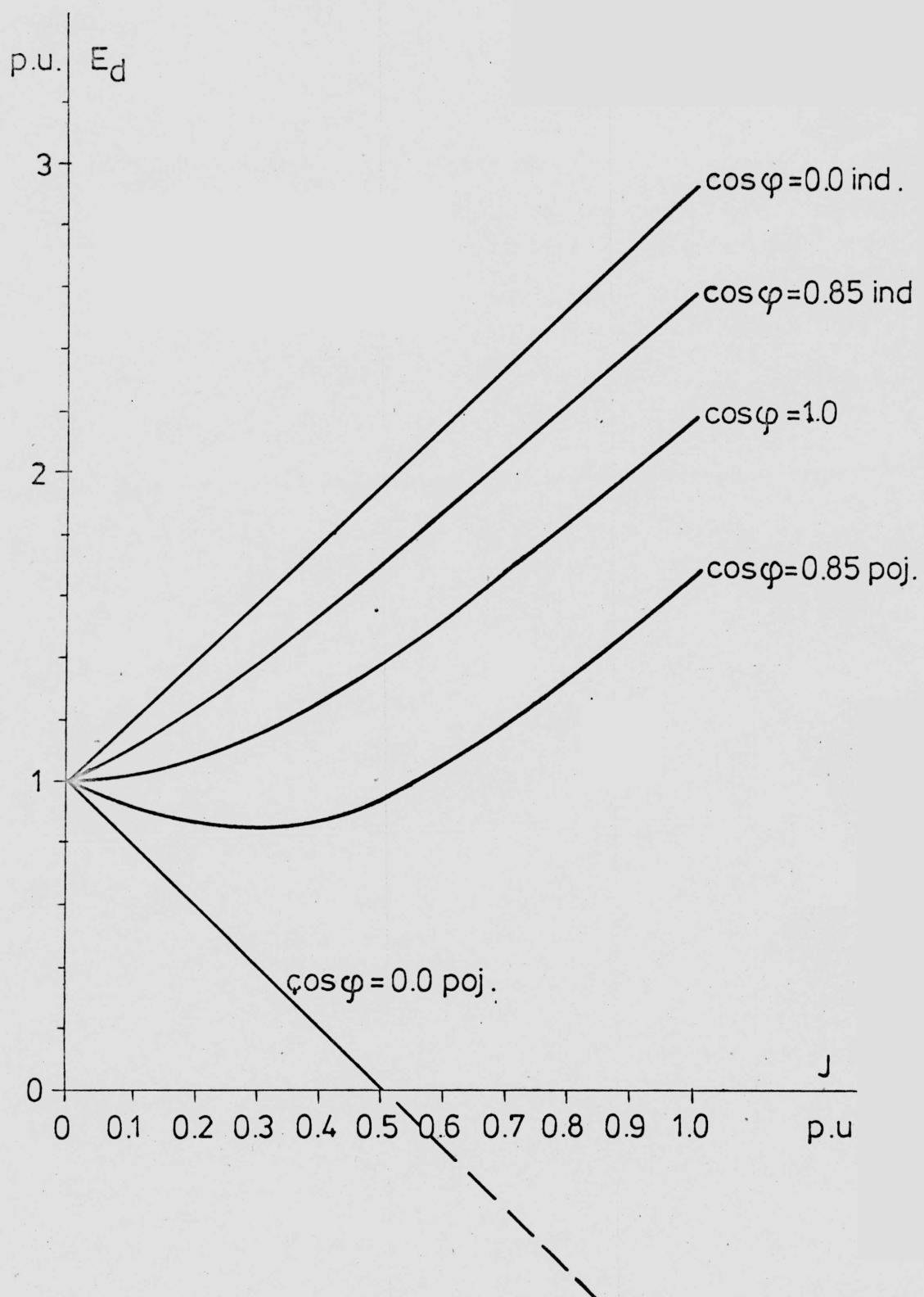
Celem uzupełnienia rodziny charakterystyk stanu ustalonego wynikających z wykresu wektorowego, obliczono charakterystyki regulacyjne kriogeneratora i generatora konwencjonalnego i przedstawiono je na rys. 2.6. i 2.7. /*/ Za charakterystykę regulacyjną uważa się zależność $E_d = f/J$, przy $U = U_N$; $\cos \varphi = \text{const}$ i $n = \text{const}$. Przy znamionowym współczynniku mocy i przy znamionowym prądzie twornika, prąd wzbudzenia, dla utrzymania napięcia znamionowego musi być w przypadku maszyny konwencjonalnej ok. 2,6 razy większy niż znamionowy prąd wzbudzenia przy biegu jałowym J_{FON} . W przypadku kriogeneratora, wymagana krotność prądu wzbudzenia wynosi ok. 1,24. Przy znamionowym prądzie twornika kriogeneratora $J = 1$ p.u. do przejścia od pracy przy $\cos \varphi = 0$ poj. do pracy przy $\cos \varphi = 0$ ind., wystarcza zmiana prądu wzbudzenia od wartości ok. $0,62 J_{FON}$ do ok. $1,38 J_{FON}$. W przypadku maszyny konwencjonalnej, praca w tak szerokim zakresie zmian $\cos \varphi$ jest niemożliwa z

/*/

Wyniki obliczeń zamieszczono w zał. 2 i 3



Rys. 2.6. Charakterystyki regulacyjne kriogeneratora 1 GVA



Rys. 2.7. Charakterystyki regulacyjne generatora konwencjonalnego 1 GVA

uwagi na utratę stabilności statycznej w obszarze niedowzbudzenia. Z porównania wynika, że kriogenerator cechują o wiele korzystniejsze charakterystyki regulacji.

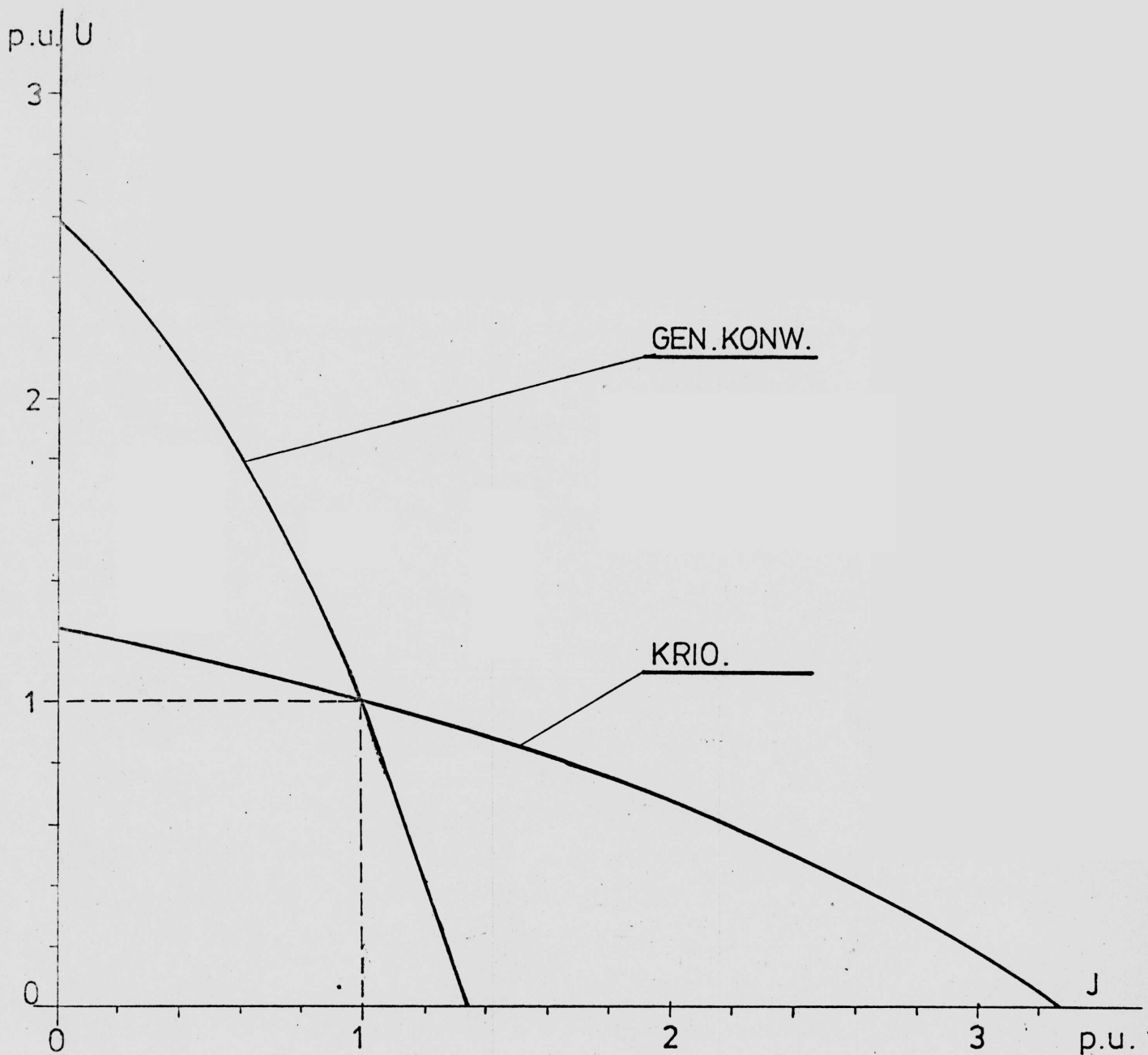
Charakterystyka zewnętrzna $U = f/J$ określa zmiany napięcia na zaciskach stojana w funkcji zmian wartości prądu obciążenia, przy zachowaniu warunku $\cos \varphi = \text{const}$, stałego prądu wzbudzenia J_F , $E_d = \text{const}$, oraz przy stałej prędkości obrotowej. Warunki takie występują przy zmianach obciążenia maszyny pracującej indywidualnie. Dla pokazania znacznie korzystniejszych charakterystyk zewnętrznych kriogenerators, obliczono te zależności dla $\cos \varphi = \cos \varphi_N = 0,85$ i dla $\cos \varphi = 1$ przy $J_F = \text{const}$ /rys. 2.8. i 2.9./. Charakterystyki $U = f/J$ wykreślono w oparciu o wykresy pomocnicze /załącznik 3/. Z przebiegiem charakterystyk zewnętrznych wiąże się znamionowa zmienność napięcia maszyn synchronicznych u_m . Wyznaczona wg PN-55IE - 06000, § 1.3.18 w oparciu o zależność 2.13. wartość u_m kriogenerators wynosi 24 %.

$$u_m = \frac{U_o - U_N}{U_N} \cdot 100 \% , \quad /2.13./$$

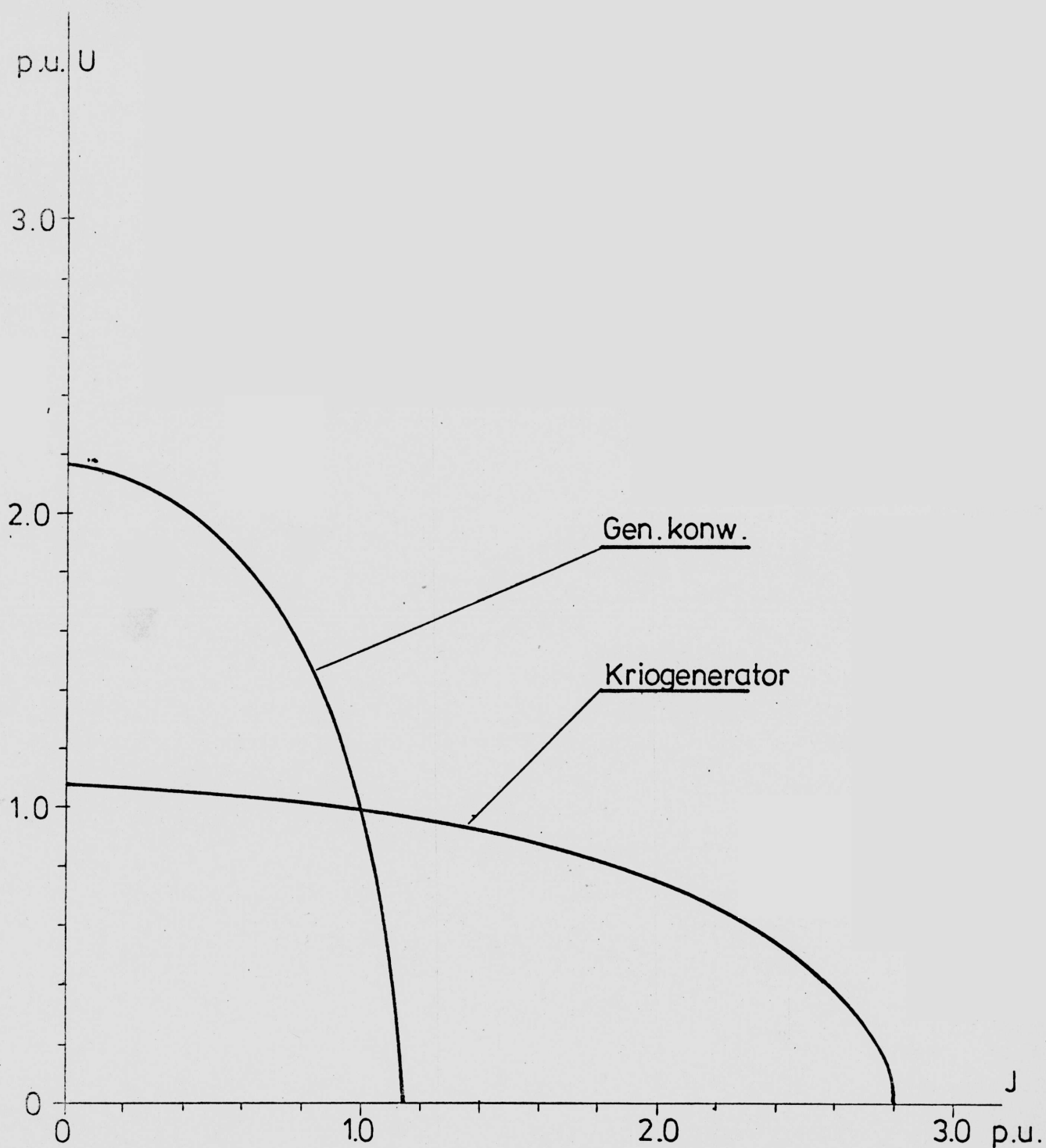
gdzie:

U_o - napięcie biegu jałowego przy znamionowym prądzie wzbudzenia J_{FN} /wartość odczytana z charakterystyki $U = f/J$./

Maszyny konwencjonalne są na ogół budowane tak, aby znamionowa zmienność napięcia nie przekraczała 40 - 50 % [3]. Mała wartość u_m kriogenerators jest obok wcześniej wymienionych, następną korzystną cechą tej maszyny.



Rys. 2.8. Charakterystyki zewnętrzne generatora konwencjonalnego i kriogeneratora 1 GVA
 / $J_F = J_{FN}$, $\cos \varphi = \cos \varphi_N = 0,85$ /



Rys. 2.9. Charakterystyki zewnętrzne generatora konwencjonalnego i kriogeneratora 1 GVA
/ $J_F = 0,87 J_{FN}$, $\cos \varphi = 1$ /

2.5. Analiza czynników ograniczających obszar pracy kriogeneratora

Dopuszczalne zakresy długotrwałej pracy generatora konwencjonalnego ograniczone są różnymi czynnikami, z których najważniejsze to:

- a/ prąd wzbudzenia,
- b/ prąd twornika,
- c/ moc turbiny,
- d/ stabilność pracy maszyny,
- e/ nagrzewanie się skrajnych elementów generatora.

W generatorach konwencjonalnych wartość prądu wzbudzenia J_F nie może długotrwale przekraczać wartości znamionowej J_{FN} . Wynika to z warunku nieprzekroczenia dopuszczalnej temperatury uzwojeń wzbudzenia, wynikłej wskutek dość dużych strat $J_F^2 \cdot R_F$ w uzwojeniu. W kriogeneratorach nie ma tak ostrych ograniczeń; bliska zeru wartość rezystancji uzwojenia wzbudzenia sprawia, że moc $J^2 R$ jest bardzo mała. Moc wzbudzenia stanu ustalonego kriogeneratora jest nieistotna, gdyż potrzebna jest tylko do pokonania wewnętrznych strat układu zasilającego i doprowadzeń. Dla przykładu, wartość mocy traconej w obwodzie wzbudzenia rozpatrywanych maszyn 1 GVA wynosi: ok. 2 MW dla maszyny konwencjonalnej i 35 kW dla kriogeneratora. Tak więc, w kriogeneratorze brak większych ograniczeń ze względu na nagrzewanie się uzwojenia. Krytyczna wartość prądu nadprzewodnika J_{FK} , przy której następujące utrata nadprzewodnictwa musi być odpowiednio większa od wartości znamionowej J_{FN} . Zapewnienie odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa zależy głównie od znajomości konstrukcji kriostat - uzwojenie nadprzewodzące.

Warunek nieprzekroczenia dopuszczalnej temperatury uzwojeń stojana wynika z wartości znamionowej prądu stojana. Uzależniony jest on m.in. od sposobu i intensywności chłodzenia. Ponieważ nie przewiduje się użycia nadprzewodzącego uzwojenia twornika, ograniczenie to będzie podobne jak w przypadku maszyny konwencjonalnej. Także i układy chłodzenia stojana kriogeneratora będą rozwiązywane podobnie jak w generatorach konwencjonalnych.

Ograniczenie pochodzące od mocy znamionowej jest oczywiste.

Ważnym ograniczeniem podczas eksploatacji maszyn konwencjonalnych jest nagrzewanie się skrajnych elementów przy niewzbudzeniu, kiedy strumienie rozproszenia stojana i wirnika są skierowane zgodnie i prostopadłe od litych płyt dociskowych wywołując duże straty wirowe. Konstrukcja kriogeneratora jest szczególnie odpowiednia dla pracy przy niedowzbudzeniu. Wiąże się to w głównej mierze z brakiem żelaza na drodze strumienia głównego, co pociąga za sobą wzrost reluktancji także dla strumienia rozproszonego. Tak więc strumień rozproszenia maleje co w połączeniu z nieobecnością ferromagnetyka powoduje, że grzanie się skrajnych elementów nie występuje w kriogeneratorze w takim stopniu jak w maszynie konwencjonalnej.

2.5.1. Wykres obciążalności kriogeneratora

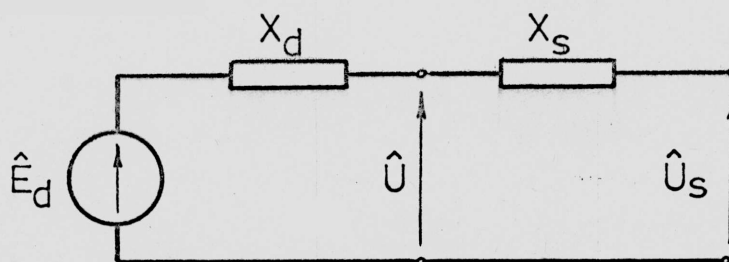
Nieodzownym składnikiem analizy czynników ograniczających obszar pracy kriomaszyny jest wykres jej obciążalności. Do wykonania wykresu zakłada się, że niedowzbudzona maszyna pracuje poprzez reaktancję zewnętrzną X_s na szyny sztywnego napięcia U_s /rys. 2.10/. Moc pozorna $\underline{S}$ w postaci zespolonej:

$$\underline{S} = U \cdot J \cdot \exp /-j\varphi / \quad /2.14./$$

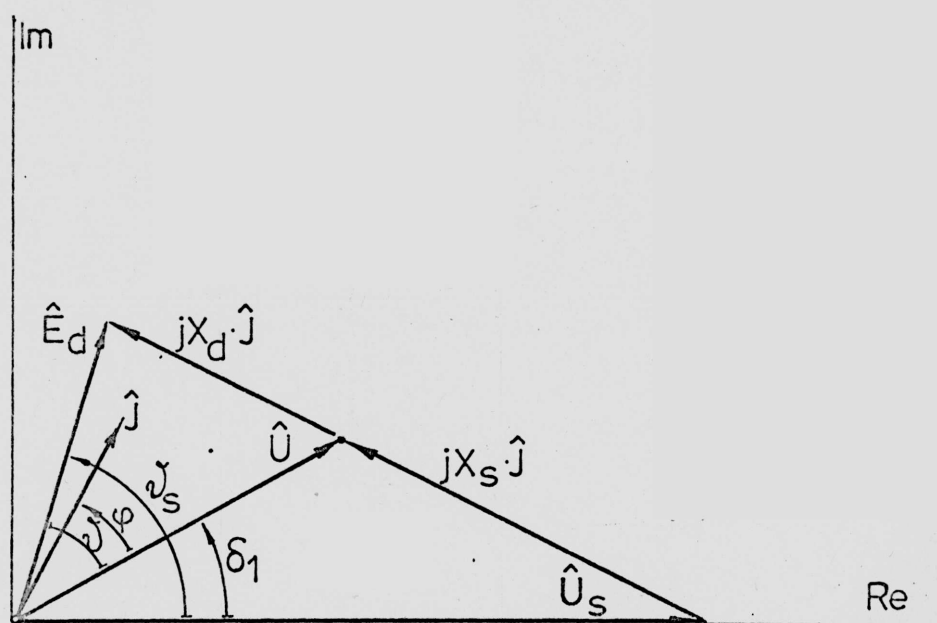
Przy $U = 1$ p.u. i $J = 1$ p.u. promień koła mocy wynosi 1. Jeśli napięcie $U = \text{const.}$, promień koła uzależniony jest od wartości prądu J . Wyznaczamy w ten sposób ograniczenie mocy generatora przez prąd stojana. Po przekształceniu zależności /2.14./, równanie okręgu mocy przyjmuje następującą postać /2.15./ według [29] :

$$\underline{S} = \frac{U \cdot E_d}{X_d} \cdot \exp \left[j \left(\delta_1 - \delta_s + \frac{\pi}{2} \right) \right] - j \frac{U^2}{X_d} \quad /2.15./$$

Wielkość $-j \frac{U^2}{X_d}$ oznacza przesunięcie środka koła mocy na ośi mocy biernych. Promieniem tego koła jest wartość $\frac{U \cdot E_d}{X_d}$.



Rys. 2.10. Schemat zastępczy układu do wyznaczenia wykresu obciążalności maszyn



Rys. 2.11. Wykres wektorowy generatora niedowzbudzonego współpracującego z systemem

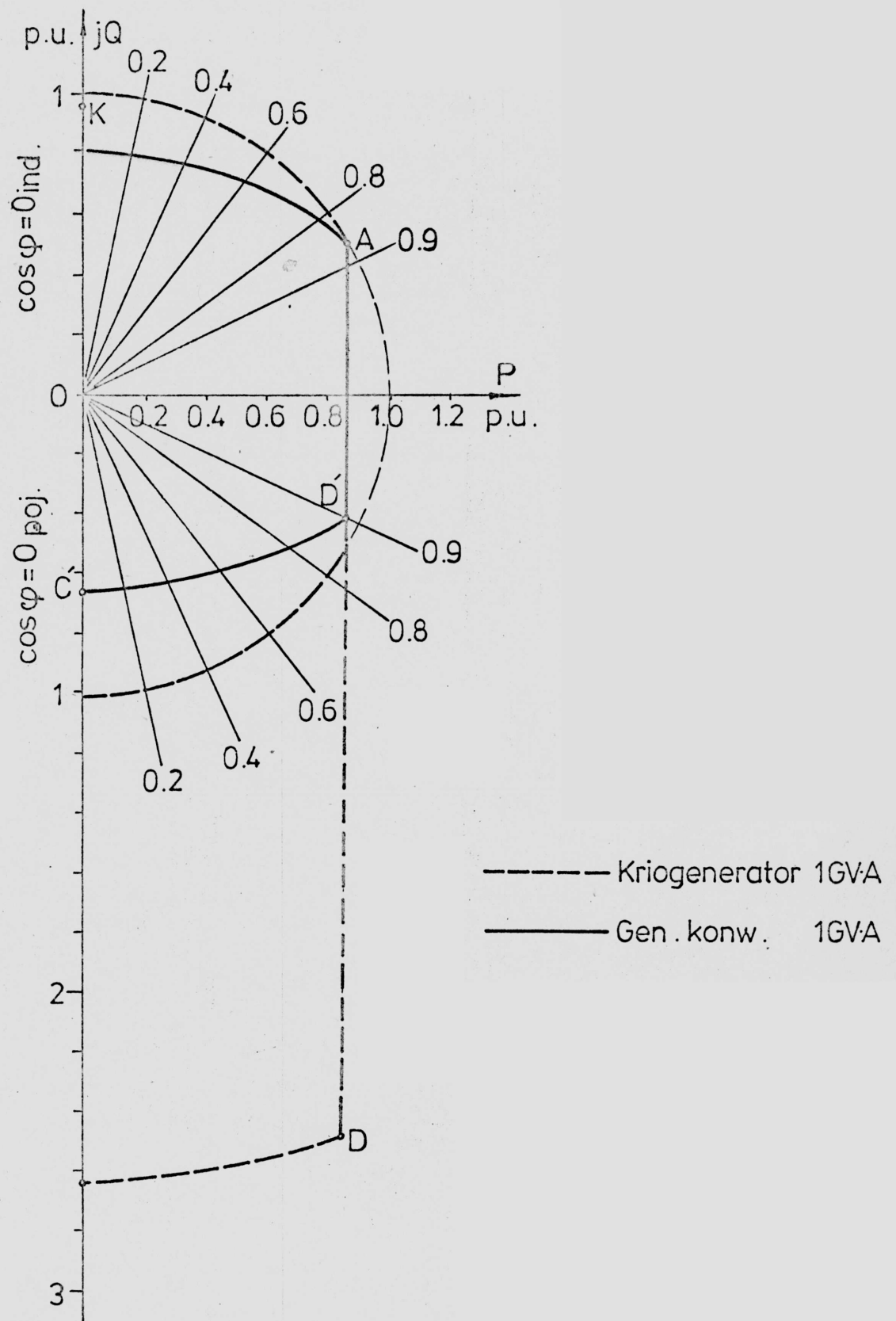
Przy danych wartościach U , X_d , promień ten jest funkcją $\text{sem. } E_d$ i oznacza ograniczenie przez prąd wzbudzenia. Bardzo ważnym ograniczeniem obszaru pracy generatora jest pogorszenie warunków stabilności statycznej, występujące szczególnie ostro przy niedowzbudzeniu. Krzywą ograniczającą jest okrąg o równaniu /2.16./:

$$\underline{S} = U^2 \frac{X_d + X_s}{2X_d \cdot X_s} \cdot \exp \left[j \left(2\delta_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right] + j U^2 \left(\frac{X_d + X_s}{2X_d \cdot X_s} - \frac{1}{X_d} \right)$$

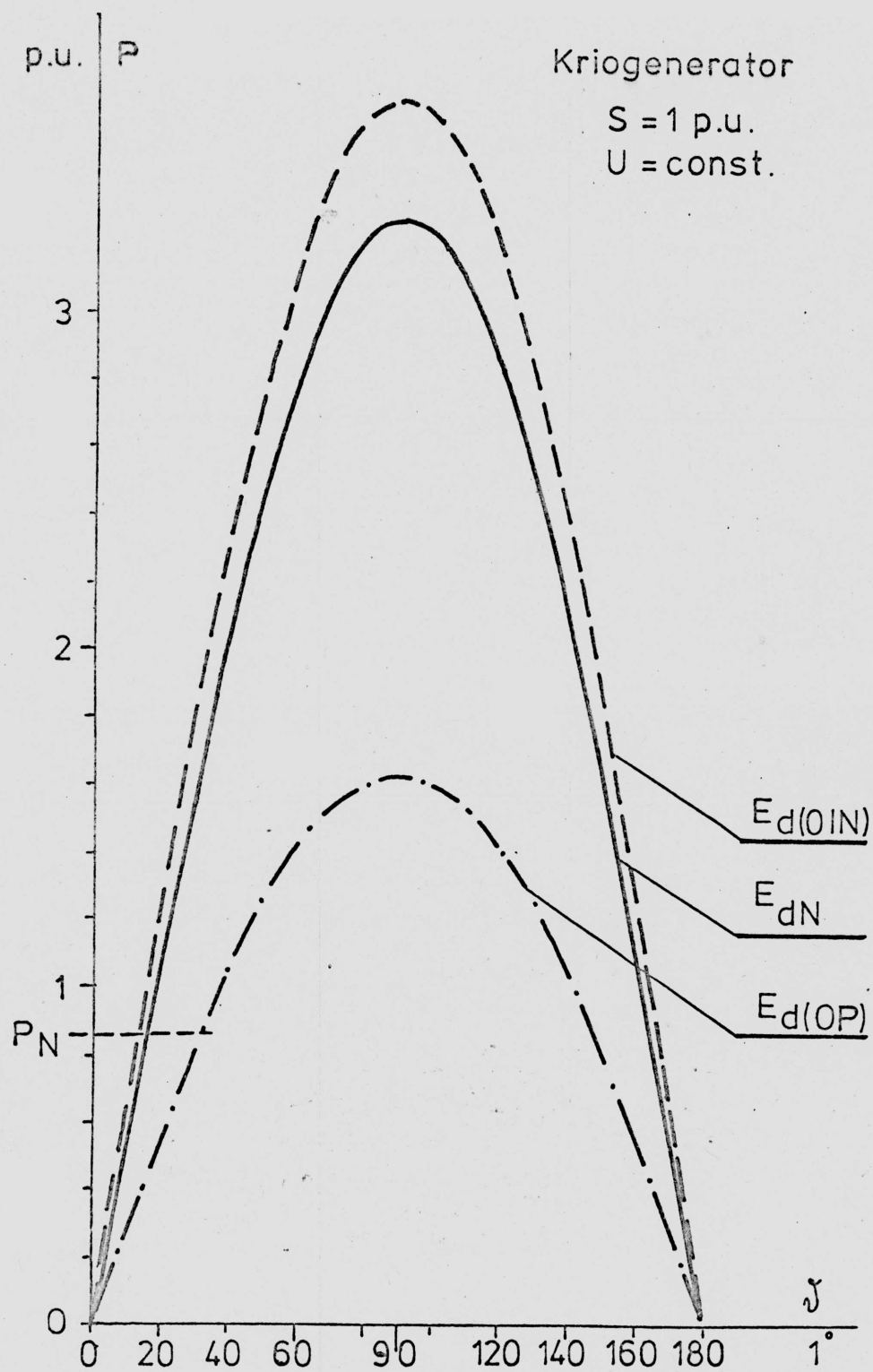
/2.16/

Wewnątrz tego okręgu spełniony jest warunek, że kąt δ_1 /rys. 2.11./ pomiędzy $\text{sem. } E_d$ a napięciem U_s systemu jest mniejszy od $\frac{\pi}{2}$. Wykres obciążalności kriogeneratora i generatora konwencjonalnego 1 GVA przedstawiono na rys. 2.12. Daje się zauważyć, że ograniczeniem pracy przy niedowzbudzeniu kriogeneratora jest tylko znamionowy prąd stojana. Do pokazania korzystniejszych własności w odniesieniu do stabilności statycznej samego kriogeneratora wykreślono zależności $P = f(\delta_1, E_d)$ przy założeniu, że wartość reaktancji $X_s = 0$ /rys. 2.13. i 2.14./. W przypadku kriogeneratora pracującego przy $\cos \varphi_{\text{poj}} = 0$ i momencie napędowym turbiny koniecznym do pokonania oporów mechanicznych, zwiększenie momentu do wartości znamionowej nie spowoduje wypadnięcia maszyny z synchronizmu /rys. 2.13./. Jeśli chodzi o generator konwencjonalny /rys. 2.14./, zwiększenie momentu turbiny do połowy wartości znamionowej powoduje wypadnięcie maszyny z synchronizmu. Wykreślone charakterystyki pozwalają na porównanie stabilności obu rodzajów maszyn. Kriogenerator wykazuje korzystniejsze cechy generowania mocy biernej zarówno indukcyjnej jak i pojemnościowej, aniżeli ekwiwalentna maszyna konwencjonalna.

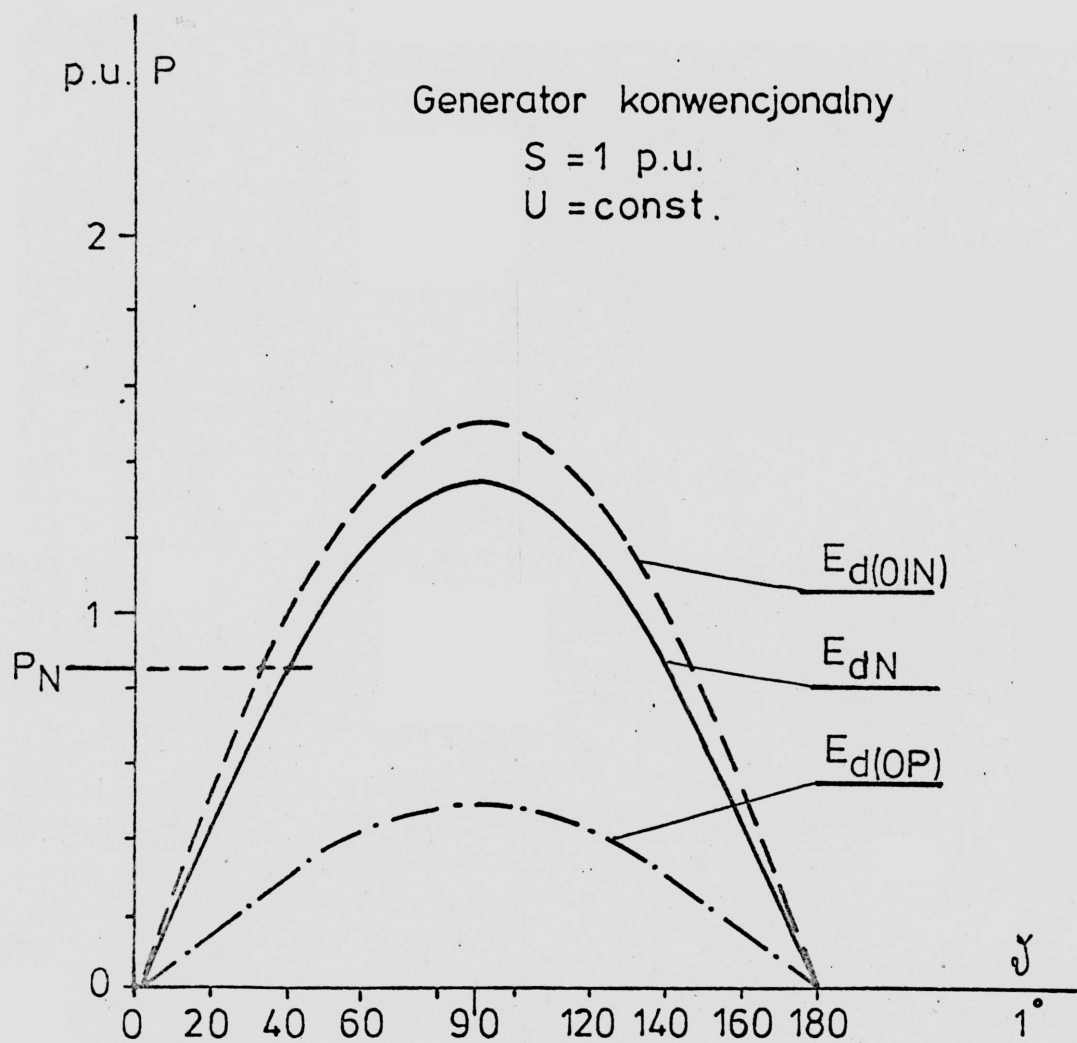
W podsumowaniu stwierdza się, że jedynymi ograniczeniami obszaru pracy kriogeneratora są: znamionowy prąd stojana i znamionowa moc turbiny.



Rys. 2.12. Wykres obciążalności kriogeneratora i maszyny konwencjonalnej 1 GVA
/ $X_s = 0,4$ p.u. /



Rys. 2.13. Wykres $P = f(\gamma, E_d)$; / $X_s = 0$ /



Rys. 2.14. Wykres $P = f(\delta, E_d)$; / $X_S = 0$ /

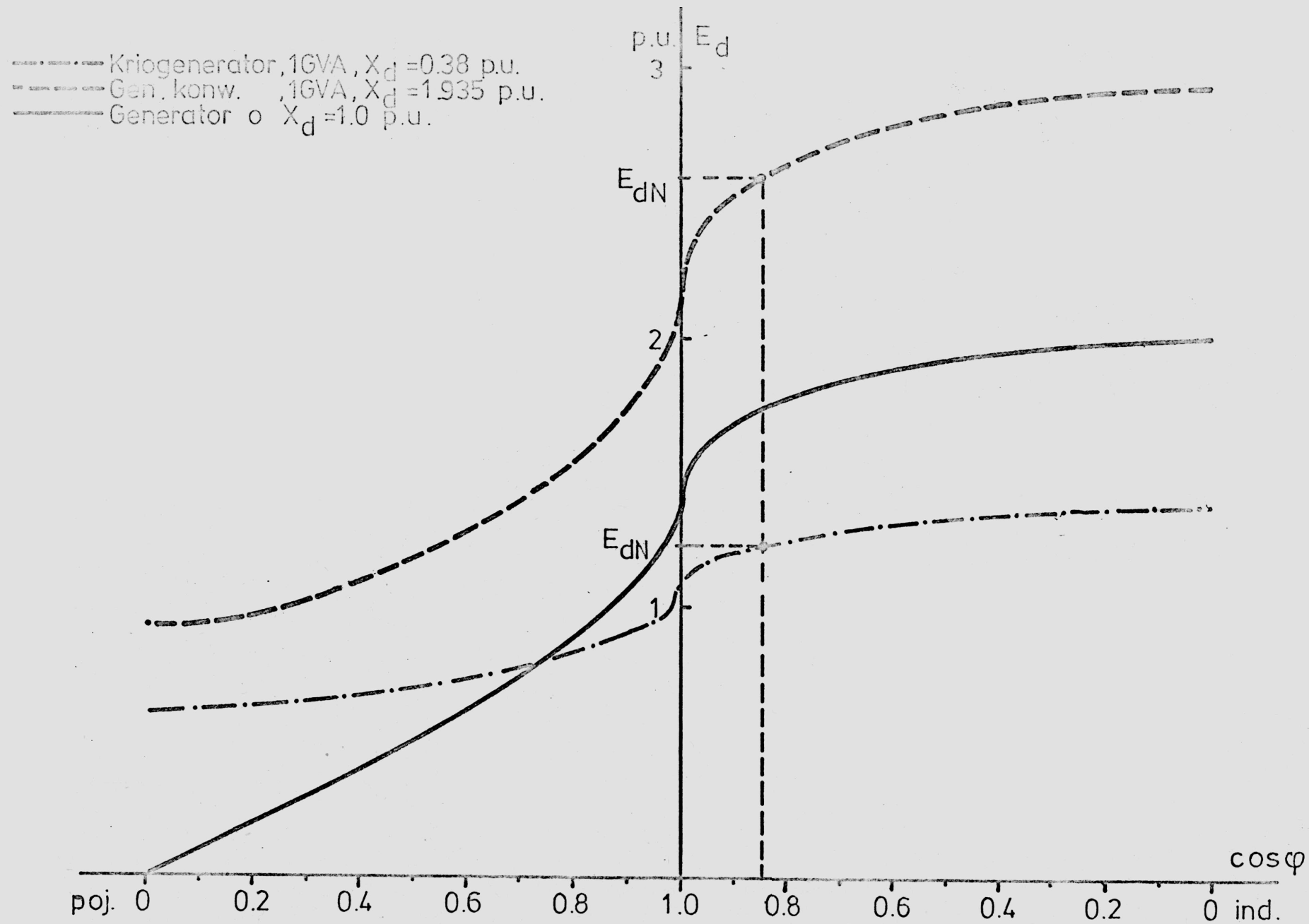
2.6. Praca ustalona przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$

Możliwość przejścia maszyny do pracy przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$ zależy od ograniczeń które omówiono w p. 2.5. Ze względu na małą wartość reaktancji synchronicznej X_d kriogeneratora, wartość kąta obciążenia maszyny jest również mała. Wychodząc z wykresu wektorowego stanu ustalonego /rys. 2.1./, wykreślono zależności $E_d = f / \cos \varphi$; $\vartheta = f / \cos \varphi$ / dla obu rodzajów maszyn, przy obciążeniu znamionową mocą pozorną / $U = 1$ p.u., $J = 1$ p.u./ rys. 2.15. i 2.16. /wyniki obliczeń umieszczono w załączniku 4/. W porównaniu z generatorem konwencjonalnym sem. E_d kriogeneratora wykazuje niewielkie zmiany w funkcji współczynnika mocy. Jeśli chodzi o przebieg kąta $\vartheta = f / \cos \varphi$ / przy obciążeniu znamionową mocą pozorną, wykazuje on inny charakter niż w maszynie konwencjonalnej /rys. 2.16./; podczas gdy kąt generatora konwencjonalnego wzrasta przy wzroście niedowzbudzenia, kąt ten w kriogeneratorze maleje. Największą wartość kąta kriogenerator osiąga przy lekkim niedowzbudzeniu / $\cos \varphi = \text{ok. } 0,95$ poj./. Tę odmienność zachowania się kąta obciążenia ilustruje najlepiej rys. 2.17. Jak widać, przy niedowzbudzeniu, wskaz napięcia $\underline{U}$ kriogeneratora znajdzie się pod osią prądu $\underline{J}$. O ile w maszynie konwencjonalnej sem. E_d przemieszczając się po okręgu ma tendencję do coraz to większego rozchylenia się w stosunku do napięcia $\underline{U}$, to w kriogeneratorze E_d podąża niejako za wskazem napięcia $\underline{U}$, powodując w rezultacie zmniejszanie się kąta ϑ .

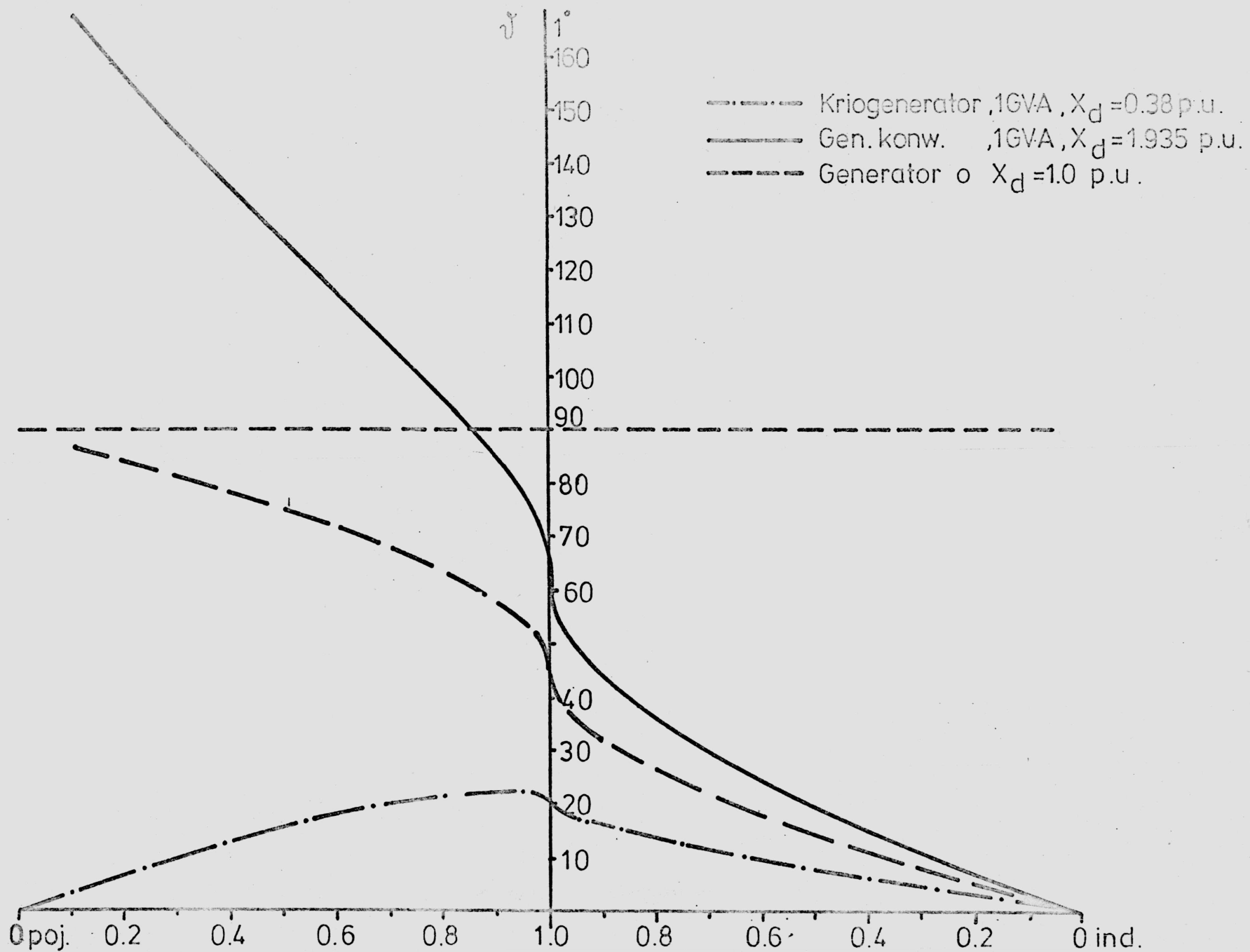
W warunkach pracy znamionowej, /znamionowa moc pozorna, $\cos \varphi_N = 0,85$ / znamionowy prąd wzbudzenia analizowanych maszyn jest jednakowy i wynosi $J_{FN} = 6$ kA. W przypadku analizowanego kriogeneratora stosunek $\frac{J_{FN}}{J_{FON}} = 1 = 1,25$. Oznaczając literą k stosunek sem.

E_d przy obciążeniu czysto indukcyjnym / $\cos \varphi = 0_{ind}$ /, do wartości znamionowej E_{dN} / $\cos \varphi = 0,85$ /, otrzymujemy dla kriogeneratora:

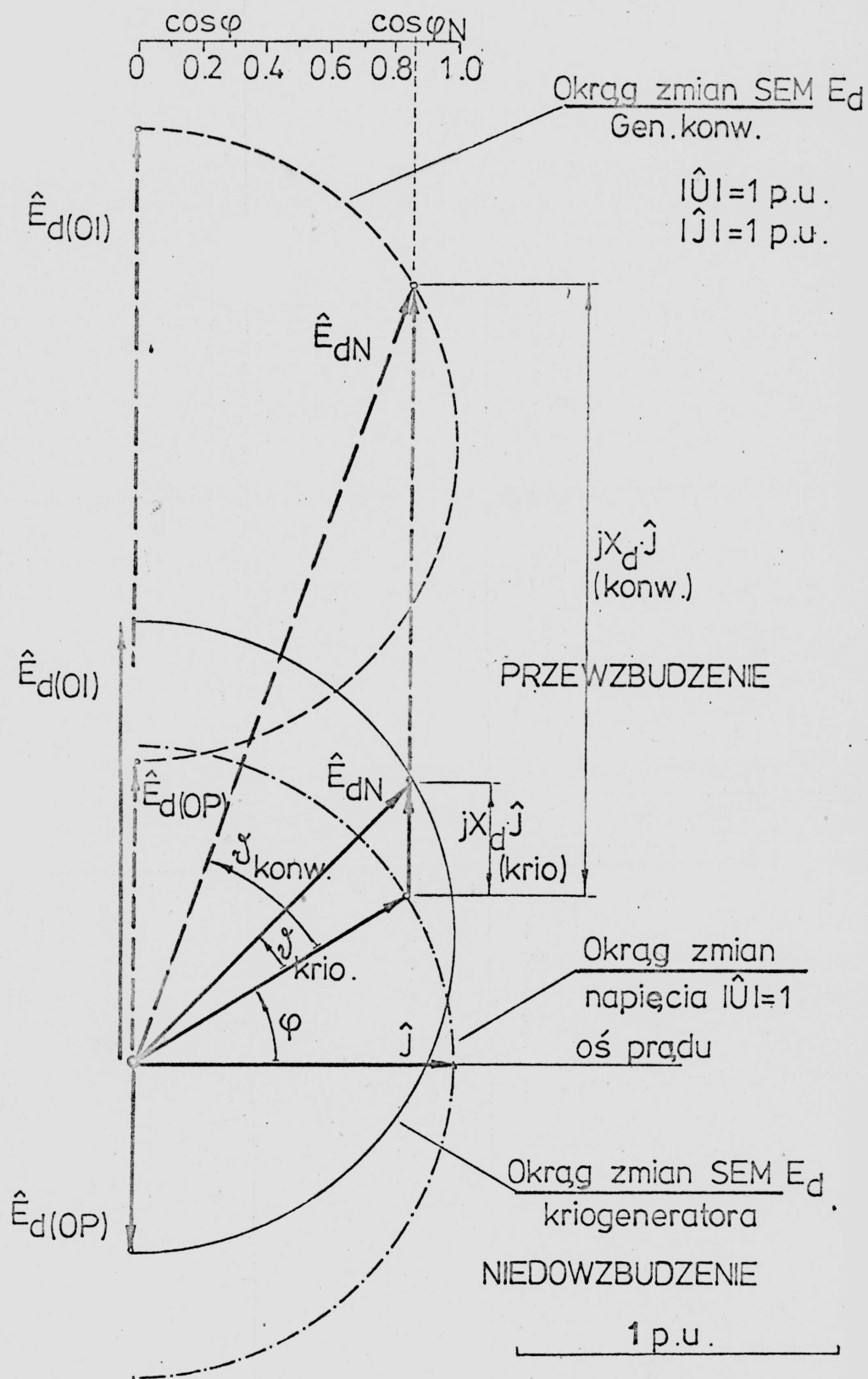
$$k = \frac{E_d / O_i}{E_{dN}} = \frac{1,38}{1,24} = 1,11$$



Rys. 2.15. Wykres $E_d = f / \cos \varphi$ / kriogenerators i maszyny konwencjonalnej 1 GVA
 / $S = S_N$, $U = U_N = 1$ p.u. /



Rys. 2.16. Wykres $v = f(\cos \varphi)$; / $S = S_N$, $U = U_N = 1$ p.u. /



Rys. 2.17. Wykres wektorowy dla pracy ustalonej przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$

Wartości $E_{d/Oi/}$ i E_{dN} odczytano z wykresu 2.15. Ponieważ nasycenie obwodu magnetycznego w kriogeneratorze nie występuje, możemy napisać, że $E_d = c \cdot J_F$, gdzie c oznacza wartość stałą. Stąd:

$$\frac{E_{d/Oi/}}{E_{dN}} = k = \frac{J_{F/Oi/}}{J_{FN}}, \quad /2.17./$$

gdzie:

$J_{F/Oi/}$ - prąd wzbudzenia przy obciążeniu znamionową mocą pozorną i przy $\cos \varphi = 0$ ind.

Odpowiedni stosunek $J_{F/Oi/}/J_{FON}$ wynosi:

$$\frac{J_{F/Oi/}}{J_{FON}} = \frac{J_{FN}}{J_{FON}} \cdot \frac{J_{F/Oi/}}{J_{FN}} = k \cdot l \quad /2.18./$$

Dla analizowanego kriogeneratora $k = 1,11$; $l = 1,25$, więc $J_{F/Oi/}/J_{FON} = \text{ok. } 1,4$. Tak więc zwiększenie o około 40 % wartości prądu wzbudzenia przy biegu jałowym J_{FON} powoduje przejście kriogeneratora z biegu jałowego do pracy przy obciążeniu czysto indukcyjnym. Powyższe wartości obliczono dla generatora konwencjonalnego tej samej mocy. Z danych generatora wynika, że $l = 2,7$. Wartość współczynnika k wynosi ok. 1,13. W związku z tym:

$$\frac{J_{F/Oi/}}{J_{FON}} = k \cdot l \approx 3$$

Tak więc, przejście maszyny konwencjonalnej do pracy przy $\cos \varphi = 0$ ind wymagałoby trzykrotnego zwiększenia prądu J_{FON} . Biorąc pod uwagę fakt, że współczynnik k generatora konwencjonalnego określono przy liniowej charakterystyce magnesowania, uwzględnienie zjawiska nasycenia spowoduje jego dalsze zwiększenie. W związku z tym stosunek $J_{F/Oi/}/J_{FON}$ będzie większy od 3.

Sumując powyższe rozważania należy stwierdzić, że istnieje realna możliwość długotrwałej pracy kriogeneratora w całym obszarze jego znamionowej mocy przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$ pod warunkiem nieprzeciążenia turbiny. Przeprowadzona analiza pracy przy $\cos \varphi \neq \cos \varphi_N$ wykazała, że ograniczenie pochodzące od wartości znamionowej prądu wzbudzenia maszyny konwencjonalnej nie występuje w kriogeneratorze w obszarze przewzbudzenia. Wymagane 40 %-owe zwiększenie prądu wzbudzenia dla przejścia od biegu jałowego do pracy przy $\cos \varphi = 0_{ind}$, stanowi nieduże obciążenie układu chłodzącego wirnik kriogeneratora /moc tracona w obwodzie wzbudzenia kriogeneratora podczas pracy przy $\cos \varphi = 0_{ind}$ wynosi ok. 44 kW, a przy obciążeniu znamionowym 36 kW/. Jedynym warunkiem, dla pracy przy $\cos \varphi = 0_{ind}$ jest nieprzekroczenie wartości krytycznej prądu nadprzewodnika J_{FK} , która powinna wynosić:

$$J_{FK} \geq K_B \cdot k \cdot l \cdot J_{FON} , \quad /2.19./$$

gdzie:

K_B - współczynnik bezpieczeństwa uzależniony od rodzaju konstrukcji kriogeneratora.

Dla analizowanego kriogeneratora wartość krytyczna prądu nadprzewodnika $J_{FK} > K_B \cdot 1,4 \cdot J_{FON}$, co odpowiada warunkowi $J_{FK} > K_B \cdot 6,7$ kA.

Również w obszarze niedowzbudzenia kriogenerator okazuje się lepszą maszyną i to zarówno ze względu na stabilność statyczną jak i brak nadmiernego nagrzewania się jego skrajnych elementów.

Praca ustalona kriogeneratora w całym obszarze jego znamionowej pracy pozornej, przy obciążeniu symetrycznym nie stwarza zagrożenia stanu nadprzewodnictwa uzwojenia wzbudzenia. Zagrożenie to, w warunkach pracy ustalonej, może nastąpić tylko w przypadku zaistnienia dłuższej przerwy w dostarczaniu krio-chłodziwa, lub na skutek zbyt dużej asymetrii obciążenia. Polskie przepisy dopuszczają 3 %-ową trwałą niesymetrię obciążenia turbogeneratorów, wyrażoną zawartością składowej przeciwnej prądu /wg [48]/. Przewiduje się, że dla typowego kriogeneratora obciążonego prądem niesymetrycznym o zawartości

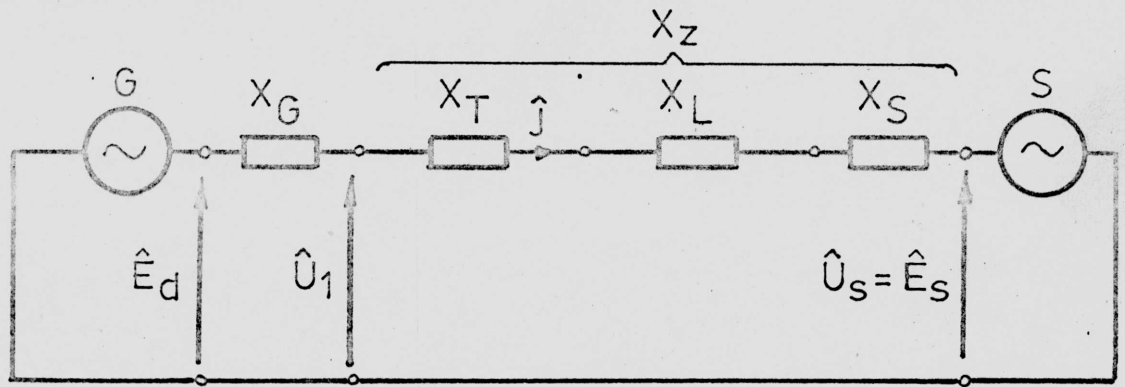
składowej przeciwnej ok. 10 %, ilość ciepła rozpraszanego w ekranie jest niemal o dwa rzędy mniejsza, niż strata mocy w uzwojeniu wzbudzenia maszyny konwencjonalnej w stanie ustalonym /według [14] /. Grzanie ekranu umieszczonego w temperaturze nadprzewodzących uzwojeń stanowi bardzo duże obciążenie kriogenicznego systemu chłodzenia. Umieszczenie ekranu poza obszarem niskich temperatur i chłodzenie go konwencjonalnymi sposobami, częściowo eliminuje tę potencjalną niedogodność. Można stwierdzić, że zdolność do przenoszenia długotrwałej asymetrii obciążenia kriogeneratorów nie będzie gorsza niż w przypadku maszyn konwencjonalnych. O dopuszczalnej asymetrii obciążenia decydują w głównej mierze: konstrukcja ekranów, ich liczba, sposób ich chłodzenia oraz system chłodzenia nadprzewodzących uzwojeń wzbudzenia.

2.7. Stabilność statyczna

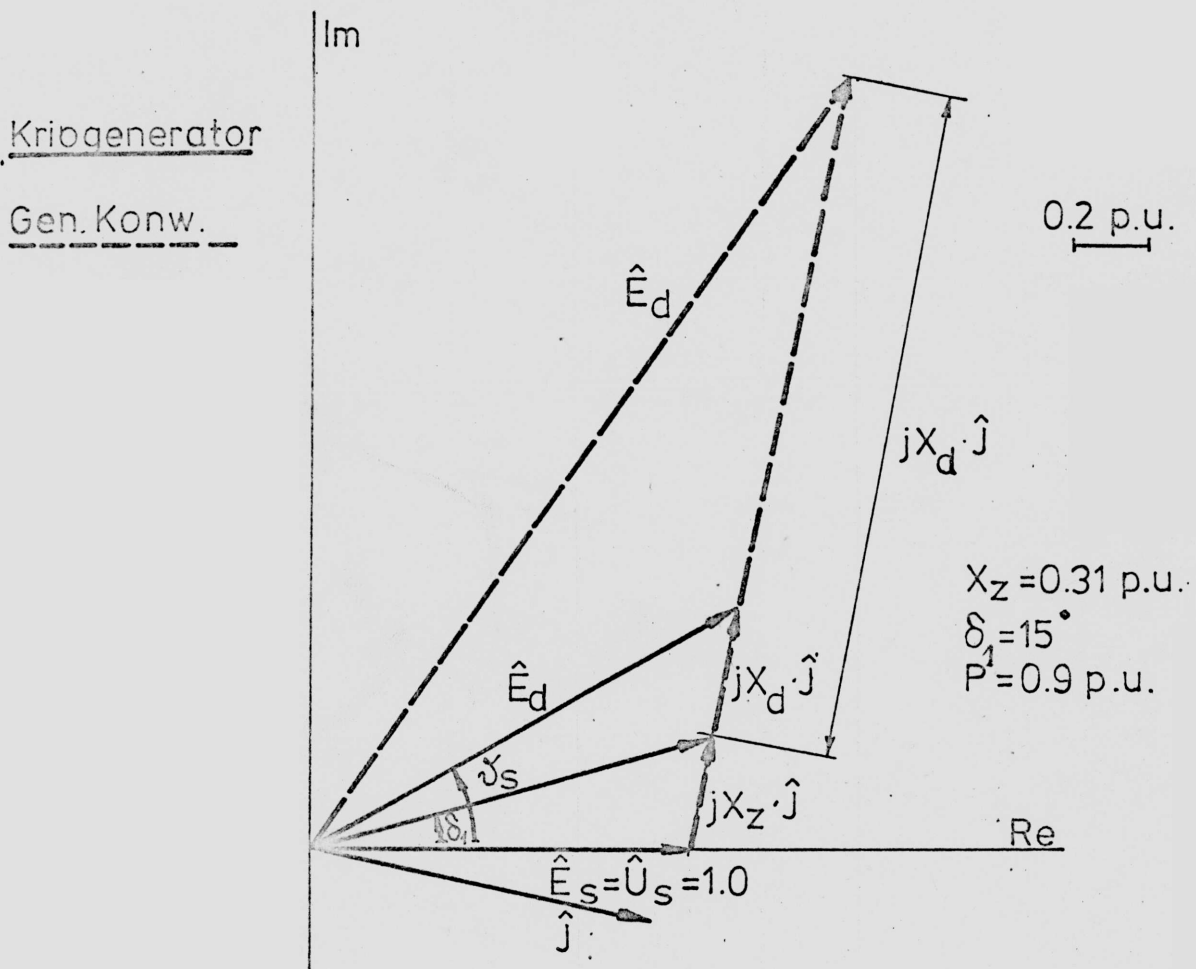
Przedział stabilności statycznej konkretnego systemu może być określony w formie maksymalnej mocy, która może być przesłana do systemu bez utraty synchronizmu, jeśli obciążenie zmienia się bardzo powoli, a prąd wzbudzenia zmienia się w taki sposób, że przywraca normalne warunki pracy /zazwyczaj stałe napięcie na zaciskach generatora/. Tak przyjęte kryterium jest dostateczne dla systemu dwumaszynowego w celu wykazania różnic stabilności statycznej układu z kriogeneratorem i maszyną konwencjonalną.

Rozważania oparto na przykładzie układu przesyłowego /rys. 2.18./, składającego się z generatora, transformatora blokowego, linii wysokiego napięcia oraz systemu elektroenergetycznego. Obliczenia przeprowadzono w trzech wariantach dla kriogeneratora 1 GVA i ekwiwalentnej maszyny konwencjonalnej. Układ przesyłowy i reaktancje jego elementów opisano przy obliczeniach zwarć niesymetrycznych /p. 3.6.1./.

Przy rozważaniach założono, że napięcie na zaciskach generatora U_1 jest utrzymywane stałe i równe $U_1 = 1.1$ p.u., zaś napięcie



Rys. 2.18. Schemat zastępczy układu do badania stabilności statycznej



Rys. 2.19. Wykres wskazowy układu z rys. 2.18.

na szynach sztywnego napięcia $U_s = 1,0$ p.u. Na rys. 2.19. przedstawiono wykres wektorowy układu z rys. 2.18. przy założeniu, że $\underline{U}_s = 1,00 \angle 0^\circ$ a $\underline{U}_1 = 1,1 \angle \delta_1$ /gdzie: δ_1 - kąt pomiędzy $\underline{U}_s$ i $\underline{U}_1$ /. Przez kąt ϑ_s oznaczono rozchylenie pomiędzy wskazem $\underline{E}_d$ i $\underline{U}_s$. Reaktancja X_z jest zastępczą reaktancją pomiędzy punktami układu o napięciach $\underline{U}_1$ i $\underline{U}_s$:

$$X_z = X_T + X_L + X_S$$

Obliczenia przeprowadzono w oparciu o wykres wektorowy /rys. 2.19./. Zakładając kolejno różne wartości kąta δ_1 , przy danej wartości $\underline{U}_1$; $\underline{U}_s$ i X_z określano wartości prądu $\underline{J}$ /zależność 2.20./.

$$\underline{J} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_s}{jX_z} \text{ [p.u.] } \quad /2.20./$$

Po określeniu wartości prądu można wyliczyć wartość siły elektromotorycznej $\underline{E}_d$:

$$\underline{E}_d = \underline{U}_1 + j X_G \cdot \underline{J} = \underline{E}_d \cdot \exp /j \vartheta_s/ \quad /2.21/$$

Wartość mocy przesyłanej do systemu wynosi:

$$P = \frac{E_d \cdot E_s}{X_\Sigma} \cdot \sin \vartheta_s = P_m \cdot \sin \vartheta_s \text{ [p.u.] } , \quad /2.22./$$

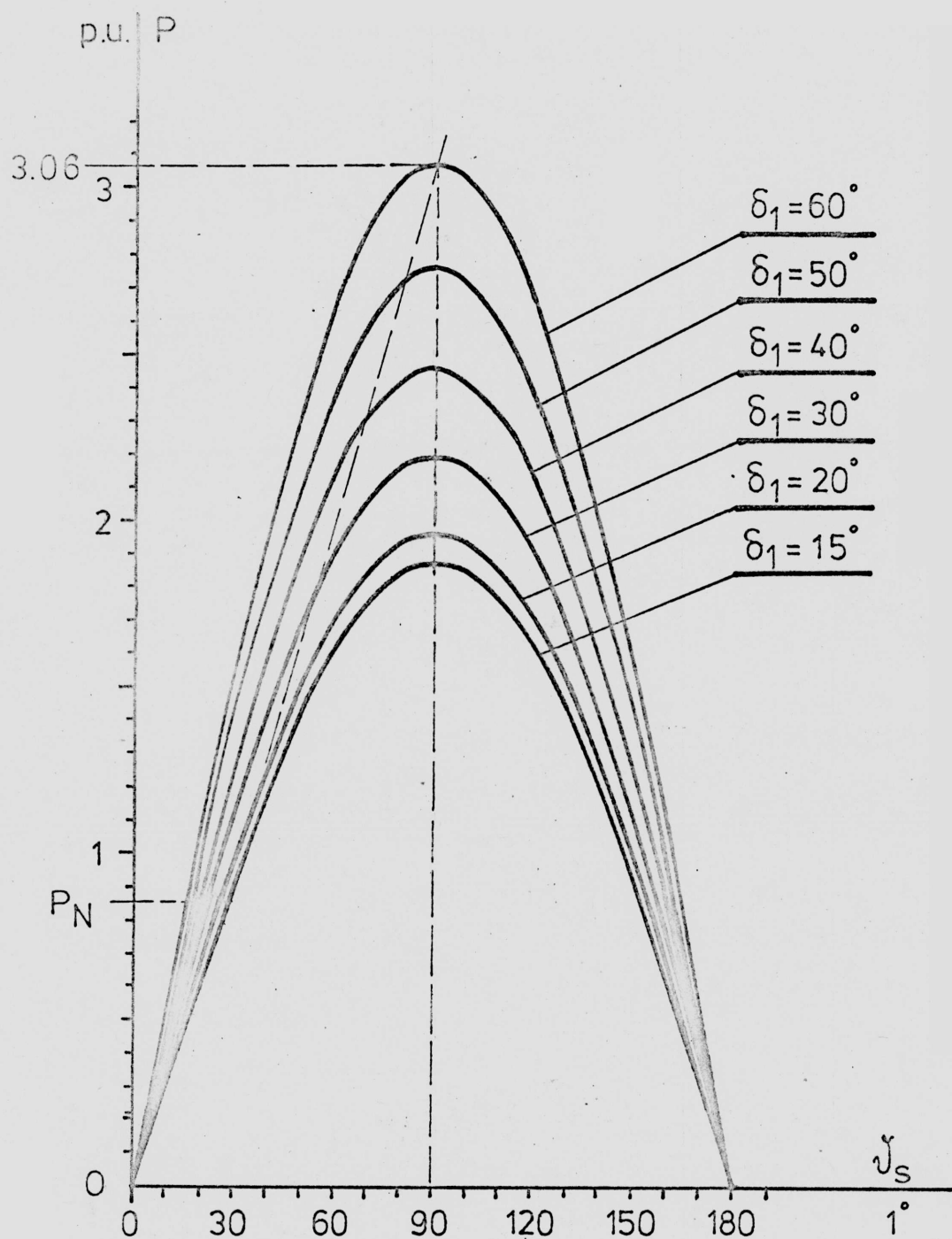
gdzie:

$$X_\Sigma = X_G + X_z \text{ [p.u.] } ,$$

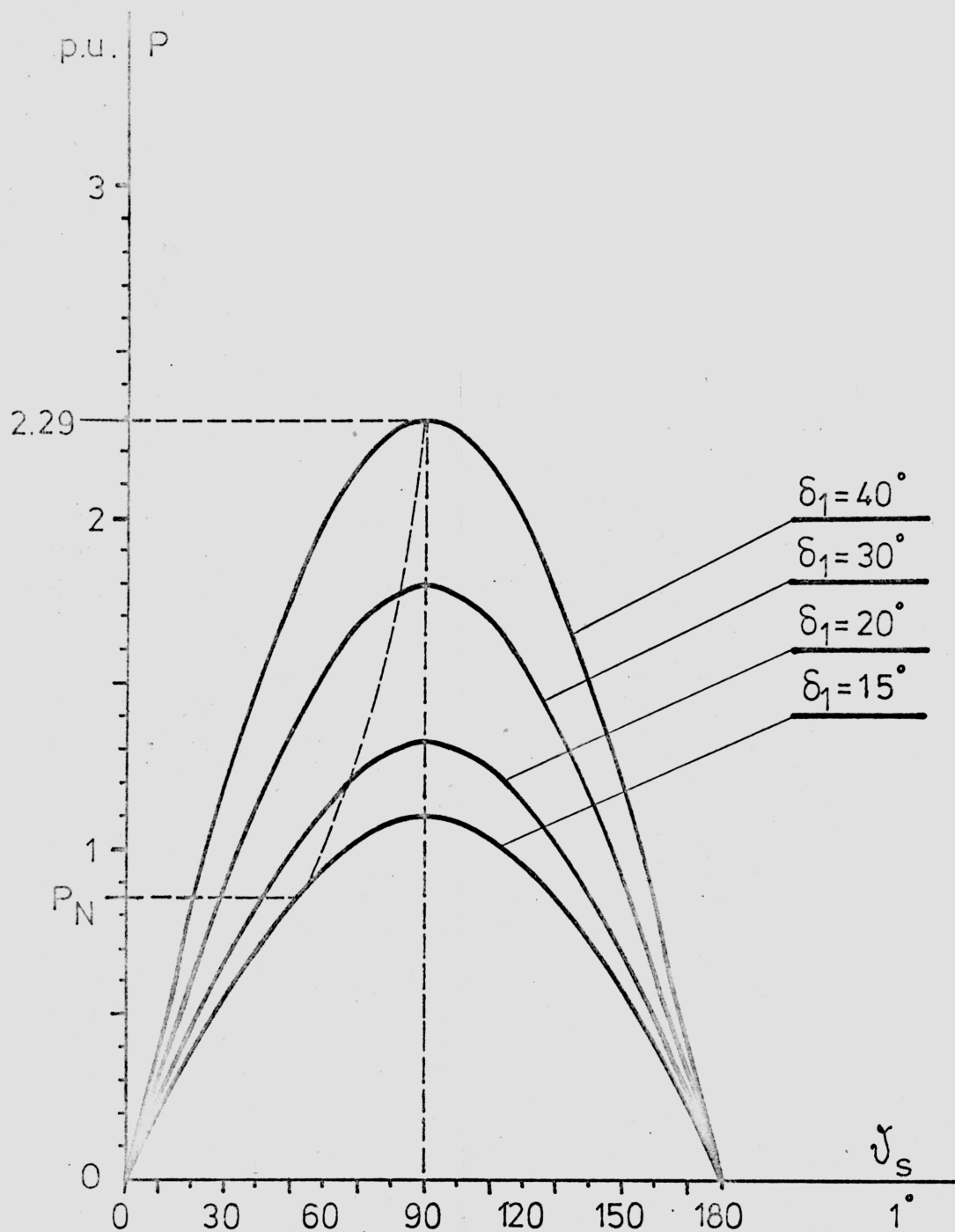
$$P_m = \frac{E_d \cdot E_s}{X_\Sigma} \quad - \text{ moc maksymalna } . \quad /2.23./$$

Wariant 1

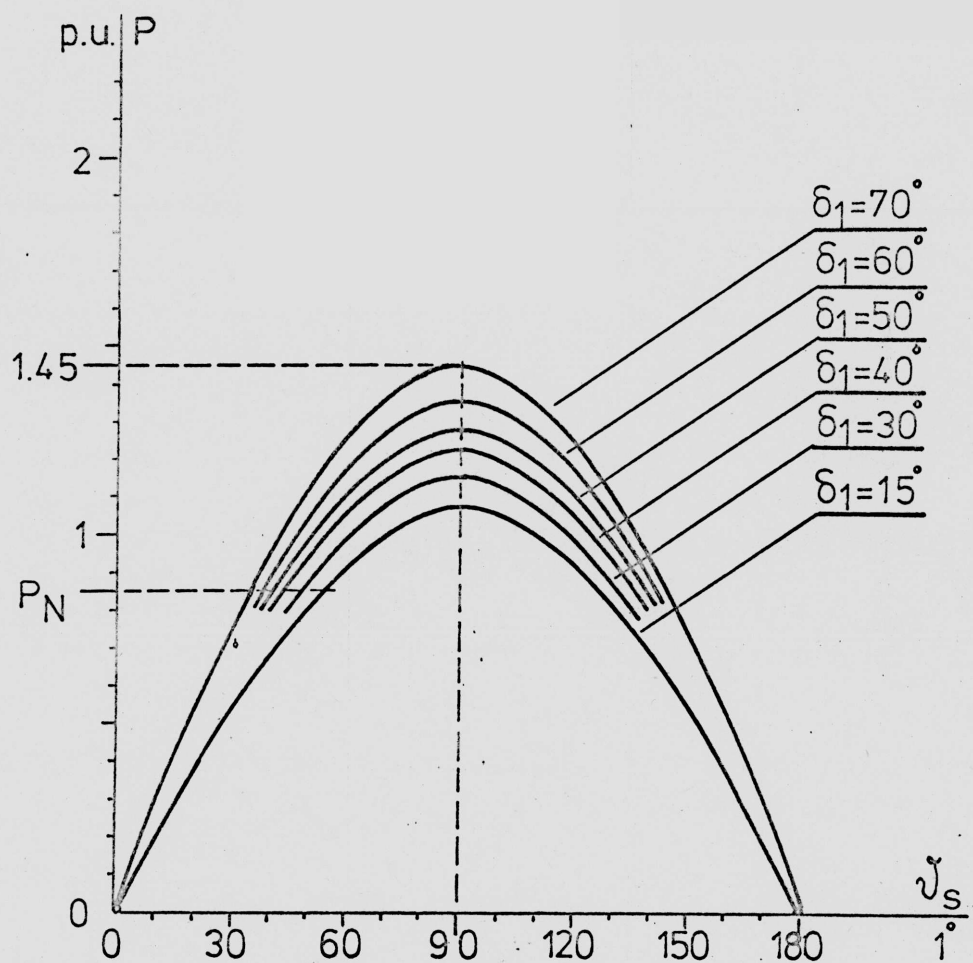
Generator współpracuje z systemem poprzez transformator i linię 400 kV. Do rozważań założono wartość reaktancji X_z :



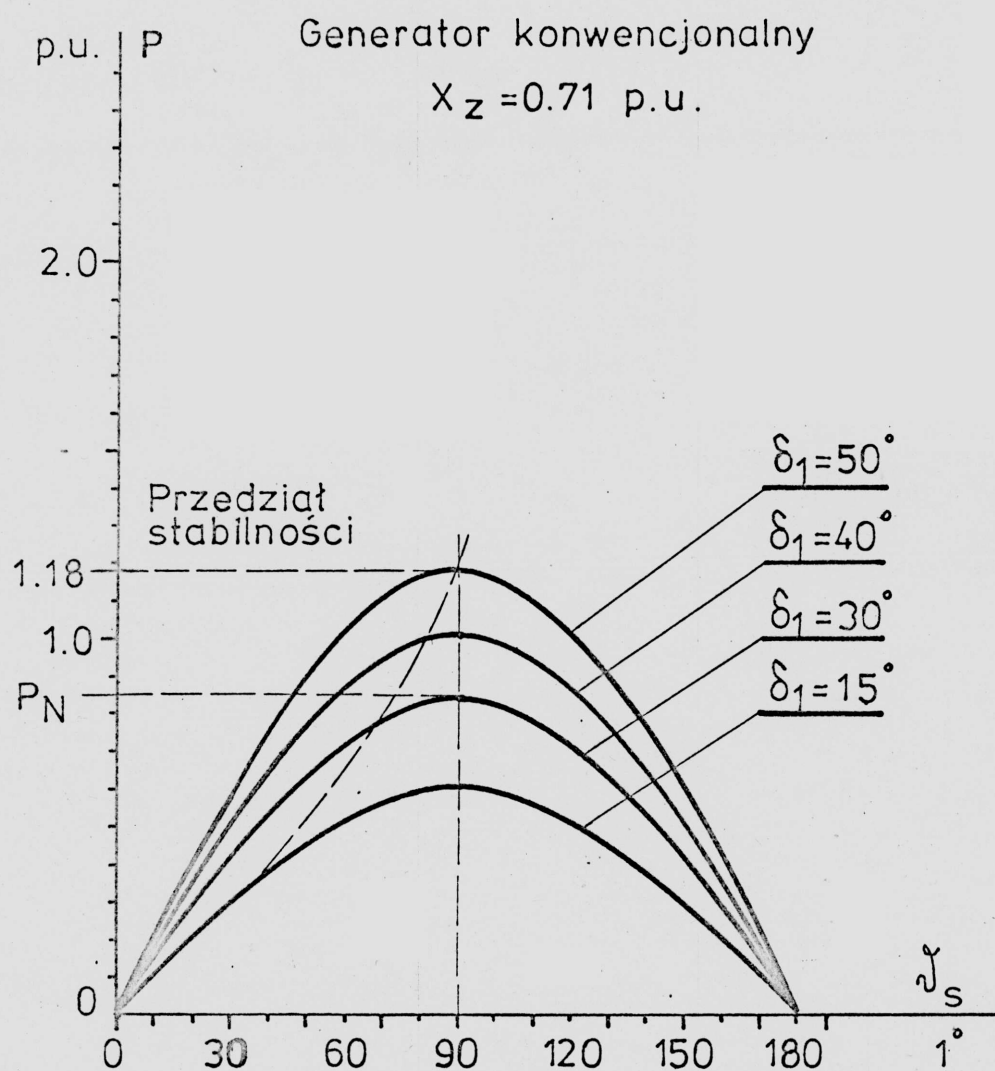
Rys. 2.20. Zależność $P = f/\gamma_s, \delta_1$ / przy współpracy kriogeneratora 1 GVA z systemem / $X_z = 0,31$ p.u. /



Rys. 2.21. Zależność $P = f/\gamma_s, \delta_1$ / przy współpracy generatora konwencjonalnego 1 GVA z systemem / $X_2 = 0,31$ p.u. /



Rys. 2:22. Zależność $P = f/\delta_1$ / przy współpracy kriogeneratora 1 GVA z systemem / $X_Z = 0,71$ p.u./



Rys. 2.23. Zależność $P = f/\delta_s, \delta_1$ / przy współpracy generatora konwencjonalnego 1 GVA z systemem / $X_Z = 0.71$ p.u. /

$$X_Z = X_T + X_L + X_S = 0,31 \text{ [p.u.]}; (X_T = 0,15 \text{ p.u.}; X_S = 0,06 \text{ p.u.}).$$

Reaktancję transformatora i systemu przyjęto jak przy analizie zwarć niesymetrycznych p. 3.6.1. Określona wartość reaktancji linii X_L wynosi $X_L = 0,1$ p.u. co odpowiada linii dwutorowej o długości $l =$ ok. 100 km, lub linii jednotorowej o długości $l =$ ok. 50 km.

Wariant 2

W wariancie tym przyjęto wartość reaktancji zastępczej $X_Z = 0,71$ p.u., w wyniku czego reaktancja linii przesyłowej $X_L = 0,5$ p.u. Odpowiada ona linii jednotorowej o długości $l =$ ok. 250 km, lub linii dwutorowej o długości $l =$ ok. 500 km. /W chwili obecnej w Polsce eksploatowane są linie 400 kV jednotorowe o długościach od 120 km do 220 km według [36] /.

Wariant 3

Przyjęto wartość reaktancji zastępczej $X_Z = 2$ p.u. równą w przybliżeniu reaktancji synchronicznej generatora konwencjonalnego.

Wyniki obliczeń zamieszczono w tab. 2.2. i tab. 2.3. Zależności mocy przesyłanych w funkcji kąta ψ_s dla kriogeneratora i maszyny konwencjonalnej w dwu wariantach reaktancji X_Z przedstawiają rys. /2.20 - 2.23./. Odpowiednią zależność dla wariantu trzeciego $/X_Z = 2 \text{ p.u.}/$ umieszczono w załączniku 5.

Tabela 2.2.

δ_1	$X_Z = 0,31 \text{ p.u.}$								$X_Z = 0,71 \text{ p.u.}$								$X_Z = 2,0 \text{ p.u.}$							
[°]	KRIO.				KONW.				KRIO.				KONW.				KRIO.				KONW.			
-	$\underline{J}$	$\underline{E}_d$	$P_{\max}$	P	$\underline{J}$	$\underline{E}_d$	$P_{\max}$	P	$\underline{J}$	$\underline{E}_d$	$P_{\max}$	P	$\underline{J}$	$\underline{E}_d$	$P_{\max}$	P	$\underline{J}$	$\underline{E}_d$	$P_{\max}$	P	$\underline{J}$	$\underline{E}_d$	$P_{\max}$	P
15	0,92 -12,14	1,29 28,9	1,87	0,9	0,92 -12,14	2,48 54,8	1,10	0,9	0,4 -1,22	1,17 21,41	1,07	0,39	0,4 -1,22	1,6 40,3	0,6	0,39	0,14 -12,1	1,12 17,3	0,47	0,14	0,14 -12,1	1,25 26,2	0,32	0,14
20	1,19 -4,6	1,35 37,6	1,95	1,19	1,19 -4,6	2,94 65,6	1,31	1,19	0,52 -4,6	1,19 28,5	1,09	0,52	0,52 -4,6	1,77 51,1	0,67	0,52	0,19 -4,5	1,13 23,6	0,47	0,19	0,19 -4,5	1,29 35,2	0,32	0,19
30	1,77 4,84	1,51 53,8	2,19	1,76	1,77 4,84	4,04 80,6	1,79	1,77	0,77 5,22	1,25 42,4	1,15	0,77	0,77 5,22	2,2 68,3	0,83	0,77	0,28 5,19	1,15 34,8	0,48	0,28	0,28 5,19	1,41 50,2	0,36	0,28
40	2,35 12,8	1,7 67,9	2,46	2,28	2,35 12,8	5,15 91,0	2,29	2,29	1,02 12,4	1,33 55,2	1,22	1,00	1,02 12,4	2,68 81,13	1,01	1,00	0,36 12,7	1,17 46,2	0,49	0,36	0,36 12,7	1,56 64,0	0,39	0,36
50	2,87 19,13	1,9 79,3	2,76	2,71	-	-	-	-	1,25 19,1	1,4 66,7	1,28	1,18	1,25 19,1	3,13 91,0	1,18	1,18	0,44 19,04	1,19 56,8	0,50	0,42	0,44 19,04	1,71 75,8	0,43	0,42
60	3,38 25,35	2,11 90,0	3,06	3,06	-	-	-	-	1,48 25,18	1,49 78,0	1,36	1,33	-	-	-	-	0,52 25,3	1,22 67,6	0,51	0,47	0,52 25,3	1,87 86,5	0,47	0,47
70	-	-	-	-	-	-	-	-	1,70 31,9	1,58 88,2	1,45	1,45	-	-	-	-	0,6 31,45	1,25 78,5	0,52	0,51	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,68 36,8	1,28 88,4	0,54	0,54	-	-	-	-

UWAGA: Przy wielkościach podanych w formie zespolonej $/J;E/$ wartości górne zapisu oznaczają moduł w p.u., a dolne argument liczby /w stopniach/.

Tabela 2.3.

δ_1	$X_z = 0,31$ p.u.			$X_z = 0,71$ p.u.			$X_z = 2,0$ p.u.		
	P	K_p KRIO	K_p KONW	P	K_p KRIO	K_p KONW	P	K_p KRIO	K_p KONW
[°]	p.u.	%	%	p.u.	%	%	p.u.	%	%
15	0,9	107,7	22,2	0,39	174,4	53,8	0,14	235,7	128,6
20	0,19	63,8	10,0	0,52	109,6	28,8	0,19	147,4	68,4
30	1,76	24,4	0,1	0,77	49,3	7,8	0,28	71,4	28,5
40	2,28	7,9	0	1,00	22,0	1,0	0,36	36,1	8,3
50	2,71	1,8	-	1,18	8,5	0	0,42	19,0	2,4
60	3,06	0	-	1,33	2,2	-	0,47	8,5	0
70	-	-	-	1,45	0	-	0,51	1,9	-
80	-	-	-	-	-	-	0,54	0	-

gdzie:

P - moc przesyłana do systemu,

K_p - mocowy współczynnik zapasu równowagi statycznej,

$$K_p = \frac{P_{gr} - P}{P} \cdot 100 \%,$$

P_{gr} - moc graniczna określona dla danych warunków pracy.

Analiza otrzymanych wyników

Kriogenerator charakteryzuje się znacznie korzystniejszymi charakterystykami równowagi statycznej niż generator konwencjonalny. Możliwość współpracy maszyny z systemem pod względem zachowania równowagi statycznej określa wyliczony mocowy współczynnik zapasu równowagi statycznej K_p . W celu zapewnienia poprawnej pracy układu, przyjęto w Polsce następujące wartości współczynnika K_p według [5] :

- $K_p \geq 20 \%$ - stany normalnej pracy ,
- $K_p \geq 5 \div 10 \%$ - przy braku rezerwy mocy ;
- $K_p \geq 8 \%$ - w krótkotrwałych stanach poawaryjnych .

Wyniki obliczeń wskazują możliwość przekazania dużych mocy na duże . odległości za pomocą tylko jednej linii o napięciu 400 kV /w przypadku kriegeneratora/. Przykładowo, przesłanie do systemu mocy $P = 1$ p.u. w układzie jak na rys. 2.18 z kriegeneratorem przy pomocy jednotorowej linii 400 kV o długości 250 km jest możliwe przy współczynniku zapasu $K_p = 22 \%$. Tak więc, zgodnie z [5] kriegenerator spełnia warunek równowagi statycznej, że $K_p \geq 20 \%$. W przypadku maszyny konwencjonalnej pracującej w tym samym układzie współczynnik $K_p = 1 \%$ i układ, praktycznie rzecz biorąc, jest na granicy stabilności. Okazuje się, że dla zachowania wymaganego marginesu bezpieczeństwa $/K_p \geq 20 \%/$ układ z generatorem konwencjonalnym może przesłać tylko połowę mocy $/P = \text{ok. } 0,52 \text{ p.u. } /$, którą można by przesłać w układzie z kriegeneratorem. W tabeli 2.4. zestawiono iloraz maksymalnych mocy $/P_{\max}/$ układu z kriegeneratorem $/P_{\max KR}/$ i maszyną konwencjonalną $/P_{\max KO}/$, oraz odpowiedni stosunek mocy bezpiecznych $/P_b/$ dla różnych wartości reaktancji X_z . Przez moc bezpieczną $/P_b/$ rozumie się maksymalną moc przesłaną w danym układzie przy zachowaniu warunku $K_p \geq 20 \%$.

Tabela 2.4.

	$X_z = 0,31 \text{ p.u.}$	$X_z = 0,71 \text{ p.u.}$	$X_z = 2 \text{ p.u.}$
$\frac{P_{\max KO}}{P_{\max KR}}$	0,74	0,81	0,87
$\frac{P_{b KO}}{P_{b KR}}$	0,51	0,52	0,7

/indeksy: KO - konwencjonalny,
KR - kriogeniczny/.

Jak widać z danych tabeli 2.4., użycie kriegeneratora pozwala na przesłanie prawie dwukrotnie większej mocy przy zachowaniu równowagi

statycznej, w porównaniu z mocą, jaka może być przesłana w tym samym układzie przesyłowym przy użyciu maszyny konwencjonalnej. Ta przewaga kriogeneratora nieznacznie maleje ze wzrostem reaktancji układu przesyłowego X_Z . Otrzymane wyniki wskazują, że o ile do przesłania pewnej mocy w układzie konwencjonalnym potrzebna jest linia dwutorowa o określonej długości, to ze względów stabilności statycznej w przypadku kriogeneratora wystarczy linia jednotorowa. Ta istotna zaleta kriogeneratora wprowadzi zapewne znaczne oszczędności w budowie linii przesyłowych. Biorąc pod uwagę fakt, że długość odcinków linii 400 kV w Polsce waha się w granicach /120 - 220/ km, odpowiadające tym długościom reaktancje linii w przyjętym układzie przesyłowym umożliwiają dwukrotne zwiększenie przesyłanej mocy, przy zachowaniu warunku $K_p > 20 \%$. O znacznie korzystniejszej stabilności statycznej układu z kriogeneratorem decyduje mała wartość jego reaktancji synchronicznej X_d . W tych samych warunkach pracy, przy przesyle takiej samej mocy w układzie konwencjonalnym, rozchylenie wskazów E_d i U_s / U_s jest prawie dwukrotnie większe.

Tak więc, kriogenerator okazuje się znacznie lepszym elementem generującym układu elektroenergetycznego również i pod względem stabilności statycznej.

W pracy pominięto rozważania dotyczące stabilności dynamicznej kriogeneratora. Zagadnienie to zostało opracowane w [14], gdzie udowodniono, że stabilność dynamiczna kriogeneratora jest porównywalna z granicą stabilności ekwiwalentnego typowego generatora konwencjonalnego pracującego w takim samym systemie.

2.8. Wnioski i uwagi wynikające z analizy pracy ustalonej kriogeneratora

Na podstawie przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, że kriogenerator cechuje się:

- a/ - znacznie korzystniejszymi charakterystykami eksploatacyjnymi,
- b/ - możliwością pracy w całym obszarze jego znamionowej mocy pozornej, bez groźby utraty stanu nadprzewodnictwa przez uzwojenie wzbudzenia,

- c/ - znacznie większą przeciążalnością statyczną i małą zmiennością napięcia,
- d/ - posiada znacznie korzystniejsze własności stabilności statycznej, co wiąże się z możliwością przesyłu mocy na duże odległości przy pomocy mniejszej liczby linii wysokiego napięcia,
- e/ - jest znacznie lepszym generatorem mocy biernej.

C Z Ę Ś Ć 3

STANY NIEUSTALONE KRIOGENERATORA

Wybór właściwych zabezpieczeń kriogeneratora oraz wyrobienie sobie poglądu na charakter i odmienność zjawisk zachodzących przy współpracy kriomaszyny z systemem, wymaga analizy zjawisk występujących podczas zakłóceń.

Przedmiotem analizy jest porównanie zachowania się maszyny konwencjonalnej i kriogenicznej tej samej mocy /1 GVA/, w tych samych stanach pracy. Celem analizy jest uzyskanie informacji dla określenia możliwości współpracy kriogeneratora z systemem w wybranych stanach pracy, oraz uzyskania czynników rzutujących na konstrukcję takiej maszyny z punktu widzenia stanów nieustalonych. Analiza polega na rozwiązywaniu równań różniczkowych opisujących maszynę synchroniczną.

3.1. Wybór metody badań

Dla porównania zjawisk zachodzących podczas pracy dwóch maszyn różniących się konstrukcyjnie, lecz opisanych tymi samymi parametrami, najbardziej odpowiednim jest badanie ich zachowania się w takich samych warunkach pracy, przy użyciu tej samej metody. Porównanie zachowania się kriogeneratora z zachowaniem się maszyny konwencjonalnej, znanej

również z praktyki eksploatacyjnej, pozwoli na określenie zasadniczych różnic. Dlatego też do rozważań wykorzystano obliczenia, uzupełnionych równaniem ruchu, równań Parka-Goriewa, przy pomocy maszyny cyfrowej, korzystając ze schematu zastępczego maszyny jak na rys. 3.1. Istotną zaletą tej metody jest właściwe odwzorowanie strony jakościowej zjawisk, a także jej dokładność [43]. Ponadto, metoda ta pozwala na badanie wielu zjawisk w maszynach już na etapie projektowania. Stwarza to możliwość wyznaczania charakteru i rozmiaru potencjalnych zakłóceń maszyn jeszcze nie eksploatowanych. W związku z tym, metoda ta na obecnym etapie zaawansowania prac projektowych w dziedzinie kriogeneratorów dużej mocy jest całkowicie odpowiednim narzędziem pracy.

3.2. Schemat zastępczy i równania różniczkowe maszyny

W zależności od konstrukcji kriogeneratora, szczególnie konstrukcji i liczby ekranów, równania Parka-Goriewa mogą być mniej lub bardziej rozbudowane. W przypadku istnienia dwóch a nawet i trzech ekranów, zachodzi konieczność uwzględnienia dodatkowych obwodów tłumiących. Z uwagi na znikomą liczbę danych takich konstrukcji w odniesieniu do kriogeneratora, oraz ze względu na lepszą możliwość porównania z maszyną konwencjonalną, rozważania przeprowadzono dla kriogeneratora z pojedynczym ekranem. W takim przypadku rolę klatki tłumiącej pełni ekran. [Układ równań w postaci bezpośrednio przydatnej do liczenia na maszynie cyfrowej ujmuje zależność /3.1./. Przyjęty układ współrzędnych "d", "q" jest nieruchomy względem wirnika; oś "d" wyprzedza oś "q".

$$D\psi_d = -d_1\psi_d - \psi_q - \psi_q \cdot s + d_2\psi_f + d_3\psi_D + U_s \sin\theta_s,$$

$$D\psi_q = \psi_d + \psi_d \cdot s - d_4\psi_q + d_5\psi_Q - U_s \cos\theta_s,$$

$$D\psi_f = U_F + R_F / d_7 \cdot \psi_d - d_6\psi_f + d_8\psi_D, \quad /3.1./$$

$$D\psi_D = d_9 \cdot \psi_d + d_{10} \cdot \psi_f - d_{11} \cdot \psi_D,$$

$$D\psi_Q = d_{12} \cdot \psi_q - d_{13} \cdot \psi_Q,$$

$$D s = d_{14} / m_{to} - \frac{m_{tn}}{p} \cdot s / + d_{14} / d_{16} \cdot \psi_d \cdot \psi_Q - d_{15} \cdot \psi_d \cdot \psi_q + \\ + d_{17} \cdot \psi_q \cdot \psi_f - d_{18} \cdot \psi_q \cdot \psi_D + d_{19} \cdot \psi_q \cdot \psi_d / , \quad /3.1./$$

$$D \dot{\psi} = s ,$$

gdzie:

ψ_d - strumień skojarzony uzwojeń stojana w osi d;

ψ_q - strumień skojarzony uzwojeń stojana w osi q,

ψ_f - strumień skojarzony uzwojeń wzbudzenia,

ψ_D - strumień skojarzony ekranu w osi d,

ψ_Q - strumień skojarzony ekranu w osi q,

$D = d/dt$ - operator różniczkowania względem czasu,

s - poślizg,

$\dot{\psi}$ - kąt obciążenia wirnika,

U_s - napięcie sieci sztywnej,

U_f - napięcie wzbudzenia,

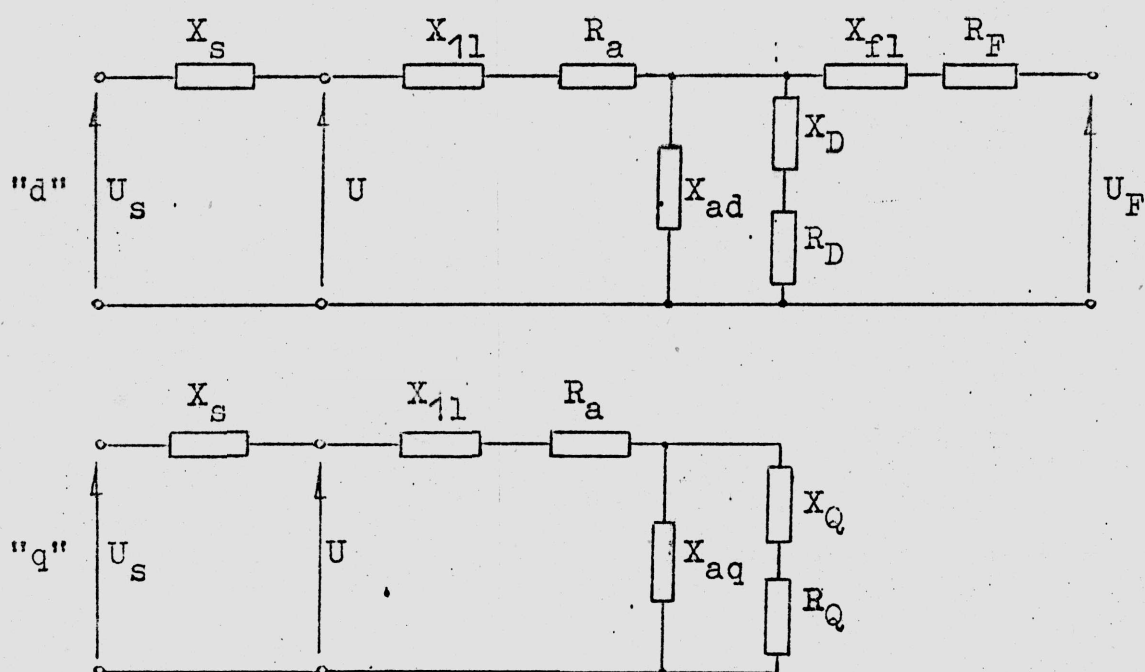
R_f - rezystancja w obwodzie wzbudzenia,

m_{to} - stopień obciążenia turbiny,

m_{tn} - znamionowy moment turbiny.

Współczynniki równań $d_1 \div d_{19}$ są funkcją parametrów impedancyjnych maszyny i systemu, oraz stałej inercji mas wirujących. Są one zestawione w załączniku 6. Wzory na współczynniki $d_1 \div d_{19}$ są słuszne dla zastępczego schematu generatora podanego przez Canaya [11] /rys. 3.1./. Równania Parka-Goriewa dla kriogeneratora różnią się od ogólnie przyjętej formy zapisu dla maszyn konwencjonalnych tylko równaniem dla nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia, w przypadku jeśli posiada on tylko jeden ekran. Przy założeniu, że nie dokonujemy żadnej regulacji prądu wzbudzenia:

$$D \psi_f = U_f + R_f / d_7 \cdot \psi_d - d_6 \cdot \psi_f + d_8 \cdot \psi_D / \simeq 0$$



Rys. 3.1. Schematy zastępcze generatora w osiach "d" i "q"

Wynika to z bardzo małej wartości rezystancji R_F oraz małej wartości napięcia U_F . Ponieważ układ równań /3.1./ wykorzystywano również do obliczeń stanów nieustalonych maszyny konwencjonalnej, gdzie $D\psi_f \neq 0$, założenia $D\psi_f = 0$ nie uczyniono. Otrzymane wyniki obliczeń pozwolą określić na ile prawdziwe byłoby to założenie dla kriogeneratora. Schematy zastępcze maszyn w osiach "d" i "q" /rys. 3.1./, ze względu na małą ilość znanych nam obecnie parametrów maszyn, różnią się od schematów podanych przez Canay'a pominięciem reaktancji charakterystycznej X_{rc} , która uwzględnia sprzężenie obwodu wzbudzenia i obwodu tłumienia poprzez strumień rozproszenia [11]. Parametry impedancyjne obliczono z zależności podanych przez Canay'a [11] po uwzględnieniu, że $X_{rc} = 0$.

$$X_{ad} = X_d - X_{1l} , \quad /3.2./$$

$$X_{f1} = \frac{X_d' - X_{1l}}{X_d - X_d'} \cdot X_{ad} , \quad /3.3./$$

$$X_D = \frac{X_d'' - X_{1l}}{X_d' - X_d''} , \quad /3.4./$$

$$R_F = \frac{X_d' \cdot /X_{ad}/^2}{\omega \cdot T_d' \cdot X_d' /X_d - X_d' /} , \quad /3.5./$$

$$R_D = \frac{X_d'' /X_d' - X_{11}/^2}{\omega \cdot T_d'' \cdot X_d' /X_d - X_d'' /} , \quad /3.6./$$

$$X_{aq} = X_{ad} \text{ /dla kriogeneratora/} , \quad /3.7./$$

$$X_{aq} = 0,95 X_{ad} \text{ /dla generatora konwencjonalnego/} ,$$

$$X_Q = \frac{X_q'' - X_{11}}{X_q - X_q''} \cdot X_{aq} , \quad /3.8./$$

$$R_Q = \frac{1}{\omega \cdot T_q''} \cdot \frac{X_q''}{X_q} . \quad /3.9./$$

3.3. Założenia upraszczające

Jako wyjściowy przyjmuje się układ równań Parka-Goriewa maszyny idealnej. Rozważania przeprowadza się przy następujących założeniach upraszczających:

- nie uwzględnia się wpływu regulacji wzbudzenia,
- maszyna jest napędzana turbiną o stałym momencie,
- maszyna pracuje na sieć sztywną poprzez reaktancję zastępczą $X_S = 0,15 \text{ p.u.}$,
- kriogenerator posiada jeden ekran o parametrach: R_D, R_Q, X_D, X_Q ,
- stałą inercji kriticznego zespołu $/H_T/$ przyjęto przy założeniu, że kriogenerator jest napędzany taką samą turbiną jak w przypadku maszyny konwencjonalnej.

Określenie reaktancji ekranu X_D i X_Q na podstawie danych parametrów dotyczących dużych kriogeneratorów jest w chwili obecnej niemożliwe. Wyliczenie wartości tych parametrów z zależności /3.4./ i /3.8./ jest również niemożliwe z uwagi na poczynione założenie upraszczające $/X_{11} = X_d''/$, gdyż wartość reaktancji ekranu w obwodach osi "d" i "q"

daży do zera. W związku z tym, wartości X_D i X_Q oszacowano wstępnie: $X_D = X_Q = 0,001$ p.u. i przeprowadzono obliczenia zwarciove na przykładzie zwarcia trójfazowego na zaciskach maszyny. Celem uzyskania informacji o wpływie założonych wartości parametrów X_D i X_Q na przebiegi zwarciove, obliczenia powtarzano dla różnych wartości X_D i X_Q w przedziale $/0,01 - 0,001/$ p.u. Głównym kryterium wyboru wartości X_D i X_Q było uzyskanie jak najmniejszej amplitudy składowej przemiennej 50 Hz w prądzie wzbudzenia, przy możliwie największej składowej aperiodycznej prądu zwarcia. Wnioski dotyczące wpływu tych wielkości na poprawność otrzymanych obliczeń, oraz wskazówki dotyczące wartości parametrów X_D , X_Q celem poprawienia warunków nadprzewodnictwa uzwojenia wzbudzenia umieszczono w dalszej części rozprawy. Przyjęcie powyższego kryterium jest uzasadnione wobec niemożliwości określenia parametrów ekranu dużych jednostek. Należy podkreślić, że problem ekranowania uzwojeń kriogeneratora od zmiennych zewnętrznych pól magnetycznych i projektowania samych ekranów jest już wstępnie opracowany [44]. Zastosowanie proponowanej w [44] metody określenia parametrów ekranu rozpatrywanego kriogeneratora 1 GVA jest w chwili obecnej niemożliwe, z uwagi na nieznaną konstrukcję tak dużych maszyn. Należy przy tym zauważyć, że jednoczesne spełnienie przez ekran sprzecznych często ze sobą funkcji stanowi poważny problem natury konstrukcyjnej, którego całkowite rozwiązanie pozwoli w przyszłości na dokładne określenie parametrów ekranu. Sprzeczne funkcje ekranu są następujące:

- pełnienie roli uzwojenia tłumiącego maszyny synchronicznej,
- termiczne ekranowanie obszaru kriogenicznego przed promieniowaniem cieplnym z obszaru o temperaturze otoczenia /duże naprężenia mechaniczne/,
- ekranowanie przed zewnętrznymi polami magnetycznymi /głównie 50 i 100 Hz/,
- przenoszenie dużych momentów uderowych przy zwarciach,
- umożliwienie płynnej regulacji strumienia wzbudzenia.

3.4. Obliczenia

Rozwiązanie układu równań różniczkowych maszyny przeprowadzono przy pomocy metody Rungego-Kutty, polegającej na numerycznym całkowaniu tych równań na maszynie cyfrowej. Wartość kroku całkowania h przyjmowano w zależności od symulowanego procesu, w granicach $h = /0,001 - 0,020/$ s. Do analizy stanów nieustalonych przyjęto następujące wielkości podstawowe:

$$\text{prąd: } J_p = \sqrt{2} \cdot J_N,$$

$$\text{napięcie: } U_p = \sqrt{2} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}},$$

$$\text{strumień skojarzony: } \psi_p = \frac{U_p}{\omega_p},$$

$$\text{impedancja: } Z_p = \frac{U_p}{J_p},$$

$$\text{czas: } \tau_p = \frac{1}{\omega_p},$$

gdzie:

J_N - znamionowy prąd fazowy w kA ,

U_N - znamionowe napięcie generatora w kV,

$\omega_p = \omega_N$ - znamionowa prędkość kątowna; $\omega_N = 314 \text{ s}^{-1}$.

W związku z powyższym, wartości względne amplitud: znamionowego prądu fazowego generatora oraz znamionowego napięcia fazowego, są równe 1 p.u.

Przy pomocy obranej metody, wykonano szereg obliczeń podstawowych wielkości w funkcji czasu dla przypadku zwarcia na zaciskach oraz przy niedowzbudzeniu.

Podstawowe parametry obu analizowanych maszyn przedstawiono w tab. 1. Parametry pomocnicze, wyliczone z zależności 3.2. - 3.9., zestawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1.

Parametr	Kriogenerator	Generator konwencjonalny
—————	p.u.	p.u.
X_{ad}	0,28	1,67
X_{fl}	0,32	0,066
X_D *	10^{-3}	0,035
R_F	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$0,99 \cdot 10^{-3}$
R_D	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$
X_{aq}	0,28	1,59
X_Q *	$1 \cdot 10^{-3}$	0,019
R_Q	$6 \cdot 10^{-3}$	0,023
H_T **	1770	2028

* - parametry założone w oparciu o rozważania przeprowadzone w części /3.5.1./,

** - wyznaczono orientacyjnie wg. [20] .

Uzyskana z przyjętego schematu zastępczego maszyny wartość reaktancji X_{fl} dla kriogeneratora, jest bliska wartości reaktancji synchronicznej, co jest zgodne z [22] . Różnica wartości rezystancji uzwojenia wzbudzenia obu rodzajów maszyn wynosi ok. trzy rzędy wielkości.

Warunki początkowe stanu ustalonego poprzedzającego zakłócenie obliczono z zależności /2,1 - 2,6/.

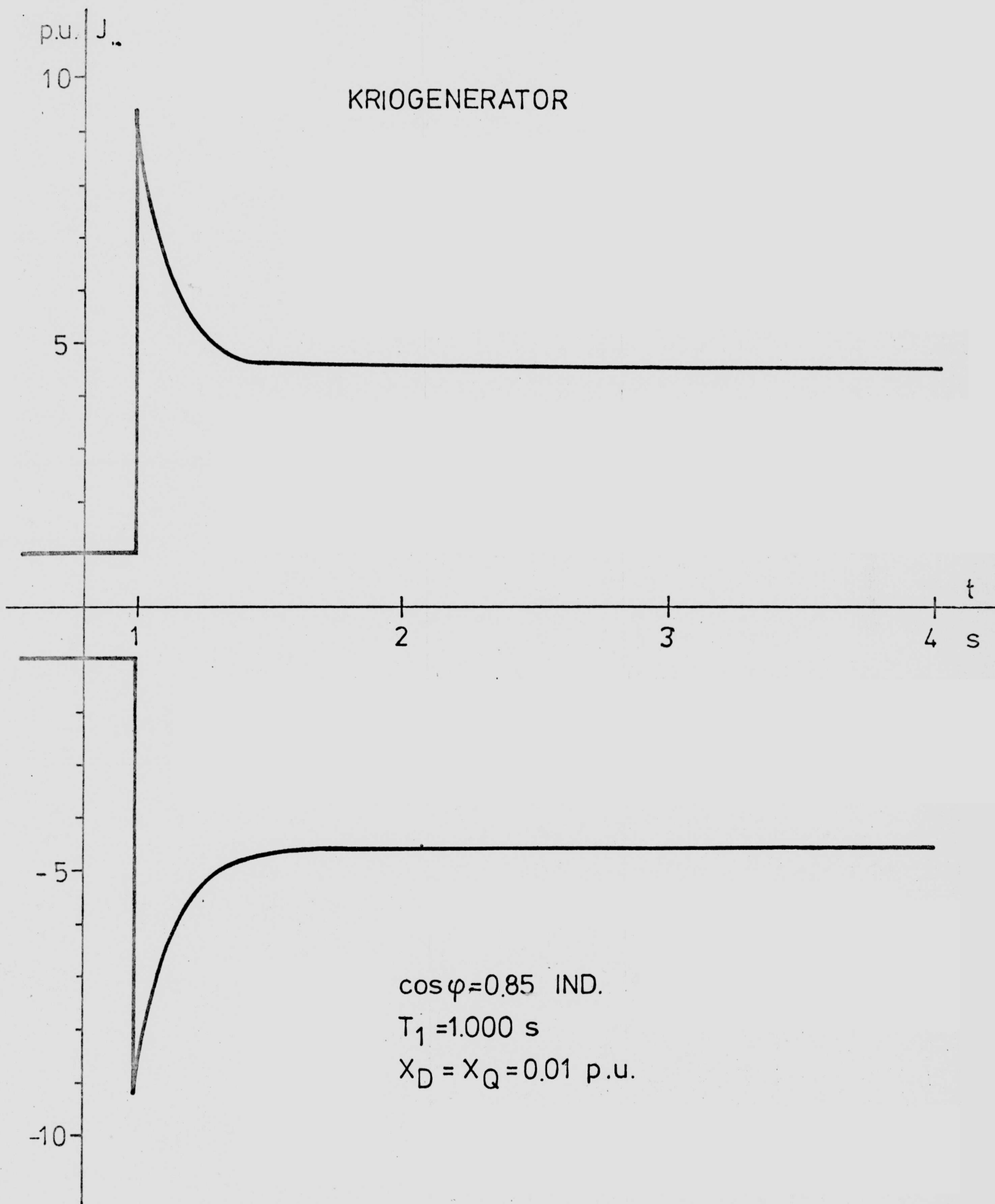
3.5. Zwarcie trójfazowe na zaciskach

Obliczenia zwarć trójfazowych na zaciskach kriogeneratora przeprowadzono w kilku wariantach w celu uzyskania informacji o wartości prądów zwarciovych, o charakterze ich przebiegów, o wartości składowej aperiodycznej prądów zwarciovych, amplitudzie składowej przemiennej w prądzie wzbudzenia kriogeneratora. Ponadto uzyskano dane odnośnie do wartości momentu elektromagnetycznego i zmian kąta obciążenia ψ

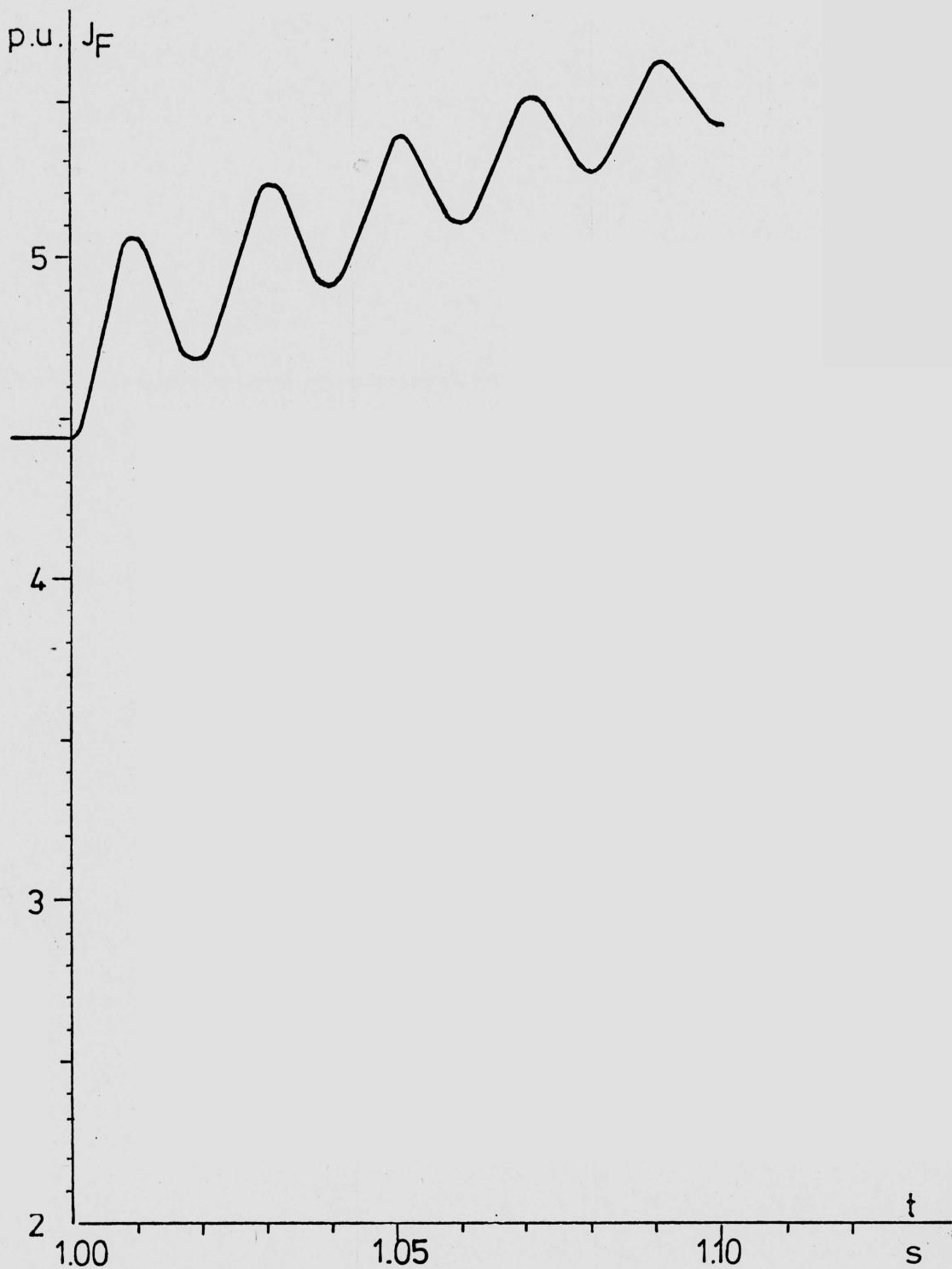
w funkcji czasu. Do symulacji zwarć przyjmowano stałą wartość momentu turbiny $m_t = 0,85$ p.u., oraz stałą wartość napięcia wzbudzenia.

3.5.1. Rozeznanie wpływu wartości reaktancji ekranu X_D , X_Q na przebiegi zwarciove

Symulacja zwarcia przeprowadzana była przy poczynionych w p. 3.3. założeniach w następujących warunkach: obliczenia rozpoczynano dla stanu pracy znamionowej maszyny w chwili $T_0 = 0$ s. Stan pracy ustalonej trwał do chwili $T_1 = 1$ s, w której następowało zwarcie. W wyniku nie stwierdzono znacznego wpływu reaktancji X_D i X_Q na wartość oraz charakter prądów zwarciovwch. Zależności prądu stojana w funkcji czasu dla skrajnych wartości X_D i X_Q /0,001 oraz 0,01/ p.u. przedstawiono na rys. 3.2. i 3.4. Udarowy prąd zwarcia przy założonej wartości $X_D = X_Q = 0,001$ p.u. wynosi ok. 10,3 p.u. i jest nieznacznie większy od prądu w drugim skrajnym przypadku / $X_D = X_Q = 0,01$ p.u./, kiedy to jego wartość wynosi ok. 9,5 p.u. Początkowa wartość składowej aperiodycznej prądu stojana, przy założonym czasie wystąpienia zwarcia $T_1 = 1$ s, jest mała i wynosi ok. 0,5 p.u. Ze względu na bardzo dużą wartość stałej czasowej T_d' kriogeneratora, składową przejściową prądu zwarciovwego w rozpatrywanym przedziale czasu trwania zwarcia /5 s/ można przyjąć jako stałą. Przy założeniu, że po czasie ok. 0,5 s od chwili / T_1 / wystąpienia zwarcia /rys. 3.2./ prąd zwarciovy ustala się na poziomie 4,6 p.u., to po upływie 2,5 s jego wartość maleje bardzo nieznacznie, do 4,59 p.u. Inaczej natomiast przedstawia się problem wpływu reaktancji X_D , X_Q na wartość składowej przemiennej prądu wzbudzenia. Jak należało oczekiwać, przy dużych wartościach X_D , X_Q amplituda składowej zmiennej jest duża /rys. 3.3./. Dla wartości $X_D = X_Q = 0,01$ p.u. największa wartość amplitudy składowej periodycznej prądu wzbudzenia wynosi ok. 0,2 p.u., podczas gdy dla wartości $X_D = X_Q = 10^{-3}$ p.u. jest ono mniejsza i wynosi ok. 0,05 p.u. Względny zachowania stanu nadprzewodnictwa uzwojenia wzbudzenia dopuszczają znikomą zawartość składowej przemiennej. W trakcie analizy wyników innych zależności, jak $\psi = f/t$, $m = f/t$, nie zauważono wpływu zmian ich wartości na skutek zmian



Rys. 3.2. Obwiednia prądu zwarciovego przy zwarciu trójfazowym kriogeneratora 1 GVA
/ $X_D = X_Q = 0,01 \text{ p.u.}$ /



Rys. 3.3. Wykres $J_F = f(t)$ przy zwarcu trójfazowym
kriogeneratora 1 GVA / $X_D = X_Q = 0,01$ p.u. ,
 $\cos \varphi = 0,85$, $T_1 = 1,000$ s /

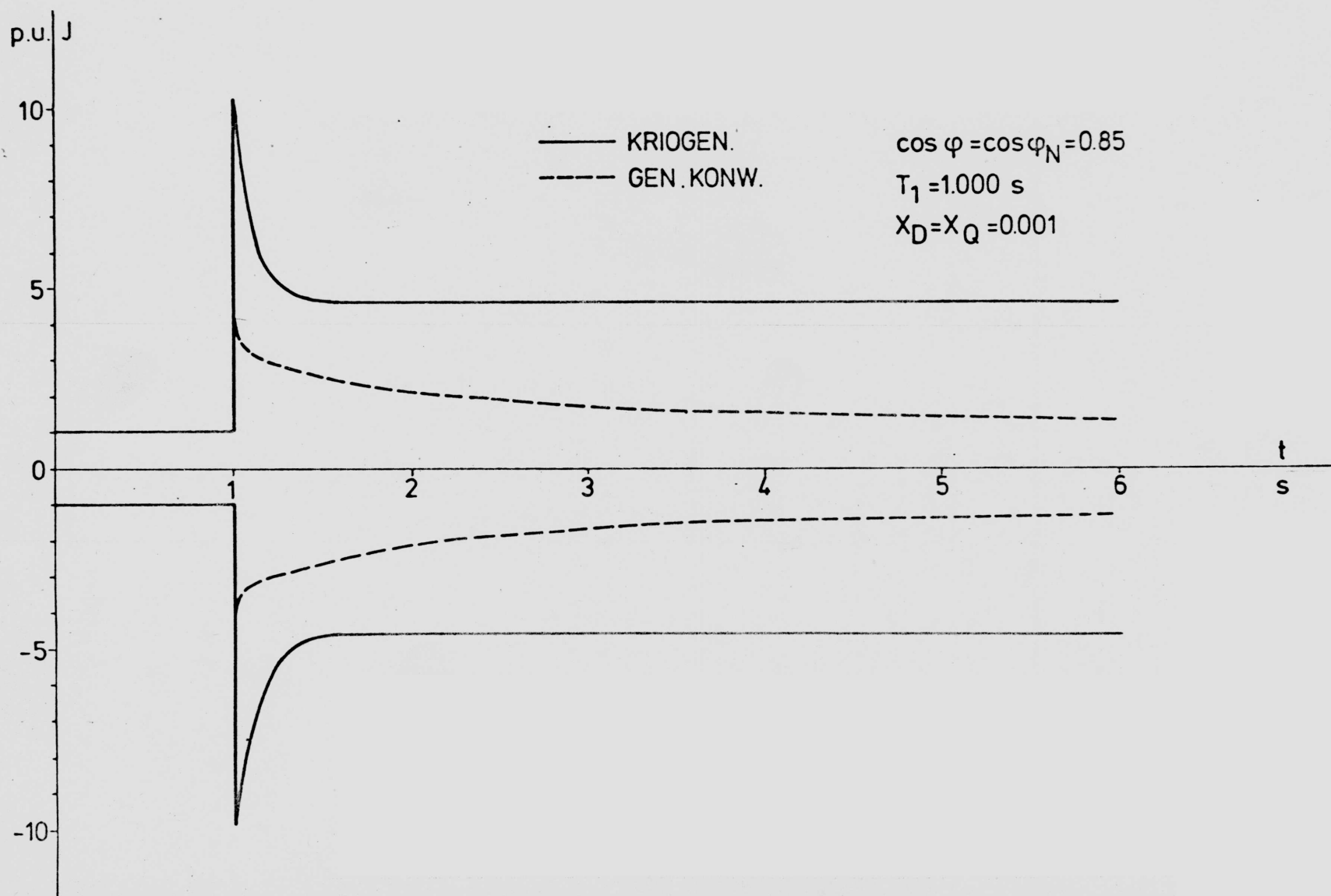
reaktancji X_D , X_Q . W związku z tym, przyjmując kryterium zachowania nadprzewodnictwa za najważniejsze, do dalszych obliczeń przyjęto $X_D = X_Q = 0,001$ p.u. Określenie dopuszczalnej wartości amplitudy składowej periodycznej w prądzie wzbudzenia na obecnym etapie zaawansowania prac projektowych jest niemożliwe, gdyż jej wartość jest ściśle związana z rodzajem użytego nadprzewodnika, sposobem jego stabilizacji, konstrukcją uzwojenia oraz intensywnością chłodzenia. Oscylogramy badanych przebiegów maszyny synchronicznej z nadprzewodzącym uzwojeniem wzbudzenia [33] dotyczące przebiegu prądu wzbudzenia przy zwarciu trójfazowym nie wykazują składowej przemiennej, co potwierdza konieczność ograniczania jej amplitudy w modelu przyjętym do rozważań.

3.5.2. Analiza porównawcza zachowania się obu maszyn podczas zwarcia

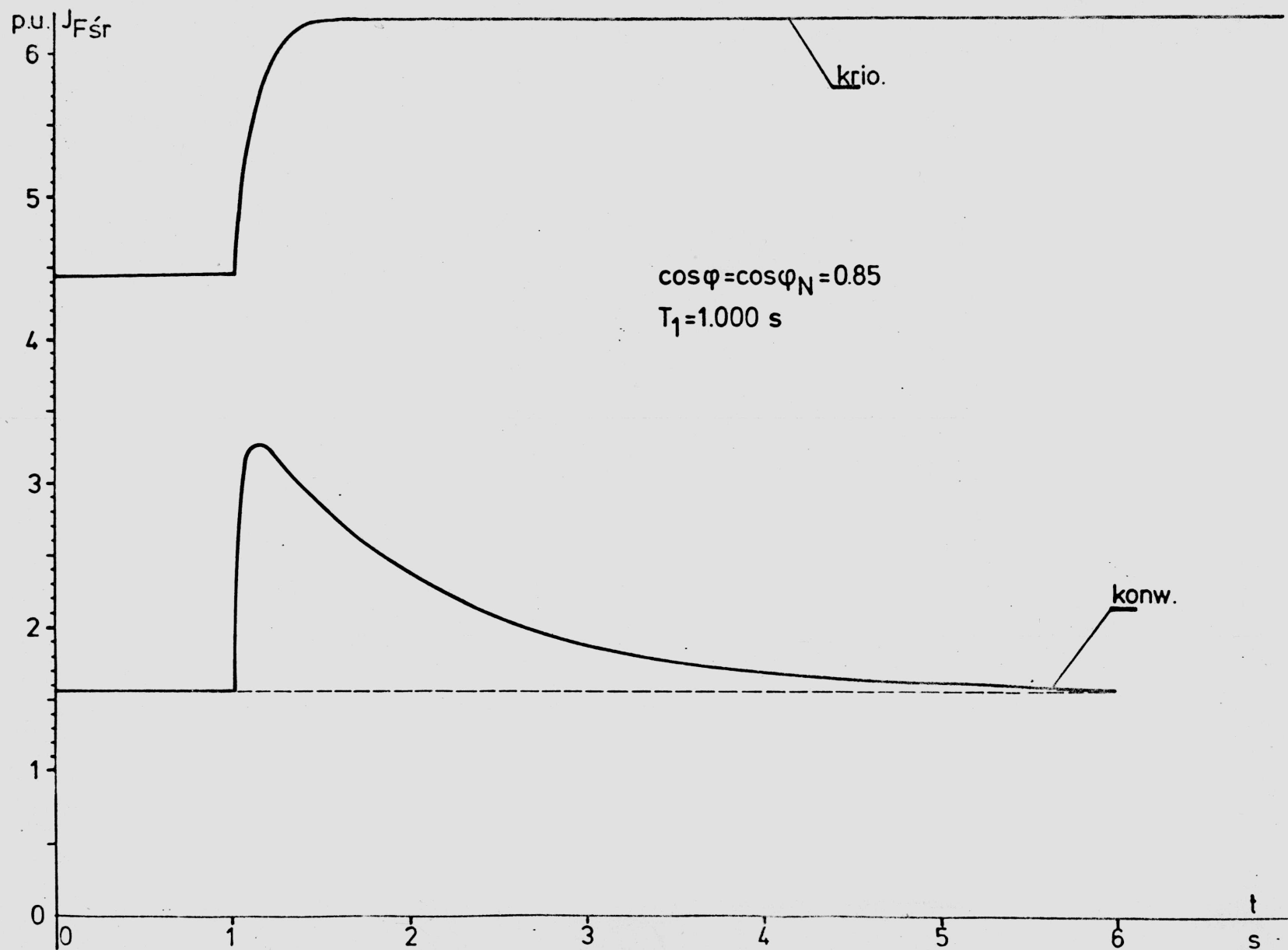
W wyniku przeprowadzonych w p. 3.5.1. badań dotyczących wyboru parametrów X_D , X_Q ekranu, dalsze rozważania przeprowadzono przy założeniu, że $X_D = X_Q = 10^{-3}$ p.u. Celem uzyskania pełniejszej informacji o przebiegach zwarciovych, zmieniano symulowany czas wystąpienia zwarcia T_1 w granicach $/0,995 - 1,005/$ s. Przeprowadzone obliczenia wykazały znaczną odmienność niektórych przebiegów i ich zależność od czasu.

3.5.2.1. Zwarcie w chwili $T_1 = 1,000$ s

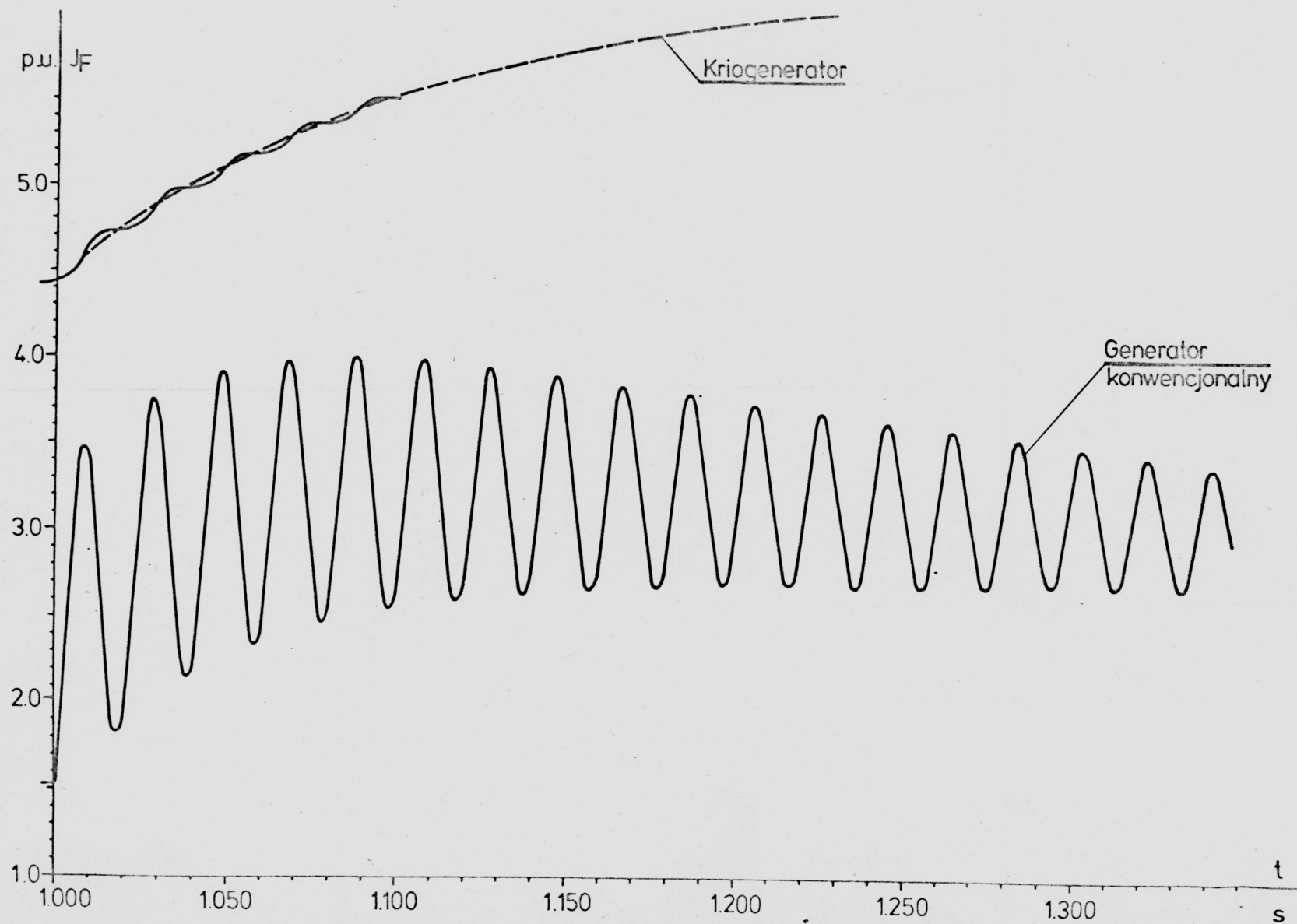
Przypadek ten omówiono częściowo w punkcie 3.5.1. dotyczącym wyboru parametrów X_D i X_Q . Na rys. 3.4. przedstawiono obwiednie prądów zwarciovych obu maszyn. Wartość udarowego prądu zwarcia w kriogeneratorze jest ponad dwa razy większa niż w generatorze konwencjonalnym. Wartość składowej aperiodycznej w tym wariancie obliczeń $/T_1=1,000\text{s}/$ jest pomijalnie mała w porównaniu z prądem udarowym. Duża wartość stałej czasowej T_d' kriogeneraatora sprawia, że przejściowy prąd zwarcia utrzymany jest na stałym poziomie, a przebieg prądu wzbudzenia w funkcji czasu /rys. 3.5./ jest bardzo słabo tłumiony. Gdyby obwód wzbudzenia kriogeneraatora miał rezystancję R_F równą zeru, to ustalony na poziomie ok. 6,2 p.u. prąd wzbudzenia płynąłby nieskończenie długo.



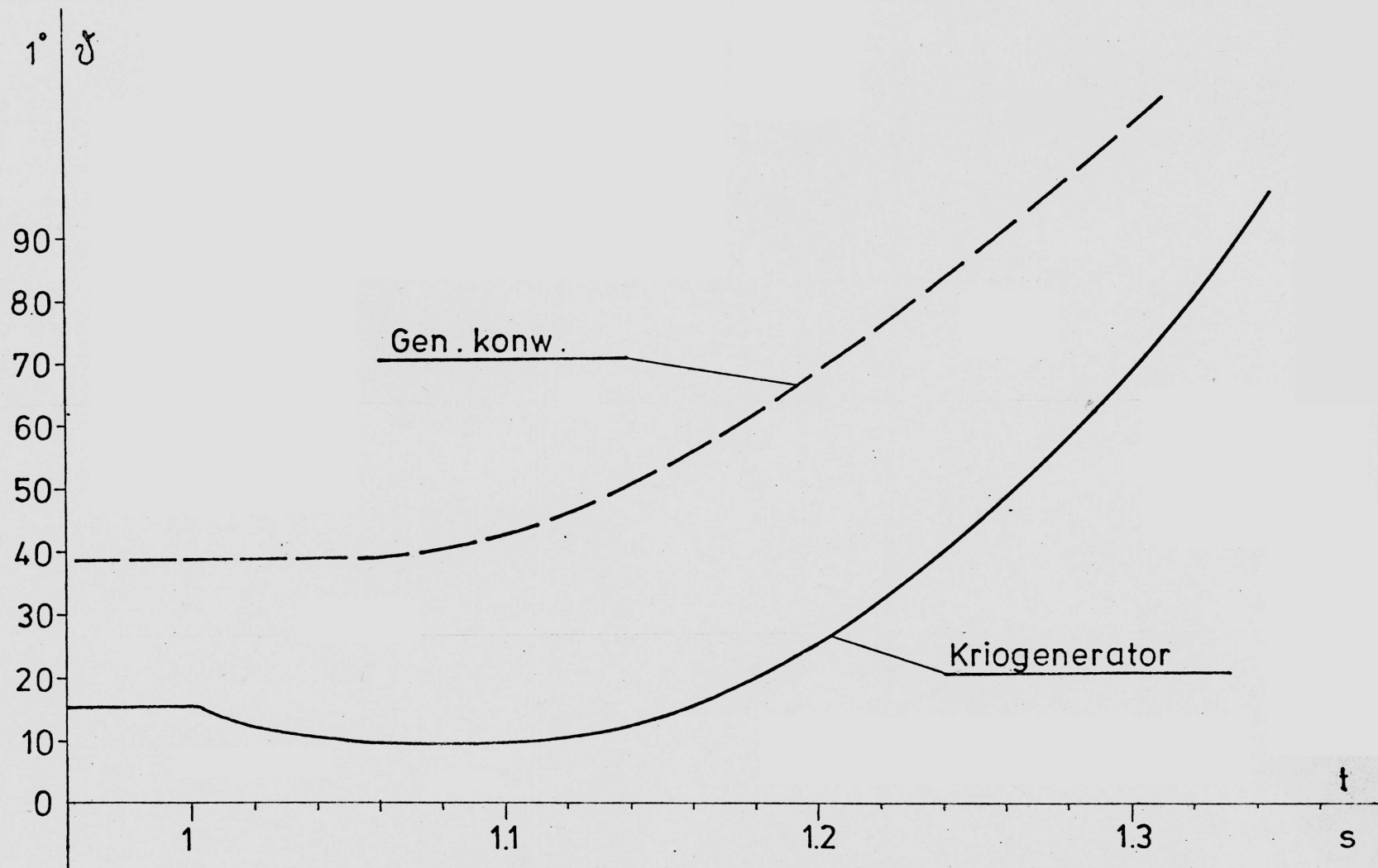
Rys.3.4. Obwiednie prądów zwarciovych kriogeneratora i generatora konwencjonalnego.



Rys.3.5. Przebieg wartości średniej prądu wzbudzenia.



Rys.3.6. Przebieg prądu wzbudzenia $J_F = f(t)$ w początkowym okresie zwarcia z uwzględnieniem składowej periodycznej.



Rys. 3.7. Przebieg $\delta = f(t)$ przy zwarcu trójfazowym na zaciskach
 / $T_1 = 1,000 \text{ s}$, $X_D = X_Q = 0,001 \text{ p.u.}$, $\cos \varphi = 0,85$ /

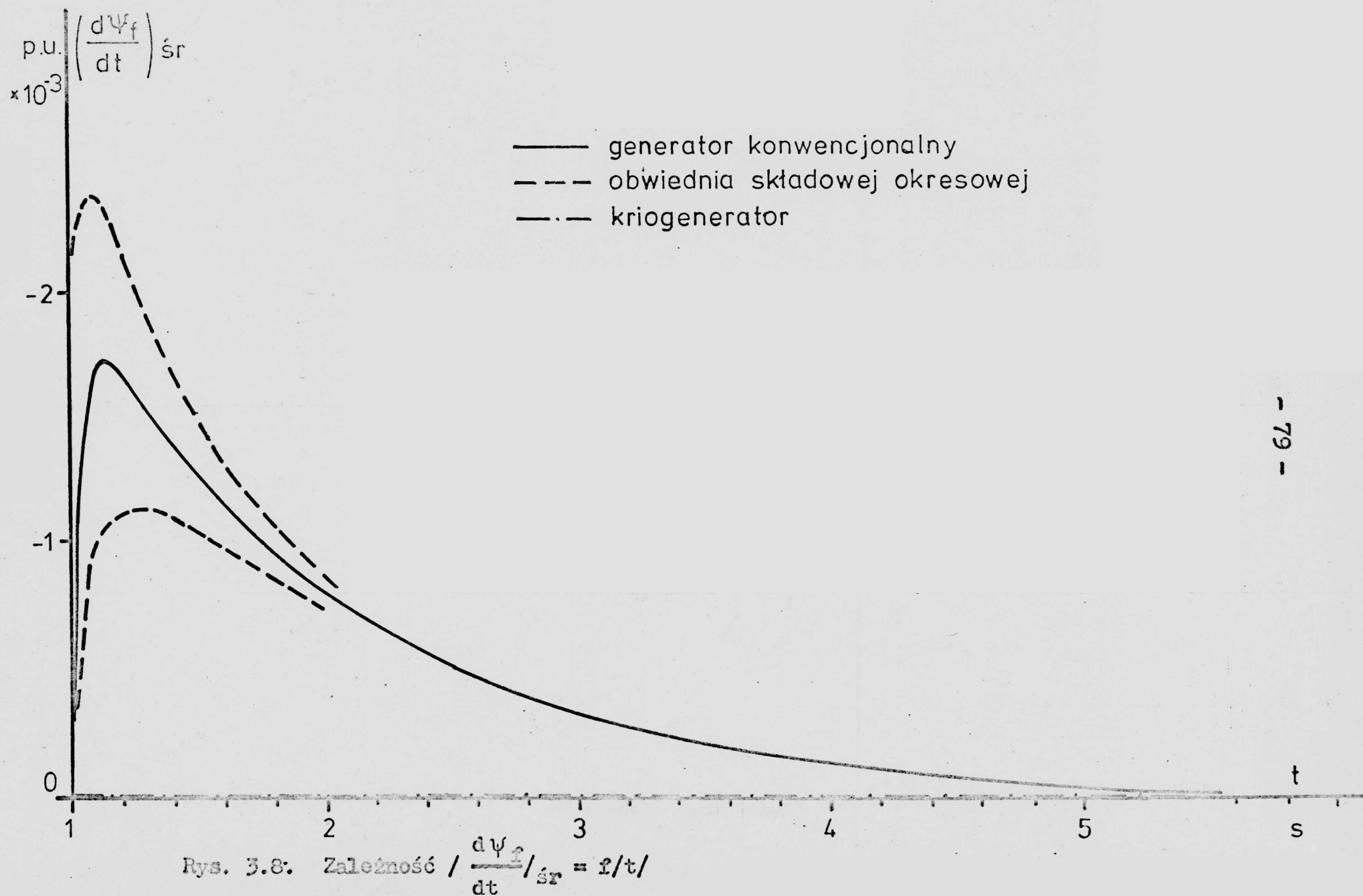
Na rys. 3.6. przedstawiono przebieg prądu wzbudzenia obu maszyn w początkowym okresie zwarcia. Charakteryzuje się on dużą różnicą w zawartości składowej periodycznej dla obu maszyn.

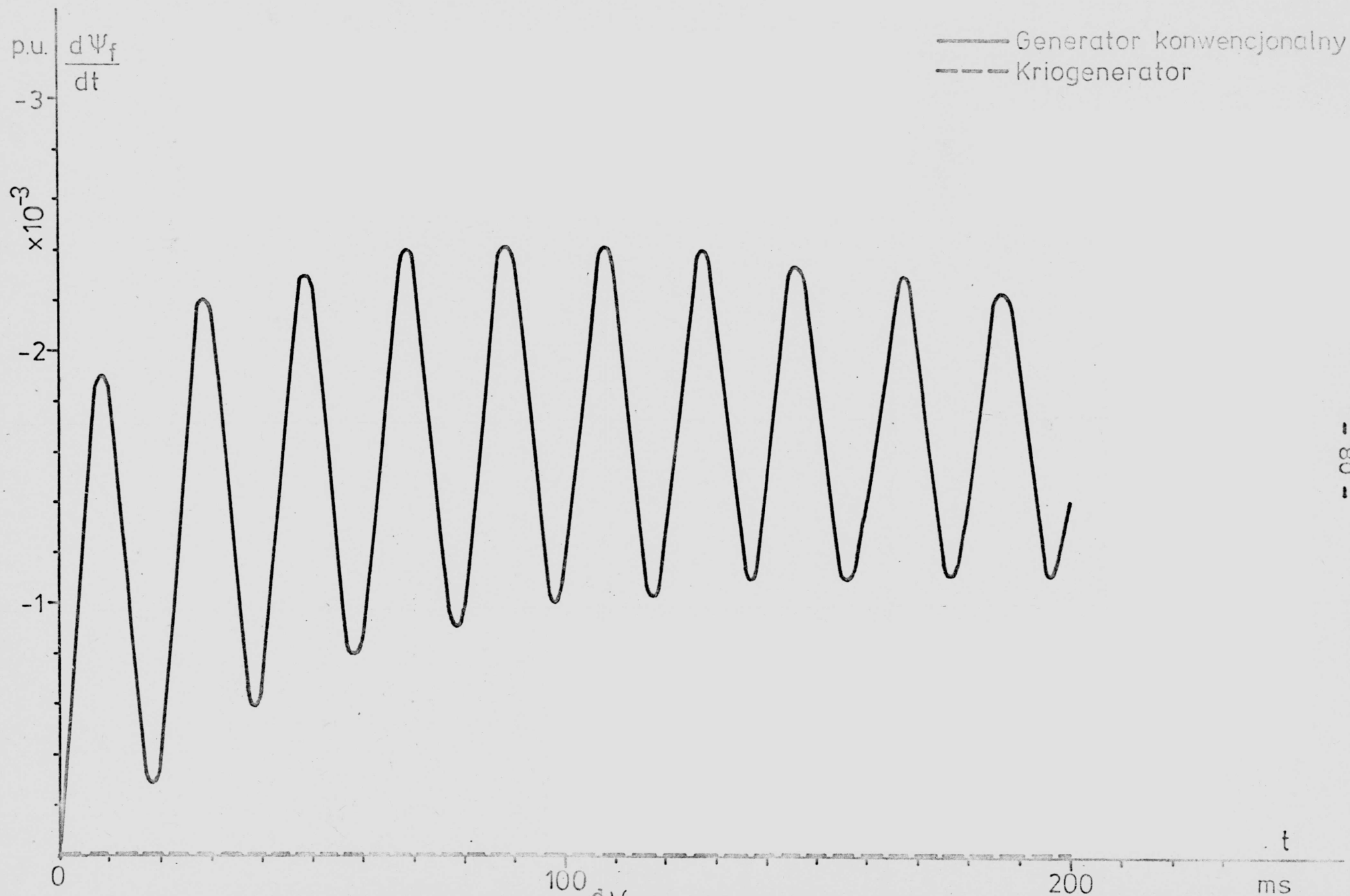
Zmianę kąta obciążenia maszyn w funkcji czasu trwania zwarcia $\vartheta = f/t$ /rys. 3.7./ charakteryzują podobne przebiegi, z tym, że w przypadku kriogeneratora daje się zauważyć nieznaczne zmniejszenie się kąta w początkowej fazie zwarcia. Przesunięcie charakterystyk $\vartheta = f/t$ spowodowane jest znacznie mniejszą wartością reaktancji X_d kriogeneratora. Wyniki obliczeń, dotyczące zmian strumienia ψ_f skojarzonego z uzwojeniem wzbudzenia, potwierdzają słusność poczynionego w p. 3.2. przypuszczenia, że mała wartość U_f i bliska zero wartość rezystancji R_F wywołują bardzo małe zmiany $\frac{d}{dt} / \psi_f /$. Zależności $\frac{d}{dt} / \psi_f / = f/t$ oraz $\frac{d}{dt} / \psi_{sr} / = f/t$ przedstawiono na rys. 3.8. i 3.9.

Moment elektromagnetyczny $m = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d$ pojawiający się w maszynie po wystąpieniu zwarcia /rys. 3.10./ w kriogeneratorze jest ponad dwa razy większy od momentu generatora konwencjonalnego. Jego maksymalna wartość wynosi ok. 10 p.u., co jest zgodne z przypuszczeniami odnośnie do jego wartości [14]. Wystąpienie tak znacznych wartości momentu należy wziąć pod uwagę przy konstruowaniu kriogeneratorów, szczególnie zaś jego ekranów.

3.5.2.2. Zwarcie w chwili $T_1 = 0,995$ s

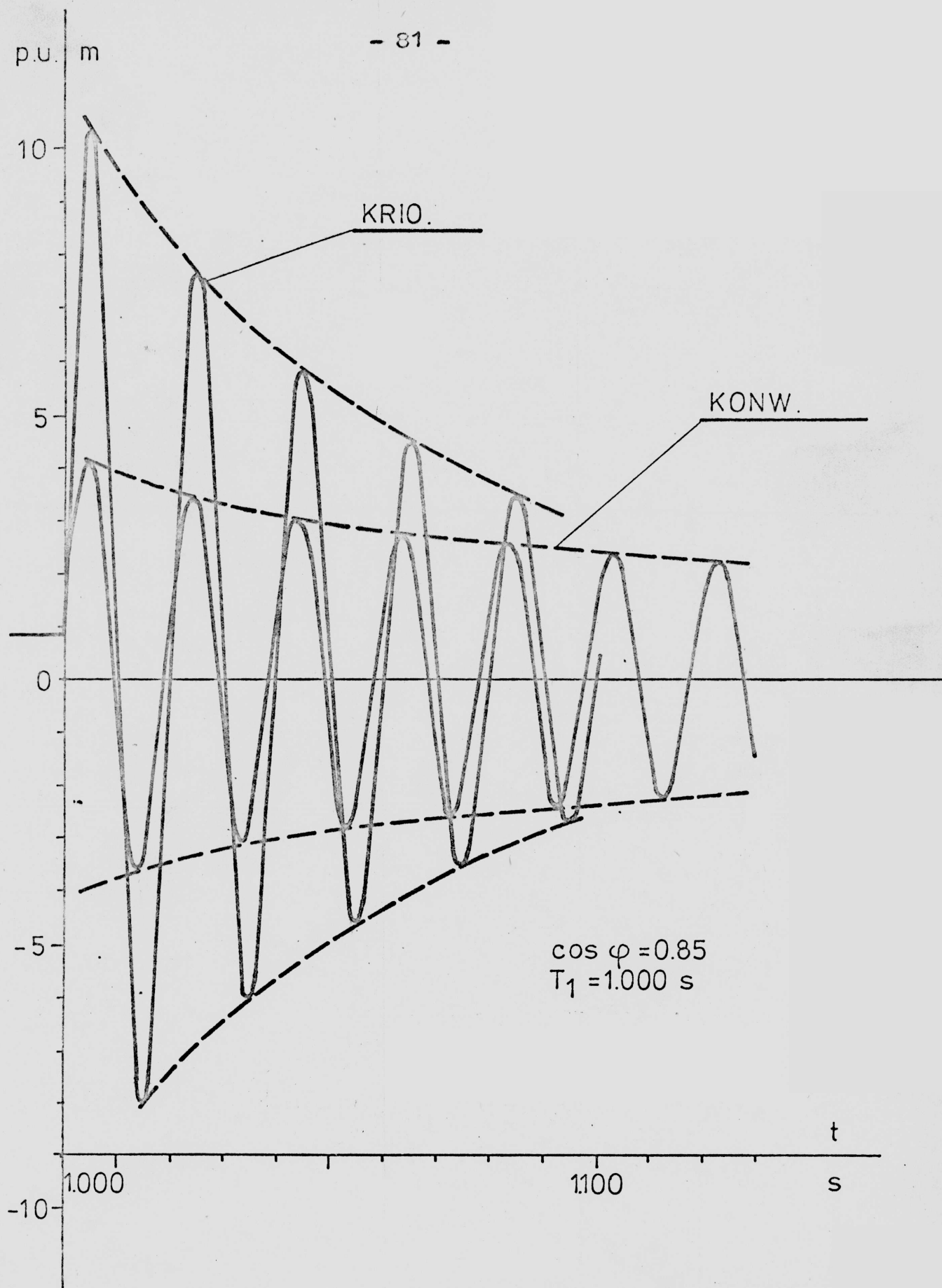
Celem uzyskania maksymalnej wartości składowej nieokresowej prądu zwarciovego, zmieniano symulowany czas T_1 wystąpienia zwarcia. Pozwoliło to na określenie maksymalnych wartości udarowego prądu zwarcia. Największą wartość początkową składowej aperiodycznej prądu, równą ok. 9 p.u., otrzymano dla $T_1 = 0,995$ s. Obwiednie prądów zwarciovych obu maszyn przedstawiono na rys. 3.11. Wartość udarowego prądu zwarcia kriogeneratora wynosi ok. 17,5 p.u., co w porównaniu z wartością ok. 7 p.u. maszyny konwencjonalnej, wywoła m.in. znaczny wzrost sił dynamicznych działających na uzwojenie stojana. Biorąc pod uwagę ponad dwukrotny wzrost wartości prądu zwarcia, oddziaływania dynamiczne na pręty stojana umieszczone w konstrukcji bezżłobkowej, zwiększą się czterokrotnie, w porównaniu z maszyną konwencjonalną.



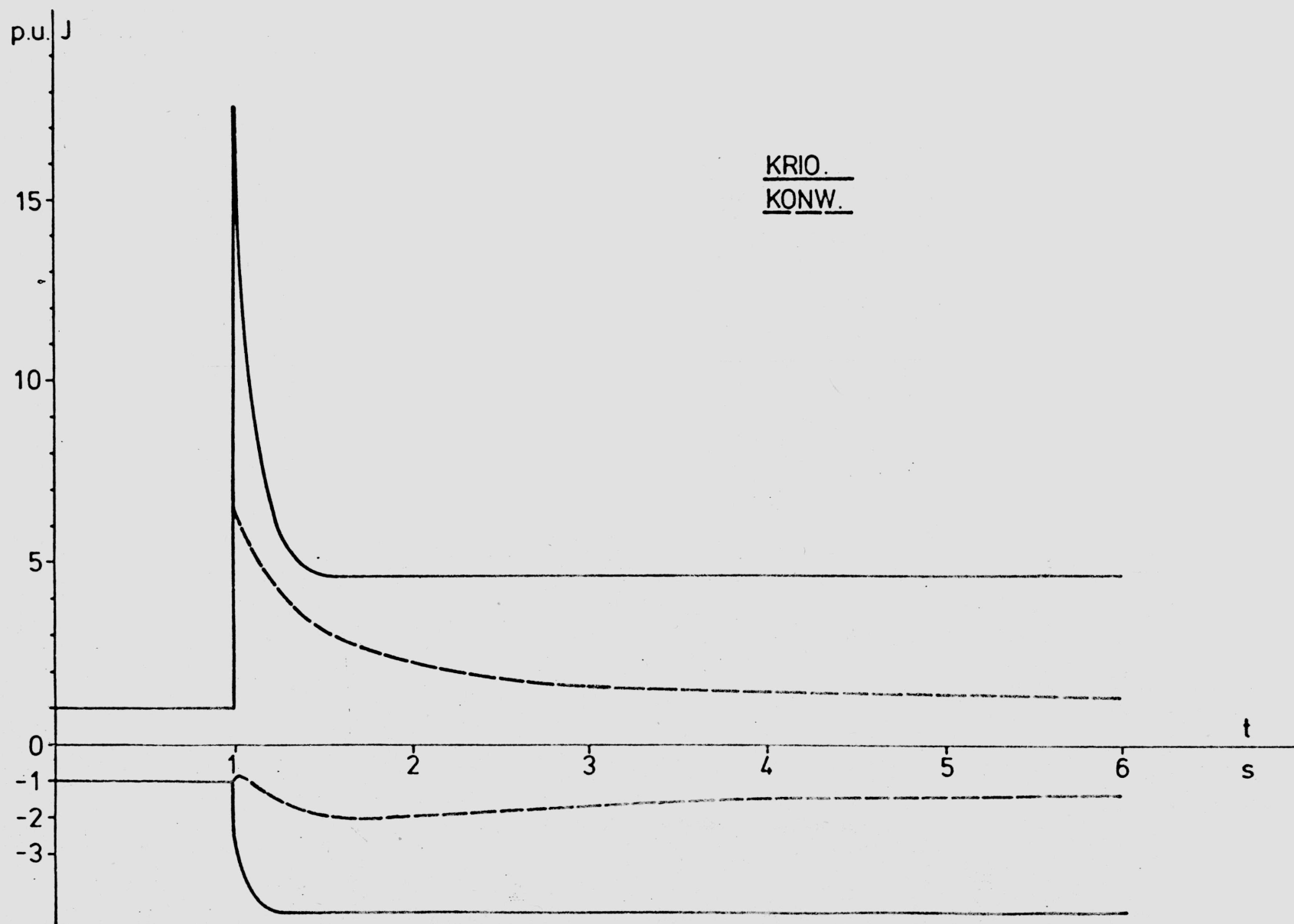


Rys. 3.9. Zależność

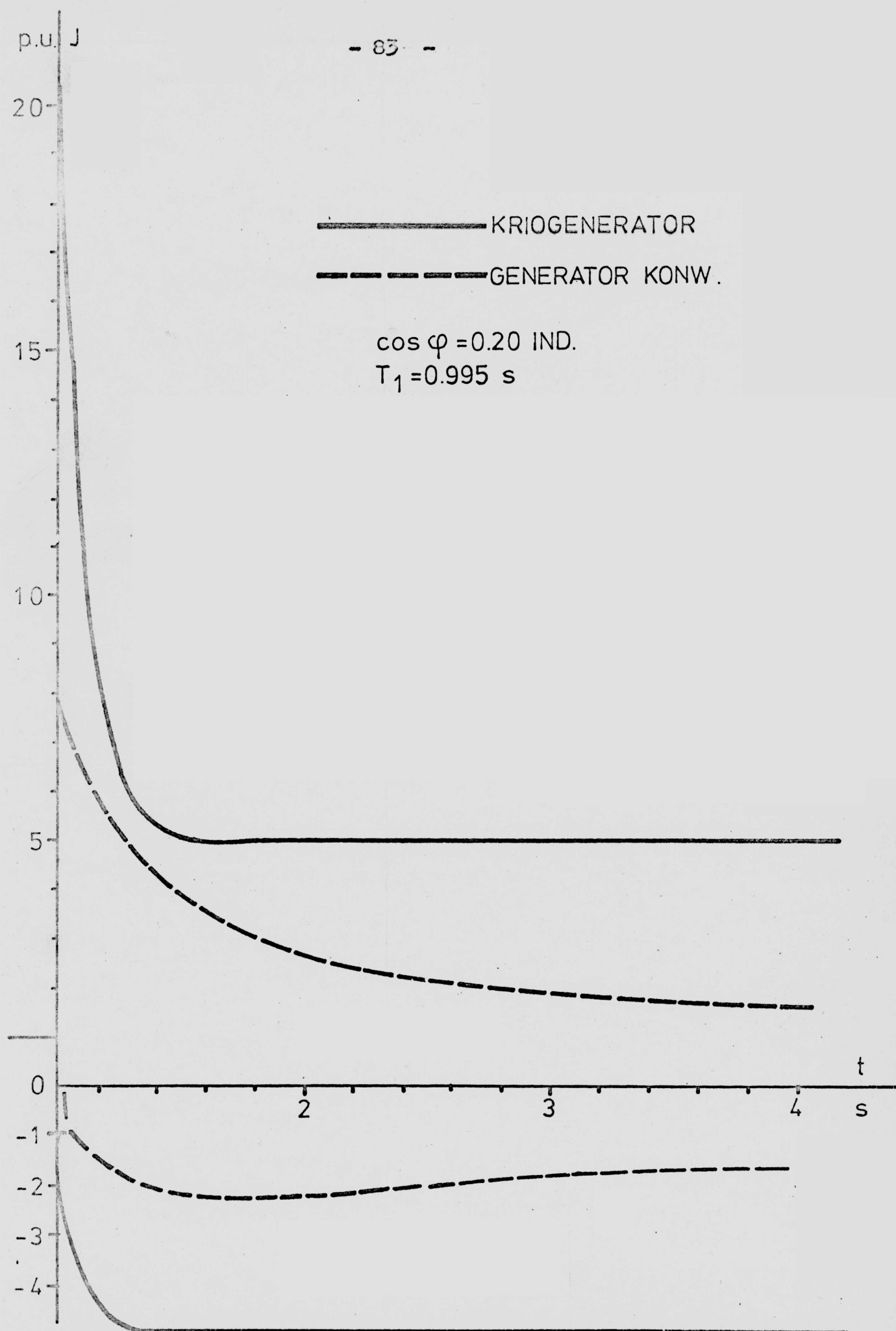
$$\frac{d\Psi_f}{dt} = f/t/$$



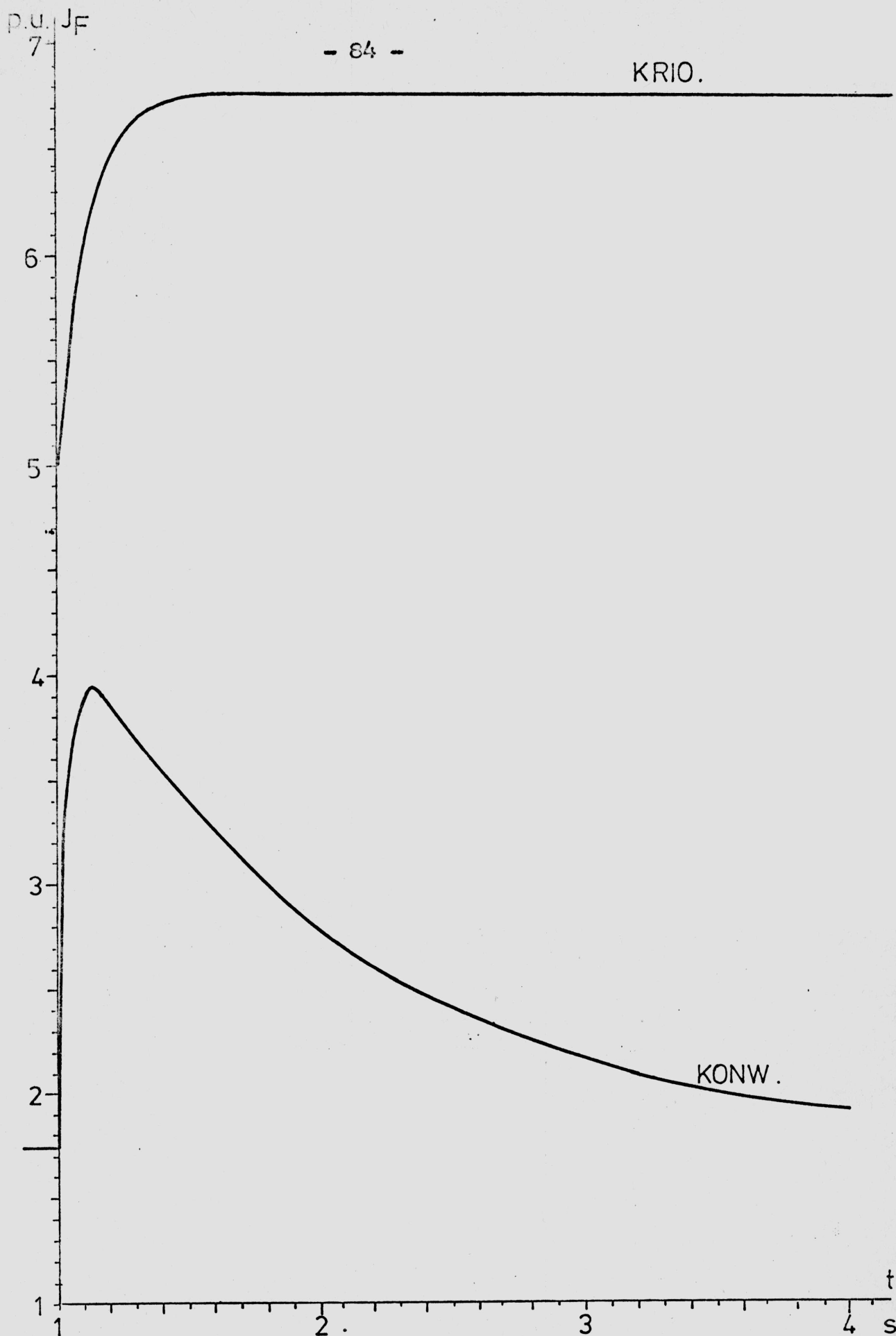
Rys. 3.10. Przebieg momentu elektromagnetycznego w funkcji czasu



Rys.3.11. Obwiednie prądów zwarciovych przy zwarcu w chwili $T_1=0.995$ s , $\cos \varphi = 0.85$.



Rys.3.12. Obwiednie prądów zwarciovych przy $\cos \varphi = 0.2 \text{ IND}$



Rys. 3.13. Przebieg $J_F = f/t/$ przy $\cos \varphi = 0,2$ ind

Pozostałe wielkości, jak moment elektromagnetyczny, kąt obciążenia i prąd wzbudzenia mają wartości i charakter przebiegów podobne, jak w przypadku wariantu dla $T_1 = 1,000$ s.

3.5.2.2.1. Zwarcie trójfazowe przy $\cos \varphi = 0,2$ ind

Brak ograniczeń ze względu na prąd wzbudzenia kriogeneratora, sprzyja możliwości długotrwałej pracy w obszarze przewzbudzenia przy małych wartościach współczynnika mocy. Zwarcie w takich warunkach pociąga za sobą pojawienie się największych prądów. W związku z tym, w celu uzupełnienia informacji o prądach zwarciovych kriogeneratora, przeprowadzono symulację zwarcia następującego po pracy ustalonej, w warunkach obciążenia znamionową mocą pozorną przy $\cos \varphi = 0,2$ ind. Prąd udarowy kriogeneratora /rys. 3.12./ osiąga wtedy wartość ok. 19 p.u. Charakter przebiegu prądu wzbudzenia jest podobny do odpowiednich przebiegów w poprzednich wariantach obliczeń rys. 3.13. Przebieg pozostałych wielkości jak m , ψ , $\frac{d}{dt} / \psi_f / = f/t/$ są również podobne do odpowiednich przebiegów opisanych w p. 3.5.2.1.

Celom uzupełnienia obliczeń zwarciovych przeprowadzono analizę zwarć niesymetrycznych.

3.6. Zwarcia niesymetryczne

Obliczenie prądu początkowego w miejscu zwarcia niesymetrycznego wykonano metodą PN/E dla przypadków zwarć: jednofazowego, dwufazowego i dla porównania z wynikami otrzymanymi poprzednio, dla zwarcia trójfazowego. Ze względu na brak danych odnośnie do reaktancji dla składowej zerowej kriogeneratora X_{OG} , obliczenia spodziewanych wartości prądów zwarciovych przeprowadzono dla zwarć występujących na szynach WN transformatora blokowego połączonego d/Y /wyeliminowanie z obwodu składowej zerowej reaktancji X_{OG} /.

3.6.1. Założenia upraszczające

W obliczeniach przyjęto następujące uproszczenia:

żonego z 3-ch transformatorów jednofazowych wynosi 15 - 16 % [27].
Przy tak przyjętym transformatorze, odpowiednie reaktancje dla składowych symetrycznych są sobie równe $X_{1T} = X_{2T} = X_{0T}$ [25].

Linia przesyłowa:

Założono linię dwutorową o napięciu 400 kV i długości 200 km.
Zgodnie z PN/E-05 002 dla linii dwutorowych zaleca się przyjmować stosunek X_0/X_1 1,5 raza większy od wartości X_0/X_1 linii jednotorowych.
Wartość X_0/X_1 linii jednotorowej 400 kV o dwóch przewodach odgromowych przyjęto ok. 2,9 według [13]. Reaktancję linii w Ω/km przyjęto:
 $X_1 = 0,339 \Omega/\text{km}$ według [36].

Zastępcza reaktancja linii $X_L = 33,9 \Omega = X_{1L} = X_{2L}$;

$$X_{0L} = 1,5 \cdot 2,9 \cdot X_{1L} = 4,35 X_{1L} = 147,46 \Omega.$$

Wobec braku danych, założono, że linia dochodzi do wielkiego węzła energetycznego 400 kV o mocy zwarciowej $S_{zw} = 15 \text{ GVA}$. W obliczeniach zwarć niesymetrycznych przyjęto moc podstawową S_p równą mocy znamionowej kriogeneratora $S_N = 1 \text{ GVA}$. Napięcie podstawowe U_p przyjęto równe napięciu znamionowemu w miejscu zwarcia $U_p = 1,05 U_N$;

$$U_p = 1,05 \cdot 400 \text{ kV} = 420 \text{ kV}.$$

Prąd podstawowy J_p :

$$J_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_p} = 1,37 \text{ kA}.$$

$$\text{Impedancja podstawowa } Z_p = \frac{U_p}{J_p} = 176,4 \Omega.$$

Obliczone wartości reaktancji elementów układu wynoszą:

$$\begin{aligned} X_{1G} &= X_{2G} = 0,1 \text{ p.u.}, \\ X_{1T} &= X_{2T} = X_{0T} = 0,15 \text{ p.u.}, \\ X_{1L} &= X_{2L} = 0,192 \text{ p.u.}, \\ X_{0L} &= 0,83 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Reaktancję zastępczą systemu określono z założonej wartości mocy zwarciowej $X_{1s} = 0,06 \text{ p.u.}$

Założono, że $X_{2s} = X_{0s} = X_{1s}$.

Przy obliczaniu wartości prądów zwarciovych, poszczególne składowe symetryczne transformowano przy założeniu, że transformator blokowy nie wprowadza przesunięcia pomiędzy wielkościami po obu stronach transformatora. Odpowiada to grupie zerowej połączeń /d/Y 0/. Przyjęcie takiej grupy połączeń pozwala na wyliczenie maksymalnych wartości prądów /składowe zgodna i przeciwna dodają się algebraicznie/. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 3.2.

3.6.3. Analiza wyników obliczeń

Prądy zwarciove kriogeneratora są większe od prądów zwarciovych generatora konwencjonalnego, średnio ok. 1,7 raza dla wszystkich rodzajów zwarć na szynach WN. Podobnie jak w maszynach konwencjonalnych, największą wartość w porównaniu z innymi rodzajami zwarć osiąga prąd zwarcia trójfazowego. Najgroźniejszym zwarcie, pod względem oddziaływań dynamicznych na konstrukcję kriogeneratora, jest trójfazowe zwarcie na zaciskach, podczas którego prąd zwarciovy jest ok. 2,8 razy większy od prądu generatora konwencjonalnego. Przy napięciu generatora $U_N = 27$ kV maksymalna wartość udarowego prądu zwarcia i_u wynosi ok. 541,2 kA! Wspomniana w p. 1.3.1 możliwość zwiększenia napięć znamionowych kriogeneratorów stanowi jedyne realne rozwiązanie prowadzące do ograniczenia dużych wartości prądów zwarciovych. Otrzymane metodą PN/E krotności I_p/J_N są porównywalne z wartościami obliczonymi na maszynie cyfrowej dla zwarcia trójfazowego na zaciskach $I_p/J_N = 10$ - wartość uzyskana z obliczeń na maszynie cyfrowej; $J_p/J_N = 9,9$ - wartość uzyskana z obliczeń metodą PN/E/. Dla maszyny konwencjonalnej wartości te wynoszą odpowiednio 4 i 3,5. Udział składowej przeciwnej w prądzie zwarciovy przy zwarciach niesymetrycznych nie zależy od rodzaju generatorów w tak przyjętym układzie. Wartość ta jest prawie jednakowa i zależy głównie od konfiguracji i parametrów elementów danego układu. Zawartość składowej przeciwnej w prądzie zwarciovy osiąga w obu przypadkach maksymalne wartości ok. 0,6.

Tabela-3.2.

Zestawienie maksymalnych wartości prądów generatora przy zwarciach na szynach III bloku

Rodzaj zwarcia	KRIOGENERATOR 1 GVA, $U_N = 27$ kV							GENERATOR KONW. 1 GVA, $U_N = 27$ kV						
	I_{p1}	I_{p2}	I_p	α	ϑ	i_u	ϑ_{max}	I_{p1}	I_{p2}	I_p	α	ϑ	i_u	ϑ_{max}
	kA	kA	kA	-	-	kA	-	kA	kA	kA	-	-	kA	-
1-fazowe	28,0	28,0	56,0	0,5	2,6	142,5	4,7	17,5	17,5	35,0	0,5	1,63	89,0	2,94
2-fazowe	42,5	42,5	73,6	0,57	3,4	187,4	6,12	24,6	24,6	42,5	0,58	2,0	108,2	3,58
2-fazowe z ziemią	56,4	28,6	74,9	0,38	3,5	190,8	6,3	34,0	15,3	43,5	0,35	2,03	111,0	3,66
3-fazowe	85,0	-	85,0	-	4	216,4	7,16	49,2	-	49,2	-	2,3	125,2	4,14
3-fazowe na zaciskach generatora	212,6	-	212,6	-	9,9	541,2	17,9	74,9	-	74,9	-	3,5	190,8	6,3

gdzie: I_{p1} - wartość skuteczna składowej zgodnej prądu początkowego generatora, I_{p2} - wartość skuteczna składowej przeciwnej prądu początkowego generatora, I_p - wartość skuteczna składowej okresowej prądu początkowego generatora, $\alpha = I_{p2}/I_p$ - zawartość składowej przeciwnej w prądzie I_p i_u - udarowy prąd zwarciový; $i_u = k_u \cdot \sqrt{2} \cdot I_p$, $k_u = f / R; X /$ obwodu - z braku danych za [25] przyjęto $k_u = 1,8$, $\vartheta = I_p / J_N$ $\vartheta_{max} = \vartheta \cdot k_u$

Reasumując stwierdza się, że zwarcie trójfazowe na zaciskach kriogeneratora, podobnie jak to ma miejsce w maszynach konwencjonalnych, jest najgroźniejszym zakłóceniem wywołującym bardzo silne naprężenia dynamiczne.

3.7. Problem utraty wzbudzenia kriogeneratora

Wstęp

Zagadnienie niedowzbudzenia /pracy asynchronicznej/ maszyn konwencjonalnych nabiera coraz to większej wagi ze wzrostem mocy tych jednostek. Duże reaktancje i względnie mała bezwładność mechaniczna z uwagi na stosunkowo niewielkie wymiary geometryczne dużych truboze-społów, są przyczyną gorszej stabilności pracy i większych przyspie-szeń w przypadku utraty synchronizmu. Należy zwrócić uwagę na fakt, że zakłócenia w obwodach wzbudzenia i regulacji napięcia stanowią znacz-ny procent zakłóceń w ogóle. Rola zabezpieczeń od niedowzbudzenia jest zatem bardzo istotna i na całym świecie są one zaliczane do grupy zabezpieczeń podstawowych. Szereg firm zachodnich, z uwagi na miejscowe przegrzania czołowej części wirnika, nie dopuszcza nawet do krótko-trwałej pracy asynchronicznej, zalecając bezzwłoczne wyłączenie maszy-ny przy utracie wzbudzenia. Tak więc utrata wzbudzenia w maszynach konwencjonalnych prowadzi zazwyczaj do odłączenia ich od systemu, co przy dużych mocach odłączanego generatora znacznie pogarsza warunki pracy systemu.

Powstaje pytanie, jakie skutki pociągnie za sobą utrata wzbu-dzenia kriogeneratora współpracującego z systemem w warunkach pracy znamionowej?

3.7.1. Utrata wzbudzenia w kriogeneratorze

Zagadnienie utraty wzbudzenia w maszynie z nadprzewodzącym uzwo-żeniem wzbudzenia o mocy 1 GVA przeanalizowano w oparciu o obliczenia numeryczne równań Parka-Goriewa /3,1/. W celu porównania, przeprowa-dzono takie same obliczenia dla maszyny konwencjonalnej. Symulację zaniku wzbudzenia przeprowadzono w dwóch wariantach.

3.7.1.1. Wariant 1-szy obliczeń

Analizę zaniku wzbudzenia maszyn przeprowadzono przy założeniach jak w p. 3.3.

Opis procesu symulacji

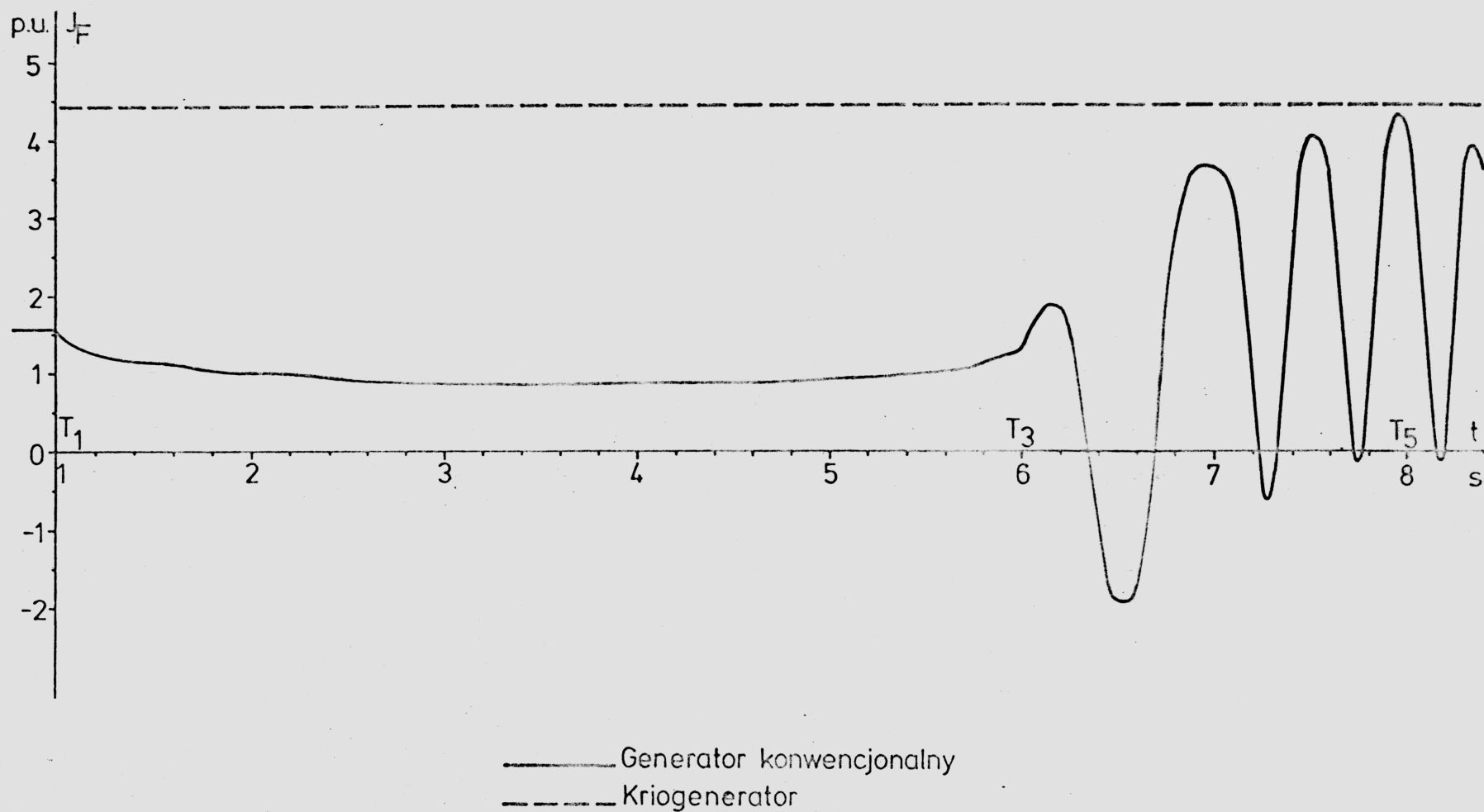
W warunkach pracy znamionowej maszyny $/U = 1 \text{ p.u.}, J = 1 \text{ p.u.}, \cos \varphi = \cos \varphi_N = 0,85/$ następuje utrata wzbudzenia w czasie $T_1 = 1 \text{ s}$ od chwili rozpoczęcia obliczeń. Podczas utraty wzbudzenia uzwojenie wzbudzenia zostaje zwarte $/R_F = R_{FN}/$. Okres niedowzbudzenia trwa do chwili $T_3 = 6 \text{ s}$, po czym napięcie wzbudzenia o wartości $U_F = 2 U_{FN}$ zostaje założone ponownie. W czasie $T_5 = 3 \text{ s}$ następuje skokowe zmniejszenie napięcia wzbudzenia do wartości $U_F = U_{FN}$. Obliczenia przeprowadzono przy stałej wartości momentu turbiny $m_t = 0,85 \text{ p.u.}$ Wartości parametrów obu maszyn, jak w p. 3.4.

3.7.1.1.1. Wyniki obliczeń na maszynie cyfrowej

Obliczenia stanów nieustalonych po utracie wzbudzenia przeprowadzono dla jednej wartości rezystancji w obwodzie wzbudzenia $R_F = R_{FN}$. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów na rys. 3.15 - 3.18.

Stan nieustalony po utracie wzbudzenia maszyny 1 GVA można podzielić na dwa etapy:

Etap I-szy w odniesieniu do maszyny konwencjonalnej charakteryzuje stopniowym zwiększaniem się kąta obciążenia /rys. 3.17./, wzrostem prądu stojana /rys. 3.16./ i poślizgu /rys. 3.18./ oraz zmniejszaniem się prądu wzbudzenia /rys. 3.15./. Umownie przyjęto, że etap ten trwa od momentu utraty wzbudzenia do momentu wzrostu poślizgu do pierwszej wartości maksymalnej $s_{\max} = 3,6 \cdot 10^{-2}$, co odpowiada czasowi $t = 6,32 \text{ s}$. W przypadku kriogeneratora charakterystyczne zmiany wielkości występują w tak małym stopniu, że etap I-szy można uznać za kontynuację stanu pracy ustalonej. Zmiana poślizgu kriogeneratora w tym czasie jest bardzo mała i wynosi ok. 10^{-6} . O ile zmiany prądu wzbudzenia generatora konwencjonalnego są znaczne, to w kriogeneratorze wartość tego

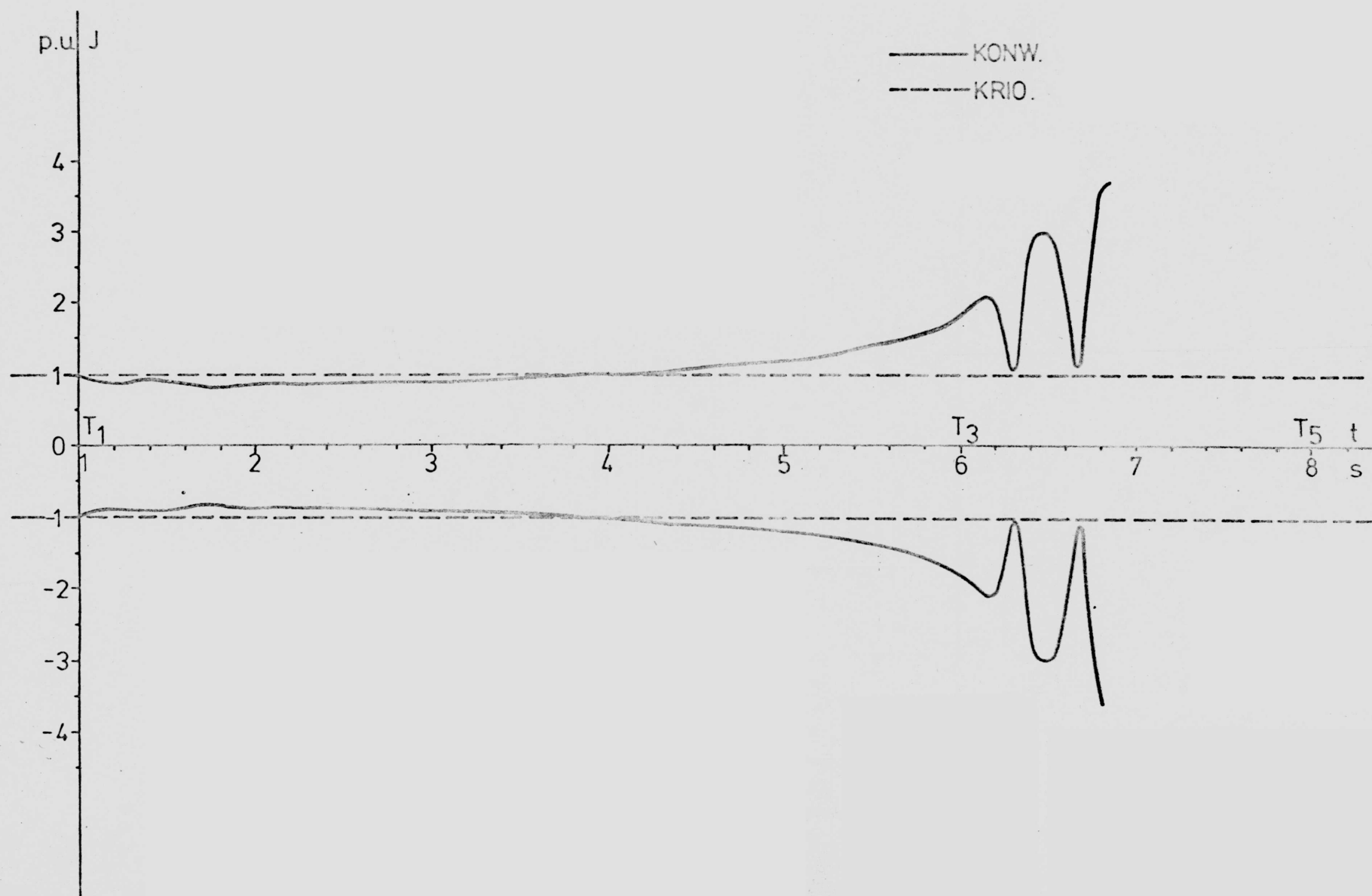


Rys.3.15. Wykres prądu wzbudzenia w funkcji czasu [wariant 1].

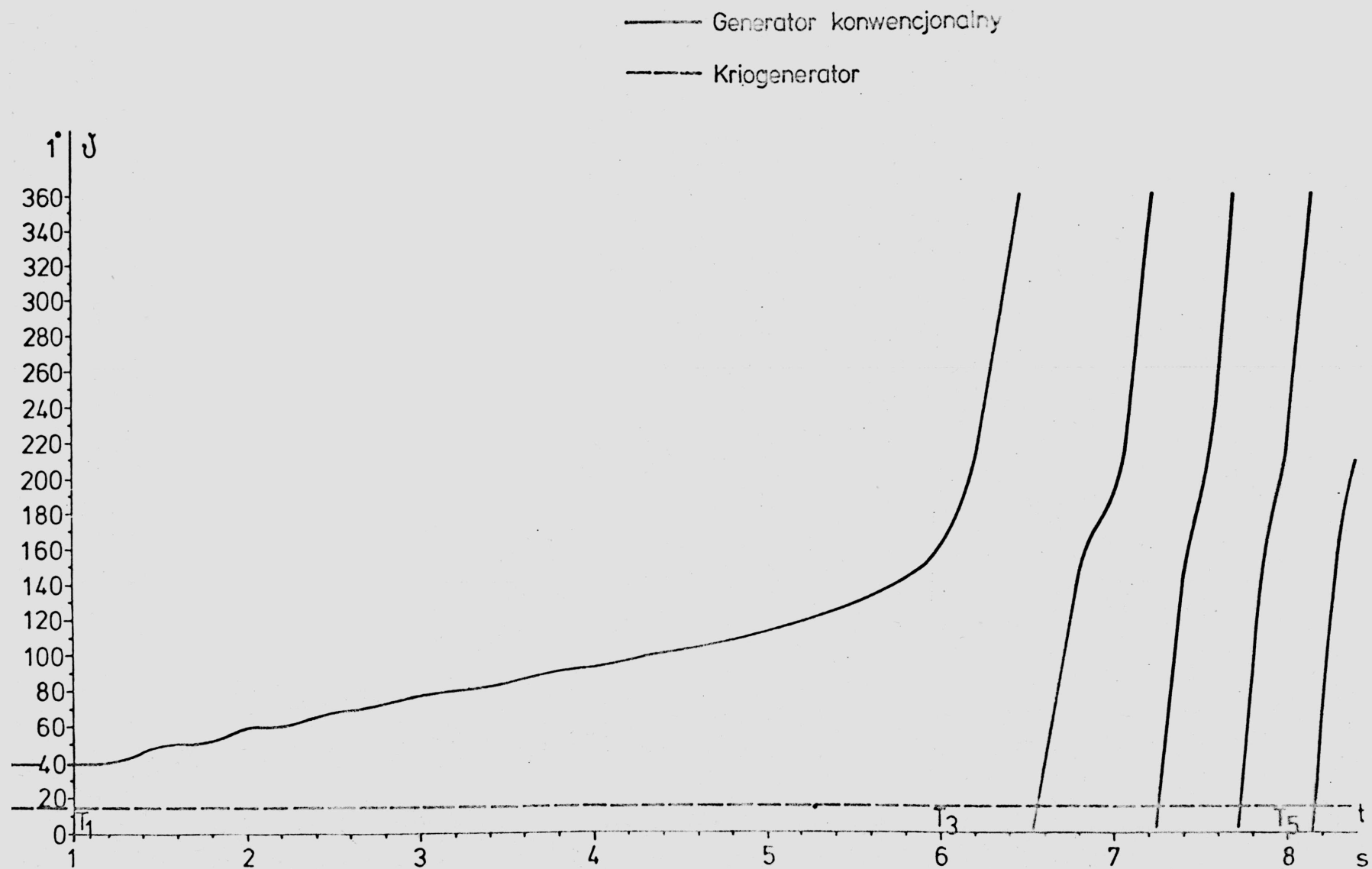
$T_1 = 1$ s - zanik wzbudzenia

$T_3 = 6$ s - załączenie napięcia wzbudzenia $U_F = U_{FN}$

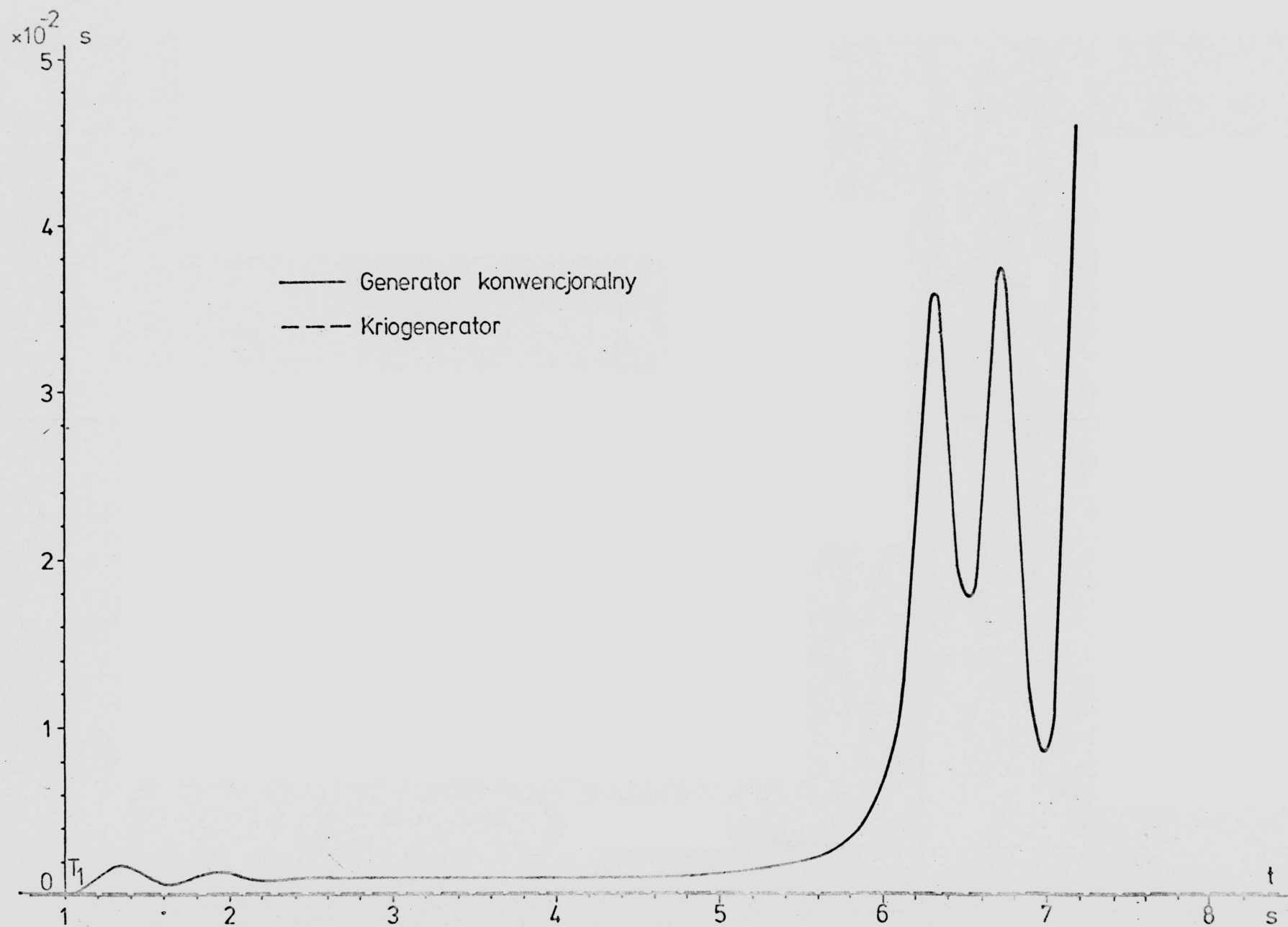
$T_5 = 8$ s - zmniejszenie napięcia wzbudzenia do wartości $U_F = U_{FN}$



Rys.3.16. Przebieg prądu stojana $J=f(t)$ [wariant 1]



Rys.3.17. Przebieg kąta obciążenia maszyn $\vartheta = f(t)$, wariant 1.



Rys.3.18. Wykres zmian poślizgu $s=f(t)$, wariant 1.

prądu zmalała tylko o 0,04 p.u. od wartości znamionowej, odpowiadającej ok. 4,44 p.u. Od momentu utraty wzbudzenia do końca I-go etapu kąt wirnika zwiększył się od wartości $\vartheta_N = 38^\circ$ do wartości ok. 260° , podczas gdy w kriogeneratorze również i ta wielkość wzrosła bardzo nieznacznie /odpowiednio od $\vartheta_N = 14,94^\circ$ do $\vartheta = 15,06^\circ$ /.

Prąd stojana maszyny konwencjonalnej ma w początkowym okresie tendencję malejącą do wartości ok. $0,8 J_N$, później zaś wzrasta i pod koniec I-go etapu osiąga wartość ok. $2,1 J_N$. Odnosnie do maszyny kriogenicznej, to prąd stojana w rozpatrywanym przedziale czasu zmniejszył się o ok. $0,02 J_N$.

Etap II-gi w odniesieniu do maszyny konwencjonalnej cechują zjawiska charakterystyczne dla procesu wypadania generatora z synchronizmu. Nieodpowiednia chwila załączenia napięcia wzbudzenia po jego zaniku powoduje, że w II-gim etapie wirnik generatora konwencjonalnego zaczyna systematycznie przyspieszać. W prądzie wzbudzenia pojawia się wtedy składowa przemienna wzniesana wzrastającą częstotliwością poślizgu a jej maksymalna wartość wynosi ok. 4,3 p.u. Prąd stojana zmodulowany częstotliwością poślizgu w analizowanym przedziale czasu /10 s/ osiąga maksymalne wartości rzędu $4,7 J_N$. Załączenie wzbudzenia po 5 s zaniku nie doprowadziło do resynchronizacji maszyny konwencjonalnej, a przeciwnie, spowodowało wypadnięcie jej z synchronizmu. W przypadku kriogeneratora, analizowane przebiegi podobnie jak w I-szym etapie wykazują bardzo małe zmiany. W tabeli 3.3. zestawiono najważniejsze wielkości kriogeneratora w stanie pracy ustalonej / $t < T_1 = 1$ s/; w chwili załączenia wzbudzenia / $t = T_3 = 6$ s/, oraz w czasie $t = 10$ s na którym zakończono obliczenia.

Tabela 3.3.

Wielkość	Jednostki	Stan ustalony	Załączenie wzbudzenia	$t = 10$ s
Prąd wzbudz. J_F	p.u.	4,44	4,40	4,42
Prąd stojana J	p.u.	0,99	ok. 0,97	0,98
Kąt obciążenia ϑ	$^\circ$	14,94	15,06	15,01
Poślizg s	-	$< 10^{-6}$	10^{-6}	$< 10^{-6}$

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość pracy kriogeneratora nawet przy zaniku wzbudzenia. Taki stan odpowiada warunkom pracy z tzw. "zamrożonym strumieniem" i jest odmianą pracy ustalonej kriogeneratora.

3.7.1.2. Wariant 2-gi obliczeń

Analizuje się problem utraty wzbudzenia kriogeneratora 1 GVA zasilającego, poprzez transformator blokowy i linię, sieć sztywną /rys. 3.14./. Reaktancja zastępcza transformatora, linii i systemu wynosi $X_E = 0,4$ p.u. O ile w obliczeniach wariantu 1 przyjęto moment turbiny stały i równy znamionowemu, to w wariancie 2 uwzględniono charakterystyki statyczne turbiny, zakładając, że statyzm wynosi 4 %. Pozostałe założenia przyjęto jak w wariancie 1.

Opis procesu symulacji

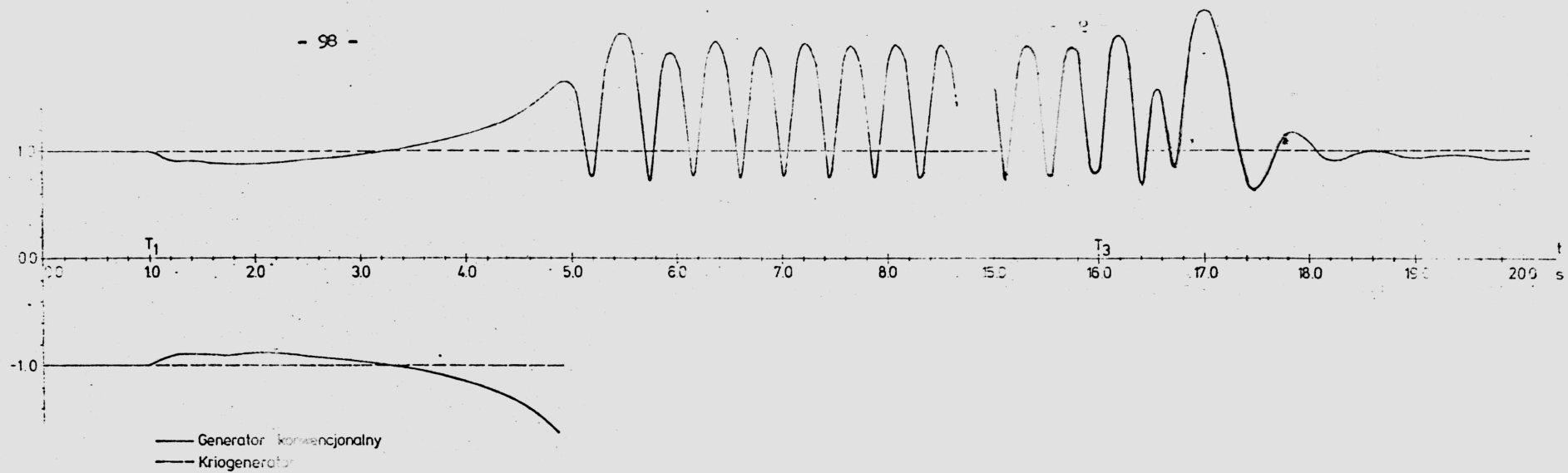
Podobnie jak w wariancie 1, utrata wzbudzenia następowała w czasie $T_1 = 1$ s. Po 15 s zaniku wzbudzenia, w chwili $T_3 = 0,16$ s, załączano napięcie wzbudzenia o wartości znamionowej $U_F = U_{FN}$. Podczas zaniku wzbudzenia uzwojenie nadprzewodzące zwierano $R_F = R_{FN}$ /. Obliczenia, przeprowadzane dla obu analizowanych maszyn 1 GVA, kontynuowane były do chwili $t = 20$ s.

3.7.1.2.1. Wyniki obliczeń na maszynie cyfrowej

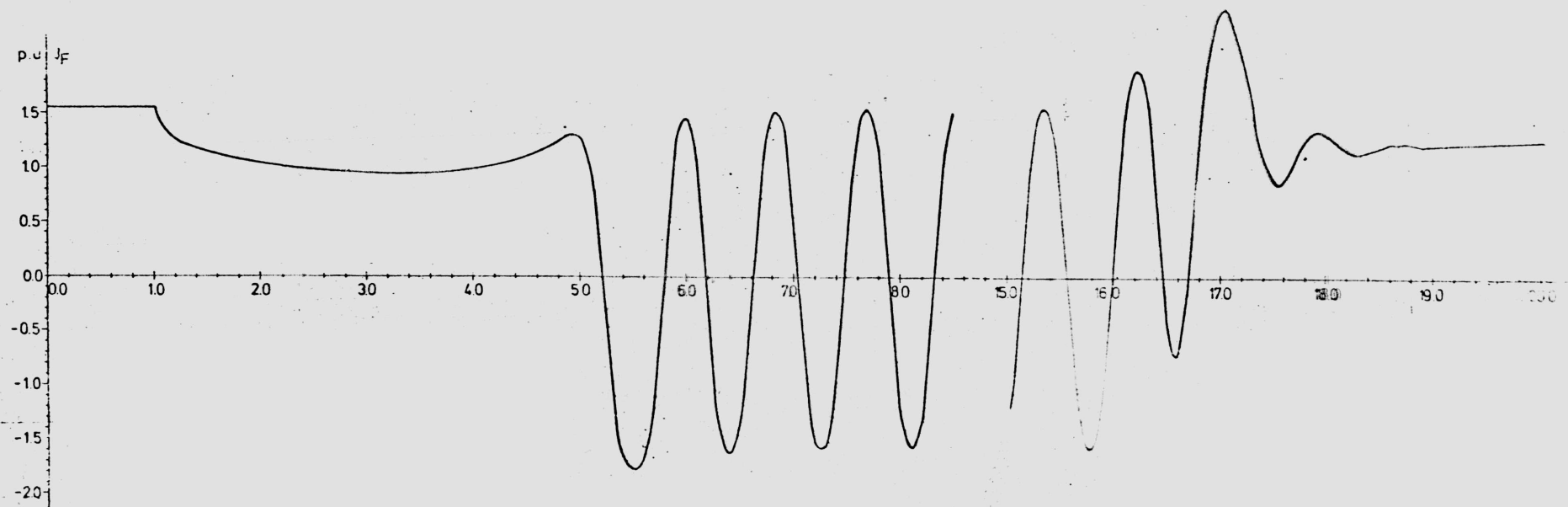
Obliczenia ważniejszych wielkości przedstawiono w postaci wykresów J_F , J , ψ , $s = f/t$ /rys. 3.19 - 3.22./. Stan nieustalony po utracie wzbudzenia w rozpatrywanej wersji obliczeń możemy podzielić na trzy etapy:

Etap I-szy - nie różni się charakterem zjawisk od etapu I-go wersji 1, jedynie trwa krócej /do ok. 5,2 s/.

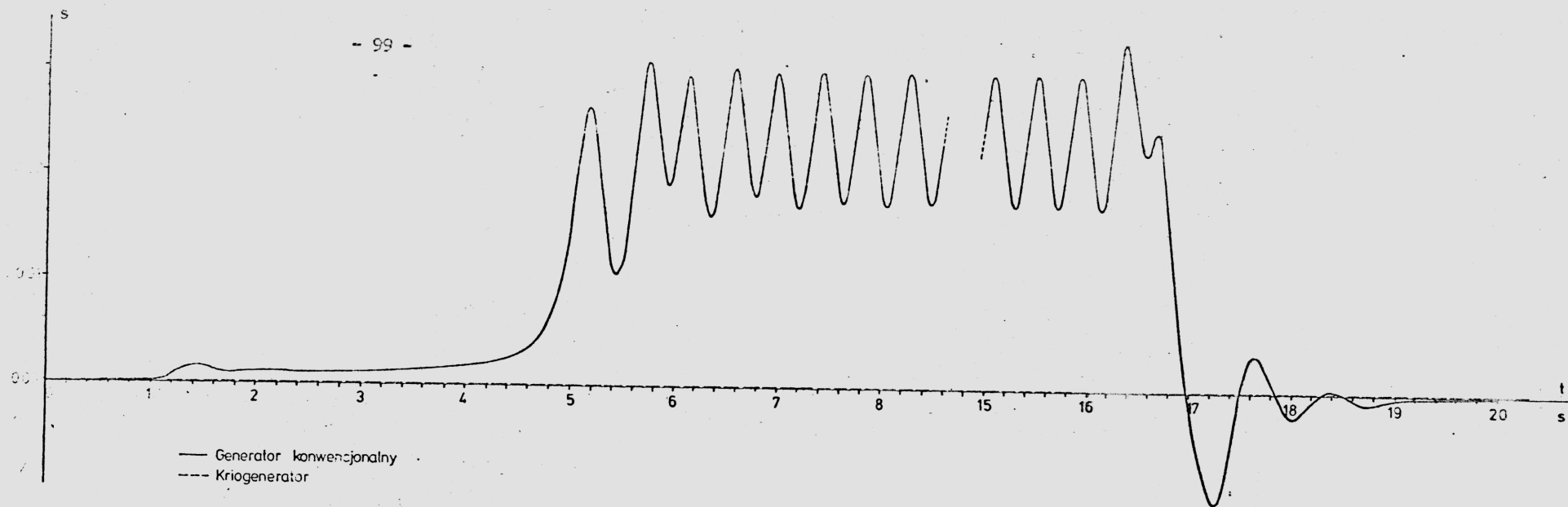
Etap II-gi - etap ustalonej pracy asynchronicznej maszyny konwencjonalnej. Podczas gdy przebiegi poszczególnych wielkości generatora konwencjonalnego mają charakter oscylacyjny wywołany pracą asynchroniczną maszyny, odpowiednie przebiegi kriogeneratora wskazują na



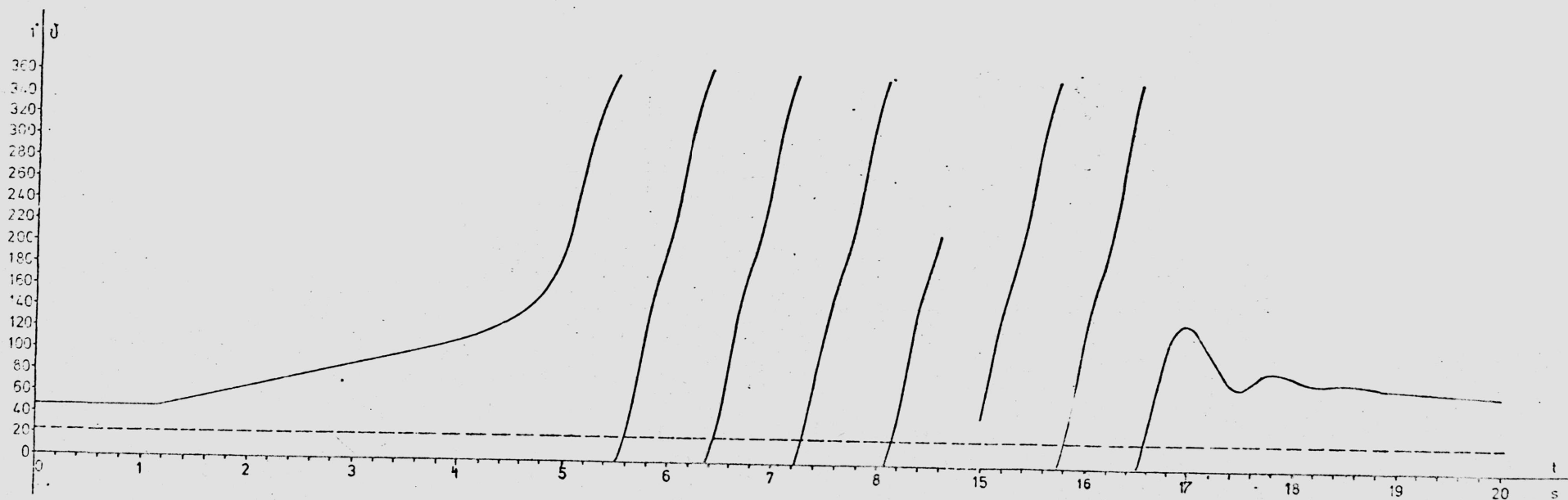
Rys.3.19. Obwiednie prądu stojana $J = f(t)$ podczas zaniku wzbudzenia (warant 2).



Rys.3.20. Przebieg prądu wzbudzenia $J_F = f(t)$ dla generatora konwencjonalnego (warant 2)



Rys.3.21 Przebieg poślizgu $s=f(t)$, (wariant 2)



Rys.3.22. Przebieg kąta obciążenia $\delta=f(t)$, (wariant 2).

to, że maszyna ta pozostaje nadal w stanie pracy ustalonej. Amplituda składowej przemiennej prądu w obwodzie wzbudzenia maszyny konwencjonalnej jest znaczna /ok. 1,6 p.u./, a zmiana znaku w czasie tego prądu może być przyczyną powstawania przebiegów w uzwojeniu wirnika. Prąd stojana maszyny konwencjonalnej przyjmuje również duże wartości /ok. 2 p.u./, podczas gdy prąd kriogeneratora nie ulega większym zmianom /tabela 3.4./

Etap III-ci - dotyczy końcowego okresu stanu nieustalonego generatora konwencjonalnego i umownie określono go od momentu ponownego podania wzbudzenia /w 16-tej sekundzie/, do chwili, gdy poślizg osiągnie po raz pierwszy wartość zero /17 s/. Jest to chwila resynchronizacji maszyny konwencjonalnej z systemem. Generator nadprzewodzący, podobnie jak w poprzednich etapach, nie wykazał większych zmian wartości rozpatrywanych przebiegów.

Tabela 3.4.

Kriogenerator 1 GVA

Wielkość	Jedn.	Zanik wzbudzenia $t=T_1=1s$	Załączenie wzbudzenia $t=T_3=16s$	Koniec obliczeń $t=20s$
J_F	p.u.	4,44	4,35	4,35
J	p.u.	0,99	0,97	0,97
ψ_s	°	22,81	23,29	23,28
s	-	ok. 10^{-6}	$2 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
U	p.u.	0,999	0,992	0,992

W tabeli 3.5. przedstawiono wybrane wielkości rozpatrywanego stanu nieustalonego maszyny konwencjonalnej 1 GVA.

Tabela 3.5.

Generator konwencjonalny

Wielkość	Stan ustalony	Etap I	Etap II	Etap III	Koniec obliczeń
czas t [s]	0 - 1 [s]	1,0-5,2 [s]	5,2-16,4 [s]	16,4-17 [s]	20 [s]
Poślizg s_{sr} /wart. średnia/	$5 \cdot 10^{-6}$	/5-26000/ $\times 10^{-6}$	/1,75 - 3/ $\times 10^{-2}$	/3,3 - 0/ $\times 10^{-2}$	-0,033 $\times 10^{-2}$
Prąd stojana J [p.u.]	0,99	0,99-0,75	0,75 min - 2,0 max	0,75-min 2,3 -max	0,92
Prąd wzbudz. J_p [p.u.]	1,55	1,55 - 0	-1,55 min +1,55 max	-0,7 min +2,46 max	1,25
Napięcie generatora U [p.u.]	0,99	0,99-0,68	0,62 min 0,84 max	0,62 min 0,83 max	0,92

Czas od momentu utraty wzbudzenia do momentu gdy kąt wirnika osiąga wartość graniczną $\pi/2 - t/\pi/2 = 2,14$ s .

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość współpracy kriogeneratora z systemem nawet po utracie wzbudzenia. Maszyna pracuje wówczas w stanie ustalonym, gdyż zmiany wielkości charakterystycznych są bardzo powolne. Możliwość pracy kriogeneratora z "zamrożonym strumieniem" jest cenną zaletą w eksploatacji maszyn bardzo dużej mocy, z uwagi na skutki, jakie pociąga utrata wzbudzenia maszyn konwencjonalnych, /kożysania prądów, napięć i mocy/ z wyłączeniem generatora włącznie.

C Z E Ś Ć 4

4.1. ZABEZPIECZENIA KRIOGENERATORA PRZED SKUTKAMI ZAKŁÓCEŃ

Kriogeneratory dużych mocy, jak dotychczas, nie wyszły ze stadium projektów, toteż nie istnieją przyczyny, które zmusiłyby wytwórców do opracowania układów zabezpieczających. Jednak przy obecnym tempie prac w tej dziedzinie, problem ten może okazać się palący już w ciągu najbliższych lat. Warto więc obecnie, w świetle otrzymanych wyników rozważań oraz danych literaturowych, zastanowić się nad możliwościami jego opracowania.

4.1.1. Zakłócenia w pracy kriogeneratora i możliwość ich wystąpienia

Celem poznania zagadnienia zabezpieczeń kriogeneratora istnieje m.in. potrzeba określenia zakłóceń w pracy maszyny i zjawisk im towarzyszących, przed których skutkami chcemy zabezpieczyć ten obiekt. Stany zakłóceniowe kriogeneratora nie różnią się w zasadzie od tych, które występują w konwencjonalnym wykonaniu maszyny. Istniejące różnice dotyczą głównie przebiegów zakłóceńowych /prądy zwarciove/, rozmiarów uszkodzeń /duża energia pola magnetycznego i duże moce zwarciove/ oraz potencjalnej możliwości wystąpienia danego rodzaju zakłócenia.

Zakłócenia możemy podzielić, podobnie jak w przypadku maszyny konwencjonalnej, następująco:

- 1/ zakłócenia w stojanie,
- 2/ zakłócenia w wirniku,
- 3/ zakłócenia zewnętrzne,
- 4/ zakłócenia w pracy urządzeń pomocniczych /w tym kriochłodziarek/.

Z racji odmienności budowy i wartości parametrów kriogeneratora, pojawiają się dodatkowe zakłócenia, które nie występują w maszynach konwencjonalnych. Większość zakłóceń, szczególnie dotyczących stojana, przebiega podobnie jak w maszynach konwencjonalnych. Zmieniona konstrukcja stojana /wykonanie bezżłobkowe/ oraz znaczne zwiększenie

jego napięcia znamionowego sprawia, że określenie prawdopodobieństwa wystąpienia zwarcia doziemnych jest trudne. Użycie włókien sztucznych nasyconych żywicą do konstrukcji nośnej uzwojenia stojana może w znacznej mierze ograniczyć możliwość wystąpienia tych zwarcia. Prawdopodobieństwo wystąpienia zwarcia zwojowych i międzyfazowych uzależnione jest przede wszystkim od rodzaju użytej izolacji. Nadmienić należy, że pracuje ona w trudnych warunkach. Przy braku żłobków, moment obciążenia maszyny jest przenoszony przez uzwojenie stojana, jego izolację i niemagnetyczną konstrukcję nośną. Biorąc pod uwagę dużą wartość momentów uderowych /ok. 10 p.u. przy zwarciu 3-faz. na zaciskach, trudno obecnie określić zmianę własności izolacyjnych w funkcji czasu. Jefferies i Gibbs [18] sugerują, że obecność masywnego cylindrycznego ekranu wirnika znacznie zwiększa wartość współczynnika $J_2^2 \cdot t$. Obliczenia oparte na całkowitym grzaniu się ekranu wykazały, że dla kriogeneratora 2 GVA wartość $J_2^2 \cdot t$ wynosi ok. 10.

Inaczej przedstawia się problem zakłóceń w wirniku. W stanie ustalonym, celem wymuszenia znamionowego prądu w obwodzie wzbudzenia kriogeneratora potrzebne jest napięcie kilku woltów. Wystąpienie zwarcia doziemnego nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia podczas takiego stanu pracy jest w zasadzie niemożliwe. Nawet w przypadku wystąpienia drugiego zwarcia z ziemią prąd wzbudzenia popłynie dalej uzwojeniem nadprzewodzącym. Prawdopodobieństwo wystąpienia zwarcia w obwodzie wzbudzenia kriogeneratora wzrasta podczas wszelkich zmian wartości prądu wzbudzenia, dla uzyskania których, z racji silnego tłumienia, wymagane są duże wartości napięcia. Istnieje wówczas możliwość utraty nadprzewodnictwa. Przejście uzwojenia wzbudzenia w stan normalnego przewodnictwa zaczyna się utratą nadprzewodnictwa małego odcinka tego uzwojenia, powodując wytworzenie się rezystancyjnej części uzwojenia. Wskutek towarzyszącej temu zmianie prądu wzbudzenia, na rezystancyjnym odcinku uzwojenia wyindukuje się duże napięcie $U_F = L \frac{di_F}{dt}$, które może doprowadzić do przebicia izolacji międzyzwojowej i spowodować zwarcie zwojowe. Towarzyszące wydzielanie znacznych ilości energii cieplnej w tej części uzwojenia może spowodować silne punktowe nagrzewanie izolacji, a co za tym idzie, powstanie dużych naprężeń mechanicznych układu izolacyjnego. Ograniczenie tych niekorzystnych zjawisk zależy

w głównej mierze od sposobu stabilizacji nadprzewodnika oraz od intensywności chłodzenia uzwojeń. Tak więc, wszelkie zwarcia w uzwojeniu wzbudzenia mogą być spowodowane przekroczeniem parametrów krytycznych nadprzewodnika. Towarzyszące stanom przejściowym kriogeneratora grzanie ekranu może spowodować jego eliptyczne odkształcenie. Z tej racji zaistnienie potrzeba ciągłej kontroli temperatury ekranu. Wystąpienie zakłóceń zewnętrznych w postaci różnego rodzaju zwarć w systemie przesyłowym, pociągnie za sobą podobne skutki, jak w przypadku generatora konwencjonalnego, pracującego w bloku. Jedyna różnica dotyczy stanów niesymetrycznych, które mogą stać się przyczyną utraty nadprzewodnictwa wskutek braku odpowiednich zabezpieczeń.

Mała zmienność napięcia kriogeneratora /p. 2.4./ sprawia, że wzrost napięcia stojana spowodowany odłączeniem maszyny do sieci jest mały. Możliwość przemagnesowania transformatora blokowego jest więc mniejsza niż w rozwiązaniach konwencjonalnych.

Innym rodzajem zakłóceń są awarie urządzeń pomocniczych kriobloku, głównie kriochłodziarek helowych. Niedostarczenie helu do kriostatu spowoduje systematyczny wzrost temperatury uzwojeń, aż do przejścia w stan normalnego przewodzenia. Takie zakłócenie wymaga odłączenia kriogeneratora od systemu /ze zwłoką zależną m.in. od pojemności cieplnej kriostatu/.

Należy stwierdzić, że większość zakłóceń w kriogeneratorze spowoduje zagrożenie utraty nadprzewodnictwa. W związku z tym, kontrola stanu nadprzewodnictwa i zabezpieczenia przed jego utratą stanowią jeden z głównych członów układu automatyki zakłóceńowej kriobloku.

4.1.2. Prądy zwarciovowe i ich skutki

Stosunek amplitudy prądu zwarciovowego do amplitudy znamionowego prądu kriogeneratora 1 GVA w przypadku zwarcia 3-faz na zaciskach wynosi ok. 18. Oznacza to, że przy wartościach $J_N = 21,4 \text{ kA}$ / $U_N = 27 \text{ kV}$ / amplituda prądu zwarciovowego wyniesie ok. 545 kA. Wyzwalana lokalnie energia jest bardzo duża. Także natężenie pola magnetycznego wokół szyn fazowych maszyny jest duże, co może mieć bezpośredni wpływ na wtórne uzwojenia przekładników prądowych, przewody, a być może także i na przekładniki napięciowe. Skutki te, tak ważne z punktu zapewnienia

prawidłowych warunków pracy układu automatyki zakłóceńowej, można i należy ograniczyć, budując kriogeneratory na wyższe napięcia niż 30 kV. Np. dwukrotne zwiększenie napięcia znamionowego /54 kV/ spowoduje dwukrotne zmniejszenie amplitudy prądu znamionowego i zwarciowego. Odpowiedni stosunek amplitud prądu zwarciowego i znamionowego generatora konwencjonalnego 1 GVA wynosi ok. 7, co przy wartości prądu $J_N = 21,4$ kA daje amplitudę prądu zwarciowego ok. 212 kA. Tak więc, przy znacznie większych wartościach napięcia znamionowego kriogeneratora natężenie prądów zwarciowych i związanych z tym skutków zwarcia podczas jego eksploatacji jest tego samego rzędu co w maszynach konwencjonalnych dużej mocy.

Bardzo ważną cechą o daleko sięgających następstwach i konsekwencjach, zarówno w odniesieniu do ogólnej koncepcji zabezpieczeń jak też do niektórych członów układu pierwotnego i wtórnego, jest stosunkowo długi czas trwania składowej nieokresowej prądu zwarciowego stojana. Podobnie jak w maszynach konwencjonalnych, może okazać się, że cały prąd zwarciowy zostanie przesunięty powyżej osi czasu, co w połączeniu ze znaczną jego wartością stanowi duży problem dla współczesnych-wyłączników. Ograniczenie skutków zwarcia w obrębie kriobloku zależy ponadto od konstrukcji kriostat - uzwojenie wzbudzenia, która powinna umożliwić szybkie odwzbudzenie kriogeneratora.

Układy zabezpieczeń działających przy zwarciach zewnętrznych nie różnią się w istotny sposób od rozwiązań obecnie stosowanych.

4.1.3. Ogólna koncepcja zabezpieczeń kriobloku w świetle rozwiązań konwencjonalnych

W sprawie generalnej koncepcji zabezpieczeń, gdy nie ma praktyki eksploatacyjnej kriogeneratorów, trudno w chwili obecnej dać konkretną odpowiedź. Układy zabezpieczeń turbiny, transformatora blokowego i transformatora potrzeb własnych, nie ulegną zmianie. Jedyne różnice będą dotyczyć nastawień. Pojawiają się zabezpieczenia kriochłodziarek. Odmienność konstrukcji wirnika i związana z tym odmienność zakłóceń, wymaga opracowania nowych zabezpieczeń o innych kryteriach działania. W tabeli 4.1. zamieszczono wykaz podstawowych przyczyn wywołujących działanie różnego rodzaju zabezpieczeń generatora konwencjonalnego

i kriogenicznego. Jak widać z tego zestawienia, pojawia się nowe, bardzo ważne zabezpieczenie od utraty nadprzewodnictwa. Pełni ono trudną funkcję zabezpieczenia nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia przed utratą nadprzewodnictwa /wysoka temperatura odcinka normalnie przewodzącego, szybkie odparowanie helu, wzrost ciśnienia w kriostacie, możliwość wybuchu/.

Tabela 4.1.

STOJAN	GENERATOR	1	2	3	4	5	6	UWAGI:
Podwójne zwarcie z ziemią /zab. różnic. wzdłuż./	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	
Zwarcie zwojowe /zab. róż. poprzeczne/	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	
Zwarcie z korpusem 1-faz. doziemne /zab. 95%-100%/	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	
Wzrost napięcia /zabezp. nadnapięciowe/	KONW.	•	•	•	•	•	•	ze zwłoka stosunkowo mały wzrost napięcia przy zrzucie obciążenia ok. 25 %
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	
Wzrost temp. uzwojeń /przeciążenie 1-szy stopień/	KONW.					•		
	KRIO.					•		
=====								
Wzrost temp. uzwojeń /przeciążenie 2-gi stopień/	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	
Wzrost temp. rdzenia	KONW.					•		
	KRIO.	nie dotyczy						brak części ferromagnetycznych
Wzrost prądu /przeciążenie/ /przekaznik nadprądowy/	KONW.					•		ze zwłoka
	KRIO.					•		ze zwłoka
Zwarcia m. fazowe	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	

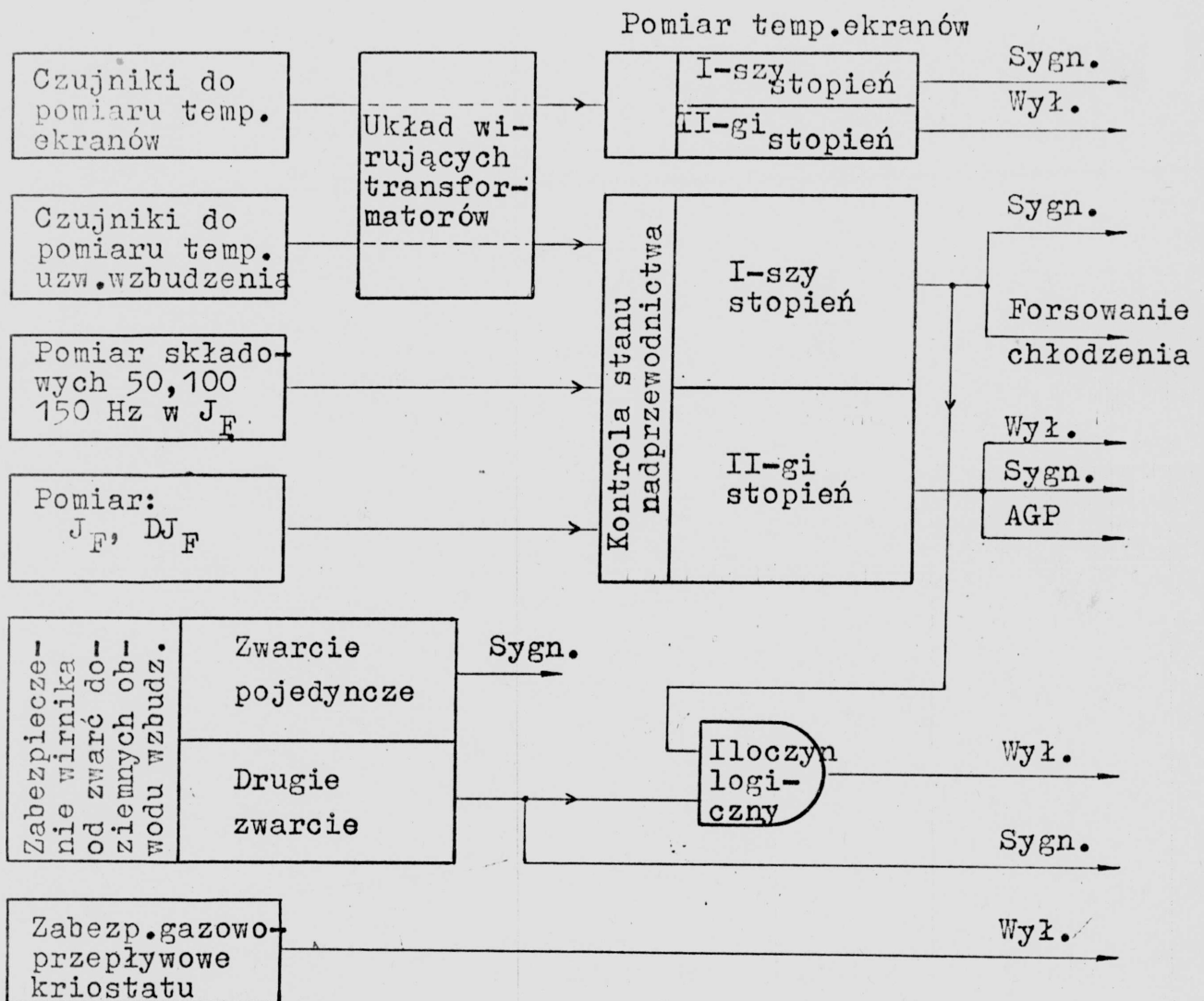
STOJAN	GENERATOR	1	2	3	4	5	6	UWAGI
Przeciek chłodziwa do izolacji	KONW.						•	
	KRIO.						•	
Wzrost temp. chłodziwa /czujniki/	KONW.						•	
	KRIO.						•	
WIRNIK								
Zwarcie 1-punktowe z ziemią	KONW.						•	
	KRIO.						•	
Zwarcie 2-punktowe z ziemią	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO						•	Jeśli nie działa zabezp. od utraty nadprzewodn.
		•	•	•	•	•	•	Jeśli działa zab. utraty nadprzewodnictwa
Niesymetria obciążenia $J_2^2 t = \text{const}$ 1-szy stopień	KONW.						•	Ze zwłoka
	KRIO.						•	Pomiar temp. ekranu Pomiar składowej 100 Hz w prądzie wzbudzenia
Niesymetria obciążenia $J_2^2 t = \text{const}$ 2-gi stopień	KONW.		•				•	
	KRIO.		•				•	Nie działa zab. utraty nadprzewodnictwa
		•	•	•	•	•	•	Działa zab. utraty nadprzewodnictwa
Temperatura uzwojeń 1-szy stopień	KONW.						•	Ze zwłoka
	KRIO.						•	Jedno z kryteriów działania zab. utraty nadprz.
Temperatura uzwojeń 2-gi stopień	KONW.	•	•	•	•	•	•	
	KRIO.							Pobudza zab. utraty nadprzewodnictwa
Utrata nadprzewodnictwa 1-szy stopień	KONW.	Nie dotyczy						
	KRIO.						•	Jeśli zagrożony stan nadprzewodnictwa
Utrata nadprzewodnictwa 2-gi stopień	KONW.	Nie dotyczy						
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	Pomiar wielkości krytycznych nadprzewodnika

WIRNIK	GENERATOR	1	2	3	4	5	6	UWAGI
Wzrost prądu	KONW.						•	Ze zwłoka Kontroluje zab. utraty nadprzewodnictwa
	KRIO.							
Temperatura ekranu 1-szy stopień	KONW.	Nie dotyczy						
	KRIO.						•	
Temperatura ekranu 2-gi stopień	KONW.	Nie dotyczy						/zabezpieczenia czujni- kowe/
	KRIO.		•				•	
Awaria kriocho- dziarek	KONW.	Nie dotyczy						Ze zwłoka
	KRIO.	•	•	•	•	•	•	
WSPÓŁPRACA Z SYSTEMEM								
Utrata wzbudzenia i praca asynchro- niczna	KONW.						•	Praca z "zamrożonym strumieniem"
	KRIO.						•	
Utrata synchro- nizmu	KONW.		•				•	Powiązanie z regulatorem napięcia Po-wiązanie z regulato- rem napięcia
	KRIO.		•				•	
Zwarcie z ziemią dołączenia do szyn strony najwyższego napięcia	KONW.		•				•	
	KRIO.		•				•	

Legenda:

- 1 - ZBT - Zawór bezpieczeństwa turbiny.
- 2 - GWM - Główny wyłącznik mocy.
- 3 - AGP - Samoczynne gaszenie pola.
- 4 - PWM - Wyłącznik mocy źródła zasilania potrzeb własnych.
- 5 - SZR - Samoczynne załączanie rezerwowego zasilania.
- 6 - SYG - Sygnalizacja optyczna i akustyczna.

Kryterium zadziałania tego zabezpieczenia jest przekroczenie wartości krytycznej temperatury, prądu /ewentualnie natężenia pola magnetycznego/. Dodatkowym kryterium jest pomiar składowej periodycznej 50, 100 i 150 Hz w prądzie wzbudzenia. Proponowaną koncepcją zabezpieczenia wirnika kriogeneratora przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Koncepcja zabezpieczenia wirnika kriogeneratora

W celu przesłania informacji o temperaturze ekranów i nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia zastosowano układ wirujących transformatorów wykorzystując zjawisko sprzężenia magnetycznego. Badania przeprowadzone w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej [7] i [34], przy współudziale autora, wykazały całkowitą przydatność układu wirujących transformatorów do pomiaru temperatury wirników maszyn elektrycznych. W zależności od temperatury ekranów /"zimne" lub "gorące"/ istnieje możliwość zastosowania czujników pozystorowych lub diód półprzewodnikowych, jako elementów mierzących temperaturę. Zabezpieczenie gazowo-przepływowe, będące odmianą takiego zabezpieczenia transformatorów, chroni kriostat przed skutkami utraty nadprzewodnictwa uzwojenia wzbudzenia. Dwustopniowy układ kontroli stanu nadprzewodnictwa powoduje forsowanie chłodzenia w przypadku zagrożenia nadprzewodnictwa /I-szy stopień/, lub wyłączenie kriobloku w przypadku utraty nadprzewodnictwa /II-gi stopień/. Układ ten w połączeniu z zabezpieczeniem termicznym ekranów chroni wirnik kriogeneratora przed skutkami stanów niesymetrycznych. Cechą charakterystyczną jest brak zabezpieczeń od niedowzbudzenia. Przeprowadzone obliczenia wykazały bowiem możliwość pracy kriogeneratora po utracie wzbudzenia. Mała wartość mocy traconej w obwodzie wzbudzenia kriogeneratora stwarza realną możliwość awaryjnego zasilania prądem wzbudzenia z odpowiedniej baterii akumulatorów. Do zabezpieczenia kriobloku przed skutkami zwarcia, głównymi czynnikami decydującymi o rozmiarze uszkodzeń będą: układ automatycznego gaszenia pola /AGP/, szybkie wyłączniki i zabezpieczenia. Techniczna realizacja nowych układów zabezpieczeń wirnika kriogeneratora nie przedstawia w chwili obecnej większych trudności.

4.2. Odwzbudzenie

Gaszenie pola magnetycznego kriogeneratora jest decydującym końcowym etapem działania zabezpieczeń. Odmienność budowy wirnika kriomaszyny rzutuje na problemy związane z odwzbudzaniem. Znaczna ilość energii cieplnej wydzielanej w kriogenicznym środowisku kriostatu i ekranie podczas tego procesu utrudnia problem automatycznego gaszenia pola. Określenie możliwości bezawaryjnego wchłonięcia pow-

stałych strat wiąże się w głównej mierze ze znajomością parametrów układu schładzania wirnika kriogeneratora, oraz jego konstrukcji. Jedną z przyczyn powstawania strat cieplnych w kriostacie, są zmiany wartości prądu wzbudzenia. Wprowadzając pojęcie krytycznej prędkości zmian prądu wzbudzenia $\frac{d}{dt} /i_F/_{max}$, eliminuje się z rozważań konieczność cieplnej analizy zjawisk towarzyszących zmianom prądu nadprzewodnika. Za krytyczną wartość $\frac{d}{dt} /i_F/_{max} = D i_F_{max}$ uważa się tę prędkość zmian prądu wzbudzenia kriogeneratora, przy której nadprzewodzące uzwojenie wzbudzenia przechodzi w stan normalnego przewodnictwa. Zbyt szybkie wytracenie energii magnetycznej podczas odwzbudzenia może spowodować wybuchowe odparowanie helu i rozerwanie kriostatu. Dla przykładu, energia magnetyczna niedużego selenoidu o indukcyjności $L = 10 \text{ H}$, przez który przepływa prąd o natężeniu 30 A wynosi $4,5 \text{ kJ}$. Taka ilość energii cieplnej wystarcza do odparowania $1,7 \text{ l}$ ciekłego helu [9]. Jeśli zamiana energii magnetycznej w ciepłą zachodzi w krótkim czasie, to powstała ilość ok. 1200 l helu gazowego nie zdąży opuścić kriostatu i może spowodować jego zniszczenie. Biorąc pod uwagę znacznie większe wartości energii magnetycznej dużych kriogeneratorów /rzędu MJ/, ilość gazowego helu, który może powstać w stanach awaryjnych będzie duża. W związku z powyższym, do zabezpieczenia kriostatu, należy się liczyć z koniecznością zainstalowania w nim zabezpieczenia gazowo-przepływowego helu.

Dla danej wartości $D i_F_{max}$, oraz przy założeniu, że odwzbudzenie następuje z biegu jałowego od wartości początkowej prądu $J_{Fo} = J_{FN}$, możemy wyznaczyć wartość krytycznej stałej czasowej τ_k obwodu wzbudzenia kriogeneratora:

$$\tau_k = \frac{J_{FN}}{D i_F_{max}} . \quad /4.1./$$

Przebieg prądu wzbudzenia podczas odwzbudzania z biegu jałowego ujmuje ogólna zależność 4.2.:

$$i_F = J_{FN} \cdot \exp \left/ - \frac{t}{\tau} \right/ . \quad /4.2./$$

Czas, po którym prąd wzbudzenia zmniejszy się do wartości i_F wynosi:

$$t \approx \tau \cdot \ln \frac{J_{FN}}{i_F} . \quad /4.3./$$

W zależności 4.3. wynika ograniczenie na czas odwzbudzenia, nakładane przez krytyczną wartość stałej czasowej τ_k . Wzory 4.1.-4.3. ujmują uproszczone zależności charakterystyczne dla odwzbudzania stosowanego w maszynach konwencjonalnych z użyciem oporu gaszącego. Możliwość skrócenia czasu zaniku prądu wzbudzenia daje metoda krótkotrwałego przyłączenia uzwojenia wzbudzenia do źródła napięcia o przeciwnej biegunowości. W początkowym okresie tego procesu prąd wzbudzenia maleje w przybliżeniu liniowo $/D i_F \approx \text{const}/$. Przy takim założeniu, czas potrzebny do zmniejszenia prądu od wartości J_{FN} do wartości i_F przy zachowaniu warunku $D i_F \leq /D i_F/_{\max}$ wynosi:

$$t \approx \frac{J_{FN} - i_F}{/D i_F/_{\max}} . \quad /4.4./$$

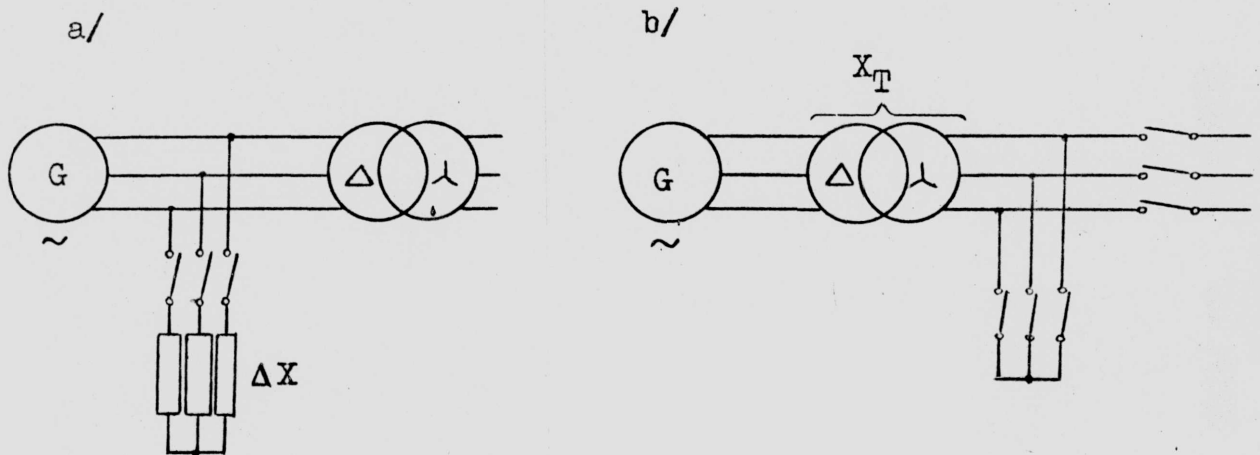
Badania doświadczalne przeprowadzone na maszynie synchronicznej 10 kVA z nadprzewodzącym uzwojeniem wzbudzenia w Politechnice w Jlménau /NRD/ wykazały, że wartość krytyczna dla tej konstrukcji wynosi ok. $486 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ /według [33] /. Biorąc pod uwagę znaczne wartości prądu wzbudzenia dużych maszyn kriogenicznych, może okazać się, że przy wartości $/D i_F/_{\max} \approx 0,5 \text{ kA} \cdot \text{s}^{-1}$, czas potrzebny do zmniejszenia prądu wzbudzenia od wartości J_{FN} do zera wyniesie kilkanaście sekund. Z racji tłumiącego oddziaływania ekranu, napięcie na zaciskach zanika w czasie dłuższym, od czasu zaniku prądu wzbudzenia. W związku z tym, przyjmując za koniec procesu odwzbudzania chwilę, gdy napięcia na zaciskach osiągnie wartość ok. $0,1 U_N$, czas odwzbudzania kriogeneratora przy zachowaniu nadprzewodnictwa, wyniesie również co najmniej kilkanaście sekund.

Podczas wystąpienia zwarcia w obrębie bloku wymaga się szybkiego odwzbudzenia /ok. 3 s/. Zastosowanie metod konwencjonalnych w przypadku kriogeneratora będzie możliwe pod warunkiem zbudowania układu

kriostat - uzwojenie nadprzewodzące, który zapewni osiągnięcie $/Di_{F_{\max}}/$ rzędu ok. $2 \text{ kA} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2.1. Analiza możliwości zastosowania zwieraczy dla skrócenia czasu AGP kriogeneratora

Metoda polega na wywołaniu 3-fazowego zwarcia na zaciskach maszyny. Po odłączeniu kriobloku od systemu, napięcie na zaciskach wzrasta do wartości $U_{sz} \approx /1 + X_d'/ U_N$, tj. ok. $1,25 U_N$. Maszyna zostaje zwarta przez reaktancję ograniczającą ΔX , którą w ogólnym przypadku może reprezentować transformator blokowy /rys. 4.2b./.



Rys. 4.2. Schematy gaszenia pola przy użyciu zwieraczy

Wskutek tego, napięcie na zaciskach szybko zmniejsza się do wartości uwarunkowanej reaktancją ΔX , powodując szybsze zgaśnięcie łuku.

Równanie opisujące przebieg amplitudy napięcia na zaciskach generatora w czasie gaszenia pola tą metodą ma następującą postać: /wg [38]/

$$u = \Delta X \left[\frac{U_{sz}}{X_d'' + \Delta X} - \frac{U_{sz}}{X_d' + \Delta X} \exp \left/ - \frac{t}{T''} \right/ + \frac{U_{sz}}{X_d' + \Delta X} - J_0 \exp \left/ - \frac{t}{T} \right/ + J_0 \right] .$$

/4.5./

gdzie:

U_{sz} - napięcie na zaciskach kriogeneratora przed załączeniem zwarcia. W dalszej części zakłada się, że $U_{sz} = /1 + X_d' / U$

T' - stała czasowa przebiegu składowej przejściowej prądu płynącego w uzwojeniu stojana:

$$T' = T_{do}' \cdot \frac{X_d' + \Delta X}{X_d' + \Delta X},$$

T'' - stała czasowa przebiegu składowej podprzejściowej prądu stojana

$$T'' = T_{do}'' \cdot \frac{X_d'' + \Delta X}{X_d' + \Delta X},$$

J_o - wartość prądu ustalonego płynącego w uzwojeniach stojana wskutek napięcia indukowanego przez pole magnetyczne szczątkowe wirnika. W dalszych rozważaniach wielkość tę pomija się z uwagi na bardzo małą wartość pola szczątkowego /brak żelaza na drodze strumienia głównego/.

Ogólną postać zmian prądu wzbudzenia i_F od chwili załączenia zwieraczy określa zal. 4.6.:

$$i_F = J_{Fo} \left[\left/ 1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d + \Delta X} \right/ \exp \left/ - \frac{t}{T'} \right/ - \frac{X_d - X_d'}{X_d' + \Delta X} \left\{ \left/ 1 - \lambda \right/ \exp \left/ - \frac{t}{T''} \right/ + \right. \right. \\ \left. \left. + \lambda \cdot \exp \left/ - \frac{t}{T_{ax}} \right/ \cos \omega t \right\} \right], \quad /4.6./$$

gdzie:

J_{Fo} - wartość początkowa prądu wzbudzenia,

T_{ax} - stała czasowa zaniku składowej aperiodycznej prądu płynącego w uzwojeniach stojana:

$$T_{ax} = T_a \cdot \frac{X_d' + \Delta X}{X_d'},$$

$$\lambda = \frac{X_d' + \Delta X / X_d'' - X_{11}}{X_d'' + \Delta X / X_d' - X_{11}}.$$

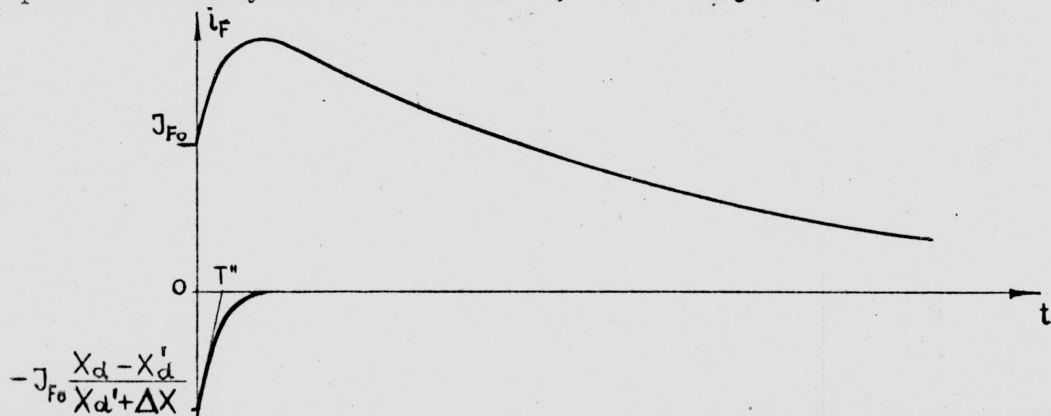
Przy założeniu, że $X_{11} \approx X_d''$, współczynnik λ dąży do zera. Świadczy to o małym poziomie składowej periodycznej w prądzie wzbudzenia kriogeneratora /zal. 4.6./, co jest zgodne z wymaganiami nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia. Dlatego też pominięcie składowej okresowej w tych rozważaniach jest dopuszczalne. Przy założeniu że $\lambda \approx 0$, otrzymujemy zależność 4.7.:

$$i_F = J_{Fo} \left[1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d' + \Delta X} \exp \left/ -\frac{t}{T'} \right/ - \frac{X_d - X_d'}{X_d' + \Delta X} \exp \left/ -\frac{t}{T''} \right/ \right]. \quad /4.7./$$

W wyrażeniu 4.5. możemy pominąć człon tłumiony ze stałą czasową T'' ponieważ $T'' \ll T'$. W kriogeneratorach różnica pomiędzy tymi wielkościami wynosi kilka rzędów. W związku z powyższym zależność /4.5./ przyjmuje postać /4.8./:

$$u \approx \frac{X/1 + X_d' / U_N}{X_d' + \Delta X} \exp \left/ -\frac{t}{T'} \right/. \quad /4.8./$$

Odnosnie do wyrażenia 4.7. określającego prąd uzwojenia wzbudzenia, to z uwagi na zachowanie ciągłości prądu, nie można pominąć członu tłumionego ze stałą T'' . Jednakże, uwzględniając krytyczną prędkość zmian natężenia prądu, należy przeanalizować przebieg prądu wzbudzenia przy tym ograniczeniu. Ogólny charakter przebiegu prądu wzbudzenia podczas załączenia zwieraczy ilustruje rys. 4.3.



Rys. 4.3. Charakterystyka $i_F = f(t)$ po załączeniu zwieraczy

W pierwszym okresie zwarcia daje się zauważyć znaczny wzrost prądu w stosunkowo krótkim czasie /ok. 3T"/. Fakt ten nie powinien pociągnąć za sobą utraty nadprzewodnictwa, nawet w przypadku krótkotrwałego przekroczenia wartości $/D i_F/_{\max}$, gdyż system chłodzenia kriostatu musi cechować zdolność odprowadzenia krótkotrwałego nadmiaru wydzielającego się ciepła. Dlatego w analizie zaniedbuje się procesy podprzejsściowe przyjmując, że w chwili $t = 0$ wartość prądu wzbudzenia wynosi:

$$i_F(t=0) = /1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d' + \Delta X}/ J_{Fo}.$$

Nakładając warunek $/D i_F/_{\max}$, otrzymujemy krytyczną wartość stałej czasowej τ_{kz} zaniku prądu wzbudzenia po załączeniu zwieraczy:

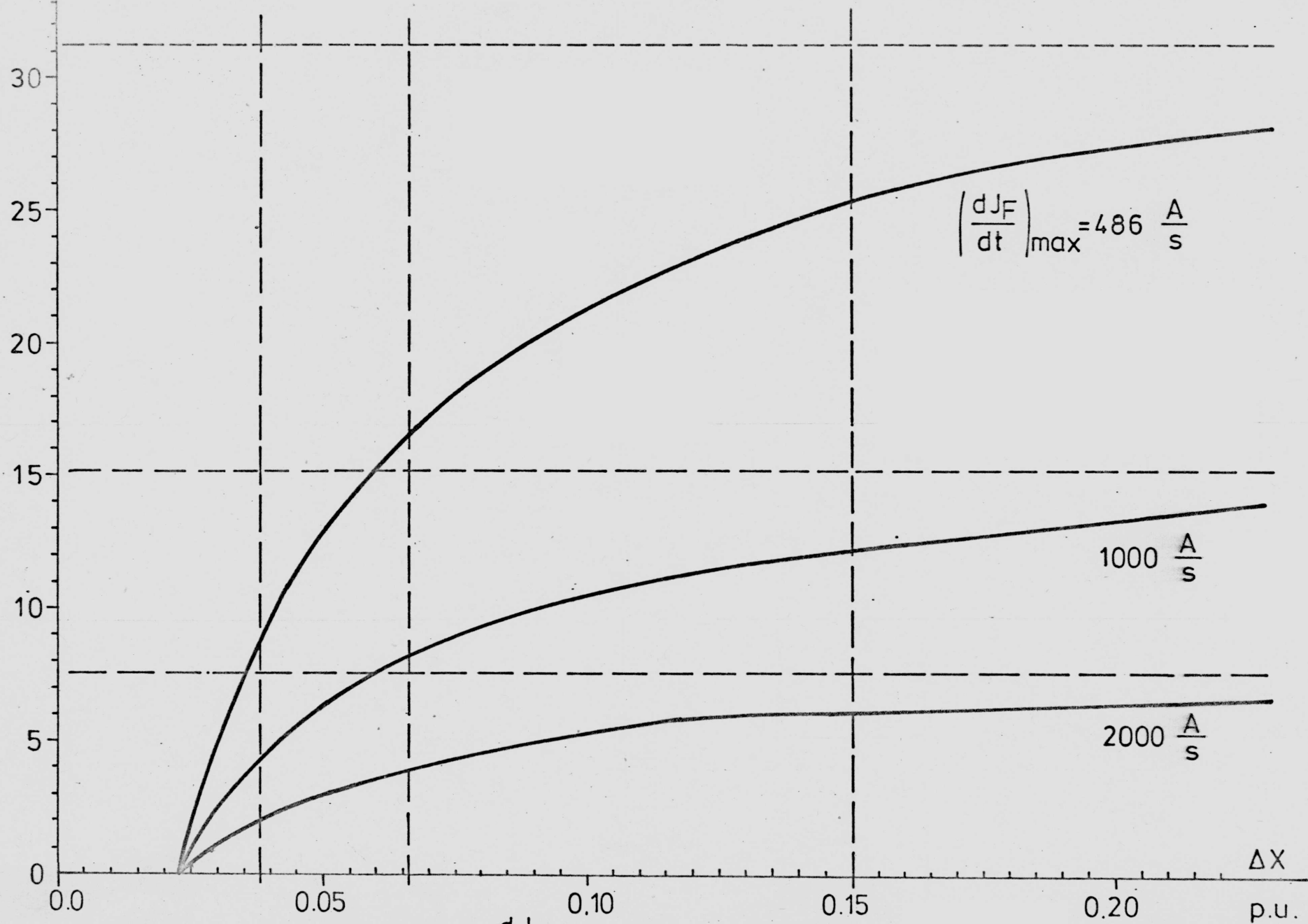
$$\tau_{kz} \approx \frac{/1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d' + \Delta X}/ \cdot J_{Fo}}{/D i_F/_{\max}}. \quad /4.9./$$

Dla zachowania równowagi termicznej kriostatu, stała czasowa T' musi spełniać warunek $T' > \tau_{kz}$, przy czym w celu uzyskania krótkiego czasu odwzbudzenia, stała T' powinna być bliska wartości τ_{kz} . Opisany układ musi współdziałać z układem odwzbudzania metodą klasyczną. Po przekształceniu zależności 4.8. i uwzględnieniu granicznego warunku $T' = \tau_{kz}$ otrzymujemy czas gaszenia pola tą metodą:

$$t_g \approx \frac{/1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d' + \Delta X}/ \cdot J_{Fo}}{/D i_F/_{\max}} \cdot \ln \frac{U_N /1 + X_d' / \Delta X}{U_k /X_d' + \Delta X/}, \quad /4.10./$$

gdzie: ..

U_k - wartość napięcia przy której gaśnie łuk przyjmowana zwykle jako $0,1 U_N$.



Rys.4.4. Zależność $t_g = f\left[\left(\frac{dJ_F}{dt}\right)_{\max}; \Delta X\right]$.

W celu zobrazowania problemu wyliczono i wykreślono charakterystyki $t_g = f/\Delta X$ /rys. 4.4./ dla trzech różnych założonych wartości $/D i_F/_{max}$: 486, 1000 i 2000 A·s⁻¹, na przykładzie kriogeneratora 1 GVA. Pozostałe dane wyjściowe przyjęto następująco: $U_N = 1$ p.u., $U_k = 0,1 U_N$, $J_{Fo} = J_{FN} = 6$ kA. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4.4.

Znaczne skrócenie czasu gaszenia pola zachodzi przy wartościach reaktancji ograniczającej ΔX mniejszych od reaktancji transformatora blokowego. W związku z tym, istnieje potrzeba zainstalowania dławików ograniczających, jak to pokazano na rys. 4.2a. Jak widać z rys. 4.4., dla jednakowej wartości reaktancji ΔX , największe względne skrócenie czasu gaszenia pola tą metodą zachodzi dla małych wartości $/D i_F/_{max}$. Dlatego, o ile osiągnięcie $/D i_F/_{max}$ rzędu 2 kA·s⁻¹ /p.4.2./ okazałoby się niemożliwe, należy się liczyć z możliwością zastosowania zwieraczy. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za - czy przeciw - stosowaniu zwieraczy będą względy wytrzymałościowe /zwarcie trójfazowe/ i ekonomiczne.

Podsumowując, formułują się następujące wnioski:

- a/ do szczegółowego opracowania konkretnych układów zabezpieczeń kriobloku konieczna jest znajomość znacznie większej ilości danych technicznych niż dysponuje się obecnie,
- b/ większość układów i rozwiązań zabezpieczeń dotyczących zakłóceń w stojanie kriogeneratora nie różni się od stosowanych w eksploatacji maszyn konwencjonalnych,
- c/ do zabezpieczenia wirnika kriogeneratora przed skutkami zakłóceń istnieje potrzeba szczegółowego opracowania nowych, niezmiernie ważnych zabezpieczeń,
- d/ potwierdzona możliwość pracy kriomaszyny z "zamrożonym strumieniem" eliminuje zabezpieczenie od niedowzbudzenia,
- e/ do zabezpieczenia kriostatu przed wybuchem istnieje konieczność wyposażenia go w zabezpieczenie gazowo-przepływowe,
- f/ duże prądy zwarciorowe kriogeneratorów należy zmniejszyć budując

- maszyny o znacznie większych napięciach znamionowych,
- g/ ze względu na moce zwarciove, czasy własne wyłączników i zabezpieczeń powinny być w miarę możliwości skrócone,
 - h/ przy wystąpieniu zakłóceń w obrębie kriobloku należy liczyć się z możliwością awaryjnego przejścia uzwojeń wzbudzenia w stan normalnego przewodnictwa,
 - i/ głównym czynnikiem decydującym o rozmiarze uszkodzeń jest szybko działający układ AGP,
 - j/ użycie zwieraczy daje możliwość znacznego skrócenia czasu AGP kriogeneratora,
 - k/ dzięki skokowemu obniżeniu się napięcia na zaciskach po załączeniu zwieraczy, należy liczyć się z krótszym czasem palenia się łuku w miejscu uszkodzenia maszyny,
 - l/ bez względu na sposób gaszenia pola kriogeneratora, wielkość $/D i_F/_{max}$ jest głównym czynnikiem decydującym o czasie odwzbudzenia.

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Kriogenerator stwarza możliwość długotrwałej pracy zarówno przy przewzbudzeniu i niedowzbudzeniu w obszarze jego znamionowej mocy pozornej.
2. Wyróżnia się korzystniejszymi charakterystykami eksploatacyjnymi i stabilnością statyczną.
3. Kriogenerator jest znacznie lepszym elementem generującym moc bierną.
4. Posiada możliwość pracy w przypadku utraty wzbudzenia /praca z tzw. "zamrożonym strumieniem"/.
5. Dla ograniczenia dużych prądów zwarciowych kriogeneratorów należy dwukrotnie zwiększyć poziom ich napięć znamionowych.

6. Ogólna koncepcja zabezpieczeń kriobloku nie będzie się zasadniczo różnić od układów zabezpieczeń bloków konwencjonalnych. Jedyna odmienność dotyczy zabezpieczeń wirnika.
7. Zabezpieczenie od utraty nadprzewodnictwa będzie jednym z podstawowych zabezpieczeń kriogeneratora.
8. Przy prawidłowym zabezpieczeniu kriobloku i odpowiedniej konstrukcji kriogeneratora skutki zakłóceń nie będą większe niż w przypadku ekwiwalentnej maszyny o budowie konwencjonalnej.
9. O wielkości zakłóceń w obrębie kriobloku decydować będzie możliwie szybki układ AGP, w związku z czym konstrukcja kriostatu musi zapewnić m.in. możliwość bezawaryjnego przejścia uzwojeń w stan normalnego przewodzenia.

Biorąc pod uwagę fakty:

- porównywalnych granic stabilności dynamicznej obu rodzajów maszyn,
- znacznie korzystniejszych charakterystyk stabilności statycznej,
- lepszych charakterystyk eksploatacyjnych,
- realnych możliwości zabezpieczenia kriobloku przed skutkami zakłóceń,

stwierdza się, że przy spełnieniu warunków wynikających z przeprowadzonych rozważań, współpraca kriogeneratora z systemem jest możliwa.

W miarę dopływu informacji o kriogeneratorach przeprowadzoną analizę należy uściślać i rozszerzać.

LITERATURA

- [1] Aichholzer G. - Neue Wege zum Bau zweipoliger Turbogeneratoren bis 2 GVA, 60 kV, Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien, heft 1, 1972 r.
- [2] Antal L. - Analiza parametrów bezżłobkowej maszyny synchronicznej o nadprzewodzącym uzwojeniu wzbudzenia, Praca doktorska, Inst.Ukł.Elektromasz.P.Wr., 1975.
- [3] Antal L. - Podstawowe parametry indukcyjne bezżłobkowej maszyny synchronicznej o nadprzewodzącym uzwojeniu wzbudzenia, Komunikat Nr39 Inst.Ukł.Elektromasz. P.Wr., Wrocław, 1974.
- [4] Appleton A.D., Anderson A.F. - A review of the critical aspects of superconducting a.c. generators, Proc.Appl. Supercond. Conf., Annapolis Md. 1972 New York.
- [5] Bernas S. - Praca układów elektroenergetycznych, WPN, W-wa 1972.
- [6] Bertinov A.J. - Induktivnyje soprotivlenia svierchprovodnikovoj sinchronnoj mašiny, Energetyka i transport, nr 4, 1971.
- [7] Borecki J., Szkółka S., i in. - Zabezpieczenia przeciążeniowe silników wysokiego napięcia w układach KTZ, Raport nr 186 Inst.Energoelekt.P.Wr., Wrocław 1974.
- [8] Bratoljic T. - Turbogeneratoren mit supraleitender Erregerwicklung, Bull. SEV, 64, 1974, nr 17, str 1040-1050.
- [9] Bremer J.W. - Urządzenia nadprzewodnikowe, PWN, W-wa, 1965.
- [10] Burceva G.E., Wyrwiński W.W. - Analiz tiebovanij k elektromašinym parametrom moščnych turbogeneratorov po dinamičeskoj ustojčivosti, Elektrotehnika, nr 2, 1973, str 8-12.
- [11] Canay M. - Equivalent Circuits of Synchronous Machines for Calculating Quantities of the Rotor during Transient Processes and Asynchronous Starting, Brown Boveri Review, nr 2, 1969.
- [12] Chang Y.W., i in. - Development of a 5 MVA Superconducting Generator Testing and Evaluation, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr-2, 1974, str 496-499.

- [13] . Demel W., Kawka K. - Linia przesyłowa o napięciu 400 kV, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9, 1963.
- [14] . Einstein T.H. - System Performance Characteristics of Superconducting Alternators for Electric Utility Power Generation, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 2, 1975, str 310-318.
- [15] . Furuyama M., Kirtley L. - Transient Stability of Superconducting Alternators, IEEE Transactions on Apparatus Power and Systems, nr 2, 1975, str 320 - 328.
- [16] . Globov J.A., Kačteljan W.E. - Ob ustojčivosti kriogennych turbo-generatorov, Električestvo, nr 7 , 1976, str 23 - 27.
- [17] . Hiebler H. - The 1333 MVA Generator for "Donald C. Cook" Nuclear Power Plant of AEP, Brown Boveri Review, nr 1, 1972.
- [18] . Jefferies M.J., Gibbs E.E. - Prospects for superconductive generators in the electric utility industry, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 5, 1973, str 1659 - 1669.
- [19] Kazovskij A. - Pieriechodnyje procesy w električeskich mašinach pieriemennogo toka, Izd. AN SSSR, Moskva, 1962.
- [20] Kazovskij A. - Anormalnyje režimy raboty krupnych sinchronnych mašin, Izd. Nauka, Leningrad, 1969.
- [21] . Kimbark E. - Sinchronnyje mašiny i ustojčiwost električeskich sistem, Gosudarstviennoje Energetičeskije Izdatielstvo, Moskva, 1960.
- [22] . Kirtley L. - Per Unit Reactances of Superconducting Synchronous Machinery, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 4, 1973, str. 1316-1320.
- [23] . Kirtley L., i in. - Program of large superconducting machines, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 1, 1973, str. 112 - 115.

- [24] • Kolmer M., Różycki A. - Generator synchroniczny z wirującym nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia, Opracowanie nr 11/21/72/73, część V, Inst. Metrologii i Maszyn Elektrycznych P. Śląskiej, Gliwice 1973.
- [25] • Kończykowski S., Bursztyński J. - Zwarcia w układach elektroenergetycznych, WNT, W-wa, 1965.
- [26] • Kozłowski M., Kopczyński Z. - Podstawowe kierunki postępu technicznego w budowie transformatorów dla wielkich bloków energetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 1971.
- [27] • Kozłowski M. - Problemy transformatorowe na CIGRE 72, Przegląd Elektrotechniczny, nr 8, 1973.
- [28] • Laible Th. - Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb, Springer-Verlag Berlin, 1952.
- [29] • Latek W. - Zarys maszyn elektrycznych, WNT, W-wa, 1974.
- [30] • Lorch H.O. - Feasibility of turbogenerator with superconducting rotor and conventional stator, Proceedings of the IEE, nr 2, 1973.
- [31] • Majewski J., Traczewski A. - Pierwszy polski układ przesyłowy o napięciu 400 kV Mikułowa-Joachimów, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9, 1963.
- [32] • Materiały - Provisional Report of Study Committee Nr 11 Meeting in Paris on September 1 and 3 1976.
- [33] • Müller i in - Badania doświadczalne przeprowadzone na maszynie synchronicznej z nadprzewodzącym uzwojeniem wzbudzenia, Sprawozdanie nr 48 Pracowni Badawczej Kriotechniki, Ilmenau, NRD, 1974, EMA DOLMEL, W-w 1974, niepublikowane.
- [34] • Okraszewski Z., Szkółka S., i in - Zabezpieczenia temperaturowe wirników maszyn elektrycznych prądu stałego i prądu przemiennego, Raport nr 291 Inst. Energoelekt. P. Wr. Wrocław, 1975.
- [35] • Plamitzer A. - Maszyny elektryczne, WNT, W-wa.
- [36] • Praca zbior. - Ćwiczenia z sieci i systemów elektroenergetycznych, Praca zbiorowa pod redakcją J. Kożuchowskiego, PWN, Wrocław 1973.

- [37] • Reichert K., Nelson L. - Rechenmethoden und Modelle für die Untersuchung des Stabilitätsverhaltens grosser Synchronmaschinen, Brown Boveri Mitteilungen, nr 11, 1974.
- [38] • Szymański A., Wiszniewski A. - Gaszenie pola w maszynach o wzbudzeniu bezszczotkowym, Pr.nauk.Inst.Energoelekt. P.Wr.,nr 4, 1970.
- [39] • Thullen P., i in. - An Eksperimental Alternator with a Superconducting Rotating Field Winding, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 2, 1971, str 611 - 619.
- [40] Trojak J. i in. - Nowe układy zabezpieczeń wielkich bloków 500 MW, Raport nr 15 Inst.Energoelekt.P.Wr., W-w, 1972.
- [41] Trojak J. i in. - Opracowanie nowych struktur zabezpieczeń wielkich bloków . Część II, Raport nr 115 Inst.Energoelekt.P.Wr., W-w, 1973/74.
- [42] Trojak J. i in. - Opracowanie nowych struktur zabezpieczeń dużych bloków, Raport nr 233 Inst. Energoelekt.P.Wr., Wrocław, 1975.
- [43] • Trojak J. i in. - Opracowanie nowych struktur zabezpieczeń dużych bloków. Część I, Raport nr 160 Inst. Energoelekt. P.Wr., Wrocław, 1974.
- [44] • Uczkiewicz J. - Ekranowanie nadprzewodzącego uzwojenia wzbudzenia generatora synchronicznego od zmiennych zewnętrznych pól magnetycznych, Praca doktorska, Inst. Układów Elektromasz. P.Wr., 1977.
- [45] • Vesolovskij H.H. i in. - Generator pierieniennogo toka 100 kW so sverchprowodiaščym induktorom, Električestvo, nr 5 1973.
- [46] Woodson H.H., Steckly Z.J.J. - A Study of alternators with superconducting field winding, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 3, 1966.
- [47] • Woodson H.H. i in. - The Application of Superconductors in the Field Windings of Large Synchronous Machines, IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, nr 2, 1971, str. 620 - 627.

[48] . Żydanowicz J., i in.- Zabezpieczenia i automatyka w energetyce,
WNT, Warszawa 1975.

Wykaz odbiorców

egz.

1	Promotor	1
2	Recenzenci	3
3	Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej	1
4	Archiwum Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocł..	1
5	Autor	2

Razem 8

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1

Obliczenie pomocniczych parametrów analizowanych maszyn

KRIOGENERATOR 1 GVA

GENERATOR KONWENCJONALNY 1 GVA

Przy założeniu, że ekran znajduje się blisko uzwojenia wzbudzenia, możemy napisać wg. [2] :

$$X_{11} \approx X_d'' = 0,10 \text{ p.u.},$$

$$X_{ad} = X_d - X_{11} = 0,28 \text{ p.u.}$$

Ponieważ $X_d'' \approx X_q''$, to

$$X_{2G} \approx \frac{X_d'' + X_q''}{2} = 0,1 \text{ p.u.}$$

Stała czasowa T_a :

$$T_a \approx \frac{X_{2G}}{R_a} = 33,3 \text{ p.u.}$$

Stałe czasowe : T_d' , T_d''

$$T_d' \approx T_{do}' \cdot \frac{X_d'}{X_d} = 494 \text{ s},$$

$$T_d'' \approx T_{do}'' \cdot \frac{X_d''}{X_d} = 0,1 \text{ s}.$$

$$X_{11} \approx X_d'' - 0,025 = 0,259 \text{ p.u.},$$

$$X_{ad} = 1,676 \text{ p.u.}$$

$$X_{2G} = 0,28 \text{ p.u.}$$

$$T_a = 112 \text{ p.u.}$$

$$T_d' = 1,015 \text{ s},$$

$$T_d'' = 0,034 \text{ s}.$$

Wyniki obliczeń charakterystyk "V" analizowanych maszyn

Kriogenerator 1 GVA

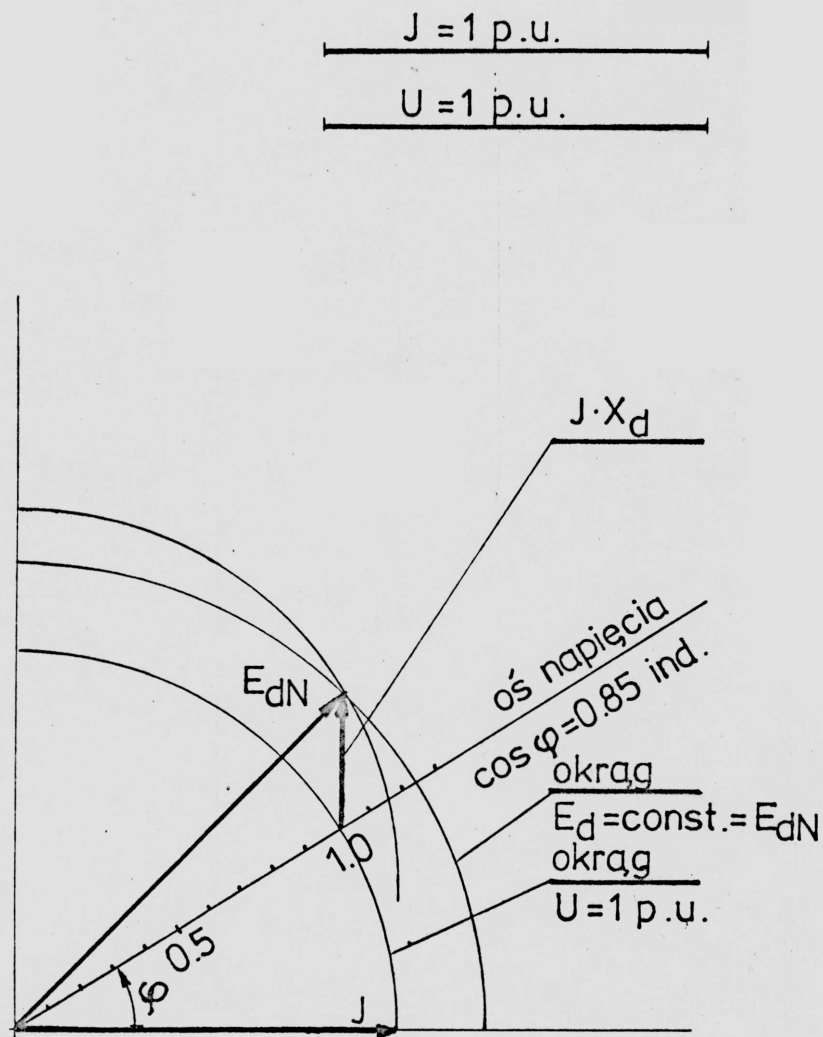
	$\cos \varphi = 0,85$			$\cos \varphi = 0,9$			$\cos \varphi = 0,95$			$\cos \varphi = 1$		$\cos \varphi = 0,7$		
P	J	Edi	Edp	J	Edi	Edp	J	Edi	Edp	J	Ed	J	Edi	Edp
p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0,85	1,0	1,24	0,86	0,94	1,20	0,90	0,90	1,15	0,95	0,85	1,05	1,21	1,35	0,75
0,68	0,8	1,19	0,88	0,75	1,15	0,91	0,72	1,11	0,95	0,68	1,03	0,97	1,28	0,78
0,51	0,6	1,13	0,90	0,57	1,11	0,93	0,54	1,08	0,96	0,51	1,02	0,73	1,21	0,83
0,34	0,4	1,09	0,93	0,38	1,07	0,95	0,36	1,05	0,97	0,34	1,01	0,48	1,14	0,88
0,17	0,2	1,04	0,96	0,19	1,03	0,97	0,18	1,02	0,98	0,17	1,00	0,24	1,05	0,96
0,00	0,0	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00

	$\cos \varphi = 0,5$			$\cos \varphi = 0,2$		
P	J	Edi	Edp	J	Edi	Edp
p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0,85	1,7	1,60	0,55	4,25	2,60	0,66
0,68	1,4	1,47	0,61	3,40	2,49	0,37
0,51	1,0	1,35	0,69	2,25	1,85	0,25
0,34	0,7	1,23	0,79	1,70	1,64	0,39
0,17	0,3	1,11	0,89	0,85	1,32	0,69
0,00	0,0	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00

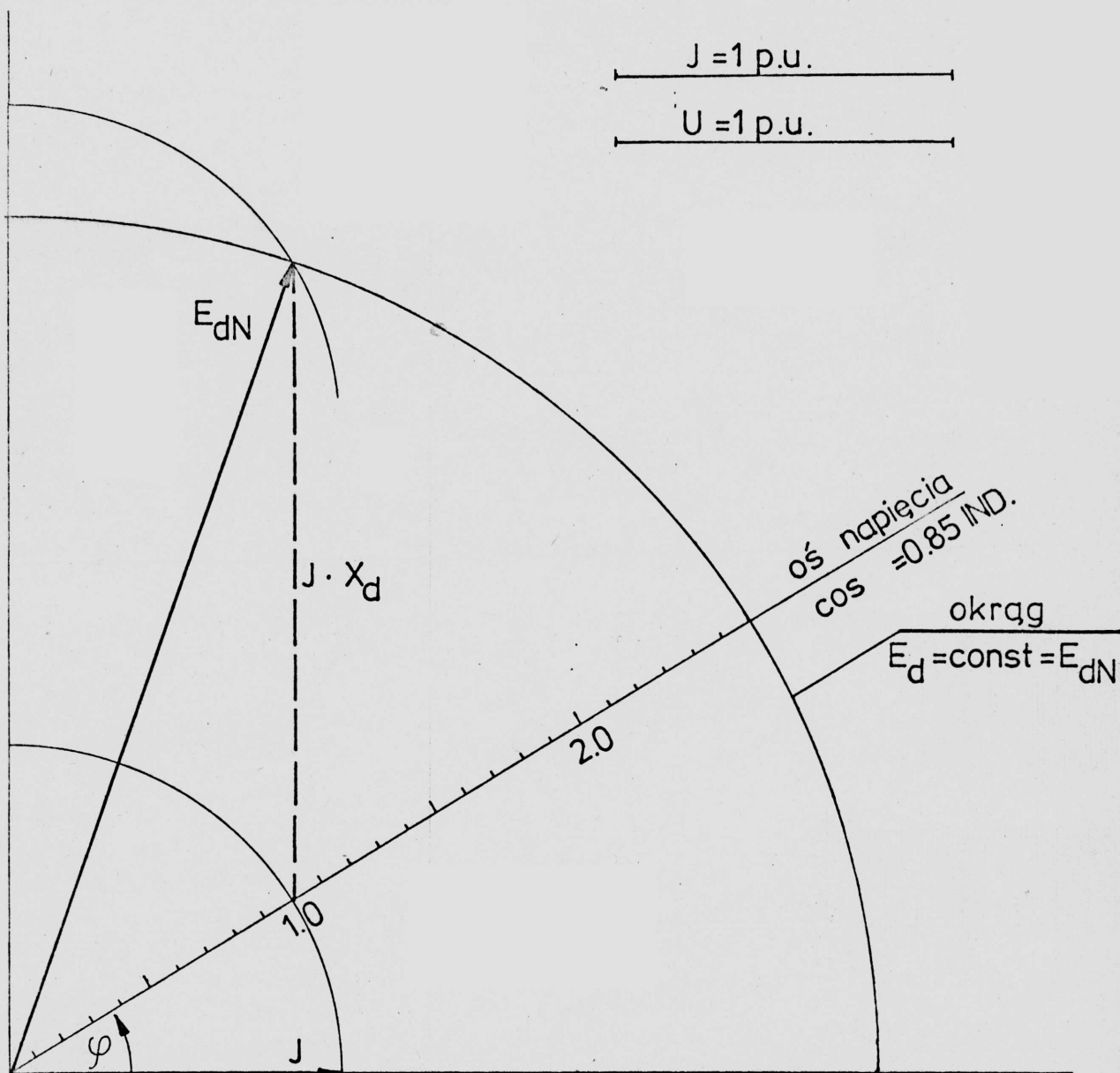
Generator konwencjonalny 1 GVA

	$\cos \varphi = 0,85$			$\cos \varphi = 0,9$			$\cos \varphi = 0,95$			$\cos \varphi = 1$		$\cos \varphi = 0,7$		
P	J	E_{di}	E_{dp}	J	E_{di}	E_{dp}	J	E_{di}	E_{dp}	J	E_d	J	E_{di}	E_{dp}
p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0,85	1,0	2,60	1,64	0,94	2,43	1,66	0,90	2,25	1,71	0,85	1,92	1,21	3,14	1,78
0,68	0,8	2,24	1,33	0,75	2,10	1,36	0,72	1,94	1,43	0,68	1,65	0,97	2,69	1,36
0,51	0,6	1,89	1,06	0,57	1,78	1,12	0,54	1,65	1,20	0,51	1,40	0,73	2,24	0,99
0,34	0,4	1,55	0,88	0,38	1,47	0,95	0,36	1,38	1,02	0,34	1,20	0,49	1,80	0,73
0,17	0,2	1,25	0,86	0,19	1,20	0,90	0,18	1,16	0,95	0,17	1,05	0,24	1,37	0,74
0,00	0,0	1,00	-	0,00	1,00	-	0,00	1,00	-	0,00	1,00	0,00	1,00	-

	$\cos \varphi = 0,5$			$\cos \varphi = 0,2$		
P	J	E_{di}	E_{dp}	J	E_{di}	E_{dp}
p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0,85	1,7	4,18	2,47	4,25	9,20	7,25
0,68	1,4	3,53	1,83	3,40	7,56	5,60
0,51	1,0	2,88	1,21	2,55	5,92	3,96
0,34	0,7	2,24	0,67	1,70	4,27	2,32
0,17	0,3	1,60	0,54	0,85	2,65	0,69
0,00	0,0	1,00	-	0,00	1,00	-



Rys. Z.1. Uproszczony wykres pomocniczy do wykreślenia charakterystyki zewnętrznej kriogeneratora 1 GVA / $\cos \varphi = \cos \varphi_N = 0,85 = \text{const.}$,
 $E_d = E_{dN} = \text{const.}$ /



Rys. Z.2. Uproszczony wykres pomocniczy do wykreślenia charakterystyki zewnętrznej generatora konwencjonalnego 1 GVA / $\cos \varphi = \cos \varphi_N = 0,85 = \text{const.}$, $E_d = E_{dN} = \text{const.}$ /

Wyniki obliczeń charakterystyk zewnętrznych analizowanych maszyn / wartości prądu J odczytywane z wykresów pomocniczych rys. Z1 i Z2 /.

U p.u.		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
J p.u.	KRIO	3,26	3,13	2,97	2,79	2,60	2,39	2,16	1,92	1,63	1,31
	KONW	1,34	1,31	1,28	1,25	1,22	1,18	1,15	1,12	1,07	1,03

U p.u.		1,0	1,1	1,2	1,24	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
J p.u.	KRIO	1,00	0,63	0,21	0,00	-	-	-	-	-	-
	KONW	1,00	0,95	0,90	0,88	0,85	0,81	0,75	0,70	0,65	0,59

U p.u.		1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
J p.u.	KRIO	-	-	-	-	-	-	-	-
	KONW	0,53	0,46	0,40	0,33	0,25	0,17	0,10	0,00

Załącznik 3

Wyniki obliczeń charakterystyk regulacji analizowanych maszyn;
/ $E_d = f/J$ przy $U = U_N = 1$ p.u.; $\cos \varphi = \text{const}$, $n = \text{const}$ /

Kriogenerator 1 GVA

		J p.u.										
	$\cos \varphi$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
E_d p.u.	1	1	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,06	1,07
	0,85ind	1	1,02	1,04	1,06	1,09	1,11	1,14	1,16	1,19	1,21	1,24
	0,85poj	1	0,98	0,96	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
	0 ind	1	1,04	1,08	1,11	1,15	1,19	1,23	1,23	1,30	1,34	1,38
	0 poj	1	0,96	0,92	0,89	0,85	0,81	0,77	0,73	0,70	0,66	0,62

Generator konwencjonalny 1 GVA

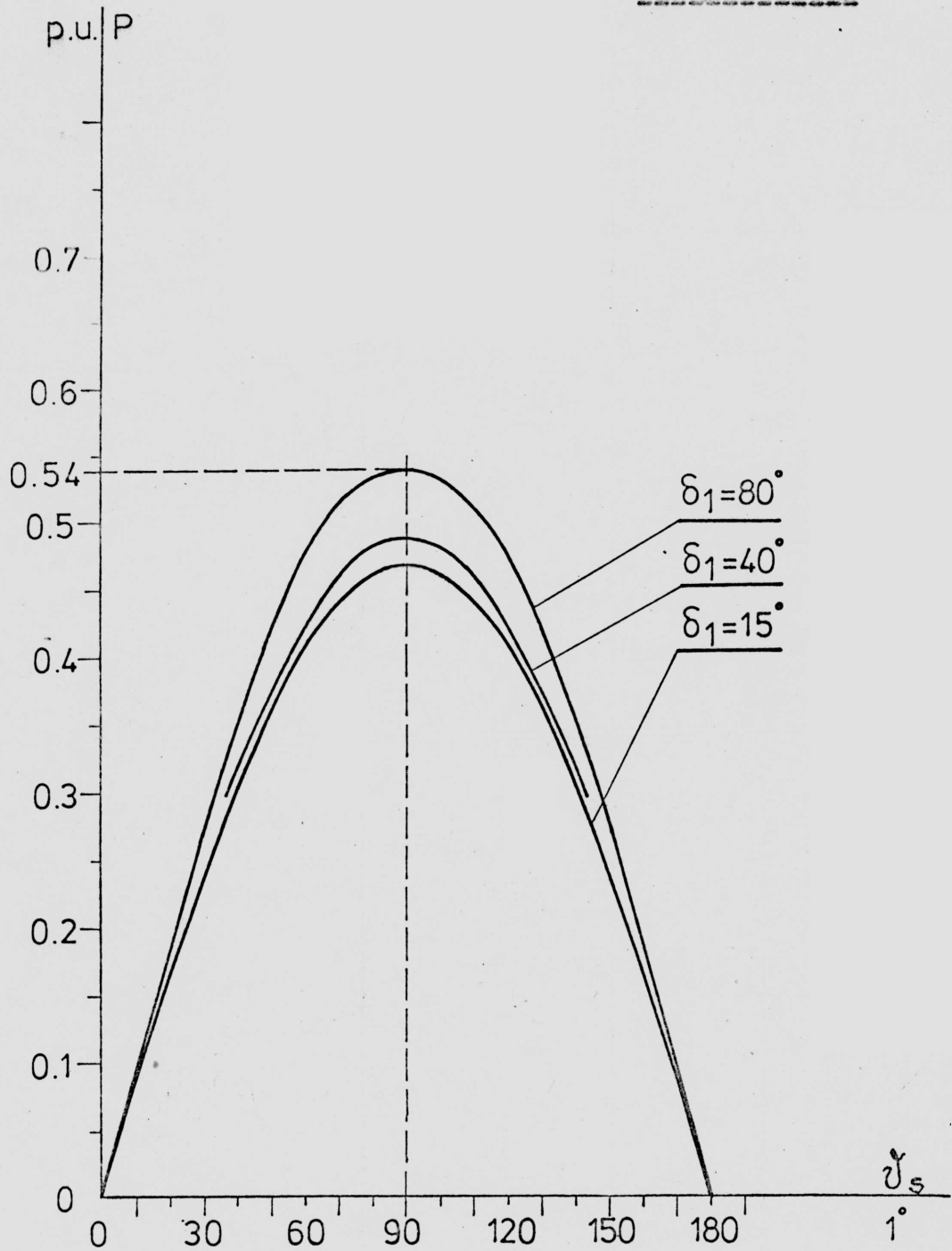
		J p.u.											
-	cos φ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
E_d p.u.	1	1	1,02	1,07	1,16	1,26	1,39	1,53	1,68	1,84	2,01	2,18	
	0,85ind	1	1,11	1,25	1,39	1,55	1,72	1,89	2,06	2,24	2,42	2,60	
	0,85poj	1	0,91	0,86	0,85	0,88	0,96	1,06	1,19	1,32	1,48	1,64	
	0 ind	1	1,19	1,39	1,58	1,77	1,97	2,16	2,35	2,55	2,74	2,93	
	0 poj	1	0,80	0,61	0,42	0,23	0,03	-	-	-	-	-	

Załącznik 4

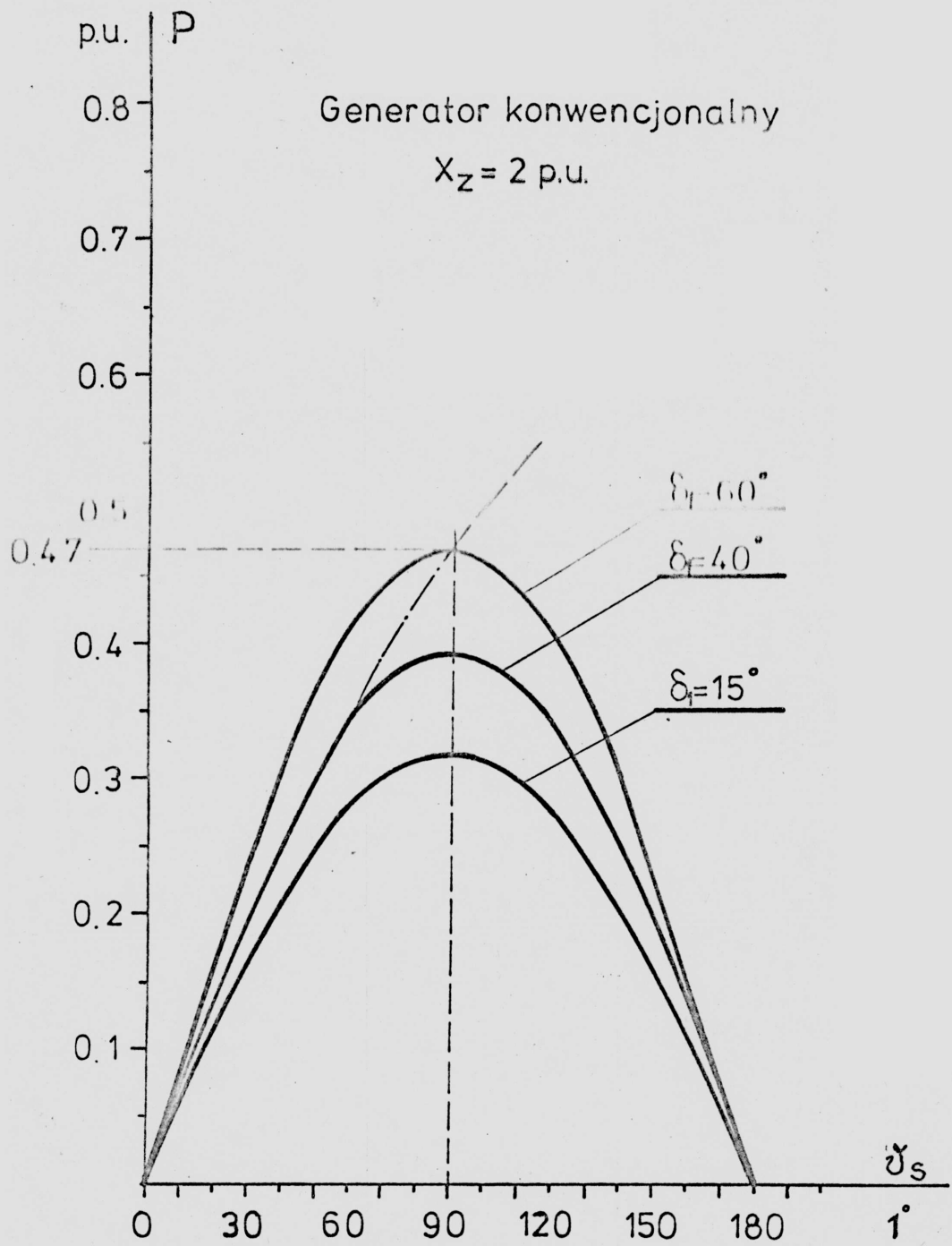
Wyniki obliczeń charakterystyk $\vartheta = f/\cos\varphi$, $E_d = f/\cos\varphi$
przy $U = J = 1$ p.u.

cos φ	Kriogenerator 1 GVA		Generator konw. 1 GVA	
	ϑ °	E_d p.u.	ϑ °	E_d p.u.
0 ind	0	1,38	0	2,94
0,1	1,5	1,38	3,8	2,93
0,2	3,2	1,37	7,6	2,92
0,3	4,7	1,36	11,5	2,90
0,4	6,4	1,35	15,6	2,88
0,5	8,1	1,34	19,9	2,84
0,6	9,9	1,32	24,4	2,80
0,7	11,8	1,29	29,6	2,74
0,8	13,9	1,26	36,6	2,66
0,9	16,3	1,21	43,4	2,53
1,0	20,8	1,06	62,7	2,18
0,9	22,3	0,90	84,9	1,75
0,8	21,5	0,82	95,9	1,56
0,7	20,0	0,77	105,7	1,41
0,6	18,1	0,73	115,3	1,28
0,5	15,8	0,69	124,9	1,18
0,4	13,1	0,66	135,0	1,09
0,3	10,1	0,64	145,5	1,02
0,2	6,9	0,63	156,6	0,98
0,1	3,4	0,62	168,2	0,94
0 poj	0	0,62	180,0	0,93

Załącznik 5



Rys. Z.3. Zależność $P = f/\psi_s, \delta_1$ / kriogenerators
1 GVA / $X_2 = 2$ p.u. /



Rys. Z.4. Zależność $P = f/\delta_s, \delta_1$ / generatora konwencjonalnego 1 GVA / $X_Z = 2$ p.u. /

Załącznik 6

Zestawienie wzorów na współczynniki równań różniczkowych
 $d_1 \div d_{19} /$.

$$d_1 = \frac{R_a}{X_{11} + X_{ad} \left[1 - \frac{X_{ad}}{\frac{X_D}{1 + \frac{X_D}{X_{fl}}} + X_{ad}} \right]},$$

$$d_2 = \frac{R_a}{X_{fl} \left[1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}} \right] + \left[1 + \frac{X_{fl}}{X_D} \right] \left[X_{ad} \cdot \left(1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}} \right) - X_{ad} \right]},$$

$$d_3 = \frac{R_a}{X_D \left[1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}} \right] + \left[1 + \frac{X_D}{X_{fl}} \right] \left[X_{ad} \left(1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}} \right) - X_{ad} \right]},$$

$$d_4 = \frac{R_a}{X_{11} + X_{aq} \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{X_Q}{X_{aq}}} \right]},$$

$$d_5 = \frac{R_a}{X_{11} + X_Q \left[1 + \frac{X_{11}}{X_{aq}} \right]},$$

$$d_6 = \frac{1}{\frac{X_{fl}}{1 + \frac{1}{X_D} \left[X_{ad} - \frac{X_{ad}}{1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}}} \right]} + \frac{1 + \frac{X_{fl}}{X_D}}{\frac{1}{X_D} + \frac{1}{X_{ad} - \frac{X_{ad}}{1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}}}}}},$$

$$d_7 = \frac{d_2}{R_a}, \quad d_8 = \frac{1}{X_{fl} \cdot \frac{X_D}{X_{ad} - \frac{X_{ad}}{1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}}}} + 1 + \frac{X_D}{X_{fl}}},$$

$$d_9 = d_3 \cdot \frac{R_D}{R_a}, \quad d_{10} = d_8 \cdot R_D,$$

$$d_{11} = \frac{R_D}{\frac{X_D}{1 + \frac{1}{X_{fl}} \left[X_{ad} - \frac{X_{ad}}{1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}}} \right]} + \frac{1 + \frac{X_D}{X_{fl}}}{\frac{1}{X_{fl}} + \frac{1}{X_{ad} - \frac{X_{ad}}{1 + \frac{X_{11}}{X_{ad}}}}}},$$

$$d_{12} = d_5 \cdot \frac{R_Q}{R_a}, \quad d_{13} = \frac{R_Q}{X_Q + X_{aq} \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{X_{11}}{X_{aq}}} \right]},$$

$$d_{14} = \frac{1}{H_T} ,$$

$$d_{15} = \frac{d_4}{R_a} ,$$

$$d_{16} = \frac{d_5}{R_a} ,$$

$$d_{17} = d_7 ,$$

$$d_{18} = \frac{d_3}{R_a} ,$$

$$d_{19} = \frac{d_1}{R_a} .$$

22.2

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	* N *	D.N.5.B.M.T.E.N. 051.51.051.7								
	Rozpocz. pr.	Zakończ. pr.	Opubl. pr.		Instytut		Nr tematu.			
	1.07.3	06.7.7			I.08					
Nr zlecenia.		Nr archiwalny								
		I.08. / K-318. / 7.7 *								
Symbol UKD. 536.48 621.344.1		Kriogenika system elektroenergetyczny								77: Inst. Energoelektr. P. Wr. MNSZWIT pol.
Opis bibliograficzny.										
Szkółka Stanisław Zachowanie się kriogeneratora w systemie elektroenergetycznym w porównaniu z ekwiwalentną maszyną konwencjonalną. Komunikaty Instytutu Energoelektryki P. Wr. 1977, nr 318 145s., 57 rys., 11 tabl., 48 poz. bibliograf. / masz. powiel. / Rozprawa doktorska Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, Wrocław Promotor: prof. Jan Trojak										
Charakter pracy: <i>stosowane</i> Materiały odpłatne: <i>A</i> Rozpowszechnienie: na praw. ręk.										

Analiza dokumentacyjna
<D

W pracy przedstawiono analizę porównawczą zachowania się dwu ekwiwalentnych generatorów synchronicznych o nadprzewodzącym i konwencjonalnym uzwojeniu wzbudzenia w wybranych stanach pracy. Podano tendencje zmian podstawowych parametrów elektromagnetycznych obu rodzajów maszyn w funkcji ich mocy. Przedstawiono charakterystyki pracy ustalonej kriogeneratora i maszyny konwencjonalnej o mocy 1 GVA. Analizę stanów nieustalonych przeprowadzono w oparciu o numeryczne obliczenia różniczkowych równań Parka-Goriewa zastępując kriogeneratorschematem zastępczym maszyny konwencjonalnej. Zaproponowano ogólną koncepcję zabezpieczenia kriobloku jak też samego wirnika kriogeneratora.

Imię i Nazwisko autora analizy

Stanisław Szkółka

Słowa kluczowe

<S

generator synchroniczny, nadprzewodzące uzwojenie wzbudzenia, praca ustalona, proces przejściowy, zabezpieczenia.

**0480*00*

<A. * B. * C. * D.

* E. * F. * G. * H.

Tylko PRL	CINTE	APW	Podpis red.	Podpis asyst. d/s badań	Potwierdzenie przyjęcia poprawki	Potwierdzenie przyjęcia karty w Oddziale Dokumentacji
TAK	TAK	NIE				
Wpisać TAK lub NIE						