ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: ENERGETYKA z. 72 Nr kol. 604

Andrzej WITKOWSKI

STANOWISKO DO BADAŃ STRUKTURY PRZEPŁYWU W OSIOWYM STOPNIU SPRĘŻAJĄCYM

Streszczenie. Przedstawiono konstrukcję oraz oprzyrządowanie stanowiska do badań struktury przepływu w osiowym stopniu sprężającym zarówno w układzie bezwzględnym, jak i względnym. Omówiono zasady pomiaru podstawowych wielkości charakteryzujących własności aerodynamiczne stopnia.

1. Wstęp

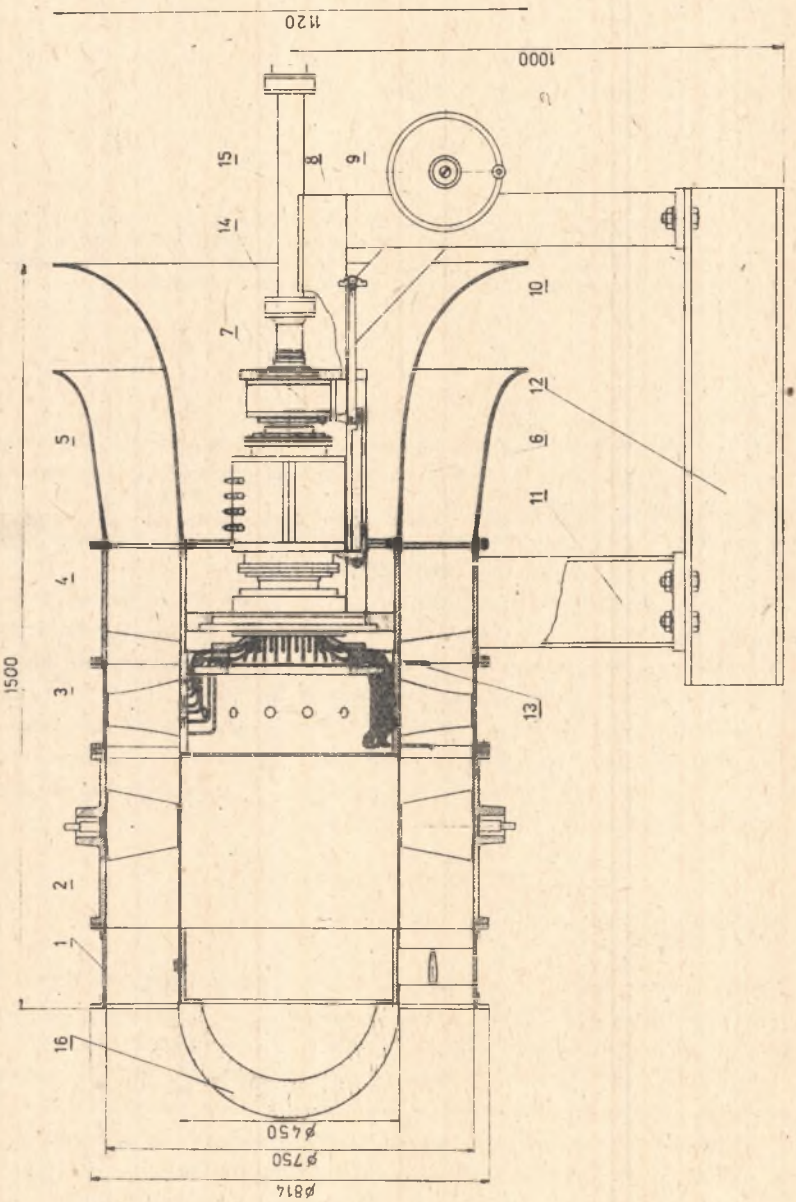
Rozwiązanie zarówno pierwszego jak i drugiego zadania aerodynamiki maszyn przepływowych wymaga dokładniejszego poznania zjawisk występujących w przepływie przez układy łopatkowe.

Rzeczywisty postęp może być tu osiągnięty jedynie poprzez równoczesny rozwój badań teoretycznych i eksperymentalnych.

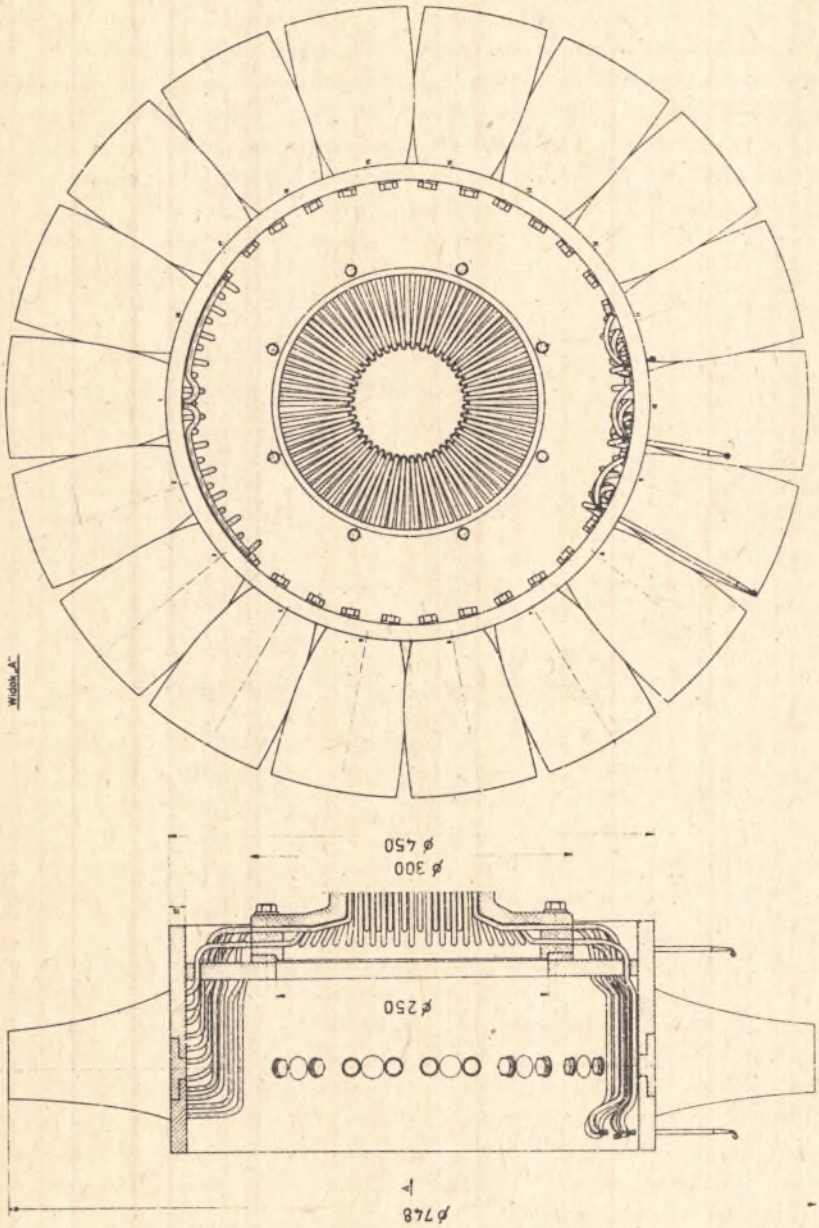
Stosownie do tego dla uzyskania uzupełniających informacji dotyczących przepływu przez osiowe stopnie sprężające oraz dla umożliwienia weryfikacji wyników badań teoretycznych skonstruowano stanowisko do badań obciążeń aerodynamicznych wirujących wieńców łopatkowych oraz struktury przepływu w wybranych przekrojach kontrolnych stopnia zarówno w układzie względnym, jak i bezwzględnym, w obliczeniowym i pozaobliczeniowych punktach pracy. Stanowisko umożliwia ponadto badanie pełnych charakterystyk aerodynamicznych stopnia.

2. Stopień modelowy

Układ przepływowy modelowego osiowego stopnia sprężającego (rys. 1) składa się z pierścieniowej części wlotowej (1) dwunastu profilowanych łopatek wstępnej kierownicy regulacyjnej (2) koła wirnikowego (3), łopatek kierownicy tylnej (4) oraz krzywoliniowego dyfuzora pierścieniowego (5). Stosunkowo długa część wlotowa kanału przed stopniem umożliwia uformowanie wystarczająco grubej dla celów pomiaru warstwy przyściennej. Zasadniczym elementem stopnia modelowego jest koło wirnikowe o średnicy zewnętrznej 750 mm podwieszone na wale i połączone z urządzeniem do przenoszenia impulsów ciśnieniowych z koła wirnikowego do układu stałego (6) z uszczelnieniem wodnym w wykonaniu Instytutu Lotnictwa w Warszawie [1].



Rys. 1. Stanowisko do badań struktury przepływu w osiowym stopniu sprężającym



rys. 2. Koło wirnikowe

Koło wirnikowe (2) o stosunku średnic ν = 0,6 składa się z cylindrycznej piasty stalowej z zamocowanymi na niej za pomocą śrub osiemnastoma łopatkami, wykonanymi z epidianu zbrojonego włóknem szklanym, o stałej długości cięciwy wzdłuż wysokości. Łopatki zaprojektowano zgodnie z zasadą stałego wiru. Zapewnia to wyrównany profil prędkości na wylocie z koła wirnikowego w obliczeniowym i bliskim obliczeniowego punktach pracy stopnia, co ułatwi wyznaczenie z wystarczającą dokładnością krawędzi brzegowych warstwy granicznej. Przewidziano wymienność układu łopatkowego koła wirnikowego. Przyjęto profil C4 o szkieletowej kołowej. Szczegóły konstrukcyjne łopatek zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Łopatki koła wirnikowego

18 łopatek o długości l = 133,9 mm Profil C4 o szkieletowej kołowej			
Lp.	Promień r [m]	Kąt wygięcia ϑ [o]	Kąt ustawienia γ [o]
0	0,225	53,64	55,77
1	0,262	53,25	43,84
2	0,300	20,37	35,97
3	0,337	12,09	30,61
4	0,375	6,34	26,74

Duża skala modelu ma na celu ułatwienie badań przepływu w obszarze pierścieniowej warstwy granicznej, której grubość uwarunkowana jest wymiarami kanału przepływowego. Przekaźnik ciśnień umożliwia przenoszenie 96 impulsów ciśnieniowych z układu wirującego do układu stałego bez konieczności zatrzymywania stanowiska. Urządzenie umożliwia równoczesny odczyt ośmiu punktów pomiarowych i kolejną ich zmianę w czasie ruchu wieńca wirnikowego.

Jedna z łopatek wykonana jest jako drenowana w siedmiu przekrojach na siedmiu promieniach z 21 punktami poboru ciśnienia wzdłuż obwodu łopatki. Pozostałych 75 dysponowanych punktów pomiarowych rozdzielonych jest pomiędzy 15 pięciootworowych sond kulowych wirujących wraz z wirnikiem. Trzy z nich zamocowane są w piaście na wlocie do koła wirnikowego.

Pozostałych 12 sond zamocowanych jest na stałe na trzech promieniach po cztery wzdłuż podziałki w przekroju wylotowym łopatek koła wirnikowego.

Za kołem wirnikowym znajduje się kierownica tylna składająca się z 13 płaskich łopatek cylindrycznych.

Ze względów konstrukcyjnych zastosowano dyfuzor pierścieniowy, zakrzywiony wykonany z epidianu zbrojonego włóknem szklanym.

3. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

3.1. Badanie pełnych charakterystyk aerodynamicznych stopnia

Modelowy stopień sprężający podłączony jest po stronie ssania do rurociągu pomiarowego (rys. 3). Podstawowymi elementami stanowiska pomiarowego są: rurociąg pomiarowy z wymiennymi wlotami lemniskatowymi do pomiaru natężenia przepływu oraz silnik elektryczny prądu stałego z ciągłą tyrystorową regulacją liczby obrotów, zabudowany w kołysce umożliwiającej pomiar momentu obrotowego. Do pomiaru wydajności przewidziano trzy wymienne dysze wlotowe umożliwiające pomiar w trzech zakresach wydajności:

I $\dot{V} = 0,77 - 4,62\ m^3/s$

II $\dot{V} = 4,62 - 8,47\ m^3/s$

III $\dot{V} = 8,47 - 11,55\ m^3/s$.

Strumień masy oblicza się z zależności

$$\dot{m} = \alpha \cdot A \cdot \frac{p_o}{\sqrt{RT_o}} \sqrt{2 \frac{\varkappa}{\varkappa-1} \left(\frac{p_o - \Delta p_d}{p_o}\right)^{\frac{2}{\varkappa}} - \left(\frac{p_o - \Delta p_d}{p_o}\right)^{\frac{\varkappa+1}{\varkappa}}},$$

gdzie:

α - współczynnik skalowania wlotu,

T_o, p_o - temperatura, ciśnienia otoczenia,

Δp_d - spadek ciśnienia w dyszy,

A - pole najmniejszego przekroju dyszy.

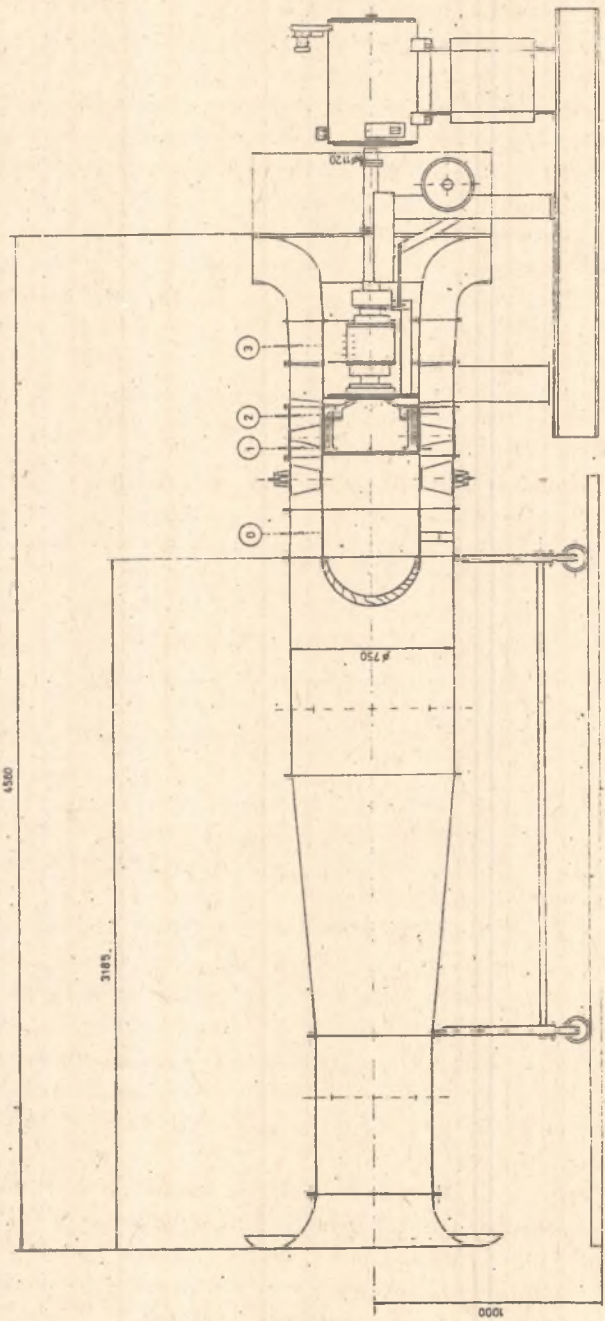
Przyrost ciśnienia całkowitego stopnia określony jest jako różnica ciśnienia całkowitego na wylocie ze stopnia za kierownicami tylnymi (przekrój pomiarowy 3-3 na (rys. 3)) oraz ciśnienia całkowitego w kolektorze wlotowym (przekrój pomiarowy 0-0).

W kolektorze wlotowym ciśnienie całkowite stanowi sumę ciśnienia statycznego mierzonego na obwodzie kolektora w ośmiu punktach i uśrednionego następnie w zbiorniku uśredniającym oraz ciśnienia dynamicznego określonego ze średniej prędkości przepływu w przekroju pomiarowym.

Pomiar ciśnienia całkowitego za stopniem przeprowadzony zostanie przez zastosowanie za kierownicami tylnymi wielopunktowych grzebieniowych sond ciśnienia całkowitego o małej czułości na odchylenie strug od kierunku osiowego.

3.2. Badanie struktury przepływu bezwzględnego

Przewiduje się sondowanie przepływu w czterech przekrojach kontrolnych 0,1,2 i 3 (rys. 3) pięciootworowymi sondami kulowymi z przymocowanymi do nich półprzewodnikowymi czujnikami [2] temperatury. Sondy mogą być prze-



Rys. 3. Stanowisko do badań charakterystyk aerodynamicznych osiowych stopni sprężających

mieszczane promieniowo w kierunku obwodowym oraz obracane wokół swej osi. W efekcie sondowania otrzymujemy pole parametrów przepływu w przekrojach kontrolnych. Na przykład dla przekroju "0" i "3" mamy:

$$T_o(r_o, \vartheta_o), \quad p_o(r_o, \vartheta_o), \quad C_{mo}(r_o, \vartheta_o)$$

$$T_3(r_3, \vartheta_3), \quad p_3(r_3 \vartheta_3), \quad C_{m3}(r_3, \vartheta_3).$$

Entalpię wyznaczamy z zależności:

$$i_o(r_o, \vartheta_o) = C_p\, T_o(r_o, \vartheta_o), \quad i_3(r_3 \vartheta_3) = C_p\, T_3(r_3, \vartheta_3)$$

$$d\dot{m}\,(r, \vartheta) = \rho\,(r,\vartheta)\,.\,C_m(r,\vartheta).r.dr\,d\vartheta$$

$$\rho(r,\vartheta) = p(r,\vartheta)/R\,T\,(r,\vartheta).$$

Znajomość przedstawionych parametrów w całym przekroju przepływowym przed stopniem (przekrój 0) i za stopniem (przekrój 3) umożliwia wyznaczenie całkowitej straty w stopniu przy pominięciu wymiany ciepła z otoczeniem z zależności [3] :

$$\Delta L_s = \int_A \Delta l_{so3}\, d\dot{m} = \int (i_3 - i_o)d\dot{m} - \int_A \int_0^3 1/\rho\,.dp.d\dot{m},$$

Prace jednostkową $\int_0^3 1/\rho\, dp$ wyznaczamy przyjmując przemianę politropową przy stałym wykładniku politropy dla każdej linii prądu

$$\int_0^3 1/\rho.\ dp(r,\vartheta) = \frac{n}{n-1}\,(r,\vartheta)\,R\left[T_3(r,\vartheta) - T_o(r,\vartheta)\right].$$

Wykładnik politropy obliczamy z zależności

$$\frac{n}{n-1}\,(r,\vartheta) = \ln\ p_2/p_3 \Big/ \ln T_3/T_o.$$

Zamiast wartości strat można obliczyć sprawność η stopnia z zależności:

$$\eta = 1 - \Delta L_s \Big/ \int_A (i_3 - i_o)\, d\dot{m}.$$

Sondowanie przepływu głównego przeprowadza się pięciootworowymi sondami kulowymi o średnicy główki 5 mm w wykonaniu IMP w Łodzi. W obszarze pierścieniowej warstwy granicznej sondowanie odbywa się za pomocą trójotworowej sondy stopkowej. Przewiduje się również wykorzystanie zestawu sond firmy DISA [4].

3.3. Badanie przepływu względnego

Konstrukcja przekaźnika ciśnień (rys. 4) zapewnia jednoczesny pomiar ciśnienia w ośmiu punktach i przełączanie kolejnych punktów podczas ruchu koła wirnikowego. 21 punktów pomiarowych połączonych jest z przewodami przebiegającymi wzdłuż wysokości jednej z łopatek. Konstrukcja łopatki umożliwia pomiar rozkładu ciśnienia statycznego na jej powierzchni w siedmiu przekrojach i określenie obciążenia aerodynamicznego zarówno w obszarze przepływu głównego, jak również w obszarze warstwy przyściennej.

Pomiar struktury przepływu za łopatkami wstępnej kierownicy regulacyjnej dokonywany jest za pomocą trzech wirujących wraz z kołem wirnikowym pięciootworowych sond kulowych. Umożliwiają one wyznaczenie uśrednionych wielkości charakteryzujących przepływ na wlocie do wieńca łopatkowego koła wirnikowego. Przewidziano również badania struktury przepływu względnego za kołem wirnikowym za pomocą dwunastu wirującym wraz z kołem wirnikowym pięciootworowych sond kulowych, rozmieszczonych na trzech promieniach po cztery wzdłuż podziałki łopatek. Sondy zamocowane są w piaście za pomocą zacisków umożliwiających ustawienie ich w stosunku do kierunku napływającego strumienia, po zatrzymaniu koła wirnikowego.

Wpływ sił odśrodkowych działających na słup powietrza w przewodach impulsowych wymaga uwzględnienia w obliczeniach odpowiednich współczynników korekcyjnych. Przyjmując, że zmiany ciśnienia w przewodach przebiegają izotermicznie współczynnik korekcyjny, przez który należy pomnożyć zmienioną wartość ciśnienia dla uzyskania ciśnienia rzeczywistego, wynosi:

$$k_o = e^{\frac{\omega^2(r^2 - r_o^2)}{3RT_o}}$$

gdzie:

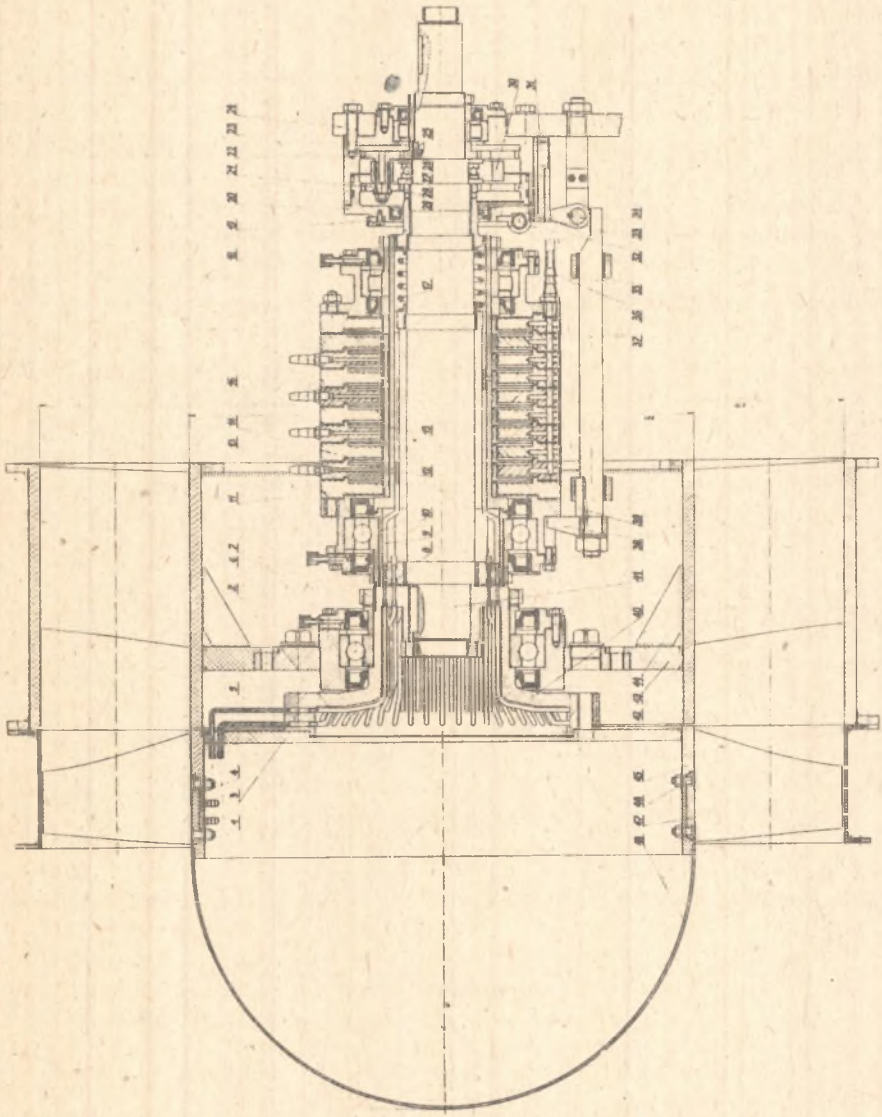
r_o - promień odbioru impulsu ciśnieniowego,

r - promień ustawienia czujnika sondy,

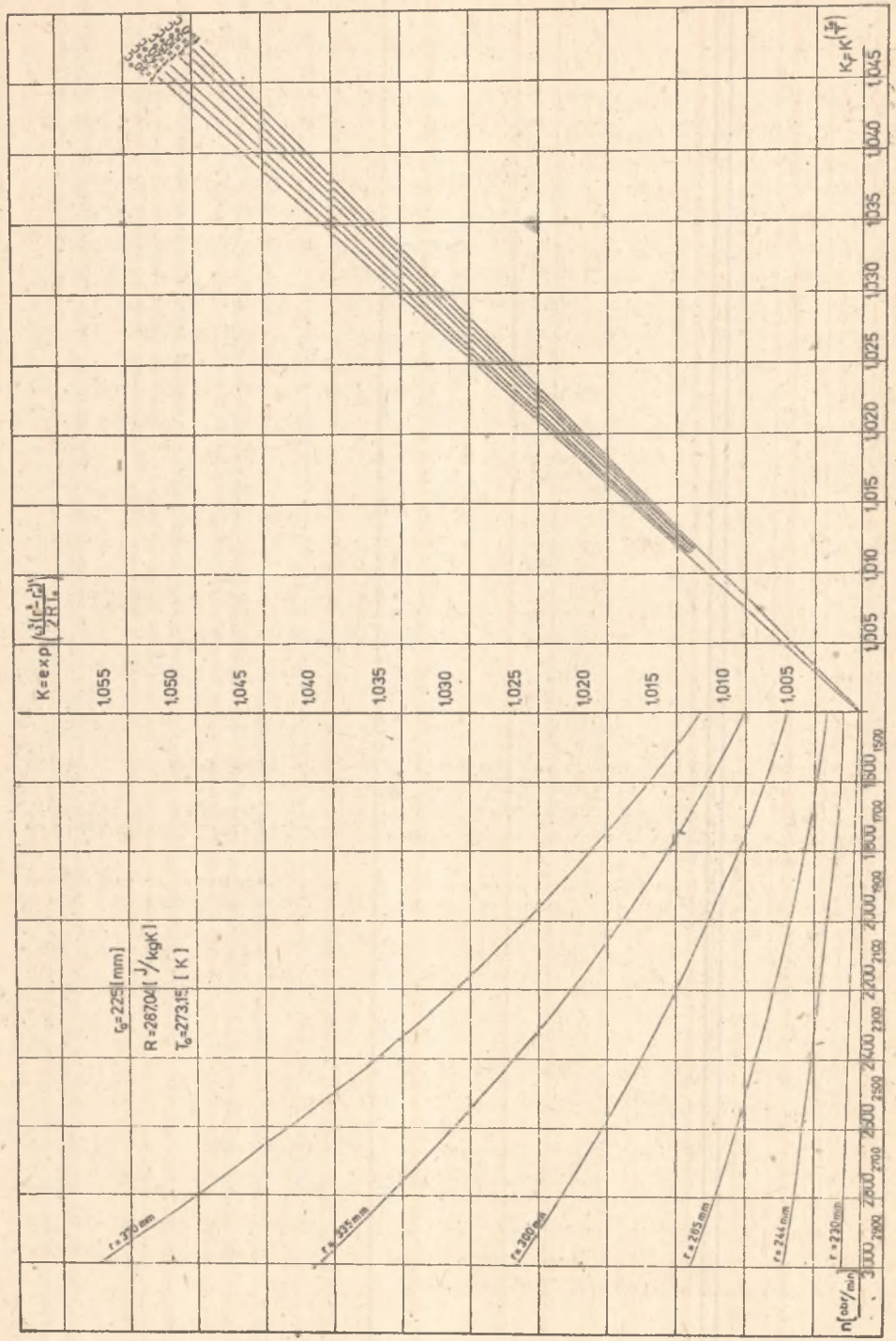
Wpływ temperatury uwzględnia się dodatkowo przez wprowadzenie zależności

$$K_T = K_o^{\frac{T_o}{T}}$$

Zależność współczynnika K_o od liczby obrotów i promienia pomiaru ciśnienia oraz temperatury zestawiono na rys. 5.



Rys. 4. Urządzenie do przekazywania impulsów ciśnieniowych z koła wirnikowego



Rys. 5. Wykresy korekcyjne

4. Uwagi końcowe

Przedstawione stanowisko do badań struktury przepływu w osiowych stopniach sprężających ma na celu doświadczalną weryfikację metod obliczeniowych zarówno w zakresie pierwszego jak i drugiego podstawowego zagadnienia aerodynamiki. Wyniki badań strat całkowitych występujących w stopniu w skojarzeniu z metodami analitycznymi umożliwią rozróżnienie i oszacowanie wielkości strat profilowych, strat występujących w pierścieniowej warstwie granicznej oraz strat przepływów wtórnych.

Przewiduje się również oszacowanie wielkości występujących w obliczeniach pierścieniowej warstwy granicznej, takich jak: parametr kształtu warstwy przyściennej H oraz współczynnik tarcia powierzchniowego [4].

Odrębny problem stanowi doświadczalne określenie związku pomiędzy obciążeniem aerodynamicznym wirujących wieńców łopatkowych, a punktem pracy stopnia oraz w dalszej kolejności wyznaczenie profilowej warstwy przyściennej oraz strat profilowych.

Projekt stanowiska opracowany został w ramach realizacji problemu międzyresortowego MR I.26 "Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych" koordynowanego przez IMP PAN w Gdańsku.

Wykonawstwo stanowiska sfinansowane zostało przez Ośrodek Badawczo Rozwojowy BAROWENT w ramach problemu węglowego 10.1 poz. 23.04.01.

LITERATURA

[1] Instytut Lotnictwa Warszawa: Stoisko do badania przepływu w ruchu względnym na modelowych wentylatorach promieniowych, 1965.

[2] Uszaruk A.: Nowy czujnik do pomiaru temperatur w układzie przepływowym wentylatorów. Materiały na Konferencję "WENTYLATORY PRZEMYSŁOWE" Gliwice-Katowice 1979.

[3] Bitterlich W., Rubner K.: Measured and calculated losses in an Axial-Flow Compressor Stage. Contribution to the Fifth Conference on Fluid Machinery, Budapest, September 1975.

[4] Witkowski A.: Quasirzeczywisty model przepływu w osiowym stopniu sprężającym. ZN Pol.Śl. Energetyka z.66, Gliwice 1978.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ОСЕВОМ КОМПРЕССОРНОМ СТУПЕНИ

Р е з ю м е

Представлено конструкцию и оборудование установки для исследования структуры потока в осевом компрессорном ступени в релятивном и абсолютном движении. Обсуждено принципы измерения основных величин определяющих аэродинамические свойства компрессорной ступени.

ARRANGEMENT FOR TESTING OF THE FLOW STRUCTURE IN AXIAL COMPRESSOR STAGE

S u m m a r y

The construction and testing equipment of the test arrangement for determining of the relative and absolute flow structure in axial compressor stage has been described. The method of aerodynamic test of the axial compressor stages has been discussed.