

Z BADAŃ FOTOSPRĘŻYSTYCH WIRNIKA GENERATORA DUŻEJ MOCY

R. S. DOROSZKIEWICZ, J. LIETZ (WARSZAWA)

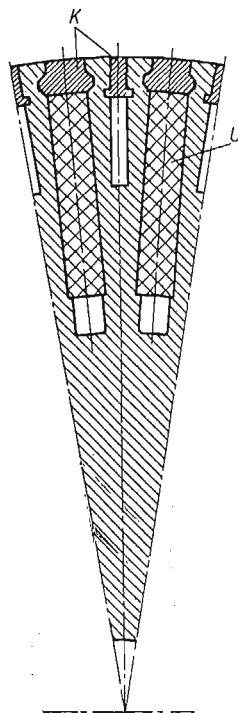
1. Wstęp

Dający się obecnie wyraźnie zanotować postęp w konstrukcji turbogeneratorów dużej mocy, zmierzający do zwiększenia mocy i sprawności maszyny prowadzi do budowy coraz większych jednostek, w których obciążenia mechaniczne i termiczne wirników stają się coraz wyższe. Na obwodowej części wirnika (rys. 1), gdzie w wyfrezowanych żłobkach ułożone są uzwojenia U , zamknięte przy pomocy klinów K , występują w ruchu obrotowym poważne obciążenia siłami bezwładności.

Kształty «zębów» wirnika, podyktowane warunkami konstrukcyjnymi, wydają się z punktu widzenia wytrzymałościowego niezbyt korzystne. W rzeczywistości naprężenia w zębach wirnika w miejscach koncentracji mogą osiągać granicę plastyczności, zwłaszcza w czasie próbnego przeciążenia przy podwyższonych obrotach.

Ten stan rzeczy jest w zasadzie dopuszczalny, tym niemniej znajomość rozkładu naprężeń w zakresie odkształceń liniowo-sprężystych jest cennym materiałem dla konstruktorów maszyn elektrycznych — zwłaszcza, że mechaniczna awaria wirnika turbogeneratora pociąga za sobą katastrofalne następstwa.

Zagadnienie wyznaczania rozkładu naprężeń w wirującym modelu wirnika na drodze fotosprężystości zostało podjęte przez autorów niniejszego artykułu. Przedstawiono tu metodę i technikę badań tego zagadnienia zastosowaną w Pracowni Analizy Naprężeń IPPT PAN.



Rys. 1. Fragment przekroju poprzecznego wirnika generatora

2. Badania

2.1. Ogólne założenia i przyjęta metoda. Ponieważ zarówno przekrój «beczki» wirnika, jak i obciążenie nie zmienia się na dość znacznej długości, spro-

wadzono problem do zagadnienia płaskiego. Poddano badaniu model płaski będący odwzorowaniem przekroju wirnika płaszczyzną prostopadłą do jego osi. Taki model wykonany z materiału fotosprężystego należało obciążyć siłami, jakie powstają przy wirowaniu:

a) siłami masowymi działającymi na materiał modelu wskutek jego wirowania,

b) siłami bezwładności, jakie działają na kliny i uzwojenia wypełniające zębki; siły te przenoszone są na zęby wirnika poprzez zaklinowanie i mają charakter sił zewnętrznych.

Przy modelowym badaniu stanu naprężenia, jaki występuje w elementach wirujących, korzystać można z następujących metod:

A. *Metoda statyczna*, w założeniu swoim nieściśła, nadaje się jedynie do badania naprężeń w niektórych miejscach modelu np. w przekroju, gdzie występują spiętrzenia naprężeń. Polega ona na tym, że obciążamy model statycznie siłami równoważnymi siłom bezwładności, pochodzącymi od mas znajdujących się po jednej stronie badanego przekroju i przyłożonymi możliwie z dala od niego. Wymaga to każdorazowo oszacowania błędu, jaki wynika z przyjętego uproszczenia. Sposób ten stosował W. SZCZEPIŃSKI [1].

B. *Zamrażanie naprężeń w wirującym modelu*. Metoda ta jest zastosowaniem ogólnie znanej w fotosprężystości metody «zamrażania naprężeń» do naszego przypadku. Model zostaje umieszczony na wale specjalnej wirówki o możliwie stałej szybkości obrotowej i wiruje w pojemniku termostatu, w którym temperaturę podnosi się do temperatury «zamrażania» (80-150°C w zależności od materiału modelu) i następnie powoli obniża do temperatury pokojowej. Efekt optyczny wywołany naprężeniami występującymi przy wirowaniu zostaje w ten sposób utrwalony i łatwo go po wyjęciu modelu z wirówki sfotografować w świetle spolaryzowanym. Szybkość potrzebna do wirowania modelu jest stosunkowo niewielka ze względu na znaczną czułość optyczną materiału w podwyższonej temperaturze. Kłopoty sprawia tu jednak bardzo niska w wysokiej temperaturze wytrzymałość materiału fotosprężystego na długotrwałe naprężenia rozciągające, jakie zwykle występują w elementach wirujących.

C. *Metoda polegająca na wirowaniu modelu z dużą szybkością w temperaturze pokojowej i dokonywaniu zdjęć w polaryskopie przy pomocy błyskowego źródła światła*. Ta metoda opisana w dalszym ciągu bardziej szczegółowo stanowi punkt wyjścia dla przeprowadzonych badań z tym, że autorzy nie rezygnują z metod A i B traktując je jako uzupełniające. Podobną metodę polegającą na wykorzystaniu lampy stroboskopowej do zdjęć stosowali M. MILBAUER i M. PERLA [2].

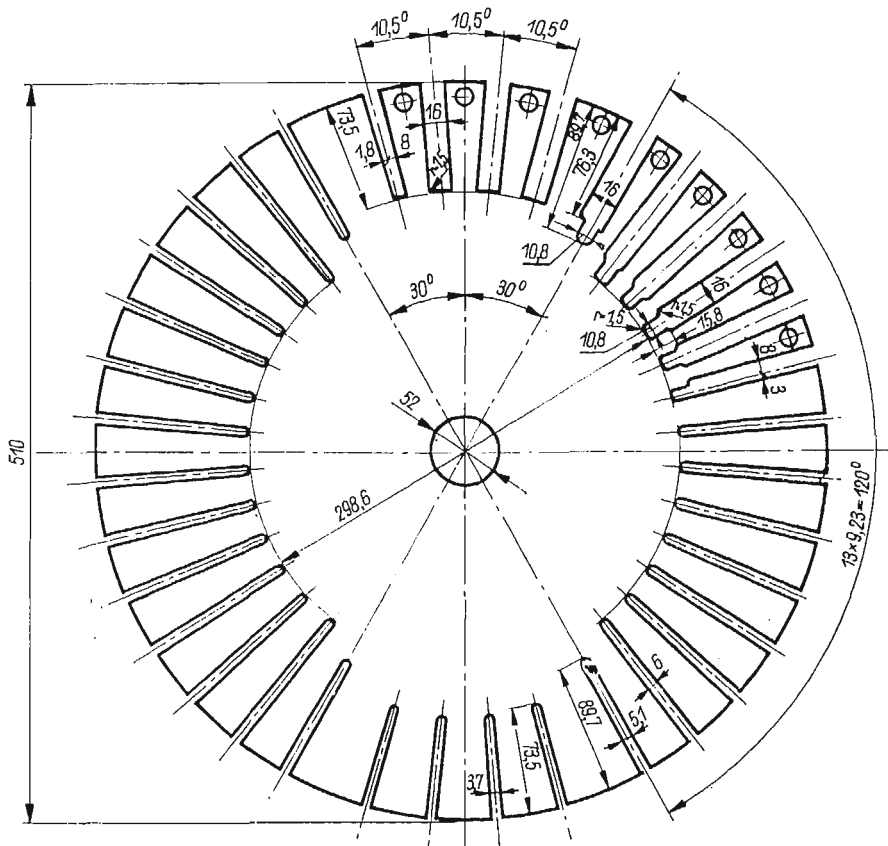
2.2. *Opis badań*. Dla przeprowadzenia badań sporządzono dwa modele:

a) model całego poprzecznego przekroju wirnika (rys. 2),

b) model pojedynczego typowego zęba (rys. 3).

Materiałem były płyty o grubości 10 mm odlane z żywicy epoksydowej Araldit D utwardzanej na zimno.

Model wirnika a) zaprojektowano w ten sposób, że na około 1/4 jego obwodu (wirnik posiada 2 prostopadłe osie symetrii) odwzorowano dna poszczególnych żłobków. Na zewnętrznym obwodzie zęby zaopatrzono w ciężarki, których działanie zastępowało obciążenie rzeczywistego zęba siłami bezwładności klinów i uzwojeń. Pozostałą część obwodu modelu nie podlegającą badaniu wykonano tak, aby zachowana była głębokość poszczególnych żłobków i aby rozłożenie mas w każdym zębie było statycznie równoważne. Ten model pozwalał określić rozkład naprężeń u podstawy zębów i w masywie wirnika.

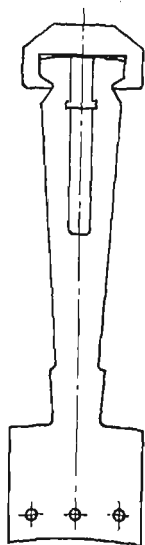


Rys. 2. Rysunek modelu przekroju poprzecznego wirnika

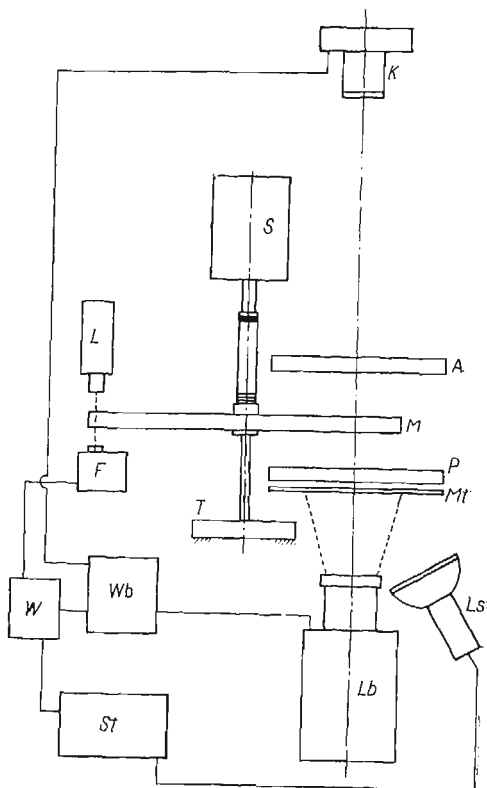
Badanie modelu pojedynczego zęba daje naprężenia w jego trzonie i górnej partii. Nieprawidłowości w stanie naprężenia powstaną jedynie u podstawy modelu. Podczas badań modelu zęba w jego wierzchołku zaczepiono o rowki klinowe bezwładnościowy obciążnik duralowy, który odwzorowywał działanie sił zewnętrznych na ząb.

Badanie modelu wirnika przeprowadzono na stanowisku, którego schemat przedstawia rys. 4, ogólny zaś widok rys. 5. Problem nadania modelowi prędkości obrotowej około 3500 obr/min rozwiązano w ten sposób, że wirnik skła-

dający się z modelu M (rys. 4) umieszczonego na piaście między dwiema tarczami z cienkiego pleksiglasu (dla zmniejszenia oporów powietrza), zawieszony swobodnie na wale silnika S , wiruje w płaszczyźnie poziomej. Ponieważ zawieszenie takiego wirnika jako bąka na elastycznym gumowym wałku jest dynamicznie niestateczne, umieszczono poniżej tłumik olejowy T , który zapewnia stateczność ruchu, tak iż wirnik pracuje zupełnie spokojnie. Wykorzystano tu repulsyjny silnik prądu zmiennego o mocy 0,8 kW z ciągłą regulacją obrotów w szerokim zakresie. W układzie tym oś optyczna polaryskopu musi być oczy-



Rys. 3. Zarys modelu zęba wirnika z obciążnikiem



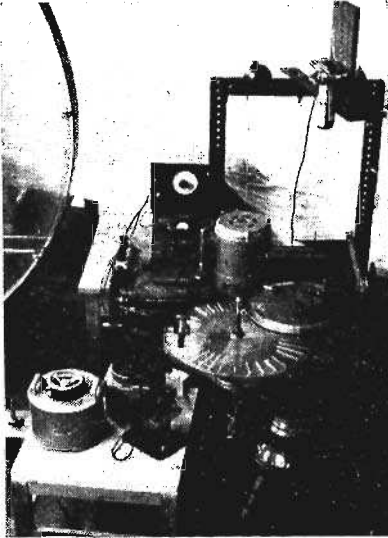
Rys. 4. Schemat stanowiska do fotosprężystego badania modelu wirnika

wicie pionowa. Widzimy więc od dołu kolejno lampę błyskową Lb , matówkę Mt , polaryzator P , analizator A , oraz kamerę fotograficzną K . Jako uboczne źródło światła zastosowano lampę stroboskopową Ls .

Błyski lampy stroboskopowej ściśle zsynchronizowano z obrotami wirnika. Uzyskano to w ten sposób, że na brzegu pleksiglasowej tarczy wirnika nałożono czarną plamkę, która za każdym obrotem przecina wiązkę światła, jaka z lampki L pada na fotokomórkę F . Powstający w ten sposób impuls elektryczny wzmocniony przez wzmacniacz W steruje aparaturą stroboskopową St dając w efekcie

możliwość wizualnej obserwacji nieruchomego dla oka obrazu naprężeń. Przesuwanie pola widzenia po obwodzie modelu uzyskiwano w łatwy sposób drogą zmiany położenia zespołu fotokomórki z lampką.

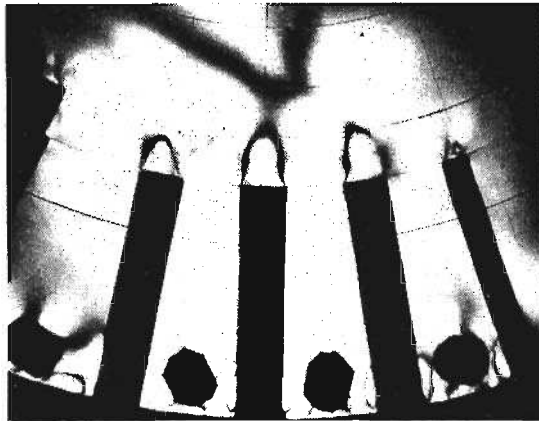
Zdjęć fotograficznych dokonywano przy użyciu typowej lampy błyskowej, w której wyładowanie iskrowe kondensatora $2 \mu\text{F}$ przy napięciu 6 kV daje silny pojedynczy błysk o czasie trwania około 2-2,5 μsek , co umożliwia uzyskanie



Rys. 5. Ogólny widok stanowiska do fotosprężystego badania modelu wirnika



Rys. 6. Zdjęcie zochrom ifragmentu modelu wirnika wykonane metodą błyskową



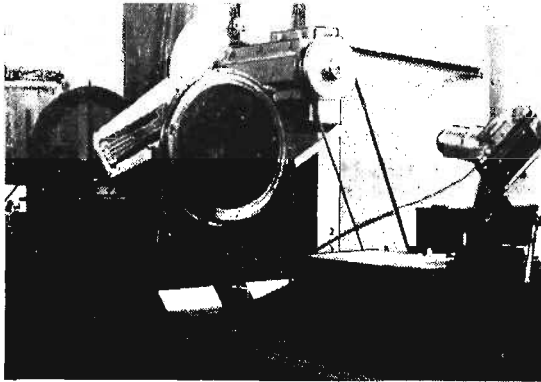
Rys. 7. Zdjęcie izokliny fragmentu modelu wirnika wykonane metodą błyskową

ostrego zdjęcia na filmie o czułości 17/10 DIN. Wyzwolenie błysku pochodzi również od impulsu z fotokomórki z tym, że na drodze od wzmacniacza do lampy umieszczono wyzwalacz błysku *Wb* sprzężony z migawką aparatu fotograficznego. Wyzwalacz błysku, który podobnie jak zespół fotokomórki i wzmac-

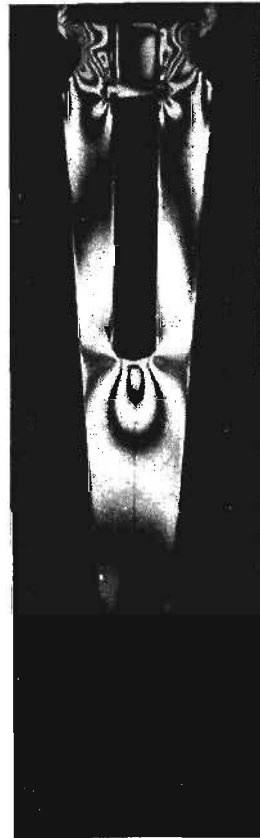
niacz jest urządzeniem wykonanym w Pracowni Analizy Naprężeń, zawiera dodatkowy stopień wzmocnienia oraz obwód tyratronu, który może zapalić się przenosząc pojedynczy impuls na lampę błyskową dopiero po naciśnięciu spustu migawki.

Na rysunku 6 widzimy jedno ze zdjęć izochrom uzyskane przy pomocy opisanego wyżej urządzenia z zastosowaniem monochromatycznego filtra pomarańczowego. Rysunek 7 przedstawia jedno ze zdjęć izoklin.

Badanie modelu pojedynczego zęba przeprowadzono w podobny sposób jak modelu wirnika. Odmienna była tylko część mechaniczna urządzenia. Model przymocowany na obwodzie aluminiowej tarczy i zrównoważony przeciwwagą wirował w płaszczyźnie pionowej na osi wirówki do badań fotosprężystych napędzanej silnikiem asynchronicznym o mocy 2,8 kW. Stosowano szybkości obrotowe od 1000-1700 obr/min. Odległość wierzchołka zęba od osi obrotu wynosiła 45 cm. Oś optyczna polaryskopu była w tym przypadku pozioma, a pozostałe elementy aparatury i ich układ takie same jak w stanowisku opisanym powyżej. Na rysunku 8 widzimy model zęba zamocowany



Rys. 8. Model zęba zamontowany w wirówce do badań fotosprężystych

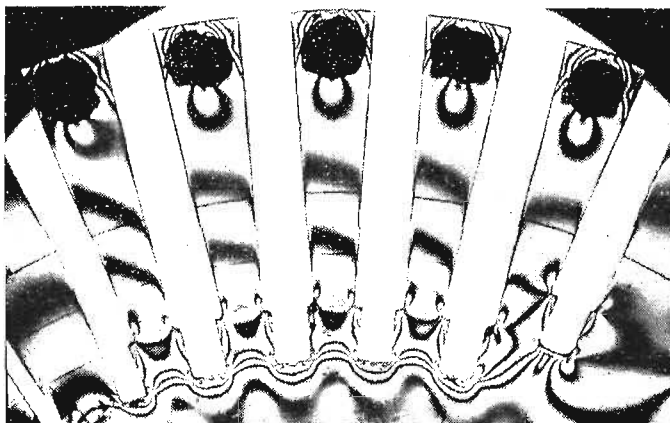


Rys. 9. Zdjęcie izochrom modelu zęba wykonane metodą błyskową

w wirówce «błyskowej», a rys. 9 przedstawia zdjęcie izochrom tego samego modelu, jakie uzyskano przy 1450 obr/min.

Po przeprowadzeniu opisanych badań oba modele posłużyły w następnej fazie do badań metodą zamrażania naprężeń. Model wirnika zamontowano w tym celu na osi wirówki do zamrażania między dwiema okładzinami z blach duralowych i poddano wirowaniu w komorze do wygrzewania plastyków z prędkością około 400 obr/min. Temperaturę w komorze od 110°C obniżano z prędkością około 10° na godzinę. Zdjęcie izochrom wykonane w świetle sodowym przedstawia rys. 10.

Podobnie potraktowano model zęba zakładając go wraz z tarczą i przeciwwagą na wał wirówki z tą różnicą, że badanie oparto na zasadzie superpozycji naprężeń od sił masowych i zewnętrznych. Zastosowano tu metodę superpozycji eksperymentalnej, której technikę laboratoryjną opracował R. S. DOROSZKIEWICZ [3]. W pierwszej fazie uzyskano przy pomocy wirowania zamrożony efekt optyczny wyłącznie od sił masowych (model był bez obciążnika). Następnie



Rys. 10. Zdjęcie «zamrożonego» obrazu izochrom w modelu wirnika w świetle lampy sodowej ten sam model obciążono statycznie, fotografując sumaryczny efekt od sił masowych i zewnętrznych. Ominięto w ten sposób trudność polegającą na tym, że model wirujący w podwyższonej temperaturze wraz z obciążnikiem nie wytrzymałby skoncentrowanych naprężeń rozciągających i uległby zniszczeniu.

3. Uwagi końcowe

Podsumowując doświadczenia uzyskane w toku przeprowadzenia opisanych tu badań można stwierdzić, że metoda zdjęć błyskowych w zastosowaniu do określania stanu naprężenia w elementach wirujących zdała pomyślnie egzamin.

Koszt wyposażenia stanowiska badawczego nie jest nadmiernie wysoki.

Samo przeprowadzenie badania nie zajmuje tak wiele czasu, jak metoda zamrażania, a w każdej chwili można widzieć i kontrolować obraz naprężeń.

Niekorzystną stroną metody jest konieczność stosowania pewnych środków ostrożności i zabezpieczeń przy dużych prędkościach wirujących modeli.

Poza tym, o ile obrazy izoklin są zadowalające, o tyle izochromy wyższych rzędów nie są wyraźne. Wynika to z tego, że lampa błyskowa daje światło zbliżone do białego i przy zastosowaniu filtrów jednobarwnych daje się odczytać około siedmiu rzędów izochrom.

Radykalnej poprawy tego stanu rzeczy oczekiwać można przy zastosowaniu laserowych źródeł światła. Bardzo krótki czas błysku, stosunkowo duża jego energia i ściśle monochromatyczne światło stwarza możliwości doskonalenia metod fotoprężystości zwłaszcza w zakresie badań dynamicznych.

Literatura cytowana w tekście

- [1] W. SZCZEPIŃSKI, *Badanie kształtu rowków wirników generatorów dużej mocy metodą elasto-optyczną*, I Sympozjum z zakresu elastoptyki PTMTS, Warszawa 1962.
- [2] M. MILBAUER, M. PERLA, *Fotoelasticimetric a příklady jejího použití*, Nakladatelství Československé Akademie Věd, Praga 1961, 116-139.
- [3] R. S. DOROSZKIEWICZ, *New Photoelastic Method for Determining the State of Stress in Dams*, Symposium on Concrete Dam Models, October 14-19 październik 1963, Paper No. 9, Lizbona.

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В статье рассматривается вопрос о нахождении распределения напряжений в роторе турбогенератора с помощью оптического метода.

Приводятся общие предпосылки задачи сведенной к плоской проблеме.

Произведен короткий обзор оптических методов применяемых при исследованиях вращающихся деталей, а также описывается примененная авторами техника эксперимента, который состоит в фотографировании в поляризованном свете модели вращающейся с большой скоростью, причем источником освещения является лампа-молния. В описании испытательного стенда обращено внимание на некоторые его усовершенствования, как свободная подвеска вращающейся модели на упругом валу с масляным демпфером и связь между затвором фотоаппарата и фотоэлементом с лампой-молнией.

На основании проведенных исследований доказана пригодность метода к испытаниям такого типа, хотя (как следует из доступной автором литературы) в данный момент этот метод широко не применяется.

Summary

ON THE PHOTO-ELASTIC INVESTIGATION OF A GENERATOR ROTOR

The paper concerns the method of determination of the stress distribution in a turbogenerator rotor by means of photoelastic methods. General formulation of the problem reduced to the plane case is presented.

A short survey of the photoelastic methods is given as applied to the investigation of rotating elements, and the technique used by the authors is described. It consists in making photoelastic photographs of a rapidly rotating model by using flash sources of light. In describing the experimental stand, attention is drawn to certain improvements, e.g. free suspension of the rotating model on an elastic shaft with oil damper and the coupling of the shutter of the camera with the photoelastic cell and flash lamp.

On the basis of the performed experiments it was proved that the method is applicable to this kind of investigations, although (this follows from the available literature) the method has not been widely used.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 12 kwietnia 1964 r.