

Janusz Petryna, Maciej Sułowicz, Łukasz Puzio, Politechnika Krakowska, Kraków  
Arkadiusz Dziechciarz, Technical University of Cluj Napoca, Rumunia

## WYKRYWANIE ZWARĆ ZWOJOWYCH W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH NA STACJI PRÓB Z WYKORZYSTANIEM CEWKI DO POMIARU STRUMIENIA POOSIOWEGO

### DETECTION OF INTER-TURN SHORT CIRCUITS IN ELECTRICAL MACHINES AT A TESTING STATION USING A COIL FOR MEASURING THE AXIAL FLUX

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań stojana maszyny prądu przemiennego na stacji prób z wykorzystaniem cewki do pomiaru strumienia poosiowego. Badania przeprowadzono dla generatora 75 kW, dla którego wykonano proces wymiany uzwojenia i przed zaimpregnowaniem uzwojeń poddano stojan maszyny testom. Na stacji prób podczas badań międzyoperacyjnych przy stosowaniu tradycyjnych metod nie stwierdzono uszkodzenia maszyny. Jednak na występowanie zwarć zwojowych wskazywała użyta później metoda surge test. Podobnie na występowanie zwarć zwojowych wskazywała zaproponowana przez autorów i zastosowana metoda diagnostyczna z wykorzystaniem cewki do pomiaru strumienia poosiowego.

W artykule opisano metodę pomiarów, interpretację uzyskanych wyników oraz zamieszczono wyniki analiz i obliczeń połowych potwierdzających zmianę symptomów diagnostycznych dla maszyny zdrowej i maszyny, w uzwojeniach której występują zwarcia zwojowe. W podsumowaniu artykułu przedstawiono propozycję, w jaki sposób stosować tę metodę badań do wykrywania uszkodzeń stojana na stacji prób.

**Abstract:** The paper presented the results of an AC machine stator tests at the testing station using the coil for measuring the axial flux. The study was conducted for the 75 kW generator for which the replacement of the winding was performed and before impregnating the winding the stator was subjected to testing.

At the testing station during interop tests using conventional methods, there was no symptoms of damage to the machine detected. However, a surge test method used later, pointed a winding inter-turn short circuit. Similarly, the inter-turn short circuit of the winding was pointed by proposed and applied by the authors diagnostic method to use a testing coil to measure the axial flux. In the article the method of measurement and interpretation of the results are described in details, and the results of analyzes and field calculations confirming the change in the diagnostic symptoms for a sound machine and the machine with the winding coil inter-turn short circuits are published as well. In conclusion, the article presents a proposal on how to use this method of stator damage detection at a testing station.

**Słowa kluczowe:** strumień poosiowy, badanie uzwojeń, zwarcia zwojowe, diagnostyka uszkodzeń, modelowanie zwarć, obliczenia połowe

**Keywords:** axial flux, winding testing, inter-turn short circuits, diagnosing damages, modeling faults, field calculations

### 1. Wstęp

Diagnostyka stanu uzwojeń podczas prac związanych z przezwojeniem uzwojenia stojana jest bardzo ważna i powinna być wykonana przynajmniej w kilku fazach realizacji wymiany uzwojenia. Do kontroli jakości wykonanych prac w celu wykrycia zwarć zwojowych, które mogą wystąpić w nowo formowanych uzwojeniach, można stosować drogie, jak na rynek polski urządzenia do kontroli stanu uzwojeń [4]. Urządzenia te do określenia stanu izolacji wykorzystują metodę surge test, powszechnie stosowaną do badania izolacji w remontowanych maszynach na stacji prób.

W przypadku, gdy nie dysponujemy kosztownym urządzeniem do kontroli stanu izolacji, możemy użyć prostszych narzędzi i prostej metody opartej na pomiarze strumienia rozproszenia lub strumienia poosiowego.

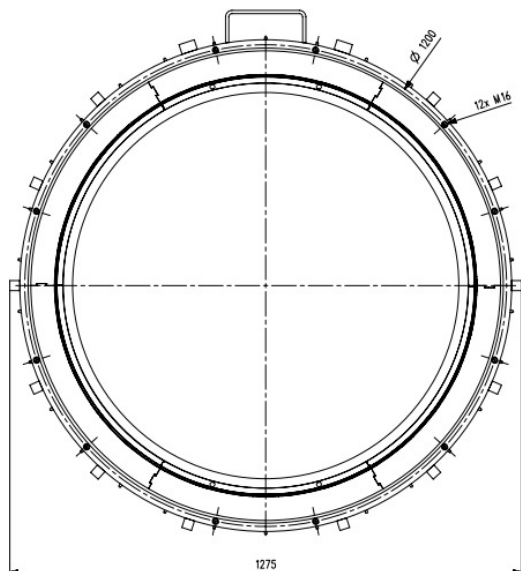
W przypadku wystąpienia uszkodzenia związanego ze zwarcie zwojowym wewnątrz cewki lub zwarcie pomiędzy cewkami znajdującymi się w tym samym żłobku stojana następuje zmiana rozkładu strumienia. Te zmiany mogą być zarejestrowane przy pomocy zwykłej cewki posiadającej wystarczającą ilość zwojów, do rejestracji sygnału napięciowego na zaciskach

cewki. W przypadku symetrii maszyny rozkład strumienia i tym samym sygnał diagnostyczny dla każdej z faz będzie bardzo podobny. W przypadku wystąpienia zwarcia wewnątrz cewki lub zwarcia między sąsiednimi cewkami wartości sygnałów z cewki pomiarowej będą znacząco różnić się przy zasilaniu poszczególnych faz stojana.

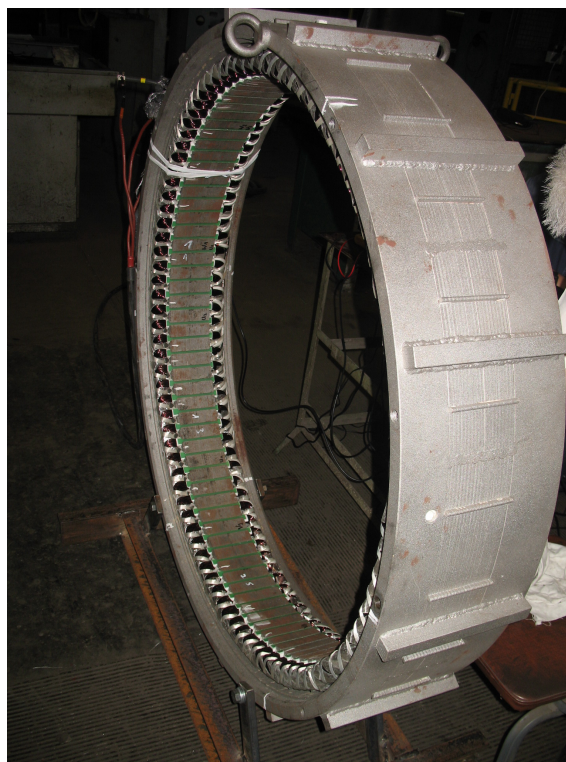
Autorzy od kilku lat rozwijają metody wykorzystujące strumień unipolarny do skutecznej diagnostyki stanu maszyny. W tym artykule zostanie pokazana metoda diagnostyki stanu uzwojeń prototypowego generatora pracującego w trudnych warunkach środowiskowych, który podczas eksploatacji uległ awarii i w trakcie wykonywania remontu dzięki stosowaniu badań kontrolnych po każdej jego fazie uniknięto impregnacji uzwojeń, w których występowały zwarcia zwojowe.

## 2. Badany generator

Obiektem badań był generator synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi, które rozmieszczone były na powierzchni cylindrycznego wirnika. Szczegółowo budowa i własności eksploatacyjne maszyny zawarto w pracach [1],[2]. Maszyna charakteryzowała się nietypowymi wymiarami zewnętrznymi ze względu na relatywnie dużą średnicę stojana 1250 mm w odniesieniu do długości pakietu jarzma 100mm.

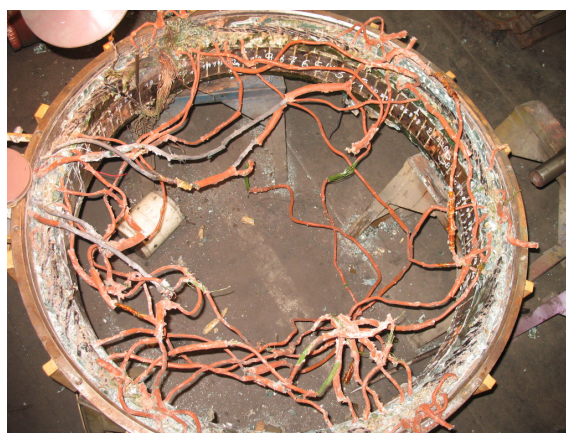


Rys. 1. Przekrój stojana badanego generatora



Rys. 2. Widok stojana badanego generatora

Taka konstrukcja generatora pozwoliła na jego zintegrowanie z prototypem rurowej turbiny wodnej o osiowym przepływie wody. W tym wykonaniu 28 biegunów wirnika prądnicy umieszczonych było na obwodzie łopatek rotora turbiny, zatem wyeliminowano mechanizm przekładniowy oraz związane z nim koszty zakupu i konserwacji. Jednak z powodu bezpośredniego kontaktu magnesów oraz uzwojeń stojana z przepływającą wodą, konieczne było zabezpieczenie uzwojeń kompozytem epoksydowym.



Rys. 3. Widok uszkodzonego stojana generatora

Generator ten podczas kilkumiesięcznej eksploatacji w trudnych warunkach (w wodzie) uległ awarii. Podczas długotrwałej pracy rezystancja

izolacji zmniejszyła się na tyle, że doszło do zwarcia pomiędzy uzwojeniami i nastąpiło uszkodzenie uzwojenia całego stojana. Widok maszyny z uszkodzeniem stojana przedstawiono na rys.3.

### 2.1. Problem z uzwojeniem generatora przed impregnacją

W ramach prac badawczo-rozwojowych nad wspomnianym uszczelnieniem należało dokonać przezwojenia stojana, aby możliwe były dalsze testy kompozytów. Prace remontowe oraz diagnostyczne uzwojenia wykonano na terenie zakładu remontującego maszyny elektryczne w Krakowie. Widok stojana po przezwojeniu przed planowaną impregnacją uzwojeń przedstawiono na rys.4.



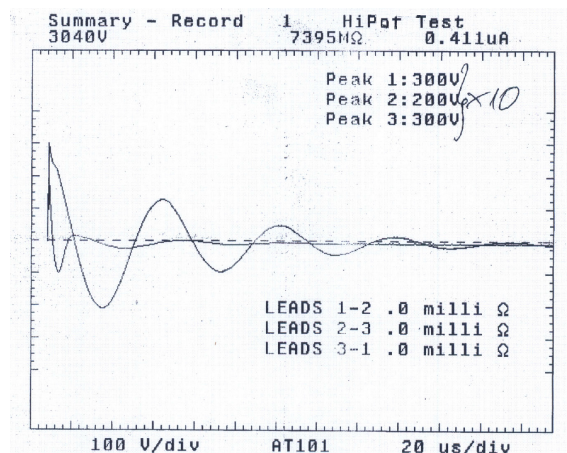
Rys. 4. Widok stojana generatora podczas przezwojenia

Po umieszczeniu cewek w poszczególnych żłobkach dokonano skojarzenia uzwojeń stojana i poddano je próbom napięciowym i innym rutynowym badaniom przed impregnacją uzwojeń i wykonaniem uszczelnień materiałami kompozytowymi. Rutynowe metody badań stosowane na stacji prób nie wykazywały zwarcie w uzwojeniach stojana.

Badania stanu izolacji generatora przed impregnacją wykonano metodą surge test z użyciem przyrządu D12R firmy Baker Instrument [4]. Podczas badań przy standardowych ustawieniach przyrządu (napięcie próby 3000V) okazało się, że w układzie izolacyjnym występuje zwarcie zwojowe w fazie lub międzyfazowe zwarcie zwojowe, co było widoczne na dwóch różnych przebiegach sygnału wymuszenia i odpowiedzi podczas obserwacji wyników testu na oscylogramie.

Na rys.5 przedstawiono fragment raportu z badań przyrządem D12R firmy Baker Instrument,

aktualnie SKF, na którym widoczna jest wyraźna różnica pomiędzy sygnałem generowanym do uzwojenia, a sygnałem zarejestrowanym jako odpowiedź uzwojenia.

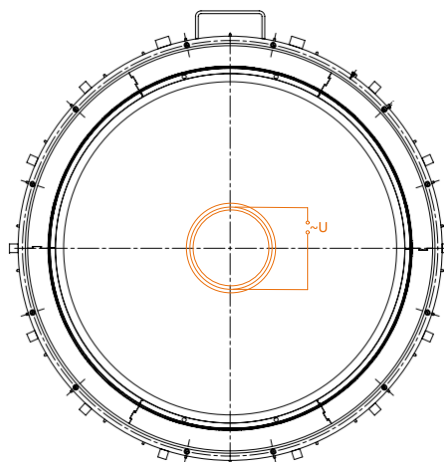


Rys. 5. Oscylogram z badań stanu izolacji generatora przed impregnacją metodą surge test przyrządem D12R firmy Baker Instrument

Z powodu dwóch rozbieżnych wyników badań: przyrządem D12R i rutynowymi metodami stosowanymi na stacji prób w zakładzie remontującym maszyny elektryczne, postanowiono zweryfikować stan uzwojeń jeszcze innymi metodami pomiarowymi, aby rozstrzygnąć, czy jest zwarcie w uzwojeniach stojana, czy go nie ma.

### 3. Wyniki pomiarów na stacji prób

Do badań na wykrycie zwarcie zwojowych postanowiono zastosować pomiar strumienia pochodzącego od uzwojeń, wewnątrz stojana w osi symetrii maszyny.



Rys. 6. Idea pomiaru strumienia

Schemat ideowy pomiarów strumienia w środku osi symetrii stojana przedstawiono na rys.6.

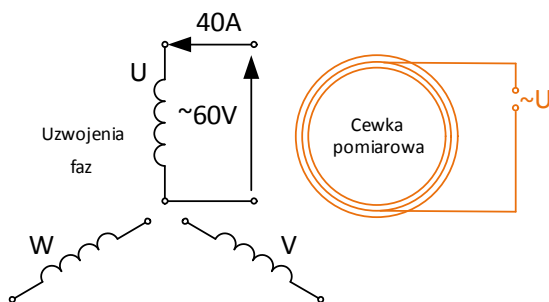
Sygnal z cewki mierzono woltmierzem oraz podano na wejście analogowe karty pomiarowej NI USB 6259, która zarejestrowała sygnał z cewki, prąd i napięcie zasilające uzwojenia stojana. Sygnal rejestrowano z częstotliwością 10kHz przy pomocy dedykowanego oprogramowania w środowisku Matlab. Zestawione stanowisko do badań przedstawiono na rys.7.



Rys. 7. Zestawiony układ pomiarowy do rejestracji sygnałów diagnostycznych

Podczas badań zasilano stojan maszyny obniżonym napięciem z autotransformatora wymuszając w różnie skojarzonych uzwojeniach poszczególnych faz prąd około 40A. Na początku wykonano 3 pomiary dla nieskojarzonych uzwojeń poszczególnych faz. Zasilono uzwojenie każdej z faz obniżonym napięciem około 60V i wymuszono prąd 40A.

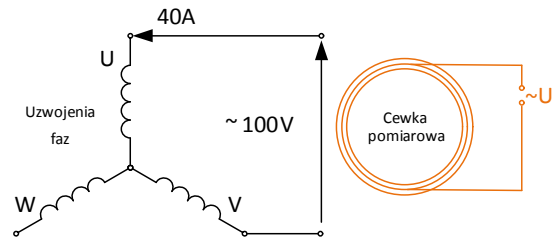
Schemat ideowy pomiaru pokazano na rys.8.



Rys. 8. Schemat ideowy stosowany do lokalizacji zwarcia zwojowych w uzwojeniach stojana badanego generatora

Dla każdego przypadku pomiarowego zmierzono i zarejestrowano sygnał napięciowy na wyjściu cewki pomiarowej umieszczonej wewnątrz stojana. Zarejestrowano sygnały napięciowe odpowiednio dla każdej fazy U, V, W o wartościach skutecznych: 0,31 V, 0,46 V i 0,47 V. W tym wypadku sygnał w pierwszej

fazie nieznacznie odbiegał od pozostałych wartości napięć dla fazy V i W.



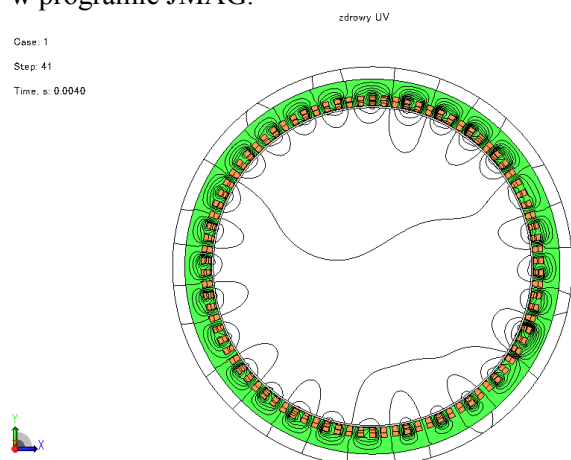
Rys. 9. Schemat ideowy stosowany do lokalizacji zwarcia międzyfazowych w uzwojeniach stojana badanego generatora

Przy zasilaniu uzwojeń skojarzonych w gwiazdę wyniki pomiarów sygnału z cewki pomiarowej umieszczonej wewnątrz stojana w jego osi symetrii były następujące: dla faz U-V 0,16V, dla faz V-W 0,16V, dla faz W-U 0,01 V. Tym razem sygnał mierzony na zaciskach cewki pomiarowej w przypadku zasilania faz W-U był kilkanaście razy mniejszy, niż w pozostałych dwóch przypadkach. Tak duża asymetria rejestrowanego sygnału pozwalała przypuszczać, że jednak w dwuwarstwowym uzwojeniu stojana występuje zwarcie zwojowe pomiędzy cewkami z dwóch różnych faz, spotykającymi się w jednym ze wspólnych żłobków.

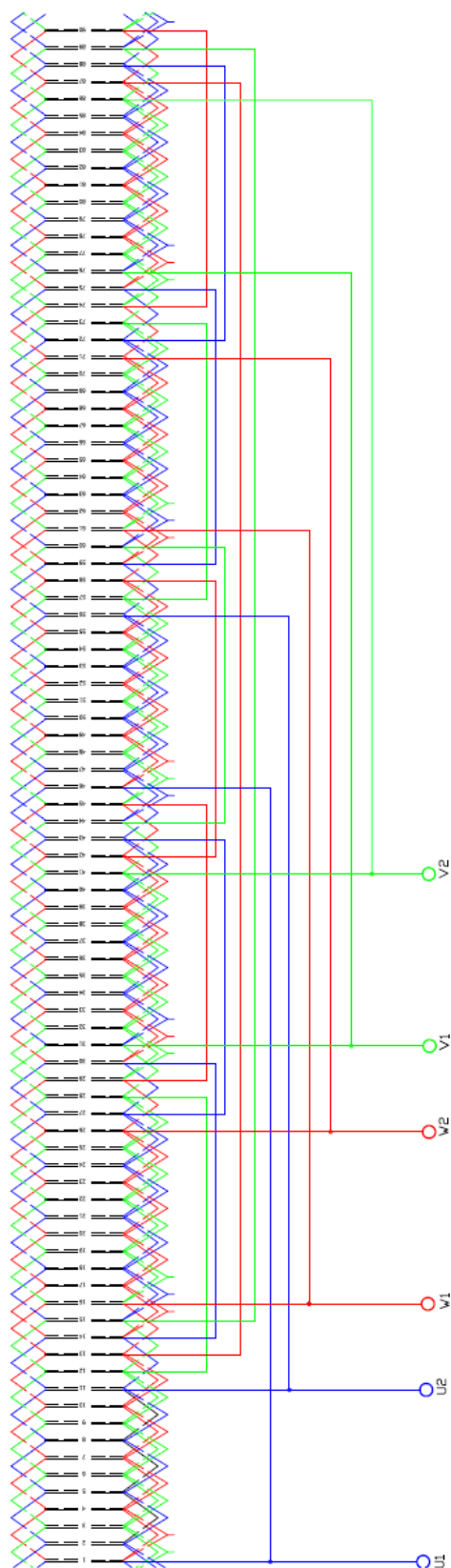
#### 4. Obliczenia polowe mające na celu potwierdzenie zwarcia w uzwojeniu stojana

W celu potwierdzenia słuszności stawianej diagnozy co do występowania międzyfazowego zwarcia zwojowego, w uzwojeniu stojana zamodelowano geometrię 2D stojana maszyny w programie JMAG.

Case: 1  
Step: 41  
Time: s: 0.0040



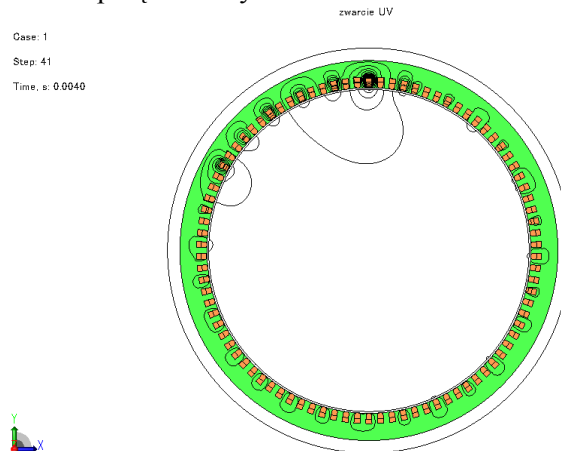
Rys. 10. Widok przekroju stojana modelowanego generatora w programie JMAG, rozkład strumienia, symetria elektryczna uzwojeń



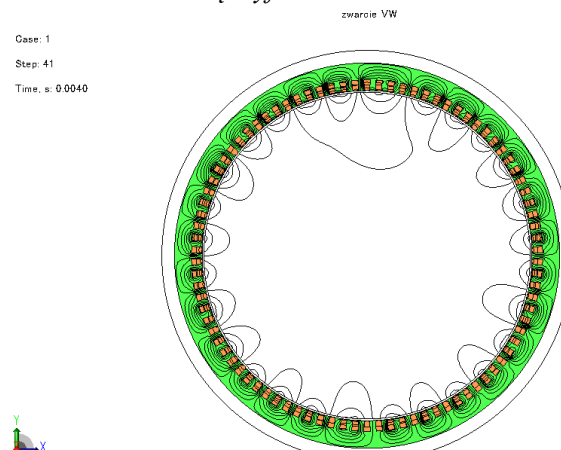
Rys. 11. Schemat uzwojenia stojana badanego generatora

Odwzorowano schemat połączeń uzwojenia przedstawionego na rys.11.

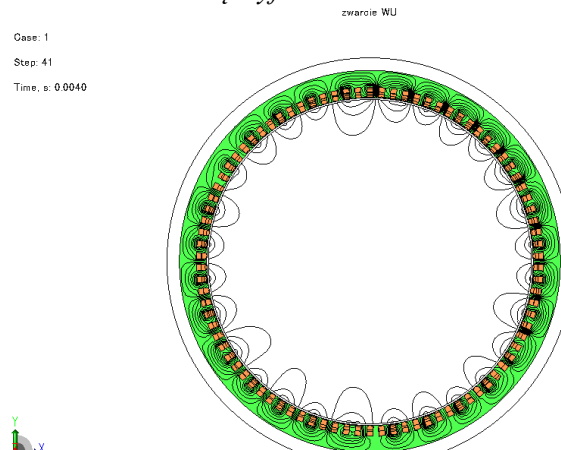
Przeprowadzono obliczenia dla sześciu przypadków zasilania uzwojeń maszyny według schematów połączeń z rys.8 i 9.



Rys. 12. Rozkład strumienia przy zasilaniu faz U-V – zwarcie międzyfazowe w żłobku nr 1



Rys. 13. Rozkład strumienia przy zasilaniu faz V-W – zwarcie międzyfazowe w żłobku nr 1

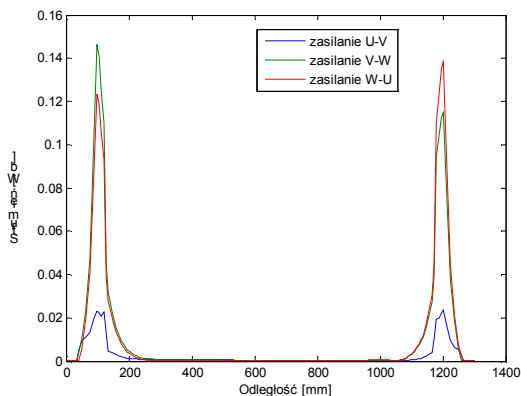


Rys. 14. Rozkład strumienia przy zasilaniu faz W-U – zwarcie międzyfazowe w żłobku nr 1

Na rys.12 do rys.14 przedstawiono rozkłady strumienia wewnątrz stojana maszyny, w przypadku zwarcia międzyfazowego w żłobku, w którym spotykają się cewki dwu faz W i U.

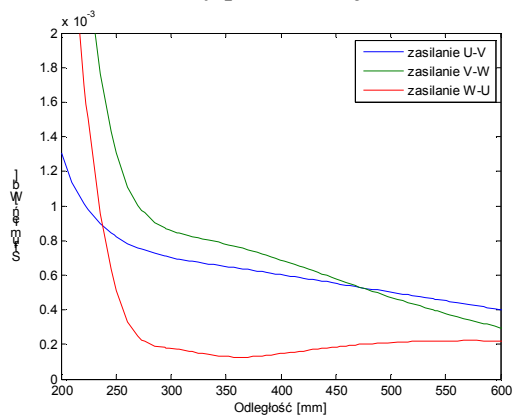
## 5. Interpretacja wyników obliczeń

Na rys.15 przedstawiono wykres rozkładu strumienia wzdłuż osi x dla poszczególnych trzech sposobów zasilania uzwojeń stojana badanej maszyny w przypadku zwarcia międzyfazowego w żłobku nr 1.



Rys. 15. Rozkład strumienia wzdłuż osi x dla trzech przypadków zasilania stojana przy zwarciu międzyfazowym w żłobku nr 1

Na rys. 16 można zauważyć, że w przypadku występowania zwarcia wartość strumienia w jednej fazie maleje kilkukrotnie, co potwierdza wyniki pomiarów napięcia na zaciskach cewki pomiarowej wykonanych przy pomocy woltomierza i karty pomiarowej.



Rys. 16. Rozkład strumienia wzdłuż osi x stojana dla trzech przypadków zasilania stojana przy zwarciu międzyfazowym w żłobku nr 1 w miejscu umieszczenia cewki

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono alternatywny sposób wykrywania zwarć zwojowych i międzyfazowych w stojanach maszyn prądu przemiennego poprzez pomiar strumienia wewnątrz stojana w jego osi symetrii. Zaletą metody jest łatwość pomiaru oraz niezwykle proste urządzenia pomiarowe – zwykła cewka bezdrzeniowa plus

woltomierz oraz autotransformator zasilający z pomiarem napięcia i prądu. Wykonanie samego pomiaru trwa krótko, nie wymaga skomplikowanych procedur i daje natychmiastowy wynik.

Zaprezentowane tu wyniki obliczeń połowych potwierdzają tezę, że zwarcie nawet małej liczby zwojów powoduje wyraźne deformacje pola magnetycznego wewnątrz maszyny, łatwo mierzalne na zewnątrz. Jak pokazano, metoda ta jest na równi skuteczna z testami wykonanymi przy pomocy aparatury pomiarowej do badań surge test, za to o wiele tańsza i dla uzwojeń bezpieczniejsza, gdyż gwarantuje nastawienie prądu zasilania o właściwym natężeniu.

## 7. Literatura

- [1]. Borkowski D., Węgiel T.: *Optymalizacja przetwarzania energii dla małych elektrowni wodnych z generatorami pracującymi ze zmienną prędkością obrotową*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 92, 2011, wyd. KOMEL, s. 121-126.
- [2]. Borkowski D., Węgiel T.: *Small Hydropower Plant With Integrated Turbine-Generators Working at Variable Speed*, Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.28, no.2, pp.452-459, June 2013.
- [3]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A., Guziec K.: *Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 99, 2013, wyd. KOMEL, s. 85-90.
- [4]. Baker D12R surge testing. Baker Instrument Company, an SKF Group Company. [www.bakerinst.com](http://www.bakerinst.com)

## Autorzy

dr inż. J. Petryna, [jpetryna@pk.edu.pl](mailto:jpetryna@pk.edu.pl)  
 dr inż. M. Sułowicz, [msulowicz@pk.edu.pl](mailto:msulowicz@pk.edu.pl)  
 mgr inż. Ł. Puzio, [uziek@interia.pl](mailto:uziek@interia.pl)  
 Politechnika Krakowska, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii  
 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24  
 mgr inż. A. Dziechciarz  
[arkadiusz.dziechciarz@gmail.com](mailto:arkadiusz.dziechciarz@gmail.com)  
 Technical University of Cluj Napoca, Rumunia

## Informacje dodatkowe

Praca została wykonana w ramach badań własnych autorów, we współpracy z firmami zainteresowanymi rozstrzygnięciem wątpliwości, czy w uzwojeniach stojana badanej maszyny mogło dojść do zwarć zwojowych lub zwarć międzyfazowych.