

ROZRUSZNIKI WIOPRĄDOWE - 50 LAT BADAŃ NA WYDZIALE ELEKTRYCZNYM POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Krzysztof PIENKOWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
SEP O/Wrocław, Koło Nr 69
tel.: 71 320 34 67 e-mail: krzysztof.pienkowski@pwr.edu.pl

Streszczenie: W artykule opisano historię 50 lat badań rozruszników wioprządowych prowadzonych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Przedstawiono opisy budowy opracowanych rozruszników wioprządowych. Przedstawiono sylwetki głównych uczestników zespołu badawczego rozruszników wioprządowych i podano tematykę prowadzonych przez nich prac badawczych. Wyszczególniono najważniejsze osiągnięcia badawcze i wdrożeniowe zespołu badawczego.

Słowa kluczowe: rozrusznik wioprządowy, historia badań, zespół badawczy, tematyka badań, osiągnięcia badawcze i wdrożeniowe.

1. WPROWADZENIE

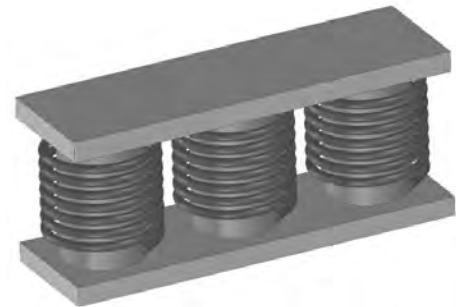
W układach napędowych średniej i dużej mocy stosowane są powszechnie silniki AC: silniki indukcyjne klatkowe i pierścieniowe, silniki synchroniczne i asynchroniczne. Rozruch tych silników sprawia wiele problemów technicznych związanych z poborem dużych prądów rozruchowych, ograniczeniem stopnia nagrzania silnika, zapewnieniem uzyskania odpowiedniej wartości momentu rozruchowego oraz pożądanego czasu rozruchu. Do realizacji tych zadań są stosowane odpowiednie rozruszniki. W przypadku silników indukcyjnych pierścieniowych rozruszniki są przyłączane za pośrednictwem pierścieni ślizgowych do obwodu wirnika silnika. Natomiast w przypadku silników indukcyjnych klatkowych i silników synchronicznych stosowane są rozruszniki stojanowe włączane do obwodu stojana silnika.

Do rozruszników o oryginalnej konstrukcji i działaniu, przeznaczonych do rozruchu silników prądu zmiennego należą rozruszniki wioprządowe. Rozruszniki tego typu były przez ponad 50 lat przedmiotem badań naukowych i wdrożeń przemysłowych prowadzonych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej (oznaczenie skrótowe - WE PWr). W artykule opisano około 50-letnie prace badawcze z tematyki rozruszników wioprządowych prowadzone przez zespół naukowy WE PWr. Opis osiągnięć poszczególnych członków zespołu badawczego został opracowany na podstawie baz danych DONA Biblioteki Głównej Politechniki Wrocławskiej [1], opracowania [2] oraz osobistych wspomnień autora niniejszego artykułu.

2. BUDOWA ROZRUSZNIKÓW WIOPRĄDOWYCH

Budowa typowego rozrusznika wioprządowego, zbliżona do konstrukcji 3-kolumnowego dławika 3-

fazowego została przedstawiona na rysunku 1. Rozrusznik wioprządowy składa się z trzech kolumn wykonanych w postaci elementów z litych materiałów ferromagnetycznych (stali o zwykłej konstrukcji). Kolumny są połączone magnetycznie w części dolnej i górnej za pomocą jarzm magnetycznych wykonanych z litych płyt stalowych lub z blach magnetycznych. Na poszczególnych kolumnach rozrusznika wioprządowego są nawinięte uzwojenia fazowe rozrusznika, które najczęściej są łączone w gwiazdę [3, 4, 5].



Rys.1. Budowa rozrusznika wioprządowego [4]

Zasada działania rozruszników wioprządowych jest oparta na zjawisku powstawania strat mocy od prądów wirnych w litym rdzeniu ferromagnetycznym, indukowanych przepływem prądów przemiennych w uzwojeniu rozrusznika. W rozrusznikach wirnikowych te straty mocy są zmienne w funkcji częstotliwości prądów wirnika, czyli poślizgu silnika indukcyjnego pierścieniowego. Stąd rozrusznik wioprządowy stanowi obwód o samoczynnie malejącej impedancji w funkcji rosnącej prędkości kątowej wirnika silnika. Zapewnia to uzyskanie bezstopniowego przebiegu momentu rozruchowego oraz odpowiednie zmniejszenie wartości prądów rozruchowych silnika [3,6].

3. OPISY KONSTRUKCJI OPRACOWANYCH ROZRUSZNIKÓW WIOPRĄDOWYCH

Zespół badawczy na Wydziale Elektrycznym PWr opracował i opatentował wiele różnych konstrukcji rozruszników wioprządowych [1, 3, 6, 7]. Odmienności konstrukcji rozruszników są zależne od rodzaju kształtów kolumn rdzenia ferromagnetycznego rozrusznika [3, 6]. Ma to istotny wpływ na sposób wnikania fali pola elektromagnetycznego do rdzenia i zmienność parametrów elektromagnetycznych rozrusznika. W przypadku rdzenia

wykonanego z grubościennej rury stalowej bez szwu występuje jednostronne wnikanie fali płaskiej. W przypadku rury ze szczeliną podłużną występuje dwustronne wnikanie fali płaskiej. W rozruszniku wirowym z rdzeniem o kolumnach wielokrotnych, rdzeń ma postać kolumny wykonanej z wiązki prętów i występuje tu wnikanie fali cylindrycznej. Kolumny wielokrotne mogą stanowić również kombinację elementów o różnych rodzajach wnikania fali elektromagnetycznej (np. rury ze szczeliną i wiązki prętów), co pozwala na szersze możliwości kształtowania zmienności parametrów rozrusznika wirowego [3].

Inną odmienną konstrukcją rozrusznika wirowego opracowaną przez zespół naukowy był rozrusznik segmentowy. Rozrusznik ten jest zbudowany z elementów jednofazowych, nazywanych segmentami. Rdzenie segmentów są wykonane w postaci dwóch równolegle ustawionych litych płyt stalowych na których jest nawinięte jednowarstwowe uzwojenie. W rozruszniku tym występuje wnikanie dwustronne płaskiej fali elektromagnetycznej. Wykonanie rozrusznika w postaci segmentowej zapewniało symetrię magnetyczną i elektryczną w każdej fazie i umożliwiało typizację elementów rozrusznika [3].

Do innych istotnych zalet rozruszników wirowych należą: prosta budowa, małe wymiary, niski koszt wytworzenia, duża niezawodność pracy, brak elementów ruchomych i czynnika chłodzącego, brak konieczności obsługi i konserwacji.

4. OSIĄGNIĘCIA ZESPOŁU BADAWCZEGO W ZAKRESIE BADAŃ ROZRUSZNIKÓW WIROWYCH

4.1. Wykonane prace doktorskie

Powstanie zespołu badawczego do badań rozruszników wirowych zostało zainicjowane przez Władysława Kędziora (rys. 2) w 1964 roku, który w tym samym roku podjął pracę naukową w Katedrze Elektrycznych Układów Napędowych PWr. Skład zespołu badawczego obejmował dodatkowo kilku młodych pracowników naukowych Katedry.



Rys.2. Doc. dr inż. Władysław Kędzior

Prowadzone przez W. Kędziora pionierskie prace badawcze dotyczące rozruszników wirowych zostały zakończone uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych, nadanego w 1967 r. przez Radę Wydziału Elektrycznego PWr na podstawie pracy doktorskiej: "Rozruch silników indukcyjnych pierścieniowych przy pomocy rozruszników wirowych" (promotor pracy - prof. Feliks Andrzejewski). W 1972 r. dr W. Kędzior został powołany na stanowisko docenta [2]. Po zmianie struktury organizacyjnej w 1968 r. badania zespołu były kontynuowane w Instytucie Układów Elektromaszynowych (IUE), należącym do struktury WE PWr.

Do zespołu badawczego dołączył w 1967 r. Bernard Herman (rys. 3), który w latach następnych był głównym współpracownikiem naukowym doc. W. Kędziora.

B. Herman przedstawił wyniki prowadzonych badań naukowych w rozprawie doktorskiej: „Rozruszniki wirowe o rdzeniach wielokrotnych”, wykonanej pod opieką naukową doc. W. Kędziora i w 1975 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych [1].

Do zespołu badawczego od roku 1974 na okres kilku lat dołączył młody pracownik naukowy Instytutu Układów Elektromaszynowych Krzysztof Pieńkowski (autor tego artykułu). Uczestniczył on aktywnie w pracach obliczeniowych, projektowych, pomiarach laboratoryjnych i badaniach przemysłowych rozruszników wirowych. K. Pieńkowski był autorem magisterskiej pracy dyplomowej z tematyki rozruszników wirowych, wykonanej pod opieką B. Hermana, a doc. W. Kędzior był promotorem jego pracy doktorskiej z tematyki niezwiązanej z rozrusznikami wirowymi.

W 1977 r. po ukończeniu studiów na WE PWr do zespołu badawczego dołączył Ryszard Brzeziński (rys. 3). Prowadzone przez niego prace badawcze dotyczyły głównie wdrożenia komputerowych technik obliczeniowych dla projektowania konstrukcji rozruszników oraz analizy stanów dynamicznych i wyznaczania charakterystyk rozruchowych silników indukcyjnych z rozrusznikami wirowymi. W latach wcześniejszych możliwości obliczeń cyfrowych były bardzo skromne i wiele obliczeń projektowych i analiz rozruszników było prowadzonych z wykorzystaniem suwaków logarytmicznych lub prostych kalkulatorów elektronicznych. R. Brzeziński przedstawił wyniki prowadzonych badań naukowych w rozprawie doktorskiej: „Kryteria doboru parametrów i programowanie charakterystyk mechanicznych silników indukcyjnych z rozrusznikami wirowymi”, wykonanej pod opieką naukową doc. W. Kędziora i w 1981 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych [1].



Rys.3. Dr inż. Bernard Herman i dr inż. Ryszard Brzeziński

Doc. W. Kędzior był również promotorem zespołowej pracy doktorskiej, wykonanej przez Ryszarda Subocza i Jerzego Scelinę, którzy w 1983 r. uzyskali stopnie doktorów nauk technicznych na podstawie rozprawy: „Analiza i synteza silników asynchronicznych pierścieniowych z rozrusznikami wirowymi o wzbudzeniu wewnętrznym” [1]. R. Subocz i J. Scelina po obronie nie podjęli pracy na uczelni.

Wymienione powyżej stopnie naukowe doktora nauk technicznych zostały nadane przez IUE PWr, który od roku 1971 uzyskał prawa do doktoryzowania [2]. Stąd sumarycznym dorobkiem zespołu badawczego było przygotowanie i obrona 5 prac doktorskich z tematyki rozruszników wirowych.

4.2. Działalność publikacyjna i patentowa

Opracowane publikacje naukowe zespołu badawczego dotyczyły analiz obwodowych silników indukcyjnych pierścieniowych z rozrusznikami wirowymi, opracowania metodyki obliczeń charakterystyk rozruchowych, uściślenia metod obliczeń parametrów elektromagnetycznych rozruszników wirowych

z uwzględnieniem nieliniowości charakterystyk magnesowania i zjawisk wnikania pola elektromagnetycznego do rdzenia rozrusznika, badań wpływu kształtu elementów rdzenia ferromagnetycznego na właściwości rozrusznika, określenia zasad projektowania i doboru rozruszników wirowych [3, 6].

Doc. W. Kędzior kierował zespołem badawczym do momentu przejścia na emeryturę w 1992 r. [2]. W 1989 r. R. Brzeziński zakończył pracę na uczelni i podjął pracę w formie działalności własnej [2]. Od tego czasu główną osobą zespołu badawczego zostaje dr B. Herman. Kontynuuje współpracę badawczą z emerytowanym doc. W. Kędziorem, ale wiele zadań badawczych realizuje samodzielnie lub jako opiekun prac dyplomowych. W wybranych pracach badawczych dotyczących rozruszników wirowych uczestniczył wtedy również prof. Jan Zawilak. Prowadzono prace stanowiące poszerzenie dotychczasowej tematyki badawczej. Prace te dotyczyły badania możliwości stosowania rozruszników wirowych jako rozruszników stojanowych do silników indukcyjnych klatkowych i silników synchronicznych dużej mocy z ruchem asynchronicznym [6, 7]. Innym nowym kierunkiem badań były analizy stanów hamowania dynamicznego i hamowania przeciwwłączeniem silników indukcyjnych pierścieniowych z zastosowaniem dławików wzorowanych na konstrukcji i działaniu rozruszników wirowych [1, 6, 8]. Wyniki wymienionych powyżej badań oprócz praktycznych zastosowań przemysłowych były przedmiotem licznych publikacji naukowych zespołu badawczego [1].

Sumarycznie wyniki prac badawczych prowadzonych w zespole naukowym były przedmiotem ponad 30 autorskich i współautorskich artykułów i referatów naukowych. Pewna liczba artykułów została opublikowana w renomowanych naukowych czasopismach krajowych. Również pewna liczba referatów naukowych była przedstawiana na znaczących krajowych i zagranicznych konferencjach i sympozjach naukowych. Znaczącym dorobkiem naukowym zespołu badawczego jest uzyskanie również 9 patentów na różne rozwiązania konstrukcji i układy pracy rozruszników wirowych.

4.3. Działalność przemysłowa i wdrożeniowa

Szczególnie duże osiągnięcia zespołu badawczego są związane z praktycznymi wdrożeniami rozruszników wirowych w przemyśle. Potwierdzeniem tego jest opracowanie przez zespół ponad 50 raportów badawczych z tematyki rozruszników wirowych, zawierających zasady obliczeń, projektowania i praktycznej instalacji rozruszników wirowych w przemysłowych układach napędowych [1, 2].

Pierwsze rozwiązania rozruszników wirowych były wynikiem wspólnych badań prowadzonych przez Instytut Układów Elektromaszynowych i Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Górnictwa Odkrywkowego POLTEGOR we Wrocławiu. Opracowane rozruszniki wirowe zostały wdrożone do ruchu silników indukcyjnych pierścieniowych dużej mocy w wielosilnikowych napędach przenośników taśmowych w wielu krajowych kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego i kopalniach siarki. Do innych praktycznych zastosowań rozruszników wirowych należały napędy młynów kulowych stosowanych w KGHM POLSKA MIEDŹ SA, w cementowniach Chełm i Warta, napędy

pomp dużej mocy, napędy traków do drewna w PZBM MAKURUM w Bydgoszczy i wiele innych [1, 3, 6].

Poza rozrusznikami wirowymi do silników indukcyjnych pierścieniowych zostały opracowane i wdrożone konstrukcje rozruszników wirowych stojanowych przeznaczonych do silników synchronicznych z ruchem asynchronicznym. Na podkreślenie zasługują zrealizowane zastosowania rozruszników stojanowych do silników synchronicznych o dużych mocach: 3,15 MW, 2,5 MW, 1,9 MW, 1,25 MW, 1,0 MW oraz do szeregu silników indukcyjnych klatkowych o napięciu znamionowym 6 kV [6, 7].

Przy współpracy z COBPGO Poltegor został również opracowany dławik z litym rdzeniem ferromagnetycznym o konstrukcji wzorowanej na rozruszniku wirowym. Dławik ten został zastosowany do hamowania przeciwwłączeniem silnika o mocy 630 kW w napędzie koła czerpakowego koparki w górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego [6, 8].

W początkowym okresie przemysłowego wdrażania rozruszników wirowych, konstrukcje rozruszników wirowych były wykonywane w małych seriach w warsztatach kopalń lub innych zakładów przemysłowych. Było to przeszkodą w opracowaniu typoszeregu rozruszników i w przedstawieniu szerszej oferty handlowej. W wyniku działań członków zespołu badawczego dokonano zainteresowania wybranych przedsiębiorstw podjęciem w kraju produkcji rozruszników wirowych. Obecnie w Polsce istnieją dwa przedsiębiorstwa, oferujące produkcję i sprzedaż rozruszników wirowych: Partner Serwis Sp. z o.o. [8] i LUMEL [5]. Przedsiębiorstwa te w swojej ofercie handlowej oferują rozruszniki wirowe dla pożądanej mocy silnika oraz na pożądane wartości napięcia zasilania i warunki środowiskowe pracy.

O ważnym znaczeniu rozruszników wirowych w przemyśle świadczy fakt, że produkcja tych rozruszników została również podjęta przez wiele przedsiębiorstw światowych. Do najbardziej znanych należą przedsiębiorstwa w Republice Południowej Afryki [4] i w Indiach [9, 10].

4.4. Nagrody i inne osiągnięcia

Opracowany rozrusznik wirowy o konstrukcji segmentowej uzyskał w 1996 r. Brązowy Medal na Światowych Targach Wynalazczości, Badań i Nowatorstwa Przemysłowego – EUREKA '96 w Brukseli [6].

Rozrusznik wirowy z rdzeniem wielokrotnym typu WIRLEG, zaprojektowany do silników o napięciu znamionowym wirnika do 1500 V i prądzie wirnika do 2500 A na podstawie decyzji Wyższego Urzędu Górniczego (znak GE-80/98) uzyskał dopuszczenie do stosowania w podziemnych zakładach górniczych w kopalniach niemetanowych i metanowych [6].

4.5. Zakończenie działalności zespołu badawczego

Działania badawcze przedstawionego zespołu naukowego należy obecnie uznać jako zakończone z powodów naturalnych. Doc. W. Kędzior w bieżącym roku ukończy 90 lat życia. Inni członkowie zespołu badawczego już od kilku lat nie żyją (Dr B. Herman †2019 r. i dr R. Brzeziński †2014 r.). Zespół badawczy nie wychował swoich następców, mogących prowadzić kontynuację badań z zakresu rozruszników wirowych.

Ze względu na intensywny rozwój przekształtników energoelektronicznych występuje coraz większe

ograniczenie zastosowań silników indukcyjnych pierścieniowych i ich zastępowanie przez silniki indukcyjne klatkowe. Zmniejsza to znacznie zapotrzebowanie na rozruszniki wirnikowe do silników tego typu. Natomiast układy rozruchowe z rozrusznikami stojanowymi są wypierane przez nowoczesne, powszechnie dostępne energoelektroniczne układy płynnego rozruchu.

5. PODSUMOWANIE

Prace badawcze zespołu naukowego z Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej dotyczące rozruszników wirowych należy uznać jako oryginalne i o dużym znaczeniu naukowym i technicznym. W okresie czasowym rozpatrywanym w artykule badania te miały charakter pionierski i innowacyjny. Oryginalność tych badań została potwierdzona uzyskaniem wielu patentów, opracowaniem dużej liczby artykułów i referatów naukowych, raportów badawczych i technicznych oraz opracowaniem wielu prac doktorskich. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki prowadzonych badań naukowych zostały również praktycznie wdrożone w wielu dziedzinach gospodarki krajowej. Na podstawie uzyskanych wyników badań została podjęta produkcja przemysłowa typoszeregu rozruszników wirowych przez wybrane firmy krajowe. Obecnie, mimo intensywnego rozwoju układów sterowania silników elektrycznych przez przekształtniki energoelektroniczne, w wielu przypadkach nadal celowe jest stosowanie rozruszników wirowych. Dotyczy to w szczególności układów napędowych o ciężkim rozruchu oraz pracujących w trudnych warunkach środowiskowych i eksploatacyjnych.

Mimo wieloletnich badań nie można uznać, że tematyka badań dotyczących rozruszników wirowych została wyczerpana. Mimo prostej konstrukcji, opis matematyczny zjawisk w rozrusznikach wirowych jest bardzo złożony. Celowe jest prowadzenie dalszych badań, dotyczących w szczególności wykorzystania analiz polowych do badań rozkładów pól elektromagnetycznych w rdzeniach rozruszników wirowych i wyznaczania ich parametrów elektromagnetycznych, zastosowania nowoczesnych metod optymalizacji konstrukcji rozruszników, wykonania analiz stanów elektromagnetycznych, analiz stanów cieplnych i innych

zjawisk w rozrusznikach. Stanowiąc to może inspirację i zachętę do podjęcia badań naukowych w tych dziedzinach.

6. BIBLIOGRAFIA

1. DONA: <https://biblioteka.pwr.edu.pl/uslugi/dorobek-naukowy>, data dostępu 12.03.2022.
2. Praca zbiorowa: *Maszyny i napędy elektryczne w Politechnice Wrocławskiej w latach 1945-1995*, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław, 1995.
3. Kędzior W., Herman B., *Rozruszniki wirowe do silników asynchronicznych pierścieniowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. LIII, Z.3, 1977, s.112-115.
4. LH Marthinusen, South Africa, Robert Melaia: *Eddy-Current Starters for Wound Rotor Induction Motors*, <https://www.slideserve.com/coty/eddy-current-starters-for-wound-rotor-induction-motors-robert-melaia-robmlhm-co-za-melaiaimweb-co-za>, data dostępu 12.03.2022.
5. LUMEL: *ROZRUSZNIKI WIROPŁYDOWE TYPU RN5*, https://www.technologie.com.pl/pdf/lumel/rn5_kk_pl_1199512521.pdf, data dostępu 12.03.2022.
6. Herman B., Kędzior W.: *Zastosowanie teorii prądów wirowych w analizie i projektowaniu urządzeń do rozruchu i hamowania układów napędowych z silnikami indukcyjnymi*, Prace Nauk. Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWr., *Studia i Materiały*, V.58, Nr 25, 2005, s.197-205.
7. Herman B., Zawilak J.: *Wirowy rozrusznik stojanowy*, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, Komel, Nr 50, 1995, s.146-149.
8. PARTNER SERWIS: *Produkcja rozruszników wirowych*, <https://www.grupapartner.pl/produkcja-rozrusznikow-wirowych.html>, data dostępu 12.03.2022.
9. Midex Global PVT Ltd, Madhya Pradesh, India: *Eddy Current Starters*, <https://www.dial4trade.com/midexglobalmidex-global/eddy-current-starters-pdid-1022844.htm>, data dostępu 12.03.2022.
10. Prajapati V. N.: *MAGNA START - New Generation Slip-Ring Motor Starter*, *Electrical India*, Dec. 5, 2015, <https://www.electricalindia.in/magna-start-new-generation-slip-ring-motor-starter>, data dostępu 12.03.2022.

EDDY CURRENT STARTERS - 50 YEARS OF RESEARCH AT THE ELECTRICAL FACULTY OF THE WROCLAW UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

The article describes the history of 50 years of research on eddy current starters conducted at the Faculty of Electrical Engineering of the Wrocław University of Science and Technology. Descriptions of the construction of the developed eddy-current starters are presented. The significant advantages of eddy current starters are: simple structure, small dimensions, low production costs, high operational reliability, no moving parts and no coolant, no need for service and maintenance. The eddy-current starters can be operated as the rotor starters at the connection to the slip-ring induction motor or as the stator starters at connection to the stator terminals of squirrel-cage induction motor or to the armature terminals of synchronous motor. As a result, the advantageous stepless waveforms of the starting torque of the motor are obtained and the value of the starting current of the motor is reduced. The composition of research team for studies of eddy-current starters was presented. The profiles of the main participants of the research team were described and the topics of their research were given. The developed Ph.D. thesis, scientific articles, technical reports and patents were mentioned. The most important industrial implementations of eddy-currents are listed and discussed.

Keywords: eddy-current starter, research history, research team, research topics, research and implementation achievements.