

Problem badań konstruktorskich trwałości eksploatacyjnej wysokonapięciowych silników klatkowych

Ryszard Rut, Jan Mróz, Jadwiga Płoszyńska, Ryszard Schab

1. Wstęp

Problem trwałości wysokonapięciowych silników indukcyjnych klatkowych na przestrzeni ubiegłych kilkudziesięciu lat był przedmiotem wielu analiz, zwłaszcza w odniesieniu do awariogennych stanów pracy takich jak długotrwały rozruch, nawrót czy praca z awaryjnie zablokowanym wirnikiem. Jednym z kierunków, takich prac były badania eksperymentalne, w tym badania obiektów zniszczonych. Poawaryjne oględziny, ze względu na rozległość zniszczeń, nie zawsze umożliwiają ustalenie, co było pierwotną, a co wtórną przyczyną awarii [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Wyspecjalizowane badania silników indukcyjnych dużej mocy potwierdziły, że ich trwałość zależy od odporności wytrzymałościowej na wypadkową działań termicznych, elektrodynamicznych oraz bezwładnościowych. Ponadto opisano analitycznie i badano tam stany krytyczne, w których silniki najczęściej ulegają awariom:

- długotrwały rozruch;
- kolejne, występujące po sobie długotrwałe rozruchy;
- stan zablokowania wirnika;
- długotrwały rozruch poprzedzony kilkusekundowym zablokowaniem wirnika;
- rozruch z przeciwnego wirowania;
- załączenie silnika przy niewygaszonym polu;
- praca rewersyjna silnika.

Niszczący charakter prac zawęził zakres badań, gdyż badania silników mogły być prowadzone do ich zniszczenia. Mimo że w ciągu kilkudziesięciu ostatnich lat zmieniły się techniki i możliwości badawcze, obecnie obserwuje się znaczne zmniejszenie ilości prac eksperymentalnych dotyczących problemów cieplnych i trwałościowych dużych silników elektrycznych. Dzieje się tak dlatego, że problem badań eksperymentalnych silników dużej mocy jest związany z szeregiem czynności o charakterze logistycznym, gdyż zwykle muszą się one odbywać w warunkach przemysłowych. Wiąże się to z dużymi kosztami eksperymentu, do czego przyczynia się fakt zniszczenia kosztownego obiektu przy badaniach trwałościowych.

Obecne publikacje dotyczące badań eksperymentalnych związanych z nagrzewaniem silników indukcyjnych klatkowych są więc stosunkowo nieliczne [7, 8, 9]. Dla silników dużej mocy pewną możliwością weryfikacji badań symulacyjnych jest pozyskiwanie wyników badań prowadzonych przez producentów. Ograniczają się one na ogół do badań stanów ustalonych – praca [7] opisuje sieć cieplną silnika 400 kW chłodzonego wodą w ustalonym stanie znamionowym. Porównano tam wyniki

Streszczenie: Problematyka badań eksperymentalnych dużych maszyn elektrycznych, a szczególnie konstruktorskich badań trwałościowych, jest trudnym i kosztownym zagadnieniem. Artykuł zawiera retrospektywny opis prac eksperymentalnych podjętych przed kilkudziesięciu laty w Politechnice Rzeszowskiej, w odniesieniu do wysokonapięciowych silników indukcyjnych klatkowych.

Słowa kluczowe: silnik klatkowy, badania eksperymentalne, trwałość eksploatacyjna

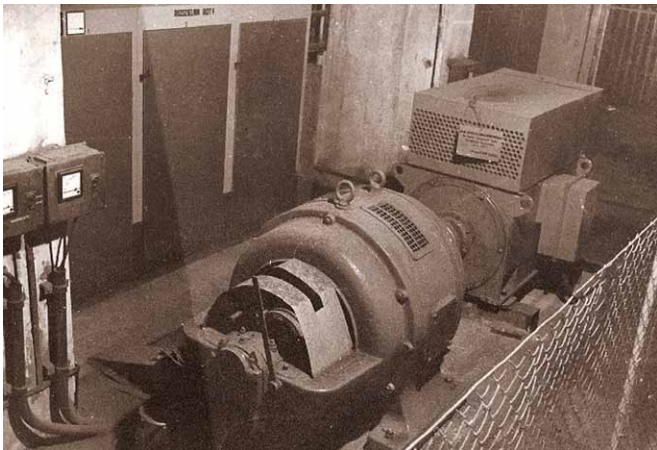
THE CONSTRUCTIONAL RESEARCH OF OPERATING ENDURANCE OF HIGH-VOLTAGE SQUIRREL-CAGE MOTORS

Abstract: The issues of experimental tests of large electric machines is a complex and costly task, especially constructional endurance tests. The paper contains a retrospective description of experimental tests of high-voltage squirrel-cage induction motors which have been taken in Rzeszow University of Technology for several decades.

Keywords: squirrel-cage motor, experimental research, operating endurance

obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów cieplnych wykonanych także przez producenta silnika. Praca [8] opisuje problemy elektromagnetyczne i termiczne silnika indukcyjnego 1150 KM zasilanego z falownika wektorowego, zweryfikowane rezultatami eksperymentu. Praca [9] opisuje różnorakie techniki używane przez jej autorów w ciągu ostatnich 30 lat, dla określenia temperatury elementów wirnika dużych indukcyjnych i synchronicznych maszyn (do 12,6 MVA) w czasie ustalonego czasu pracy.

Jednymi z pierwszych badań w tym zakresie w kraju były prace prowadzone przez autorów w Politechnice Rzeszowskiej. Mija właśnie 40 lat od momentu zapoczątkowania tych badań. Niniejszy artykuł ma na celu przypomnienie tych, w zasadzie pionierskich, badań eksperymentalnych, których rezultaty przyczyniły się do opracowania przez krajowych specjalistów nowych konstrukcji, spełniających wymagania stawiane przez energetykę.

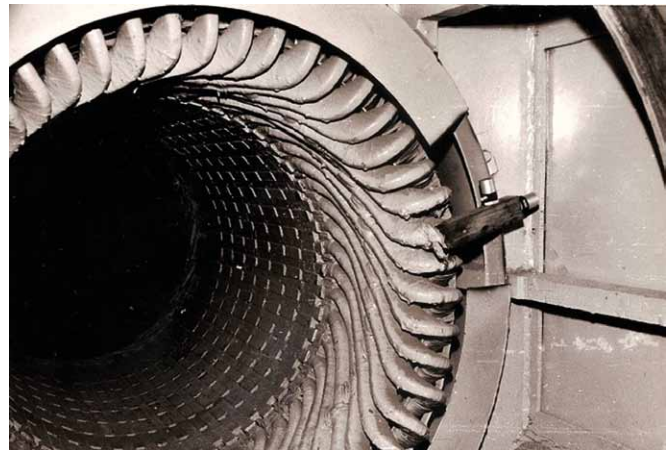


Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego dla potrzeb badań trwałościowych silników indukcyjnych klatkowych

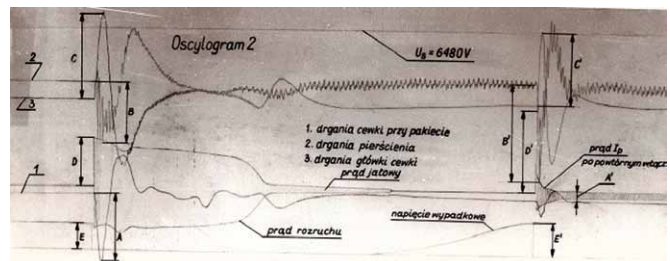
2. Przykłady badań eksperymentalnych silników klatkowych dużej mocy

Początek badań autorów, związanych z oceną przydatności silników indukcyjnych dużej mocy do eksploatacji w trudnych warunkach napędu potrzeb własnych elektrowni ciepłych, związany jest ze stanowiskiem pomiarowym specjalnie wykonanym na terenie Elektrowni Stalowa Wola w 1974 roku (rys. 1).

Badania zapoczątkowane w latach 1974–1989 dotyczyły przydatności silników 500 kW, 6000 V do pracy w napędach potrzeb własnych energetyki. Oceniano ją w oparciu o warunki techniczne WTO-70 ZPM dotyczące silników klatkowych indukcyjnych wysokiego napięcia, stosowanych do napędów potrzeb własnych w elektrowniach ciepłych. Początkowo program badań obejmował cykl pracy realizujący 5000 rozruchów o 30-sekundowym czasie trwania. Ponieważ w początkowym okresie stanowisko badawcze nie zapewniało tak długiego rozruchu, przyjęto do badań trwałości cykl pracy obejmujący 14-sekundową pracę z zablokowanym wirnikiem przy napięciu 1,075 UN, bieg jałowy o czasie trwania 300 s i wybieg. Ten cykl ustalony na drodze obliczeniowej zapewniał przyrost temperatury uzwojenia stojana (klasa izolacji F) w zakresie 80–100°C. Warto zaznaczyć, że program badań obejmował dodatkowo rejestrację



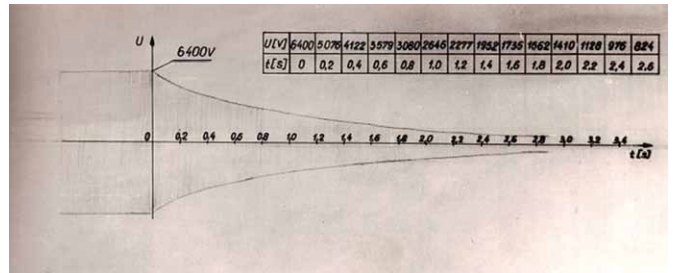
Rys. 2. Widok uzwojeń stojana od strony N z czujnikami do pomiaru drgań



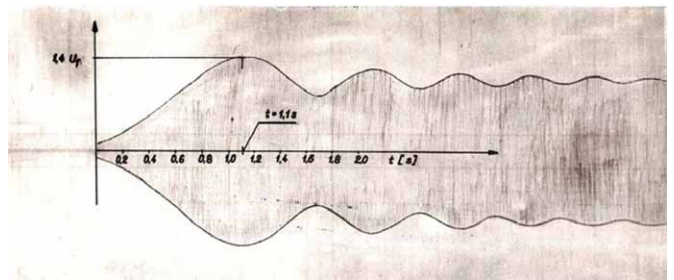
Rys. 3. Widok oscylogramu amplitudy drgań czoł cewek uzwojenia stojana podczas załączenia przy niewygaszonym polu

amplitud drgań czoł uzwojeń stojana przy pomocy czujników drgań (rys. 2).

Do wszelkich rejestracji sygnałów elektrycznych w tym okresie były powszechnie używane oscylografy pętlicowe zapisujące przebiegi na papierze światłoczułym, tworząc tzw. oscylogramy. Przykład oscylogramu przedstawiającego drgania czoł uzwojenia stojana w czasie załączenia przy niewygaszonym polu przedstawia rysunek 3.



Rys. 4. Widok oscylogramu napięcia resztkowego badanego silnika



Rys. 5. Widok oscylogramu napięcia różnicowego badanego silnika

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg napięcia resztkowego, a na rysunku 5 – przebieg napięcia różnicowego badanego silnika. Przedstawione oscylogramy ilustrują dobrze, jaki wielki nakład pracy był potrzebny do uzyskania nie tylko określonej dokładności tych wyników, ale wyników jako takich. Wykonanie takich pomiarów, z wykorzystaniem współczesnych metod pozyskiwania sygnałów, nie nastręcza obecnie aż tak dużych problemów.

Na rysunku 6 przedstawiono widok oryginalnego oscylogramu prądu rozruchu i prędkości silnika – widać tam problem skalowania tego przebiegu.

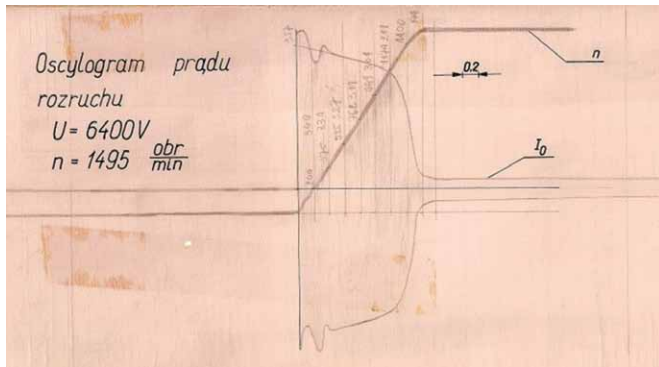
Charakterystykę momentu silnika uzyskiwano z użyciem wałka skrętnego z zespołem tensometrów wykonanego we własnym zakresie (rys. 7).

Kolejnym z badań był pomiar luzu promieniowego (luz między prętem a dnem żłobka) w żłobkach wirnika. Badania zasadnicze obejmowały próbę długotrwałą – 10 000 rewersów nieobciążonego silnika w cyklu bezpiecznym dla uzwojeń stojana. Pomiar był wykonywany w sposób przedstawiony na rysunku 8.

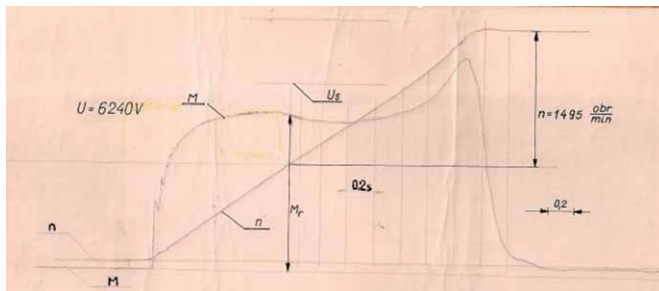
Wywierając nacisk na pręt za pomocą siłomierza P (rys. 8), mierzono w środku pręta jego ugięcie. Innym ciekawym badaniem był pomiar przemieszczeń pierścieni zwierających uzwojenia wirnika przy zahamowanym wirniku (rys. 9).

Ważnym badaniem była rejestracja przyrostu temperatury pręta i pierścienia zwierającego uzwojenia klatkowego w stanie z zablokowanym wirnikiem. W tych latach pomiar był wykonywany za pomocą termopar miedź-konstantan (rys. 10).

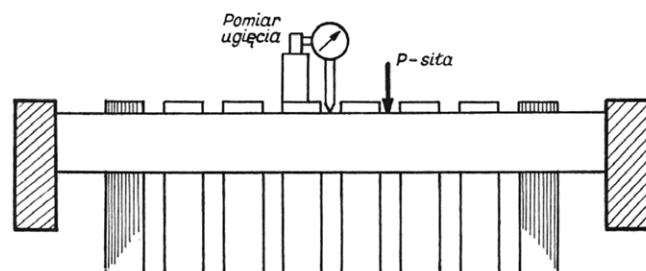
Do rejestracji temperatury uzwojenia były używane bardzo kłopotliwe w obsłudze jednokanałowe rejestratory analogowe – wymagające skalowania zarówno rejestratora, jak i termopar wykonanych we własnym zakresie. Niekiedy takie próby kończyły się niepowodzeniem z powodu dużej zawodności tego



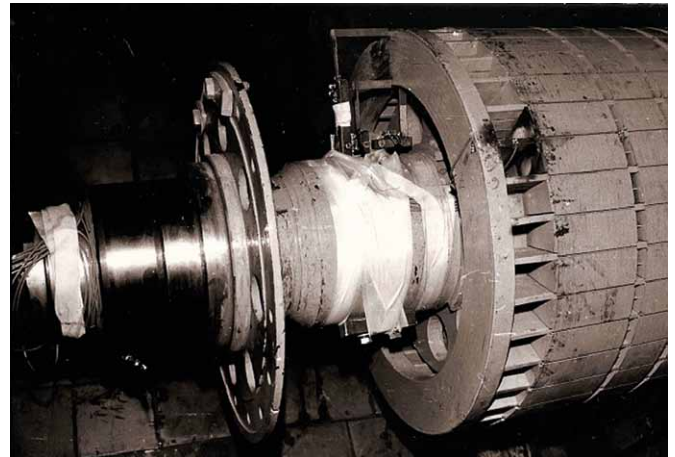
Rys. 6. Widok oscylogramu prądu stojana i prędkości w czasie rozruchu silnika



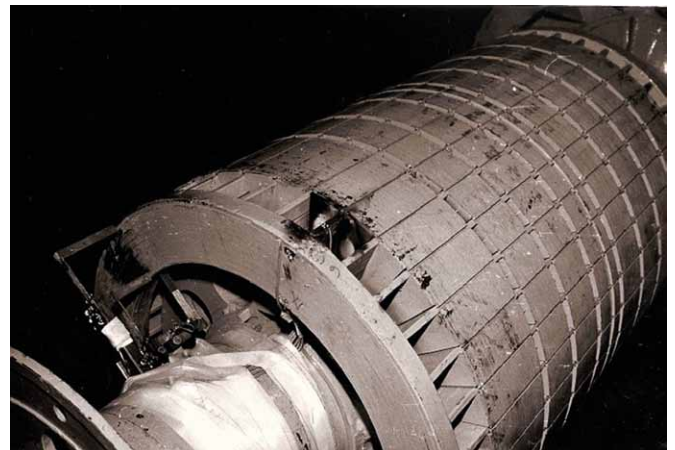
Rys. 7. Widok oscylogramu momentu i prędkości w czasie nawrotu silnika



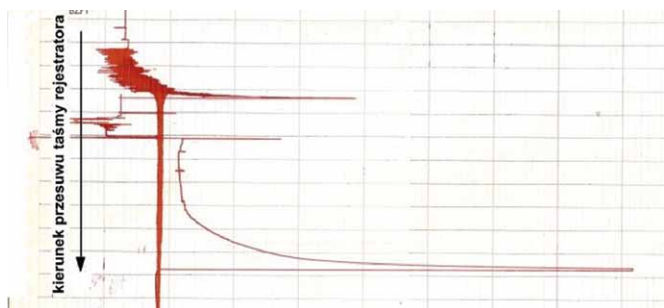
Rys. 8. Pomiar luzu promieniowego w żłobkach wirnika



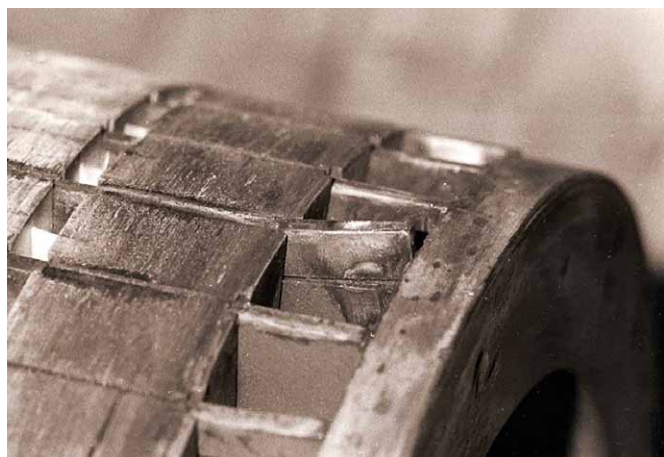
Rys. 9. Widok zestawu czujników tensometrycznych do pomiarów odkształceń pierścienia zwierającego



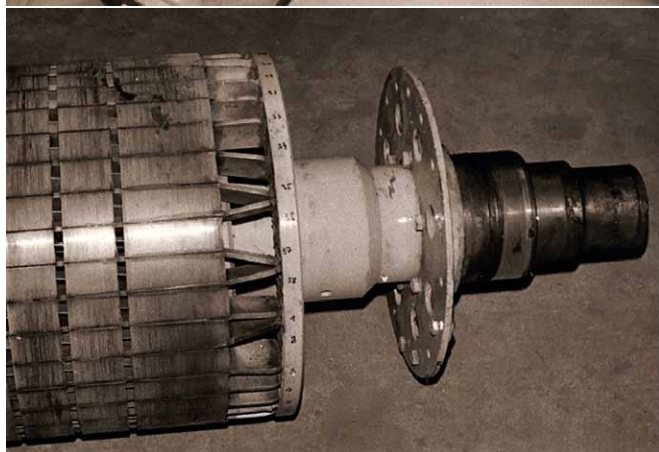
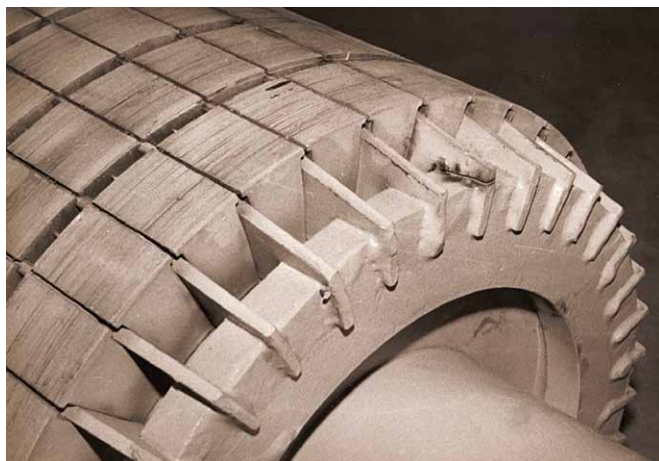
Rys. 10. Punkty instalowania termopar w pierścieniu zwierającym i przecie uzwojenia klatkowego wirnika



Rys. 11. Rejestracja temperatury pręta uzwojenia klatkowego w stanie zablokowanym wirnikiem



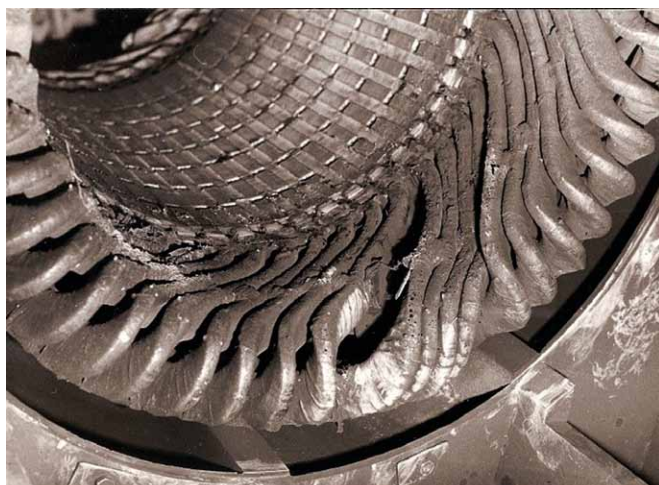
Rys. 12. Odgięty w kierunku promieniowym segment dzielonego pręta



Rys. 14. Uszkodzone pręty uzwojenia klatkowego



Rys. 13. Odgięte siłą bezwładności nagrzane pręty przy rewersie



Rys. 15. Widok deformacji czół cewek stojana od strony N jako efekt działania dynamicznego prądu

sprzętu (tusze, taśma papierowa, mechanizm przesuwu). Pokazuje to rysunek 11, gdzie fragment przebiegu temperatury pręta uzwojenia klatkowego, cechujący się dużą stromością narastania, dotyczy załączenia silnika z zablokowanym wirnikiem. Później następuje wyłączenie napięcia zasilania i stygnięcie pręta uzwojenia klatkowego. Widać także pomiar zakończony niepowodzeniem, spowodowanym zakłóceniem w pracy rejestratora.

Zasadniczymi elementami badań trwałości konstrukcji badanych silników były próby długotrwałe – 10 000 rewersów. Pró-

by te były prowadzone aż do lat 1990–1991 i dotyczyły stale modernizowanych konstrukcji uzwojenia klatkowego, aż po zastosowanie rozwiązania z tzw. prętem biernym. W czasie prób prowadzonych na przestrzeni wielu lat występowały liczne awarie badanych silników – widok niektórych z nich przedstawiają rysunki 12–15.

Zakończenie

Mimo skromnych możliwości technicznych, doskonalonych w miarę upływu lat, uzyskiwane rezultaty pozwoliły na osiągnięcie wymiernych efektów. Prrowadzone badania trwałości eksploatacyjnej silnika, rozpoczęte w latach 1974–1976, sprawiły, że kolejne ulepszone przez krajowych projektantów wersje konstrukcyjne spełniły wymagania energetyki. Przypominając tę badawczą problematykę, której prowadzenie jest zawsze trudne w odniesieniu do obiektów dużej mocy, i kontynuując prace w tym kierunku [10, 11, 12, 13], pragniemy zwrócić uwagę młodym pracownikom naukowym, że mając do dyspozycji coraz lepszy sprzęt, nie powinni zaniedbywać w swej działalności szeroko pojętej empirii. Jej rola jest nie do przecenienia w naukowej działalności dotyczącej wielodziedzinowości zjawisk (elektromagnetycznych, cieplnych, mechanicznych, wentylacyjnych) w silnikach elektrycznych.

Literatura

- [1] BERNADT M.: *Narazenia silników klatkowych wywołane przepływem prądu rozruchowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, 39/1986.
- [2] GOGOLEWSKI Z., PASZEK W., GABRYŚ W., KUBEK J.: *Uszkodzenia maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1967.
- [3] RUT R.: *O przydatności badań elastooptycznych w analizie uszkodzeń głębokoślóbkowych prętów uzwojeń klatkowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, 39/1986.
- [4] RUT R.: *Stan naprężeń i przemieszczeń głębokoślóbkowego prostokątnego pręta uzwojenia wirnika indukcyjnego silnika klatkowego*. „Archiwum Elektrotechniki”, t. XXXVIII, z. 1/4, 1989, s. 78–88.
- [5] RUT R.: *Badanie trwałości eksploatacyjnej silników indukcyjnych klatkowych dla doboru optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych klatki wirnika*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, 45/1992, s. 9–13.
- [6] RUT R., BERNADT M., CZOGAŁA E., TYLIKOWSKI A.: *Naprężenia w prętach klatki wirnika w czasie rozruchu silnika indukcyjnego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” BOBRME Komel, 16/1972.
- [7] KROK R.: *Influence of work environment on thermal state of electric mine motors*. „Archives of Electrical Engineering”, 60(3)/2011, s. 357–370.
- [8] ALAKAYSHEE Q., STATON D.A.: 1150 hp motor design, electromagnetic and thermal analysis. ICEN – 15-th International Conference on Electrical Machines, Burgas-Belgium, 2002.
- [9] DYMOND J.H., ONG R., STRANGES N.: *Instrumentation, Testing and Analysis of Electric Machine Rotor Steady-State Heating*. IEEE Transactions on Industry Applications, 38(6)/2002, s. 1661–1664.
- [10] RUT R.: *Analiza nieustalonych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2001.
- [11] MRÓZ J.: *Analiza uzależnień elektromechanicznych i cieplnych w stanach nieustalonych silników indukcyjnych dwuklatkowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2013.
- [12] PŁOSZYŃSKA J.: *Dyskusja niepożądanых zjawisk występujących w silnikach indukcyjnych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, 68/2004, s. 93–97.
- [13] RUT R., PŁOSZYŃSKA J.: *Nieustalony stan cieplny uzwojeń silników indukcyjnych klatkowych o trapezowym przekroju pręta*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, 61/2000, s. 125–132.



dr hab. inż. Ryszard Rut, prof. PRz,

e-mail: rrut@prz.edu.pl;

dr hab. inż. Jan Mróz, prof. PRz,

e-mail: janmroz@prz.edu.pl;

dr inż. Jadwiga Płoszyńska,

e-mail: jadvplo@prz.edu.pl;

mgr inż. Ryszard Schab,

e-mail: ryschab@prz.edu.pl;

Politechnika Rzeszowska,

Wydział Elektrotechniki i Informatyki,

Zakład Elektrodynamiki i Systemów

Elektromaszynowych