

Uzwojenie wirnika silnika indukcyjnego trakcyjnego

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Artur Polak

1. Warunki eksploatacji silników trakcyjnych

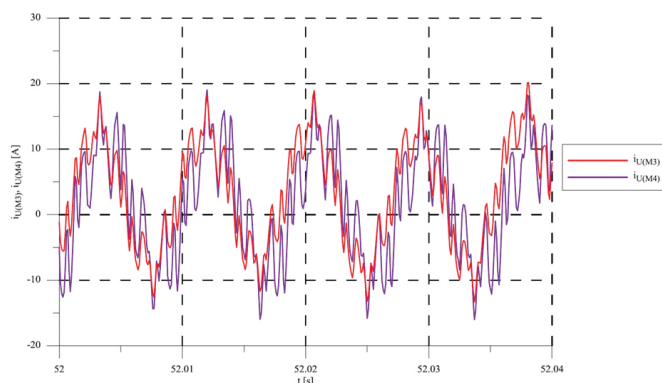
Silniki napędowe w pojazdach trakcyjnych są zabudowane na wózkach jezdnych, dwa silniki na jednym wózku. Standardowo są to silniki indukcyjne klatkowe. Warunki eksploatacji silników determinują ich żywotność. Na warunki eksploatacji silników trakcyjnych składają się: pogoda, napięcie zasilania, moment obciążenia i drgania wózków.

Uzwojenia wirników silników kolejowych są miedziane prętowane, na czołach zwarte pierścieniami. Uzwojenia wirników tramwajowych są odlewane z aluminium. Napięcie sieci trakcyjnej w Polsce dla PKP wynosi DC 3 kV, a sieci tramwajowej DC 600 V. Silniki są zasilane z falowników DC/AC. Jeden falownik zasila dwa silniki. Wartość napięcia AC zasilającego silnik jest regulowana od wartości minimalnej, przy ruszaniu pojazdu trakcyjnego, do wartości znamionowej U_N . W tych warunkach zasilania napięcie znamionowe (wartość skuteczna napięcia zmiennego) silników kolejowych $U_N = 2100$ V, a silników tramwajowych 420 V. Silniki trakcyjne pracują w dwóch zakresach regulacji prędkości obrotowej:

- przy stałym momencie: $U_{min} \leq U \leq U_N$, $0 \leq n \leq n_N$;
- przy stałej mocy: $U = U_N$, $n_N < n \leq n_{max}$.

Regulacja prędkości obrotowej silników jest realizowana w systemie modulacji szerokości impulsów MSI. Zawartość wyższych harmonicznych w napięciu i prądzie silników indukcyjnych zasilanych z falowników DC/AC jest zjawiskiem naturalnym – rys. 1.

Harmoniczne podstawowe napięcia i prądu generują moment elektromagnetyczny średni, jest to moment napędowy pojazdu trakcyjnego. Wyższe harmoniczne napięcia i wyższe



Rys. 1. Przykładowe przebiegi prądów fazowych dwóch silników zainstalowanych na jednym wózku: częstotliwość napięcia $f = 114,9$ Hz, co odpowiada 96% prędkości maksymalnej pociągu i prądach $I_{M3} \approx I_{M4} \approx 0,2I_N$, $I_N = 78$ A

Streszczenie: Silniki indukcyjne napędzające pociągi i lokomotywy mają małą trwałość. Urywają się pierścienie zwierające pręty uzwojenia wirnika. W artykule przedstawiono uzwojenie wirnika dwuwarstwowe, zwarte tylko jednym pierścieniem. Pierścień wykonany jest z blachy miedzianej i jest przykręcony do podzwojnika lub osadzony na wale. Połączenie pierścienia z uzwojeniem jest elastyczne i umożliwia dylatację termiczną czoł uzwojenia. Czoła warstwy dolnej uzwojenia po wyjściu ze żłobków są wygięte promieniowo w kierunku osi wirnika, a następnie uformowane obwodowo. W ten sposób uzyskano dodatkową przestrzeń na założenie bandaży o odpowiedniej grubości. Bandaże czoł uzwojenia, wewnętrzny i zewnętrzny, o dostatecznej grubości, mają dobrą wytrzymałość mechaniczną i nie stwarzają zagrożenia rozerwania. Wyeliminowano przyczynę dużej awaryjności wirników w silnikach indukcyjnych trakcyjnych.

Słowa kluczowe: silniki indukcyjne trakcyjne, uzwojenie wirnika, bandaże czoł, pierścienie zwierające

🇬🇧 ROTOR WINDING OF TRACTION INDUCTION MOTOR

Abstract: Induction motors driving trains and locomotives have low durability. The rings containing the rotor winding bars break. The article presents a double-layer rotor winding, shorted with only one ring. The ring is made of copper sheet and is bolted to the sub-core or mounted on a shaft. The ring-winding connection is flexible and allows thermal expansion of the winding ends. The faces of the bottom layer, after exiting the slots, are wound radially towards the rotor axis and then formed circumferentially. In this way, additional space was created for applying a bandage of appropriate thickness. Front and outer winding bandages, of sufficient thickness, have good mechanical strength and do not pose a risk of bursting. The cause of high failure frequency of rotors in induction traction motors has been eliminated.

Keywords: induction traction motors, rotor winding, face bandage, shorting ring

harmoniczne prądu generują moment elektromagnetyczny zmienny o podwójnej częstotliwości w stosunku do harmonicznych napięcia i prądu. Moment zmienny, przy niewielkim momencie średnim, może powodować, że wartości chwilowe momentu są ujemne, wówczas pochodna prędkości obrotowej silnika, proporcjonalna do momentu, jest ujemna. Na wale

silnika jest osadzone małe koło zębate, a na osi jezdnej wózka duże koło zębate. Między zębami kół występuje luz. Duże koło zębate wiruje ze stałą prędkością obrotową determinowaną szybkością jazdy pojazdu trakcyjnego. Moment bezwładności wirnika silnika jest niewielki. W sumie powoduje to, że prędkość kątowa $\omega_m(t)$ silnika zawiera składową zmienną. Wał silnika ma mikrodrżania skrętne nałożone na prędkość kątową średnią. Amplituda drgań skrętnych jest równa połowie wielkości luzu. Zęby małego koła uderzają w zęby dużego koła. Na elementy wirnika o momencie bezwładności J , w tym na pierścienie zawierające uzwojenie, działają momenty dynamiczne

$$T_d = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

Silniki indukcyjne trakcyjne dużej mocy, napędzające lokomotywy i pociągi, mają uzwojenie wirników wykonane z prętów miedzianych zwartych na czołach pierścieniami miedzianymi. Pierścienie są osadzone na podzwojnikach i bywają słabo zabezpieczone przed drganiami skrętnymi prędkości obrotowej. Momenty dynamiczne działają zmęczeniowo na połączenia prętów z pierścieniami.

Drugim źródłem drgań są wózki jezdne pojazdu. Silniki napędowe w pociągach i lokomotywach o maksymalnej prędkości do 150 km/h są instalowane na wózkach jezdnych. Zamocowanie silników nie zawsze jest odsprężone i drgania kół jezdnych bezpośrednio przenoszone są na silniki. Drgania silnika o prędkości v_m oddziałują na pierścienie zawierające o masie m , generując siłę dynamiczną F_d promieniową

$$F_d = m \frac{dv_m}{dt}$$

Moment dynamiczny T_d i siły dynamiczne F_d sumują się i powodują zmęczeniowe pękanie połączenia prętów z pierścieniami zwierającymi – rys. 2.

Problem urywania się pierścieni zwierających w uzwojeniach klatkowych autorzy znają z własnych badań eksploatacyjnych wykonywanych na pociągach kolejowych w normalnych warunkach ich kursowania. Problem ten omawiany jest także w literaturze [5, 7]. Dawne układy napędowe pojazdów szynowych bazowały na silnikach prądu stałego [4], a w nich drgań skrętnych wałów nie ma.

Przepisy kolejowe dotyczące silników napędowych są wymagające. Norma PN-EN 61373 z 2011 r. podaje wymagania dotyczące odporności urządzeń mechanicznych, pneumatycznych, elektrycznych i elektronicznych taboru na udary mechaniczne i wibracje [6]. W normie określono wymagania dotyczące badań elementów wyposażenia pojazdów kolejowych, narażonych na wibracje i wstrząsy, wynikające ze specyfiki środowiska pracy na kolei. Maksymalne wartości skuteczne przyspieszeń drgań występujące w eksploatacji, wg załącznika A.3 normy (kategoria 3 – urządzenia montowane na osi zestawu kołowego), wynoszą:

- oś pionowa 43 m/s² (ok. 4,3 g);
- oś poprzeczna 39 m/s² (ok. 3,9 g);
- oś wzdłużna 20 m/s² (ok. 2,0 g).



Rys. 2. Wirnik silnika zespołu trakcyjnego EN 57 z urwanym pierścieniem

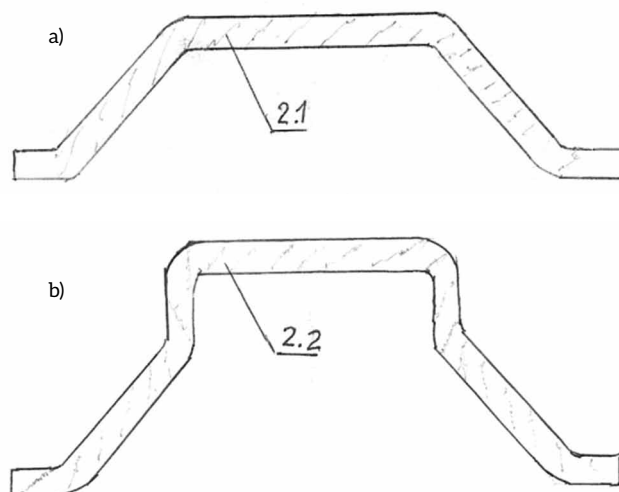
Silniki poddane tym wibracjom powinny pracować przez 10 minut bez uszkodzenia. Silniki indukcyjne badania te przechodzą. Pierścienie urywają się zmęczeniowo dopiero po dłuższym okresie eksploatacji, zwykle po okresie gwarancyjnym producenta.

W artykule przedstawiono uzwojenie wirnika bez pierścieni zwierających. Jeśli pierścieni zwierających nie ma, to nie będą się urywać. Trwałość eksploatacyjna silnika z tym uzwojeniem powinna być znacznie dłuższa.

2. Uzwojenie wirnika silnika trakcyjnego

W przedstawionym rozwiązaniu uzwojenie wirnika (1) składa się z prętów izolowanych. Uzwojenie jest dwuwarstwowe, przy czym pręty górne (2.1) mają kształt standardowy – rys. 3, a pręty dolne (2.2) na wyjściu ze żłobków są wygięte promieniowo w kierunku wału (8) i na niższej średnicy są uformowane czoła po obwodzie, tak aby przylegały do podzwojnika. Rysunki prętów górnego (2.1) i dolnego (2.2) przedstawiono na rys. 3.

Pręty ułożone na wirniku są zabezpieczone przed siłami odśrodkowymi: w części żłobkowej klinami, a na czołach bandażem. Uformowane czoła prętów warstwy dolnej (2.2) leżą na podzwojnikach (6). Podzwojniki są przymocowane do pakietu blach wirnika (1) bądź są osadzone na wale (8) silnika.



Rys. 3. Pręty uzwojenia wirnika: a – warstwy górnej; b – warstwy dolnej

Po włożeniu prętów dolnych (2.2) do żłobków na czoła uzwojenia nakładany jest bandaż wewnętrzny (3.2). Wygięcie promieniowe czoł prętów dolnych (2.2) w kierunku wału umożliwia nałożenie grubszej warstwy bandaża (3.2), jak to pokazano na rys. 4. Po tej czynności w żłobkach układa się pręty górne (2.1). Pręty górne (2.1) w żłobkach klinuje się. Wszystkie końcówki prętów uzwojenia warstwy górnej (2.1) i warstwy dolnej (2.2), z obydwóch stron pakietu blach (1) wirnika, łączy się z sobą skuwkami. Łączone pręty (2.1) i (2.2) powinny leżeć w żłobkach oddalonych od siebie o podziałkę biegunową, jak to pokazano na rys. 5. Czoła prętów górnych (2.1) są rysowane linią ciągłą, a czoła prętów dolnych (2.2) linią przerywaną. Następnie na czoła uzwojenia warstwy górnej (2.1) nakłada się bandaż zewnętrzny (3.1).

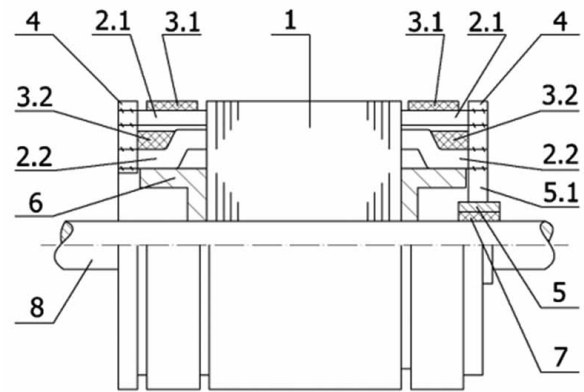
Całe uzwojenie przedstawiono na schemacie łączeniowym na rys. 6. Pręty górne (2.1) są ponumerowane kolejno od 1 do N , gdzie N oznacza liczbę prętów górnych. Pręty dolne mają numery prętów górnych, leżących w tych samych żłobkach – ze znakiem prim. Pokazano to na schemacie rozwiniętym na rys. 5. Schemat łączeniowy (rys. 6) jest prostszy i w sposób czytelny pokazuje kolejne połączenia prętów górnych (2.1) z prętami dolnymi (2.2). Na schemacie łączeniowym pręty górne (2.1) są oznaczone małymi okręgami „pełnymi”, a pręty dolne (2.2) okręgami „pustymi”.

Skuwki łączące pręty górne (2.1) z prętami dolnymi (2.2) powodują, że uzwojenie tworzy obwód elektryczny zamknięty, identycznie jak w maszynach prądu stałego, jak na rys. 7. Gdy uzwojenie stojana jest zasilane napięciem przemiennym i wzbudza strumień magnetyczny, to w poszczególnych zewojach uzwojenia indukuje się napięcie. Sumaryczne napięcie indukowane w okręgu jest równe zero. Aby w uzwojeniu płynął prąd, to należy stworzyć, z jednej strony pakietu blach, obwody zwarte. Pętle zwarcia powinny być na obwodzie symetrycznie rozłożone. Można to zrealizować, zwierając z sobą wszystkie skuwki uzwojenia bądź uzwojenie podzielić na m faz i każdą fazę zewrzeć. Jeśli wszystkie zewoje zostaną z jednej strony wirnika zwarte poprzez połączenie pierścieniem miedzianym, to otrzymamy wówczas uzwojenie $(N/2p)$ fazowe, gdzie N oznacza liczbę prętów górnych (2.1), a p liczbę par biegunów. Przy takim połączeniu $(N/2p)$ nie musi być liczbą całkowitą, a uzwojenie jest symetryczne, podobnie jak w wirnikach z uzwojeniem klatkowym.

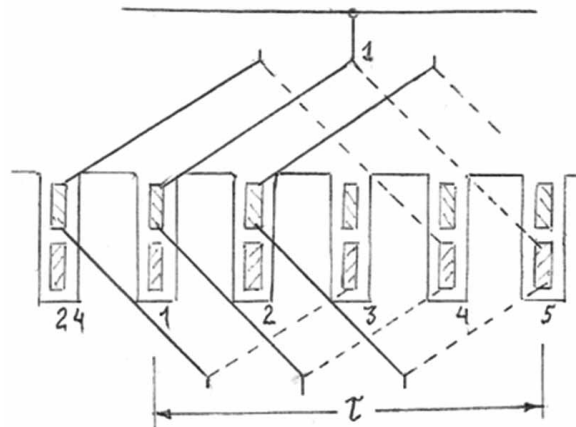
W ten sposób wyjście uzwojenia wirnika jest zwarte, jak to widać na rysunku 7. Uzwojenie można podzielić także na m faz, lecz tylko wówczas, gdy $\frac{N}{m \cdot 2p}$ jest równe liczbie całkowitej. Uzwojenie przedstawione na rysunkach 6 i 7 ma: ($N = 24$, $p = 3$) i podzielono go na ($m = 2$) fazy, gdyż podziałka biegunowa liczona w prętach górnych $\tau = 4$. Uzwojenie takie można podzielić tylko na $m = 2$ fazy. Przy tym podziale dwa kolejne pręty należą do jednej fazy, a następne dwa pręty należą do drugiej fazy. Kąt elektryczny między fazami wynosi $\pi/2$. Schemat elektryczny uzwojenia dwufazowego przedstawiono na rys. 8.

Podzielenie uzwojenia na ($m = 3$) fazy jest możliwe, gdy: ($N = 24$, $p = 2$) lub ($N = 36$, $p = 3$) itd.

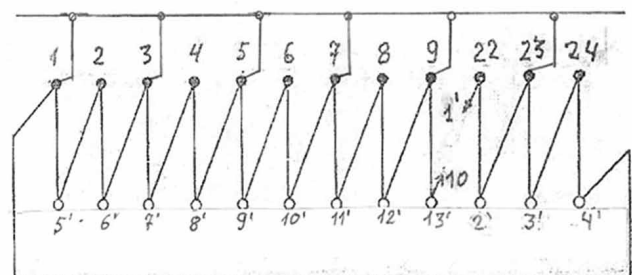
Pierścień zwierający (5) skuwki uzwojenia, korzystnie miedziany, może być osadzony na wałku (8) bądź przymocowany do podwojnika (6) i może być izolowany bądź nieizolowany.



Rys. 4. Wirnik uzwojony z nałożonymi bandażami

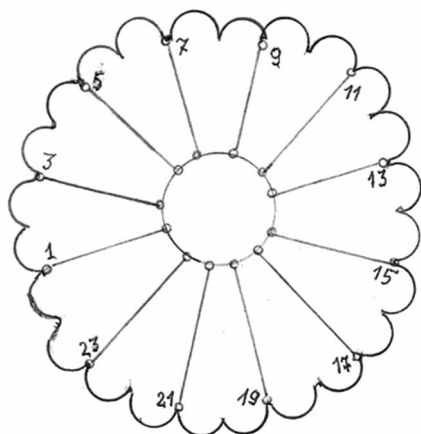


Rys. 5. Połączenie prętów w wirniku o liczbie żłobków $Z = 24$ i liczbie par biegunów $p = 3$, podziałka biegunowa liczona w prętach $\tau = 4$

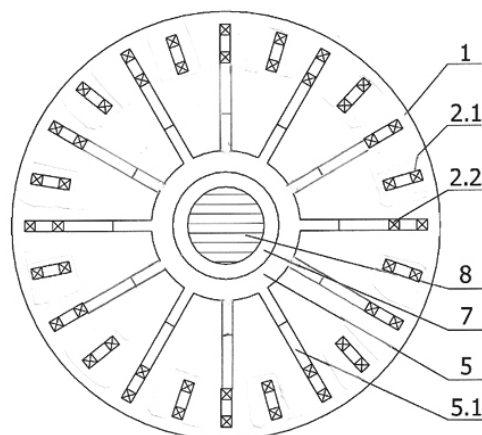


Rys. 6. Schemat uzwojenia o liczbie żłobków $Z = 24$ i liczbie par biegunów $p = 3$

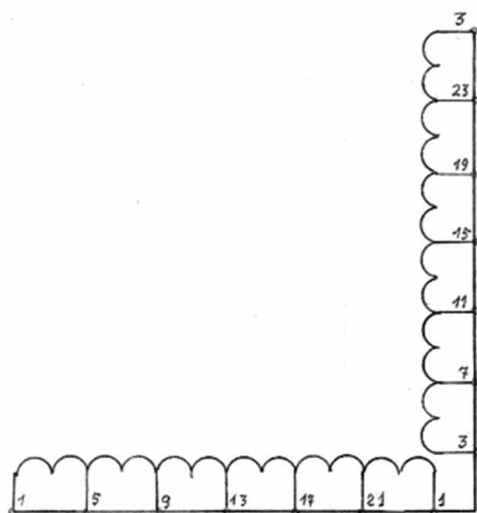
Pierścień (5) przedstawiony na rys. 9 jest osadzony na wałku (8) na tulei izolacyjnej i ma na obwodzie ($2 \cdot 2p = 12$) równo rozmieszczonych wypustów (5.1) do połączenia ze skuwkami. Przymocowanie pierścienia zwierającego (5) do powierzchni bocznej podwojnika (6), zamiast umieszczenia go na wałku (8), jest korzystne, gdyż skraca długość wypustów (5.1) łączących pierścień (5) ze skuwkami. Najprostszym sposobem przymocowania pierścienia (5) do podwojnika (6) jest przykręcenie go



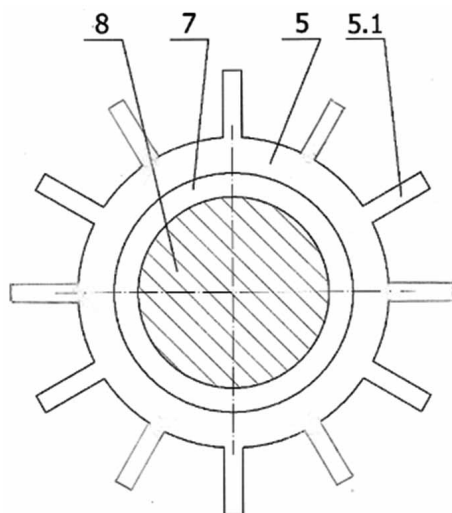
Rys. 7. Uzwojenie wirnika z rys. 6 tworzy zamknięty okrąg, początki prętów nieparzystych są zwarte



Rys. 10. Widok wirnika w płaszczyźnie połączenia prętów uzwojenia z pierścieniem zwierającym



Rys. 8. Uzwojenie dwufazowe z rysunków 6 i 7



Rys. 9. Pierścień zwierający (5) z wypustkami łączeniowymi (5.1) do skuwek uzwojenia

śrubami, wówczas pierścień (5) nie jest izolowany, jest mechanicznie dobrze przytwierdzony i jest mało prawdopodobieństwo, że się urwie. Wypusty (5.1) mogą być uformowane wraz z pierścieniem np. w technologii wycinania laserem z blachy miedzianej, lecz mogą być także do pierścienia (5) przyspawane bądź zgrzane. Takie wypusty zapewniają dylatację termiczną osiową uzwojenia. Wypusty mogą być wykonane z taśmy plecionej z cienkich przewodów, co zapewnia ich elastyczność osiową i obwodową.

Dwie warstwy bandaży: bandaż wewnętrzny (3.2) i bandaż zewnętrzny (3.1) skutecznie zabezpieczają czoła uzwojenia przed odkształceniem wymuszonym przez siły odśrodkowe i obwodowymi siłami bezwładności. Bandaże (3.1) i (3.2) są wykonane korzystnie taśmą z włókna szklanego bądź taśmą z tworzywa sztucznego zbrojoną włóknami szklanymi lub węglowymi. Wygięcie czół prętów (2.2) dolnej warstwy uzwojenia w kierunku osi wału (8) stworzyło miejsce na grubszy bandaż wewnętrzny (3.2), który zabezpiecza czoła prętów dolnych (2.2) przed wygięciem się pod wpływem działania sił odśrodkowych.

Rysunek 10 przedstawia widok wirnika (1) w płaszczyźnie połączeń skuwkami końcówek prętów górnych (2.1) z prętami dolnymi (2.2) i połączenie uzwojenia z pierścieniem zwierającym.


Podsumowanie

Silnik indukcyjny trakcyjny z uzwojeniem wirnika wykonanym według przedstawionego w artykule rozwiązania nie ma pierścieni zwierających stosowanych w wirnikach klatkowych. Uzwojenie wirnika jest zwarte tylko jednym pierścieniem (5). Pierścień (5) wykonany jest z blachy miedzianej o odpowiedniej grubości i przekroju i jest przykręcony do podzwojnika (6) lub osadzony na wale (8). Wypusty (5.1) miedziane lite, łączące pierścień (5) ze skuwkami na czołach uzwojenia, są elastyczne i mogą się sprężycie odginać w kierunku osiowym, umożliwiając dylatację termiczną czół uzwojenia. Wypusty (5.1) miedziane z taśmy plecionej z drutu są elastyczne w kierunku osiowym i obwodowym. Czoła prętów dolnych uzwojenia, po

wyjściu ze żłobków, są wygięte promieniowo w kierunku wału, a następnie uformowane obwodowo. W ten sposób uzyskuje się dodatkową przestrzeń na założenie bandaży wewnętrznego o odpowiedniej grubości. Bandaże czoł uzwojenia, wewnętrzny i zewnętrzny, o dostatecznej grubości, mają wystarczającą wytrzymałość mechaniczną i nie stwarzają zagrożenia rozzerwania. W ten sposób wyeliminowano przyczynę dużej awaryjności wirników w silnikach indukcyjnych trakcyjnych.

Literatura

- [1] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T., POPRAWSKI W.: *Uzwojenie wirnika silnika indukcyjnego trakcyjnego*. Patent RP nr 228976 z dnia 08.12.2017 r.
- [2] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T., POLAK A.: *Indaction motors in traction drives, service tests*. „Technical Transactions”, 10(115)/2018.
- [3] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T., POLAK A.: *Traction induction motor*. Proceedings in the MET'2017. Pol. Warszawska. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818004005>. MATEC Web of Conferences 180, 04005 (2018) MET'2017.
- [4] BILIŃSKI J., FRYDRYSIAK R., GMURCZYK E.: *Modernizacja systemu napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57 z zastosowaniem silników asynchronicznych*. „Technika Transportu Szynowego”, 12/2008.
- [5] LAL GANESH R.N.: *Development of reliable designs of squirrel cage rotors for traction motors. used in locomotives working in arduous operating conditions*. IET Electric Power Applications, March 2009.
- [6] Norma PN-EN 61373 (IEC 61373) 2011 r. Zastosowania kolejowe. Wyposażenie taboru kolejowego. Badanie odporności na udary mechaniczne i wibracje.
- [7] SKARPETOWSKI G.: *Uszkodzenie klatki wirnika silnika trakcyjnego LK 450 X6*. Politechnika Krakowska. Em. Bombardier Transportation CH. 7 Juli 2014 r.

 Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany