

Nikołaj Łukov, Marek Babel

Przekładnia elektryczna lokomotywy spalinowej prądu zmiennego, z asynchronicznymi silnikami trakcyjnymi z wirnikiem pierścieniowym bez falowników trakcyjnych

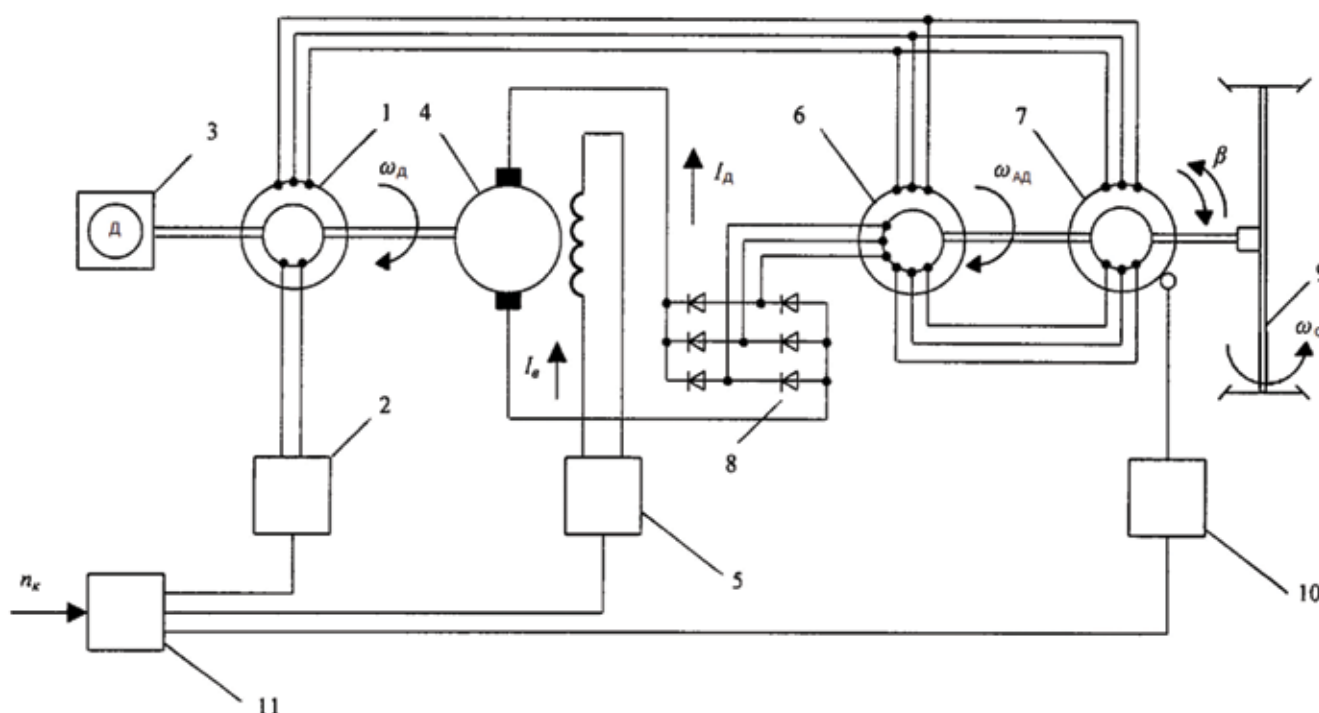
Zastosowanie w lokomotywach spalinowych trakcyjnych prądnic synchronicznych pozwala opracować przekładnie elektryczne prądu zmiennego bez stosowania falowników częstotliwości i zwiększyć wskaźniki techniczno-ekonomiczne lokomotyw. Przedstawiono opis schematów i charakterystyk przekładni elektrycznej, składającej się z trakcyjnej prądnicy synchronicznej i asynchronicznych silników trakcyjnych pierścieniowych. Przy tym jeden z każdej pary silników posiada stojan obrotowy, a obydwa te silniki tworzą konstrukcyjnie jeden zespół.

Słowa kluczowe: lokomotywa spalinowa, przekładnia elektryczna, prądnica synchroniczna, asynchroniczny silnik trakcyjny.

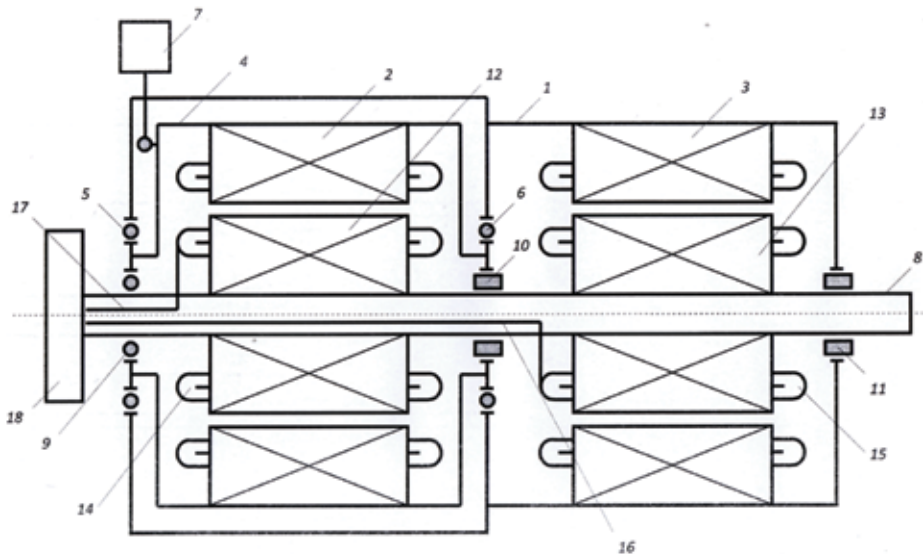
W lokomotywach spalinowych stosowane są przekładnie elektryczne w wariancie prądu stałego i zmiennego. Przekładnie elektryczne w wariancie prąd zmienny – stały i zmienny – stały – zmienny posiadają określone zalety w stosunku do przekładni prądu stałego. Przekładnie elektryczne w wariancie prąd zmienny – stały – zmienny składają się z trakcyjnej prądnicy synchro-

nicznej (TPS) z blokiem wzbudzenia, prostownika trakcyjnego, falownika trakcyjnego częstotliwości (FTC) i asynchronicznych silników trakcyjnych (AST). Takie przekładnie elektryczne opracowano na podstawie układów napędu elektrycznego zestawów kołowych elektrycznych pojazdów szynowych, na których nie występują TPS, a energia elektryczna dostarczana jest z sieci trakcyjnej. Przy występowaniu na lokomotywie spalinowej TPS mogą być opracowane przekładnie elektryczne, z zastosowaniem AST, bez wykorzystania FTC, które posiadają określone wymiary gabarytowe, masę, cenę, wskaźniki niezawodności.

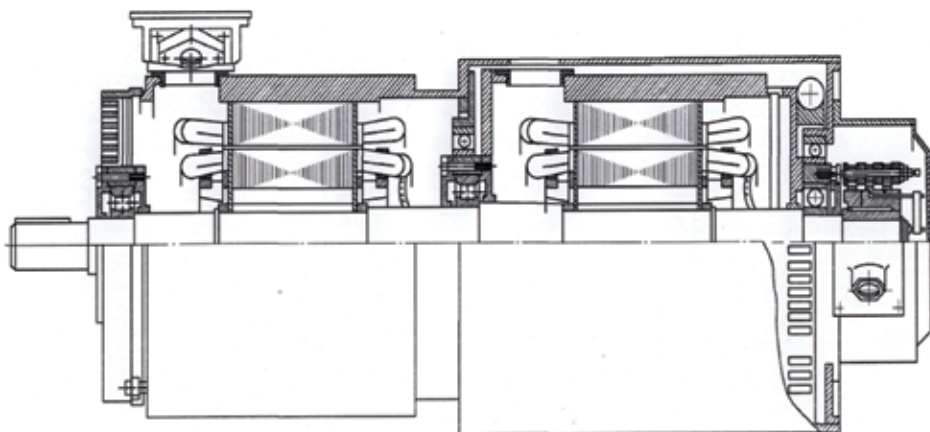
Opracowana przekładnia elektryczna lokomotywy składa się z następujących elementów (patrz rys.1): TPS 1, której uzwojenie wzbudzenia podłączone jest do bloku wzbudzenia 2; wał prądnicy połączony jest z wałem silnika spalinowego 3 i z wałem silnika elektrycznego prądu stałego 4, którego uzwojenie wzbudzenia podłączone jest do drugiego bloku wzbudzenia 5; uzwojenie stojana TPS podłączone jest do uzwojeń stojana AST 6 i 7, których uzwojenia wirnika połączone są szeregowo i podłączone do silnika elektrycznego prądu stałego 4 za pośrednictwem prostownika 8, a wały połączone są między sobą i z osiami zesta-



Rys. 1. Schemat ideowy przekładni elektrycznej lokomotywy z silnikami asynchronicznymi pierścieniowymi bez falowników częstotliwości, gdzie: 1 - TPS, 2 - blok wzbudzenia TPS, 3 - silnik spalinowy, 4 - silnik elektryczny prądu stałego, 5 - blok wzbudzenia silnika elektrycznego prądu stałego, 6 - AST, 7 - AST z obrotowym stojanem, 8 - prostownik, 9 - zestaw kołowy, 10 - mechanizm obrotu stojana, 11 - blok sterowania przekładnią elektryczną, n_k - nastawnik maszynisty, ω_d , ω_m , ω_o - prędkość kątowa wału korbowego silnika spalinowego, asynchronicznego silnika trakcyjnego i zestawu kołowego



Rys. 2. Schemat ideowy trakcyjnego asynchronicznego zespołu dwusilnikowego z obrotowym stojanem jednego silnika, gdzie: 1 – kadłub wspólny, 2 – stojan obrotowy, 3 – stojan nieobrotowy, 4 – kadłub stojana obrotowego, 5, 6 i 9 – łożyska kulkowe, 7 – mechanizm obrotu stojana, 8 – wał, 10 i 11 – łożyska wałeczkowe, 12, 13 – wirniki, 14, 15 – uzwojenia wirników, 16, 17 – przewody, 18 – elementy ślizgowe



Rys. 3. Trakcyjny asynchroniczny zespół dwusilnikowy z obrotowym stojanem jednego silnika

wów kołowych 9 lokomotywy; stojan jednego z AST wykonany jest jako obrotowy i połączony z mechanizmem obrotu 10; blok sterowania 11 przekładnią elektryczną komunikuje się z silnikiem spalinowym 3, blokami wzbudzenia 2 i 5 i mechanizmem 10 obrotu stojana.

W przedmiotowej przekładni elektrycznej zamiast dwóch jednakowych AST pierścieniowych, z których jeden posiada obrotowy stojan, może być zastosowany trakcyjny asynchroniczny zespół dwusilnikowy sterowany płynnie z obrotowym stojanem jednego z silników, który składa się z następujących elementów (rys. 2): wspólny kadłub 1, w którym zamontowano dwa jednakowe stojany – obrotowy 2 i nieobrotowy 3. Stojan obrotowy 2, którego kadłub 4 zabudowany jest w łożyskach 5 i 6, połączony jest z mechanizmem obrotu 7. Wspólny wał 8 zabudowany jest w łożyskach 9, 10 i 11.

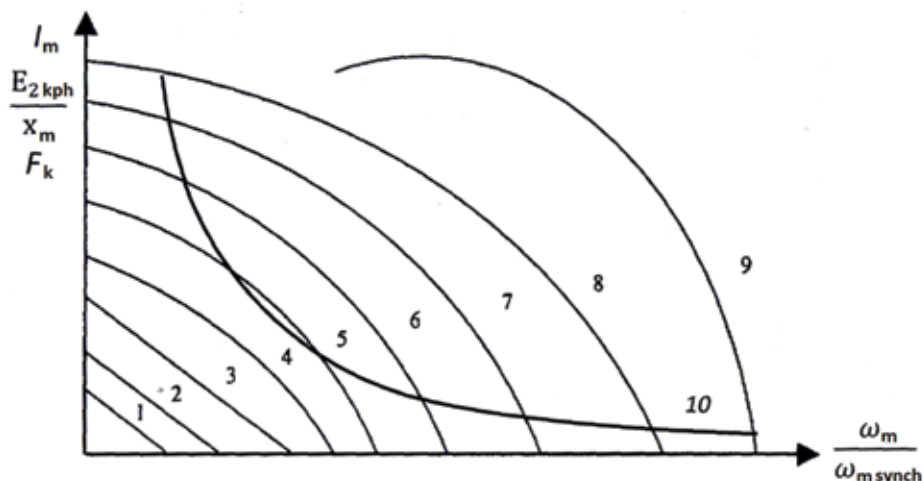
Na wspólnym wale 8, w kolejności, zabudowane są dwa jednakowe wirniki 12 i 13, z uzwojeniami 14 i 15, podłączonymi za pośrednictwem przewodów 16 i 17 do elementów ślizgowych 18 (pierścieni ślizgowych i aparatu szczotkowego), zabudowanych

na wale 8. Przeprowadzone badania teoretyczne i eksperymentalne zespołu dwusilnikowego, w którym jeden z silników asynchronicznych pierścieniowych posiada stojan obrotowy, wykazały wysoką efektywność sterowania zespołem poprzez obrót stojana. Opracowano konstrukcję zespołu dwusilnikowego (rys. 3), odpowiadającą schematowi przedstawionemu na rys. 2.

Opracowana przekładnia elektryczna działa w następujący sposób. Przy maksymalnych obrotach $\omega_{m \max}$ wałów AST i osi zestawu kołowego 9 ω_0 stojan obrotowy jednego z AST powinien być ustawiony w takim położeniu, aby SEM, indukowane w uzwojeniach obracających się wirników AST, były zgodne po fazie, czyli aby kąt rozbieżności między położeniami stojanów AST 6 i 7 β_{\max} wynosił 180° elektrycznych (odpowiada to $\pm 180^\circ/p$ stopniom geometrycznym, gdzie p – liczba par biegunów AST). Przy tym kącie przesunięcia stojanów β_{\max} obydwa AST pracują jak jeden AST o podwójnej mocy. Silnik elektryczny prądu stałego może mieć taki prąd wzbudzenia I_{ex} , jaki jest niezbędny do pracy przekładni elektrycznej w danym stanie pracy. Zwiększenie prądu wzbudzenia I_{ex} prowadzi do zmniejszenia ω_m AST i odwrotnie, zmniejszenie prądu wzbudzenia I_{ex} prowadzi do zwiększenia ω_m . W analizowanym przypadku (w zakresie dużych ω_m) celowe jest dokonywanie zmiany ω_m przez zmianę prądu wzbudzenia silnika elektrycznego prądu stałego do wartości poślizgu $S = 0,25$, przy tym prąd wzbudzenia I_{ex} powinien być maksymalny. Kolejne zmniejszenie ω_m (prędkości lokomotywy) osiągane jest poprzez obrót

stojana AST 7. Przy obrocie stojana w kierunku zmniejszenia β wynikowa SEM uzwojeń wirników 14 i 15 AST 6 i 7 równa jest sumie geometrycznej SEM uzwojeń wirników. Przy tym S zacznie się zmniejszać, wyprostowany prąd I_m w obwodzie silnika prądu stałego 4 ulegnie zmniejszeniu, a moment obrotowy rozwijany przez AST zmniejszy się. Obroty ω_m będą się zmniejszać do wartości, przy której moment obrotowy obydwa AST będzie równy momentowi oporowemu powstającemu na zestawach kołowych lokomotywy. Przy braku kąta przesunięcia między uzwojeniami stojanów AST (tj. przy $\beta = 0^\circ$) SEM, w uzwojeniach 14 i 15 ich wirników, są równe i skierowane naprzeciw, wynikowa SEM równa się zero i obroty $\omega_m = 0$. Zwiększenie ω_m osiągane jest przez obrót stojana AST 7 (przez zwiększenie β) (rys. 4), a następnie poprzez zmniejszenie I_b silnika elektrycznego prądu stałego 4.

Zależności I_m siły pociągowej lokomotywy F_k i stosunków napięcia fazowego E_{2kph} wirników AST (na rozłączonych pierścieniach ślizgowych) do zredukowanej (do obwodu wirnika) reaktancji fazy AST x_m przy $S = 1,0$, w zależności od względnej prędkości obrotowej $\bar{\omega}_m = \omega_m / \omega_{m \text{ synch}}$, przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależności I_m , F_k i stosunków napięcia fazowego E_{2kph} wirników AST do zredukowanej (do obwodu wirnika) reakcyjności fazy AST X_m przy $s = 1,0$ w zależności od względnej prędkości obrotowej $\bar{\omega}_m = \omega_m / \omega_{msynch}$. Elektromechaniczne charakterystyki AST: linie 6 i 7 przy różnych wartościach β (od minimalnej – linia 1 do 180° – linia 5) i różnych prądach wirników I_m (linie 6 – 9) oraz charakterystyka trakcyjna lokomotywy (linia 10)

Opracowana przekładnia elektryczna może być zastosowana przy zmianie przełożenia przekładni 10:1. W związku z wykorzystaniem energii poślizgu wirników AST (opóźnienia się ich w stosunku do wirujących pól magnetycznych stojanów) w silniku elektrycznym prądu stałego 4, przekładnia elektryczna mocy okazuje się bardzo efektywną, ponieważ straty mocy są niewielkie i równe sumie strat w TPS, AST 6 i 7 oraz silniku elektrycznym prądu stałego 4. Wykorzystanie w obwodzie wirnika AST prostownika niesterowanego 8 zwiększa niezawodność przekładni elektrycznej w porównaniu z przekładnią w wariancie prąd zmienny – stały – zmienny. Rozpędzanie się lokomotywy z proponowaną przekładnią elektryczną odbywa się bardzo płynnie: na pierwszym etapie – przez obrót stojana AST 7, a następnie – przez zmniejszenie I_{ex} silnika elektrycznego prądu stałego 4. W związku z tym, że napięcie na prostowniku 8 i silniku elektrycznym prądu stałego 4 (niezależnie od zakresu regulacji prędkości lokomotywy) nie przekracza 25% wartości zredukowanego napięcia na pierścieniach wirników (przy ich nieruchomym stanie $s = 1,0$), moc ustalona nie przekracza 25% od ustalonej mocy przekładni elektrycznej. Konieczność dokonywania obrotu stojana jednego z AST nieznacznie komplikuje konstrukcję przekładni elektrycznej, jednakże opracowanie takich AST nie stanowi większego problemu technicznego.

W opracowanej przekładni elektrycznej AST zasilane są napięciem z TPS o przebiegu sinusoidalnym. Dlatego sprawność i $\cos\phi$ (współczynnik mocy) takich AST i TPS są większe niż AST, zasilanych napięciem z trakcyjnych falowników częstotliwości, znacznie różniących się od przebiegu sinusoidalnego, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości.

Bibliografia:

1. Babel M., Zwiększenie efektywności pracy lokomotyw spalinowych SM31 w eksploatacji, „Technika Transportu Szynowego” 2012, nr 1–2.
2. Lukov N., Babel M., Woszczyzna B., Przekładnia elektryczna lokomotywy spalinowej prądu zmiennego z prądnicą synchroniczną i asynchronicznymi silnikami pierścieniowymi, „Technika Transportu Szynowego” 2017, nr 10.

3. Stokowy B., Elektroniczny układ regulacji przekładni elektrycznej zmodernizowanej lokomotywy spalinowej SM42, „Technika Transportu Szynowego” 2001, nr 1–2.
4. Булгаков А. А., Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1982, 327 с.
5. Винокуров В. А., Попов Д. А. Электрические машины железнодорожного транспорта – М.: Транспорт, 1986, 511 с.
6. Камаев А. А., Конструкция, расчет и проектирование локомотивов, – М.: Машиностроение, 1981, 351 с.
7. Луков Н. М., Космодамианский А. С. Автоматические системы управления локомотивов. – Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007, 429 с.

8. Луков Н. М., Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов, – М.: Машиностроение, 1988, 272 с.
9. Луков Н. М. и др. Передачи мощности тепловозов, – М.: Транспорт, 1987, 279 с.
10. Пугачев А. А., Регулируемый электропривод вспомогательных агрегатов подвижного состава с асинхронным двигателем, имеющим поворотный статор – Дисс. канд. техн. наук, М: – МГУПС (МИИТ), 2009, 153 с.
11. Шишкин В. П., Диалоговое проектирование на микро-ЭВМ асинхронных двигателей с фазным ротором [Текст]: учеб. пособие / В. П. Шишкин, Н. И. Чуворов. – Иваново: [б. и.], 1989, 87 с.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Nikołaj Łukov** – Moskiewski Uniwersytet Komunikacji (MIIT)
dr hab. inż. **Marek Babel** – Instytut Techniczny, PWSZ Nowy Sącz

Alternating-current electric transmission of the diesel locomotive with asynchronous traction slip-ring motors without traction inverters

Use of traction synchronous generators on diesel locomotives allows for development of alternating-current electric transmissions without traction inverters and for increasing technical and economic performance of locomotives. A description of the schematics and characteristics of an electric transmission consisting of an asynchronous traction generator and asynchronous traction ring motors was presented. In this case, one of each pair of motors has a rotary stator, and both motors are designed as a single assembly.

Keywords: diesel locomotive, electric transmission, synchronous generator, asynchronous slip-ring motor.