

## ROZKŁAD OBCIĄŻEŃ MIĘDZY SILNIKI NAPĘDZAJĄCE PRZENOŚNIK TAŚMOWY

LOAD DISTRIBUTION BETWEEN THE BELT CONVEYOR DRIVE MOTORS

**Bogusław Karolewski – Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska**  
**Piotr Ligocki – biuro MT PROJEKT s.c., Wrocław**

*Wykorzystując rozbudowany matematyczny model przenośnika taśmowego wyznaczano momenty elektromagnetyczne dwóch silników napędzających wspólny bęben napędowy przenośnika. Uwzględniono możliwość wystąpienia różnic pomiędzy parametrami silników oraz przesunięcia czasu załączenia jednego z nich. Badano również przypadek współpracy silników z przemiennikami częstotliwości pracującymi w otwartym układzie sterowania. Uwzględniono różnice przebiegów ramp rozruchowych obu przemienników. Symulacje pozwalają ocenić stopień przeciążenia silnika i dopuszczalność rozruchu w danych warunkach.*

**Słowa kluczowe:** przenośniki taśmowe, układ napędowy, silnik klatkowy, przeciążenie, model matematyczny, rozruch

*Using extensive belt conveyor mathematical model, electromagnetic moments of the two engines driving a common drive drum of the conveyor were determined. Taken into account the possibility of differences between the parameters of the motors and the time shift switch one of them. Were also investigated case of cooperation between motors with frequency converters operating in open loop. Allowances for differences starter ramp waveforms both drives. The simulations allow us to assess the degree of overload and start acceptability under given conditions.*

**Key words:** belt conveyors, drive system, induction motor, overload, mathematical model, starting

### Wprowadzenie

Do napędu przenośników taśmowych o dużej długości i wydajności wykorzystuje się układy wielu silników napędowych. W przypadku napędu jednobębnowego (na ogół czołowego), bęben może być napędzany przez 2 silniki, umiejscowione najczęściej po jego obu stronach. W układzie dwubębnowym – przy czym na ogół oba bębny znajdują się na stacji czołowej – liczba silników może wzrosnąć do 4. W bardzo długich przenośnikach wykorzystuje się jeszcze trzeci bęben na stacji końcowej, czyli liczba silników może osiągnąć 6. W niektórych rozwiązaniach stosuje się jeszcze dodatkowy napęd pośredni na trasie przenośnika.

Wykorzystanie kilku silników pozwala nie tylko na ograniczenie mocy pojedynczej maszyny, ale przede wszystkim poprawia rozkład naprężeń w taśmie [4]. Wadą tego rozwiązania jest komplikowanie układu sterowania napędami. Występują również problemy związane z nierównomiernym rozkładem obciążeń pomiędzy poszczególne silniki, co jest tematem niniejszego artykułu. Nierównomierne obciążenie napędów może prowadzić do szkodliwego zjawiska niedociążenia jednych silników przy równoczesnym przeciążeniu innych.

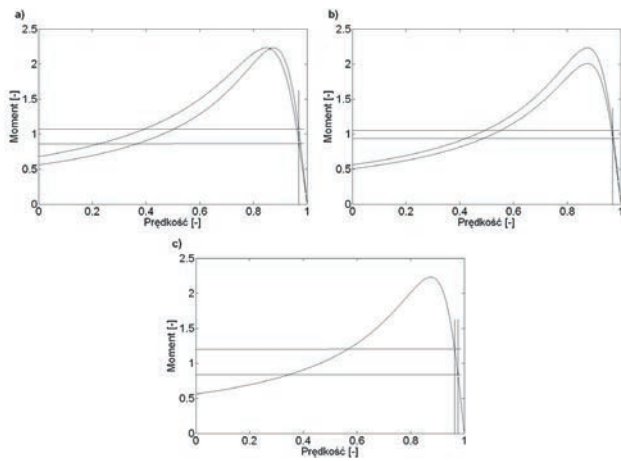
### Przyczyny nierównomierności obciążenia silników

Nierównomierności rozkładu mocy między silnikami, występujące w układach wielonapędowych z maszynami indukcyjnymi, mogą być spowodowane czynnikami dynamicznymi, jak skoki obciążeń w trakcie rozruchu oraz czynnikami statycznymi [1]. Wśród przyczyn statycznych można wyróżnić:

niejednakowe właściwości fizykochemiczne odcinków taśmy, różnice w przełożeniach przekładni, różniące się między sobą charakterystyki silników napędowych czy sprzęgieł hydrokinetycznych, różne napięcia zasilania silników czy odmienne sprawności napędów. Jednocześnie warto zaznaczyć, że stosowanie sprzęgieł hydrokinetycznych (ze stałym bądź zmiennym wypełnieniem) pozwala na odpowiednie rozłożenie obciążenia pomiędzy silniki napędów wielobębnowych [3].

Przyczyny różnic w obciążeniu silników napędu wielobębnowego można podzielić również w zależności od tego czy silniki napędowe pracują na wspólnym wale mechanicznym napędzającym jeden bęben napędowy, czy też nierównoważenie obciążeń dotyczy silników zamontowanych na różnych bębnach napędowych [7]. W pierwszym przypadku podstawową przyczyną problemu są różnice w wielkościach charakteryzujących silniki układu zdwojonego, czyli np. między wartościami parametrów silników napędowych, nawet w przypadku stosowania silników tego samego typu (rys. 1a), czy między wartościami napięć zasilających (rys. 1b). Powoduje to, w razie drobnych różnic, odmienny przebieg charakterystyk mechanicznych silników, a w związku z tym przesunięcie punktu pracy dla określonej wartości prędkości (takiej samej z uwagi na sprzężenie mechaniczne obu maszyn w przypadku nie stosowania sprzęgieł poślizgowych). Skutkuje to różnicą ich obciążeń, co prowadzi do przeciążenia silnika o sztywniejszej charakterystyce [3].

Z kolei przy rozpatrywaniu nierównomiernego obciążenia silników połączonych z różnymi bębnami napędowymi, należy brać pod uwagę różne prędkości tych bębnów (rys. 1c). Przyczyną różnic w prędkościach mogą być różne średnice obu bębnów [11]. Pokryte są one gumową okładziną, która może być w różnym stopniu starta. Przy usytuowaniu bębnów w sto-



Rys. 1. Graficzne przedstawienie nierównomierności obciążeń silników napędowych spowodowanych różnicami: a) wartości parametrów, b) poziomu napięcia zasilającego silniki, c) prędkości obrotowych [7]

Fig. 1. Graphical representation unevenness of the drive motors load caused by differences: a) the level of motor supply voltage, b) the level of motor supply voltage, c) the rotational speed [7]

sunkowo niewielkiej odległości, na jednej stacji napędowej, trzeba uwzględnić również fakt mniejszej prędkości taśmy za bębnum napędowym niż przed nim. Wynika to ze zmniejszania się wartości sił w taśmie na odcinku opasującym bębnum napędowy i kurczenia się taśmy (tzw. poślizg sprężysty, niezbędny do przenoszenia siły z bębna na taśmę) [3].

Należy zaznaczyć, że taśma, zwłaszcza z linkami stalowymi – zazwyczaj stosowana w długich przenośnikach – jest stosunkowo sztywna, mimo swoich lepkosprężystych właściwości [7].

Ogólnie rzecz biorąc, rozkład mocy pomiędzy silniki poszczególnych bębnow napędowych zależy od charakterystyk elementów układu napędowego oraz od właściwości zastosowanej taśmy.

### Zagrożenia związane z różnicami obciążenia silników

Problem nierównomiernego rozkładu mocy pomiędzy dwa silniki sprzężone ze wspólnym bębnum napędowym jest istotny zarówno przy rozpatrywaniu rozruchu, jak i pracy ustalonej przenośnika. W obu stanach przejawia się jednak w inny sposób i stwarza odmienne zagrożenia.

Różny stopień obciążenia napędów podczas rozruchu przenośnika może prowadzić do przeciążenia jednego z silników przy niedociążeniu (czy wręcz pracy generatorowej) drugiego. Tym samym w skrajnych przypadkach może on uniemożliwić przeprowadzenie rozruchu. W czasie rozruchu przenośnika taśmowego ze stałym położeniem bębna napinającego, niektóre silniki mogą krótkotrwale spełniać rolę hamulca, a więc pracować jako generator i powodować dodatkowe obciążenie układu napędowego [1].

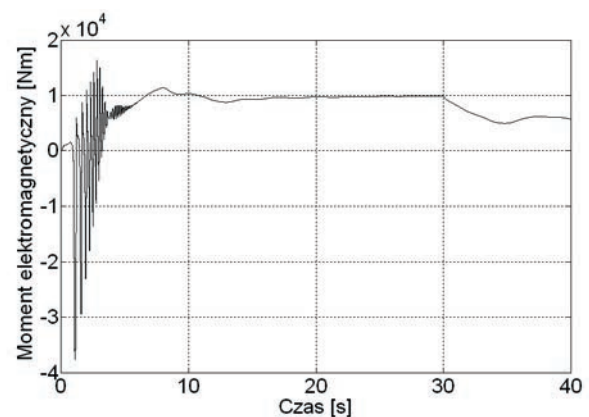
Przy rozruchu długich przenośników taśmowych z silnikami zasilanymi przez przemienniki częstotliwości, stosuje się zwykle sterowanie prędkością przy zastosowaniu rampy rozruchowej określonego kształtu [2]. Sterowanie rozruchem przy ustalonej wartości czasu rozruchu może być realizowane w otwartej pętli sterowania. Praca w takim układzie stwarza pro-

blem z zapewnieniem jednakowej prędkości zadanej układów sterowania obydwu silników połączonych za pomocą wspólnego wału mechanicznego. W literaturze proponowane jest rozwiązanie tego problemu poprzez zastosowanie sterowania wektorowego przy zadawaniu prędkości jednemu z przemienników (napęd typu master) oraz wymuszaniu takiej samej wartości momentu, jak wytwarzany przez pierwszy silnik, drugiemu przemiennikowi (napęd typu slave) [9]. Sterowanie wektorowe jest jednak znacznie bardziej złożone od skalarnego i wymaga większej wiedzy na temat obiektu regulacji czyli silnika oraz konieczności montowania dodatkowych czujników bądź stosowania estymatorów. Dlatego w wielu układach napędowych przenośników wykorzystuje się sterowanie skalarnie, a ocena stosowania tego typu sterowania w napędach przenośników, pod kątem kryteriów jakości sterowania, wskazuje na wysoką jego skuteczność [6].

Stany dynamiczne typu rozruch są krótkotrwałe, a więc czas występowania nierównomiernego obciążenia silników, w stosunku do okresu pracy ustalonej, jest stosunkowo krótki. Jednak w stanach dynamicznych może pojawiać się poślizg niesprężysty na bębnum napędowych, doprowadzając do nieprawidłowego rozkładu obciążeń między silniki napędowe. Poślizg powoduje, że bęben na którym on wystąpił, przestaje przekazywać siłę napędową taśmie. Jest to skrajny przypadek nierównomierności obciążenia, gdy cała siła napędowa jest przekazywana przez jeden bęben, podczas gdy na bębnie drugim, z poślizgiem, obciążenie jest znacznie zredukowane. Sytuacja ta dotyczy zwłaszcza mniej rozciągliwych taśm z linkami stalowymi [8].

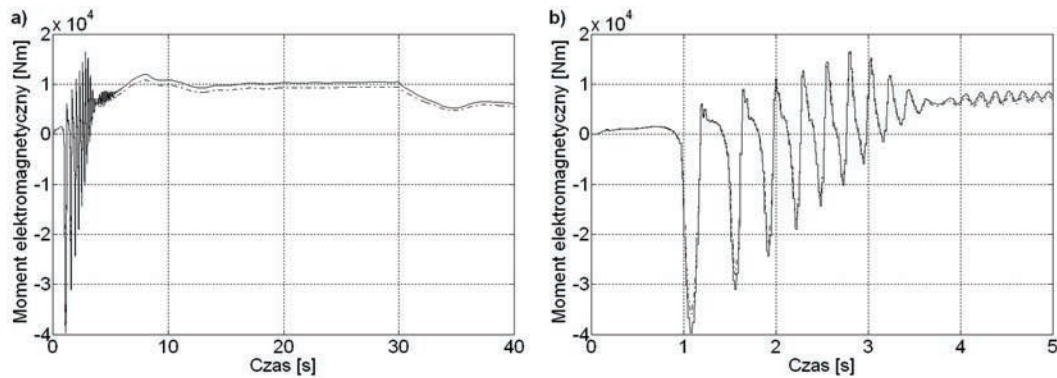
### Wyniki symulacji pracy dwóch silników napędzających wspólny bęben

Wykorzystując rozbudowany matematyczny model przenośnika taśmowego [5], wykonano badania symulacyjne, zmierzające do określenia, w jakim stopniu wybrane zakłócenia mogą wpływać na przebieg rozruchu przenośnika z napędem częstotliwościowym. Obiektem badań był przenośnik o długości 3,6 km, z napędem 3-bębnowym i silnikami po 630 kW. Jako odniesienie wykorzystano przebiegi momentów elektromagnetycznych pary silników napędzających wspólnie wał danego bębna napędowego przy identycznych wartościach paramet-



ys. 2. Przebiegi momentów elektromagnetycznych silników napędzających wał bębna przy identycznych wartościach parametrów

Fig. 2. Courses of electromagnetic torque of motors driving pulley shaft with identical parameter values



Rys. 3. Przebiegi momentów elektromagnetycznych silników napędzających wał wspólnego bębna napędowego przy 5% zróżnicowaniu wartości ich parametrów (a) oraz powiększenie początkowego odcinka przebiegu (b)

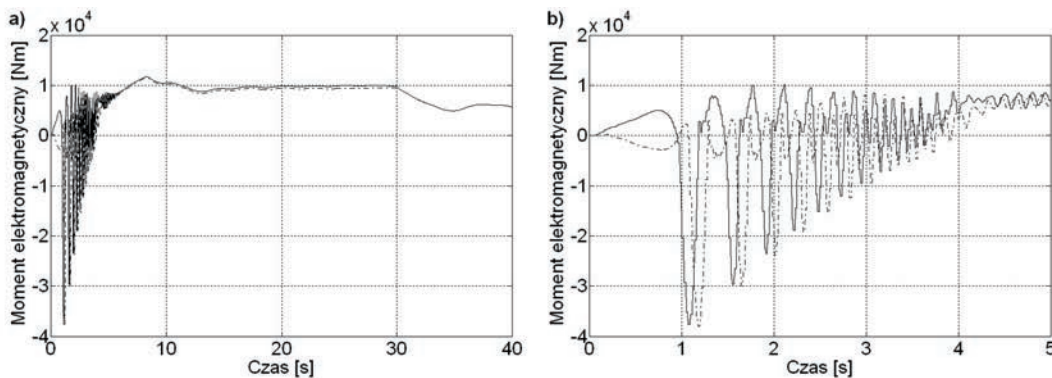
Fig. 3. Courses of electromagnetic torque of motors driving a common shaft driving pulley at 5% variation of the parameters (a) and enlargement of the initial section of the course (b)

trów obu urządzeń oraz liniowym narościę prędkości zadanej w czasie 30 sekund, identycznym dla obu przekształtników (rys. 2). Ponieważ sygnały sterujące oraz parametry silników i łączącego je układu mechanicznego - sprzęgieł podatnych, wałów i przekładni - są identyczne, wobec tego przebiegi na rysunku 2 nałożyły się na siebie.

W pierwszej kolejności badano wpływ różnic pomiędzy wartościami parametrów silników tego samego typu na przebiegi rozruchowe przenośnika taśmowego. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi momentów elektromagnetycznych generowanych przez silniki napędzające wspólnie wał pojedynczego bębna przy założeniu rozbieżności ich parametrów (reaktancje i rezystancje stojana oraz wirnika, jak również indukcyjność wzajemna) rzędu 5%. W połączeniu mechanicz-

Dalsze badania dotyczyły wpływu różnic między charakterystykami sterowania przemienników na przebiegi rozruchowe. Przyjęto różniące się między sobą przebiegi prędkości zadanej przy zastosowaniu liniowej rampy narostu prędkości. Różnicę uzyskano poprzez opóźnienie startu jednego z silników napędowych o 0,1 sekundy, co przy czasie rozruchu 30s odpowiada ok. 0,3% różnicy prędkości obu silników. Otrzymane przebiegi momentów napędowych wykreślono na rysunku 4.

Różnice pomiędzy chwilowymi wartościami prędkości zadanej spowodowały znaczną rozbieżność pomiędzy przebiegami momentów obu silników, zwłaszcza tuż po starcie pierwszego napędu. Wspomniane zjawisko jest wyraźnie widoczne na rysunku 4b.

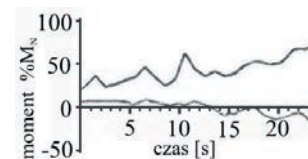


Rys. 4. Przebiegi momentów elektromagnetycznych silników napędzających wał wspólnego bębna napędowego przy zastosowaniu opóźnienia załączenia jednego z nich o 0,1 s (a) oraz powiększenie początkowego odcinka przebiegu (b)

Fig. 4. Courses of electromagnetic torque of motors driving a common shaft driving pulley with using delay one of them to 0,1 s and the initial section of the enlarged course (b)

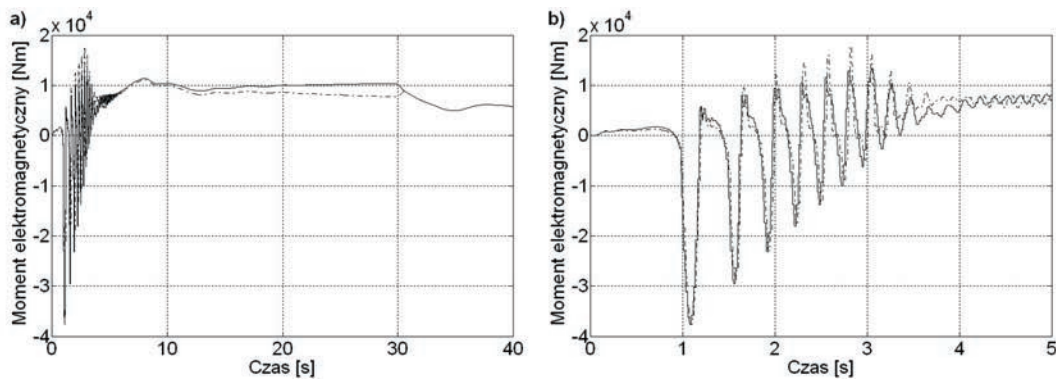
nym silników zastosowano sprzęgła podatne o charakterystyce nieliniowej z histerezą.

Nawet dosyć znaczne rozbieżności (rzędu 5%) w wartościach parametrów schematu zastępczego silników nie przeszkodziły w dokonaniu rozruchu urządzenia (rys. 3a). Wpływ różnic parametrów uwidocznił się w postaci zmian amplitud drgań momentu w początkowym okresie rozruchu, co zostało przedstawione na rysunku 3b. W dalszym przebiegu rozruchu różnice między wartościami momentów obu silników były niewielkie.



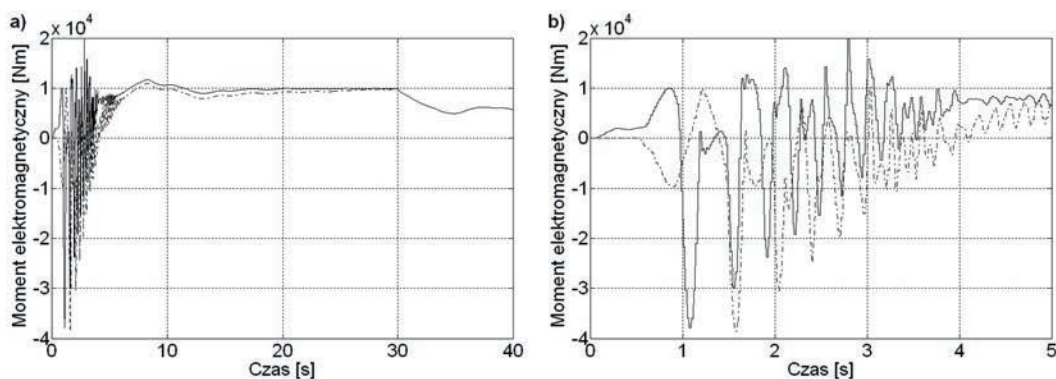
Rys. 5. Pomiarowe przebiegi momentów ilustrujące przejście do pracy generatorowej jednego z dwóch silników pracujących na wspólnym wale [10]

Fig. 5. Measuring courses of moments illustrating transition to generator operation one of the two motors working on a common shaft [10]



Rys. 6. Przebiegi momentów elektromagnetycznych silników napędzających wał wspólnego bębna napędowego przy rosnącej wartości różnic prędkości zadanych obu silników (a) oraz powiększenie początkowego odcinka przebiegu (b)

Fig. 6. Courses of electromagnetic torque of motors driving a common shaft driving pulley with the increasing difference between set rotational speed values of two engines (a) and enlargement of the initial section of the course (b)



Rys. 7. Przebiegi momentów elektromagnetycznych silników napędzających wał wspólnego bębna napędowego przy malejącej wartości różnic prędkości zadanych obu silników (a) oraz powiększenie początkowego odcinka przebiegu (b)

Fig. 7. Courses of electromagnetic torque of motors driving a common shaft driving pulley with decreasing difference between set rotational speed values of two engines (a) and enlargement of the initial section of the course (b)

W pewnych okresach silniki wzajemnie się napędzają. Praca generatorowa drugiego (wolniejszego) silnika kosztem momentu napędowego generowanego przez pierwszy trwa do 1 sekundy rozruchu. Wartość momentu osiągnięta w tym okresie przez pierwszy silnik stanowi połowę wartości maksymalnej jaka wystąpiła w trakcie trwania całego rozruchu i przekracza ponad 3 razy wartość osiągniętą w początkowym okresie rozruchu przy braku różnic prędkości zadanych silników (rys. 3b). Powyższe zjawisko może prowadzić do przeciążenia silnika i przerwania rozruchu przez systemy zabezpieczające.

W [10] opublikowano wyniki pomiarów dotyczących analizowanej sytuacji. Zmierzone przebiegi momentów obu silników (rys. 5) znacznie się od siebie różnią, a charakter ich zmian jest podobny jak momentów obliczeniowych z rysunku 4b w okresie od załączenia do około 0,8 s.

W dalszym etapie rozruchu, powyżej 5-tej sekundy (rys. 4a), rozbieżności między przebiegami momentów obu silników okazały się znacznie mniejsze. Widać więc, że różnice pomiędzy chwilowymi wartościami prędkości zadanych mają największy wpływ na początkowy etap rozruchu. Potwierdzają to badania przy zastosowaniu rosnącej wartości tych różnic (ta sama chwila startu obu silników przy wydłużeniu rozruchu jednego z nich o 0,5 s; rys. 6) oraz przy różnicy malejącej

(czas startu silników przesunięty o 0,1s przy tej samej chwili zakończenia rozruchu; rys. 7).

## Podsumowanie

Z uwagi na krótki czas trwania rozruchu, nieznaczne przeciążenie jednego z silników nie powodujące awaryjnego wyłączenia, nie stanowi istotnego problemu przy założeniu wyrównania obciążeń po osiągnięciu stanu ustalonego. Wartość i czas trwania przeciążenia można wyznaczać symulacyjnie. Przy większych rozbieżnościach pomiędzy silnikami, przeciążenia mogą być groźne i zabezpieczenia nie powinny dopuścić do przeprowadzenia rozruchu.

Uzyskane wyniki badań układu z przemiennikami w otwartej pętli sterowania dowodzą konieczności zachowania jednakowej wartości prędkości zadanej obu silników jako podstawowego warunku uzyskania właściwego rozkładu mocy pomiędzy silniki napędu jednobębnowego, a tym samym poprawnego przebiegu rozruchu przenośnika.

Podobne badania można wykonać dla silników napędzających dwa lub trzy bębny napędowe. Model umożliwia uwzględnienie różnic prędkości pomiędzy bębnami.

## Literatura

- [1] Antoniak J, Lutyński A., Zastosowanie układów soft-start w napędach długich górniczych przenośników taśmowych. Pr. Nauk. Inst. Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 80, Konferencje nr 20, Wrocław 1996, s. 9-21
- [2] Bardos A., Starting Ramps of Overland (Long Distance) Belt Conveyor. Bulk Solids Handling, 2000, vol. 20, nr 2, s. 153-157
- [3] Bolt A. G., Fluid Couplings vs. Electronic Soft Starts in the Drive to Conveyors. Beltcon 9, Johannesburg, October 1997
- [4] Karolewski B, Ligocki P., Sposoby kształtowania przebiegów rozruchowych przenośnika taśmowego. Pr. Nauk. Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 63, Studia i Materiały nr 29, Wrocław 2009, s. 447-457
- [5] Karolewski B, Ligocki P., Modelling of long belt conveyors, (Modelowanie długich przenośników taśmowych). Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 16, nr 2, 2014, s. 179-187
- [6] Landy C., Vector Controlled Variable Speed Drives – a Viable Alternate for Driving Conveyors. Beltcon 10, Johannesburg, October 1999
- [7] Sheehy D. J., Balancing of Multi-Drive Conveyor Motors with Wound Rotor Motors. Bulk Solids Handling, vol. 23 nr 3, 2003, s. 182-185
- [8] Sur S., Dual Drives for Belt Conveyors. Bulk Solids Handling, vol. 7 nr 4, august 1987, s. 509-514
- [9] Szymański J., Przemienniki częstotliwości w wielosilnikowym napędzie wału o dużym momencie rozruchowym. VIII Krajowa Konferencja Naukowa „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym”, SENE 2007, Łódź 21-23 listopada 2007
- [10] Szymański J., Sterowanie współbieżne wielosilnikowym zespołem napędowym powierzchniowego przenośnika taśmowego. Pr. Nauk. Politechniki Radomskiej, seria: Transport, nr 1(21), 2005
- [11] Vierlig A., Zur Theorie der Band Förderung. Continental Transportband-Dienst, 3rd edition 8, 1972

