# Przykłady modelowania własności mechanicznych i dynamiki napędów przenośników taśmowych z wykorzystaniem oprogramowania SimulationX

René Noack, Jörg Arloth, Paweł Mendyka

## 1. Wprowadzenie

Przenośniki taśmowe należą do urządzeń transportu ciągłego i wykorzystywane są na całym świecie do transportu materiałów sypkich na krótkich i średnich dystansach. Użytkowanie tego typu przenośnika wymaga zapewnienia jego możliwie dużej dostępności (minimalizacji czasu przestojów organizacyjnych i remontowych), przez co wymagania niezawodności stawiane strukturze mechanicznej i układowi napędowemu są bardzo wysokie. W fazie projektowania struktury mechanicznej istnieje wiele sprawdzonych programów narzędziowych ułatwiających konstruktorowi jego zadanie. Dodatkowo, oprogramowanie umożliwiające symulację całych systemów mechanicznych pozwala na analizę przenośnika taśmowego jako złożonej struktury fizycznej, w celu opracowania nowych, innowacyjnych rozwiązań bądź optymalizacji istniejących konstrukcji czy poprawy funkcjonowania przenośnika w trakcie pracy lub podczas rozruchu i hamowania.

Symulacje systemów opisujących zjawiska i układy z różnych dziedzin fizyki – np. mechaniki, elektroniki, termiki czy hydrauliki – zwane w literaturze zagranicznej symulacjami multifizycznymi (ang. *multi-physics*) stały się w ostatnim czasie standardowymi narzędziami wykorzystywanymi w wielu dziedzinach przemysłu do projektowania, rozwoju i analiz wszelkiego rodzaju rozbudowanych maszyn – od etapu pierwszego szkicu aż do wirtualnego prototypu. Symulacje takie dostarczają informacji o zachowaniu systemu zarówno w nominalnych, jak i w ekstremalnych warunkach i pozwalają ocenić wzajemne oddziaływania pomiędzy komponentami danego systemu na długo przed rozpoczęciem właściwej produkcji. Symulacja systemowa nie skupia się na pojedynczym z komponentów danego systemu, ale ocenia je jako współpracującą ze sobą całość. Takie podejście pozwala na zrozumienie i ocenę wzajemnych relacji pomiędzy mechanicznymi, hydraulicznymi, elektronicznymi i innymi cechami systemu w sposób rzetelny i efektywny, a przez to na weryfikację działania całego systemu.

Systemowy model przenośnika taśmowego pozwala na analizę wielu różnych aspektów działania tego urządzenia, w zależności od interesującego inżyniera obszaru jego działania, np. części mechanicznej, układu przeniesienia napędu, napędów elektrycznych czy układu sterowania. Aby móc zrealizować tego typu analizy w sposób efektywny, niezbędne jest posiadanie

**Streszczenie:** W artykule krótko przedstawiono metodę modelowania przenośnika taśmowego, wraz z wymienieniem najpopularniejszych programów przemysłowych służących do analizy tego urządzenia. Wskazano, że szczególnie korzystnym środowiskiem do analizowania złożonych zagadnień związanych z przenośnikami jest symulacja multifizyczna (dotycząca równocześnie kilku dziedzin fizyki, np. mechaniki, elektrotechniki i hydrauliki), opisana w dalszej części artykułu na przykładzie programu SimulationX. Przedstawiono strukturę tego programu oraz budowę podstawowego modelu symulacyjnego przenośnika taśmowego. Zilustrowano kilka praktycznych scenariuszy wykorzystania takiego modelu – do analizy dynamicznej sił w taśmie, do odstrajania regulatorów sterujących przenośnikiem, do badań układów napędowych oraz do analiz termicznych silnika elektrycznego napędzającego przenośnik Artykuł zakończono, podając perspektywy dalszego rozwoju przedstawionego podejścia symulacyjnego.

### MODELING EXAMPLES OF THE MECHANICAL AND DRIVE RELATED DYNAMICS OF BELT CONVEYORS USING SIMULATIONX SOFTWARE

***Abstract:*** *This article briefly presents the method of conveyor belt modelling, including the most popular industrial programs for analysing this kind of machine. It has been shown that a particularly advantageous environment for analysing complex conveyor issues is a multi-physical simulation (which simultaneously involves several fields of physics, such as mechanics, electrical electrotechnics and hydraulics), described later in the article on the example of SimulationX software. The structure of this program was presented, as well as the construction of the basic model of a conveyor belt. Several practical scenarios for the use of such a model – for dynamic analysis of the belt, for the set-up of the conveyor controllers, for testing the drive systems and for the thermal analysis of the electric motor driving the conveyor were illustrated. The article was concluded showing development perspectives of the presented simulation approach.*

dostępu do ustandaryzowanych modeli urządzeń składowych przenośnika, jak również zapewnienie odpowiedniej parametryzacji tychże modeli. Dla potrzeb parametryzacji wykorzystuje się zarówno parametry projektowe przenośnika, jak również zintegrowane z modelami komponentów składowych odpowiednie bazy danych parametrów danych urządzeń, oparte najczęściej o dane dostarczone np. przez poszczególnych producentów taśm, łożysk, silników, przekładni itp. W zależności od przyjętej koncepcji sterowania model systemowy przenośnika może zostać wykorzystany w podejściu MIL, SIL i HIL (odpowiednio ang. *model*, *software*, *hardware in the loop* – model, oprogramowanie, urządzenie w pętli [sprzężenia zwrotnego]). W rozdziale czwartym niniejszej publikacji przedstawiono kilka przykładowych scenariuszy aplikacyjnych takiego modelu.

## 2. Obecnie stosowana metodologia symulacji dynamicznej przenośników taśmowych

Obliczenia dynamiki przenośników taśmowych są obecnie powszechną praktyką inżynierską. Od pierwszych publikacji na ten temat (m.in. [7]) aż do dnia dzisiejszego [18] przedstawiony poniżej model fizyczny uznawany jest za podstawowy (rys. 1). W przedstawionym podejściu przenośnik został podzielony na kilka sekcji: stację napędową i zwrotną oraz kilka dyskretnych sekcji taśmy, reprezentowanych przez model sprężysto-tłumiący.

Kolejnym ważnym aspektem związanym z modelowaniem przenośników taśmowych jest matematyczny opis oporów ruchu w odpowiednich fragmentach taśmy. Istnieje wiele metod obliczeniowych związanych z modelowaniem tego typu zjawisk, często bazujących na obowiązujących standardach i regulacjach, takich jak np. niemiecka norma DIN22101 [1]. Norma ta określa całkowite opory ruchu F jako sumę oporów częściowych, wyrażonych zależnością (1):

$$F = F_H + F_N + F_{St} + F_S \quad [\mathrm{N}] \qquad (1)$$

gdzie:
$F_H$ – opory główne;
$F_N$ – opory drugiego rzędu;
$F_{St}$ – opory nachylenia trasy;
$F_S$ – opory dodatkowe (specjalne).

Szczegółowy opis poszczególnych składowych oporów ruchu można znaleźć w publikacjach [1] i [18].

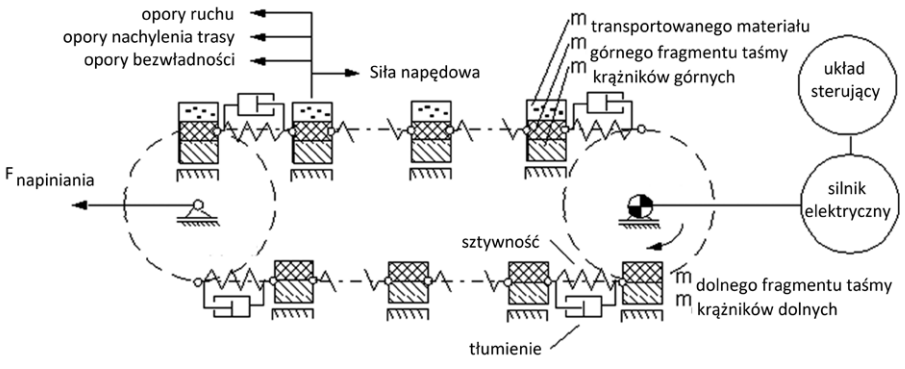
## 3. Oprogramowanie do analizy dynamiki przenośników taśmowych

Na świecie można obecnie spotkać szeroką gamę oprogramowania pomagającego inżynierom projektować i analizować przenośniki taśmowe; szczegółowy przegląd tego typu oprogramowania zawarto w publikacjach [9] i [19]. Należy tutaj wymienić m.in. programy Sidewinder firmy AC-Tek (opisany w publikacji [16]), program Belt Anlayst firmy Overland [15], BELTSTAT i PSTRESS firmy Conveyor Dynamics [9], Helix Delta T firmy Helix Technologies [8] czy RECURDYN firmy FunctionBay [11]. Wszystkie wymienione programy oferują możliwość wyliczania parametrów taśmy przenośnika, zarówno w fazie ruchu ustalonego, jak również podczas rozruchu i hamowania. Są to specjalistyczne programy, które dzięki rozbudowanym bazom elementów bibliotecznych (np. różnych rodzajów taśm) ułatwiają inżynierom fazę projektowania i doboru poszczególnych elementów przenośnika dla określonych warunków projektowych. Programy te są do siebie stosunkowo podobne, a o konkretnym zastosowaniu decydują w praktyce doświadczenie i preferencje użytkownika.

W Polsce również realizowanych jest szereg prac związanych z symulacjami i analizami pracy przenośników taśmowych. Badacze bardzo często w tym celu wykorzystują pakiety do obliczeń numerycznych (np. w pracy przedstawionej w publikacji [3] wykorzystano program Matlab) lub przedstawiają tylko wyniki analiz, nie odnosząc się do użytego oprogramowania (m.in. prace [5, 6, 12, 13 i 17]). Polskim programem służącym do analizy przenośników taśmowych jest pakiet QNK wraz z modułem obliczeniowym TASMTEST (program został opisany m.in. w publikacji [14]). Możliwości pakietu QNK odpowiadają wyżej wymienionym programom zagranicznym. Obliczenia prowadzone z wykorzystaniem programu QNK są również zgodne z normą [1].

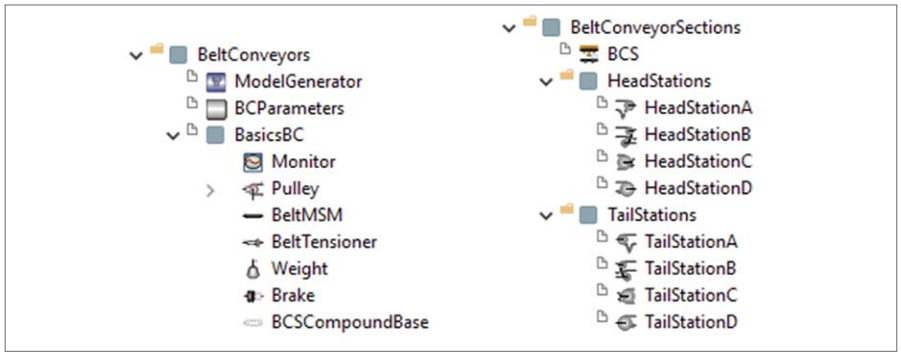
Przytoczone oprogramowanie, jakkolwiek bardzo funkcjonalne, posiada jedną istotną wadę – pozwala przeprowadzić tylko i wyłącznie zakres badań symulacyjnych przewidzianych przez producenta, dotyczących tylko i wyłącznie przenośnika taśmowego. Nie można zatem zastosować podejścia systemowego – równoczesnej analizy układów, w których przenośnik taśmowy jest elementem większego systemu. Przykładem może być analiza drgań skrętnych wałów układów napędowych, zjawisk termicznych w silniku elektrycznym bądź dobór parametrów regulatora sterującego prędkością przenośnika.

Unikalnym oprogramowaniem, pozwalającym na analizę wymienionych zjawisk bez potrzeby prowadzenia złożonych ko-symulacji (symulacji w kilku programach komputerowych jednocześnie, celem np. równoczesnej analizy zjawisk hydraulicznych, mechanicznych

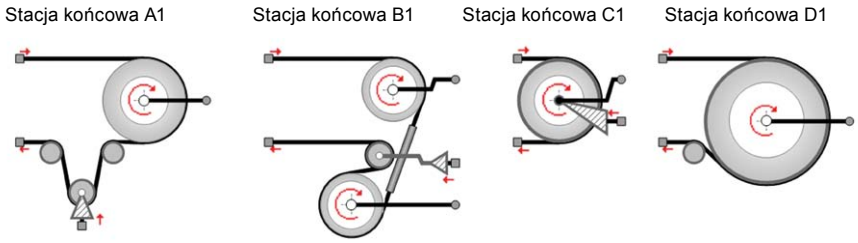



**Rys. 1.** Podstawowy schemat modelu fizycznego przenośnika taśmowego (na podstawie [4])

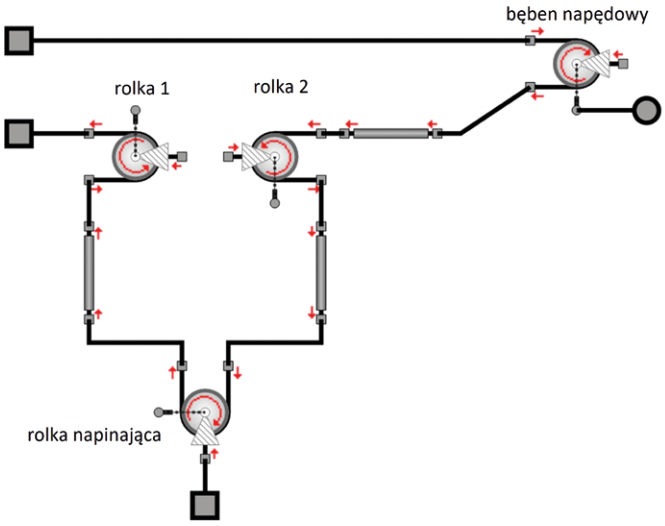
i elektrycznych), znajdującym zastosowanie do systemowych symulacji przenośników taśmowych, jak również innych złożonych urządzeń mechanicznych, jest pakiet SimulationX firmy ESI ITI GmbH. Pakiet ten jest oparty o zestaw bibliotek, znacząco ułatwiających modelowanie konkretnych urządzeń i maszyn (np. dźwigów, pojazdów, maszyn do robót ziemnych, napędów bateryjnych itp.). Jedną z nich jest biblioteka BeltConveyor (z ang. przenośnik taśmowy), oparta o zasady modelowania przedstawione w rozdziale 2. Wymienione biblioteki elementów powstają na drodze współpracy pomiędzy producentem oprogramowania a ośrodkami badawczymi i akademickimi na całym świecie. Autorzy niniejszej publikacji są zarówno członkami zespołu twórców programu SimulationX, jak również wykorzystują go w codziennej praktyce inżynierskiej do rozwiązywania problemów i realizacji projektów przemysłowych.




**Rys. 2.** Elementy biblioteki BeltConveyor (przedstawiono oryginalne, występujące w programie nazwy elementów biblioteki dotyczącej przenośników taśmowych – pochodzące z języka angielskiego)




**Rys. 3.** Różne rodzaje modeli stacji końcowych przenośnika



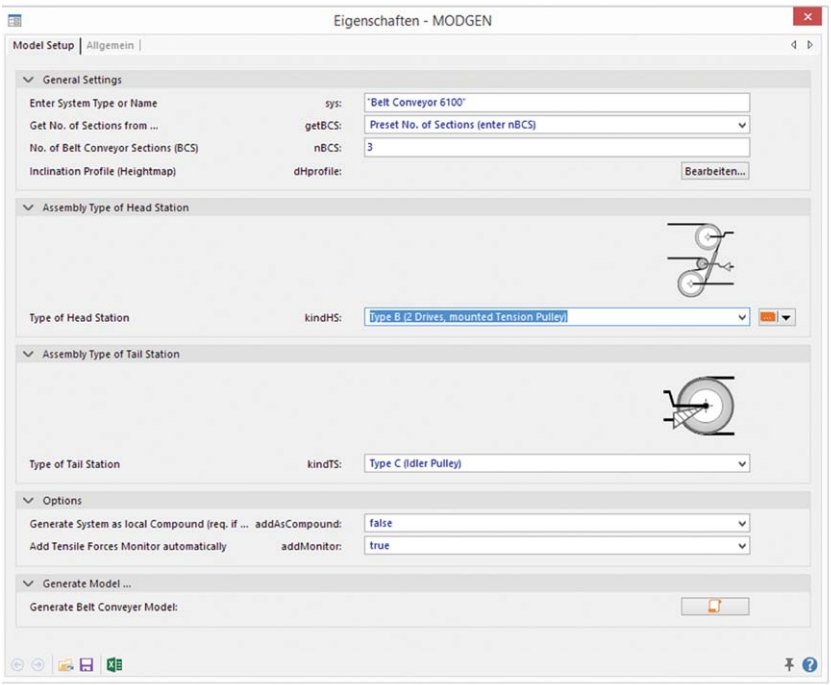

**Rys. 4.** Model stacji napędowej z napinaniem grawitacyjnym (typ A)

### *Podstawowe elementy modelowe*

Na rys. 2 przedstawiono poszczególne składniki wspomnianej powyżej biblioteki BeltConveyor – rysunek jest odzwierciedleniem drzewa wyboru elementów, stanowiącego element programu symulacyjnego.

Nazwy elementów biblioteki opisane są w języku angielskim, tak samo jak pakiet SimulationX. Poza elementem ModelGenerator, pozwalającym na uproszczone, proceduralne generowanie modelu przenośnika, oraz centralnym elementem pozwalającym określić parametry projektowe, nazwanym BCParameters, w bibliotece występują dwie podgrupy elementów. Podgrupa BasicsBC zawiera podstawowe elementy modelujące segment taśmy przenośnika wraz z krążnikami, nazwane BeltMSM, oraz elementy modelujące bębny Pulley. Przy pomocy tych elementów, jak również dodatkowych modeli z biblioteki (np. napinaczy czy hamulców), możliwe jest modelowanie bardziej złożonych układów mechanicznych.

Podgrupa BeltConveyorSections zawiera bardziej złożone w stosunku do swojej poprzedniczki modele elementów, umożliwiające budowę modeli przenośnika zgodnych z podejściem przedstawionym na rys. 1. Zawarty w podgrupie element BCS odpowiada sekcji taśmy z obciążonym (załadowanym) pasmem górnym oraz nieobciążonym (pustym) pasmem dolnym. Dodatkowo podgrupa zawiera cztery złożone konfiguracje stacji końcowych, przedstawionych na rys. 3. Konfiguracje te zostały zbudowane z prostych, podstawowych modeli elementów (rys. 4) i mogą zostać domyślnie sparametryzowane zgodnie z normą [1], lub skonfigurowane ręcznie przez użytkownika.




**Rys. 5.** Okno generatora modelu przenośnika taśmowego (widok rzeczywistego okna programu – w języku angielskim)

### *Generator modeli*

Zasadniczą różnicą pomiędzy poszczególnymi modelami przenośników taśmowych jest przeważnie liczba dyskretnych segmentów taśmy (m.in. zależna od kształtu trasy przenośnika) i konfiguracja stacji końcowych. W przypadku omawianego modelu przenośnika możliwe jest wykorzystanie w programie SimulationX gotowego generatora modeli, ułatwiającego użytkownikowi budowę oraz przetestowanie danej konfiguracji przenośnika. Po wprowadzeniu do generatora profilu trasy oraz wyborze wersji stacji początkowej i końcowej generator tworzy model symulacyjny i dobiera do niego wszystkie niezbędne parametry dla poszczególnych elementów składowych.

Okno generatora modelu przenośnika taśmowego przedstawiono na rys. 5. Poszczególne pozycje odnoszą się odpowiednio do nadanej przez użytkownika nazwy generowanego modelu, metody wyliczenia bądź bezpośredniego podania ilości zastosowanych podziałów (segmentów) taśmy oraz charakterystyki nachylenia trasy przenośnika. Oprócz tego, niezbędne jest wskazanie rodzaju zastosowanej stacji napędowej i zwrotnej.

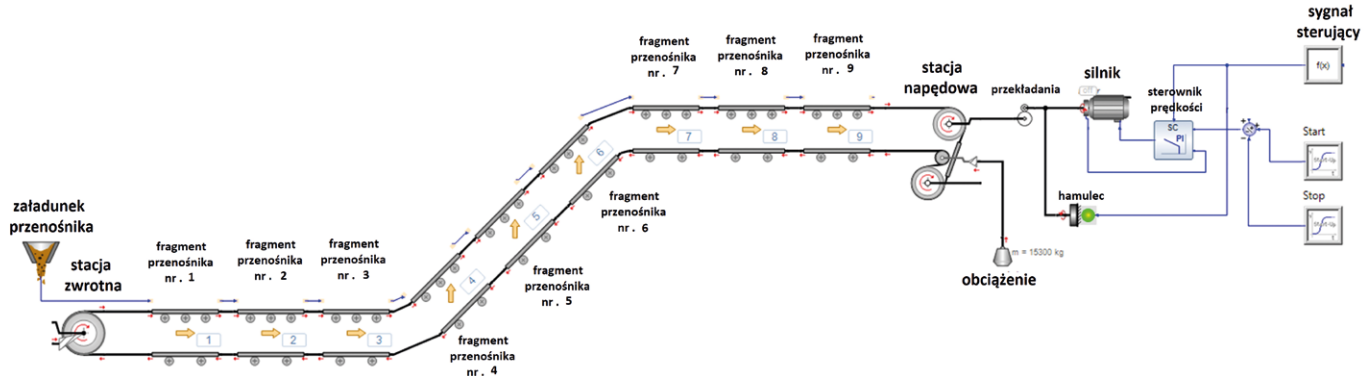
Ostatnim krokiem budowy modelu jest ustalenie dodatkowych wymagań (np. czy generowany model ma być częścią większego złożenia) oraz warunków brzegowych (np. nominalnej wydajności przenośnika), po czym model symulacyjny staje się w pełni funkcjonalny i gotowy do testów.

### *Zmienne wyjściowe*

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy model przenośnika taśmowego. Ze względu na wyższy stopień rozbudowy modelu zawiera on nie tylko elementy związane z mechaniczną konstrukcją przenośnika, ale również elementy z innych bibliotek programu SimulationX. Pozwala to na bardziej kompleksowe modelowanie urządzenia, np. poprzez dobór bardziej zaawansowanych modeli elementów układu napędowego dla syntezy rozbudowanych systemów kontrolno-sterujących. Przykładowy model z rys. 6 zawiera prostą przekładnię mechaniczną, model silnika elektrycznego prądu przemiennego oraz regulator prędkości. Przykładowe rozwiązania układów napędowych przenośników opisano w publikacji [20].

Symulacja przeprowadzona z wykorzystaniem modelu z rys. 6 umożliwia analizę różnych zmiennych wyjściowych, takich jak:

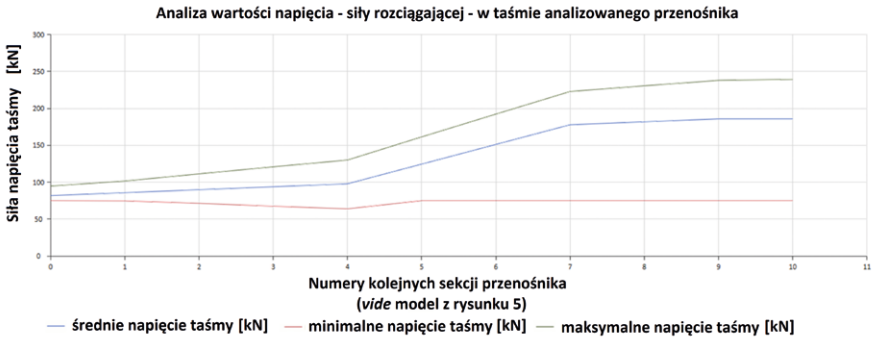
- siły rozciągające w każdym z segmentów taśmy;
- opory ruchu taśmy;
- prędkości obrotowe poszczególnych bębnów;
- prędkość, moment, obciążenie chwilowe oraz moc silnika napędowego;
- rozkład obciążenia w taśmie.




**Rys. 6.** Przykładowy model przenośnika taśmowego wraz z układem napędowym i układem sterowania prędkością

## 4. Przykładowe zastosowania

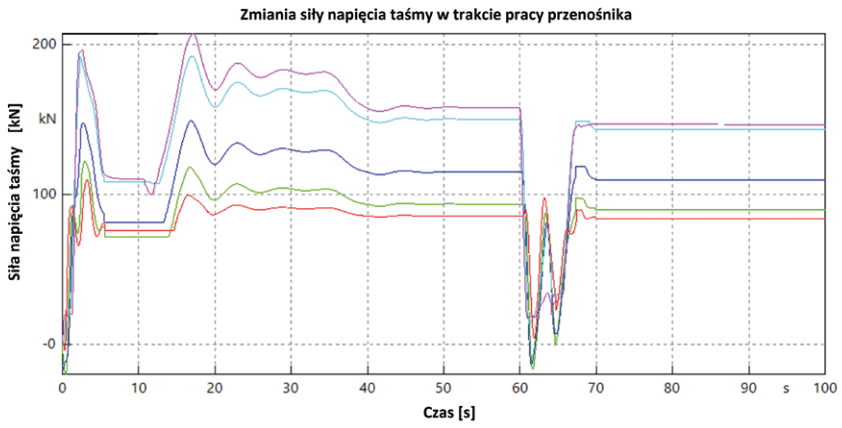
W kolejnych akapitach przedstawiono wyniki systemowego modelowania przenośników taśmowych, analizowanych pod różnymi aspektami. Oprócz przedstawionych, istnieją również inne przypadki zastosowania symulacji przenośników taśmowych w analizach inżynierskich, co czyni opisywane modele niezwykle użytecznymi i wszechstronnymi.




**Rys. 7.** Wykres wartości napięcia taśmy w poszczególnych sekcjach przenośnika taśmowego

### *Analiza stanów dynamicznych podczas rozruchu i hamowania przenośnika*

Od czasów pierwszych symulacji dynamiki przenośników taśmowych [7] aż do dnia dzisiejszego analiza stanów nieustalonych oraz ocena oddziaływań dynamicznych jest fundamentalnym celem przeprowadzania tego typu analiz. Szczególnie interesujące są niestandardowe konfiguracje przenośników oraz ekstremalne warunki ich pracy, szczególnie z uwagi na występujące siły rozciągające, wymagane momenty napędowe i obciążenia napinaczy. Spektrum analizowanych przypadków rozciąga się od klasycznego rozruchu i hamowania przenośnika, poprzez zatrzymania awaryjne aż do sytuacji uszkodzenia jednego z podzespołów układu napędowego czy zablokowania układu napinającego. Pierwsze wykorzystanie oprogramowania SimulationX do analizy takich przypadków opisano w publikacji [4].




**Rys. 8.** Siły rozciągające w poszczególnych segmentach taśmy przenośnika podczas rozruchu i hamowania

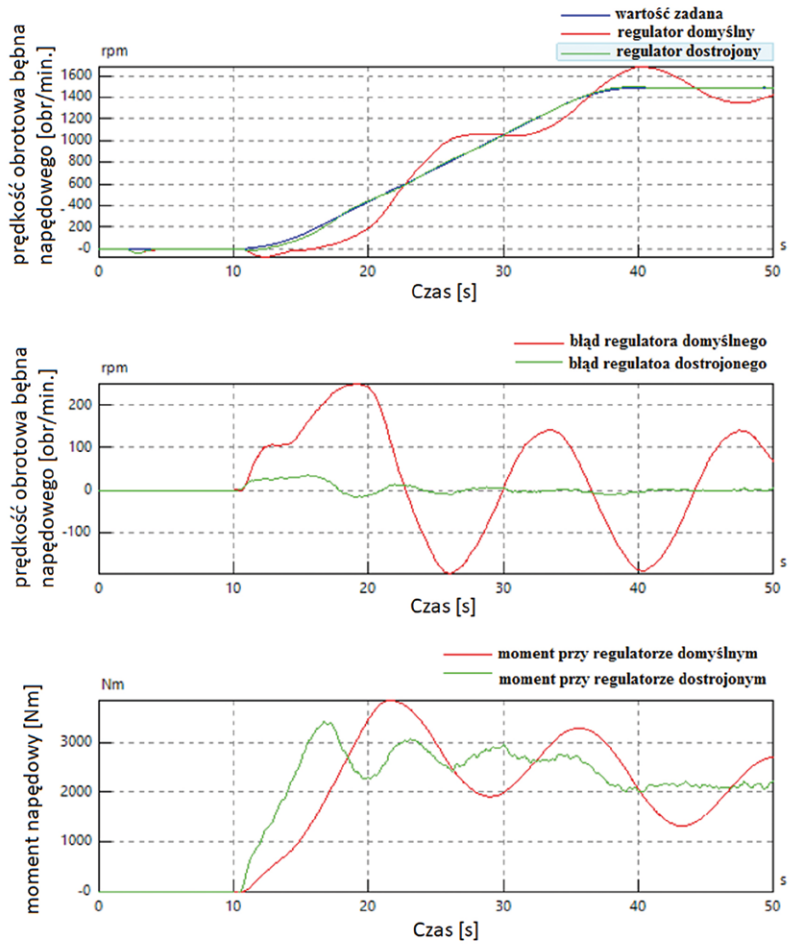
Wykresy na rys. 7 i 8 przedstawiają symulowane siły rozciągające w taśmie podczas rozruchu i hamowania modelu z rys. 6. Rysunek 7 pokazuje siłę rozciągającą taśmy górnej, w odniesieniu do położenia segmentu taśmy przenośnika. Z uwagi na to, iż na wykresie z rys. 7 nie występuje czas w postaci jawnej, zamiast jednej krzywej siły napięcia taśmy wykreślono trzy przebiegi – wartości średnie, maksymalne i przeciętne. Jak można zauważyć, maksymalne siły napięcia taśmy występują w pobliżu stacji napędowej, najmniejsze zaś przy stacji zwrotnej. Siła napięcia taśmy nie spada w analizowanym przypadku poniżej wartości zerowej, a więc utrzymane jest ciągłe napięcie taśmy (stan prawidłowy).

Rysunek 8 przedstawia zmianę siły rozciągającej w trakcie pracy przenośnika, uwzględniając fazę rozruchu, chwilę pracy ustalonej oraz fazę hamowania. Na wykresie przedstawiono zależność napięcia taśmy od czasu, a więc konieczne było wyznaczenie zbioru przebiegów czasowych siły napinającej odpowiednio dla każdego z segmentów obliczeniowych przenośnika. Jak można zauważyć, w analizowanym przypadku podczas hamowania taśma całkowicie traci swoje napięcie, co może prowadzić do poważnych uszkodzeń – jest to więc stan niebezpieczny, któremu należy przeciwdziałać, np. stosując układy kontrolowanego zatrzymania przenośnika.

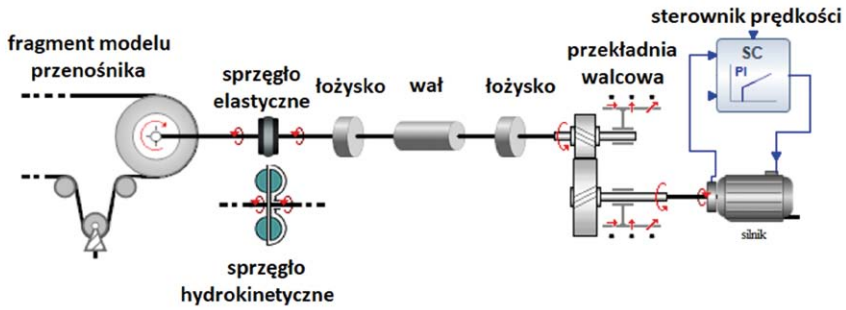
### *Dobór parametrów algorytmów sterujących*

Innym polem zastosowań modeli systemowych jest wirtualne projektowanie urządzeń i maszyn. Z punktu widzenia inżynierii sterowania można wyróżnić kilka podejść wykorzystujących wirtualny model jako zastępstwo realnego obiektu sterowania. Takie strategie, zbiorczo zwane z angielska *in-the-loop*, są szczególnie często wykorzystywane przez producentów i integratorów układów napędowych [10, 21]. Dla przenośników taśmowych, szczególnie podejście *model-in-the-loop* (w skrócie MIL) jest efektywną i szybką metodą znajdowania najkorzystniejszych parametrów układów sterujących.

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki poprawy działania algorytmu sterującego napędem przenośnika taśmowego. Idąc od góry, wykresy przedstawiają prędkość, błąd wysterowania oraz




**Rys. 9.** Przebiegi wartości mierzonych dla różnych ustawień regulatora sterującego prędkością przenośnika taśmowego



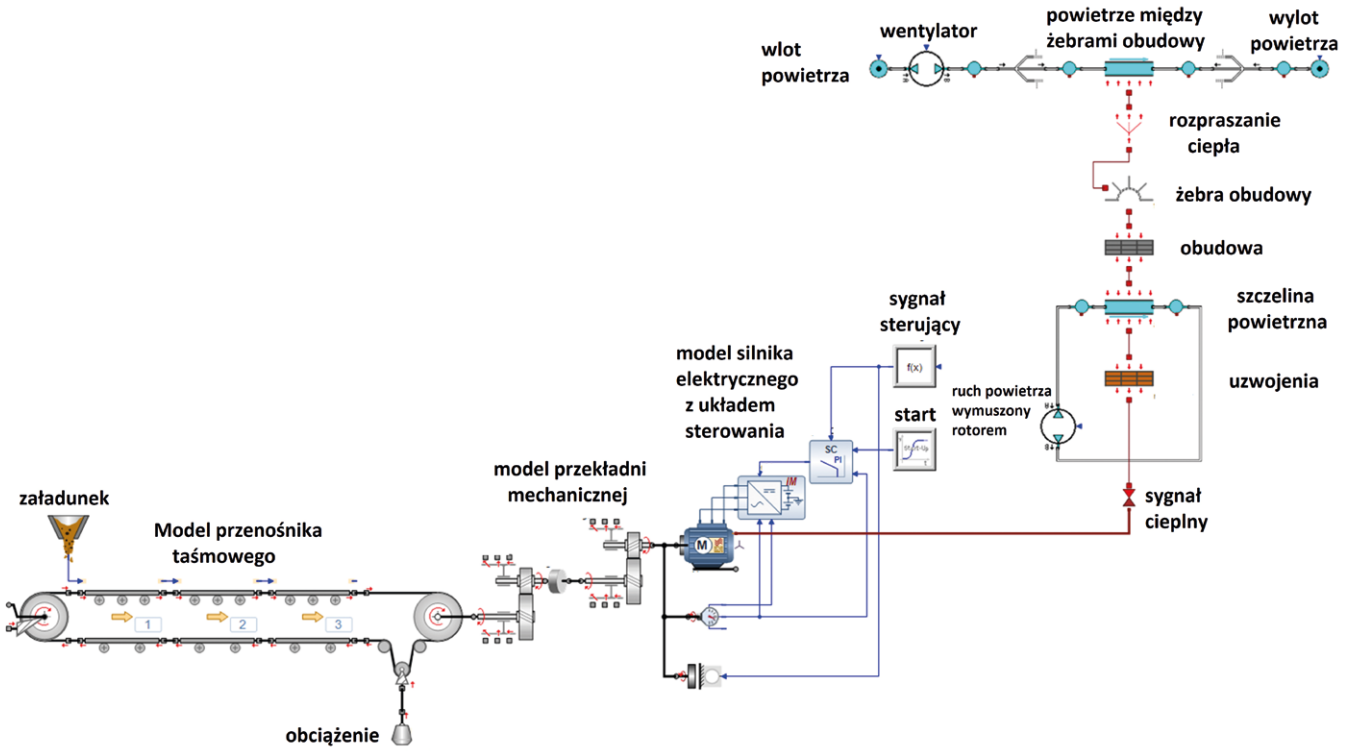

**Rys. 10.** Szczegółowy model układu napędowego

moment napędowy silnika. Wykresy czerwone dotyczą domyślnych parametrów algorytmu PID, natomiast wykresy zielone parametrów dostrojonych.

W przypadku przedstawionym na rysunku 9 zadaniem projektanta był dobór odpowiednich nastaw regulatora PI tak, aby możliwie ograniczyć oscylacje i jak najbardziej zbliżyć się do zadanego przebiegu podczas rozruchu przenośnika. Jest to zagadnienie dość istotne, gdyż rozruch powinien zachodzić możliwie szybko, jednak w taki sposób, aby nie zerwać sprzężenia ciernego pomiędzy bębnem napędowym a taśmą; występujące w układzie napędowym oscylacje są natomiast zjawiskiem niekorzystnym z uwagi na możliwość wzbudzania się drgań mechanicznych w taśmie, co skutkuje m.in. jej szybszym zużyciem i rozsypywaniem transportowanego urobku. Na górnym wykresie rysunku 9 można zauważyć, że wstępnie dobrane nastawy (w tym przypadku dobrane metodą Zieglera-Nicholsa, opisaną m.in. w publikacji [22]) charakteryzują się widocznymi oscylacjami, nie wykazują natomiast istotnego uchybu statycznego (oscylują wokół wartości zadanej). Po iteracyjnym, eksperymentalnym dostrojeniu regulatora udało się zredukować wspomniane wahania Na środkowym wykresie przedstawiono błąd sterowania – jak widać, układ po dostrojeniu w najgorszym przypadku wykazuje około pięć razy mniejszy błąd, zanikający po 50 sekundach ruchu niemal do zera. Na trzecim wykresie przedstawiono przebieg momentu napędowego na bębnie napędowym – na podstawie jego przebiegu można wnioskować, iż poprawa charakterystyki prędkości przenośnika w czasie rozruchu okupiona została obecnością wyższych harmonicznych w przebiegu momentu napędowego po dostrojeniu.

### *Symulacje układów napędowych*

Korzystając z modelu przenośnika taśmowego jako elementu podstawowego, możliwe jest modelowanie szczegółowej struktury układów napędowych i przeprowadzenie np. analizy drgań dla poszczególnych ich elementów pomiędzy bębnem napędowym a silnikiem. Do tego celu w programie SimulationX zawarto modele różnego typu urządzeń, takich jak sprzęgła elastyczne i hydrokinetyczne, wały czy przekładnie zębate walcowe i stożkowe. Pozwala to na wyznaczenie krytycznych częstotliwości drgań własnych układu i przeanalizowanie ich wpływu na poprawną pracę urządzenia (szczególnie w fazach rozruchu i hamowania). Tego typu analizy zostały opisane w pracach [4] i [10]. Model układu napędowego przedstawiony na rysunku 10 został wykonany




**Rys. 11.** Model przenośnika taśmowego z układem napędowym, silnikiem indukcyjnym, elektroniką sterującą oraz modelem termicznym układu chłodzenia

przy wykorzystaniu rozbudowanych modeli elementów składowych uwzględniających luzy oraz fluktuacje sztywności (w zadanym przedziale). Pozwala to na ocenę drgań skrętnych układu i emitowanego przezeń hałasu, jak również potencjalnego wpływu niewyważenia poszczególnych komponentów.

### *Analiza obciążenia termicznego komponentów układu napędowego*

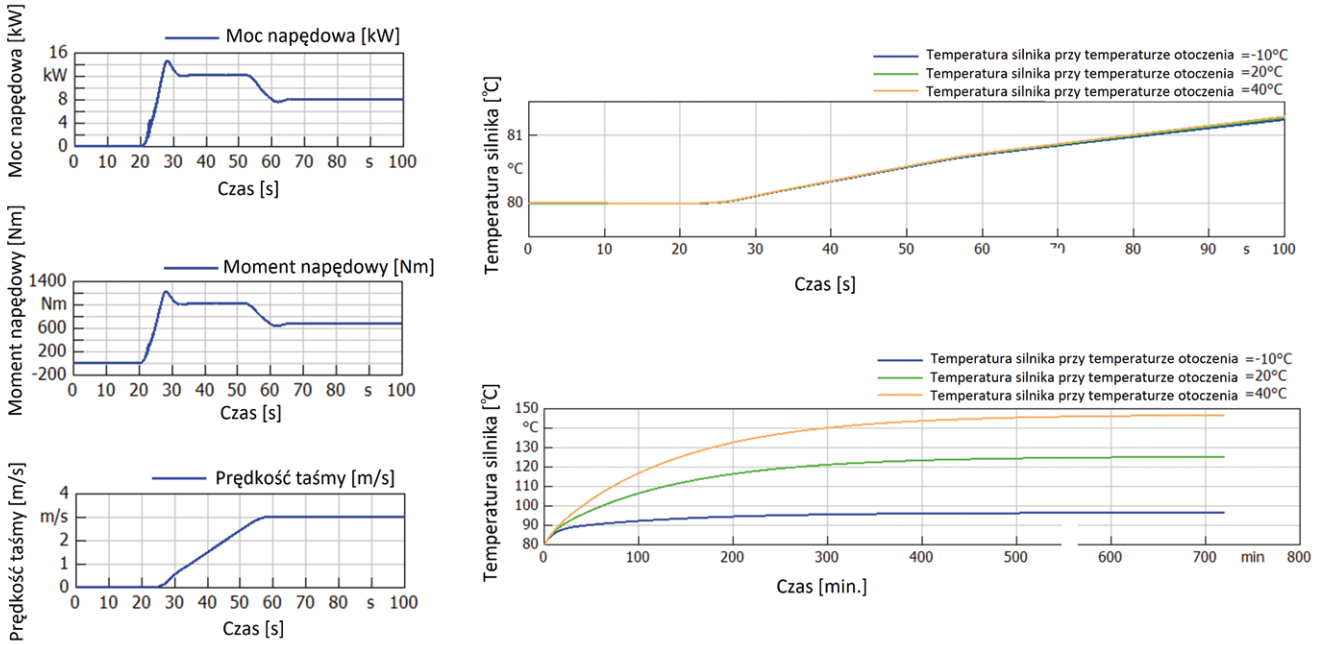
Symulacja systemów oparta jest na filozofii reprezentowania maszyn i procesów za pomocą komponentów łączących w sobie kilka domen fizycznych. W odniesieniu do przenośników taśmowych możliwe jest zatem rozszerzenie zakresu prowadzonych analiz również poza parametry mechaniczne urządzenia, np. o analizy termiczne. Na poniższym przykładzie (rys. 11) przedstawiono model przenośnika wraz z elektromechanicznym układem napędowym i elektroniką sterującą. Jednym z parametrów wynikowych napędu są straty energii, zależne od symulowanego obciążenia przenośnika. Straty te (przedstawione na schemacie czerwoną linią) stanowią parametr wejściowy dla termicznego modelu silnika złożonego z rotora, statora, przerwy powietrznej, obudowy, radiatora i wentylatora.

W oparciu o wartość temperatury otoczenia można oszacować, do jakiego stopnia rozgrzeją się poszczególne komponenty silnika w funkcji czasu pracy przenośnika pod zadanym obciążeniem (lub przy zadanej funkcji obciążenia). Rysunek 12 przedstawia wyniki tego typu symulacji. Początkowo w pełni załadowany przenośnik zostaje uruchomiony (ok. 20 sekundy symulacji), po czym przyspiesza i osiąga swoją prędkość nominalną równą 3 m/s, którą następnie podtrzymuje (wykresy po lewej stronie). Na wykresach po prawej stronie rysunku przedstawiono narastanie temperatury silnika dla trzech temperatur otoczenia (linia niebieska –10°C, zielona 20°C, czerwona 40°C). Początkowa temperatura silnika w każdym przypadku wynosiła 80°C. Wykresy przedstawiają dwie skale czasowe – wykres górny opisuje pierwsze 100 sekund symulacji, natomiast wykres dolny pokazuje stabilizację temperatury po 700 minutach symulacji.

Jak widać na wykresach przedstawionych na rysunku 12, temperatura napędu narasta stosunkowo powoli, asymptotycznie do pewnej ustalonej wartości. Wpływ temperatury otoczenia jest tym bardziej widoczny, im dłużej trwa praca przenośnika – stąd wniosek, że dla wydajnego układu chłodzącego najbardziej niebezpieczne jest długie (powyżej trzech godzin) użytkowanie przenośnika przy wysokiej temperaturze otoczenia;

reklama

reklama




**Rys. 12.** Wyniki symulacji narastania temperatury silnika w czasie pracy

reklama

reklama

użytkowanie przez krótszy okres (rzędu jednej – dwóch godzin) nie niesie za sobą tak dużego ryzyka przegrzania analizowanej struktury.

Przedstawiony model pozwala na przeprowadzenie obliczeń dotyczących temperatury dowolnego komponentu przenośnika taśmowego (silnika, taśmy, przekładni itp.). Pozwala to na wyznaczenie odpowiedniej metody chłodzenia oraz dostarcza istotnych informacji dotyczących spełnienia przez dany komponent wymagań odpowiedniej klasy temperaturowej.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Metoda symulacji multifizycznej przenośników taśmowych jest niezwykle użytecznym narzędziem, stanowiącym novum w procesie projektowania i analizy pracy tego typu urządzeń. Modułowe podejście do symulacji pozwala inżynierowi w prosty sposób zbudować i przeanalizować pod żądanym kątem zarówno prosty model przenośnika, jak i rozbudowany układ mechaniczny, składający się obok przenośnika z wielu innych podzespołów towarzyszących. Możliwa jest również symulacja układu kilku przenośników współpracujących ze sobą, co jest istotne przy analizie najkorzystniejszego wariantu układu sterującego takim zespołem. Dodatkowo wykorzystując dostępne na rynku oprogramowanie, inżynier może skupić się na rozwiązaniu konkretnego zagadnienia technicznego, nie musząc od podstaw tworzyć opisów matematycznych poszczególnych urządzeń, przez co oszczędza się czas konieczny na przeprowadzenie analiz.

Przedstawione w artykule oprogramowanie do symulacji multifizycznej przenośników może być dalej rozwijane, zarówno przez producenta, jak i indywidualnych użytkowników. Przykładowo, biblioteki wykorzystywanych elementów modelowych mogą zostać w prosty sposób rozbudowane o specyficzne urządzenia stosowane przez użytkownika. Możliwa jest też zmiana reguł przeprowadzanych symulacji, wprowadzenie standardów obowiązujących regionalnie w danym kraju czy skonfigurowanie modelu symulacyjnego dla specyficznych potrzeb i zastosowań. Obok już obecnego w programie SimulationX standardu DIN22101 planowane jest w kolejnych wersjach wykorzystanie standardu CEMA [2]. W ramach dalszego rozwoju programu producent planuje dodanie elementów związanych z modelowaniem przenośników rurowych i rozbudowę bazy modeli silników napędowych, jak również innych komponentów, takich jak ruchoma stacja rozładowcza (tzw. *tripper car*).

## Literatura


[1] DIN22101, „Stetigförderer – Gurtförderer für Schüttgüter – Grundlagen für die Berechnung und Auslegung", Deutsches Institut für Normung e.V., 1982.

[2] CEMA 6th. Edition, „Belt Conveyors for Bulk Materials".

[3] Cencarewicz K., Przystałka P.: *Symulator przenośnika taśmowego z uwzględnieniem uszkodzeń*. „Modelowanie Inżynierskie" 55/2015.

[4] Dilefeld M., Schramm C.: *„Modeling Dynamic Behavior of Belt Conveyors for Open-Pit Mining in SimulationX"*, 15th ITI Symposium, 2012.

[5] Dzikowski A., Dukalski P., Rossa R.: *Badania symulacyjne rozruchu i pracy silnika LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego*. „Napędy i Sterowanie" 3/2016.

[6] Dzikowski A., Rossa R., Dukalski P.: *Analiza, modelowanie i symulacje rozruchu i pracy silnika LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty problemowe" 2(106)/2015.

[7] Funke H.: *Zum dynamischen Verhalten von Förderbandanlagen beim Anfahren und Stillsetzen unter Berücksichtigung der Bewegungswiderstände*. rozprawa doktorska, TH Hannover, 1975.

[8] Gerges Y.S.: *Improved energy efficiency in troughed belt conveyors: Selected factors and effects*. „International Journal of Engineering and Technical Research" 3.6/2015.

[9] He Q., Hong L.: *Review of dynamic modeling and simulation of large scale belt conveyor system*. Intelligent Computing and Information Science 2011.

[10] Hellmuth T.: *Smart Drives für Gurtförderanlagen*, 13. Fachtagung – Gurtförderer und ihre Elemente, Essen, 2017.

[11] Hu K., Yong C.G.: *Virtual prototyping of belt conveyor based on Recurdyn*. „Applied Mechanics and Materials" Vol. 16. Trans Tech Publications, 2009.

[12] Karolewski B., Ligocki P.: *Rozkład obciążeń między silniki napędzające przenośnik taśmowy*. „Górnictwo Odkrywkowe" 55.4–5/2014.

[13] Karolewski B., Ligocki P.: *Modelling of long belt conveyors*. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability" 16(2)/2014.

[14] Kaszuba M.: *Porównanie rozruchu przenośnika taśmowego z wykorzystaniem silników pierścieniowych oraz sprzęgieł hydrodynamicznych*. „Górnictwo i Geoinżynieria" 35/2011.

[15] Kecojevic V., Bise C., Haight J.: *The effective use of professional software in an undergraduate mining engineering curriculum*. Interactive Learning Environments 13.1–2/2005.

[16] Kruse D.J.: *Chute designs and trajectories using the discrete element method*. Materiały konferencyjne BELTCON 15, 2009.

[17] Kulinowski P.: *Badania symulacyjne jako element zintegrowanego procesu projektowania w aspekcie eksploatacji przenośników taśmowych*. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability" 1/2013.

[18] Kulinowski P.: *Simulation method of designing and selecting tensioning systems for mining belt conveyors*. Archives of Mining Sciences – Archiwum Górnictwa, 59(1)/2014.

[19] Lodewijks G.: *Two decades dynamics of belt conveyor systems*. Bulk Solids Handling, 22(2)/2002

[20] Mendyka P.: *Układy rozruchowe ścianowych przenośników zgrzebłowych*. „Napędy i Sterowanie" 7–8/2014.

[21] Richter, Noack R.: *System Simulation for Belt Conveyor Systems and their Applications*. SimulationX User Forum, 2016.

[22] Ziegler J.G., Nichols N.B.: *Optimum settings for automatic controllers*. Transactions of the ASME, 64/1942.



René Noack, Jörg Arloth – ESI ITI GmbH Dresden, Niemcy;

Paweł Mendyka – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza


artykuł recenzowany