

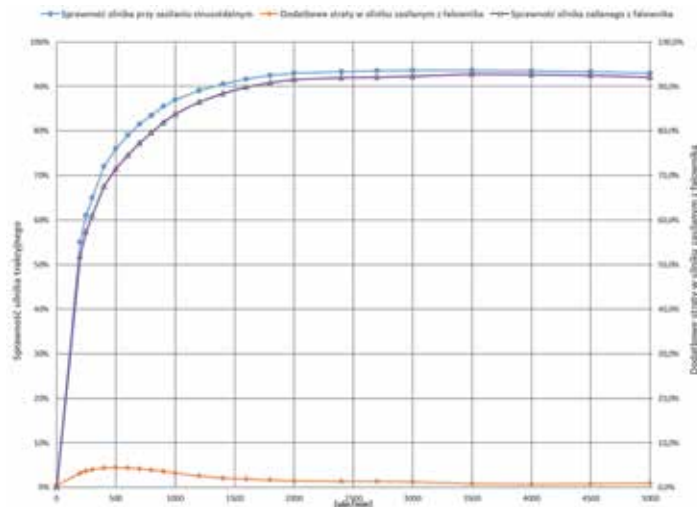
Janusz Biliński, Michał Łągosz

Metodyka wyznaczania strat ciepłych i obciążeń termicznych w falownikach trakcyjnych

W artykule przedstawiono zasady określania strat ciepła w przetwornicach trakcyjnych metodą TLV i symulację prób zmian temperatury w przetwornicy trakcyjnej podczas teoretycznego przejazdu pociągu. Przejazd teoretyczny składał się z cyklu rozruchu, jazdy, hamowania i zatrzymywania. Wyniki przedstawiono na wykresach dla różnych parametrów modelu cieplnego. Przeprowadzone modelowanie potwierdziło poprawność zastosowanej metody ustalenia strat ciepłych i obciążeń termicznych przekształtnika trakcyjnego. Przedstawione wyniki wskazują, jak ważna jest znajomość zjawisk towarzyszących. Pozwala ona dobrać prędkość, przy której napęd osiąga optymalną efektywność. Nowoczesne metody symulacji pozwalają na uzyskiwanie efektów w relatywnie krótkim czasie.

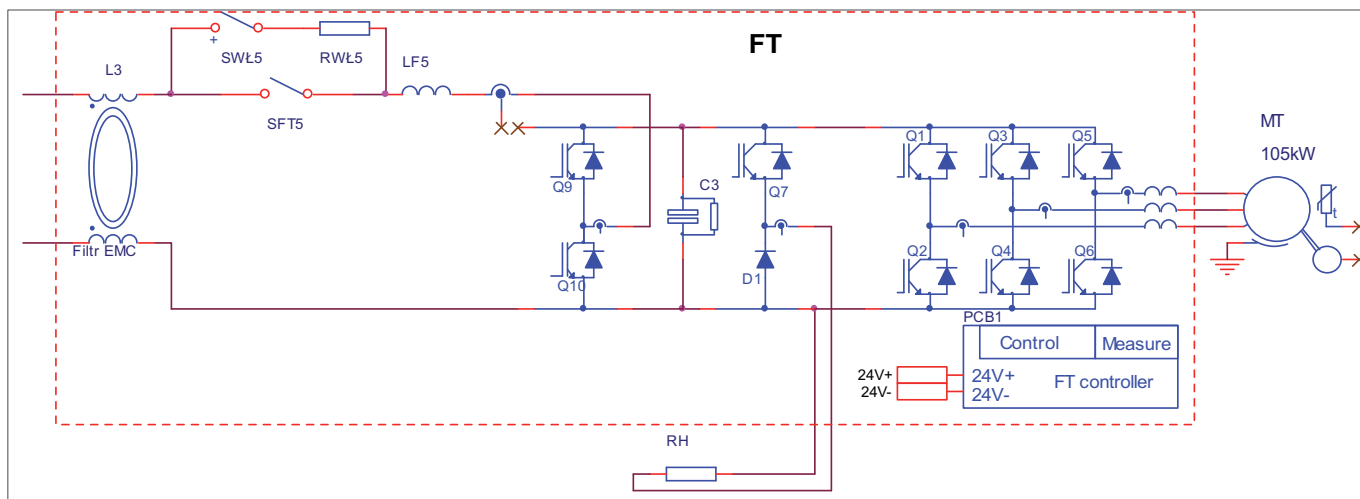
W nowoczesnych pojazdach trakcyjnych są stosowane zaawansowane rozwiązania energoelektroniczne w układach napędowych. Klasyczny układ napędowy, asynchroniczny silnik trakcyjny prądu przemiennego, przekładnia i falownik trakcyjny, jest z reguły projektowany dla konkretnego typu pojazdu z uwzględnieniem jego specyfiki eksploatacji, ilości rozruchów, warunków otoczenia. W każdym przypadku wymagane jest, by układ napędowy miał jak największą sprawność przy minimalnych wymiarach i jak najmniejszej masie. Z tego względu, przy projektowaniu silników i falowników dąży się do zminimalizowania strat występujących w tych urządzeniach. Typowy układ napędowy pojazdu trakcyjnego przedstawiono na rysunku 1.

Wyznaczenie wartości strat w falowniku wymaga kompleksowej analizy jego punktów pracy. Falownik trakcyjny zasila silniki lub silniki trakcyjne napięciem przemiennym o zmiennej częstotliwości, tak, by umożliwić płynne przyspieszanie pojazdu bez szarpnięć. W czasie rozruchu silniki pobierają prąd w zakresie od zera do wartości maksymalnej, również obciążenie silnika

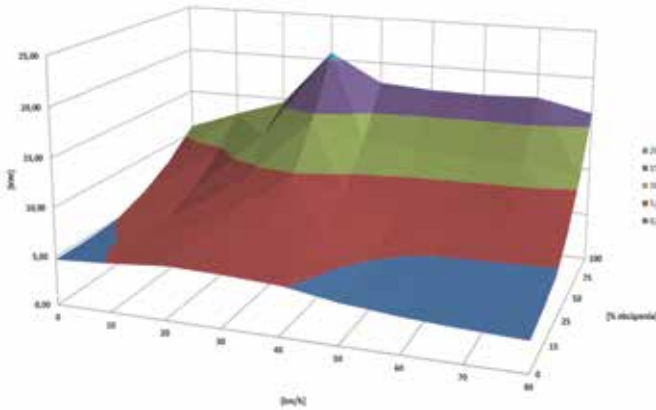


Rys. 2. Przykładowe wykresy sprawności silnika trakcyjnego zasilanego z falownika

jest zmienne w czasie. W czasie jazdy z prędkością ustaloną silniki trakcyjne pracują ze stałą prędkością obrotową i momentem, w czasie hamowania silniki pracują w trybie pracy prądnicowej, oddając energię do falownika i dalej do sieci zasilającej (rekuperacja energii). Ponadto falownik, jako odbiornik lub generator energii elektrycznej charakteryzuje się zmiennym współczynnikiem mocy ($\cos \phi$), co także ma wpływ na jego obciążenie. W celu zapewnienia poprawnej pracy, zwłaszcza do zapewnienia szybkiego przejścia z trybu pracy silnikowej do pracy prądnicowej, silnik pobiera z falownika prąd magnesujący, znacznie mniejszy od prądu znamionowego. Zmienność wartości obciążenia, częstotliwości i współczynnika mocy silnika w czasie powoduje, że nie jest możliwe wyznacze-



Rys. 1. Schemat typowego układu napędowego pojazdu trakcyjnego



Rys. 3. Przykładowy wykres mocy strat falownika tramwajowego w funkcji prędkości jazdy i obciążenia

nie stałej wartości strat w układzie falownika. Ponadto stosowana jest zmienna częstotliwość przełączania elementów półprzewodnikowych, która pozwala na optymalne kształtowanie fali sinusoidalnej prądu, a także ma wpływ na straty przełączania w półprzewodnikowych elementach mocy.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wykresy sprawności silnika trakcyjnego zasilanego z falownika.

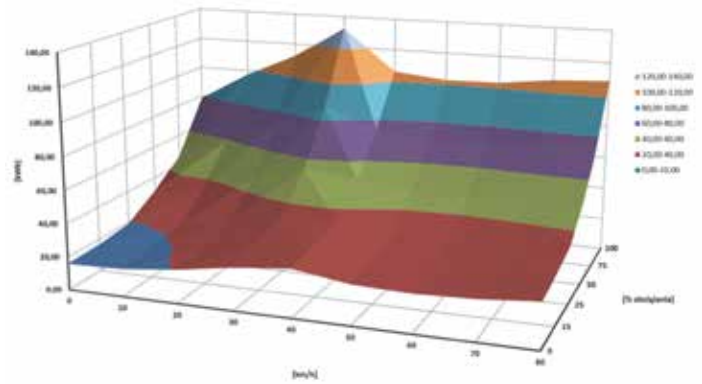
W celu dokładniejszego określenia wartości strat w silniku trakcyjnym należy wyznaczyć straty w falowniku dla poszczególnych punktów pracy silnika. Najczęściej obliczenia wykonuje się dla prędkości jazdy od zera do prędkości maksymalnej z krokiem co 10 km/h i wartości obciążeń 0%, 15%, 25%, 50%, 75% i 100% obciążenia, przy czym obciążenie jest przyjmowane dla wymaganej siły pociągowej i może przewyższać wartości znamionowe silnika. W wyniku obliczeń uzyskuje się macierz z wartościami strat do poszczególnych punktów pracy falownika.

Należy podkreślić, że do wyznaczenia wartości strat w punkcie pracy konieczne jest określenie przez producenta silnika wartości prądu silnika, częstotliwości i współczynnika mocy w danym punkcie pracy. Na tej podstawie można wyznaczyć straty mocy w elementach półprzewodnikowych mocy. W pełnym bilansie strat układu napędowego pojazdu należy także uwzględnić straty w przekładni, straty w filtrze wejściowym falownika, zużycie energii na potrzeby własne falownika itp.

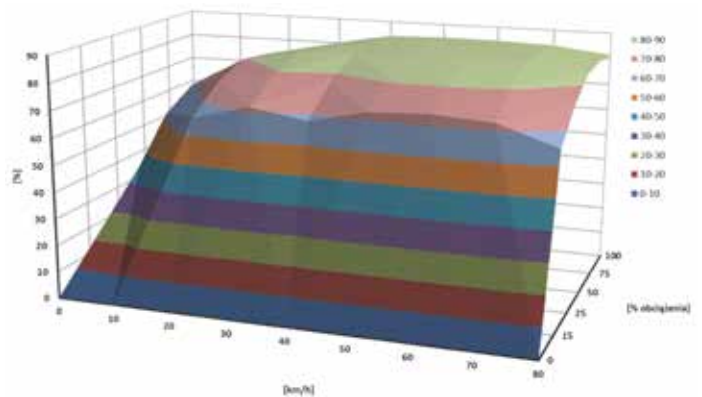
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wykres mocy strat falownika tramwajowego w funkcji prędkości jazdy i obciążenia. Podobnie można wyznaczyć moce strat dla całego układu napędowego z uwzględnieniem strat w przekładni i silniku trakcyjnym. Przykładowy wykres mocy strat przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy wykres sprawności układu napędowego tramwaju w funkcji prędkości jazdy i obciążenia.

Na podstawie obliczonych danych można także określić zapotrzebowanie na moc pojazdu trakcyjnego, jaka jest pobierana z sieci trakcyjnej. Tabela taka jest określana w literaturze jako tabela TLV (niem. *Triebfahrzeug Leistungs- und Verbrauchstafel*) i może być wykorzystana do symulacji zużycia energii w czasie przejazdu po trasie o określonym profilu. Przykładowy wykres TLV przedstawiono na rysunku 6.

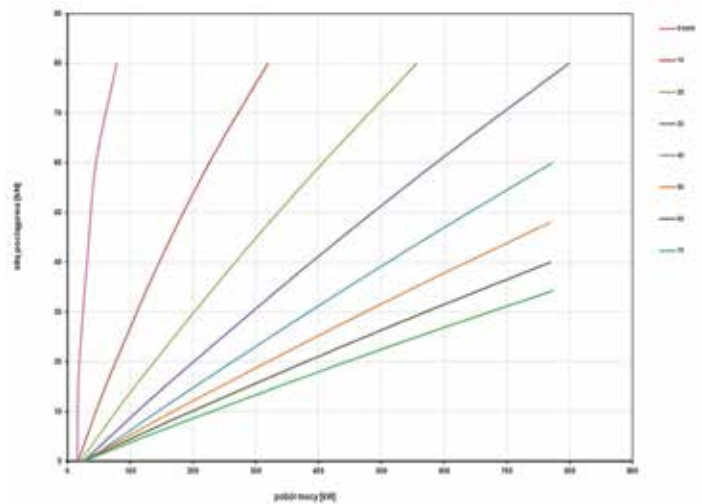
Przedstawione powyżej charakterystyki strat układu napędowego mogą posłużyć do przeprowadzenia oceny temperatur w elementach półprzewodnikowych falownika napędowego. Do zilustrowania takiej oceny przyjęto typowy układ elektryczny falownika pokazanego na rysunku 1, a składającego się z trzech



Rys. 4. Przykładowy wykres mocy strat układu napędowego tramwaju w funkcji prędkości jazdy i obciążenia

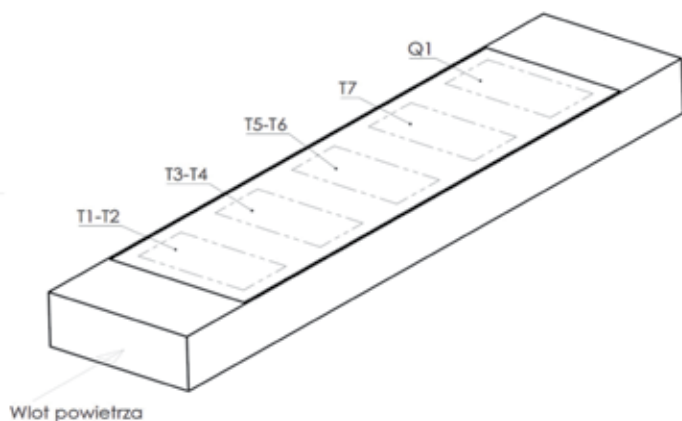


Rys. 5. Przykładowy wykres sprawności układu napędowego tramwaju w funkcji prędkości jazdy i obciążenia

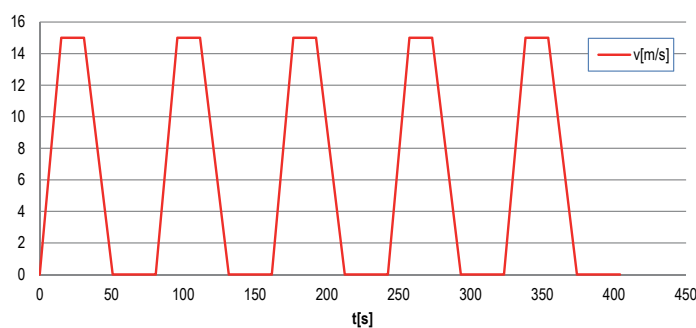


Rys. 6. Przykładowy wykres siły pociągowej w funkcji poboru mocy dla różnych prędkości jazdy (TLV)

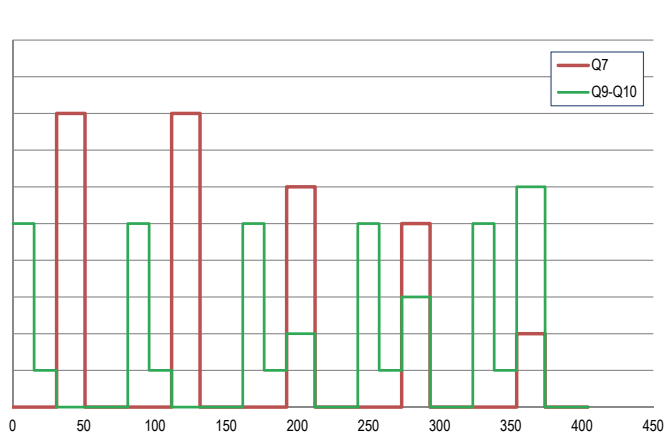
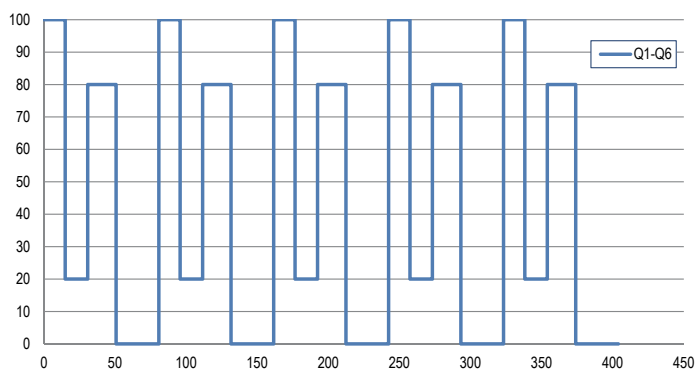
podwójnych tranzystorów układu napędowego Q1-Q6, tranzystora Q7 sterującego hamowaniem z wykorzystaniem rezystora oraz tranzystora Q9-Q10 sterującego rekuperacją. Na rysunku 7 pokazano model mechaniczny takiego falownika służący do symulowania stanu termicznego z wykorzystaniem oprogramowania *SW Flow Simulation*. Tranzystory są modelowane jako powierzchnie na radiatorze, na których wydziela się ich moc strat ciepłych. Radiator jest chłodzony wymuszonym przepływem powietrza.



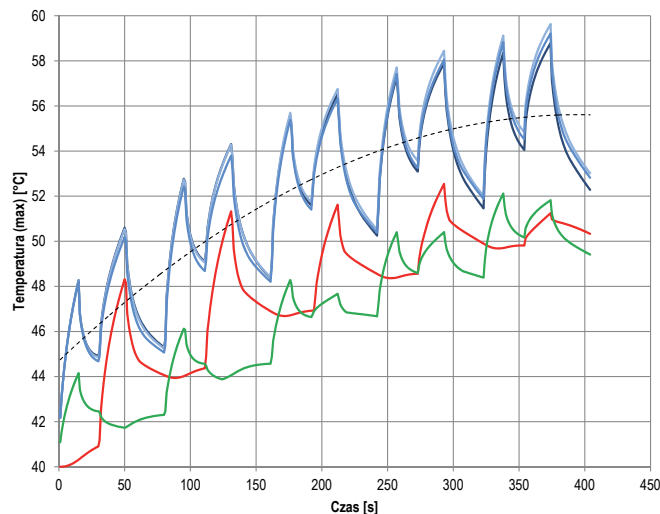
Rys. 7. Model mechaniczny falownika do symulacji



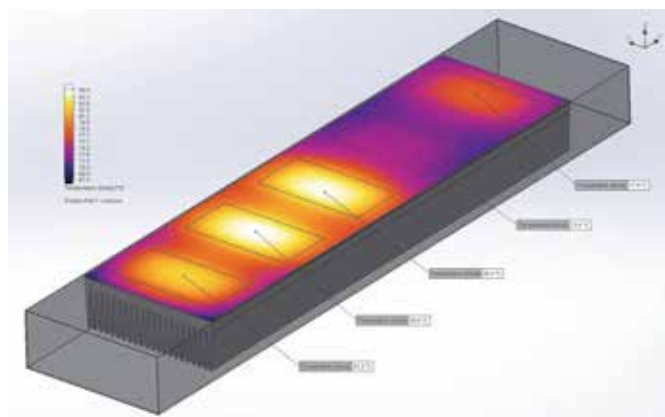
Rys. 8. Przejazd teoretyczny pojazdu



Rys. 9. Przebieg mocy strat cieplnych tranzystorów falownika w czasie przejazdu teoretycznego



Rys. 10. Przebieg maksymalnych temperatur pod tranzystorami falownika



Rys. 11. Pole temperatur radiatora falownika w warunkach pracy z mocą maksymalną nieograniczoną w czasie

Celem przeprowadzonych symulacji było określenie zmienności temperatur elementów półprzewodnikowych mocy w czasie hipotetycznego przejazdu, który zdefiniowano jako ciąg następujących po sobie cykli, składających się z: rozruchu z przyspieszeniem 1 m/s^2 do prędkości 15 m/s (54 km/h), jazdy z ustaloną prędkością 54 km/h , hamowania z opóźnieniem $0,75 \text{ m/s}^2$ i postoju przez 30 s . Przebiegi te zilustrowano na rysunku 8.

W trakcie przejazdu tranzystory falownika wydzielają ciepło zależnie od aktualnego cyklu pracy, co zilustrowano na rysunku 9. Przyjęto, że w pierwszych dwóch cyklach hamowanie elektrodynamiczne odbywa się wyłącznie z wykorzystaniem rezystora hamowania, a w dalszych cyklach pojawia się wzrastający udział hamowania z odzyskiem energii.

Tak duża zmienność wydzielanej mocy strat w półprzewodnikach w czasie przejazdu wywołuje dużą zmienność temperatur na ich styku z radiatorem. Na rysunku 10 pokazano jak zmieniają się maksymalne temperatury pod każdym z elementów półprzewodnikowych w trakcie przejazdu.

Jak widać, z każdym kolejnym cyklem temperatura maksymalna pod tranzystorami zasilającymi silnik zdąża asymptotycznie do ustalonej wartości. Dla porównania – na rysunku 11 pokazano maksymalne temperatury pod elementami półprzewodnikowymi w warunkach pracy ustalonej z maksymalnymi mocami

strat ciepłych przy identycznych warunkach chłodzenia. Wynika z tego, że przy projektowaniu wymuszonego chłodzenia falowników korzystniej jest posłużyć się symulacją temperatur w czasie hipotetycznej jazdy niż warunkami stanu ustalonego dla maksymalnej mocy wyjściowej, bowiem pozwoli to na obniżenie masy radiatora lub zmniejszenie mocy wentylatora chłodzącego.

Widać również, że analizę można ograniczyć do 5–6 cykli nagrzewania, co jest wystarczające do uzyskania informacji o obciążeniach ciepłych tranzystorów. Temperatura wewnątrz tranzystora (złącza półprzewodnikowego) może być oszacowana na podstawie rezystancji termicznej, zdefiniowanej w kartach katalogowych tych półprzewodników, oraz rezystancji termicznej zastosowanej pasty termoprzewodzącej.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule wybrane aspekty strat w trakcyjnych układach napędowych wskazują, jak istotna jest świadomość towarzyszących im zjawisk. Pozwala to na rekomendowanie prędkości eksploatacyjnych, przy których napęd uzyskuje maksymalne sprawności. Ponadto, dzięki tej wiedzy można zoptymalizować układy chłodzenia falowników trakcyjnych, uzyskując zmniejszenie wymiarów konstrukcji, podniesienie trwałości i niezawodności elementów półprzewodnikowych mocy oraz zwiększenie sprawności ogólnej napędu. Nowoczesne metody symulacyjne pozwalają na uzyskanie wyników w stosunkowo krótkim czasie i na dużym poziomie ufności, przy założeniu właściwego doboru parametrów początkowych układu, metody modelowania i umiejętności interpretacji uzyskanych wyników.

Bibliografia:

1. Bartłomiejczyk M., Połom M., Wpływ struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej – pomiary rekuperacji, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 3.

2. Biliński J., Figat J., Milewski D., *Tramwaj z zasobnikiem akumulatorowym – koncepcja i testy*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 1–2.
3. Giziński Z., *Falownikowy układ napędowy do nowych i modernizowanych tramwajów*, „Technika Transportu Szynowego” 2001, nr 7.
4. Maciołek T., *Zastosowanie zasobników energii w trakcji kolejowej 3 kV DC – nieodległa perspektywa?*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 9.

Autorzy:

dr inż. **Janusz Biliński**, dr inż. **Michał Łagosz** – MEDCOM

Methodology for determination of the heat losses and thermal loads in traction inverters

This paper presents the principles for determination of heat losses in traction inverters using TLV method and a sample simulation of temperature variation in the traction inverter during the theoretical test run of the train. The theoretical test run consisted of start-up, driving, braking and stopping cycles. The results are shown in the graphs with particular parameters of the thermal model. Modeling confirmed the correct methodology applied to determine the heat losses and thermal loads in the solid state traction power inverter. The paper shows selected aspects of losses of traction drive systems, indicates how important is awareness of accompanying phenomena. This knowledge allows recommending operational speed at which the drive is achieving maximum efficiency. Modern simulation methods can produce results in a relatively short time and at a high confidence level, assuming proper selection of the initial parameters of the system, modeling methods and ability to interpret the results.



Maciej Stajniak, Adam Koliński (red.)

Współczesne technologie transportowe w łańcuchach dostaw

ISBN: 978-83-62805-18-1

Liczba stron: 188

Format: B5

Oprawa: miękka

Rok wydania: 2016

Obecnie w transporcie spotykane są coraz to nowocześniejsze technologie. Związane jest to z optymalizacją czasu dostawy oraz kosztów, które stanowią jeden z najważniejszych czynników decyzyjnych wyboru gałęzi transportu. Złożoność i rozległość tematyki ujętej w tym obszarze badawczym, zdecydowała o formie i zakresie przedstawionej publikacji. Wyniki badań zaprezentowano w 4 grupach tematycznych obejmujących łącznie 15 rozdziałów. W pierwszej części skoncentrowano się wokół technologii transportowych w logistyce. Część drugą poświęcono infrastrukturze transportowej w łańcuchach dostaw. Część trzecia dotyczy nowoczesnych technologii informatycznych stosowanych w przedsiębiorstwach logistycznych i transportowych. Ostatnia, czwarta część monografii zawiera rozważania przedstawiające praktyczne zastosowanie rozwiązań transportowych umożliwiających racjonalizację kosztów prowadzonej działalności.

Pełna oferta wydawnicza na stronie www.inw-spatium.pl