

KRZYSZTOF KRAWIEC

dr inż., Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej,
e-mail: krzysztof.krawiec@polsl.pl;
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

MÁTYÁS KONIORCZYK

dr, Wigner Research Centre for Physics, Department of Quantum Optics and Quantum Information;
e-mail: koniorczyk.matyas@wigner.hu;
Konkoly-Thege Mikós út 29-33,
H-1121 Budapest

KRZYSZTOF DOMINO

dr hab., Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk; e-mail: kdomino@iitis.pl;
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Możliwości zastosowania obliczeń kwantowych w modelowaniu systemów i procesów transportowych¹

Streszczenie: W dzisiejszym świecie konieczność podjęcia właściwych decyzji w możliwie jak najkrótszym czasie wydaje się być ważniejsza niż kiedykolwiek. Dotyczy to wielu procesów transportowych w różnych systemach transportowych. Jednocześnie, w środowisku badaczy operacyjnych, trwają prace nad nowymi, bardziej wydajnymi algorytmami wsparcia podejmowania decyzji, a to wraz z rozwojem technologii obliczeniowych pozwala na sprawne rozwiązywanie coraz większych problemów. Jedną z nich jest kwantowe wyzarzanie, które możliwe jest m.in. z wykorzystaniem komputera D-Wave. W artykule zaprezentowano zarys możliwości jego wykorzystania do wsparcia decyzji dyspozytorskich związanych z przywróceniem funkcjonowania ruchu pociągów na odcinku sieci kolejowej w sytuacji, gdy na tej linii występują znaczne opóźnienia w ruchu kolejowym.

Słowa kluczowe: publiczny transport zbiorowy, obliczenia kwantowe, modelowanie systemów transportowych.

Wprowadzenie

Współczesne systemy transportowe, a także procesy w nich zachodzące, cechuje znaczny poziom złożoności. W obszarze praktycznym niektóre podmioty, np. miasta lub obszary metropolitalne, do planowania transportu w sposób solidny i odporny stosują komercyjne oprogramowanie, takie jak VISUM. Różnie definiowane cele można osiągnąć stosując agregację i adaptację obecnych metod rozwiązywania problemów, w tym operacje z zastosowaniem teorii grafów, wykorzystanie teorii gier do dodatkowych ograniczeń związanych z priorytetyzacją potrzeb pasażerów.

Uwzględniając wyżej wymienione uwarunkowania, należy dążyć do opracowywania metod i modeli wspomagania decyzji, które uwzględniają rzeczywiste scenariusze w transporcie publicznym. Można w tym celu wykorzystywać techniki optymalizacji oraz ich niezbędne rozszerzenia. Bardzo istotne jest poszukiwanie możliwości skalowania omawianych problemów, aby sprostać przypadkom występującym w rzeczywistych sieciach transportowych.

W systemach transportowych, także w podsystemach publicznego transportu zbiorowego, zdarzają się zakłócenia. Mogą być one spowodowane przez wiele czynników, takich jak niekorzystne warunki atmosferyczne, awarie ta-

boru, usterkę infrastruktury, wypadki i wiele innych czynników niezależnych od usługodawcy. Zakłócenia te mają znaczny wpływ na percepcję użytkownika usługi transportowej i jego wrażenia na temat jej jakości.

Mając świadomość, że całkowite wyeliminowanie zakłóceń oraz ich przyczyn jest niemożliwe, kluczowym zagadnieniem staje się sprawna reakcja zarządzających procesem przewozowym na daną sytuację i możliwie jak najszybsze przywrócenie poprawnego funkcjonowania systemu. Konsekwencje niewłaściwych decyzji w takich sytuacjach mogą być wielopłaszczyznowe i mogą mieć znaczące konsekwencje dla pasażerów i operatorów w zakresie kosztów oraz czasu.

Obecnie, zwłaszcza w mniejszych sieciach transportowych, problem zaburzeń jest rozwiązywany przez dyspozytorów bez żadnego wsparcia informatycznego. W niektórych większych sieciach (przede wszystkim zagranicznych) decyzje dyspozytorskie są wspomagane prostymi komputerowymi systemami wsparcia decyzji. Zwykle istniejące systemy nie uwzględniają nowych, dodatkowych ograniczeń technologicznych wynikających np. z eksploatacji niskoemisyjnych środków transportu oraz nie są ukierunkowane na satysfakcję pasażera. Ponadto duże systemy transportowe są złożone i zastosowanie istniejących systemów wsparcia decyzji może wymagać dużych mocy obliczeniowych oraz długiego czasu obliczeń. Dlatego prowadzi się badania nad dedykowanymi algorytmami skracającymi czas obliczeń. Jednym z nowatorskich rozwiązań jest zastosowanie obliczeń kwantowych. Jest to nowe podejście do wspomagania tego typu decyzji w zakresie badań nad wrażliwością systemu transportowego na zakłócenia. Podejście to zostało omówione w artykule.

Konwencjonalne metody wsparcia decyzji przywracania normalnego funkcjonowania systemu transportowego

Konsekwencje zakłóceń w funkcjonowaniu transportu publicznego mogą być wielopłaszczyznowe i mogą mieć znaczący wpływ na zaangażowanie zarówno kosztów, jako i czasu pasażerów oraz usługodawców [1, 2, 3]. Przez analogię do [1] rozumiemy odporność jako zdolność systemu transportu publicznego do utrzymania swojej funkcji po wystąpieniu zakłócenia. W artykule zakłócenie rozumiemy jako sytuację decyzyjną, która nie jest na tyle poważna, aby angażować zespół zarządzania kryzysowego. Niewłaściwe

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022. Wkład autorów w publikację: K. Krawiec 34%, M. Koniorczyk 33%, K. Domino 33%.

² Autorzy dziękują spółce Koleje Śląskie Sp. z o.o. za konsultacje przy badaniach naukowych. Publikacja powstała dzięki grantowi Rektora Politechniki Śląskiej nr BKM-700/RT2/2022 12/020/BKM2022/0233.

decyzje mogą powodować wzrost kosztów, a w niektórych przypadkach także spadek bezpieczeństwa ruchu.

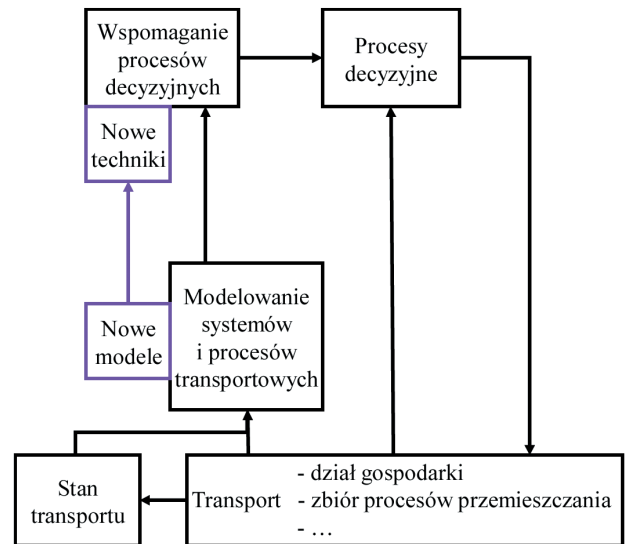
Dobrym przykładem występowania zakłóceń w transporcie publicznym są nowo pojawiające się problemy związane z nową technologią. Weźmy jako przykład autobusy elektryczne. Autobusy te, w warunkach bardzo niskich temperatur, mają zmniejszony zasięg operacyjny w stosunku do zasięgu katalogowego, co może powodować problemy operacyjne i zwiększony czas oczekiwania na autobus. Innym problemem może być np. awaria ładowarki akumulatorów trakcyjnych tych autobusów, zlokalizowanej na sieci transportowej. W związku z niewystarczającym – do realizacji całoniedzielnego zadania przewozowego – zasięgiem tych autobusów w rozkładzie jazdy przewiduje się przerwy na doładowanie. Nagła awaria ładowarki spowoduje zatem znaczne zaburzenia w ruchu. Innym przykładem zakłóceń są analogiczne problemy występujące w transporcie szynowym, jak również trolejbusowym (np. awaria zasilania, oblodzenie sieci trakcyjnej lub awaria taboru). Wynikające z nich utrudnienia i uciążliwości dla pasażerów skutkują zmniejszeniem zaufania społecznego do transportu publicznego przyjaznego środowisku.

Najczęściej stosowanym sposobem rozwiązania problemów decyzyjnych jest zapisanie go w formie liniowej z odpowiednimi ograniczeniami oraz z funkcją celu. Ograniczenia problemu są związane z możliwościami infrastruktury, taboru oraz innymi parametrami technicznymi (np. dopuszczalną prędkością lub ograniczoną przepustowością). O jakości rozwiązania świadczy wartość funkcji celu, która powinna być jak najniższa, a jest kwantyfikowaną miarą niedogodności (np. suma opóźnień). Opracowanie efektywnej funkcji celu nie jest proste, a uwzględnienie sumy opóźnień, tak jak to się robi w większości współczesnych prac badawczych, nie uwzględnia w wystarczającym zakresie problemów społecznych związanych z funkcjonowaniem transportu.

Oprócz programowania liniowego ze zdefiniowaną funkcją celu stosuje się proste heurystyki [1], [4, 5], takie jak metodę FIFO (ang. First In First Out): pierwsze na wejściu – pierwsze na wyjściu, LIFO (ang. Last In First Out): ostatnie na wejściu – pierwsze na wyjściu. Heurystyki te są proste w zastosowaniu, ale wyniki mogą być dalekie od optymalnych, w sensie minimalizacji skutków zakłóceń.

Istnieją również inne zaawansowane metody minimalizacji skutków zakłóceń, np. metody oparte na teorii gier oraz teorii grafów. W niektórych przypadkach metody te uwzględniają stochastyczny opis warunków ruchu [6,7]. Istnieją także bardziej zaawansowane podejścia wykorzystujące metody inspirowane biologicznie, takie jak metody ewolucyjne lub optymalizacja rojem cząstek [8,9].

Na rysunku 1 przedstawiono środowisko badań nad wykorzystaniem nowych algorytmów i technik do wspomaganie procesów decyzyjnych w transporcie. Niezależnie od definicji transportu zawsze występują ważne procesy decyzyjne. Aby je wspierać, należy znać stan transportu. Na podstawie tego stanu można modelować systemy i procesy transportowe dla potrzeb wspomaganie procesów decyzyjnych. Autorzy pracują nad nowymi modelami i nowymi



Rys. 1. Środowisko dla nowych technik wspomaganie procesów decyzyjnych w transporcie
Źródło: opracowanie własne

technikami wspomaganie procesów decyzyjnych, skupiając się także na transporcie publicznym.

W tym artykule krótko omówimy jedną z nowatorskich metod obliczeniowych – metodę obliczeń kwantowych, skupiając się na jej zastosowaniu do rozwiązywania problemu zakłóceń w ruchu w publicznym transporcie zbiorowym. Jest to metoda nowa i, w obszarze transportu, stosowana była w optymalizacji sygnalizacji świetlnej [10], harmonogramowaniu pracy pojazdów [11] oraz modelowaniu ruchu lotniczego [12,13]. W obszarze transportu kolejowego pierwsze publikacje naukowe pojawiły się dopiero w 2021 roku. Dotyczyły one optymalizacji planowania pracy taboru kolejowego [14] oraz wspomaganie dyspozytora liniowego w zarządzaniu zaburzeniami w ruchu kolejowym [15,16].

Metody obliczeń oparte na technikach kwantowych oraz ich potencjalne zastosowanie w transporcie publicznym

Teoria obliczeń kwantowych łączy w sobie idee klasycznej teorii informacji, informatyki i fizyki kwantowej [17]. W ostatniej dekadzie dokonano ogromnego postępu w eksperymentalnym rozwoju komputera kwantowego: maszyny, która wykorzystywałaby całą złożoność wielocząsteczkowej funkcji falowej kwantów do rozwiązania problemu obliczeniowego [18]. Komputery kwantowe różnią się znacząco od komputerów klasycznych, ponieważ te pierwsze stosują logikę kwantową, która zasadniczo różni się od klasycznej logiki boolowskiej.

W odróżnieniu od zwykłego bitu komputerowego, który może przyjmować wartość binarną 0 lub 1, kubit (używany w komputerach kwantowych) może reprezentować wartość 0, 1 lub dowolną proporcję wartości 0 i 1 w superpozycji obu stanów, z pewnym prawdopodobieństwem. Superpozycja umożliwia algorytmom kwantowym przetwarzanie informacji w ułamku czasu, jaki zajęłoby najszybszym systemom klasycznym rozwiązanie niektórych problemów [19]. Prowadzi to, obecnie w teorii, do większej wydajności obliczeń kwantowych w porównaniu z ich klasycznymi odpowiednikami.

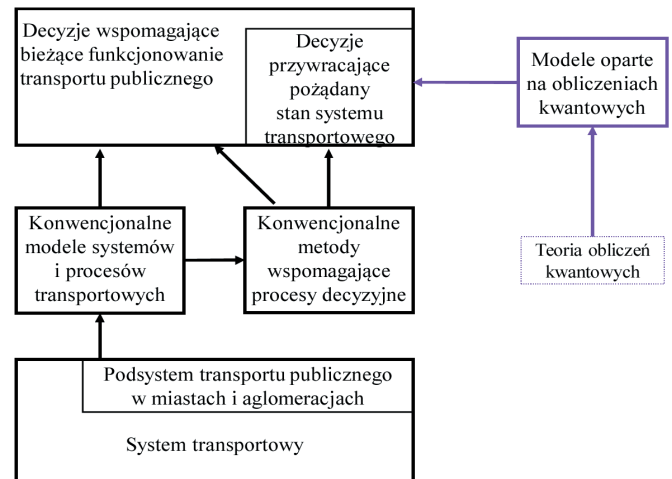
Przykładem kwantowych urządzeń obliczeniowych są kwantowe wyżarzaczki, np. urządzenie D-Wave [20]. Innym, bardziej uniwersalnym przykładem kwantowych maszyn obliczeniowych są komputery bramkowe. Na obecnym poziomie rozwoju wspomniane urządzenia kwantowe (szczególnie komputery bramkowe) są jednak zbyt małe (jeśli chodzi o dostępną pamięć operacyjną), aby przetwarzać większe zbiory danych. Oczekuje się, że szybki rozwój komputerów kwantowych spowoduje w przyszłości możliwości obliczeniowe wykraczające poza obecne klasyczne ograniczenia sprzętowe.

Istotnym wyzwaniem jest fakt, że komputery kwantowe wymagają innych ram modelowania matematycznego, na przykład poprzez szkło spinowe Isinga w przypadku wyżarzaczy kwantowych. Krokiem pośrednim w przekształcaniu praktycznego problemu optymalizacyjnego na problem wejścia do komputera kwantowego jest zapisanie problemu w postaci kwadratowej i wyższego rzędu nieograniczonej optymalizacji binarnej (ang. Quadratic and Higher-Order Unconstrained Binary Optimization). Więcej informacji na ten temat czytelnik znajdzie w [16]. Również efektywne przetwarzanie wyników obliczeń kwantowych jest istotnym wyzwaniem, ponieważ dzisiejsze urządzenia kwantowe są podatne na błędy. Stąd znaczna część eksperymentów daje wyniki, których jakość nie jest wystarczająco dobra, zatem nie mogą być przetłumaczone na stosowalne rozwiązanie problemu wejściowego. W trakcie opracowywania są również algorytmy korekcji błędów obliczeń kwantowych. Oczekuje się, że problemy jakości wyników z obliczeń kwantowych zostaną przewyżczone w nieodległej przyszłości, ponieważ technologia obliczeń kwantowych szybko się rozwija. Dodatkową specyfiką obliczeń kwantowych jest otrzymanie wielu różnych rozwiązań jednocześnie, co daje kilka proponowanych rozwiązań i możliwość ostatecznej decyzji przez osobę zarządzającą.

Na rysunku 2 przedstawiono koncepcję wykorzystania modeli opartych na obliczeniach kwantowych w transporcie, także publicznym.

Modele wspomagania decyzji oparte na obliczeniach kwantowych mogą w przyszłości stanowić nowe, jakościowe wsparcie dla konwencjonalnych metod wspomagających procesy decyzyjne w transporcie. Dobrym przykładem może być odcinek sieci kolejowej, na którym – niezależnie od przyczyn – ruch kolejowy jest zaburzony. Oznacza to, że część pociągów jest opóźniona w stosunku do pierwotnego rozkładu jazdy. Rozwiązaniem problemu jest takie rozplanowanie pociągów, aby zminimalizować opóźnienia wykraczające poza opóźnienia pierwotne (które nie są możliwe do uniknięcia). Należy jednak unikać konfliktów ruchowych – sytuacji, w której co najmniej dwa pociągi zgłaszają się do zajęcia tego samego, blokowego odcinka sieci kolejowej. Opóźnienia wtórne wynikają zwykle z konfliktów ruchowych i uwarunkowane są priorytetami w ruchu pociągów, ustalonymi przez zarządcę infrastruktury.

Z operacyjnego punktu widzenia można na analizowaną sytuację spojrzeć jak na utworzenie ad hoc nowego rozkładu



Rys. 2. Koncepcja wykorzystania modeli opartych na obliczeniach kwantowych w transporcie publicznym

Źródło: opracowanie własne

jazdy wolnego od konfliktów ruchowych, przy konstrukcji którego należy uwzględnić następujące uwarunkowania:

- minimalny czas przejazdu danego odcinka blokowego,
- zajęcie poszczególnych bloków przez wyłącznie jeden pociąg w danym czasie,
- obiegowanie taboru,
- przepustowość stacji kolejowych.

W szczególności należy rozwiązać konflikt ruchowy polegający na tym, że dwa pociągi poruszające się w przeciwnych kierunkach zgłaszają się do obsługi jednego odcinka blokowego. Rozwiązać go trzeba zgodnie z założoną polityką dyspozytorską nadawania priorytetów pociągom [21]. Można to także rozumieć jako badanie przejścia systemu transportowego ze stanu zakłóconego do normalnego.

Problem można zapisać za pomocą wektora N zmiennych binarnych $x \in \{0,1\}^N$ z elementami $\{0,1\}$. Każda z tych zmiennych jest równa 1, jeśli dany pociąg odjeżdża z danej stacji w danym czasie, oraz równa 0 w przeciwnym przypadku. Innymi słowy, omawiany problem formułujemy w całości jako binarne zmienne decyzyjne, co osiągnąć można poprzez dyskretyzację zmiennych czasowych.

Głównym wyzwaniem jest przekształcenie ograniczeń klasycznego zapisu optymalizacji liniowej na problem kwadratowej optymalizacji binarnej:

$$\min_x x^T Q x$$

W macierzy Q znajdują się zarówno zakodowane uwarunkowania operacyjne (minimalny czas przejazdu, zajętość odstępów blokowych itd.), jak również minimalizowana funkcja celu (np. suma opóźnień pociągów).

Aby rozwiązać omawiany problem z wykorzystaniem obliczeń kwantowych, należy sformułować problem jako model Isinga, który określa siłę sprzężenia pomiędzy parą kubitów w maszynie obliczeniowej. Model ten dotyczy zbioru zmiennych o wartościach $s_i \in \{-1, +1\}$, które oznaczają kierunek mikroskopowych momentów magnetycznych (co wynika z faktu, że pierwotnie model ten opisywał mikroskopowo

procesy magnetyczne). Zmienne te odpowiadają wspomnianym wcześniej zmiennym binarnym $x \in \{0,1\}^N$.

Model Isiniga przypisuje zatem energię do konkretnej konfiguracji zmiennych Isinga (rozumianych jako kubity) [15]:

$$E = \sum_{(i,j) \in E} J_{i,j} s_i s_j + \sum_{i \in V} h_i s_i$$

gdzie:

(V, E) – oznacza graf problemu V to wierzchołki w których znajdują się spiny, a E to połączenia między spinami;

$J_{i,j}$ – oznacza siłę interakcji;

h_i – oznacza zewnętrzne pole magnetyczne w i -tym spinie.

Powyżej przedstawiono najważniejsze kroki zastosowania kwantowych obliczeń do zarządzania ruchem niskoemisyjnych pojazdów po sieci transportu publicznego w przypadku wystąpienia zaburzeń. Zastosowanie obliczeń kwantowych jest badaniem przełomowym, dlatego że w przyszłości rozwój komputerów kwantowych może być szybszy niż rozwój komputerów klasycznych, co prawdopodobnie poprawi ich parametry i możliwość ich zastosowania w rozbudowanych, metropolitalnych sieciach transportu publicznego, w których eksploatowane są nowoczesne, niskoemisyjne środki transportu.

Podsumowanie

Obliczenia kwantowe stanowią obiecujący i nowatorski kierunek badań, który jest realizowany przez ośrodki badawcze na całym świecie. Przykładem urządzeń kwantowych są wyzarzaczki kwantowe, których zastosowanie może stanowić krok w kierunku zapewnienia usług transportu publicznego o większym niż obecnie stopniu niezawodności dla społeczności i grup społeczno-ekonomicznych zlokalizowanych na obszarach miejskich i metropolitalnych. Opracowanie nowych algorytmów opartych na obliczeniach kwantowych będzie można wykorzystać m.in. do minimalizacji skutków zaburzeń w ruchu kolejowym. Obliczenia kwantowe obecnie nie są wystarczająco technologicznie zaawansowane, aby mogły znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu realnych problemów dyspozytorskich. Jednak ich szybki rozwój pozwala mieć nadzieję na możliwą realną implementację w niezbyt odległej przyszłości do analizy procesów w systemach transportowych.

Literatura

- Mattsson L.G., Jenelius E., *Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research*, Transportation Research Part A Policy and Practice, 2017, vol. 81, DOI: 10.1016/j.tra.2015.06.002.
- Yap M., Cats O., *Predicting disruptions and their passenger delay impacts for public transport stops*, Transportation, 2021, vol. 48, nr 4, DOI: 10.1007/S11116-020-10109-9/FIGURES/14.
- Azolin L.G., Rodrigues da Silva A.N., Pinto N., *Incorporating public transport in a methodology for assessing resilience in urban mobility*, Transportation Research Part D Transportation and Environment, 2020, vol. 85, nr 102386, DOI: 10.1016/j.trd.2020.102386.
- D'Ariano A., Pacciarelli D., Pranzo M., *A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network*, European Journal of Operational Research, 2007, vol. 183, nr 2, DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.034.
- Lange J., Werner F., *Approaches to modeling train scheduling problems as job-shop problems with blocking constraints*, Journal of Scheduling, 2018, vol. 21, nr 2, DOI: 10.1007/S10951-017-0526-0/TABLES/4.
- Tang X., Lin X., He F., *Robust scheduling strategies of electric buses under stochastic traffic conditions*, Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2019, vol. 105, DOI: 10.1016/j.trc.2019.05.032.
- Krawiec K., *Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport*, Transport Problems, 2021, vol. 16, nr 1, DOI: 10.21307/tp-2021-009.
- Olivera A.C., García-Nieto J.M., Alba E., *Reducing vehicle emissions and fuel consumption in the city by using particle swarm optimization*, Applied Intelligence, 2015, vol. 42, nr 3, DOI: 10.1007/S10489-014-0604-3/FIGURES/10.
- Stolfi D.H., Alba E., *Generating realistic urban traffic flows with evolutionary techniques*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, vol. 75, DOI: 10.1016/j.engappai.2018.07.009.
- Inoue D., Okada A., Matsumori T., Aihara K., Yoshida H., *Traffic signal optimization on a square lattice with quantum annealing*, Scientific Reports, 2021, vol. 11, nr 1, DOI: 10.1038/s41598-021-82740-0.
- Irie H., Wongpaisarnsin G., Terabe M., Miki A., Taguchi S., *Quantum Annealing of Vehicle Routing Problem with Time, State and Capacity*, Quantum Technology and Optimization Problems, 2019, vol. 11413 LNCS, DOI: 10.1007/978-3-030-14082-3_13/COVER.
- Singh A., Lin C.Y., Huang C.I., Lin F.P., *Quantum Annealing Approach for the Optimal Real-time Traffic Control using QUBO*, 2021, IEEE/ACIS 22nd International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), DOI: 10.1109/SNPD51163.2021.9704985.
- Stollenwerk T., O'Gorman B., Venturelli D., *Quantum Annealing Applied to De-Conflicting Optimal Trajectories for Air Traffic Management*, IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems, 2019, vol. 21, nr 1, DOI: 10.1109/TITS.2019.2891235.
- Grozea C., Hans R., Koch M., Riehn C., Wolf A., *Optimising Rolling Stock Planning including Maintenance with Constraint Programming and Quantum Annealing*, 2021, Preprint dostępny w serwisie Arxiv o numerze 2109.07212, DOI: 10.48550/arxiv.2109.07212.
- Domino K., Koniorczyk M., Krawiec K., Jałowiecki K., Deffner S., Gardas B., *Quantum annealing in the NISQ era: railway conflict management*, Preprint dostępny w serwisie Arxiv 2021, nr 2112.03674v2, DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.03674.
- Domino K., Kundu A., Salehi O., Krawiec K., *Quadratic and Higher-Order Unconstrained Binary Optimization of Railway Rescheduling for Quantum Computing*, Quantum Information Processing, 2022, nr 21:337, DOI: 10.1007/s11128-022-03670-y.
- Steane A., *Quantum computing*, Reports on Progress in Physics, 1998, vol. 61, DOI: http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/61/2/002.
- Ladd T.D., Jelezko F., Laflamme R., Nakamura Y., Monroe C., O'Brien J.L., *Quantum computers*, Nature, 2010, vol. 464, DOI: 10.1038/nature08812.
- Co to jest kubit?* Microsoft Azure, https://azure.microsoft.com/pl-pl/overview/what-is-a-qubit/#qubit-vs-bit [dostęp: 21.04.2022].
- Getting Started with D-Wave Solvers – D-Wave System Documentation. https://docs.dwavesys.com/docs/latest/doc_getting_started.html [dostęp: 21.04.2022].
- Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir, PKP PLK, Warszawa 2011.