



Komputery kwantowe. Osiągnięcia i problemy

dr inż. **WOJCIECH NOWAKOWSKI**, prof. ndzw.,

Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa

Komputery kwantowe wykorzystują właściwości bitów kwantowych, czyli *kubitów*. W przeciwieństwie do tradycyjnych komputerów, w których bity muszą mieć wartość zero lub jeden, *kubit* może przyjmować wiele wartości jednocześnie. Pozwala to na bardzo szybkie przetwarzanie informacji. Dzięki wykorzystaniu takich zjawisk jak *splątanie* lub *tunelowanie* kwantowe, można teoretycznie rozwiązywać wybrane problemy w kilka dni, zamiast tysięcy lat, niezbędnych do rozwiązania tych problemów za pomocą maszyn istniejących.

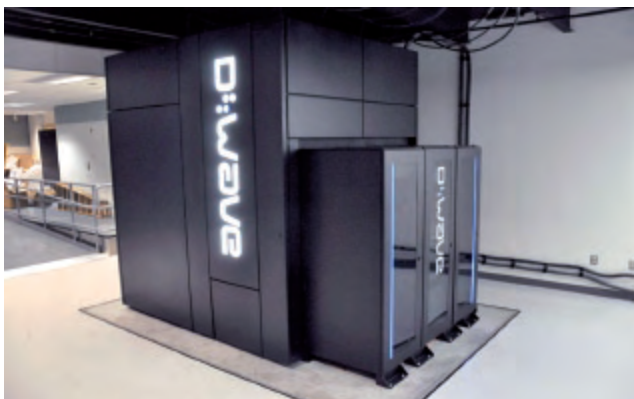
Pierwsza na świecie firma komercyjna, oferująca komputery kwantowe, D-Wave Systems Inc., z Burnaby (Vancouver, Kanada), mająca swoje główne laboratoria w Palo Alto, w Kalifornii, zrealizowała w maju 2013 roku zamówienie wartości ok. 15 mln dolarów na instalację maszyny *D-Wave System Two* (rys. 1). Maszyna ta, z 512-kubitowym procesorem *Vesuvius*, chłodzonym ciekłym helem do temperatury 0,02 kelvina, wymaga mocy zasilania 12 kW, trzykrotnie większej od tej, jak byłaby potrzebna do zasilania 10 największych superkomputerów produkowanych w USA.

Komputer został zakupiony do nowego *Quantum Artificial Intelligence Laboratory* (QuAIL) stworzonego w NASA *Advanced Supercomputing* (NAS) przy NASA's *Ames Research Center*, wspólnie przez NASA, Google Inc. i Uniwersyteckie Towarzystwo Badań Kosmicznych (*Universities Space Research Association*, USRA). *D-Wave Two* jest drugim z kolei, już znacznie doskonalszym i rozbudowanym cyfrowym systemem kwantowym. Pierwszym był *D-Wave System One*, zakupiony przez koncern zbrojeniowy Lockheed Martin w 2011 roku do ewentualnego wykorzystania w projektowaniu myśliwca piątej generacji F-35 Lightning II.

Laboratorium QuAIL planuje wykorzystanie komputera *D-Wave System Two* do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych np. w kontroli ruchu lotniczego, zarządzaniu, robotyce, nawigacji i komunikacji, diagnostyce systemów, rozpoznawaniu wzorców, wykrywaniu anomalii oraz planowaniu misji kosmicznych i tworzeniu ich harmonogramów. Przez badanie tych problemów QuAIL ma nadzieję udowodnić, że duże komputery kwantowe będą w sta-

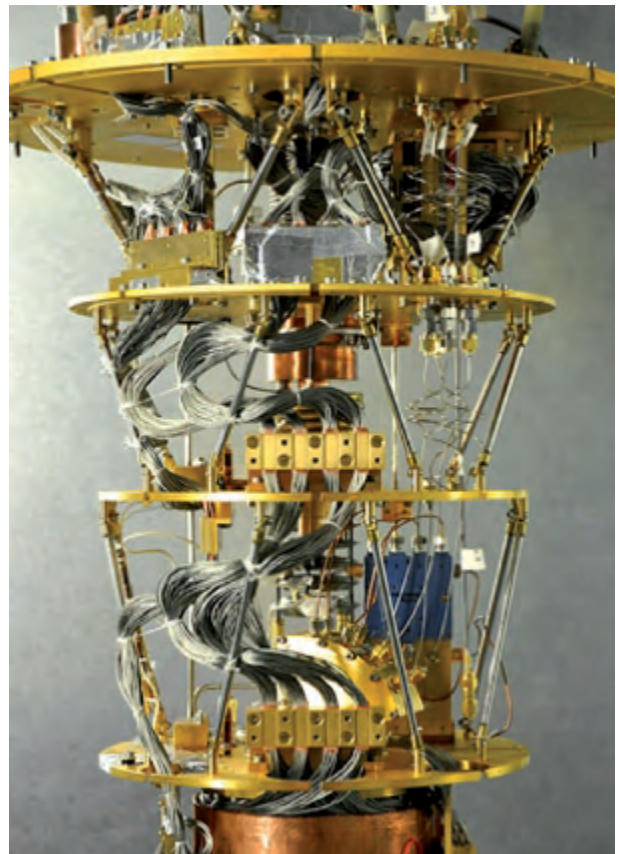
nie rozwiązywać niektóre problemy o wiele szybciej niż klasyczne komputery wykorzystujące nawet najlepsze obecnie znane algorytmy optymalizacji. W ciągu pięciu lat zespół projektu OuAIL ma prowadzić cztery główne tematy: testowanie działania komputera kwantowego, rozwój algorytmów kwantowych AI i ich implementacji, badanie problemów dekompozycji i tworzenie hybrydowych algorytmów kwantowo-klasycznych. Przewiduje się także, że szerokie środowiska akademickie będą mogły poprzez Towarzystwo USRA korzystać z systemu *D-Wave System Two* i prowadzić wspólne badania z naukowcami NASA i Google.

D-Wave System Two nie jest jednak klasycznym komputerem kwantowym. Nie wykorzystuje efektu kwantowego splątania, lecz tak zwane kwantowe wyżarzanie. Jest to algorytm prowadzący do wyboru najlepszego rozwiązania z wielu alternatywnych. Znacznie szybciej, niż w klasycznych komputerach, gdzie stosuje się podobny algorytm zwany *symulowanym wyżarzaniem* (ang. *simulated annealing*).



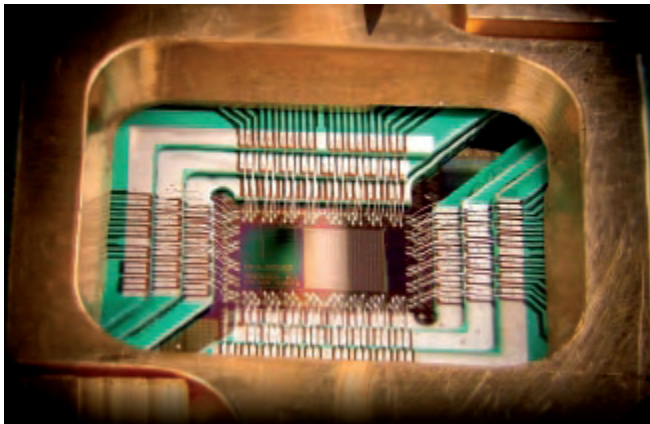
Rys. 1. D-Wave System Two, komputer kwantowy w Laboratorium QuAIL (www.nas.nasa.gov)

Fig. 1. D-Wave System Two, QuAIL Quantum Computer (www.nas.nasa.gov)



Rys. 2. Struktura montażowa procesora D-Wave Vesuvius, chłodzona do prawie zera bezwzględego (0,020 ° K). (www.nas.nasa.gov/quantum/index.html)

Fig. 2. Support structure for installation of the D-Wave Vesuvius processor, which is cooled to 20 millikelvin (near absolute zero). (www.nas.nasa.gov/quantum/index.html)



Rys. 3. Chip D-Wave System, przeznaczony do współpracy ze 128 nadprzewodzącymi elementami logicznymi (en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems)

Fig.3. Chip constructed by D-Wave Systems Inc., designed to operate as a 128-qubit superconducting quantum processor (en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems)

Podstawy algorytmu symulowanego wyżarzania zostały opisane po raz pierwszy w roku 1953 Swoją nazwę oraz sposób działania zawdzięcza on analogii do zjawisk krzepnięcia cieczy i stygnięcia metali. Przy powolnym ochładzaniu cząsteczki ciała tworzą bardziej równomierne struktury. Jeżeli spadek temperatury jest szybki, to cząsteczki nie znajdują optymalnego położenia i rozłożą się bardziej przypadkowo.

Metoda symulowanego wyżarzania jest rozwinięciem wcześniejszych metod *iteracyjnych*, które opierały się na ciągłym ulepszaniu istniejącego rozwiązania do momentu, gdy nie udało się go dalej poprawić. Algorytm taki zatrzymuje się jednak na minimum lokalnym i nie potrafi znaleźć globalnego minimum. W algorytmie symulowanego wyżarzania możliwy jest wybór gorszego rozwiązania. Algorytm symulowanego wyżarzania może więc wyjść ze znalezionej minimum lokalnego i dalej podążać w kierunku rozwiązania optymalnego.

Parametrem algorytmu, który ma wpływ na prawdopodobieństwo wyboru gorszego rozwiązania jest temperatura. Na początku działania algorytmu temperatura jest wysoka, dzięki czemu algorytm może wybierać rozwiązania gorsze. Wraz z kolejnymi iteracjami algorytmu temperatura spada i wybierane są częściej rozwiązania lepsze. Pod koniec pracy algorytmu prawdopodobieństwo wyboru gorszego rozwiązania jest bliskie zeru. Algorytm zachowuje się wówczas, jak typowy algorytm iteracyjny.

Kwantowe wyżarzanie (ang. *quantum annealing*) możliwe jest dzięki efektowi tunelowania kwantowego (cząstka może przekroczyć barierę potencjału o wysokości większej niż energia cząstki), dzięki któremu poszczególne kubity są ze sobą powiązane – „orientują się” jakiegoś procesy zachodzą w pozostałych.

Gdy w 2011 r. firma D-Wave zaprezentowała maszynę D-Wave System One jako pierwszy na świecie komputer kwantowy, w środowisku oceny były różne. Massachusetts Institute of Technology stwierdził, że to oszustwo, a maszyna nie ma nic wspólnego z procesami kwantowymi. Oskarżeniom sprzyjała tajemniczość producenta, nieskorego do udzielania informacji o tym, jak ich produkt działa. W ustaleniu prawdy pomogły badania w *University of Southern California*, gdzie przeprowadzono testy komputera sprzedanego firmie Lockheed Martin. Udało im się potwierdzić, że D-Wave jest jednak komputerem kwantowym – dochodzi w nim wyżarzania kwantowego, a nie do standardowego wyżarzania symulowanego.

Na razie jednak D-Wave nie może być traktowany jako uniwersalny komputer kwantowy – potrafi on rozwiązywać tylko określone zadania optymalizacyjne takie jak na przykład minimalny cykl Hamiltona w pełnym grafie ważonym. Jest to ścieżka rozpoczynająca się w danym wierzchołku, przechodząca przez każdy kolejny wierzchołek dokładnie jeden raz i kończąca się w punkcie startowym. Jeśli na przykład wierzchołki grafu będziemy interpretować jako miasta, a jego krawędzie jako drogi, to problem sprowadza się do znalezienia optymalnej trasy odwiedzenia wszystkich miast i powrotu do miasta startowego. Oczywiście wykorzystując kwantowe wyżarzanie możliwe jest rozwiązywanie podobnych, lecz wielokrotnie trudniejszych problemów dużo szybciej niż za pomocą komputerów klasycznych. Testy pokazały, że dla tych problemów optymalizacji, które można uruchomić bezpośrednio na kwantowych procesorach, maszyna D-Wave jest ponad cztery tysiące razy szybsza od rozwiązań software'owych. Najtrudniejszy z problemów został rozwiązany w ciągu pół sekundy, podczas gdy najlepszy z systemów software'owych potrzebował na to 30 minut. Przetestowano też najnowszy eksperymentalny procesor Vesuvius V6 – okazał się on jakieś prawie trzykrotnie szybszy.

Poważnym problemem w procesorach D-wave jest to, że ich kubity wykonane ze sprzężonych elektromagnetycznie pierścieni niobu są bardzo wrażliwe np. na dekoherencję. Chipy te Jak, już wspomniano, schładzane są do temperatury niemal absolutnego zera, a ponadto osłaniane przed promieniowaniem zewnętrznym. Nawet jednak takie zabezpieczenia nie zapewniają prawidłowego działania w potrzebnym czasie. Dlatego każda operacja powtarzana jest wielokrotnie, aby zapewnić przynajmniej statystyczną jej poprawność..

Firma D-Wave publikuje (<http://www.dwavesys.com/en/publications.html>) wyniki doświadczeń, które pokazały, że mechanizmy zakłócające proces wyżarzania kwantowego nie muszą być tak dotkliwe dla prawdziwych, kwantowych systemów otwartych działających w skończonej temperaturze. Okazało się, że mała ilość szumu termicznego (który uważa się powszechnie za zły) może faktycznie zwiększyć skuteczność rozwiązywania problemów, a nie ją zmniejszyć. Ponieważ wszystkie prawdziwe komputery kwantowe będą nieuchronnie otwartymi systemami kwantowe działającymi w skończonej temperaturze.

Naukowcy z *University of Southern California* są zdania, że w przyszłości powinno udać się wykorzystać podstawy działania D-Wave System do stworzenia uniwersalnego komputera kwantowego potrafiącego rozwiązywać dowolne zadania. Chyba można to uznać za naturalny stan rzeczy – pierwsze klasyczne komputery też były tylko zaawansowanymi kalkulatorami.

W wywiadzie dla *Telegraph.co.uk*, Anton Zeilinger, uważany za jednego z ojców komputerów kwantowych przewiduje, że takie maszyny staną się codziennością już w najbliższej przyszłości.

Literatura

- [1] Nowakowski W.: O kryptografii kwantowej. Elektronika, konstrukcje, technologie, zastosowania, nr 2/2010.
- [2] <http://www.dwavesys.com/>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems
- [4] <http://alexjones.pl/pl/aj/aj-technologie-i-nauka/aj-informatyka/item/7528-quantowy-komputer-d-wave-naprawde-dziala>
- [5] <http://robert.nowotniak.com/pl/quantum-computing/>
- [6] http://www.deltami.edu.pl/temat/fizyka/zastosowania/2011/04/17/Komputery_kwantowe/
- [7] http://home.agh.edu.pl/~pyrda/doku.php?id=wiki:komputer_kwantowy
- [8] Sergio Boixo, Troels F. Rønnow, Sergei V. Isakov, Zhihui Wang, David Wecker, Daniel A. Lidar, John M. Martinis, Matthias Troyer: Quantum annealing with more than one hundred qubits. Quantum Physics, Jul 2013. <https://archive.org/details/arxiv-1304.4595>.
- [9] <http://155.158.112.34/~algorytmewolucyjne/materiały-z-wykładu.html>
- [10] <http://www.dwavesys.com/en/publications.html>