

Przyszłość w metrologii kwantowej

The future in quantum metrology

Kontynuujemy prezentację wzorców wielkości elektrycznych, utrzymywanych w Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu GUM. Po rezystancji przyszedł czas na wzorzec napięcia elektrycznego stałego.

The Bulletin "Metrology and Hallmarking" continues to present national measurement standards of electrical quantities, maintained in the Laboratory of Electricity and Magnetism Laboratory. This time we are talking about National DC voltage standard.

Adam Żeberkiewicz (redaktor działu „Metrologia wczoraj i dziś” Biuletynu GUM):

– Czy możemy powiedzieć, że dziedzina, którą Pani się zajmuje, pojawiła się wraz z wynalezieniem elektryczności?

Edyta Dudek (Kierownik Pracowni Wzorców Wielkości Elektrycznych) – Nie. Rozmawiać będziemy o kwantowym wzorcu napięcia elektrycznego stałego. Wykorzystuje on zjawisko tunelowania, które zostało odkryte przez Briana Josephsona (Nagroda Nobla z fizyki w 1973 roku) w 1962 roku, a potwierdzone doświadczalnie w 1963. Jeżeli założymy, że badanie zjawisk elektrycznych rozpoczęło się od odkrycia w 1785 roku przez Charlesa Augustina’a Coulomba, a w 1800 roku przez Alessandro Voltę pierwszej baterii elektrycznej, to można stwierdzić, że będziemy rozmawiać o dość „młodym” wzorcu. Jeśli chodzi o wielkości jednostek elektrycznych, to pod względem konstrukcji są jednymi z bardziej skomplikowanych, ale przy tym również ważniejszych jednostek miar na świecie. Te związane z elektrycznością stanowią bowiem odniesienie dla pomiarów wszystkich dziedzin. Metrologia kwantowa jest młodą, ale bardzo dynamicznie rozwijającą się poddziedziną. Kiedy nasi profesorowie – wykładowcy kończyli studia, nie była jeszcze znana. Odkrycia noblistów w tej dziedzinie fizyki: Josephsona i von Klitzinga miały miejsce w latach 60 i 80 XX wieku. Tak naprawdę o metrologii kwantowej młodzież będzie się uczyć dopiero za parę lat.

Jeśli chodzi o nasz wzorzec napięcia elektrycznego stałego, to jest to wzorzec o najlepszych parametrach metrologicznych, nie tylko w kraju, ale również na świecie. W innych krajowych instytutach metrologicznych występują wzorce skonstruowane w ten sam sposób. Różnią się co najwyżej szczegółami, pojedynczymi elementami, w zależności od tego, w jakich latach powstawały i kiedy były modernizowane. Wszystkie wykorzystują jednak to



samo zjawisko, układ sterowania jest podobny, pozwalają odtworzyć jednostkę napięcia elektrycznego z taką samą niepewnością, są najlepszą realizacją tej jednostki na świecie.

– **Ale zanim doszliśmy do wzorca kwantowego, napięcie elektryczne stałe było realizowane w inny sposób.**

Wzorzec, o którym mówiliśmy, został zakupiony w 1997 roku, opiera się on na efekcie kwantowym odkrytym teoretycznie w 1962 roku, a potwierdzonym doświadczalnie rok później – w 1963 roku. Co było wcześniej? W GUM, w specjalnych warunkach przechowywaliśmy ogniwa Westona. Były to ogniwa galwaniczne, w których elektrodę dodatnią stanowiła rtęć, ujemną amalgamat kadmu, a elektrolitem był nasycony wodny roztwór siarczanu kadmu. Pozwalały nam one zrealizować bardzo dokładnie jedną wartość napięcia – 1,018 V. Odtworzyć z dużą dokładnością, pod warunkiem, że ogniwa przechowywane były w odpowiednich warunkach. Chodziło głównie o brak jakichkolwiek wstrząsów i stałą temperaturę. Były one więc przechowywane w termostatach olejowych. Taki wzorzec tworzyła grupa 12 ogniw, połączonych,

sprawdzanych i porównywanych ze sobą, a także wzorcowanych okresowo w BIPM. Wiązało się to z wieloma trudnościami, bo przewiezienie takiego ogniwa do BIPM istotnie zmieniało jego parametry. Ale przede wszystkim wartość 1,018 V, przy rosnących wymaganiach przemysłu, stała się kompletnie niefunkcjonalna. Wszystkie multimetry, zwłaszcza te najdokładniejsze, wymagały do kalibracji wartości 10 V. Wreszcie konieczne stało się, zarówno z uwagi na wymagania europejskich komitetów technicznych, jak i wobec oczekiwań naszych klientów, żeby mieć wzorzec, który będzie najlepszą realizacją jednostki na świecie. Nie wiem dokładnie, kiedy zostały podjęte pierwsze działania w tym kierunku. Pierwszy wzorzec został zakupiony w 1997 roku, czyli wtedy, kiedy zaczęłam tutaj pracę. W tym samym czasie pracownicy laboratorium zaczęli jeździć do innych europejskich NMI, w których takie wzorce były już wykorzystywane, żeby zdobyć doświadczenie i dowiedzieć się, jakie warunki są wymagane do uruchomienia wzorca i stworzenia laboratorium na najwyższym poziomie. Potem trzeba było o te warunki powalczyć. Chodziło między innymi o likwidację okien. Pomimo, że jest to budynek zabytkowy, udało się je zamurować. Oprócz tego, pomieszczenie zostało wyposażone w tzw. pływającą podłogę, wszystko zostało ekranowane. Znajdujemy się przecież w centrum Warszawy, więc o drgania czy wpływ urządzeń elektronicznych jest nietrudno. Remont kapitalny trwał dłuższy czas. Musieliśmy jednak zapewnić odpowiednie warunki, żeby wzorzec mógł dobrze funkcjonować. Udało się, chociaż np. nasza klimatyzacja jest jedną z najstarszych w urzędzie – pochodzi z 1997 roku. Wtedy była dość wyjątkowa i spełniała nasze wymagania – zapewniała bowiem stabilizację na poziomie 0,1 stopnia Celsjusza. Ale elementy, które tworzyły ten system zużyły się, trudno było o zamienniki i z czasem instalacja stała się wadliwa, a problem z jej modernizacją coraz większy. W zasadzie właśnie klimatyzacja jest w tej chwili naszym jedynym problemem. Nie ma negatywnego wpływu drgań, czy innych tego typu czynników środowiskowych.

– **Na co powinniśmy zwrócić uwagę, jeśli chodzi o sam wzorzec?**

– Aktualnie jest to wzorzec państwowy, co ma znaczenie nie tylko prestiżowe, ale również wpływa na znaczne obniżenie kosztów wzorcowania przyrządów w BIPM, gdzie jest dokładnie takie samo stanowisko. Po prostu uniezależniliśmy się, jesteśmy w posiadaniu wzorca, który pozwala nam osiągnąć takie same możliwości pomiarowe.

– **A co z porównaniami międzynarodowymi?**

– Takie porównania odbywały się zanim wzorzec został ustanowiony. Otóż, po jego uruchomieniu chodziło o wykonanie takiego porównania międzynarodowego, żebyśmy mogli potwierdzić, że parametry, które deklaruje producent układu, są osiągalne w naszych warunkach laboratoryjnych i jednocześnie, że my – jako pracownicy techniczni – jesteśmy w stanie wykorzystać naszą wiedzę do sprawnego poruszania się w systemie, zgodnie z metrologicznymi zaleceniami. Chodziło więc o potwierdzenie kompetencji technicznych nie tylko samego układu, ale również zespołu, który będzie się tym zajmował. Pozytywny wynik takiego porównania był warunkiem niezbędnym do uzyskania przez nasz wzorzec statusu wzorca państwowego. Dalej poszło szybko. W 1997 roku nastąpił zakup, w 1998 roku wzorzec ruszył, a w 2003 roku był już wzorcem państwowym. Okresowo oczywiście uczestniczymy także w porównaniach kluczowych. Mogą być dwa rodzaje takich porównań: bezpośrednie i pośrednie. O pierwszych mówimy wtedy, kiedy przyjeżdża do nas złącze, będące sercem całego układu i wmontowuje się je do naszego systemu. Takie serce jest własnością organizatora porównania. Porównanie jest bardzo kosztowne, ponieważ trzeba wyjąć sondę, zużyć znaczną ilość ciekłego helu, poza tym istnieje pewne ryzyko uszkodzenia falowodu.

Prostszym, szybszym i pozwalającym na uzyskanie oczekiwanych efektów jest porównanie pośrednie, czyli nie zmienianie niczego w systemie. Wówczas tylko za pomocą układu badamy wzorzec odniesienia, biorący udział w porównaniu.

W porównaniach bierze udział często wielu uczestników, nawet do 20. U każdego z nich wzorzec musi przez jakiś czas przebywać, zanim się zaaklimatyzuje. Porównania, które służą do określenia wyników, trwają od dwóch tygodni do miesiąca. Do tego dodać należy czas podróży. Zatem taki ciąg porównań może trwać latami. Gdybyśmy się chcieli porównywać, powinniśmy to robić zawsze wtedy, kiedy dochodzi nowy element. Chodzi o potwierdzenie, że nie pogorszył on naszych parametrów. Podobnie jest w przypadku nowego pracownika, musimy wykazać, że i on może się tym zajmować i wykonywać pomiary.

– **Czy często się te nowe elementy pojawiają?**

– Aktualnie można powiedzieć, że temat został już wyczerpany, ponieważ nasz wzorzec nie może być już dokładniejszy. Nie wydaje mi się, żebyśmy mogli jakkolwiek element we wzorcu DC (napięcia stałego) udoskonalić.

– **A gdyby zmieniła się teoria, np. nastąpiło jakieś odkrycie?**



– Nie sądzę, żeby mogło się tu coś zmienić. Prace badawcze idą w kierunku kwantowego wzorca AC. W kwestii poprawy technologii wzorzec DC wyczerpał już swoje możliwości. Oczywiście jest on nadal odniesieniem dla wzorców jednostki napięcia elektrycznego we wszystkich laboratoriach, zarówno w GUM, jak i w innych laboratoriach krajowych. Wykonywane są również porównania dla klientów z zagranicy, przeważnie dla tych z Litwy, Łotwy i Estonii.

Muszę w tym miejscu zaznaczyć, że istnieje ogromna potrzeba pomiarów napięć przemiennych z największą dokładnością. Od lat staramy się o kwantowy wzorzec AC i myślę, że w ciągu 2-3 lat taki wzorzec uda się uzyskać.

– Proszę wyjaśnić, jak często na stanowisku wzorca państwowego napięcia stałego wykonywane są pomiary?

– W ciągu roku wykonujemy pomiary przez ok. dziesięć miesięcy. Jedno naczynie dewara o pojemności 100 litrów, w którym znajduje się ciekły hel, a które kosztuje ok. 4 tysięcy złotych, wystarcza nam na maksymalnie 6 tygodni pracy. Już po pięciu tygodniach widzimy, że złącze pracuje inaczej, pojawia się pewien dyskomfort, więc kończymy pomiary. Nie może dojść do sytuacji, że hel zupełnie się zużyje, zostaje wtedy zbyt dużo wilgoci, gaz skropli się, zamarznie i może spowodować uszkodzenie. Dlatego po zakończeniu pracy musimy ogrzać złącze do temperatury pokojowej, a przede wszystkim dokładnie osuszyć, jest to przecież bardzo precyzyjny układ elektroniczny, który tworzy 15 tysięcy złącz. Jedno złącze pozwala wygenerować napięcie 1 miliwolta, które jest zbyt małe. My potrzebujemy 10 woltów. W związku z tym wykorzystywanych jest 15 tysięcy złącz, podłączonych szeregowo na płytce. Jeżeli cokolwiek zostanie uszkodzone – choćby jedno z nich, np. kropelką wilgoci – to wtedy cały system nie działa. Tak więc jest to praca, która wymaga zarówno doświadczenia, jak i odpowiedniego skupienia.

– Jak długo trwa taki pomiar?

– Jedno źródło o dwóch wartościach znamionowych mierzone jest od 10 do 14 dni.

– To dosyć długo.

– Tak, ale jest to bardzo dokładny pomiar, który wykonywany jest w dość specyficznych warunkach.

– Laboratoria z jakich branż wzorcują u nas swoje przyrządy?

– Stosowane u nas źródła napięcia są powszechnie używane nie tylko w laboratoriach akredytowanych, ale również są wykorzystywane przez metrologów resortu Obrony Narodowej. Wcześniej wzorcowane były w bazie NATO w Niemczech. Wszystkie laboratoria na wysokim poziomie, które wykonują pomiary napięcia elektrycznego, powinny być wyposażone w tego typu wzorzec.

– Czy przy wzorcu są potrzebne jakieś prace konserwacyjne?

– Tak. Najważniejsza jest prawidłowa praca złącza. Wytrzymałość materiałowa złącza jest określona na ok. 10 lat. Obawiam się, że wielkimi krokami zbliżamy się do momentu, kiedy będziemy musieli je wymienić. Mija właśnie 10 lat, kiedy ostatnio wymienialiśmy ten element. To dość kosztowne zadanie. Zwykle nie da się takiej inwestycji zaplanować w planie rocznym, bo nie wiemy, kiedy złącze się zepsuje – za 8 czy za 12 lat?

– I komponentów nie można nabyć w Polsce?

– Rzeczywiście, na razie nie jest to możliwe. W momencie, gdy wymieniamy złącze, to wyłączamy układ, a kiedy zanurzamy złącze – włączamy układ. Po każdym uruchomieniu, a przed każdym wzorcowaniem, konieczne jest sprawdzenie systemu i każdego elementu krok po kroku. Oczywiście z uwagi na to, że jest to wzorzec państwowy, musimy odnotować takie wydarzenie. Zresztą, jeżeli coś pójdzie nie tak, jak trzeba, to wykonanie pomiaru w ogóle nie będzie możliwe. System wskaże, który element nie działa tak, jak powinien. Bywa, że trzeba wyczyścić styki, zbierają się tam osady i nie ma takiego przepływu, jakiego oczekujemy. Czasem mamy problemy z sygnałem czasu i częstotliwości. System jest coraz starszy, elementy się zużywają, więc coraz częściej mogą się pojawiać problematyczne sytuacje. Główną czynnością logistyczną po naszej stronie jest zabezpieczenie ciekłego helu, a co za tym idzie środków na ten cel.

– Proszę powiedzieć coś o znaczeniu wzorca, również w kontekście pomiarów w innych pracowniach Laboratorium Elektryczności GUM.

– Wzorzec stanowi odniesienie dla wszystkich pomiarów elektrycznych wykonywanych w kraju. Gdyby tego wzorca nie było, wszystkie pomiary musiałyby być odnoszone do wzorca, który znajduje się w BIPM. Oczywiście koszty utrzymania wzorca są znaczne, ale jeszcze większe byłyby koszty transportu i ubezpieczenia wzorca na czas podróży do Paryża. To wpłynęłoby także na podniesienie kosztów działalności prowadzonej przez naszych klientów, wywodzących się z przemysłu

i laboratoriów akredytowanych, które nie mając naszego wzorca, musiałyby szukać zapewnienia spójności pomiarowej czy odniesienia w innych krajach.

Oprócz wzorców państwowych mamy wciąż ogniwa Westona, które nadal są wykorzystywane w niektórych laboratoriach. Istnieje potrzeba ich okresowego sprawdzania, dla zapewnienia spójności. Planujemy też prace badawczo-rozwojowe, dzięki którym moglibyśmy coś poprawić.

– **Powiedzmy coś o tych pracach...**

W Pracowni Wzorców Wielkości Elektrycznych, w której pracuje 5 osób, zrealizowaliśmy dwa projekty badawczo rozwojowe finansowane przez NCBiR. Jeden z ostatnich dotyczył transferów Hamona, realizowaliśmy go we współpracy z Politechniką Wrocławską. Udział GUM polegał na wykonaniu przez pracowników całego systemu przekazania jednostki, ze zjawiska kwantowego, a efektem tych prac było uzyskanie dla GUM nowego stanowiska. Czyli w tej chwili możemy w naszym laboratorium wykonać te same prace, które wykonuje NIST.

Główny Urząd Miar, uczestniczył w tym projekcie jako członek konsorcjum, deklarował wkład własny, który

stanowiła praca naszych metrologów. Czyli można powiedzieć, że przez trzy lata trwania projektu, oprócz codziennych obowiązków, mieliśmy dodatkowe zadania. Jeśli chodzi o projekty międzynarodowe, to właśnie zakończył się projekt EMPIR, dotyczący wzorca napięcia przemiennego. Dzięki projektowi uzyskaliśmy wiedzę, jakie inwestycje będą potrzebne. Jeśli otrzymamy zgodę Kierownictwa, to jesteśmy w stanie w ciągu 2–3 lat stworzyć kompletnie nowy wzorzec.

Staramy się więc znaleźć powiązanie naszych badań z projektami europejskimi, a jednocześnie uzyskać duże zainteresowanie uczelni krajowych. Udział GUM w jakimkolwiek projekcie zwiększa szansę uzyskania wsparcia ze środków NCBiR. Taki projekt jest dobrze odbierany, najczęściej ma silne powiązanie z potrzebami polskiego przemysłu i gospodarki. Przeważnie efektem jest stworzenie stanowiska, które pozwala na przeprowadzanie nowych badań, bez dodatkowych nakładów finansowych. Oczywiście jest to dla nas pracochłonne, ale też satysfakcjonujące. Zawsze czegoś się uczymy.

– **Dziękuję za rozmowę.**