

## Kwantowy wzorzec rezystancji – opis, pomiary, zastosowanie

### The quantum resistance standard – description, measurements, application

W rozmowie z Marcinem Orzepowskim z Pracowni Wzorców Wielkości Elektrycznych przedstawiamy, jak zbudowany jest kwantowy wzorzec rezystancji, do czego wykorzystywane jest zjawisko rezystancji oraz jak wyglądają pomiary w tej dziedzinie.

This interview with Marcin Orzepowski (Electrical Quantities Standards Section) presents how a quantum resistance standard is built, what is the use of resistance phenomenon and what measurements in this field look like.

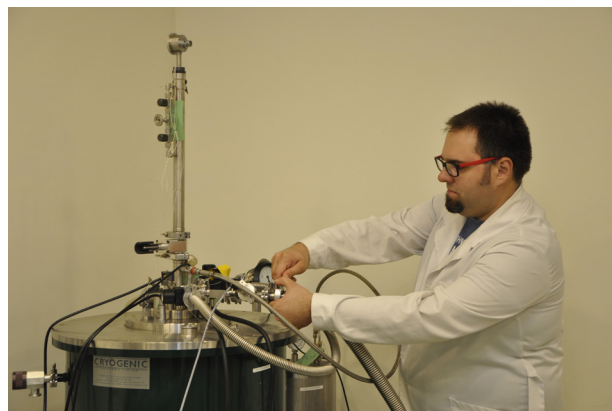
**Adam Żeberkiewicz: Rezystancja to wielkość charakteryzująca relację między napięciem a natężeniem prądu elektrycznego w obwodach prądu stałego. Kiedy to zjawisko zostało zauważone i zbadane?**

Marcin Orzepowski (Samodzielne Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu): – Mówimy tutaj o początkach elektryczności i prawie Ohma, które odkrył w I poł. XIX wieku niemiecki profesor Georg Simon Ohm. Wcześniej Alessandro Volta odkrył powstawanie siły, którą jest napięcie elektryczne. A w przypadku rezystancji mamy do czynienia z różnicą potencjałów elektrycznych.

**– Powiedzmy jak powstaje rezystancja, czyli inaczej opór elektryczny.**

– W przyrodzie występują różne substancje fizyczne zbudowane z atomów: metale, niemetale, półprzewodniki. W każdym atomie mamy dodatnio naładowane jądro, w którym są protony – nośniki dodatniego ładunku; neutrony, które nie mają ładunku (są obojętne elektrycznie) i elektrony, które mają ładunek ujemny. Elektrony wiążą ze sobą atomy w związki chemiczne, ale też pozwalają się przemieszczać dość swobodnie w metalach.

Za elektryczność odpowiadają właśnie elektrony. Mogą być one w różny sposób połączone z materią, która tam się znajduje. Dzięki temu mamy różne właściwości materiałów, na przykład jedną z właściwości metali jest przewodzenie prądu. Polega to na tym, że część elektronów znajduje się w chmurze i nie będąc związana z konkretnym atomem, potrafi się przemieszczać. Są to tak zwane elektrony walencyjne. Kiedy w jednym miejscu, w przestrzeni znajduje się więcej ładunku dodatniego, a w innym ujemnego, powstaje pole sił działających na umieszczony w nim elektron. Siła taka powoduje ruch elektronu. Na takim działaniu opiera się praca baterii (ogniw galwanicznych), generatorów. W baterii dochodzi



do reakcji chemicznej, która doprowadza do tego, że na jednej elektrodzie jest dużo elektronów, a na drugiej dużo jonów dodatnich, czyli takich atomów, które są pozbawione części elektronów. Dzieje się tak w wyniku reakcji chemicznych zachodzących w ogniwach. W ten sposób mamy wytworzone pole elektryczne. Jeżeli do baterii podłączymy przewód, to popłynie przez niego prąd. Jeżeli jeszcze przewód jest wykonany z miedzi, to będzie on bardzo dobrze przewodzić prąd, ponieważ jest tam dużo elektronów, które mogą swobodnie przepływać. Ze względu na to, że sieć krystaliczna jest tak ułożona, że nie przeszkadza przepływowi prądu, miedź – podobnie zresztą jak srebro – jest bardzo dobrym przewodnikiem. Aluminium czy stal są gorszymi przewodnikami. Stąd też, jeśli mielibyśmy przewód aluminiowy, a tak jest w starych budynkach, musielibyśmy wykorzystać jego większą średnicę, bo inaczej przewód zacząłby się grzać, a to oznacza, że pojawi się tam omawiany przez nas opór elektryczny.

Łatwy do opisanego tego zjawiska jest model hydrauliczny. W takim modelu napięcie rozumiemy jako ciśnienie wody w rurach, a natężenie stanowi przepływ tej wody. Opór elektryczny jest zależny od średnicy rury; im większa, tym mniejszy opór i odwrotnie. W przypadku miedzi ta rura jest gruba, a w przypadku aluminium cieńsza. Dlatego trzeba mocniej pchać, żeby przepchać tę samą

ilość cieczy. Jeśli będziemy mieli napięcie 1 V, a rezystancja miedzi wyniesie 1  $\Omega$ , to otrzymamy prąd o natężeniu 1 A. Natomiast, jeżeli w aluminium rezystancja wyniesie 2  $\Omega$ , to wtedy przy napięciu 1 V będziemy mieli 0,5 A. Żeby uzyskać 1 A, czyli inaczej przepchać więcej elektronów w tak krótkim czasie, będziemy musieli zwiększyć napięcie do 2 V.

### – Do czego wykorzystujemy rezystancję?

– Przede wszystkim rezystory mogą być odbiornikami, które zmieniają energię elektryczną w ciepło. Na przykład nasze domowe grzejniki są rezystorami. Rezystancja bardzo prosto przekłada się na moc. Ponieważ moc jest iloczynem prądu i napięcia, a prąd zależy od napięcia i rezystancji, to można powiedzieć, że moc wyraża się równaniem „prąd do kwadratu razy rezystancja”, albo „napięcie do kwadratu razy rezystancja”. Czyli widać, że moc wydzielona na rezystorze zależy od napięcia i rezystancji. Na przykład, jeśli ktoś projektuje ogrzewanie elektryczne, musi wiedzieć, jaka jest wartość rezystancji w określonej temperaturze.

Kolejny przykład z dziedziny elektroniki: oświetlenie LED musi mieć jakieś ograniczenie prądowe, a „zaworem” dla tego prądu jest rezystancja opornika włączonego w obwód zasilania żarówki. Oporniki połączone szeregowo mogą dzielić napięcie. W elektronice starszego typu, której reprezentantem są niektóre odbiorniki radiowe, mamy gałkę, która jest rezystorem o zmiennej wartości, suwakowym potencjometrem, a wartość sygnału elektrycznego wychodzącego jest dzielona. W ten sposób realizowana jest regulacja głośności. Rezystory są w telefonach komórkowych, zegarkach, lodówkach, pralkach.

– **Czyli możemy powiedzieć, że są to urządzenia codziennego użytku, ale jednocześnie takie, które znajdują się na samym dole piramidy spójności. A co znajduje się wyżej?**

– Rezystancja może mieć zastosowanie w ogrzewaniu, albo w elektronice użytkowej, ale my wykorzystujemy ją do pomiarów w laboratorium. Przy pomocy rezystorów możemy wykonywać różnego rodzaju pomiary. Na przykład w tensometrach, czyli przetwornikach siły na rezystancję, mierzymy de facto, jak zmienia się rezystancja. Na tensometr przyklejony do metalowego ramienia, które stanowi część jakiejś konstrukcji, zaczyna działać siła, a jego rezystancja się zmienia.

Kolejny przykład to temperatura, którą uwzględniamy w naszych pomiarach. Wzorec jednostki miary temperatury tworzą komórki punktów stałych, gdzie pewne substancje są utrzymywane w swoim stanie skupienia przez dłuższy czas: w punkcie potrójnym, w stanie

ciekłym, wrzenia, skraplania. Nazywa się to Międzynarodową Skalą Temperatury. Wkładany przez nas do komórki termometr jest tak naprawdę rezystorem. Mierząc odpowiednią rezystancję, jesteśmy w stanie wyliczyć, jaka jest temperatura.

Pomiar rezystancji jest często pomiarem napięcia, które wydziela się na rezystancji. Jeżeli prąd płynie przez rezystor, który hamuje przepływ tego prądu, to powstaje tam siła zwana napięciem, czyli różnica potencjałów. Żeby przedstawić to obrazowo: przed rezystorem jest dużo elektronów i chcą one jak najszybciej przejść, ale niestety nie mogą. Muszą zwolnić. Tak więc, z jednej strony mamy więcej, a z drugiej mniej elektronów. Po podłączeniu woltomierza zauważymy, że mamy napięcie.

### – Gdzie jeszcze wykorzystywana jest rezystancja?

– Służy ona również do przeniesienia tej wielkości na pomiar prądu, który często odbywa się dzisiaj jako pomiar rezystancji. Jeśli chcemy zmierzyć wysokie prądy, to boczniaki prądowe, które dobiera się do amperomierza, posiadają wartości o niskim nominalu. Spadek napięcia na boczniku definiuje, jaka jest wartość prądu. Co do innych wielkości elektrycznych: rezystancja jest składnikiem impedancji, nasze rezystory służą jako odniesienie przy pomiarach impedancji, indukcyjności oraz pojemności elektrycznej. W Pracowni Wzorców Wielkości Elektrycznych skupiamy się na pomiarach urządzeń o najwyższej dokładności. Wzorcowane u nas rezystory są używane w innych pracowniach GUM, w laboratoriach okręgowych urzędów miar, a w także w laboratoriach badawczych i wzorcujących. Później te rezystory są wykorzystywane, aby mierzyć różne wielkości – wszędzie tam, gdzie mamy przetwarzanie wielkości wejściowej na rezystancję.

– **W Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu wzorcowane są przyrządy znajdujące się na wyższym szczeblu piramidy. Do tego potrzebne są szczególne warunki i najwyższej jakości wyposażenie.**

– Rzeczywiście, w naszym laboratorium mierzymy głównie rezystory wzorcowe, czyli rezystory o specjalnej konstrukcji, które są umieszczone w odpowiednich obudowach. Pomiary wykonujemy w stabilnej temperaturze, umieszczając rezystory w termostatach – na przykład olejowych, czy też powietrznych. Muszą się one znajdować w takim miejscu przynajmniej 48 godzin przed wzorcowaniem. Przykładowo, kiedy klienci udostępniają nam przyrządy, które długo przebywały na zimnie, albo w sezonie letnim w wysokiej temperaturze, to konieczne jest przedłużenie okresu aklimatyzacji. Najpierw przyrząd aklimatyzujemy w powietrzu – w tym pomieszczeniu,





żeby doszedł do swojej temperatury przez co najmniej dobę, a później czekamy 48 godzin i dopiero robimy wstępny pomiar.

Termostaty nazywane przez nas wannami temperaturowymi, w których umieszczamy rezystory, wypełnione są olejem mineralnym lub olejem parafinowym, który jest także stosowany w przemyśle farmaceutycznym i spożywczym. Posiadamy także termostat powietrzny. Istnieją więc różne możliwości stabilizacji temperatury. Jesteśmy w stanie wykonać bardzo dokładne pomiary, a to dlatego, że posiadamy kwantowy wzorzec rezystancji, który jest wzorcem pierwotnym, czyli takim, który sam wytwarza najdokładniejszą reprezentację jednostki rezystancji.

**– Jak zbudowany jest wzorzec rezystancji? Widzimy, że składa się na niego wiele elementów.**

– Sercem układu jest dioda półprzewodnikowa, ale o szczególnych właściwościach. Jest ona umieszczona w specjalnej konstrukcji, służącej do schładzania jej do temperatury poniżej 1 K, co nie jest takie proste i zajmuje naprawdę sporo czasu. Chłodziarka kriogeniczna wykorzystuje rzadki izotop helu  $^3\text{He}$ . Umieszczona jest ona w kriostacie wypełnionym pospolitym izotopem skroplonym helem ( $^4\text{He}$ ). Wewnątrz kriostatu znajduje się elektromagnes. Wykonany jest on z materiału nadprzewodnikowego. Dzięki temu można w nim wytworzyć pole magnetyczne o indukcji dochodzącej do ok. 15 T, przy

prądzie zasilania wynoszącym 100 A. W odróżnieniu od helu  $^4\text{He}$ , właściwości fizyczne helu  $^3\text{He}$  pozwalają uzyskać temperaturę ok. 0,3 K, obniżając ciśnienie jego par.

W tak niskiej temperaturze rezystancja próbki w kierunku prostopadłym do przepływu prądu przyjmuje skwantowane wartości, wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego. Dysponując dość silnym polem magnetycznym, a takie możemy wytworzyć dzięki elektromagnesowi nadprzewodnikowemu, jesteśmy w stanie spowodować, że wartość rezystancji nie będzie zależna od wartości prądu, temperatury czy też indukcji pola w obszarze jednego skwantowanego stopnia, na charakterystyce zmian rezystancji pod wpływem pola magnetycznego. Wartość rezystancji będzie zależała jedynie od stałej von Klitzinga, która w zasadzie definiuje nam wartość rezystancji w tym wzorcu i od numeru stopnia (tzw. plateau). Rezystancja przyjmująca stałą von Klitzinga ma numer stopnia wynoszący 1 i jest ona osiągana przy indukcjach wyższych niż w elektromagnesie, który posiadamy. Kolejne wartości rezystancji na stopniach plateau są 2, 3, 4... itd. razy mniejsze od wartości stałej von Klitzinga. Ta stała z kolei wynika z dwóch stałych fizycznych – podstawowych: stałej ładunku elementarnego (czyli ładunku elektronu) i stałej Plancka. Stałe konwencjonalne są zatwierdzone przez CODATA i uznawane od 1990 roku, jako wzorcowa wartość rezystancji.

**– Czy wszędzie na świecie wzorzec wygląda tak samo?**

– Zasada działania wzorca jest wszędzie taka sama, a wszystkie zagraniczne NMI – by odtwarzać jednostkę rezystancji – korzystają z tego samego zjawiska.

**– Kiedy na świecie zaczęto realizować kwantowy wzorzec rezystancji?**

– W 1985 roku za wyjaśnienie efektu kwantowego i jego znaczenia dla pomiarów von Klitzing dostał nagrodę Nobla. Natomiast w 1990 roku uznano, że jest to najlepsza reprezentacja oma, czyli jednostki rezystancji i rekomenduje się wdrażanie tego rozwiązania. Bo om to jeden volt przez jeden amper. Z tym, że wzorzec odtwarza ściśle określone wartości rezystancji, w zaokrągleniu: 6,5 k $\Omega$ , 13 k $\Omega$ , 26 k $\Omega$ . W takiej sytuacji mówimy o reprezentowaniu jednostki przez wielokrotność.

W GUM stanowisko zostało zbudowane na przełomie 2005 i 2006 roku, następnie przez kilka lat prowadzone były na nim badania. Potrzebne były również porównania międzynarodowe w dziedzinie rezystancji. Takie porównania odbyły się z BIPM, a kluczowe i dodatkowe z EURAMET. Po 10 latach, w 2016 roku udało nam się podpisać dokument potwierdzający wartość naszego wzorca.



### – A więc stosunkowo niedawno...

– Tak, ale dzięki wielokrotnym porównaniom mamy bardzo dobrze udokumentowane możliwości pomiarowe.

### – I również w 2016 roku wzorzec ten został wzorcem państwowym?

– Tak. Kiedyś wzorcem była grupa rezystorów, które nadal są w laboratorium i wykorzystuje się je do badań.

### – W jakich sytuacjach?

– Wtedy, kiedy konieczne jest wzorcowanie naszych rezystorów odniesienia. W zasadzie nigdzie na świecie, poza porównaniami, przy pomocy tego wzorca nie prowadzi się pomiarów dla klienta. Po pierwsze jest to bardzo kosztowne. Żeby użytkować wzorzec, musimy mieć ok. 350 l skroplonych gazów: helu i azotu. Przy cenie 30–40 zł za litr helu, robi się z tego pokaźna kwota. Grupa rezystorów stanowi nadal wzorzec wysokiej jakości, zapewniając spójność pomiarową i gwarancję dokładności sprzętu. Rezystory służą też do tego, żeby wykonywać wzorcowania dla laboratoriów w Głównym Urzędzie Miar i w okręgowych urzędach miar. W naszej Pracowni skupiamy się na przyrządach, które służą do pomiarów najwyższego rzędu. Oprócz urzędów miar zgłaszają je instytuty badawcze, przemysł wydobywczy, lotniczy, wojsko.

### – A z zagranicy?

– Zdarzają się również klienci zagraniczni, głównie z państw sąsiadujących z Polską, na przykład z Litwy. Bywają też zapytania z zagranicy, ale niektóre usługi dla klientów spoza Polski są wykonywane w okręgowych urzędach miar. Chcą oni bowiem poddawać badaniu przyrządy niższego rzędu.

Pracownia Wzorców Wielkości Elektrycznych osiąga w swoich pomiarach wskaźnik niepewności na wysokim poziomie (jednym z lepszych na świecie), deklarowanym w CMC. W całym zakresie rezystancji (a więc od 10  $\mu\Omega$  aż do 100 T $\Omega$ ) jesteśmy w ścisłej czołówce. Dzięki temu klienci, płacąc relatywnie niewielkie pieniądze, są w stanie uzyskać wzorcowanie doskonałej jakości.

### – Czy przedstawiciele polskiego przemysłu oddają swoje przyrządy do sprawdzenia w GUM?

– Tak jak wspomniałem, mamy wielu klientów także z tego sektora. Pomiarów elektrycznych są często wykorzystywane w przemyśle. Nierzadko występuje przetwarzanie różnych wielkości fizycznych na wielkości elektryczne,

niekoniecznie na rezystancję, często na napięcie. Dzisiaj mamy możliwości cyfrowego przetwarzania sygnałów elektrycznych, np. w samochodzie mamy urządzenie (sondę lambda), które przetwarza napięcie i informuje, jaka jest zawartość tlenu w spalinach. Pojazd ma czujniki oparte o wielkości elektryczne. Z każdym rokiem tych czujników jest coraz więcej w naszych samochodach.

### – I czasem ta elektronika jest zawodna.

– Tak, ale też elektronika niejednokrotnie ratuje nam samochód. Na przykład, kiedy zapala się jakaś kontrolka informująca o problemach w silniku, czy w innym elemencie pojazdu. Żeby spełnić wymogi dotyczące poziomu emisji spalin, nasze pomiary muszą być coraz dokładniejsze. Nie da się ukryć, że mechanizmy elektroniczne są coraz bardziej skomplikowane, stąd czasem ich zawodność. Prostsze układy elektroniczne są łatwiejsze w konserwacji, ale z drugiej strony przeważnie posiadają mniejszą dokładność.

### – Jakie elementy państwowego wzorca jednostki miary rezystancji wymagają szczególnych zabiegów konserwacyjnych, a może systematycznej wymiany?

– Jeśli chodzi o przygotowanie wzorca do pracy, to za każdym razem musimy przez kilkadziesiąt godzin odpompowywać wszystkie elementy, które wymagają pracy w próżni. W tym czasie kontrolujemy jeszcze miernik próżni, który tu się znajduje. To samo dotyczy linii transferowych do przelewania kriociecz (tzw. lewarów helowych i azotowych). Urządzenie umożliwiające pracę wzorca to zbiornik, który nazywa się naczyniem Dewara i jest rodzajem termosu. Znajdują się w nim kriociecz, takie jak skroplony azot i hel. W stosunku do tego urządzenia są pewne wytyczne: trzeba mierzyć odpowiednim prądem; jeżeli będziemy mierzyć prądem większym niż 100  $\mu\text{A}$ , to nie uzyskamy satysfakcjonującego skwantowania rezystancji i będziemy musieli ogrzać próbkę z powrotem do temperatury będącej w pomieszczeniu. To błąd, wprawdzie odwracalny, ale jego popełnienie powoduje, że trzeba pomiar zaczynać od początku. Często też trzeba zostawiać uruchomione urządzenia na noc. Wszystkie procesy, które odbywają się w czasie pomiaru, są powolne. Przykładowo schłodzenie wnętrza kriostatu do temperatury wrzenia helu trwa kilka godzin.

### – Ile przeciętnie trwa taki pomiar?

– Zwykle, jeśli zaczynamy schładzanie w poniedziałek, to kończymy w środę. Następnie wykonujemy pomiary do końca tygodnia z tym, że każdego dnia trzeba powtarzać proces skraplania helu  $^3\text{He}$ , którego pary zostały

wcześniej odpompowane w procesie uzyskania temperatury poniżej 1 K. Gdyby pracownia dysponowała liczniejszą kadrą i możliwa byłaby praca na dwie zmiany, to wykonywalibyśmy ją szybciej i można byłoby przeprowadzić więcej pomiarów.

**– Czy proces może trwać bez udziału osoby nadzorującej?**

– Nie do końca. Zostawiamy to w takim stanie, żeby bezpiecznie rozpocząć pracę następnego dnia. Musimy dokładnie sprawdzić ciśnienie. Często, kiedy zmienia się temperatura, trzeba też wyregulować ciśnienie. Jest to dość żmudny proces. Samo uzyskanie temperatury 0,3 Kelwina pozwala nam na ok. 24-godzinny czas utrzymania temperatury. Często wygląda to tak, że kiedy ok. 17:00–18:00 wystąpiła pożądana przez nas temperatura, to wykonujemy pomiar do 20:00, idziemy do domu i poprzyjściurano możemy jeszcze przez kilka godzin korzystać z tej temperatury. Niestety, od południa znowu trzeba powtórzyć proces i uzyskanie tej samej temperatury trwa ponownie kilka godzin.

**– Czy warunki, w jakich wzorzec pracuje, są odpowiednie? Czy może przydałoby się nowe pomieszczenie, albo jakieś udoskonalenia w istniejącym?**

– Warunki są bardzo dobre. Jak widać, pomieszczenie, w którym się znajdujemy, jest ekranowane, klimatyzowane, z podniesioną podłogą, oświetleniem LED (żeby za mocno nie grzało), odpowiednim przepływem powietrza. Napięcie jest podtrzymywane przez zasilacz UPS. Drgania, które są wytwarzane podczas pracy wzorca, są niewielkie i nie zaburzają pracy. Poza tym wykonujemy pomiary, siedząc przy biurkach i komputerach, które są podłączone do tego stanowiska. Czyli pomiar odbywa się w zamkniętym pomieszczeniu, a sterowanie jest z innego pokoju.

**– Podobno w planie jest modernizacja stanowiska współpracującego ze wzorcem państwowym do wzorcowania rezystorów wysokoomowych.**

– To projekt, który realizujemy z Politechniką Wrocławską i Politechniką Śląską. Pozwala to nam wykonywać wysokiej jakości pomiary wysokich wartości rezystancji – powyżej 100 k $\Omega$  – które są spójne z naszym wzorcem. Dzięki zastosowaniu transferów Hamona, mostków prądu stałego z aktywnymi ramionami i komparatora rezystancji, uzyskujemy niską niepewność pomiarów i spójność z wzorcem pierwotnym, jakim jest omawiany wcześniej państwowy wzorzec rezystancji. Jego działanie zostało potwierdzone z istoty zjawiska fizycznego.