



Kraków, 13 grudnia 2018

## ***Od podłóg katedr po układy tranzystorowe: wspaniały potencjał generatywny trójkąta Sierpińskiego***

*Jeden tranzystor, zaledwie parę cewek i kondensatorów. Nawet tak prosty układ elektroniczny może stać się oscylatorem o zaskakującym bogactwie zachowań. Struktura połączeń układu powinna jednak mieć budowę fraktalną i... cechować się pewnymi niedoskonałościami. Czy podobne reguły mogłyby wyjaśniać różnorodność i złożoność reakcji ludzkiego mózgu?*

Intuicja podpowiada, że samopodobieństwo pojawia się tylko w układach o tak ogromnej złożoności jak sieci neuronowe w mózgu, czy też w fascynujących bogactwem kształtów przyrody, jak w słynnych kwiatostanach brokułów Romanesco. W Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, przy udziale partnerów z włoskich uniwersytetów w Katanii i Trydencie, dokonano odkrycia, które w pewnych aspektach podważa to przekonanie. Naukowcy skonstruowali elementarny oscylator elektroniczny z zaledwie jednym tranzystorem. Jak się okazuje, nawet tak prosty układ, jeśli zawiera cewki indukcyjne i kondensatory połączone w strukturę o cechach fraktalnych, generuje sygnały elektryczne o zadziwiająco bogatej charakterystyce.

Zazwyczaj nie zwracamy uwagi, jak wiele obiektów w naszym otoczeniu wygląda podobnie niezależnie od tego, z jak daleka czy bliska im się przyglądamy. Całość czasami jest podobna do swych części! Ta niezwykła cecha, znana jako samopodobieństwo, to wyróżnik matematycznych fraktali. Samopodobieństwo nie jest domeną wyłącznie matematyki. Widać je w kształtach chmur, liniach wybrzeży, w budowie roślin czy nawet w nas samych. Fraktalne kształty mają nasze oskrzela i naczynia krwionośne, a w mniejszej skali widać je w dendrytach czy w sieciach połączeń między neuronami w mózgu.

Dlaczego fraktale są wszechobecne? Pytanie to już długo nurtuje naukowców, lecz dopiero od niedawna doczekało się zainteresowania ze strony inżynierów, starających się wykorzystać samopodobieństwo do zagęszczania obwodów elektrycznych. Próbuje się w ten sposób miniaturyzować m.in. anteny. Możliwe jest także tworzenie innych prostych obwodów fraktalnych, na przykład poprzez odpowiednie łączenie cewek i kondensatorów. Niezależnie od swych rozmiarów, układy tego typu zawsze miałyby samopodobny kształt – i ciekawe właściwości. Dotychczas jednak nikt nie testował, jak takie fraktalne obwody sprawdząby się w oscylatorze.

„Nasze najnowsze badania rozpoczęliśmy od ekstremalnie prostego układu, który odkryliśmy rok wcześniej. To naprawdę maleństwo: składa się zaledwie z jednego tranzystora, dwóch cewek, jednego kondensatora i jednego opornika. Mimo to, w zależności od geometrii połączeń i parametrów cewek i kondensatorów, układ wykazuje różnorodną, niekiedy bardzo złożoną

aktywność. Zastanawialiśmy się więc, co by się stało, gdybyśmy zaczęli zastępować poszczególne cewki coraz mniejszymi, samopodobnymi obwodami”, mówi dr hab. Ludovico Minati (IFJ PAN), główny autor publikacji w renomowanym czasopiśmie naukowym „Chaos”.

Przy generowaniu fraktali korzysta się z wielu algorytmów. Jeden z najprostszych zaczyna się od wykreślenia trójkąta, a następnie połączenia środków jego boków. Powstają tak cztery mniejsze trójkąty: trzy przy wierzchołkach i jeden pośrodku. Trójkąt w środku należy zignorować, a w pozostałych trójkątach powtarza się całą procedurę. Odpowiednio duża liczba iteracji prowadzi do uformowania trójkąta Sierpińskiego, fraktala nazwanego w ten sposób na cześć polskiego matematyka, który badał jego właściwości. W rzeczywistości trójkąt Sierpińskiego był jednak znany wcześniej: już średniowieczni artyści Marmorari Romani stosowali go jako element dekoracyjny na posadzkach kościołów w rejonie Lacjum (środkowe Włochy).

Zaintrygowani pomysłem przekształcenia analizowanego obwodu we fraktal, naukowcy z Krakowa postanowili wkomponować w niego kolejne i kolejne struktury, wedle wzorca charakterystycznego dla trójkąta Sierpińskiego, tyle że wykonane z cewek i kondensatorów. I tu czekała na nich niespodzianka. Choć obwody do testów laboratoryjnych wykonano z najwyższą precyzją, ich schematy zachowań nie wykazywały poziomu złożoności i piękna przewidywanego przez symulacje komputerowe!

Gdy bada się wykonane z cewek proste obwody o strukturze trójkąta, generowane przez nie sygnały nie wydają się specjalnie złożone. Po rozbudowaniu pierwotnego trójkąta o kolejne iteracje z cewek i łączących je kondensatorów, zwiększa się głębokość fraktala. Sygnały stają się szybko tak skomplikowane, że w pewnym momencie ich opis wymaga użycia aż dziesięciu wymiarów! Gdy jednak struktury zbadane za pomocą symulacji numerycznych próbuje się przekształcić w prawdziwe obwody, rezultat rozczarowuje: bogactwo dynamiki prawdziwego układu jest sporo mniejsze od oczekiwanego, zmniejsza się też liczba wymiarów niezbędnych do jego opisu. Efekt ten jest konsekwencją faktu, że rzeczywiste elementy obwodu nigdy nie są idealne, co prowadzi do swobodnego „rozmycia” fraktala.

„Na początku byliśmy tym odkryciem po prostu rozczarowani. Dopiero po pewnym czasie zrozumieliśmy, że mamy do czynienia z interesującym zjawiskiem, którego istnienia pierwotnie po prostu nie byliśmy świadomi. Kluczem do usunięcia zaburzeń powstałych wskutek niedoskonałości rzeczywistych elementów okazały się bowiem nie próby poprawienia fraktalnej struktury, lecz... jej uszkodzenie!”, mówi dr Minati, nadal sprawiając wrażenie nieco zaskoczonego.

Piękno tkwi w niedoskonałości. Frazę tę nierzadko słychać z ust artystów, a najnowsze badania fizyków z IFJ PAN zdają się ją wzmacniać. Eksperymentalnie stwierdzono bowiem, że fraktalne oscylatory elektroniczne przejawiają bardziej złożone rezonanse, gdy ich struktura zostanie nieznacznie zaburzona, na przykład poprzez usunięcie części obwodu lub wprowadzenie nowego połączenia. Rezonanse podobne do tak otrzymywanych zwykle pojawiają się po losowym przetasowaniu wszystkich elementów obwodu. W rzeczywistych, fizycznie istniejących układach elektronicznych, pozwoliły odtworzyć całe bogactwo zachowań, które wcześniej wydawało się bezpowrotnie stracone wskutek nieco niższej jakości rzeczywistych elementów elektronicznych.

„Perfekcja to domena matematyki, nie biologii czy fizyki. Większość fraktali widocznych w naturze wcale nie jest perfekcyjna, co zazwyczaj odbieramy jako oczywistą wadę. Tymczasem nasze rozumienie roli tych niedoskonałości może być najzwyczajniej bardzo ograniczone”, zauważa prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

Z badań krakowskich fizyków wynika, że w prostych, fraktalnych oscylatorach elektronicznych niedoskonałości w strukturze połączeń radykalnie zwiększają dynamikę zachowań. Spostrzeżenie to prowokuje do pewnych spekulacji związanych z budową i funkcjonowaniem ludzkiego mózgu.

„Możemy skłaniać się ku przekonaniu, że niedoskonałości w sieci połączeń między neuronami powstały przypadkowo w trakcie odtwarzania jakiejś domyślnie perfekcyjnej struktury. Lecz w rzeczywistości prawdopodobnie tak nie jest. Ich obecność może służyć konkretnemu celowi i być

wręcz wynikiem długotrwałej selekcji naturalnej. Sieci neuronowe z wadami będą bowiem przejawiały większe bogactwo zachowań! Kto więc wie, czy zainspirowani tą obserwacją nie zaczniemy pewnego dnia produkować komputerów, które rozmyślnie nie będą doskonałe?”, podsumowuje prof. Drożdż.

Instytut Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie zajmuje się strukturą materii i własnościami oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość” o statusie Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017. Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. W klasyfikacji MNiSW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

#### **KONTAKT:**

dr hab. **Ludovico Minati**  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk  
tel.: +48 12 6628241  
email: [ludovico.minati@ifj.edu.pl](mailto:ludovico.minati@ifj.edu.pl)

prof. dr hab. **Stanisław Drożdż**  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk  
tel: +48 12 6628220  
email: [stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl](mailto:stanislaw.drozdz@ifj.edu.pl)

#### **PUBLIKACJE NAUKOWE:**

1. „High-dimensional dynamics in a single-transistor oscillator containing Feynman-Sierpiński resonators: Effect of fractal depth and irregularity”  
L. Minati, M. Frasca, G. Giustolisi, P. Oświęcimka, S. Drożdż, L. Ricci  
Chaos 28, 093112 (2018)  
DOI: 10.1063/1.5047481

#### **POWIĄZANE STRONY WWW:**

<http://www.ifj.edu.pl/>  
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>  
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

#### **MATERIAŁY GRAFICZNE:**

**IFJ181213b\_fot01s.jpg** HR: [http://press.ifj.edu.pl/news/2018/12/13/IFJ181213b\\_fot01.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2018/12/13/IFJ181213b_fot01.jpg)  
Trzy iteracje prostych elektronicznych oscylatorów na tle trójkąta Sierpińskiego. (Źródło: IFJ PAN)

**IFJ181213b\_fot02s.jpg** HR: [http://press.ifj.edu.pl/news/2018/12/13/IFJ181213b\\_fot02.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2018/12/13/IFJ181213b_fot02.jpg)  
Rzeczywiste oscylatory elektroniczne zwiększają dynamikę zachowań dzięki niedoskonałościom w strukturze fraktalnych połączeń. (Źródło: IFJ PAN)

**IFJ181213b\_fot03s.jpg** HR: [http://press.ifj.edu.pl/news/2018/12/13/IFJ181213b\\_fot03.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2018/12/13/IFJ181213b_fot03.jpg)  
Trzy iteracje prostych elektronicznych oscylatorów na tle trójkąta Sierpińskiego. (Źródło: IFJ PAN)