

*Adam Fedyniuk*

Kogni\_LAB  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
w Toruniu

Kogni\_LAB  
Nicolaus Copernicus University  
in Toruń

**TRANSDZIEDZINOWE ASPEKTY  
STRUKTUR MODULARNYCH  
O APLIKACJI MODULARYZACJI W RAMACH  
INŻYNIERII WIEDZY I KOGNITYWISTYKI\***

**Trans-Domain Aspects of Modular Structures  
Applying Modularization in Knowledge Engineering  
and Cognitive Science**

Słowa kluczowe: metamodelowanie, modularność, inżynieria wiedzy, konektomika, proteomika, centralność, teoria sieci, ontologie, interdyscyplinarność.

Key words: metamodeling, modularity, knowledge engineering, connectomics, proteomics, centrality, network theory, ontologies, interdisciplinarity.

Streszczenie

Zastosowanie struktury modularnej w ramach różnych rozwiązań: tak inżynierskich, jak i teoretycznych niesie ze sobą pewne ograniczenia. Problemy te są bardzo widoczne w obrębie dyskursu na temat projektowania modularnych ontologii oraz wdrażania technologii *Semantic Web*. Pomimo szerokiego zakresu problemów związanych z aplikacją modularności w inżynierii wiedzy, istnieje wciąż niewyczerpane źródło innowacji oraz nowoczesnych inspiracji dla przezwycięzania problemów z metamodelowaniem,

Abstract

The application of modular structure in the context of various solutions, both engineering and theoretical, possesses certain limitations. The problems that arise are very salient amidst the discourse concerning the design of modular ontologies and implementation of *Semantic Web* technologies. Despite a wide array of obstacles related to aptly used modularity in knowledge engineering, there is still a never-ending source of inspiration for the solutions concerning metamodeling, designing and hybridizing

---

\* Tekst w swojej pierwszej wersji był prezentowany na seminarium Filozofia Kognitywistyki w Instytucie Filozofii i Socjologii Państwowej Akademii Nauk. Naniesiono precyzacje terminologiczne, uaktualnienia i korekty językowe.

projektowaniem oraz hybrydyzacją systemów reprezentacji wiedzy. Inspirowanie się naturalnymi przejawami struktur modularnych może stanowić źródło wielu innowacji oraz podłoże do opracowania nowych podejść tak w dziedzinie inżynierii wiedzy, jak kognitywistyki. Z uwagi na nawiązanie do obliczeniowego charakteru struktur modularnych obecnych w rozmaitych dziedzinach o charakterze interdyscyplinarnym, można dotrzeć do konkluzji, że pewne obserwowalne prawidłowości związane z organizacją sieci (np. stopniami i rodzajami centralności) są w istocie transdziedzinowe (tzn. wykraczają poza dziedzinę, w której zostały pierwotnie zastosowane, mają potencjał do wykorzystania w innej dziedzinie badającej struktury relacyjne różnego rodzaju) bądź przynajmniej mają charakter projekcyjny w odniesieniu do metamodelowania ontologii.

knowledge representation systems. Being inspired by natural occurrences of modular structures can be a potent source of innovation and a foundation for developing new approaches both in the domain of knowledge engineering and cognitive science. Due to reference to the computational character of the modular structures present in various domains that are deemed interdisciplinary, one can arrive at the conclusion that certain observed regularities connected with network organisation (i.e., centrality types and measures) are in fact trans-domain (they go beyond their respective domain and have application in a different domain that concerns itself with studying relational structures of various forms) or they possess at least the projectional character in regard to ontology metamodeling.

## Wprowadzenie

Niniejszy tekst przybliży temat modularności w perspektywie wybranych dziedzin rozważań, posiłkując się najczęściej definicją modułu wykorzystywaną w teorii sieci. Przedstawione przykłady realizacji modularności bądź możliwej jej implementacji nakreślają kierunek rozważań pozwalający na rozważenie inspiracji, podejść oraz aplikacji narzędzi zapożyczonych z innych, częściowo pokrewnych dziedzin. Dotyczy to przykładowo proteomiki, inżynierii wiedzy, konektomiki i innych, gdzie pojęcie sieci (bądź wizualizacji elementów dziedziny rozważań poprzez struktury relacyjne) jest wykorzystywane. Przedstawione w tym artykule aspekty różnych struktur, bytów czy złożonych form są ukazane z uwagi na jedno wspólne konceptualne źródło – przejawy prób ustrukturyzowania relacji oraz kategoryzacji bytów, obecnej już w drzewie Porfiriusza, a idąc dalej – przez zwiększenie swej złożoności oraz odnosząc się do coraz większej skuteczności w odciążaniu człowieka w kwestii procesów wnioskowania (jak *Ars Magna* Ramona Llulla)<sup>1</sup>. Ta filozoficzna linia rozważań stanowi podstawę do ukierun-

<sup>1</sup> L. Badia, A. Bonner, A. Soler, *Who was Ramon Llull?*, Centre de Documentacio Ramon Llull, [online] <[http://quiseestlullus.narpan.net/eng/713\\_arbre\\_eng.html](http://quiseestlullus.narpan.net/eng/713_arbre_eng.html)>.

kowania i zastosowania przedstawionych aspektów modularności w ramach refleksji w filozofii inżynierii<sup>2</sup>. Przyjętym punktem wyjścia jest tutaj struktura relacyjna, która w dzisiejszych czasach przez rozwój nauki przyjmować może różne formy – wizualizacji za pomocą grafów, sieci, schematów i innych. Ale także posiadających różne własności – tak w ujęciu statycznym (czy strukturalnym) jak i dynamicznym. Nie jest to jedyny sposób ujęcia tego tematu<sup>3</sup>. Wybór zagadnień nie jest przypadkowy, ponieważ stosowane narzędzia badawcze i aparat pojęciowy między dziedzinami korzystającymi z teorii sieci, grafów czy analizy sieci społecznych stanowią wzajemnie napędzający się obszar rozwoju analizy dynamiki przepływu informacji, zmienności relacji oraz aspektów strukturalnych przedmiotów badań poszczególnych z wymienionych powyżej dziedzin<sup>4</sup>.

## Teoria sieci i jej obecność w różnych dziedzinach rozważań

Przy obecnym poziomie technologicznym interakcję rzeczy w obrębie aktywności ludzkiej możemy wyrażać i wizualizować za pomocą sieci. Istnieją różne sposoby na przedstawienie tych interakcji – czy to poprzez utworzenie grafu, czy macierzy wyrażającej ilość relacji międzyosobowych<sup>5</sup>. Dzięki temu możemy tworzyć modele statystyczne dla interakcji w sferze społecznej. Wiedza może być wizualizowana za pomocą map (zarówno *concept mapping*, jak i *mind mapping*) czy sieci relacji (wizualizacja ontologii dziedzinowych)<sup>6</sup>. Wizualizacja jest tutaj rozumiana jako np. schemat interakcji, kategoryzacja obiektów dzie-

---

<sup>2</sup> Egzemplifikacja tematyczna filozofii inżynierii m.in. w: K. Guy (red.), *Philosophy of Engineering*, vol. 1–2, The Royal Academy of Engineering 2010.

<sup>3</sup> Inne ujęcia modularności, przykładowo odnoszą się do logiki (tu w inżynierii wiedzy): B. C. Grau, I. Horrocks, Y. Kazakov, U. Sattler, *A Logical Framework for Modularity of Ontologies*, IJCAI 2007, s. 298–303.

<sup>4</sup> Przykładem może tutaj być wykorzystanie narzędzi analizy sieci w konektomicie: O. Sporns, *The Human Connectome: A Complex Network*, “Annals of the New York Academy of Sciences” 2011, nr 1224(1), s. 109–125.

<sup>5</sup> Rozważania na temat zasięgu wizualizacji interakcji za pomocą grafu znaleźć można w: F. B. Viégas, J. Donath, *Social Network Visualization: Can We Go beyond the Graph*, “Workshop on Social Networks” (CSCW) 2004, t. 4, s. 6–10.

<sup>6</sup> S. O. Tergan, T. Keller (red.), *Knowledge and Information Visualization: Searching for Synergies*. Springer 2005, t. 3426; A. Katifori, C. Halatsis, G. Lepouras, C. Vassilakis, E. Giannopoulou, *Ontology Visualization Methods – A Survey*, “ACM Computing Surveys” (CSUR) 2007, nr 39(4), 10.

dziny bądź podstawa do sformułowania ontologii dziedziny obiektów wchodzących w skład internetu rzeczy<sup>7</sup>.

Rozwijające się gałęzie przemysłu IT spowodowały, że pojęcie internetu rzeczy (IoT – *internet of things*) coraz częściej określa zakres tych relacji w ramach wykorzystywania nowoczesnych technologii bądź tworzenia projektów nawiązujących do IoT<sup>8</sup>. Ilustrując to przykładem, weźmy pod uwagę człowieka, który posiada telefon, komputer, tablet z funkcją *cloud storage*, która umożliwia dostęp do wybranych tych samych danych na wszystkich wymienionych urządzeniach. Do tego „inteligentne” (choć to pewnego rodzaju kłopotliwe określenie z uwagi na nieostrą definicję inteligencji w przypadku zastosowania w marketingu) telewizory, pralki, zmywarki – wszystkie te urządzenia mogą wchodzić w interakcję, zaliczając się do pewnej pobieżnej bądź częściowo zrealizowanej formy IoT. Mianowicie, w ramach technologii nawiązujących do internetu rzeczy mamy do czynienia z interakcjami w obrębie konkretnej architektury (często zwanej chmurą)<sup>9</sup>. Warto podkreślić, że ujęcie sieciowe internetu rzeczy może dotyczyć kwestii komunikacji w obrębie technologii informatycznych, ale także można to traktować jako konceptualizację zakresu relacji między różnymi instytucjami (w rozumieniu socjologicznym) i usługami<sup>10</sup>. Możliwe jest też stworzenie ontologii dziedzinowej wizualizującej interakcje między różnymi typami urządzeń czy usług bądź ontologii wspomagającej realizację IoT jako swobodną formę *middleware*<sup>11</sup>.

Rosnąca złożoność wspomnianych interakcji idzie także w innym kierunku. Nie tylko otaczamy się rzeczami, które wymieniają dane, ale również odkrywamy rozmaite relacje w obrębie neurologii, proteomiki, genetyki. Udoskonalamy narzędzia pozwalające mierzyć dotąd niezbadane wartości struktur relacyjnych. Pośród nich znaleźć możemy takie układy struktur, które obecne są na różnych poziomach rozważań

---

<sup>7</sup> Jest to szerokie ujęcie IoT, które ma nakreślać możliwość sformułowania dziedziny m.in. dla technologii reprezentacji wiedzy, ale także np. w ramach badań na pograniczu nauk społecznych. Zob. A.M. Oberlaender, M. Roeglinger, M. Rosemann, A. Kees, *Conceptualising Business-to-Thing Interactions – A Sociomaterial Perspective on the Internet of Things*, “European Journal of Information Systems” 2017.

<sup>8</sup> M. Keerthana, S. Ashika Parveen, *Internet of Things*, “International Journal of Advanced Research Methodology in Engineering and Technology” 2017, nr 1(2).

<sup>9</sup> Podział architektur oraz sposoby realizacji można znaleźć w: Q. Zhang, L. Cheng, R. Boutaba, *Cloud Computing: State-of-the-Art and Research Challenges*, “Journal of Internet Services and Applications” 2010, nr 1(1), s. 7–18.

<sup>10</sup> A. M. Oberlaender, M. Roeglinger, M. Rosemann, A. Kees, op. cit.

<sup>11</sup> S. Hachem, T. Teixeira, V. Issarny, *Ontologies for the internet of things*, (w:) *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Middleware Doctoral Symposium*, ACM 2011.

i w wielu dziedzinach. Modularność jest jedną z nich. Istnieją różne argumenty i kryteria przydatności stosowania takiej konfiguracji w środowisku naturalnym i w np. inżynierii. W związku z tematyką tego tekstu jednak najważniejszy pozostaje fakt, że modularność rozumiana z perspektywy teorii sieci obecna jest w obu przypadkach.

Definicja tej odsłony modularności określa moduł jako zbiór wierzchołków w danym grafie bądź sieci, posiadających więcej połączeń między sobą niż z jakąkolwiek inną częścią owej struktury. W tym przypadku stopniowość kryteriów na określenie danego zbioru jako modułu stanowi problem dla tego rodzaju rozumienia modularności. Pomimo to dziedziny posługujące się teorią sieci, wizualizacjami sieci i układami relacji wytworzyły rozmaite narzędzia oraz kryteria pomagające przy wyborze istotnych form modularności, np. poprzez modyfikację bądź uszczegółowienie tego podstawowego kryterium. Metody te znalazły swoje zastosowanie zarówno w przypadku wytworów człowieka, jak i zjawisk społecznych czy organizacji bytów biologicznych.

Analizując przejawy modularności w naturze, zauważyć można, że wiele struktur tego typu jest możliwych do zaobserwowania nawet na poziomie molekularnym. Z uwagi na tematykę, przedstawione teorie i zagadnienia będą miały związek z podejściem inżynierskim do kwestii modularności. Mówiąc ściślej, przedstawiając przykłady modularności w naturze, będę się posługiwał teoriami i koncepcjami związanymi z proteomiką, stereoizomerią i biologią systemową. Wybór tych dziedzin związany jest z wyjątkowymi cechami odkryć, które pozwoliły na rozwinięcie się takich dyscyplin jak bioinformatyka. Cechy, o których tu mowa, zazwyczaj wykraczają poza przewidywania przyjętych metodologii w ramach różnych odsłon inżynierii czy informatyki. Przykładem może być częste przyjmowanie przez dany zaprojektowany system heurystyki „dziel i rządź” w wypadku zastosowania modularnej architektury<sup>12</sup>.

## **Biokomputacja i inspiracje organizacją bytów biologicznych**

Zainteresowanie pograniczem informatyki i biologii zawdzięczać można m.in. rozwojowi metod sekwencjonowania genomu, który to znacząco przyspieszył przez ostatnie 20 lat. Wraz z następującymi od-

---

<sup>12</sup> F. Azam, *Biologically Inspired Modular Neural Networks*, Blacksburg, Virginia 2000.

kryciami powstało odrębne zagadnienie, które określa się mianem biokomputacji (*biocomputing*). Biokomputacja (albo biologiczna komputacja) dotyczy metod analizy informatycznej tworzącej komputacyjne podstawy dla diagnostyki genetycznej<sup>13</sup>. Mimo że głównym celem projektów naukowych związanych z biokomputacją jest wykorzystanie jej narzędzi w proteomice (poszukiwanie biomarkerów nowotworów), jest ona motorem postępu wielu dziedzin z nią związanych z uwagi na swój interdyscyplinarny charakter (tak jak w przypadku kognitywistyki).

Próbując niejako odwrócić ten proces, zauważalne są starania, aby wykorzystać różnego rodzaju naturalne rozwiązania dla problemów (oczywiście relewantnych z punktu widzenia danej dyscypliny) organizmów żywych. W przypadku analizowania zmian ewolucyjnych w procesie rozwoju życia biologicznego, tym bardziej z perspektywy biologii systemowej oraz proteomiki, łatwo o konkluzję, że natura w istocie jest bardziej inżynierem aniżeli wynalazcą<sup>14</sup>. Odwrotnością biokomputacji w swej idei byłoby właśnie inspirowanie się biologicznymi rozwiązaniami względem problemów danej dziedziny, a w przypadku kognitywistyki można byłoby tu mówić wręcz o naśladownictwie albo (biorąc pod uwagę aspekt inżynierski) emulacji/symulacji.

## Hybrydyzacja – sieci neuronowe a inżynieria wiedzy

Rozważając zagadnienie modularności, można zauważyć, że wyżej wymienione podejścia pokrywają się z możliwością eksploracji zastosowań tak modularności funkcjonalnej, jak i architektonicznej. Przy projektowaniu sztucznych sieci neuronowych posiłkowanie się modularnością pozwoliło na zastosowanie nie tylko struktur modularnych, ale także opracowanie tego rodzaju poprzez budowanie hybrydowych sieci neuronowych<sup>15</sup>. Pojęcie hybrydyzacji jest tutaj rozumiane jako zabieg

---

<sup>13</sup> Zob. [online] <[www.biosino.org/mirror/www.uni-mainz.de/~cfrosch/bc4s/example.html](http://www.biosino.org/mirror/www.uni-mainz.de/~cfrosch/bc4s/example.html)>.

<sup>14</sup> Jest to teza *nature as tinkerer* – opisana m.in. przez F. Jacoba, *Evolution and Tinkering*, "Science" 1977, s. 1161–1166. Postulat ten podtrzymywany jest przez teorię ewolucji molekularnej oraz fakt, że większość białek wyewoluowała od wspólnego przodka, a ich konfiguracje potrafią być bardziej bądź mniej preferowane w danych strukturach w obrębie konkretnych gatunków, co potwierdzają badania związane z *Protein Data Bank* ([www.rcsb.org/pdb/](http://www.rcsb.org/pdb/)).

<sup>15</sup> I. Kollia, G. Simou, G. Stamou, A. Stafylopatis, *Interweaving Knowledge Representation and Adaptive Neural Networks*, National Technical University of Athens, Workshop on Inductive Reasoning and Machine Learning on the Semantic Web 2009.

zaadaptowania tworu pochodzącego z jednej dziedziny badań do potrzeb innej poprzez łączenie funkcjonalności z np. innym narzędziem (Kollia i in. używają tutaj pojęcia „splatanie”). W obrębie zastosowań informatycznych przyjmować może to formę rozwiązań typu *middleware*. Przykładem w obrębie transdziedzinowych koncepcji może być (tutaj działając na pograniczu kognitywistyki i inżynierii wiedzy) zaprojektowanie architektury sztucznego systemu reprezentacji wiedzy pozwalającego na wykorzystanie zasobów ontologii dziedzinowych w badaniach nad sztuczną inteligencją<sup>16</sup>.

Hybrydyzacja sieci neuronowych łączy się często z konwersją typowej architektury typu *black box* (sieć rozumiana jako czarna skrzynka, której procesy przetwarzania danych wejściowych znajdują się poza zdalną kontrolą oraz ingerencją) w system niemonolityczny, choć nie zawsze opierający się w znaczącym funkcjonalnie stopniu o modularność. Wraz ze zmianą architektury oraz funkcji systemu zmienia się także jego zastosowanie. Otwarcie systemu monolitycznego oraz uposażenie go w dodatkowe struktury specjalizujące w danej funkcji pozwalają na przezwyciężenie typowych problemów systemów unitarnych, takich jak brak mocy obliczeniowej, niestabilność bądź zbyt spowolnione przetwarzanie danych czy katastroficzna interferencja<sup>17</sup>. Zmiana architektury pozwala także na osiągnięcie lepszych wyników pracy systemu w znacznie krótszym czasie, co jest rezultatem krótszego procesu uczenia się sieci.

W przypadku mapowania ontologii korzystanie z sieci neuronowych stanowić może podstawę do budowania ontologii modularnych. Niezbędnym elementem połączenia dwóch istniejących ontologii w ontologię modułarną jest bowiem znalezienie między nimi wspólnych elementów (relacji, obiektów, własności). Początkowe projekty sieci IENN (*identical elements neural network*) dały podstawy badawcze do rozwinięcia tej teorii w stronę sieci, które ze względu na swoją architekturę i trening są w stanie dokonywać rozmaitych operacji na ontologiach, których dziedziny zająbiają się w różnym stopniu, a ich wydajność jest porównywalna z konkurencyjnymi systemami tego typu<sup>18</sup>.

---

<sup>16</sup> Ibidem.

<sup>17</sup> Jest to rozległe zapominanie przez daną sieć neuronową wcześniej wyuczonej informacji podczas nabywania nowych. Nazywane też katastroficznym zapominaniem.

<sup>18</sup> Sieci IENN były podstawą dla OMNN – *ontology mapping neural network* – teorii, która przedstawia zarówno architekturę, jak i nietypowe podejście do zastosowania sieci neuronowej zamiast np. pluginów edytorów ontologii. Y. Peng, *Ontology Mapping Neural Network: An Approach to Learning and Inferring Correspondences Among Ontologies*, University of Pittsburgh 2010.

Wykorzystując modułarną architekturę przy projektowaniu sieci neuronowych mapujących ontologie (które także ze względu na swoją strukturę mogą być modułarne bądź podatne na proces modularyzacji), można stworzyć system, który będzie pozwalał na łatwiejszą analizę podatności na modularyzację ontologii, sprawdzenie zakresu, w jakim będzie ona ponownie wykorzystana do reprezentacji danej złożonej dziedziny i czy pozwoli to na zaprojektowanie wszechstronnego systemu (głównie dzięki swojej modularności), który będzie mógł dokonywać takich operacji (o ile dziedziny ontologii będą na to pozwalały) na praktycznie każdej parze ontologii dziedzinowych. Ostatni z postulatów jest długoterminowym celem idei *Semantic Web* i z uwagi na bardzo szybki przyrost zawartości internetu wymaga wieloletnich starań, aby efekty tego rodzaju przedsięwzięć mogłyby być zauważalne.

Sama idea *Semantic Web* jest nie tylko swoistym stanowiskiem, ale przede wszystkim zbiorem standardów dla danych, informacji oraz związanych z nimi operacji (także wytwarzanie i przechowywanie wiedzy)<sup>19</sup>. Definicję tej idei można znaleźć u Tima Bernersa-Lee, tj. „rozwiązanie obecnej sieci, w której informacjom nadane jest dobrze zdefiniowane znaczenie, umożliwiające ludziom i komputerom lepszą pracę w kooperacji”<sup>20</sup>. Proponowane przez Konsorcjum W3C standardy *Semantic Web* dla danych, informacji oraz wiedzy mają działać w sposób pozwalający na integrację obecnych zasobów internetu w owe formaty, a z drugiej strony uczynić bardziej przejrzystym korzystanie z nich przez użytkowników. Odwołując się do narzędzi analizy sieci, technologie Web 2.0 pozwalają na ujęcie zasobów jako rozległej sieci relacji, gdzie użytkownicy także traktowani są jako część struktury<sup>21</sup>. W przypadku *Semantic Web* wspomina się o Web 3.0 – co jest hipotetycznym stanem, w którym zasoby sieci mogą być wykorzystywane do wnioskowania i generowania nowej wiedzy. Można przyjąć (choć istnieją różne dookreślenia i pomysły na realizację Web 3.0), że w przypadku zrealizowania tego przedsięwzięcia sieć stanie się zasobem pozwalającym na realizację rozmaitych form inteligentnego rozumowania (rozumianego

---

<sup>19</sup> Często wspomnianym podziałem w przypadku technologii *Semantic Web* jest propozycja R. Ackoffa w postaci tzw. piramidy bądź hierarchii DIKW (*data, information, knowledge, wisdom*): R.L. Ackoff, *From Data to Wisdom*, „Journal of Applied Systems Analysis” 1989, nr 16(1), s. 3–9.

<sup>20</sup> T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila, *The Semantic Web*, „Scientific American” 2001, nr 284(5), s. 32.

<sup>21</sup> G. Erétéo, M. Buffa, F. Gandon, P. Grohan, M. Leitzelman, P. Sander, *A State of the Art on Social Network Analysis and Its Applications on a Semantic Web*, SDoW 2008.



z perspektywy definicji ról reprezentacji wiedzy w obrębie inżynierii wiedzy).

Wykorzystanie natomiast sztucznych sieci neuronowych w mapowaniu ontologii nie jest co prawda dominującym podejściem ani także najwydajniejszym czy jedynym. Jest to natomiast egzemplifikacją zaębiania się dziedzin w celu rozwiązania pewnego problemu (w tym przypadku mapowania ontologii) na pograniczu dwóch dziedzin badawczych. To połączenie kognitywistyki z inżynierią wiedzy wskazuje na wielość sposobów, na które można rozważać problemy zawartości sztucznych systemów reprezentacji wiedzy. Dodatkowo, w tym przypadku pokazuje to też, w jaki sposób można poszukiwać sposobów na rozwiązanie problemów związanych z modularyzacją ontologii<sup>22</sup>.

Obecność architektury modularnej na wielu poziomach rozważań związanych z dyscyplinami naukowymi, a zwłaszcza tymi, które przyczyniają się do interdyscyplinarnego charakteru kognitywistyki, dają mocne podstawy do prób rozwiązywania problemów inżynierii wiedzy poprzez zastosowanie modularności rozległej. Warto jednak nadmienić, że rozwiązania nawiązujące do tej koncepcji powinny być opatrzone jasno zdefiniowanymi warunkami, aby jak najlepiej wykorzystać jedną z charakterystycznych zalet modularności w tej odsłonie, mianowicie przejrzystość w funkcjonowaniu oraz oszczędność wykorzystywania zasobów systemu.

## **Rozległa modularność systemów opartych na strukturach relacyjnych**

Przejrzystość procesów systemów rozlegle modularnych (w ujęciu sieciowym) wynika z aktywacji tylko niezbędnych do rozwiązania problemu modułów, co pozwala na łatwiejsze prześledzenie procesu w systemie. Oprócz tego, dzięki zastosowaniu różnych narzędzi badających metrykę sieci, możemy tworzyć modele aktywności w obrębie danej struktury bez konieczności przybliżania wyników obliczeń (to zależne jest też od zastosowanych metod). Dodatkowo, jeżeli system jest zhierarchizowany, a na każdym z poziomów także występuje pewna forma modularności (mowa tutaj o rozległości modułów nie tylko w obrębie danego poziomu systemu, inaczej mówiąc – o rozległości w orien-

---

<sup>22</sup> Rozważania na temat mapowania ontologii i potencjału modularyzacji ontologii można znaleźć w: B. C. Grau, I. Horrocks, Y. Kazakov, U. Sattler, op. cit., s. 298–303.

tacji horyzontalnej, ale też o modularności rozległej wertykalnie) można założyć, że taki system będzie przejawiał wysoką sprawność w rozwiązywaniu problemów adaptacyjnych.

Obecność struktur modularnych na różnych poziomach systemu jest obecna także w konstytucji neuronalnej człowieka<sup>23</sup>. Co więcej, okazuje się, że aby lepiej zrozumieć wyjaśnianie struktur modularnych w ramach struktur neuronalnych, tak z perspektywy teoretycznej, jak i empirycznej, warto posłużyć się teorią sieci. W przypadku układu nerwowego nie jest to zabieg nowatorski, jednakże jeżeli rozważać możliwość zastosowania różnego rodzaju narzędzi związanych z analizą sieci, to okaże się, że istnieje wiele rozwiązań<sup>24</sup>. Dotyczy to badań z zakresu konektomiki, gdzie to właśnie narzędzia analizy sieci, topologia, podejście sieciowe oraz teoria grafów znajdują swoje zastosowanie i pozwalają na wytworzenie nowego podejścia do rozumienia zjawisk będących częścią centralnego układu nerwowego człowieka.

Przykładem tej różnorodności jest wykształcenie się konektomiki w ramach teorii kognitywistycznych. Chociaż teza, iż konstytucja neuronalna mózgu ma formę sieci, jest znana od dawna, to interdyscyplinarny charakter badań pozwolił rozszerzyć pole rozważań poprzez skorzystanie z narzędzi innych dziedzin nauki, takich jak informatyka, matematyka, fizyka czy bardziej szczegółowo proteomika, biologia systemowa, biokomputacja, biofizyka.

Warto także zwrócić uwagę na fakt, że dyscypliny mające duży wkład w rozwój konektomiki same często miały charakter interdyscyplinarny, a narzędzia i teorie tych dyscyplin mogły odnaleźć swój odpowiednik w rozważaniach z zakresu innych dziedzin. Dlatego też tak wiele wspólnego mają ze sobą konektomika i proteomika. Przedmioty badań różnią się znacznie – pierwsza odnosi się do kognitywistyki, druga biologii systemowej, pierwsza dotyczy podejścia do badania kon-

---

<sup>23</sup> D.S. Bassett, D.L. Greenfield, A. Meyer-Lindenberg, D.R. Weinberger, S.W. Moore, E.T. Bullmore, *Efficient Physical Embedding of Topologically Complex Information Processing Networks in Brains and Computer Circuits*, "PloS Computer Biology" 2010, t. 6; C.J. Honey, O. Sporns, L. Cammoun, X. Gigandet, J.P. Thiran, R. Meuli, P. Hagmann, *Predicting Human Resting-State Functional Connectivity from Structural Connectivity*, Proceedings of National Academy of Science 2009.

<sup>24</sup> O. Sporns, G. Tononi, R. Kötter, *The Human Connectome: A Structural Description of the Human Brain*, "PLoS Computational Biology" 2005, nr 1(4), e42; E. Bullmore, O. Sporns, *Complex Brain Networks: Graph Theoretical Analysis of Structural and Functional Systems*, "Nature Reviews Neuroscience" 2009, nr 10(3), s. 186–198; O. Sporns, *The Human Connectome: A Complex Network*, "Annals of the New York Academy of Sciences" 2011, nr 1224(1), s. 109–125.

stytucji neuronalnej mózgu, druga zaś funkcjonowania białek i kinaz białkowych. Jednakże metodologia badań w obu przypadkach ma wiele wspólnych cech.

## Miary centralności sieci i jej zastosowanie

Przykładem, który łączy metodologicznie rozważania konektomiki i proteomiki, jest pojęcie centralności. Centralność jest pojęciem matematycznym obecnym w teorii grafów oraz teorii sieci; jest to miara relewantności danego wierzchołka izolowanego w danym grafie<sup>25</sup>. Istnieją różne typy centralności, a każdy z nich przedstawia strukturę danej sieci czy grafu w inny sposób. Konceptualizacja typów centralności była związana z rozwojem społecznej analizy sieci<sup>26</sup>. W przypadku sieci społecznych najczęściej rozważa się cztery rodzaje centralności, a sama centralność w tym przypadku jest miarą istotności członka sieci społecznej. Natomiast całościowo w teorii sieci przyjmuje się siedem głównych typów centralności<sup>27</sup>:

- 1) stopniowa (*degree centrality*),
- 2) bliskości (*closeness centrality*),
- 3) pośrednia (*betweenness centrality*),
- 4) wektora własnego (*eigenvector centrality*),
- 5) Katza (*Katz centrality*),
- 6) perkolacji (*percolation centrality*),
- 7) międzyklikowa (*cross-clique centrality*).

Warto zwrócić uwagę na fakt, że niektóre z typów centralności powstały na potrzeby technologii informacyjnej, jak w przypadku centralności Katza, która jest wykorzystywana przy nadawaniu określonej wartości liczbowej indeksowanym stronom internetowym (to wyznacznik ich jakości) w wyszukiwarce Google przez algorytm PageRank<sup>28</sup>.

---

<sup>25</sup> Wierzchołek izolowany (ang. *vertex*) jest wierzchołkiem niebędącym końcem żadnej krawędzi grafu.

<sup>26</sup> M.E.J. Newman, *Networks: An Introduction*, Oxford University Press 2010.

<sup>27</sup> Oprócz wymienionych siedmiu typów, istnieją także inne, takie jak centralność alfa (bądź też bardziej szczegółowe parametry, jak *outdegree/indegree centrality*, *prestige centrality*, *harmonic centrality*), która nie znalazła się na tej liście, ponieważ jest uogólnieniem centralności wektora własnego, gdzie relewantność węzła w sieci jest uzależniona także od zewnętrznych czynników wpływających na wektory w grafie skierowanym. P. Bonacich, L. Paulette, *Eigenvector-Like Measures of Centrality for Asymmetric Relations*, "Social Networks" 2001, t. 23, s. 191–201.

<sup>28</sup> S.J. Carriere, R. Kazman, *Web Query: Searching and Visualizing the Web through Connectivity*, "Computer Networks and ISDN Systems" 1997, t. 29, s. 1257–1267.

Analiza sieci za pomocą centralności przynosi także pozytywne rezultaty badań w ramach proteomiki oraz kognitywistyki, a w szczególności konektomiki<sup>29</sup>. Rozważania na temat ludzkiego konektomu jako w pewien sposób scentralizowanej sieci prowadzą do konkluzji, że zachowuje on cechy przysługujące systemowi modularnemu. Systemy scentralizowane w przypadku napotkania błędu wymagają stworzenia ścieżek alternatywnych do rozwiązania danego problemu. Badając patologię niektórych chorób mózgu, po wprowadzeniu drastycznych zmian do jego neuronalnej konstytucji widoczne są próby zachowania funkcji poznawczych mimo architektonicznej zmiany (jak w przypadku pacjentów poddanych kalozotomii).

Podobnie, rozważając projektowanie ontologii inspirowanych strukturami biologicznymi, warto mieć na uwadze tego typu zależności, ponieważ metody mierzenia centralności mogą być również wykorzystane do badania (za pomocą narzędzi analizy sieci) struktury ontologii<sup>30</sup>. Jest to możliwe dzięki temu, że pluginy (jak *Graph-Viz* w programie Protege) stosowane do wizualizacji struktury ontologii przedstawiają się jako grafy skierowane.

Przyjmując podejście do projektowania ontologii zakładające inspirowanie strukturami biologicznymi (przy założeniu, że dana ontologia będzie posiadała cechę modularności), możemy wywnioskować, że pewne formy organizacji obecne w przyrodzie stanowią źródło rozmaitych możliwości aplikacji względem struktur sieci, grafów obecnych w wielu dyscyplinach, zwłaszcza tych o charakterze interdyscyplinarnym. Biorąc pod uwagę narzędzia używane do analizy sieci, możemy dotrzeć do konkluzji o modularnym charakterze struktur obecnych na wielu poziomach istnienia (tzn. subkomórkowym, neuronalnym, społecznym itp.), jak też w ramach działania systemów biologicznych oraz wytworzonych sztucznie. Tam, gdzie jest to niemożliwe, możemy dokonać wizualizacji, która pozwoli na modularyzację (jednakże należy wziąć pod uwagę zasadność takiego posunięcia oraz to, jak definiujemy moduł). Skoro różnego rodzaju narzędzia mogą zostać wykorzystane w tych przypadkach, co więcej, dając przy tym wymierne rezultaty w postaci nowej wiedzy dotyczącej działania tych struktur, można stwierdzić, że

---

<sup>29</sup> F. Cheng, P. Jia, Q. Wang, Z. Zhao, *Quantitative Network Mapping of the Human Kinome Interactome Reveals New Clues for Rational Kinase Inhibitor Discovery and Individualized Cancer Therapy*, "Oncotarget" 2014, t. 15; X.N. Zuo, R. Ehmke, M. Mennes, O. Imperati, F.X. Castellanos, O. Sporns, M.P. Milham, *Network Centrality in the Human Functional Connectome*, *Cerebral Cortex* 2012, t. 22, s. 1862–1875.

<sup>30</sup> C. Roche, *Network analysis of Semantic Web Ontologies*, Stanford CS224W Social and Information Network Analysis 2011.

mamy tu do czynienia z charakterem transdziedzinowym (wykraczającym poza jedną dziedzinę rozważań, bądź ugruntowanym w wielu dziedzinach) z perspektywy ich aplikacji. Jednocześnie można wnioskować o innym ujęciu tej własności, mianowicie o projekcyjności struktur modularnych. Projekcyjność dotyczy bezpośrednio możliwości przeniesienia tych samych zależności na inny poziom rozważań. Przykładowo, konkretna miara centralności pokazuje możliwość wytworzenia się odporności na leki przeciwnowotworowe, co jest obserwowalne na poziomie szlaków sygnałowych kinaz białkowych, lecz w ramach badań kognitywistycznych ten sam typ centralności będzie wskaźnikiem wzorców aktywacji w różnych obszarach mózgu podczas wykonywania konkretnych czynności bądź podczas bezczynności (np. analizy *resting-state* lub pracy DMN – *default mode network*).

## Organizacja, motywy i substruktury sieci

Rozważając dalej sieci i ich własności, scentralizowanie i zdecentralizowanie nie musi bazować na strukturze modularnej. Mierzenie modularności w sieciach złożonych jest wykorzystywane m.in. do odnajdywania struktury społeczności (*community structure*). Centralność natomiast w dużej mierze przyczynia się do odkrywania zależności między obszarami o wysokim stopniu centralności a tymi, gdzie jest ona minimalna. Z drugiej strony centralność jest wymiernym wyznacznikiem tego, w jakim stopniu można postulować o modularności danej struktury, tym bardziej jeżeli jest ona na tyle złożona, że korzystanie z innych metod tworzenia modułów staje się mało skuteczne (z uwagi na to, że im większa złożoność sieci, tym trudniej o wyznaczenie modułów w pewien „zdalny” sposób, tudzież adaptacji tejże struktury do tej formy). W przypadku analizy sieci modularność ma swoje stałe miejsce i jest opatrzona odpowiednimi wzorami niezbędnymi do obliczeń. Jednakże, rozważając samą architekturę modularną w sieciach, a zwłaszcza mając na uwadze zastosowania w ramach metamodelowania różnego typu, można zauważyć, że modularność nie musi być stała i jednoznaczna, jak struktury systemów unitarnych. Metody wyznaczania klik w grafach nieskierowanych, mierzenie współczynnika klastrowania oraz inne metody analizy metryki sieci pozwalają na łatwiejszą identyfikację modułów systemu.

W przypadku systemów dynamicznych wyznaczenie stałych modułów zawsze stanowiło pewien problem, który w większym bądź mniej-

szym stopniu był rozwiązywany<sup>31</sup>. Naprzeciw tym problemom wychodzą rozwiązania konektomiki. Przykładowo, dla dynamicznych systemów, które muszą dostosowywać się do problemów adaptacyjnych, warto rozważyć możliwość zastosowania struktury, która będzie dostatecznie elastyczna, aby wyznaczać swoje moduły *ad hoc* w celu uzyskania optymalnego trybu pracy i ostatecznie rozwiązania.

## Podsumowanie perspektyw i możliwości

Poza transdziedzinowością struktur tak w sieciach neuronowych, społecznych czy nawet w ramach szlaków sygnałowych kinaz białkowych, warto zwrócić uwagę na fakt, że te same parametry i układy można zaobserwować w systemach reprezentacji wiedzy. Dlatego też, aby odnaleźć nowe drogi innowacji w tym zakresie, warto zwrócić się w stronę wymienionych wcześniej metod. Przenikanie się rozwiązań w nauce na płaszczyźnie interdyscyplinarnej jest bardzo dobrze widoczne pomiędzy konektomiką, modelowaniem ontologii i proteomiką, gdy rozważy się problemy tych dziedzin przez pryzmat teorii sieci. Co ciekawe, modułarna architektura może być punktem wyjścia do zastosowania tych interdyscyplinarnych narzędzi, a co za tym idzie – także rozwiązań. W tym względzie proteomika jest bardzo dobrym źródłem inspiracji, ponieważ metody badawcze struktur białek często napotykają problem ogromnej liczby uzyskanych informacji, które trudno w całości przetworzyć i przeanalizować<sup>32</sup>. Ta swoista obfitość danych wciąż czekających na analizę sprawia, że wiele relacji i mechanizmów pracy kinaz białkowych pozostaje nieznanymi, a postęp w dziedzinach związanych z biologią systemową z czasem nie wytracił swojego impetu. Jednocześnie sieci kinaz białkowych (sieci interaktomowe) jako inspiracje w projektowaniu nowoczesnych systemów reprezentacji wiedzy mogą okazać się wyjątkowo pojemnym źródłem różnorodnych architektur ułatwiających implementację funkcji w danym systemie.

Różne dziedziny badań zajmują się układami relacji określanych jako sieci. Odnosi się to zarówno do twórców człowieka, jak i do bytów biologicznych. Rozwijane sposoby badania parametrów tych struktur

---

<sup>31</sup> Dotyczy to historii modularności w nauce, tzn. w ramach rozwiązywania problemów metodami programowania obiektowego, metod informatycznych w biologii, wyjaśniania pracy mózgu w kognitywistyce czy rozwoju tej teorii w filozofii umysłu.

<sup>32</sup> O.N. Jensen, *Modification-Specific Proteomics: Characterization of Post-Translational Modifications by Mass Spectrometry*, "Current Opinion in Chemical Biology" 2004, t. 8, s. 33–41.

w jednej z nich mogą znaleźć zastosowanie w innej. Próby wykorzystywania tych narzędzi w innych dziedzinach mogą zaowocować nowymi danymi na temat badanych struktur. Z uwagi na asymetryczny rozwój metod i narzędzi warto podkreślić transdziedzinowy charakter osiągnięć w obrębie zastosowania narzędzi *network science*, które coraz częściej zaczynają odnosić się także do inżynierii wiedzy. Możliwość stosowania sztucznych sieci neuronowych w przypadku budowania systemów reprezentacji wiedzy wprowadza dodatkowy wymiar do analizy powstałych w ten sposób systemów hybrydowych. Rozwój technologii w tym kontekście pozwala na opracowanie nowych sposobów modularyzacji np. systemów eksperckich. Oprócz tego, wraz z poszerzaniem możliwości implementacji struktur modularnych w technologiach reprezentacji wiedzy, przydatne narzędzia do ewaluacji już istniejących struktur pod kątem implementacji modularności będą musiały się rozwinąć bądź zostać dostosowane do wymogów analizy nowych architektur systemów. Tematyka transdziedzinowego aspektu zastosowania struktur modularnych rozumianych w kontekście teorii sieci pozostaje otwarta z uwagi na szybki rozwój takich dziedzin, jak konektomika czy proteomika, bądź szerzej pojmowanego *network science*. Wzrost szczegółowości badań w tym zakresie może być uzupełniany o wzajemne inspiracje i próby stosowania narzędzi w nowych kontekstach badań. Stanowi to pewien punkt wyjścia do refleksji w obrębie filozofii inżynierii mogącej być podłożem dla innowacyjnych przedsięwzięć w poszczególnych dziedzinach zastosowania struktur modularnych.

## Literatura

- Ackoff, R.L., *From Data to Wisdom*, „Journal of Applied Systems Analysis” 1989, nr 16(1).
- Azam F., *Biologically Inspired Modular Neural Networks*, Blacksburg, Virginia 2000.
- Badia L., Bonner A., Soler A., *Who Was Ramon Llull?*, Centre de Documentacio Ramon Llull, [online] <[http://quisestllullus.narpan.net/eng/713\\_arbre\\_eng.html](http://quisestllullus.narpan.net/eng/713_arbre_eng.html)>
- Bassett D.S., Greenfield D.L., Meyer-Lindenberg A., Weinberger D.R., Moore S.W., Bullmore E.T., *Efficient Physical Embedding of Topologically Complex Information Processing Networks in Brains and Computer Circuits*, „PloS Computer Biology” 2010, t. 6.
- Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O., *The Semantic Web*, „Scientific American” 2001, nr 284(5).
- Bonacich P., Paulette L., *Eigenvector-Like Measures of Centrality for Asymmetric Relations*, „Social Networks” 2001, t. 23.
- Brank J., Grobelnik M., Mladenic D., *A Survey of Ontology Evaluation Techniques*, Proceedings of the conference on data mining and data warehouses, SiKDD 2005.

- Bullmore E., Sporns O., *Complex Brain Networks: Graph Theoretical Analysis of Structural and Functional Systems*, „Nature Reviews Neuroscience” 2009, nr 10(3).
- Carriere S.J., Kazman R., , *Web Query: Searching and Visualizing the Web through Connectivity*, „Computer Networks and ISDN Systems” 1997, t. 29.
- Cheng F., Jia P., Wang Q., Zhao Z., *Quantitative Network Mapping of the Human Kinome Interactome Reveals New Clues for Rational Kinase Inhibitor Discovery and Individualized Cancer Therapy*, „Oncotarget” 2014, t. 15.
- De Las Rivas J., Prieto C., *Protein Interactions: Mapping Interactome Networks to Support Drug Target Discovery and Selection*, „Methods in Molecular Biology” 2012.
- Erétéo G., Buffa M., Gandon F., Grohan P., Leitzelman M., Sander P., *A State of the Art on Social Network Analysis and Its Applications on a Semantic Web*, SDoW 2008.
- Guy K. (red.), Lipton P., Hoare T., O’Hara K. i in. *Philosophy of Engineering*, „The Royal Academy of Engineering” 2010, t. 1–2.
- Grau B. C., Horrocks I., Kazakov Y., Sattler U., *A Logical Framework for Modularity of Ontologies*, IJCAI 2007.
- Hachem S., Teixeira T., Issarny V., *Ontologies for the Internet of Things*, „Proceedings of the 8<sup>th</sup> Middleware Doctoral Symposium”, ACM 2011.
- Honey C.J., Sporns O., Cammoun L., Gigandet X., Thiran J.P., Meuli R., Hagmann P., *Predicting Human Resting-State Functional Connectivity from Structural Connectivity*, „Proceedings of National Academy of Science” 2009.
- Jacob F., *Evolution and Tinkering*, „Science” 1977.
- Jensen O.N., *Modification-Specific Proteomics: Characterization of Post-Translational Modifications by Mass Spectrometry*, „Current Opinion in Chemical Biology” 2004, t. 8.
- Katifori A., Halatsis C., Lepouras G., Vassilakis C., Giannopoulou E., *Ontology Visualization Methods – A Survey*, ACM Computing Surveys (CSUR), (2007), nr 39(4).
- Keerthana M., Ashika Parveen S., *Internet of Things*, „International Journal of Advanced Research Methodology in Engineering and Technology” 2017, nr 1(2).
- Kollia I., Simou G., Stamou G., Stafylopatis A., *Interweaving Knowledge Representation and Adaptive Neural Networks*, National Technical University of Athens, Workshop on Inductive Reasoning and Machine Learning on the Semantic Web 2009.
- Newman M.E.J., *Networks: An Introduction*, Oxford University Press 2010.
- Oberlaender A. M., Roeglinger M., Rosemann M., Kees A., *Conceptualising Business-to-Thing Interactions – A Sociomaterial Perspective on the Internet of Things*, „European Journal of Information Systems” 2017.
- Peng Y., *Ontology Mapping Neural Network: An Approach to Learning and Inferring Correspondences Among Ontologies*, University of Pittsburgh 2010.
- Roche C., *Network Analysis of Semantic Web Ontologies*, Stanford CS224W Social and Information Network Analysis 2011.
- Sporns O., *The Human Connectome: A Complex Nnetwork*, “Annals of the New York Academy of Sciences” 2011, nr 1224(1).
- Tan H., Muhammad I., Tarasov V., Adlemo A., Johansson M., *Development and Evaluation of a Software Requirements Ontology*, (w:) 7<sup>th</sup> International Workshop on Software Knowledge-SKY 2016, 9<sup>th</sup> International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management-IC3K 2016.
- Tergan S.O., Kelle T. (red.), *Knowledge and Information Visualization: Searching for Synergies*, Springer 2005, t. 3426.



- 
- Xiao Ch., Tao X., Yun L., Kai W., *Dynamic Modular Architecture of Protein-Protein Interaction Networks Beyond the Dichotomy of „Date” and „Party” Hubs*, „Scientific Reports” 2013, t. 3.
- Zhang Q., Cheng L., Boutaba R., *Cloud Computing: State-of-the-Art and Research Challenges*, „Journal of Internet Services and Applications” 2010, nr 1(1).
- Zuo X.N., Ehmke R., Mennes M., Imperati O., Castellanos F.X., Sporns O., Milham M.P., *Network Centrality in the Human Functional Connectome*, „Cerebral Cortex” 2012, t. 22.

