proteza może zastąpić utraconą rękę czy nogę?

Stwierdziłem, że na takie pytanie trzeba odpowiedzieć w dwóch różnych kontekstach.

Jeśli brać pod uwagę wyłącznie kontekst techniczny, to można się spodziewać, że stale doskonalone systemy tak zwanej sztucznej inteligencji doprowadzą w końcu do tego, że możliwości i właściwości maszyny staną się podobne do możliwości i właściwości ludzkiego mózgu. Wskazałem zwłaszcza na proces samodzielnego uczenia się maszyn, jako na czynnik bardzo sprzyjający ich doskonaleniu. Starałem się jednak przy tym wykazać, że w tej wzrastającej inteligencji maszyn nie ma żadnych zagrożeń dla człowieka, bo maszyna może posiąść **inteligencję** ludzkiego mózgu, ale nie będzie w stanie naśladować jego **intencjonalności**.

Natomiast jeśli wziąć pod uwagę kontekst biologiczny, to zdecydowanie sceptycznie odniosłem się do możliwości technicznego protezowania całego mózgu człowiek w celach terapeutycznych. I dodatkowo wyraziłem przekonanie, że życie duchowe człowieka nie redukuje się do samej tylko biologicznej aktywności mózgu, więc nawet gdyby udało się zbudować system techniczny wiernie modelujący wszystkie procesy biologiczne toczące się w mózgu, to jednak nie będzie to równoznaczne z możliwością wykreowania sztucznego człowieka.

Bibliografia

1. Nowy M., Vetulani J., Tadeusiewicz R.: *Dwugłos o mózgu*, Wszechświat, tom 101, nr 10–12, 2000, str. 220–225.

CO MODELOWANIE NEUROCYBERNETYCZNE I SYMULACJA KOMPUTEROWA MOGĄ WNIEŚĆ DO WIEDZY O MÓZGU?

Ryszard Tadeusiewicz (Kraków)

Streszczenie

Badanie mózgu stało się na początku XXI wieku jednym z dominujących kierunków rozwoju biologii i medycyny. Jednak ta ogromna ilość już zdobytych informacji oraz ich szybki wzrost powodują, że coraz trudniej te informacje złożyć w jedną całość, zrozumieć ich znaczenie, stworzyć bazę dla ich systemowego traktowania i wykorzystania we wnioskowaniu o charakterze przyczynowo-skutkowym.

Narzędziem, które może pomóc w syntezie wiedzy neurobiologicznej i w jej systemowym wykorzystaniu może być modelowanie neurocybernetyczne. Metody budowy cybernetycznych modeli złożonych systemów potwierdziły swoją przydatność w technice (gdzie służą na przykład do kontroli montażu obiektów składających się z setek tysięcy elementów składowych – na przykład dużych samolotów pasażerskich lub wojskowych) oraz w ekonomii (gdzie wspomagają ludzi przy podejmowaniu trudnych decyzji w warunkach globalnej gospodarki i rosnącej konkurencji). Z modeli takich korzystają fizycy badający świat cząstek elementarnych oraz astronomowie analizujący powstanie i rozwój Wszechświata, a także chemicy projektujący nowe związki chemiczne. Najwyższy czas, żeby z zalet metod modelowania cybernetycznego skorzystała także neurobiologia.

W artykule przedstawiono metody budowy modeli biocybernetycznych nadające się do tworzenia modeli małych fragmentów mózgu (pojedynczych komórek nerwowych lub sieci złożonych z ich niewielkiej liczby), a także przedstawiono metodykę przechodzenia od modeli fragmentów do modeli całości za pomocą agregacji elementów składowych dla uzyskania modelu całego złożonego systemu. Przy stosowaniu opisanych metod ogromnie pomocna jest możliwość posłużenia się symulacją komputerową dla kontroli działania modeli elementów składowych oraz do antycypacji działania systemów powstających z połączenia tych elementów składowych.

Abstract

At the beginning of the 21st century, the brain study became one of the dominant directions of the development of biology and medicine. However, this huge amount of information already gained and their rapid growth make it increasingly difficult to put this information together, understand their meaning, create a basis for their systematic treatment and use in the conclusion.

A tool that can help in the synthesis of neurobiological knowledge and its systematic use may be neurocybernetic modeling. Methods of building cybernetic models of complex systems have confirmed their usefulness in technology (where they serve, for example, to inspect the assembly of objects consisting of hundreds of thousands of components - for example, large passenger or military planes) and in economics (where they assist people in making difficult decisions in global conditions economy and growing competition). Such models are used by physicists studying the world of elementary particles and astronomers analyzing the origin and development of the Universe as well as chemists designing new chemical compounds. It is time for the neuroscience to benefit from the cybernetic modeling methods.

The article presents the methods of building biocybernetic models, suitable for creating models of small brain fragments (individual nerve cells or networks composed of a small number of neurons), and the methodology for moving from fragment models to whole models using aggregation of components to obtain a model of the whole complex system. When using the described methods, it is extremely helpful to be able to use a computer simulation to control the operation of component models and to anticipate the operation of systems resulting from the combination of these components.

Wstęp

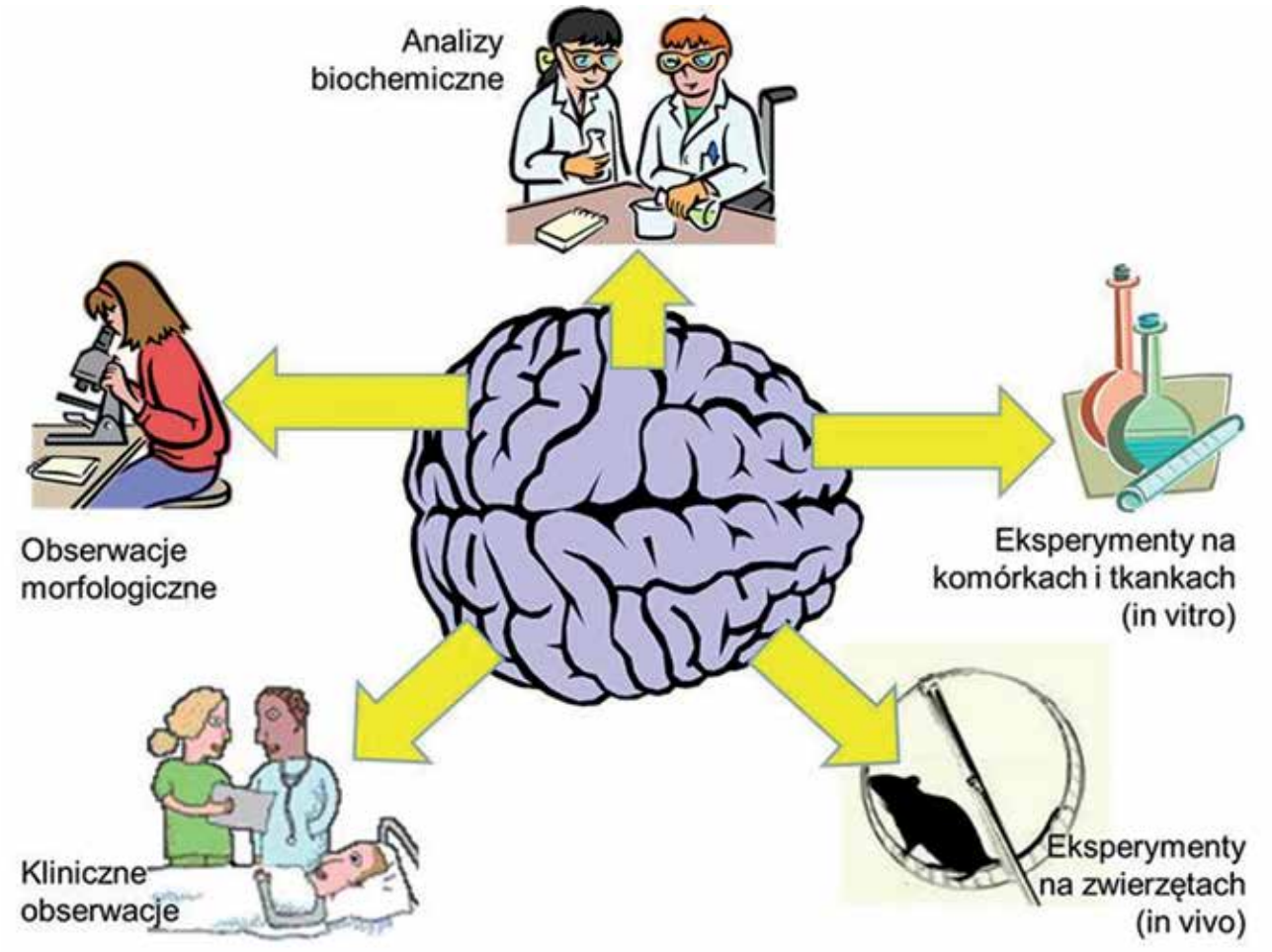
Badanie mózgu stało się na początku XXI wieku jednym z dominujących kierunków rozwoju biologii i medycyny. Badacze uzbrojeni w coraz doskonalszą aparaturę gromadzą o nim coraz więcej informacji (Ryc. 1). Dzięki rozwojowi mikroskopii oraz technik obrazowania medycznego coraz dokładniej poznajemy jego morfologię. Poznaliśmy biochemię procesów zachodzących w mózgu na poziome całego organu, na poziomie poszczególnych jego komórek i na poziomie struktur subkomórkowych. Eksperymenty in vitro i in vivo, a także obserwacje i badania kliniczne pozwalają poznać w stopniu wcześniej nieosiągalnym fizjologię całego mózgu oraz jego anatomicznie i funkcjonalnie wydzielonych części. Badania neurobiologiczne pozwalają mierzyć i oceniać aktywność bioelektryczną i biochemiczną tkanek i komórek nerwowych, a także ich wydzielonych części (na przykład synaps). Poznaliśmy też różne formy patologii mózgu i coraz lepiej radzimy sobie z ich diagnostyką i terapią.

Na pozór można by sądzić, że o mózgu wiemy już niemal wszystko.

Niestety, ta nadzieja, że wiemy już tak dużo, iż mózg nie ma już przed nami żadnych tajemnic jest nadzieją złudną. Wynika to z faktu, że każda z metod badania i analizy funkcjonowania mózgu dostarcza wiedzy **jednostronnej**. Możemy się dowiedzieć **osobno,** jak mózg jest zbudowany, jakie procesy bioelektryczne w nim zachodzą, jakie zjawiska chemiczne im towarzyszą itp. – natomiast każdy z tych zestawów wyników badań naukowych i związanych z nimi zasobów wiadomości dostarcza innej wiedzy fragmentarycznej, trudnej do zestawienia z wynikami innych badań prowadzonych według zupełnie innej metodologii. Obrazowo można to porównać z sytuacją przedstawioną na rycinie 2.

Na rysunku tym pokazano, że skomplikowane trójwymiarowe bryły mogą dostarczać różnych obrazów cieni, gdy się je oświetli z różnych kierunków. Żaden z tych obrazów nie przekazuje całej wiedzy o badanej bryle, a odtworzenie jej rzeczywistego kształtu na podstawie tych fragmentarycznych obrazów jest bardzo trudne. Analogia z sytuacją, z jaką mamy do czynienia przy badaniach mózgu, jest chyba oczywista: każda z użytych metod badawczych jest jak snop światła skierowany w jednym ustalonym kierunku. Każda dostarcza więc jakiejś fragmentarycznej informacji o tym złożonym tworze, ale złożenie tych informacji w jedną całość jest naprawdę trudne.

Stopień trudności zwiększa dodatkowo fakt, że metodologia badań biologicznych zakładała (od zawsze!), że jeśli jakiś obiekt badań był zbyt złożony, żeby go zbadać w całości, to dokonywana była jego dekompozycja na elementy prostsze (Ryc. 3), które po kolei były poddawane badaniom. Na ogół badanie tych części jest skuteczne, więc uzyskujemy bogatą kolekcję wiadomości o rozważanych częściach. Powstaje tylko pytanie, jak z wyników badania części zrekonstruować wiedzę o całości?



Ryc. 1. Rożne źródła pozyskiwania wiedzy o mózgu.

Ryc. 2. Skomplikowane bryły mogą dawać różne obrazy (cienie) przy oświetleniu ich z różnych kierunków. Omówienie w tekście. (źródło: https://www.investigacionyciencia.es/images/17843/articleImageThumbnail.jpg , dostęp 12.12.2017)

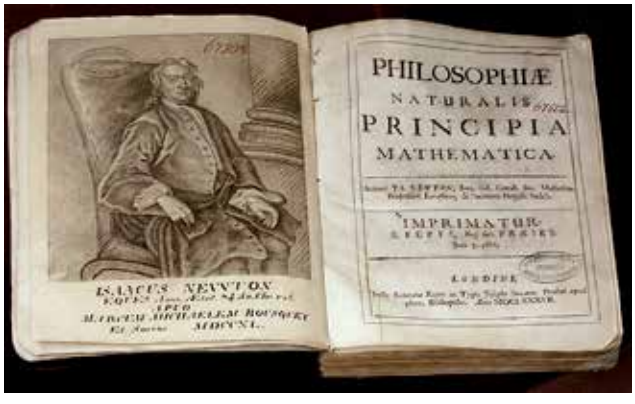
Ryc. 3. Badania biologiczne w dużej mierze polegają na tym, że mając złożony system, z którym nie potrafimy sobie poradzić, dzielimy go na części i badamy te części, co jest na ogół prostsze. (źródło: http://medicalcollege.ru/imaginator/Illusioms/505ff0a97754e.jpeg, dostęp 12.12.2017)

Taką szansę stwarza **neurocybernetyka**. Jest to nowa dziedzina wiedzy, ale warto wiedzieć, że powstała już monografia (zamówiona przez Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego), która zbiera najważniejsze dane na temat jej zakresu, przedmiotu i metodologii [4]. O tym, że książka ta rzeczywiście toruje drogę nowym obszarom poznania, świadczyć może fakt, że została ona natychmiast przetłumaczona na język rosyjski i wydana także w Moskwie (Ryc. 4).

Ryc. 4. Okładka pierwszej książki o neurocybernetyce w wersji oryginalnej (po polsku) i w rosyjskim tłumaczeniu.

Modelowanie w nauce i w technice

Problemy podobne do opisanych w poprzednim rozdziale napotykali wcześniej badacze materii nieożywionej (fizycy i chemicy), a także specjaliści nauk technicznych, ekolodzy, socjolodzy oraz ekonomiści. We wszystkich wymienionych dziedzinach istotny postęp udało się uzyskać, gdy badaniom empirycznym towarzyszyły próby zbudowania i wykorzystania **modeli matematycznych**. Tworzenie takich modeli w naukach ścisłych rozpoczęło się od fundamentalnej pracy Izaaka Newtona zatytułowanej *Philosophiae naturalis principia Mathematica* (Ryc. 5). Tytuł ten można swobodnie przetłumaczyć jako „Matematyczne podstawy wiedzy o przyrodzie". Takie tłumaczenie wydaje się lepsze niż dosłowne tłumaczenie z łaciny („Matematyczne zasady filozofii



Ryc. 5. Dzieło Izaaka Newtona, które zapoczątkowało stosowanie modeli matematycznych w naukach przyrodniczych. (źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Philosophiae_Naturalis_Principia_Mathematica#/media/File:Principia.jpg, dostęp 12.12.2017)

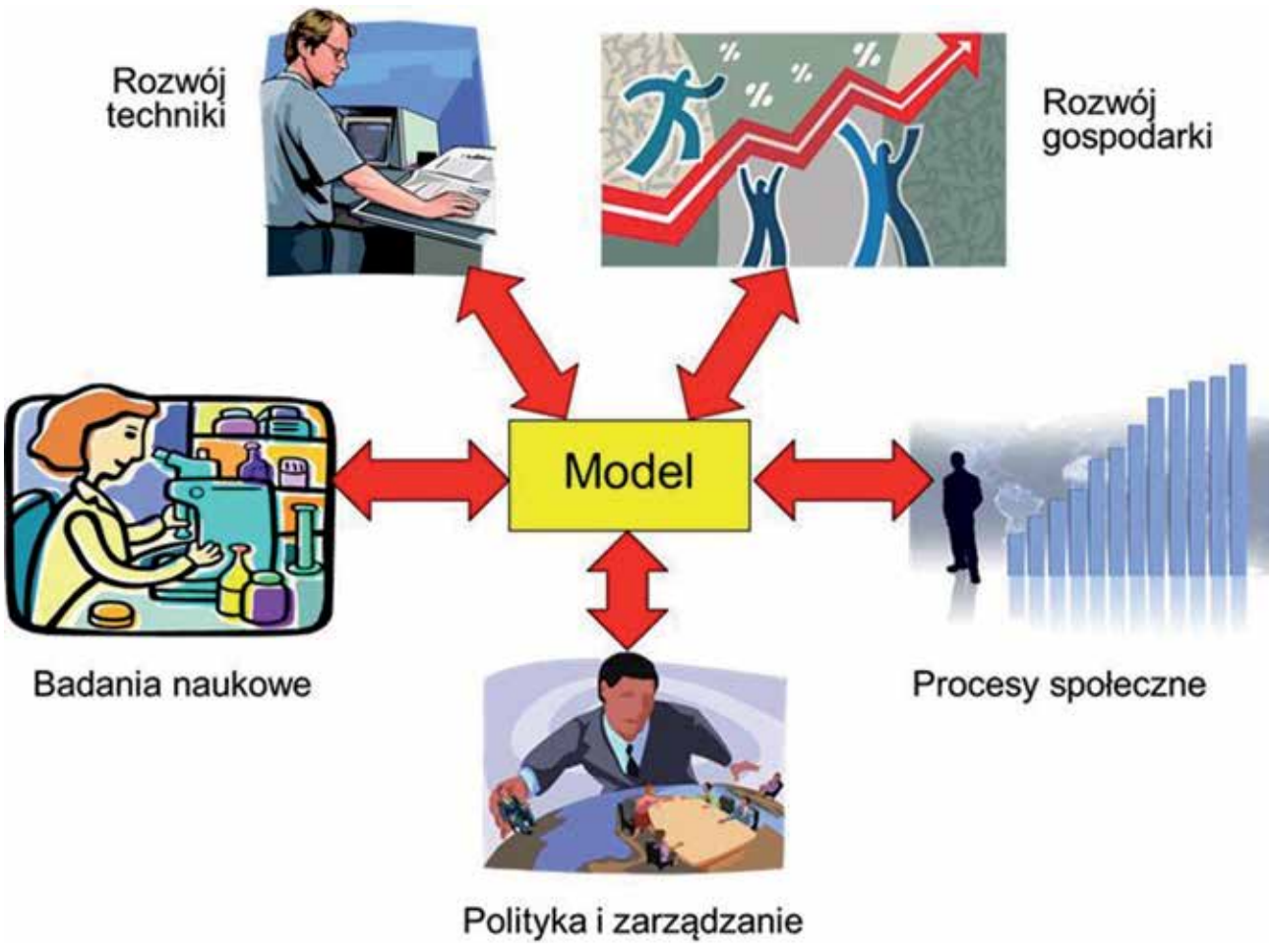
naturalnej") – bo jest dla współczesnego czytelnika bardziej zrozumiałe. Z rysunku 5 można odczytać, że księgę tę opublikowano **5 lipca 1687** roku – i była to data przełomowa w historii nauki. Od tego czasu w większym lub mniejszym stopniu wszystkie kolejne odkrycia w dziedzinie fizyki (i w nieco inny sposób także w chemii) były poprzedzane tworzeniem modeli matematycznych, które pomagały zaplanować eksperyment, umożliwiały poprawną interpretację jego wyniku, i stanowiły podstawę do praktycznych zastosowań odkrycia – między innymi w technice (Ryc. 6).

Ryc. 6. Większość urządzeń technicznych powstaje dziś w taki sposób, że najpierw tworzone są modele komputerowe, a dopiero potem maszyna jest realizowana w rzeczywistości. (źródło: https://impactlabs.mit.edu/sites/default/files/images/cad2.png, dostęp 12.12.2017)

Modelowanie w biologii i medycynie

Natomiast w badaniach biologicznych modelowanie matematyczne było przez wiele lat nieobecne, gdyż wierzono, że ogromna złożoność obiektów i procesów biologicznych w praktyce uniemożliwia stworzenie adekwatnych modeli, które by mogły być rzeczywistym narzędziem badawczym, a nie tylko sposobem matematycznego opisania tego, co i tak dobrze wiadomo.

Jednak zalety modelowania jako metodyki pomagającej w osiąganiu rozmaitych celów (Ryc. 7) nie mogły być w nieskończoność ignorowane, także na gruncie biologii i medycyny. Zresztą zalety tworzenia i wykorzystywania modeli i komputerowych analiz w biologii poznali najwcześniej genetycy, zmierzający wytrwale przez szereg lat do odczytania genomów – najpierw najprostszych organizmów (wirusów i bakterii), a potem zwierząt o coraz większej złożoności, aż do odczytania genomu człowieka włącznie. Zadanie było zbyt złożone, żeby jest rozwiązać „wprost", badając systematycznie łańcuchy DNA odcinek za odcinkiem. Dlatego zastosowano różne techniki dzielenia DNA na małe odcinki i analizowania ich struktury, a potem składania tych informacji częściowych w jedną całość. Zastosowanie tej techniki sekwencjonowania nazywaną *shotgun sequencing* doprowadziło do tego, że już 14 kwietnia roku 2003 opublikowano dokument powiadamiający o zakończeniu sekwencjonowania 99% genomu z trafnością



Ryc. 7. Obszary, w których najczęściej korzysta się (z powodzeniem!) z modeli.

99,99%. Elementem decydującym dla uzyskania tego sukcesu było zastosowanie modelowania komputerowego i szeroko rozumianej bioinformatyki.

Modele w neurocybernetyce

Mózg jest kolejnym systemem biologicznym, którego złożoność nie pozwala na poznanie go metodami „wprost". Dlatego podjęto liczne próby budowy różnych modeli poszczególnych fragmentów mózgu, oczekując, że te modele będzie można potem złożyć w całość, uzyskując holistyczny model pozwalający zrozumieć fenomen mózgu – dla samego mózgu niepoznawalny. Tegoroczny (2018) „Tydzień mózgu" w Krakowie, w ramach którego prezentowany będzie między innymi wykład nawiązujący do tego artykułu, ma dedykację: „Pamięci prof. Jerzego Vetulaniego". Warto więc przytoczyć jedną z bardzo trafnych ocen, wygłaszanych często przez prof. Vetulaniego. Otóż mówił on, że *gdyby mózg człowieka był tak prosty, że moglibyśmy go zrozumieć – to i tak byśmy go nie zrozumieli, bo mielibyśmy zbyt prymitywny mózg*.

Rzeczywiście, próba zrozumienia mózgu za pomocą samego tylko mózgu przypomina próbę podniesienia siebie samego do góry metoda ciągnięcia za włosy. Wprawdzie baron Münchhausen przechwalał się, że ciągnąc sam siebie za włosy wydobył z topieli nie tylko siebie, ale i swego konia – ale jakoś nikt mu nie wierzył (Ryc. 8).

Od lat budowane są różne modele fragmentów mózgu. Droga, jaką w tym celu trzeba przebyć, jest naszkicowana skrótowo na rycinie 9.

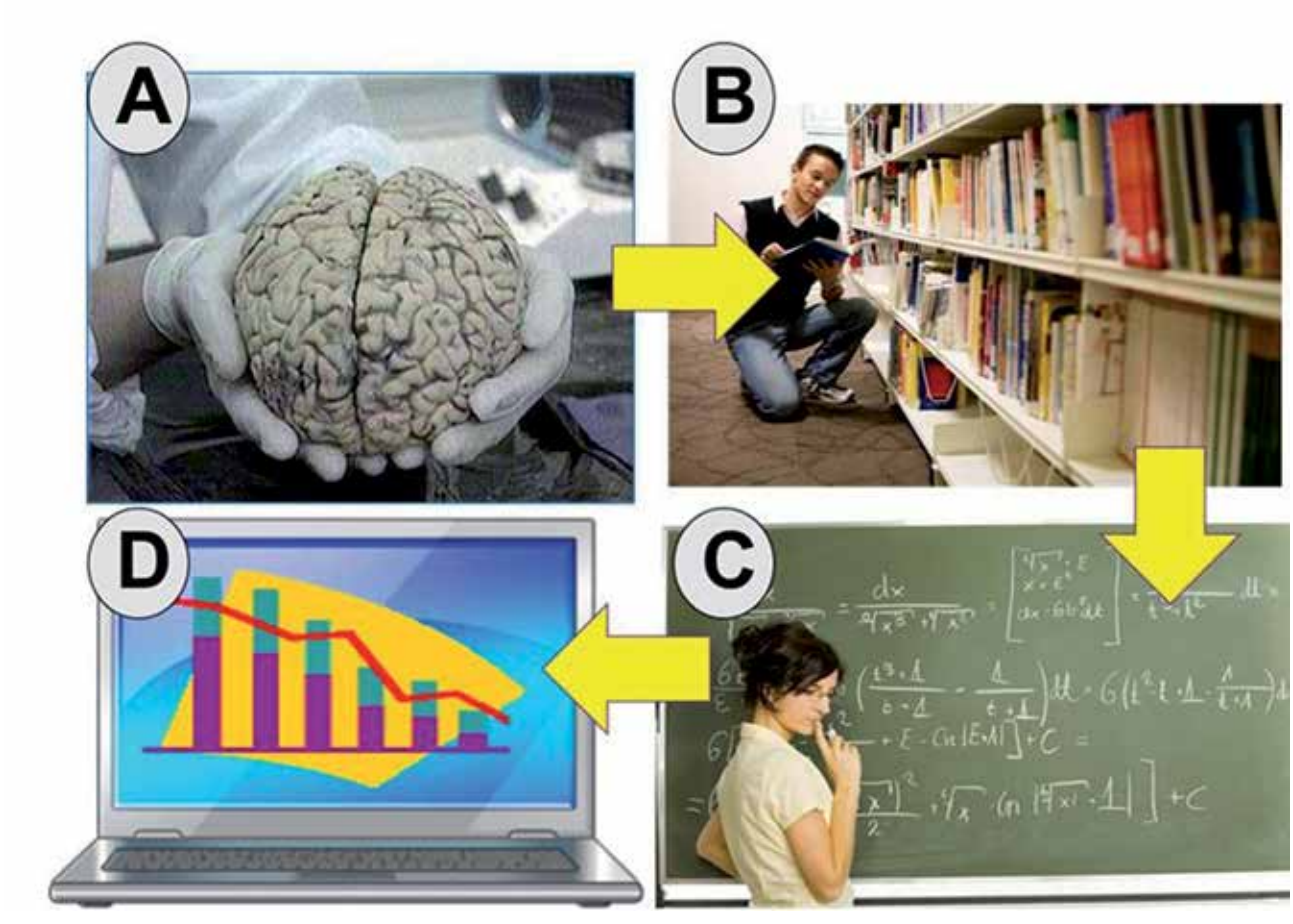
Pierwszym etapem, oznaczonym na rysunku literą **A**, są oczywiście rozmaite naukowe badania mózgu i jego fragmentów. Badania te prowadzone są różnymi metodami (por. Ryc. 1) i dostarczają ogromnej liczby danych szczegółowych, symbolicznie zaznaczonych na rycinie 9 w polu oznaczonym literą **B**. Należy dodać, że w rzeczywistości tych danych naukowych zebranych na temat mózgu jest o wiele więcej, niż książek pokazanych na prezentowanym obrazku. Bliższa prawdy jest sytuacja narysowana na rycinie 10, w której badacz budujący model jest wręcz przytłoczony ogromną liczbą dostępnych danych.

Nie dość, że danych źródłowych do budowy modelu jest tak dużo, to dodatkową trudność sprawia fakt, że są one zebrane w formie trudnej do przekształcenia w potrzebny neurocybernetyczny model. Są to

Ryc. 8. Żartobliwe przypomnienie o przechwałkach barona Münchhausena, wykazujących pewne podobieństwo z próbą zrozumienia tajemnic mózgu za pomocą samego tylko mózgu. (źródło: http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Boots/Munch.jpg, dostęp 12.12.2017)

bowiem typowo opisy tekstowe, rysunki, zdjęcia, rejestracje pochodzące z różnej aparatury pomiarowej, a także szczegółowe tabele, wykresy, diagramy – wszystko bardzo rzetelne i czytelne dla innych badaczy, ale bardzo odlegle od tego, czego potrzebują twórcy modeli, a zwłaszcza symulacji komputerowych. Dlatego niezbędnym krokiem poprzedzającym budowę modelu jest próba matematycznej formalizacji posiadanych informacji, oznaczona na rycinie 9 literą **C**.

Mając opis rozważanego obiektu w postaci formalnej (matematycznej), można podjąć próbę budowy modelu komputerowego (symulacyjnego). Model taki pozwala badać właściwości modelowanego obiektu na drodze eksperymentów obliczeniowych, co bywa niekiedy nazywane *experiment in computo* - w nawiązaniu do tradycyjnie stosowanych w biologii metod określanych jako *experiment in vitro* (badania z użyciem preparatów biologicznych umieszczonych w próbówkach) oraz *experiment in vivo* (doświadczenia wykonywane na zwierzętach). Pełny schemat postępowania wiodącego do zbudowania modelu mózgu (a dokładniej – jego fragmentów) przedstawiono na rysunku 11.

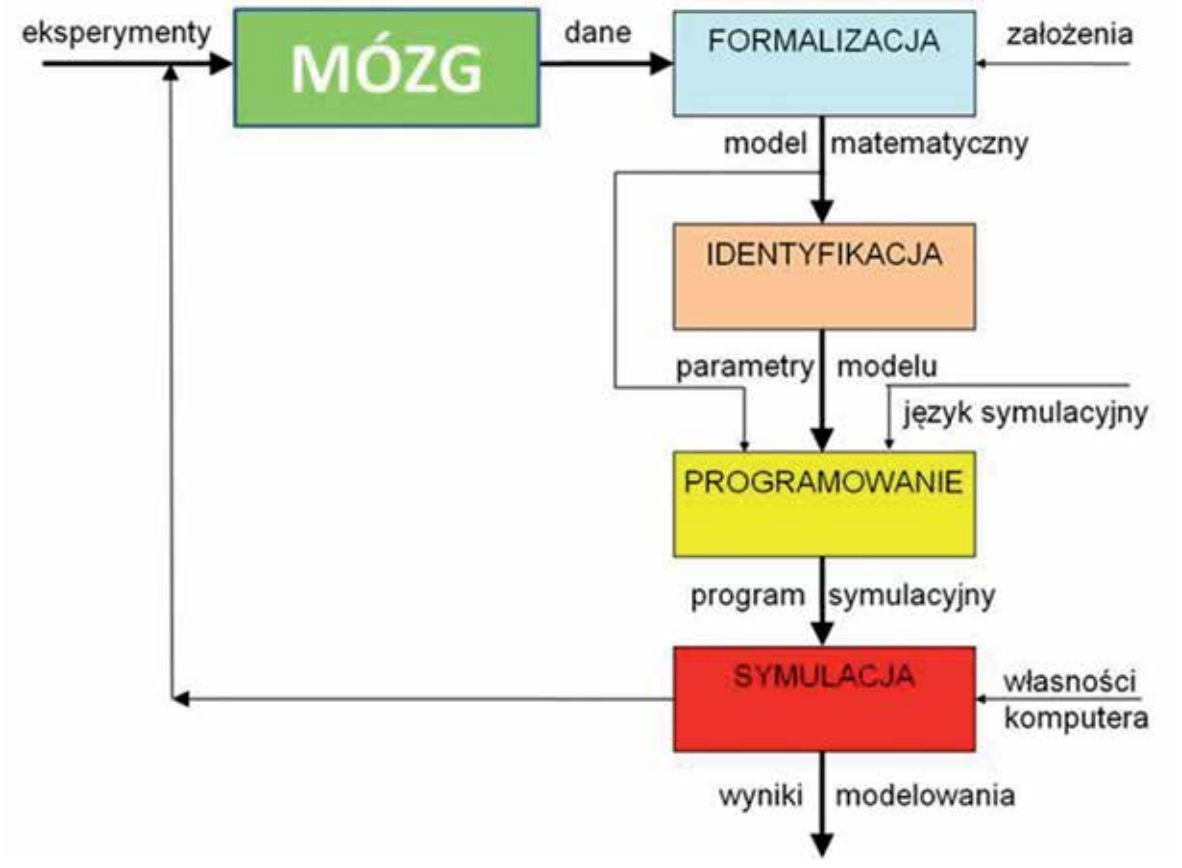


Ryc. 9. Kolejność działań przy budowie modelu mózgu (a raczej jego fragmentów). Omówienie w tekście.

Rys. 10. Żartobliwe przedstawienie ogromnej liczby danych, z jakimi musi się zmierzyć twórca neurocybernetycznego modelu mózgu.

niu rzeczywistego neuronu. Ale ta prostota okazała się siłą tego modelu. Tworzone przy jego pomocy struktury potrafiły w sposób bardzo przekonujący naśladować różne proste mechanizmy neurobiologiczne (na przykład odruch warunkowy Pawłowa, efekty hamowania obocznego, w strukturach nerwowych przetwarzające sygnały pochodzące z receptorów, procesy uczenia się i samouczenia i wiele innych). Przykłady takich modeli są opisane w publikacjach i książkach, których wykaz znajduje się na końcu artykułu.

Nieoczekiwanie dla samych badaczy zajmujących się próbami modelowania fragmentów systemu nerwowego, tworzone przez nich struktury okazały się bardzo przydatnymi narzędziami do rozwiązywania różnych praktycznych problemów informatycznych i dały początek obszernej gałęzi sztucznej inteligencji, znanej pod nazwą Sieci Neuronowe [2, 3] (Ryc. 13).



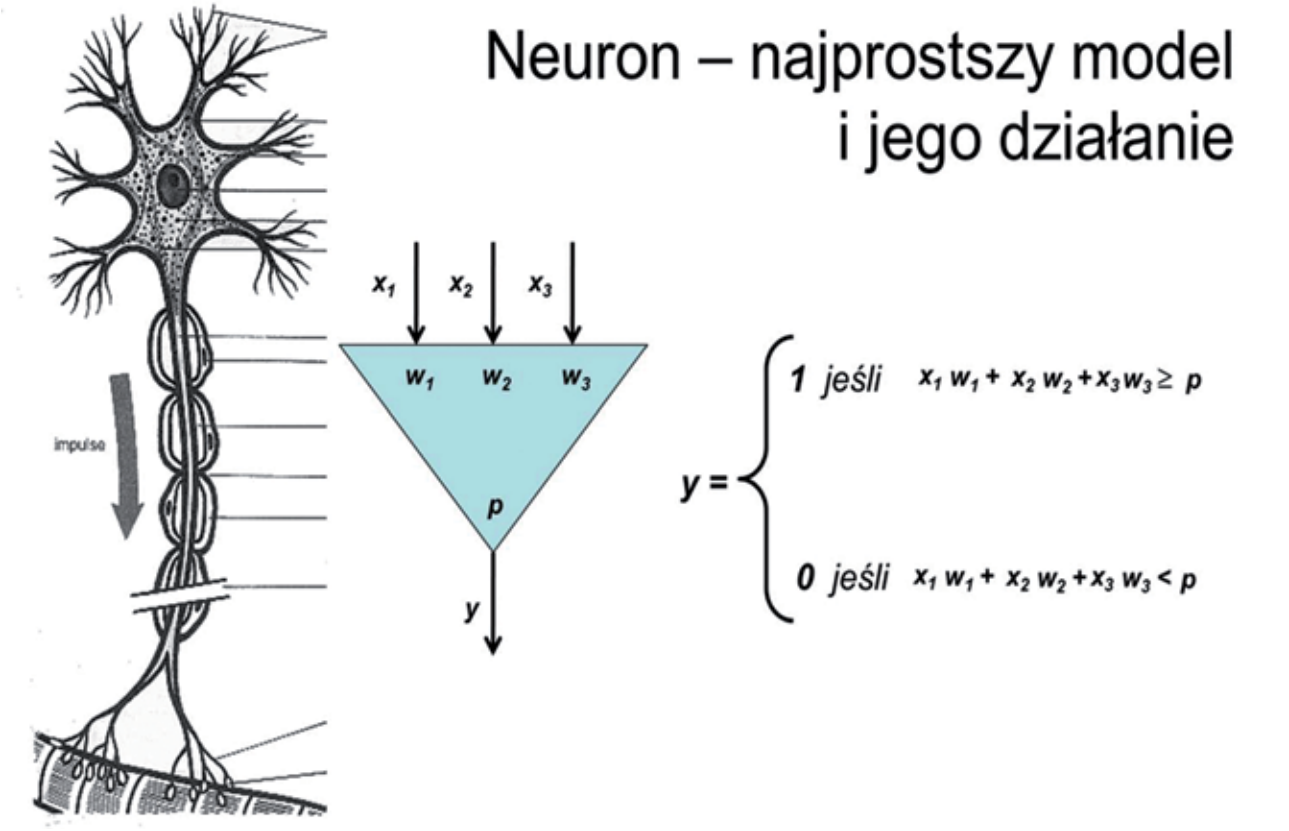
Rys. 11. Schemat postępowania zmierzającego do budowy modelu neurocybernetycznego.

Najprostsze modele neurocybernetyczne

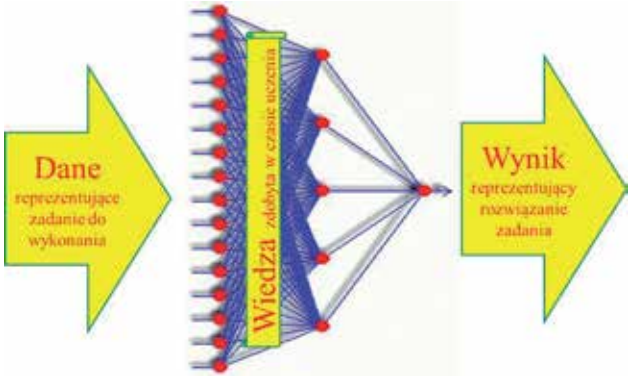
Pierwsze prace dotyczące modelowania cybernetycznego struktur neurobiologicznych pojawiły się jeszcze w połowie ubiegłego wieku. Przyjęto wtedy bardzo uproszczony model pojedynczej komórki nerwowej (Ryc. 12), którego działanie było tylko w grubym przybliżeniu wzorowane na funkcjonowa-

Jak modelowanie neurocybernetyczne może pomóc w zrozumieniu mózgu?

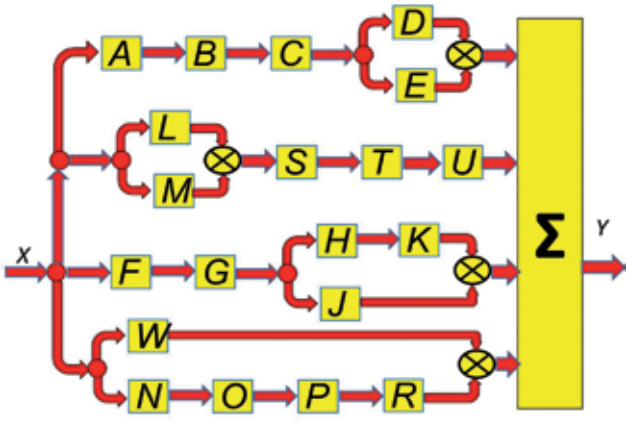
Modele neurocybernetyczne są narzędziem, które **docelowo** może pomóc w pokonaniu problemu zilustrowanego na rycinie 10. Jest to możliwe, gdyż jeśli potrafimy opisać w formie modeli neurocybernetycznych poszczególne **elementy** rozważanej struktury,



Ryc. 12. Od takich uproszczonych modeli komórek nerwowych zaczynano budowę systemów neurocybernetycznych.



Ryc. 13. Tak zwana sieć neuronowa – oparte na bazie neurocybernetyki narzędzie sztucznej inteligencji, używane do rozwiązywania różnych praktycznych problemów.

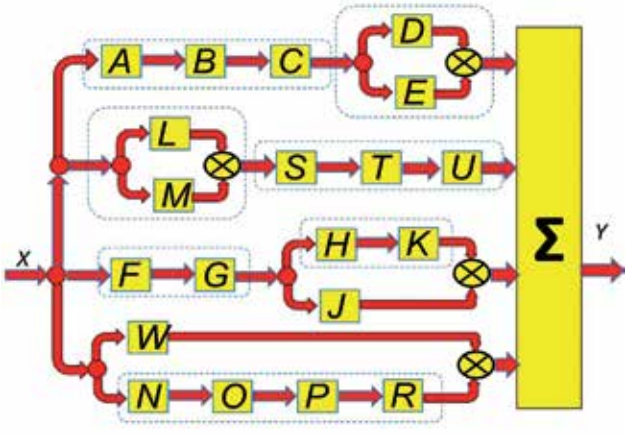


Ryc. 14. Przykładowa struktura systemu, którego elementy składowe zostały skutecznie zamodelowanie (oznaczenia od A do R symbolizują tak zwane transmitancje modeli elementów składowych).

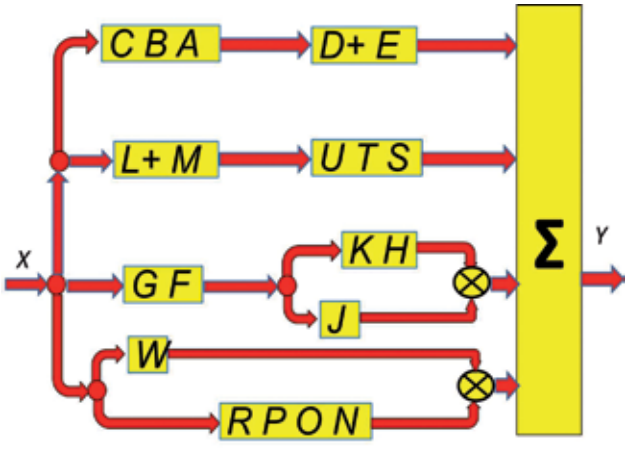
to stosując proste reguły można uzyskać **model całej struktury**. Odpowiednia przykładowa sekwencja działań przedstawiona jest na kolejnych rysunkach od numeru 14 do 18. Powoduje ona, że skomplikowany system przedstawiony na rysunku 14 może być zredukowany do pojedynczego modułu, którego opis formalny można precyzyjnie ustalić na podstawie opisów elementów składowych (określonych w następstwie ich oddzielnych badań) poprzez stosowanie dobrze zdefiniowanych i sprawnie funkcjonujących zasad i reguł.

Ograniczenia napotykane przy stosowaniu metod neurocybernetycznych

Byłoby nadmiernym uproszczeniem twierdzenie, że naszkicowana wyżej (oczywiście w dużym uproszczeniu) droga do uzyskania neurocybernetycznego modelu mózgu jest łatwa do realizacji. Główna trudność wynika z faktu, że mózg jest systemem złożonym z ogromnej liczby elementów, połączonych ze sobą w sposób niesłychanie skomplikowany i nie do końca jeszcze poznany. Porównując rozmiary

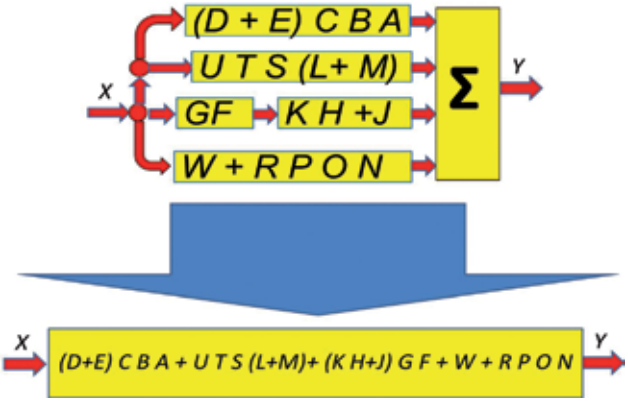


Ryc. 15. Wyodrębnienie podsystemów składowych, dla których transmitancje zastępcze można ustalić stosując znane reguły.

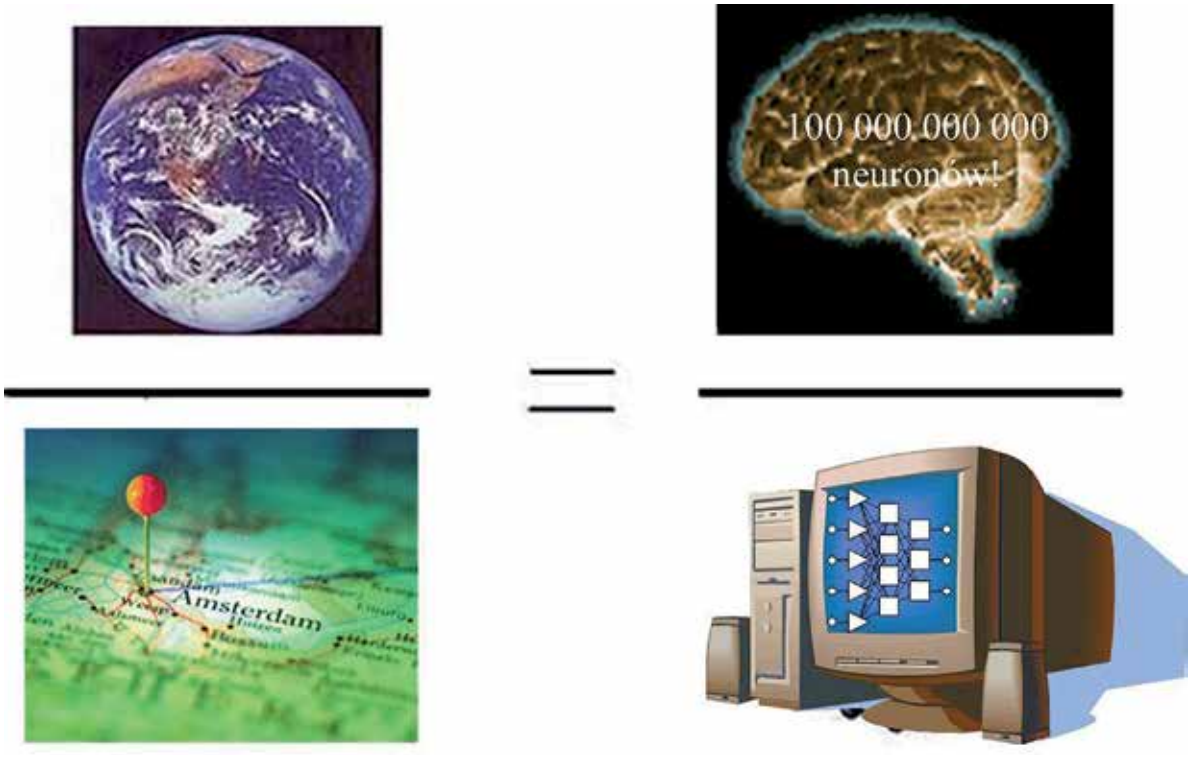


Ryc. 16 Schemat zastępczy systemu po pierwszym etapie agregacji jego struktury.

Ryc. 17. Ponowne zastosowanie tych samych reguł pozwala na dalsze zredukowanie modelowanej struktury.



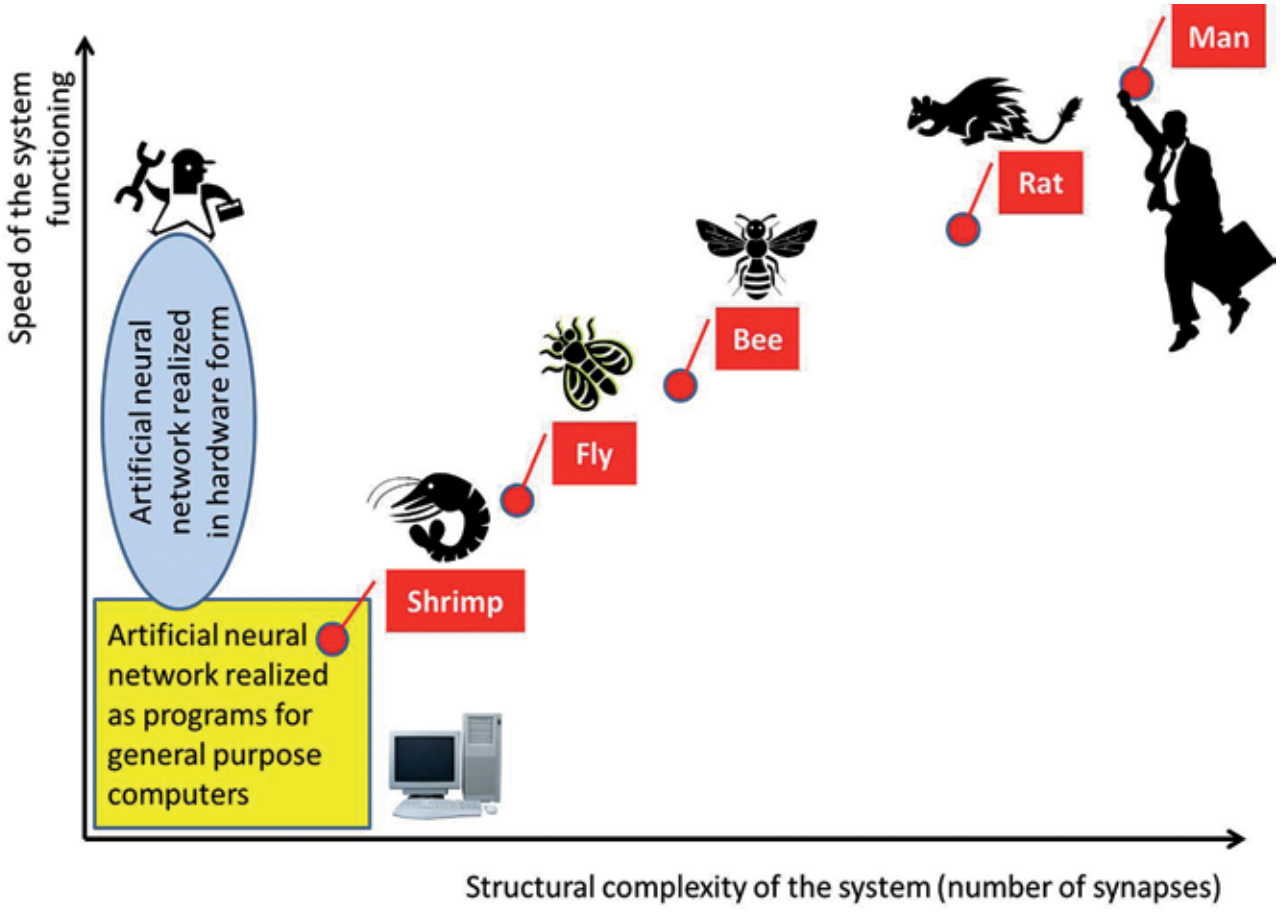
Ryc. 18. Ostatni krok procedury prowadzi do „zwinięcia” całego systemu do pojedynczego bloku



Ryc. 19. Prawdziwy mózg jest tyle razy większy (w sensie liczby elementów) od modelu w postaci sieci neuronowej, ile razy większa jest średnica Ziemi od główki szpilki.

(mierzone liczbą elementów funkcjonalnych) biologicznego mózgu i tworzonych we współczesnych komputerach modeli neurocybernetycznych dochodzimy do wniosku, że jest to proporcja podobnego rzędu, jak stosunek objętości całej kuli ziemskiej do objętości główki szpilki (Ryc. 19).

Nie znaczy to jednak, że modele neurocybernetyczne muszą być tak bardzo ubogie w stosunku do wszystkich znanych systemów nerwowych zwierząt. Wprawdzie w przypadku krewetki czy muchy nie można mówić o mózgu jako takim, ale z pewnością stworzenia te mają sprawny system nerwowy, dzięki któremu mogą odbierać bodźce pochodzące z otoczenia, sterować swoim zachowaniem i osiągać zamierzone cele (zdobycie pożywienia, ucieczka przez zagrożeniem, czynności związane z rozmnażaniem



Ryc. 20. Porównanie złożoności budowy i sprawności funkcjonowania różnych systemów neurocybernetycznych – naturalnych i sztucznych. Omówienie w tekście.

Ryc. 21 „Farma komputerów" przystosowana do modelowania dużych systemów neurocybernetycznych (pokazano Linux cluster CCortex).

Ryc. 22. Przyszłe modele neurocybernetyczne będą lokowane na superkomputerach, takich jak Prometheus. (źródło: http://www.wiz.pl/images/pro2.jpg, dostęp 12.12.2017)

itp.). Na rycinie 20 można zobaczyć, jak silnie zróżnicowane są pod względem złożoności budowy i sprawności funkcjonowania systemy nerwowe różnych istot żywych. Należy podkreślić, że zarówno oś pozioma, opisana „*Structural complexity of the system (number of synapses)*" (Strukturalna złożoność systemu mierzona liczbą synaps), jak i oś pionowa, opisana „*Speed of the system functioning*" (Szybkość działania systemu) są wyskalowane logarytmicznie. Oznacza to, że jednakowe odstępy na tych osiach oznaczają odpowiednie wartości dziesięciokrotnie zwiększone: 10, 100, 1000, 10000, 100000 itd. Wprawdzie osie nie są wyskalowane (nie podano konkretnych wartości w konkretnych miejscach), ale proporcje można odczytać. Na rysunku tym widać, że nasze modele neurocybernetyczne są na razie bardzo ubogie. Zarówno pod względem stopnia złożoności, jak pod względem szybkości działania ustępują nawet systemowi nerwowemu muchy, nie mówiąc o ssakach, a zwłaszcza o człowieku. Ale po pierwsze istnieją żywe stworzenia, których system nerwowy potrafimy już zamodelować w skali 1:1. Na rysunku zaznaczono krewetkę, ale szeroko znany jest też (dostępny w Internecie) zamodelowany dokładnie „mózg" karalucha. Tak więc „przyczółek" neurocybernetyka już uchwyciła, a rozwiązania sprzętowe (na przykład optoelektroniczne) mogą osiągać szybkość działania (ale nie złożoność strukturalną) porównywalną z systemem nerwowym muchy albo pszczoły. Nowe możliwości w tym zakresie stworzy zapewne tak zwane głębokie uczenie (*deep learning*) [1].

Rozwój modeli neurocybernetycznych zmierza do tego, żeby budować modele obejmujące coraz więcej neuronów. W tym celu buduje się specjalne „farmy komputerowe" (Ryc. 21).

Swoją rolę w tych badaniach z pewnością odegrają też superkomputery, takie jak krakowski *Prometheus* pracujący w Akademickim Centrum Komputerowym **Cyfronet AGH,** który jest notowany na 48 miejscu na liście najszybszych i największych komputerów świata (Ryc. 22).

Bibliografia

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.: *Deep learning,* MIT Press, 2016
2. Rashid T.: *Make Your Own Neural Network*, Amazon Copyrighted Material, March31, 2016, https://www.amazon.com/gp/product/1530826608/ref=as_li_tl?ie=UTF8&camp=1789&creative=9325&creativeASIN=1530826608&linkCode=as2&tag=aiop04-20&linkId=413c43cb7dea61f0b79baa5a61ee7193
3. Tadeusiewicz R., Gąciarz T., Borowik B., Leper B.: *Odkrywanie właściwości sieci neuronowych przy użyciu programów w języku C#*, Wydawnictwo Polskiej Akademii Umiejętności, ISBN 978-83-60183-53-4, Kraków 2007 Pełny tekst książki dostępny pod adresem: http://otworzksiazke.pl/ksiazka/odkrywanie_wlasciwosci_sieci_neuronowych/
4. Tadeusiewicz R. (ed.): *Neurocybernetyka teoretyczna*, ISBN 978-83-235-0479-5, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2009

Prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz, Prezes Krakowskiego Oddziału PAN, Kierownik Katedry Automatyki AGH, Absolwent AGH 1971, informatyk, automatyk, biocybernetyk. W latach 1998–2005 Rektor AGH. Doktor Honoris Causa 12 uczelni krajowych i zagranicznych. Pełne dane: www.Tadeusiewicz.pl

DIAGNOZOWANIE I LECZENIE GUZOW MÓZGU U LUDZI

Kamila Pawlicka, Anna-Maria Barciszewska, Katarzyna Rolle, Jan Barciszewski (Poznań)

Streszczenie

Glejak wielopostaciowy (glioblastoma) jest najczęściej występującą postacią nowotworu glejopochodnego mózgu u dorosłych. Komórki glejaka charakteryzują się niekontrolowaną proliferacją, dynamiczną angiogenezą, inwazyjnym wzrostem, zdolnością do unikania apoptozy i naciekania sąsiadujących tkanek mózgu.
Najczęściej stosowanym podejściem terapeutycznym w leczeniu wysokozłośliwych glejaków jest połączenie resekcji chirurgicznej z chemio- i radioterapią. Średni czas przeżycia chorych, mimo wdrożenia intensywnego leczenia, często nie przekracza jednego roku.