

ANALIZA SYSTEMOWA I ZARZĄDZANIE

Książka jubileuszowa
z okazji
50-lecia pracy naukowej

ROMANA KULIKOWSKIEGO

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN
Warszawa 1999

ISBN 83-85847-34-0

Druk: "ARGRAF" Agencja Poligraficzno-Wydawnicza, Warszawa
Skład: Barbara Katuszewska

PODSTAWOWE PROBLEMY SYNERGETYKI

Stanisław Paszkowski

Instytut Automatyki i Robotyki WAT

1. Uwagi wstępne

Przedmiotem intensywnych badań są złożone obiekty zwane *systemami wielkimi*. Jako przykłady można wymienić: system elektroenergetyczny, system obrony przeciwlotniczej, zakład produkcyjny, system masowej obsługi oraz system teleinformatyczny.

W złożonym obiekcie jego obiekty składowe, niezależnie od ich rodzaju, mogą uczestniczyć w realizacji ogólnego celu.

Do rozwoju wiedzy o złożonych obiektach, systemach wielkich, wnieśli istotny wkład polscy uczeni Roman Kulikowski, Władysław Findeisen i Jakub Gutenbaum. Ich publikacje oraz referaty na krajowych i zagranicznych konferencjach zawsze przedstawiały ważne zagadnienia z tej nowoczesnej i ważnej dziedziny nauki [23-25].

W złożonych obiektach występują chaos, uporządkowanie, organizacja i samoorganizacja. Tymi zjawiskami zajmuje się dziedzina nauki zwana synergetyką.

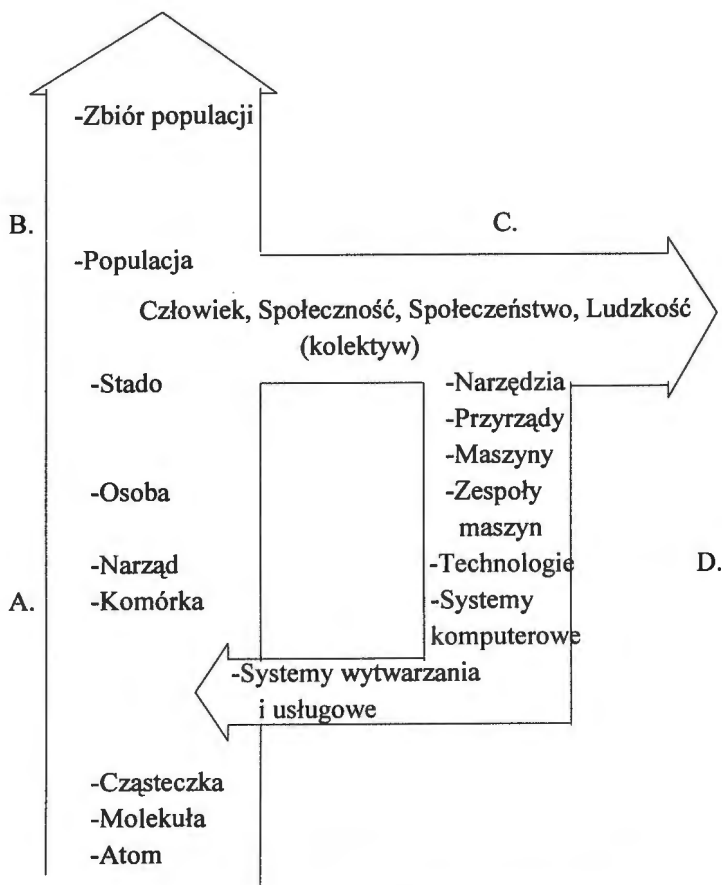
2. Pojęcie synergetyki

Nazwę synergetyka wprowadził Herman Haken, profesor fizyki w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Synergetyki na Uniwersytecie w Stuttgarcie w publikacji „*Synergetics. Is self-organization governed by universal principles?*” (1981), i rozwinął w licznych publikacjach, w szczególności [1-6].

Synergia oznacza współdziałanie ze wzajemnym potęgowaniem działania, to znaczy, że działanie dwu czynników może być większe niż suma ich działań. *Synergetyka*, jest dziedziną nauki, zajmującą się zagadnieniami kolektywnego

współdziałania obiektów składowych, chaosu, zorganizowania, samoorganizacji, struktur itp.

Właściwości makroobiektu (całości) są zależne od właściwości obiektów składowych (części), ale też od ich współdziałania, czyli synergii.



Rys. 1. Hierarchia makroobiektów i obiekty składowe

Tematyka chaosu, organizacji i samoorganizacji w makroobiektach wcześniej była podejmowana przez wielu autorów. W książce [8] *Principles of self-organization* (1962), przedstawiono materiały sympozjum poświęcone w całości tej tematyce. W tym zbiorze jest interesujący referat Ashby'ego *Zasady samoorganizacji*. W 1977 r. Nicols i Prigogine wydali książkę na temat samoorganizacji w systemach będących w stanach nierównowagi. W 1978 r. odbył się kongres

naukowy poświęcony całkowicie problematyce uporządkowania, fluktuacjom i chaosowi, występującym w złożonych obiektach nazywanych dalej *makroobiek-
tami*.

Przedmiotem badania synergetyki są makroobiekty składające się z różnego typu *obiektów składowych* (elementów, podsystemów, wydzielonych części). Rozpatruje się problemy wzajemnego oddziaływania (powiązania, zależności obiektów składowych) na siebie i na całość. Na tym tle szczególnym przedmiotem badania synergetyki są procesy samoorganizacji, powstawanie przestrzennych i czasowych struktur oraz zachowanie się makroobektu jako całości w swoim otoczeniu. Bada się takie zjawiska jak: chaos, uporządkowanie, przejście od chaosu do uporządkowania, mechanizmy samoorganizacji, itp.

Podstawowy problem synergetyki wiąże się z wykryciem ogólnych zasad samoorganizacji, warunków przejścia od chaosu do zorganizowanego działania oraz wpływanie z zewnątrz na te procesy.

Autorzy wielu prac z synergetyki rozpatrują makroobiekty i ich obiekty składowe na różnych poziomach naturalnej hierarchii. Ogólny schemat takich hierarchii przedstawiono na rys. 1.

Wspólnymi cechami tych makroobektów są:

- wielka liczba obiektów składowych, tworzących makroobiekty,
- przy pewnych parametrach wewnętrznych lub zewnętrznych w makroobiekcie powstają stabilne struktury i działania.

3. Makroobekt i obiekty składowe

3.1. Obiekt składowy

Dowolny obiekt materialny lub konceptualny (będący konstrukcją myślową człowieka) wyodrębniony z otoczenia, powiązany z nim przez oddziaływania (więzy, relacje), będziemy nazywać *obiektem składowym*. Obiekt składowy może istnieć tylko w otoczeniu. Z punktu widzenia synergetyki bez otoczenia nie ma obiektu składowego.

Otoczeniem (środowiskiem) obiektu składowego jest wszystko to, co jest z nim związane i nie należy do niego. Obiekt składowy jest powiązany z otoczeniem, a także z innymi obiektami składowymi, poprzez oddziaływania fizyczne, informacyjne, więzy, relacje, powiązania funkcjonalne.

Jako przykłady obiektów składowych można wymienić:

- komórki i narządy w organizmach biologicznych,
- człowiek we wspólnocie lub społeczeństwie,
- komputer w sieci informatycznej,
- neuron w sztucznej sieci neuronowej.

W dużym skrócie można powiedzieć, że obiekty składowe charakteryzują się następującymi podstawowymi właściwościami:

- Zdolność do powiązań, oddziaływań, komunikowania się z otoczeniem. Bez otoczenia nie ma makroobektu, który oddziałuje na otoczenie jako całość.
- Stabilność rozumiana jako zdolność do zachowania określonej właściwości (cechy) przy oddziaływaniach naruszających daną właściwość.
- Istnienie mechanizmu zmian (wyboru) stanu obiektu składowego lub sytuacji. Przedmiotem wyboru mogą być stany charakterystyk, sytuacje, w których znajduje się obiekt składowy, zadanie, procedury, struktury i organizacja obiektu składowego.
- Istnienie celu działania obiektu składowego ustalonego przez użytkownika lub rozpatrywanego przez badacza. Cel określa proces zachowania się obiektu składowego oraz wpływa na mechanizm wyboru jego stanu.

3.2 Makroobekt

Makroobekt złożony z wielu współdziałających ze sobą i z otoczeniem obiektów składowych jest podstawowym obszarem zainteresowania synergetyki. Makroobekt jako całość ma swoje charakterystyki i właściwości, są określone jego stany (sytuacje), które oddziałują na otoczenie.

Wyróżnia się 3 podstawowe typy makroobektów:

- *Zbiorowisko*. Obiekty składowe oddziałują na siebie, przy czym żaden nie ma celu działania. Zbiorowisko oddziałuje na otoczenie jako całość, jednak nie ma wspólnego celu działania. W zbiorowisku może występować chaos, przechodzenie od chaosu do uporządkowania i odwrotnie. Powyższe procesy zachodzą często pod wpływem czynników zewnętrznych. Przykładem takich makroobektów są: kryształy, przemiany fazowe, lasery, gaz w zamknięciu, plazma, itp.
- *Grupa (stado)*. Obiekty składowe oddziałują na siebie, każdy ma swój cel działania. Grupa oddziałuje na otoczenie jako całość, ale nie ma wspólnego celu działania. Brak jest organizacji i struktur. Mogą występować procesy upo-

rządkowania. Przykładami makroobiektem tej klasy może być: populacja organizmów żywych, sieci neuronowe, pewne systemy ekonomiczne itp.

- *System*. Obiekty składowe oddziałują na siebie, każdy ma swój cel działania. System oddziałuje na otoczenie jako całość, ma wspólny cel działania. System ma swoją organizację i strukturę, co zapewnia mu realizację funkcji. Mogą być również mechanizmy wewnętrzne, które zapewniają procesy samoorganizacji i rozwoju. Powyższe mechanizmy zwiększają uporządkowanie.

Makroobiekty typu *system* są przedmiotem intensywnych badań synergetyki. Poszukuje się metod konstruowania wewnętrznych mechanizmów doskonalenia, samoorganizacji, rozwoju i adaptacji do warunków otoczenia. Prosty przykładem jest zakład produkcyjny.

4. Podstawowe zjawiska występujące w makroobiekcie

4.1. Uporządkowanie a chaos

Istnienie powiązań pomiędzy obiektami składowymi i ich stanami, istnienie relacji pomiędzy zdarzeniami zachodzącymi w czasie, powoduje powstanie korelacji tzn. przyporządkowania, odpowiedniości pomiędzy powyższymi zjawiskami. Korelacje są ogólnymi charakterystykami makroobiektem, które nazywa się uporządkowaniem.

Uporządkowanie (porządek) w makroobiekcie powstaje na podstawie ogólnej relacji porządkującej, wynikającej bezpośrednio z istniejącej korelacji. Relacja porządkująca wskazuje na to, co jest pierwsze, a co dalsze, co jest przyczyną, a co skutkiem, co z czym i jak jest powiązane, co jest bliżej wzorca, a co dalej.

Koncepcja uporządkowania wynika więc bezpośrednio z przestrzenno-czasowej, często statystycznej korelacji. Czym większa jest korelacja pomiędzy zdarzeniami, i stanami obiektów składowych, tym większy jest stopień uporządkowania w danym makroobiekcie.

Należy zauważyć, że badanie przestrzenno-czasowych korelacji (uporządkowania, chaosu) pomiędzy obiektami składowymi i ich wpływu na całość daje ważną informację o makroobiekcie i jest przedmiotem zainteresowania synergetyki.

Istotnym zjawiskiem występującym w makroobiekcie jest proces przechodzenia od uporządkowania do chaosu i odwrotnie. Takie zjawisko występuje w tzw. otwartych makroobiekcie. Otwartość polega na wymianie z otoczeniem energii, materii, informacji a nawet całych obiektów składowych. Za pomocą

zewnętrznego strumienia tych czynników można spowodować w makroobiekcie uporządkowanie lub chaos oraz wywołać skokowe zmiany w strukturze i funkcjonowaniu makroobektu.

4.2. Organizacja makroobektu. Stopień zorganizowania

Organizacja makroobektu jest to zespół wszystkich właściwości, wynikiem działania których jest jego zachowanie się i wykonywanie funkcji wpływających na osiągnięcie celu. Organizacja makroobektu wyraża się przez skład i rodzaj obiektów składowych, wykonywane przez nie funkcje, rodzaje wzajemnych powiązań i oddziaływań, korelacje pomiędzy obiektami składowymi i ich stanami oraz zdarzeniami występującymi w funkcji czasu. Ogólnie można powiedzieć, że organizacja makroobektu jest pochodną jego uporządkowania.

W organizacji makroobektu często występują mechanizmy porządkujące działania i uzgodnienia działań tak, aby zapewnić wypełnienie jego funkcji w danym i zmieniającym się otoczeniu. Powyższe mechanizmy są wynikiem sterowania w makroobiekcie. Sterowanie wymusza pożądany przebieg istotnych zmiennych, koordynuje działania obiektów składowych, wyznacza cele działania, generuje programy, kontroluje przebieg ich realizacji, oraz dostosowuje wewnętrzne powiązania i struktury tak, aby makroobekt dążył do osiągnięcia celu.

Wprowadza się globalną charakterystykę makroobektu, jaką jest *stopień zorganizowania*. Stopień zorganizowania odnosi się do wzorca, jakim jest „idealne” osiągnięcie celu. Czym mniejszy jest stopień zorganizowania, to tym „większa odległość” jest od idealnego działania i może pojawić się zjawisko chaosu tzn., pogarsza się uporządkowanie.

Częścią składową organizacji makroobektu jest jego struktura. *Strukturą makroobektu* nazywa się stabilne (czasami w sensie statystycznym) uporządkowanie w przestrzeni i w czasie obiektów składowych, stanów, zdarzeń oraz powiązań. Struktura podporządkowana jest funkcji i celowi działania makroobektu. Struktura jest właściwością makroobektu najbardziej zachowawczą. Zmiana jej występuje w procesie doskonalenia lub dla realizacji nowych zadań. W makroobektach otwartych przy zmianie strumienia czynników zewnętrznych mogą występować skokowe zmiany struktury aż do pojawienia się pełnej katastrofy.

5. Samoorganizacja w makroobiekcie

W wielu makroobektach (fizycznych, biologicznych, technicznych, ekonomicznych, wojskowych) występuje zjawisko zmian stopnia zorganizowania.

Zmiany te mogą przebiegać w kierunku zwiększania stopnia zorganizowania, co można nazwać procesem organizacyjnym lub zmniejszenia tego stopnia, co nazywa się procesem dezorganizacyjnym. Jeżeli wzrost stopnia zorganizowania występuje w wyniku działania mechanizmów wewnętrznych, to zachodzi proces samoorganizacji w makroobiekcie. Zdolność makroobektu do zachowania (podtrzymania istniejących właściwości) lub do utworzenia i rozwoju jego funkcji (właściwości) w zmiennym otoczeniu nazywa się samoorganizacją. Procesy samoorganizacji zawsze prowadzą do wzrostu uporządkowania w makroobiekcie.

Rozróżnia się trzy rodzaje procesów samoorganizacji:

- Procesy *powstawania* (tworzenia) zarodków organizacji w makroobiekcie. Zakłada się istnienie początkowej struktury, zbioru możliwych funkcji i struktur - ogólnie potencjału możliwości, z którego powstanie organizacja realizująca cel makroobektu. Zwykle początkowa struktura występuje w postaci sieci (np. sztuczna sieć neuronowa). Początkowa struktura powinna zawierać nadmiar możliwości realizacji celu.
- Procesy *adaptacji*, dostosowywania się do zmian w otoczeniu i zmian w samym makroobiekcie. Procesy dostosowawcze powinny zapewnić zachowanie istniejącego stopnia zorganizowania. Ten rodzaj samoorganizacji zakłada możliwość zmian struktury makroobektu oraz parametrów i funkcji poszczególnych obiektów składowych.
- Procesy *rozwoju* wyrażające się w doskonaleniu funkcji i właściwości makroobektu. Występują tu procesy uczenia się, wykorzystywania doświadczeń z przeszłości oraz informacji z zewnątrz. Procesy rozwoju zakładają możliwość zmiany struktury, zmian funkcji i właściwości poszczególnych obiektów składowych oraz tworzenia nowej organizacji dostosowawczej do realizacji nowych zadań.

Powyższe rodzaje procesów samoorganizacji często występują jednocześnie.

Podstawowe cechy makroobektów posiadających samoorganizację to:

- Zmienność (możliwość zmian) właściwości obiektów składowych i ich powiązań.
- Możliwość selekcji obiektów składowych, które są włączane w struktury i organizację makroobektu. Zakłada się istnienie nadmiaru obiektów składowych o różnych właściwościach. Jest to podstawowy mechanizm samoorganizacji.
- Zmienne liczby i różnorodność obiektów składowych, które tworzą zasoby makroobektu. Ustalenie odpowiedniego zasobu obiektów składowych w po-

czątkowym stanie organizacji jest ważnym problemem teoretycznym synergetyki. Ustalenie liczby obiektów składowych zdolnych do gromadzenia i przetwarzania informacji, w tym wytwarzających decyzje, ma podstawowe znaczenie dla efektywnego procesu samoorganizacji.

- Istnienie w obiektach składowych zdolności do nawiązywania kontaktów, powiązań, sposobów wzmacniania lub zmniejszania tych powiązań, zanikanie niektórych powiązań i powstawanie nowych, np. w sztucznej sieci neuronowej.
- Istnienie wśród obiektów składowych takich, które mają właściwości instruktywne, tzn. zawierają informacje o podstawowych funkcjach i koordynacji działań niezbędnych do właściwego zachowania się makroobiektem np. DNA. Istnienie w makroobiekcie mechanizmu selekcji (wyboru).

Badania wskazują [1], że na procesy samoorganizacji wpływają głównie trzy parametry makroobektu:

- Intensywność przyrostu liczby obiektów składowych (odpowiednio zróżnicowanych) przez co dokonują się zmiany struktur (konfiguracji) makroobektu.
- Intensywność wykorzystania obiektów składowych w procesie funkcjonowania makroobektu.
- Wielkość zewnętrznego, globalnego oddziaływania na obiekty składowe (strumienie w otwartych makroobektach).

Dopływ do makroobektu nowych obiektów składowych może wpłynąć na zmiany w strukturze, na uporządkowanie i powstawanie nowych powiązań, które spowodują wyższy stopień zorganizowania. Często pojawienie się nowego obiektu składowego o określonych właściwościach powoduje rozprzestrzenianie się tej właściwości na sąsiednie obiekty składowe (takie zjawisko występuje w wielu procesach chemicznych i biologicznych).

Podobnie, na zmiany w wewnętrznej organizacji makroobektu ma wpływ stopień wykorzystania właściwości obiektów składowych. Dotyczy to głównie tych obiektów składowych, które spełniają funkcje organizatorskie w makroobiekcie.

Zanik istnienia makroobektu (rozpad, śmierć) może wystąpić w dwu przypadkach:

- Globalne oddziaływanie z zewnątrz lub fluktuacje wewnętrzne mogą prowadzić do zaniku poszczególnych obiektów składowych lub do zniszczenia powiązań i utratę zdolności do wypełniania swoich funkcji.
- Zanik zdolności do wykorzystania informacji o obiektach składowych i otoczeniu (brak sprzężenia zwrotnego od obiektów składowych i oddziaływania otoczenia). Makroobiekt działa w oderwaniu od otoczenia. Narusza to mechanizmy samoorganizacji, osłabienie zdolności adaptacyjnych do zmieniającego się otoczenia. Prowadzi to do dezorganizacji i w końcu do zaniku celowego działania makroobektu.

6. Modele matematyczne makroobektów

Modele matematyczne, służące do opisu procesów samoorganizacji (przejścia od chaosu do uporządkowania, zmian skokowych w organizacji makroobektu) należą do klasy modeli nieliniowych.

- H. Haken [1] podaje ogólne równanie, opisujące makroobiekt dla potrzeb synergetyki, w postaci równań różniczkowych cząstkowych charakteru stochastycznego.
- V. Lerner z Uniwersytetu Kalifornijskiego w pracy [19] rozpatruje komputerową metodologię badania rozwiązań ogólnego modelu matematycznego, opisującego zjawiska występujące w makroobektach z obszaru technologii, inżynierii, biologii, mikroelektroniki, edukacji i sztucznej inteligencji.
- Chakrabarti i G. Sutapa [20] przedstawiają modele matematyczne stopnia zorganizowania makroobektu, w postaci sumy entropii obiektów składowych pomniejszonej o entropię makroobektu.

7. Podsumowanie

Przedmiotem zainteresowania synergetyki są makroobiekty zawierające wiele obiektów składowych. W działaniach kolektywnych, występujących w makroobektach, bada się zjawiska współdziałania poszczególnych obiektów składowych, ich wpływ na cały makroobiekt oraz jego oddziaływanie na otoczenie i otoczenia na zachowanie się makroobektu.

Podstawowym zjawiskiem, które bada synergetyka jest uporządkowanie i chaos w działaniach makroobektu. Następnym przedmiotem badania są organizacja, struktura, stopień zorganizowania.

Najważniejszym problemem w badaniu makroobiekta jest mechanizm samoorganizacji. Mechanizm ten często wynika z procesów sterowania makroobiektem.

Modele matematyczne opisujące powyższe zjawiska są złożonymi równaniami typu nieliniowego.

Przykładami technicznych makroobektów, które mogą być przedmiotem zainteresowania synergetyki są:

- System sztucznej inteligencji, w tym systemy rozpoznawania obrazów, systemy uczenia się, sztuczne sieci neuronowe.
- Systemy teleinformatyczne, zawierające rozległe sieci komputerowe, łączności i usług informacyjnych.
- Systemy logistyczne, w tym system zaopatrzenia z magazynami, źródłami zaopatrzenia i transportem.
- Systemy symulacyjne, zestawy do szkolenia specjalistów, trenażery, systemy rzeczywistości wirtualnej z modelowaniem warunków otoczenia i ich wpływu na funkcjonowanie człowieka.

Literatura

1. Haken H.: *Synergetics, an introduction*. Springer 1997.
2. Haken H.: *Advanced synergetics*. Springer 1983.
3. Haken H.: *Information and self-organization: macroscopic approach to complex systems*. Springer 1990.
4. Haken H.: *Principles of brain activity, behavior, and cognition*. Springer 1996.
5. Haken H.: *Basic concepts of synergetics*. Applied Physics A, 57, 1993.
6. Haken H.: *Synergetic computers for pattern recognition*. Pergamon, Pattern Recognition, Vol.27, No 12, 1994.
7. Helbing D., Molnar P.: *Self-organization of complex structures: from individual to collective dynamics*, Vol. II, 1997.
8. *Principles of self-organization*. Pergamon Press, 1962.
9. Gorskij J.: *Sistiemno-informacjonnyj analiz procesow uprawlenija*. Nauka, Moskwa 1988.
10. Pietruszenko L. A.: *Samodwizenije materii w swiecie kibernetiki*. Nauka, Moskwa 1971.
11. *Self-organizing systems*. Pergamon Press, 1960 (*Samoorganizujusziesja Sistiemy*, Nauka, Moskwa 1964).

12. Warszawskij W. I., Pospelow D. A.: *Orkiestr igrajet bez diriżora*. Nauka, Moskwa 1984.
13. Careri G.: *Ordine e disordine nella materia*. 1982 (*Poriadok i bezporiadok w strukturie materii*, Mir, Moskwa 1985).
14. Prigogine I., Stengers I.: *Z chaosu ku porządkowi*. PIW, Warszawa 1990.
15. Atkins P. W.: *The second law*. 1984, (*Poriadok i bezporiadok w prirodzie*, Mir 1987).
16. Paszkowski S.: *Podstawowe pojęcia teorii systemów i sterowania automatycznego*. WAT, 1990.
17. Thom R.: *Parabole i katastrofy*. PIW, Warszawa 1991.
18. Arnold W.: *Tieoria katastrof*. Nauka, Moskwa 1990.
19. Lerner V.: *Mathematical foundations of the informational macrodynamics*. System Analysis, Modeling, Simulation, Vol. 26, No 1-4, 1996.
20. Chakrabati C., Sutapa G.: *Eutropic model and analysis of complex systems*. System Analysis, Modeling, Simulation, Vol. 23, No 1-2, 1996.
21. Ivakhnenko A., Muller J.: *Self - organization of nets of active neuros*. Systems Analysis, Modeling, Simulation, Vol. 20, No 1-2, 1995.
22. *Świat żywych komórek*. PWN, Warszawa 1965.
23. Findeisen W.: *Struktury sterowania dla złożonych systemów*. Oficyna Wydawnicz Politechniki Warszawskiej, Warszawa. 1997.
24. Kulikowski R.: *Sterowanie w wielkich systemach*. WNT, Warszawa 1974.
25. Gutenbaum J.: *Modelowanie matematyczne systemów*. PWN, Warszawa 1992.

ISBN 83-85847-34-0