POLSKIE TOWARZYSTWO CYBERNETYCZNE

N. Wiener

SERIA: INFORMACJA I STEROWANIE

cybernetyka

czyli sterowanie i komunikacja w zwierzęciu i maszynie

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOW

Dane oryginału

CYBERNETICS OR CONTROL AND COMMUNICATION IN THE ANIMAL AND THE MACHINE

NORBERT WIENER

second edition
The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
Copyright © 1948 and 1961 by the Massachusetts Institute of Technology

Tłumaczył
Jerzy Mieścicki

Okładkę i obwolutę projektował
Stanisław Zamecznik

Redaktor
Piotr Ligęziński

Redaktor techniczny
Maria Żmirek

109 319

Korektor
Lidia Czerwińska

POLSKIE TOWARZYSTWO CYBERNETYCZNE
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

INFORMACJA I STEROWANIE

Seria poświęcona tematyce cybernetycznej

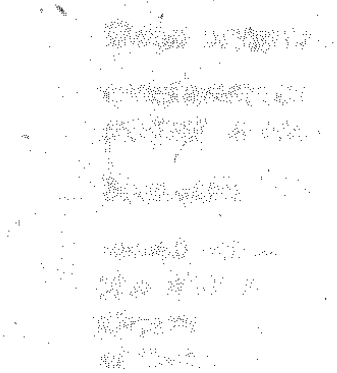
NORBERT WIENER

CYBERNETYKA

CZYLI STEROWANIE I KOMUNIKACJA W ZWIERZĘCIU I MASZYNIE

WARSZAWA 1971
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

autonom.edu.pl



SPIS RZECZY

Przedmowa do drugiego wydania 9

Część I **WYDANIE PIERWOTNE 1948**

Wstęp 23
I Czas newtonowski i czas bergsonowski 57
II Grupy i mechanika statystyczna 74
III Szeregi czasowe, informacja i wymiana informacji 91
IV Sprzężenie zwrotne i drgania 130
V Maszyny liczące a układ nerwowy 154
VI Gestalt i pojęcia ogólne 174
VII Cybernetyka a psychopatologia 187
VIII Informacja, język i społeczeństwo 200

Część II **DODATKOWE ROZDZIAŁY 1961**

IX O maszynach uczących się i samoreprodukujących się 215
X Fale mózgowe i układy samoorganizujące się 229
Skorowidz 255

PRZEDMOWA DO DRUGIEGO WYDANIA

Gdy mniej więcej trzynaście lat temu przygotowywałem pierwsze wydanie *Cybernetyki*, pewne poważne przeszkody spowodowały, że spiętrzyło się w nim wiele godnych pożałowania błędów drukarskich i kilka błędów rzeczowych. Jestem przekonany, że nadszedł czas, by zastanowić się nad cybernetyką ponownie; nie jak nad programem naukowym, który ma być realizowany w przyszłości, lecz jak nad nauką już istniejącą. Dlatego skorzystałem z okazji, by oddać niezbędne poprawki w ręce moich czytelników i jednocześnie przedstawić im dodatkowe szczegóły opisujące obecny stan przedmiotu i nowe, związane z jego tematyką poglądy, które narodziły się od czasu pierwszego wydania.

Jeśli nowa dziedzina nauki wykazuje prawdziwą żywotność, to ośrodek jej zainteresowań musi — i powinien — przesuwać się w miarę upływu lat. Kiedy pisałem *Cybernetykę* po raz pierwszy, za najpoważniejszą przeszkodę w osiągnięciu celu uważałem fakt, że pojęcia z dziedziny statystycznej teorii informacji i sterowania stanowią nowość, a nawet chyba wstrząs w stosunku do ugruntowanych wówczas poglądów. Obecnie stały się one dla inżynierów od spraw telekomunikacji i projektantów automatycznych układów sterowania narzędziem tak dobrze znanym, że główne niebezpieczeństwo, przed którym muszę ostrzec, polega na tym, że niniejsza książka może wydawać się im czymś wyświechtanym i pełnym komunałów. Zarówno w dziedzinie techniki, jak i biologii rola sprzężenia zwrotnego dobrze ugruntowała się. Znaczenie informacji oraz metody jej mierzenia i przekazywania tworzą całą dziedzinę wiedzy dla inżyniera, fizjologa, psychologa i socjologa. Automaty, których istnienie dopiero przewidywałem w pierw-

szym wydaniu niniejszej książki, znalazły już uznanie, a wiążące się z nimi niebezpieczeństwa natury społecznej, przed którymi ostrzegałem wówczas nie tylko w niniejszej książce, ale również w jej małej, popularnej krewniaczce *Cybernetyka i społeczeństwo*[1] — znalazły się już na dobre w zasięgu naszego wzroku. Wypada zatem, by cybernetyk przeniósł się na nowe tereny i poświęcił wielką część swoich zainteresowań koncepcjom, które wyrosły z osiągnięć ostatniego dziesięciolecia. Proste, liniowe sprzężenia zwrotne, których badanie miało tak wielkie znaczenie dla obudzenia u naukowców świadomości co do wagi badań w dziedzinie cybernetyki — obecnie zdają się być jeszcze prostsze i jeszcze bardziej liniowe, niż wydawało się nam na pierwszy rzut oka. W początkach teorii obwodów elektrycznych systematyczne, matematyczne metody postępowania w przypadkach złożonych obwodów nie wykraczały w istocie poza liniowe połączenia oporności, pojemności i indukcyjności. Znaczy to, że całą tę dziedzinę można było we właściwy sposób opisać przy użyciu pojęć analizy harmonicznej sygnałów, impedancji, admitancji i stosunków napięć w obwodach, przez które te sygnały przechodzą.

Na długo przed opublikowaniem *Cybernetyki* zaczęto uświadamiać sobie, że badania obwodów nieliniowych (występujących w licznych wzmacniaczach, ogranicznikach napięcia, prostownikach itp.) nie dadzą się łatwo wtłoczyć w te ramy. Niemniej jednak, w poszukiwaniu lepszej metodologii, podejmowano liczne wysiłki, by rozciągnąć liniowe pojęcia dawnej elektrotechniki daleko poza punkt, w którym nowsze rodzaje urządzeń mogą być jeszcze przy ich użyciu opisane w naturalny sposób.

Kiedy przybyłem do MIT[2], około 1920 roku, do zagadnień urządzeń nieliniowych podchodzono w ten sposób, że poszukiwano bezpośredniego rozszerzenia pojęcia impedancji tak, by obejmowało ono zarówno układy liniowe, jak i nieliniowe. W rezultacie badania w dziedzinie elektrotechniki obwodów nieliniowych zbliżały się do stanu porównywalnego z ostatnim stadium rozwoju ptolemejskiego systemu astronomicznego, gdzie epicykl piętrzył się na epicyklu, poprawka na poprawce, aż wreszcie cała wielka koronkowa budowla zwaliła się pod własnym ciężarem.

[1] Wiener N., *The Human Use of Human Beings, Cybernetics and Society*, Boston 1950, Houghton Mifflin Company; również tłumaczenie polskie: Wiener N., *Cybernetyka i społeczeństwo*, Warszawa 1960, Książka i Wiedza.

[2] MIT — Massachusetts Institute of Technology.

System kopernikański, dysponujący prostym i naturalnym heliocentrycznym opisem ruchów ciał niebieskich, zamiast skomplikowanego i nieprzejrzystego geocentrycznego opisu Ptolemeusza, wyrósł na gruzach przeładowanego systemu ptolemejskiego. Podobnie, badania nad strukturami i układami nieliniowymi, elektrycznymi czy mechanicznymi, naturalnymi czy sztucznymi, wymagają obrania świeżego, niezależnego punktu wyjścia. Usiłowałem zapoczątkować takie nowe podejście w książce *Nonlinear Problems in Random Theory*[1]. Okazało się, że analiza trygonometryczna, która ma decydujące znaczenie dla zjawisk liniowych, przestaje mieć decydujące znaczenie, jeśli przejdziemy do rozpatrywania zjawisk nieliniowych. Istnieje jasna, matematyczna przyczyna tego stanu rzeczy. Zjawiska w obwodach elektrycznych, podobnie, jak liczne inne zjawiska fizyczne, charakteryzują się niezmienniczością względem przesunięcia w czasie. Eksperyment fizyczny, który zaczęty w południe, osiągnął pewne stadium o godzinie 14, osiągnąłby to samo stadium o 14^{15}, gdyby rozpoczął się o 12^{15}. Prawa fizyki dotyczą zatem niezmienników grupy przesunięć w czasie.

Trygonometryczne funkcje $\sin nt$ oraz $\cos nt$ mają pewne ważne niezmienniki względem tej samej grupy przesunięć. Funkcja

$$e^{i\omega t}$$

pod wpływem przesunięcia, które otrzymujemy przez dodanie τ do t przechodzi w funkcję

$$e^{i\omega(t+\tau)} = e^{i\omega\tau} e^{i\omega t}$$

mającą tę samą postać. W konsekwencji

$$a\cos n(t+\tau) + b\sin n(t+\tau) = (a\cos n\tau + b\sin n\tau)\cos nt + \\ + (b\cos n\tau - a\sin n\tau)\sin nt = a_1\cos nt + b_1\sin nt.$$

Inaczej mówiąc, rodziny funkcji

$$A\,e^{i\omega t}$$

oraz

$$A\cos\omega t + B\sin\omega t$$

są niezmiennicze względem przesunięcia.

---

[1] Wiener N., *Nonlinear Problems in Random Theory*, New York 1958, The Technology Press of MIT and John Wiley & Sons, Inc.

Istnieją również inne rodziny funkcji, które są niezmiennicze względem przesunięć. Jeśli rozważymy tak zwane błądzenia przypadkowe, w których ruch cząstki w dowolnym przedziale czasu ma rozkład zależny jedynie od długości tego przedziału, a niezależny od wszystkiego, co wydarzyło się przed jego początkiem, to stwierdzimy, że zbiór tych błądzeń również przechodzi w siebie pod wpływem przesunięcia w czasie.

Innymi słowy, sama niezmienniczość względem przesunięcia jest właściwością, którą mają oprócz krzywych trygonometrycznych również inne zbiory funkcji.

Właściwość, która jest ponadto charakterystyczna dla funkcji trygonometrycznych, polega na tym, że

$$A\,e^{i\omega t}+B\,e^{i\omega t}=(A+B)\,e^{i\omega t},$$

tak że funkcje te tworzą bardzo prosty zbiór liniowy. Zauważmy, że własność ta stanowi o liniowości, czyli mówi, że wszystkie drgania o danej częstotliwości możemy sprowadzić do liniowej kombinacji dwóch drgań. Jest to właśnie ta specyficzna cecha, która stanowi o wartości analizy harmonicznej przy badaniu liniowych właściwości obwodów elektrycznych. Funkcje

$$e^{i\omega t}$$

są charakterami grupy przesunięć i pozwalają na liniowe przedstawienie grupy.

Kiedy jednak mamy do czynienia z operacjami innymi niż dodawanie funkcji mnożonych przez stałe współczynniki — na przykład gdy mnożymy dwie funkcje przez siebie — proste funkcje trygonometryczne przestają wykazywać tę podstawową dla grupy własność. Funkcje przypadkowe, takie jak te, występują w przypadku błądzeń przypadkowych, mają natomiast pewne właściwości, bardzo wygodne przy rozważaniu ich nieliniowych kombinacji.

Nie jest chyba rzeczą pożądaną, bym wnikał tu w szczegóły tych zagadnień. Są one bowiem matematycznie dość zawiłe i obejmuje je moja książka *Nonlinear Problems in Random Theory*. Materiał zawarty w tej książce znalazł już dość szerokie zastosowanie w rozważaniach nad pewnymi szczególnymi problemami nieliniowymi, lecz wiele jeszcze trzeba zrobić, by wykonać w pełni program, który został w niej nakreślony. Praktyczny wniosek z tej książki jest taki, że odpowiednim wstępem dla badań nad układami

nieliniowymi jest badanie zjawisk, mających raczej charakter ruchów Browna, a nie zbioru funkcji trygonometrycznych. W przypadku obwodów elektrycznych ruch Browna można wytwarzać fizycznie w oparciu o efekt śrutowy. Efekt ten jest zjawiskiem polegającym na nieregularności prądów elektrycznych, powodowanej tym, że prąd nie jest ciągłym strumieniem elektryczności, lecz strumieniem złożonym z niepodzielnych i równych elektronów. Prąd elektryczny podlega zatem statystycznym nieregularnościom, które same mają pewien ustalony charakter i które można wzmocnić tak, że będą stanowiły pokaźny, przypadkowy szum.

Jak wykażę w rozdziale IX, taka teoria przypadkowego szumu może znaleźć praktyczne zastosowanie nie tylko przy analizie obwodów elektrycznych i innych procesów nieliniowych, lecz również przy ich syntezie[1]. Zastosowany aparat polega na sprowadzaniu wyjścia układu nieliniowego o przypadkowym wejściu do postaci dobrze określonego szeregu pewnych funkcji ortogonalnych ściśle związanych z wielomianami Hermite'a. Zagadnienie analizy obwodu nieliniowego polega na ustaleniu wartości współczynników tych wielomianów w zależności od pewnych parametrów wejścia na drodze procesu uśredniania.

Opis tego procesu jest dość prosty. Oprócz czarnej skrzynki, reprezentującej analizowany układ nieliniowy, mamy pewne elementy o znanej budowie, które będę nazywał białymi skrzynkami, reprezentujące różne człony wymaganego rozwinięcia [2]. Wprowadzamy ten sam przypadkowy szum do czarnej skrzynki oraz do danej białej skrzynki. Współczynnik odpowiadający białej skrzynce w rozwinięciu odpowiadającym czarnej skrzynce

---

[1] Używam tu terminu „układ nieliniowy" nie w przeciwieństwie do „układu liniowego", lecz na oznaczenie szerszej kategorii układów. Metody analizy układów nieliniowych, przy użyciu przypadkowego szumu, dają się zastosować również do układów liniowych i rzeczywiście zostały już tak wykorzystane.

[2] Pojęcia „czarna skrzynka" i „biała skrzynka" są wygodnymi i obrazowymi określeniami o niezbyt dobrze zdefiniowanej treści. Przez „czarną skrzynkę" będę rozumiał aparat, taki jak czwórnik o dwóch końcówkach wejściowych i dwóch wyjściowych, który wykonuje określoną operację na obecnej i ubiegłej wartości potencjału wejściowego, lecz w przypadku którego niekoniecznie musimy mieć informacje o jego budowie, dzięki której tę właśnie operację wykonuje. „Biała skrzynka" jest natomiast podobnym urządzeniem, w którym związki między napięciem wejściowym a wyjściowym zbudowane są zgodnie z określonym schematem strukturalnym, który ma zapewnić istnienie tych właśnie, uprzednio ustalonych związków.

jest średnią iloczynu ich wyjść. Jakkolwiek średnią tę oblicza się w zbiorze wszystkich wejść, na których występuje efekt śrutowy, to jednak istnieje twierdzenie, które pozwala na zastąpienie tej średniej (we wszystkich przypadkach z wyjątkiem zbioru przypadków o prawdopodobieństwie 0) przez średnią czasową. Aby tę średnią otrzymać, musimy dysponować urządzeniem mnożącym wyjścia czarnej i białej skrzynki oraz urządzeniem uśredniającym, którego działanie może opierać się na tym, że napięcie między elektrodami kondensatora jest proporcjonalne do ładunku elektrycznego zmagazynowanego w kondensatorze, a zatem — do całki (czasowej) prądu płynącego przez kondensator.

Ustalanie odpowiadających każdej białej skrzynce współczynników tworzących składniki równoważnego opisu czarnej skrzynki, można prowadzić nie tylko kolejno, jeden po drugim: możliwe jest również określenie wszystkich tych współczynników jednocześnie. Poprzez zastosowanie odpowiednich układów sprzężeń zwrotnych możliwe jest nawet doprowadzenie do tego, by każda z białych skrzynek dostosowywała się sama do poziomu, odpowiadającego jej współczynnikowi w rozwinięciu czarnej skrzynki. W ten sposób możemy zbudować „wieloczynnościową" białą skrzynkę, która po odpowiednim dołączeniu do czarnej skrzynki i podaniu tego samego przypadkowego sygnału wejściowego będzie automatycznie przekształcała się sama w funkcjonalny równoważnik czarnej skrzynki, choć jej wewnętrzna struktura może być całkiem odmienna.

Operacje analizy, syntezy i automatycznego upodabniania się białej skrzynki do czarnej można przeprowadzić przy użyciu innych metod, które opisali: profesor Amar Bose[1] i profesor Gabor[2]. W każdej z tych metod wykorzystuje się pewien proces uczenia się, poprzez dobieranie odpowiednich sygnałów wejściowych dla czarnych i białych skrzynek oraz porównywania ich. W wielu spośród takich procesów, z metodą prof. Gabora łącznie, ważną rolę odgrywają urządzenia mnożące. Jakkolwiek zaproponowano wiele sposobów mnożenia dwóch funkcji na drodze

---

[1] Bose A. G., *Nonlinear System Characterization and Optimization*, IRE Trans. on Information Theory, IT-5, 30 - 40 (1959) — dodatek specjalny do IRE Transactions.

[2] Gabor D., *Electronic Inventions and Their Impact on Civilization*, Wykład inauguracyjny, 3 marzec 1959, Imperial College of Science and Technology, University of London, Anglia.

elektrycznej, to jednak zadanie to nie jest technicznie łatwe. Dobry układ mnożący powinien pracować w dużym zakresie amplitud. Z drugiej zaś strony musi on być na tyle szybki w działaniu, by zachowywał dokładność nawet dla dużych częstotliwości. Gabor wymaga od swego układu mnożącego zakresu częstotliwości rzędu 1000 cykli. W swym wykładzie inauguracyjnym z okazji objęcia stanowiska Profesora Elektrotechniki w Imperial College of Science and Technology Uniwersytetu Londyńskiego nie określa on jasno ani zakresu amplitud, w jakim jego metoda mnożenia pozostała słuszna, ani osiągalnego dzięki niej stopnia dokładności. Czekam z wielką niecierpliwością na jawne spercyzowanie tych własności, tak, byśmy mogli ocenić przydatność tego układu mnożącego dla pracy w innych urządzeniach, zależnych od jego działania.

Wszystkie te urządzenia, których struktura lub funkcja zmienia się w zależności od ubiegłych doświadczeń, prowadzą do nowych, bardzo interesujących koncepcji, zarówno w technice, jak i w biologii. Na terenie techniki urządzenia tego rodzaju mogą być stosowane nie tylko do rozgrywania gier lub wykonywania innych celowych czynności, ale także do wykonywania tych zadań tak, aby sprawność działania ulegała ciągłej poprawie w oparciu o ubiegłe doświadczenie. Niektóre z takich możliwości omówię w rozdziale IX niniejszej książki. Z punktu widzenia biologii, uzyskujemy co najmniej odpowiednik tego, co jest chyba najważniejszym zjawiskiem życia. Aby dziedziczenie było możliwe, a komórki mogły się rozmnażać — konieczne jest, by tak zwane geny — elementy komórki, będące nośnikami dziedziczności — mogły budować na swój wzór inne elementy, przenoszące dziedziczność. Dlatego jest dla nas rzeczą niesłychanie frapującą móc dysponować środkami, dzięki którym urządzenia techniczne mogłyby produkować inne urządzenia działające podobnie jak one same. Zagadnieniu temu poświęcę rozdział X. W szczególności omówię tam, jak układy drgające o określonej częstotliwości mogą sprowadzać do tej samej częstotliwości drgania innych układów.

Mówi się często, że produkowanie dowolnego, określonego rodzaju cząstek na podobieństwo cząsteczek już istniejących znajduje w technice swój odpowiednik w stosowaniu szablonów: wykorzystujemy tam pewien funkcjonalny element maszyny jako wzorzec, na podstawie którego produkuje się inny, podobny element. Obraz szablonu ma charakter statyczny i musi istnieć jakiś proces, na którego drodze jedna cząsteczka genu wy-

twarza inną. Wysuwam tytułem próby przypuszczenie, że być może wzorcowymi elementami, przenoszącymi tożsamość substancji biologicznych, są częstotliwości, powiedzmy – częstotliwości widm cząsteczkowych, a samoorganizacja genów może być objawem samoorganizacji częstotliwości, którą zajmę się później.

Mówiłem już w sposób ogólny o maszynach uczących się. Bardziej szczegółowym rozważaniom na temat tych maszyn, ich możliwości i niektórych problemów związanych z ich wykorzystaniem, poświęcę cały rozdział. Tu chciałbym poczynić kilka uwag natury ogólnej.

Jak się przekonamy z rozdziału I, pojęcie maszyn uczących się jest równie stare, jak sama cybernetyka. W opisanych tam przewidujących urządzeniach przeciwlotniczych liniowa charakterystyka urządzenia zależy od długookresowej znajomości statystyki rodziny szeregów czasowych, które chcemy przewidywać. Znajomość tej charakterystyki można sobie wyrobić na drodze matematycznej, zgodnie z podanymi tam przeze mnie zasadami. Jest rzeczą całkowicie możliwą zbudowanie komputera, który będzie zaznajamiał się z tymi statystykami i opracowywał bieżącą charakterystykę układu przewidującego na podstawie doświadczenia zdobytego już przez tę samą pracującą automatycznie maszynę, którą wykorzystuje się do celów przewidywania. Rozwiązanie to może wykroczyć daleko poza przewidywanie czysto liniowe. Kallinpur, Masani, Akutowicz i ja podaliśmy w różnych pracach[1] teorię nieliniowego przewidywania, którą przynajmniej w zasadzie da się zmechanizować w podobny sposób, i która opiera się na wykorzystaniu długookresowych obserwacji jako statystycznej podstawy dla krótkookresowego przewidywania.

Teoria zarówno przewidywania liniowego, jak i nieliniowego zawiera pewne kryteria dobroci przewidywania. Kryterium najprostsze, jakkolwiek na pewno nie jedyne możliwe, opiera się na minimalizacji błędu kwadratowego średniego. Kryterium to stosuje się w pewnej szczególnej postaci, w połączeniu z funkcjonałami ruchu Browna, który wykorzystuję przy skonstruowaniu urządzeń nieliniowych, jako że poszczególne człony mojego rozwi-

[1] Wiener N., Masani P., *The Prediction Theory of Multivariate Stochastic Processes*, cz. I, „Acta Mathematica", 98, (1957), str. 111-150; cz. II, ibid. 99 (1958), str. 93 - 137. Również Wiener N., Akutowicz E. J., *The Definition and Ergodic Properties of the Stochastic Adjoint of a Unitary Transformation*, „Rendicondi del Circolo Matematico di Palermo", Ser. II, VI (1957) str. 205 - 217.

nięcia mają pewne właściwości co do ortogonalności. Sprawiają one, że częściowa suma skończonej liczby tych członów stanowi najlepszą symulację naśladowanego na drodze matematycznej aparatu, jeśli ma obowiązywać kryterium minimalnego błędu kwadratowego średniego. Praca Gabora opiera się również na kryterium błędu kwadratowego średniego, jednakże w sposób bardziej ogólny, lepiej dający się zastosować do szeregów czasowych otrzymanych na drodze doświadczenia.

Pojęcie „maszyna ucząca się" można rozszerzyć daleko poza teren układów przewidujących, filtrów i innych, podobnych im urządzeń. Jest ono szczególnie ważne w badaniach i przy konstrukcji maszyn, które grają w takie gry o charakterze rywalizacyjnym, jak warcaby. Pracę o podstawowym znaczeniu dla tej dziedziny wykonali Samuel[1] i Watanabe[2] z International Business Machines Corporation. Podobnie jak w przypadku filtrów i układów przewidujących, pewne funkcje szeregu czasowego przedstawia się w postaci, w jakiej mogą być przedstawione funkcje należące do znacznie szerszej klasy. Funkcje te mogą stanowić numeryczną ocenę znaczących wielkości, od których zależy wynik gry. Tak więc na przykład mogą opisywać liczbę kamieni warcabowych obu grających stron, możliwość ich ruchów i tak dalej. Na początku gry wymienionym różnym funkcjom przypisuje się próbne wartości wagowe, a maszyna wybiera ten z dopuszczalnych ruchów, którego całkowita waga ma maksymalną wartość. Aż do tego momentu maszyna pracuje według „sztywnego" programu i nie jest maszyną uczącą się.

W tej chwili maszyna podejmuje jednak inne zadanie. Usiłuje ona przedstawić funkcję, która przyjmuje wartość 1 dla gier wygranych, 0 – dla przegranych, a powiedzmy 1/2 dla zremisowanych, w postaci zależnej od funkcji opisujących te charakteryzujące grę wielkości, które maszyna jest w stanie uwzględnić. Dążąc do tego maszyna określa na nowo współczynniki wagowe przypisane tym wielkościom tak, że staje się zdolna do rozgrywania gry w bardziej złożony sposób. Niektóre właściwości takich maszyn omówię w rozdziale IX, muszę jednak już tu podkreślić, że są one na tyle korzystne, iż umożliwiają maszynie pokonanie jej własnego programisty po 10 do 20

[1] Samuel A. L., *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers*, „IBM Journal of Research and Development", 3 (1959), str. 210 - 229.

[2] Watanabe S., *Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation*, „IBM Journal of Research and Development", 4 (1960), str. 60 - 82.

godzinach nauki. W rozdziale IX chciałbym również wspomnieć o pewnych pracach nad podobnymi maszynami, służącymi do dowodzenia twierdzeń geometrycznych i do symulowania – w ograniczonym zakresie – logiki indukcji. Wszystkie tego rodzaju prace stanowią część teorii i praktyki programowania – programowania, którym zajmowano się szeroko w Electronic Systems Laboratory w Massachusetts Institute of Technology. Stwierdzono tam, że jeśli nie stosować takiego uczącego się urządzenia, to samo programowanie „sztywno" uformowanej maszyny jest zadaniem bardzo trudnym, i że istnieje palące zapotrzebowanie na urządzenia, które programowałyby takie programowanie.

Skoro pojęcie maszyn uczących się stosuje się do maszyn, które sami zbudowaliśmy, to stosuje się również do tych żyjących maszyn, które nazywamy zwierzętami, i dzięki temu zyskujemy możliwość nowego spojrzenia na cybernetykę biologiczną. Spośród mnóstwa bieżących badań pragnąłbym tu wyróżnić książkę Stanley-Jonesów o kybernetyce (proszę zwrócić uwagę na pisownię) układów żywych[1]. W książce tej poświęca się znaczną część zainteresowania zarówno tym sprzężeniom zwrotnym, które utrzymują roboczy poziom układu nerwowego, jak i tym, które odpowiadają za specyficzne bodźce. Ponieważ połączenie poziomu układu z poszczególnymi bodźcami ma charakter w znacznym stopniu multiplikatywny, przeto ma również charakter nieliniowy i wiąże się z rozważaniami, które już naszkicowaliśmy. W tej dziedzinie badań panuje obecnie wielkie ożywienie, a przypuszczam, że w najbliższej przyszłości będzie ono jeszcze większe.

Działanie maszyn z pamięcią i maszyn rozmnażających się, o których dotąd mówiłem, jest w znacznym stopniu, choć nie całkowicie, uzależnione od bardzo specyficznego mechanizmu, który nazwałbym mechanizmem powielania. Fizjologiczne aspekty tego samego procesu muszą pozostawać w zgodzie ze szczególnymi środkami, jakimi dysponują organizmy żywe, w których „sporządzanie odbitek" jest zastąpione przez inny proces, w czasie którego układ samoorganizuje się. Dziesiąty rozdział niniejszej książki jest poświęcony omówieniu przykładowego procesu samoorganizacji, tego mianowicie, dzięki któremu w falach mózgowych tworzą się bardzo

---

[1] Stanley-Jones D., Stanley-Jones K., *Kybernetics of Natural Systems. A Study in Patterns of Control*, London 1960, Pergamon Press.

specyficzne częstotliwości. Jest on zatem w znacznym stopniu fizjologicznym odpowiednikiem tego, co jest treścią rozdziału poprzedniego, w którym omawiam podobne procesy, oparte bardziej na zasadzie powielania. Obecność stromych drgań w falach mózgowych oraz teorie, które podaję, by wyjaśnić, skąd one pochodzą, po co są i jak można je wykorzystać w medycynie, stanowią w moim pojęciu ważny, nowy przełom w fizjologii. Podobne koncepcje mogą znaleźć zastosowanie w innych działach fizjologii i wnieść realny wkład w badania nad podstawami zjawisk życia. To, co w tej dziedzinie podaję, jest raczej programem badawczym, a nie wykonaną już pracą, programem, z którym wiążę wielkie nadzieje.

Ani w pierwszym wydaniu, ani obecnie nie było moim zamierzeniem nadanie niniejszej książce charakteru kompendium z wszystkiego, czego dokonano w cybernetyce. Nie leży to ani w moich zainteresowaniach, ani możliwościach. Zamierzeniem moim było przedstawienie i rozbudowanie o nowe szczegóły moich poglądów na ten temat oraz wskazanie pewnych idei i filozoficznych refleksji, które na samym początku sprowadziły mnie na teren tej dziedziny i które wciąż interesują mnie w jej rozwoju. Jest to więc książka bardzo osobista, w której poświęca się wiele uwagi temu, co interesowało mnie samego, a stosunkowo mało temu, nad czym sam nie pracowałem.

Przy sprawdzaniu niniejszej książki wiele osób okazało mi wartościową pomoc. Pragnę wyrazić szczególne podziękowanie pannie Constance D. Boyd z The MIT Press, doktorowi Shikao Ikehara z Tokyo Institute of Technology, doktorowi Y. W. Lee z Electrical Engineering Department MIT i doktorowi Gordonowi Raisbeckowi z Bell Telephone Laboratories. Chciałbym również wspomnieć o pomocy, której udzielili mi moi studenci, John C. Kotelly i Charles E. Robinson, a szczególnie dr John S. Barlow z Massachusetts General Hospital, przy pisaniu dodatkowych rozdziałów (zwłaszcza przy obliczeniach z rozdziału X), w których rozważałem przypadek układów samoorganizujących się, występujących w badaniach nad elektroencefalogramami. Skorowidz wykonał James W. Davis.

Bez ich drobiazgowej staranności i poświęcenia nie starczyłoby mi ani odwagi, ani dokładności, by przygotować nowe i poprawione wydanie.

Cambridge, Massachusetts
Marzec 1961

Norbert Wiener

CZĘŚĆ I

WYDANIE PIERWOTNE

1948

WSTĘP

Niniejsza książka przedstawia – po więcej niż dziesięciu latach – wyniki pracy podjętej wspólnie z doktorem Arturo Rosenbluethem, pracującym wówczas w Havard Medical School, a obecnie w Instituto Nacional de Cardiologia w Meksyku. Dr Rosenblueth, kolega i współpracownik nieżyjącego już dziś dr Waltera B. Cannona, prowadził wtedy serię comiesięcznych spotkań dyskusyjnych na temat metodyki badań naukowych. Uczestnikami spotkań byli głównie młodzi naukowcy z Harvard Medical School. Spotykaliśmy się na obiedzie wokół okrągłego stołu w Venderbilt Hall. Rozmowa była żywa i nieskrępowana. Nie było to forum, które onieśmielałoby kogokolwiek albo pozwalało komukolwiek na okazywanie wyniosłości. Po posiłku ktoś z nas – albo zaproszony gość – wygłaszał referat, którego podstawowym tematem były zazwyczaj sprawy metodologii. Mówca musiał wytrzymać ogień ostrej, życzliwej, lecz bezlitosnej krytyki. Była to znakomita łaźnia dla niedowarzonych pomysłów, dla braku samokrytycyzmu, przesadnej wiary we własne siły i zarozumiałości. Kto źle znosił krytykę – nie pojawiał się więcej, jednak wśród pozostałych uczestników naszych spotkań znajdzie się niejeden taki, który jest przekonany, że stanowiły one ważny i trwały wkład w nasz rozwój naukowy.

Nie wszyscy dyskutanci byli lekarzami, czy przedstawicielami nauk medycznych. Jednym ze stałych uczestników, biorących żywo dział w dyskusji był dr Manuel Sandoval Vallarta, Meksykanin podobn jak dr Rosenblueth, profesor fizyki w Massachusetts Institute of Technology. Był on jednym z mych pierwszych studentów jeszcze z okresu, kie po I wojnie światowej zacząłem pracować w Instytucie. Dr Vallarta wykł

przyprowadzać na spotkania dyskusyjne swych kolegów z MIT-u i właśnie w ten sposób poznałem doktora Rosenbluetha. Metodyką badań naukowych interesowałem się od dawna; byłem nawet w latach 1911 - 1913 uczestnikiem poświęconego tej tematyce seminarium Josiaha Royce'a w Harvard. Ponadto uczestnicy spotkań uznali za rzecz podstawową mieć w swym gronie kogoś, kto potrafiłby krytycznie oceniać problemy natury matematycznej. Tak więc stałem się aktywnym członkiem grupy aż do momentu, gdy odwołanie dr Rosenbluetha do Meksyku w 1944 r. i zawierucha wojenna położyły kres serii spotkań.

Przez wiele lat dzieliłem wraz z doktorem Rosenbluethem przekonanie, że najbardziej owocnymi terenami rozwoju nauk są obszary zaniedbane, pozostawione jako „ziemia niczyja" pomiędzy dobrze sprecyzowanymi dziedzinami nauki. Od czasów Leibniza nie było chyba człowieka, który całkowicie panowałby nad współczesnym mu stanem ludzkiej działalności intelektualnej. Począwszy od tamtej epoki nauka staje się w coraz większym stopniu terenem pracy specjalistów, a jej działy mają tendencję do stopniowego zawężania się. Sto lat później nie może być już Leibniza, są za to Gauss, Faraday, Darwin. Dziś niewielu tylko uczonych można określić bez zastrzeżeń mianem matematyka, fizyka, biologa. Są natomiast topologowie, akustycy lub specjaliści od tęgopokrywych. Naukowiec posługuje się żargonem swej dziedziny, zna jej literaturę i rozgałęzienia, jednakże inny, sąsiedni temat będzie uważał najczęściej za coś, co należy do jego kolegi, pracującego o trzy drzwi dalej w tym samym korytarzu, a własne zainteresowanie się tym tematem za nie dające się usprawiedliwić wkraczanie w czyjeś prywatne sprawy.

Takie specjalistyczne dziedziny nieustannie rosną i zagarniają coraz to nowe obszary. Rezultaty są takie, jak wówczas, gdy tereny Oregonu zajmowali jednocześnie osadnicy amerykańscy, brytyjscy, meksykańscy i rosyjscy: niesłychana plątanina badań, nazewnictwa i praw. Jak zobaczymy w dalszej części książki, istnieją dziedziny nauki, które podlegają badaniu z różnych stron przez specjalistów od czystej matematyki, statystyków, elektroników i neurofizjologów; w których każdy fakt określany jest przez każdą z grup inną nazwą; w których pewne badania wykonuje się niepotrzebnie trzy lub cztery razy, podczas gdy wykonanie innych ważnych prac opóźnia się przez to, że przedstawiciele jednej dziedziny nie znają rezultatów badań, które w innej dziedzinie mogły już stanąć w rzędzie klasycznych.

Takie właśnie pograniczne tematy nauk oferują wykwalifikowanemu badaczowi najbogatsze możliwości. Jednocześnie na tych terenach najbardziej wyraźnie załamują się powszechnie stosowane sposoby „masowego ataku" badawczego i zasady podziału pracy. Jeśli w pewnym problemie fizjologicznym podstawowe trudności mają charakter matematyczny to dziesięciu fizjologów nie znających matematyki osiągnie dokładnie tyle ani odrobinę więcej niż jeden fizjolog nie znający matematyki. Jeśli fizjolog nie znający matematyki współpracuje z matematykiem nie znającym zupełnie fizjologii, to pierwszy z nich nie będzie umiał sformułować swego problemu przy użyciu terminów, którymi drugi umie się posługiwać, a drugi nie będzie umiał z kolei przedstawić swych odpowiedzi w takiej formie, którą mógłby pierwszy zrozumieć. Dr Rosenblueth zawsze twierdził, że badania takich białych plam na mapie nauki może prowadzić prawidłowo tylko zespół naukowców, którego każdy członek jest nie tylko specjalistą w swej dziedzinie, lecz również posiada głęboką, dobrze ugruntowaną znajomość dziedzin swych kolegów, umie pracować zespołowo, zna intelektualne nawyki innych i potrafi rozpoznać znaczenie każdej nowej sugestii swego kolegi, zanim jeszcze zostanie ona wyrażona w formalnie poprawny sposób. Matematyk nie musi umieć przeprowadzać doświadczeń fizjologicznych, lecz musi posiąść umiejętność rozumienia ich, skrytykowania czy wysunięcia nowej sugestii. Fizjolog nie musi umieć dowieść twierdzenia matematycznego, ale powinien być w stanie uchwycić jego znaczenie dla fizjologii i powiedzieć matematykowi, czego powinien poszukiwać. Lata całe marzyliśmy o organizacji niezależnych naukowców, którzy pracowaliby wspólnie nad jedną z takich „naukowych dżungli" nie jako podwładni jakiegoś wysoko postawionego urzędnika, lecz jako badacze połączeni wspólną potrzebą, wręcz intelektualną koniecznością rozumienia pewnej dziedziny nauki jako całości i ponagania sobie wzajemnie w takim rozumieniu.

Zgadzaliśmy się co do tego, na długo przed tym, zanim znaleźliśmy dziedzinę wspólnych badań i określiliśmy role przypadające w nich każdemu z nas. Decydującym czynnikiem stała się wojna. Od dość dawna zdawałem sobie sprawę, że jeśli nad krajem zawiśnie niebezpieczeństwo, to moja działalność będzie w znacznym stopniu determinowana przez dwa czynniki: moje ścisłe powiązania z kierowanym przez doktora Vannevara Busha programem prac nad maszynami liczącymi oraz naszą wspólną z dr Yuk

Wing Lee pracę nad projektowaniem sieci elektrycznych. Istotnie, oba tematy okazały ię ważne. W lecie 1940 r. skierowałem znaczną część uwagi na opracowywa ie maszyn liczących służących do rozwiązywania równań różniczkowych zastkowych. Interesowałem się nimi od dawna i przekonałem się, że asadniczą trudnością jest tu (w przeciwieństwie do równań różniczkowych wyczajnych, z którymi tak dobrze daje sobie radę analizator Busha) przestawienie funkcji więcej niż jednej zmiennej. Doszedłem także do przek nania, że rozwiązanie problemu leży w zastosowaniu procesu wybiera ia (*scanning*), podobnego jak w telewizji, i że w istocie telewizja przez w prowadzenie tej nowej metody stanie się bardziej użyteczna dla innych dziec zin techniki, niż jest użyteczna sama w sobie.

Było rzeczą jasną, że zastosowanie techniki wybierania gwałtownie zwiększy liczbę anych, z którymi będziemy mieli do czynienia, w porównaniu z liczbą danych występujących przy równaniach różniczkowych zwyczajnych. Aby zatem uzyskać sensowne wyniki w rozsądnym czasie, należy zwiększyć do maksimum szybkość elementarnych procesów obliczeniowych i unikać przerywania ciągu takich procesów przez czynności w swej naturze znacznie wolniejsze. Jednocześnie staje się konieczne wykonywanie poszczególnych kroków obliczeń z tak wysoką dokładnością, by wielokrotne powtarzanie elementarnych procesów nie prowadziło do kumulowania się wielkich błędów, przekreślających dokładność obliczeń w ogóle.

Wysunięto zatem następujące sugestie:

1. Centralny układ dodający i mnożący maszyny liczącej powinien mieć charakter cyfrowy, a nie analogowy jak w analizatorze równań różniczkowych Busha.

2. Aby zapewnić szybsze działanie urządzenia, wszystkie te układy maszyny, które pracują w zasadzie jako urządzenia przełączające, powinny być zbudowane przy wykorzystaniu lamp elektronowych, zamiast kół zębatych czy przekaźników.

3. Zgodnie z zasadami, obowiązującymi w niektórych istniejących już aparatach produkcji Bell Telephone Laboratories, byłoby chyba bardziej ekonomicznie wprowadzić do celów dodawania i mnożenia system dwójkowy zamiast dziesiętnego.

4. Maszyna powinna wykonywać sama cały ciąg operacji obliczeniowych tak, aby od chwili wprowadzenia danych aż do otrzymania końco-

wego wyniku nie była potrzebna interwencja człowieka. Umiejętność podejmowania wszystkich niezbędnych decyzji logicznych powinna być wbudowana w samą maszynę.

5. Maszyna powinna być wyposażona w urządzenie do przechowywania danych, które mogłaby szybko zapisywać, przechowywać w nienaruszonym stanie aż do momentu wymazania, szybko odczytywać, szybko wymazywać i natychmiast potem byłoby gotowe do przechowania nowych danych.

Powyższe zalecenia, wraz ze wstępnymi sugestiami co do sposobu ich urzeczywistnienia zostały przesłane do dr Vannevara Busha w celu ewentualnego ich wykorzystania w czasie wojny. W ówczesnym stadium przygotowań wojennych nie sprawiały one wrażenia wniosków tak ważnych, by warto było rozpoczynać natychmiast prace na ich temat. Niemniej jednak wszystkie reprezentują koncepcje, które zostały już ucieleśnione w nowoczesnej ultraszybkiej maszynie liczącej. Powyższe uwagi były zgodne z duchem ówczesnej myśli naukowej i ani przez chwilę nie chciałbym przypisywać sobie wyłącznej zasługi ich wypowiedzenia. Niemniej jednak okazały się one pożyteczne i mam nadzieję, że moje memorandum przyczyniło się w pewnym stopniu do spopularyzowania ich w środowisku inżynierów. Poza tym – jak się przekonamy w dalszych rozdziałach – wszystkie przedstawione wyżej koncepcje stają się szczególnie interesujące w zestawieniu z badaniami układu nerwowego.

Cała praca została w końcu włożona do szuflady i jakkolwiek nie była zupełnie bezowocna, to jednak nie skłoniła dr Rosenbluetha i mnie do podjęcia jakichś bezpośrednich badań. Nasza współpraca rozpoczęła się naprawdę od innego projektu badawczego, prowadzonego również dla celów wojskowych. Na początku wojny prestiż niemieckiego lotnictwa i defensywna postawa Anglii zwróciły uwagę wielu naukowców na konieczność usprawnienia artylerii przeciwlotniczej. Jeszcze przed wybuchem wojny stało się rzeczą jasną, że szybkość samolotu pozwala na odłożenie do lamusa wszystkich klasycznych metod kierowania ogniem i że należy koniecznie rozbudować aparaturę sterującą artylerią tak, by mogła wykonywać wszystkie niezbędne obliczenia sama. Obliczenia te stają się jednocześnie tym trudniejsze, że samolot, w przeciwieństwie do innych, dotąd spotykanych celów artylerii, ma szybkość porównywalną z szybkością pocisku, który ma go zestrzelić. Niesłychanie ważne jest zatem, by wystrzelić pocisk nie wprost w kierunku celu, lecz w ten sposób, by pocisk i cel

spotkały się w przestrzeni w przyszłości. Musimy zatem znaleźć metodę przewidywania przyszłego położenia samolotu.

Najprostszym sposobem takiego przewidywania jest ekstrapolacja aktualnego toru samolotu za pomocą linii prostej. Wiele czynników przemawia za tą metodą. Im więcej zwrotów i łuków robi samolot w czasie lotu, tym mniejsza jest jego efektywna szybkość, tym mniej ma czasu na wykonanie zadania i tym dłużej pozostaje w obszarze dla siebie niebezpiecznym. Jeśli zatem pozostałe warunki są takie same, samolot będzie leciał po linii tak prostej, jak tylko to możliwe. Jednakże w momencie, gdy wybuchnie pierwszy pocisk warunki przestaną być takie same i pilot zacznie najprawdopodobniej wykonywać liczne manewry mające na celu uniknięcie trafienia.

Gdyby wszystkie decyzje co do takich manewrów spoczywały całkowicie w ręku pilota, a ten potrafiłby jak dobry pokerzysta wykorzystywać w inteligentny sposób swoje szanse, to dysponowałby on tak wieloma możliwościami zmiany swego przewidywanego położenia przed zderzeniem się z pociskiem, że nie mielibyśmy większych szans zestrzelenia go, chyba tylko przy pomocy bardzo rozrzutnego ognia zaporowego. Jednak, z drugiej strony pilot nie ma całkowitej swobody manewrowania. Po pierwsze samolot leci z bardzo wielką prędkością i każda zbyt nagła zmiana kursu wywołuje przyśpieszenie, które może pozbawić pilota przytomności lub spowodować uszkodzenie samolotu. Ponadto pilot może sterować samolotem tylko zmieniając położenie ruchomych części płatów, co wymaga pewnego czasu. Nawet gdy lotki i stery są już ustawione w nowym położeniu — ulega zmianie tylko przyśpieszenie samolotu, a ta zmiana przyśpieszenia zanim przyniesie końcowy efekt, musi być jeszcze przekształcona; najpierw na zmianę prędkości, a potem dopiero na zmianę położenia. Na koniec, w warunkach bojowych lotnik rzadko znajduje się w nastroju, który ułatwiałby mu skomplikowane i swobodne zachowywanie się. Jest bardzo prawdopodobne, że będzie kierował się raczej wzorami postępowania, według których został wyszkolony.

Wszystkie te czynniki sprawiają, że problem przewidywania krzywoliniowego toru lotu wart jest badań, niezależnie od tego czy istotnie ich wyniki uzasadnią stosowanie w praktyce aparatury, w której ten właśnie rodzaj przewidywania byłby wykorzystany. Przewidzieć przyszłość pewnej krzywej — to znaczy wykonać pewne operacje na jej przeszłości. Ideal-

nego operatora przewidywania nie da się skonstruować w postaci aparatu, jednakże istnieją pewne operatory, zbliżone nieco do idealnych i dające się urzeczywistnić w postaci urządzeń, których budowa leży w zasięgu naszych możliwości. Zasugerowałem profesorowi Samuelowi Caldwellowi z Massachusetts Institute of Technology, że takie operatory zdają się być warte wypróbowania, a on zaproponował, by sprawdzić je przy użyciu analizatora równań różniczkowych Busha, traktując to jako gotowy model urządzenia do kierowania ogniem artylerii przeciwlotniczej. Zrobiliśmy tak, i uzyskaliśmy rezultaty, które zostaną omówione w dalszych rozdziałach. W ten sam sposób zaangażowałem się w badania prowadzone dla celów wojskowych i odtąd wspólnie z Julianem H. Bigelowem zajmowaliśmy się teorią przewidywania i konstrukcją urządzenia, które stanowiłoby urzeczywistnienie teoretycznych wniosków.

Zauważmy, że już po raz drugi związałem się z badaniami systemów elektromechanicznych, które uzurpowałyby sobie pełnienie czynności specyficznie ludzkich: w pierwszym przypadku – wykonywanie skomplikowanych obliczeń, w drugim – przewidywanie przyszłości. W pracach tego drugiego rodzaju nie dałoby się uniknąć rozważań nad sprawnością wykonywania pewnych czynności przez człowieka. W niektórych typach aparatury do kierowania ogniem artyleryjskim impuls inicjujący działanie układu przychodzi bezpośrednio z urządzenia radarowego, jednakże częściej do systemu włączony jest człowiek: celowniczy, dowódca, lub obaj jednocześnie, przy czym działają oni jako dość zasadnicza część systemu. Jest rzeczą podstawową znać ich charakterystyki sprawnościowe, po to, by uwzględnić je matematycznie w modelu urządzenia, którym sterują. Co więcej, ich cel – samolot – jest również kierowany przez człowieka, zatem i tu znajomość ludzkich charakterystyk sprawnościowych jest pożądana.

Wspólnie z Bigelowem doszliśmy do wniosku, że w zamiarowym zachowaniu się niesłychanie ważnym czynnikiem jest to, co inżynierowie od spraw sterowania nazywają sprzężeniem zwrotnym. Zajmę się nim dość szczegółowo w następnych rozdziałach. W tym miejscu warto jedynie zauważyć, że kiedy chcemy wykonać pewien ruch, zgodny z zamierzonym wzorcem, wówczas różnica między tym zamierzeniem a rzeczywiście wykonanym ruchem stanowi nowy sygnał wejściowy, powodujący takie przesunięcie danej części ciała, by jej ruch stał się jeszcze bliższy zamierzeniu.

W pewnym typie okrętowego mechanizmu sterowego położenie koła sterowego jest przenoszone na dźwignię regulującą zawory urządzenia parowego, poruszającego sterownicą. Jeśli zawory te zostaną otwarte, sterownica zaczyna poruszać się tak, by je zamknąć. Gdy zmienimy położenie dźwigni — sterownica przesunie się podobnie jak ona, rejestrując w ten sposób kątowe położenie koła sterowego, jako kątowe położenie sterownicy. Oczywiście tarcie i inne siły opóźniające ruch steru zwiększają napływ pary do zaworów z jednej strony sterownicy, co powoduje zwiększenie momentu obrotowego obracającego ster. Sprzężenie zwrotne działa zatem tak, że sprawność mechanizmu sterowego staje się względnie niezależna od obciążenia.

Z drugiej strony, przy pewnym układzie sił opóźniających, silne sprzężenie zwrotne może spowodować, że ster przesunie się zbyt daleko, co pociągnie za sobą gwałtowne działanie sprzężenia zwrotnego w przeciwnym kierunku, to z kolei doprowadzi do jeszcze większego przeciwnego wychylenia steru i tak dalej, aż wreszcie mechanizm sterowy zostaje wprawiony w niekontrolowane oscylacje i ulega zupełnemu uszkodzeniu. W takich pracach, jak książka MacColla[1] znajdziemy bardzo dokładne rozważania na temat sprzężenia zwrotnego, na temat warunków, w których jest ono korzystne i warunków, w których ulega uszkodzeniu. Zjawiska te znamy bardzo dokładnie z ilościowego punktu widzenia.

Przypuśćmy teraz, że chcę podnieść leżący przede mną ołówek — żeby to uczynić, muszę wprawić w ruch pewne mięśnie. Nikt z nas, z wyjątkiem kilku specjalistów od anatomii, nie wie, co to są za mięśnie, a nawet wśród anatomów jest może zaledwie kilku takich (jeśli w ogóle są) którzy potrafią wykonać ten ruch poruszając w świadomy, „chciany" sposób każdym odpowiednim mięśniem po kolei. Wprost przeciwnie, naszym zamierzeniem jest podnieść ołówek. Skoro się już na to zdecydujemy, nasz ruch przebiega tak, by z grubsza rzecz biorąc w każdej następnej chwili odległość ołówka od zamierzonego położenia ulegała zmniejszeniu. Tę część czynności wykonujemy nie w pełni świadomie.

Aby czynność mogła przebiegać w ten sposób, do układu nerwowego musi przedostać się jakieś świadome lub nieświadome doniesienie o tym,

---

[1] MacColl L. A., *Fundamental Theory of Servomechanisms*, New York 1946, Van Nostrand.

o ile pomyliliśmy się w każdej chwili wykonując ruch podnoszenia ołówka. Jeśli patrzymy na nasz ołówek, sygnał ten może mieć charakter przynajmniej w części wzrokowy, jednakże w bardziej ogólnym przypadku ma on charakter kinestetyczny, czy — używając modnego obecnie określenia — proprioceptywny. Jeśli nasze doznania proprioceptywne są osłabione i nie zastąpimy ich doznaniami wizualnymi ani innymi, to nie będziemy w stanie wykonać ruchu podnoszenia ołówka. Objaw taki nosi nazwę ataksji. Ataksja tego typu zbliżona jest do objawów związanych z pewną postacią kiły centralnego układu nerwowego (*tabes dorsalis*), w przypadku której zaburzone jest czucie kinestetyczne, przewodzone przez nerwy rdzeniowe.

Zbyt silne sprzężenie zwrotne stanowi jednak dla prawidłowego wykonywania czynności przeszkodę równie poważną, co sprzężenie zwrotne zbyt osłabione. Z myślą o tym Bigelow i ja zwróciliśmy się do dr Rosenbluetha z następującym pytaniem: czy istnieje patologiczny objaw przy którym pacjent, chcąc wykonać pewien ruch, taki jak podnoszenie ołówka, wykonuje tę czynność zbyt gwałtownie i popada w niekontrolowane oscylacje? Dr Rosenblueth odpowiedział nam natychmiast, że objaw taki jest dobrze znany, jest określany nazwą drżenia zamiarowego i często jest związany z urazem móżdżku.

Uzyskaliśmy w ten sposób najbardziej ważkie potwierdzenie naszych hipotez dotyczących natury przynajmniej niektórych czynności zamiarowych. Należy zauważyć, że ten nasz punkt widzenia był znacznie szerszy, niż ówczesne poglądy neurofizjologów. Centralny układ nerwowy przestał być w naszym mniemaniu zamkniętym w sobie, samowystarczalnym organem, odbierającym sygnały od komórek umysłowych i wysyłającym sygnały do mięśni. Przeciwnie, pewne jego najbardziej charakterystyczne czynności dają się wytłumaczyć jedynie jako procesy o charakterze cyklicznym, przebiegające w kierunku od układu nerwowego do mięśni, a potem wracające znów do układu nerwowego za pośrednictwem organów sensorycznych: proprioceptorowych lub innych. Wydawało się nam, że uczyniliśmy nowy krok naprzód w badaniach należących do tej części neurofizjologii, która nie zajmuje się wyłącznie elementarnymi procesami w nerwach i synapsach, ale działaniem układu nerwowego traktowanego jako całość.

Wszyscy trzej uznaliśmy, że ten nowy punkt widzenia zasługuje na

artykuł, który też wkrótce został napisany i opublikowany[1]. Dr Rosenblueth i ja przewidywaliśmy, że artykuł ten ma służyć jedynie jako sformułowanie obszernego programu eksperymentalnych prac i zdecydowaliśmy, że jeżeli kiedyś uda się nam doprowadzić do realizacji nasz plan stworzenia międzydyscyplinarnego instytutu naukowego, to ta właśnie tematyka będzie stanowić niemal idealny ośrodek naszej wspólnej działalności.

Na innej płaszczyźnie badań dla J. Bigelowa i dla mnie stało się już rzeczą jasną, że problemy techniki łączności i techniki sterowania są ze sobą nierozdzielnie związane oraz koncentrują się one nie wokół spraw należących do elektrotechniki, lecz wokół znacznie bardziej podstawowego pojęcia: wiadomości, która może być przekazywana przez układy elektryczne, mechaniczne czy nerwowe. Wiadomość jest to dyskretna lub ciągła sekwencja mierzalnych zdarzeń rozłożonych w czasie, jest więc dokładnie tym, co statystycy zwą szeregiem czasowym. Przyszłą postać wiadomości przewiduje się poprzez zastosowanie pewnego typu operatora do jej przeszłej części, przy czym operator ten może być urzeczywistniony jako matematyczny schemat obliczeniowy lub jako aparat mechaniczny czy elektryczny. Doszliśmy do wniosku, że idealne mechanizmy przewidujące, którymi zajmowaliśmy się początkowo były obciążone dwoma rodzajami błędów o zupełnie przeciwstawnym charakterze. Aparatura przewidująca, którą projektowaliśmy na początku, miała dysponować zdolnością przewidywania przyszłej postaci idealnie gładkiej fali z dowolnie dokładnym przybliżeniem. Jednakże zwiększanie żądanej dokładności przybliżenia musi się zawsze wiązać ze zwiększeniem czułości. Im lepiej aparatura działałaby dla fal gładkich, tym łatwiej wprawiałyby ją w drgania małe nawet nieciągłości fali i tym dłużej trwałoby wygasanie takich drgań. Wydawało się zatem, że dobre przewidywanie postaci fali gładkiej wymaga aparatury bardziej delikatnej i czułej, niż najlepsze nawet przewidywanie przebiegu nieciągłego, a dobór typu urządzenia, jakie należy zastosować w każdym konkretnym przypadku, zależy od statystycznej natury przewidywanego zjawiska. Ta para powiązanych ze sobą rodzajów błędów zdaje się wykazywać pewne podobieństwo do przeciwstawnych sobie prob-

---

[1] Rosenblueth A., Wiener N., Bigelow J., *Behavior, Purpose and Teleology*, „Philosophy of Science", 10 (1943), str. 18-24.

lemów miary położenia i pędu, występujących w mechanice kwantowej i znanych jako zasada nieoznaczoności Heisenberga.

Skoro tylko jasno uświadomiliśmy sobie, że rozwiązanie problemu optymalnego przewidywania można osiągnąć tylko poprzez ścisłe uwzględnienie statystyki przewidywanego szeregu czasowego, nie było już rzeczą trudną dokonać tego, w czym — jak się początkowo zdawało — leżały podstawowe trudności teorii przewidywania, a w czym w rzeczywistości kryje się efektywna metoda przewidywania. Zakładając statystykę szeregu czasowego uzyskaliśmy możność otrzymania jawnego wyrażenia na kwadratowy średni błąd przewidywania dla danej techniki i danego wyprzedzenia. Mając to wyrażenie, możemy zastąpić problem optymalnego przewidywania przez poszukiwanie pewnego operatora, który zmniejszyłby do minimum pewną dodatnią, zależną od tego operatora, wielkość. Problemy minimalizacyjne tego rodzaju należą do istniejącego już działu matematyki — rachunku wariacyjnego, a dział ten ma odpowiednią, znaną metodę. Przy pomocy tej metody jesteśmy w stanie otrzymać w jawnej postaci najlepsze rozwiązanie problemu przewidywania szeregu czasowego o danej statystyce, a co więcej możemy ucieleśnić to rozwiązanie w postaci dającej się skonstruować aparatury.

Kiedy już to uczyniliśmy, ujawnił się przynajmniej jeden nowy aspekt projektowania technicznego. Projektowanie to uważa się zazwyczaj bardziej za sztukę, niż za naukę. Przez sprowadzenie zagadnień tego rodzaju do zasady minimalizacji ustawiliśmy ten przedmiot na znacznie bardziej naukowych podstawach. Stało się dla nas rzeczą jasną, że nie jest to przypadek odosobniony, lecz istnieje cała dziedzina działalności technicznej, w której podobne problemy projektowe dadzą się rozwiązać przez użycie metod rachunku wariacyjnego.

Podjęliśmy i rozwiązaliśmy inne podobne problemy przy użyciu tych samych metod. Było wśród nich zagadnienie projektowania filtrów elektrycznych. Sygnał jest często zanieczyszczony przez zakłócenia, które nazywamy szumem tła. Stoimy zatem przed zadaniem odtworzenia pierwotnej postaci sygnału, albo jego postaci z pewnym wyprzedzeniem lub opóźnieniem, poprzez zastosowanie pewnego operatora do sygnału zakłóconego. Optymalna postać takiego operatora i urządzenia, które ma go fizycznie odwzorowywać, zależy od statystycznej natury sygnału i szumu wziętych razem i z osobna. Projektowanie filtrów elektrycznych,

które miało poprzednio charakter empiryczny i cokolwiek przypadkowy, zastąpiliśmy czynnościami, mającymi głębokie naukowe uzasadnienie.

Postępując w ten sposób uczyniliśmy projektowanie urządzeń techniki łączności nauką statystyczną, działem mechaniki statystycznej. W rzeczywistości pojęcia mechaniki statystycznej wdzierają się na teren wszystkich dziedzin nauki już od przeszło stu lat. Przekonamy się, że dominacja mechaniki statystycznej we współczesnej fizyce ma bardzo podstawowe znaczenie dla interpretacji natury czasu. W przypadku techniki łączności ważność pojęć statystycznych jest jednak oczywista w sposób bezpośredni. Przekazywanie informacji jest możliwe tylko jako przekazywanie pewnych alternatyw. Gdyby miała być przekazywana tylko jedna ewentualność, uczynilibyśmy najlepiej (i uniknęlibyśmy kłopotu) nie wysyłając w ogóle żadnej wiadomości. Telegraf i telefon mogą pełnić swe funkcje tylko wówczas, gdy przenoszone przez nie sygnały (wiadomości) bezustannie zmieniają się w sposób nie dający się całkowicie wyznaczyć z ich własnej przeszłości i mogą pracować dobrze tylko wówczas, gdy zmienność sygnałów pozostaje w zgodzie z zasadami pewnego rodzaju statystycznej regularności.

Aby uporać się z tym aspektem techniki łączności musieliśmy opracować statystyczną teorię ilości informacji, w której jednostkę stanowi ta ilość informacji, która jest przekazywana przy pojedynczej (jednokrotnej) decyzji wyboru między równoprawdopodobnymi wykluczającymi się wzajemnie możliwościami. Koncepcja ta pojawiła się w tym samym mniej więcej czasie w pracach kilku badaczy, między innymi u statystyka R. A. Fishera, dr Shannona z Bell Telephone Laboratories oraz u autora niniejszej książki. Motywy, które skłoniły Fishera do badań nad tym przedmiotem wywodzą się z klasycznych teorii statystycznych, Shannona — z problemów kodowania informacji, autora — z zagadnień szumów i sygnałów w filtrach elektrycznych. Na marginesie należy wspomnieć, że pewne moje rozważania nad tym tematem wiążą się z wcześniejszą pracą Rosjanina Kołmogorowa[1], jakkolwiek znaczną część swoich prac ukończyłem przedtem, zanim zwróciłem uwagę na osiągnięcia rosyjskiej szkoły matematycznej.

Pojęcie ilości informacji wiąże się w bardzo naturalny sposób z pewnym

---

[1] Kolmogoroff A. N., *Interpolation und Extrapolation von stationaren zufälligen Folgen*, „Bull. Acad. Sci. USSR", Ser. Math., 5 (1941), str. 3-14.

klasycznym pojęciem mechaniki statystycznej, mianowicie z *entropią*. Podczas, gdy ilość informacji zawartej w układzie jest miarą stopnia jego zorganizowania, entropia układu jest miarą stopnia dezorganizacji; jedno pojęcie jest po prostu przeciwieństwem drugiego. Ten punkt widzenia skłania nas do rozważań na temat drugiego prawa termodynamiki i tak zwanych demonów Maxwella. Problemy takie pojawiają się również — niezależnie od dotychczas wymienionych kierunków — w badaniach nad enzymami i innymi katalizatorami i mają podstawowe znaczenie dla poznania tak zasadniczych zjawisk występujących w materii żywej, jak przemiana materii i rozmnażanie. Trzecia podstawowa cecha organizmów żywych, a mianowicie wrażliwość na bodźce zewnętrzne, jest domeną teorii informacji i wiąże się z koncepcjami, które omówiliśmy wyżej.[1]

W ten sposób prawie cztery lata temu naukowcy zgrupowani wokół dr Rosenbluetha i mnie uświadomili sobie, że problemy komunikacji, sterowania i mechaniki statystycznej stanowią zasadniczo jedną całość, niezależnie od tego, czy dotyczą maszyny, czy istoty żywej. Z drugiej strony jednak poważną przeszkodą był brak takiej jedności w literaturze tematu, brak wspólnej terminologii, wreszcie nawet brak oddzielnej nazwy dla tej dziedziny. Po długich rozważaniach doszliśmy do wniosku, że cała istniejąca terminologia jest zbyt wyraźnie obciążona takimi czy innymi znaczeniami, by mogła służyć sprawie przyszłego rozwoju nowej nauki tak dobrze, jak powinna. Zostaliśmy zmuszeni, jak to często bywa, do ukucia przynajmniej jednego sztucznego neogreckiego wyrażenia, które wypełniłoby lukę. Zdecydowaliśmy się nadać całej dziedzinie teorii sterowania i komunikacji w maszynach i zwierzętach nazwę cybernetyki, którą utworzyliśmy z greckiego *κυβερνητης*, czyli *sternik*. Wybierając ją chcieliśmy podkreślić, że pierwszą z ważnych opublikowanych prac o mechanizmach ze sprzężeniem zwrotnym był artykuł Clerka Maxwella z roku 1868[2] o regulatorach, które autor określał nazwą *governors* pochodzącą właśnie od greckiego słowa *κυβερνητης*. Pragnęliśmy również nawiązać do faktu, że okrętowy mechanizm sterowy jest w istocie jednym z najwcześniejszych i najlepiej rozwiniętych mechanizmów ze sprzężeniem zwrotnym.

---

[1] Schrödinger E., *What is Life?*, Cambridge 1945, Cambridge University Press.

[2] Maxwell J. C., „Proc. Roy. Soc.", London, 16 (1868), str. 270 - 283.

Jakkolwiek sam termin *cybernetyka* nie istniał przed latem 1947 roku, to jednak uznaliśmy za wygodne używać go w odniesieniu do wcześniejszych epok rozwoju tej dziedziny. Mniej więcej od roku 1942 jej rozwój postępował naprzód na wielu frontach jednocześnie. Koncepcje zawarte we wspólnym artykule Bigelowa, Rosenbluetha i Wienera zostały rozpowszechnione przez dr Rosenbluetha na spotkaniu poświęconym sprawom centralnego hamowania w układzie nerwowym, które odbyło się w 1942 r. w Nowym Jorku pod auspicjami Josiah Macy Foundation. Wśród uczestników tego spotkania znajdował się dr Warren McCulloch z Medical School of the University of Illinois, który już przedtem był w kontakcie z dr Rosenbluethem i ze mną i zajmował się badaniami nad organizacją kory mózgowej i mózgu.

W tym momencie na scenę wkracza czynnik, który przewija się wciąż w historii cybernetyki: wpływ logiki matematycznej. Gdybym miał wybrać z historii nauki patrona dla cybernetyki — wybrałbym Leibniza. Filozofia Leibniza koncentruje się wokół dwóch ściśle ze sobą związanych koncepcji: uniwersalnego symbolizmu i rachunku rozumowania. Z nich pochodzi współczesna nam notacja matematyczna i logika symboliczna. Podobnie jak rachunek arytmetyczny użycza swych metod mechanizacji techniki obliczeniowej od abakusa poprzez ręczny arytmometr do dzisiejszych ultraszybkich maszyn liczących, tak *calculus ratiocinator* Leibniza zawiera w sobie zalążki maszyny rozumującej; *machina ratiocinatrix*. Co więcej, sam Leibniz, podobnie jak jego poprzednik Pascal, interesował się budową maszyn liczących z metalu. Nie może nas zatem wcale dziwić, że ten sam intelektualny bodziec, który spowodował rozwój logiki matematycznej, doprowadził jednocześnie do prób idealnej lub rzeczywistej mechanizacji procesów myślowych.

Dowód matematyczny, którego przebieg możemy prześledzić, musi być zapisany przy pomocy skończonej liczby symboli. Za pomocą tych symboli można wprawdzie odwoływać się do pojęcia nieskończoności, jednakże jedynie sumując po sobie skończoną liczbę kroków. Tak dzieje się w przypadku indukcji matematycznej, gdzie dowodząc, że twierdzenie zależne od parametru n jest prawdziwe dla wszystkich dodatnich n postępujemy w ten sposób, że wykazujemy najpierw prawdziwość twierdzenia dla $n=0$, a następnie dowodzimy, że z jego prawdziwości dla n wynika prawdziwość dla $n+1$. Co więcej — choć może się wydawać, że jest

inaczej – liczba reguł działania naszego mechanizmu dedukcyjnego musi być również skończona, skoro odwołujemy się do pojęcia nieskończoności, wyrażając ją przy pomocy skończonej liczby terminów. Krótko mówiąc, zarówno dla nominalistów (jak Hilbert) jak i dla intuicjonistów (Weyl) stało się rzeczą dość jasną, że rozbudowywanie teorii należących do logiki matematycznej podlega takiego samego rodzaju ograniczeniom jak te, które ograniczają sprawność maszyny liczącej. Jak się przekonamy później, można nawet w ten sposób interpretować paradoksy Cantora i Russela.

Sam jestem dawnym uczniem Russela i jego wpływowi zawdzięczam wiele. Dr Shannon wziął za temat swej pracy doktorskiej w Massachusetts Institute of Technology zastosowanie metod klasycznej algebry Boole'a do badań nad elektrycznymi układami przełączającymi. Turing, będący chyba pierwszym wśród tych, którzy badali drogą eksperymentu intelektualnego logiczne możliwości maszyn, pracował w czasie wojny dla rządu brytyjskiego jako elektronik, a obecnie kieruje programem badań nad nowoczesnymi maszynami liczącymi w National Physical Laboratory w Teddington.

Innym, młodszym imigrantem z terenu logiki matematycznej do cybernetyki jest Walter Pitts. Był on w Chicago uczniem Carnapa, pozostawał również w kontakcie z prof. Rashevsky'm i jego szkołą biofizyczną. Należy tu wspomnieć, że ta właśnie grupa przyczyniła się w znacznym stopniu do skierowania uwagi badaczy o matematycznym nastawieniu na możliwości kryjące się w naukach biologicznych, choć niektórzy z nas uważali, że naukowcy ci byli zbyt silnie pochłonięci zagadnieniami energii i potencjału oraz metodami klasycznej fizyki, by mogli dojść do zadowalających rezultatów w badaniach nad układami takiego typu, jak układ nerwowy, którego działanie nie zamyka się przecież wcale w kręgu zagadnień energetycznych.

Pitts miał szczęście dostać się pod wpływ MacCullocha i obaj zaczęli dość wcześnie pracować nad problemami połączeń synaptycznych włókien nerwowych z układem o zadanych właściwościach ogólnych. Niezależnie od Shannona zastosowali oni metody logiki matematycznej do tych fragmentów rozważań, w których występują zagadnienia przełączania. Dodali również nowe schematy, które nie występują we wcześniejszej pracy Shannona, jakkolwiek były z pewnością, sugerowane w koncepcjach Turinga: użycie czasu jako parametru, rozważania na temat sieci

zawierających zamknięte pętle oraz na temat opóźnień synaptycznych i innych[1].

W lecie 1943 r. zetknąłem się z dr J. Letvinem z Boston City Hospital, który bardzo interesował się tematyką działania mechanizmów nerwowych. Był on bliskim przyjacielem Pittsa i zapoznał mnie z jego pracą[2]. Skłonił też Pittsa, aby przeniósł się do Bostonu i poznał go z dr Rosenbluethem i ze mną. Wprowadziliśmy Pittsa do naszej grupy. Pitts przybył do Massachusetts Institute of Technology na jesieni 1943, by pracować wspólnie ze mną i pogłębiać swe wykształcenie matematyczne potrzebne do badań w dziedzinie nowej nauki — cybernetyki, która w owym czasie już się narodziła, choć jeszcze nie była ochrzczona.

Pitts znał już wówczas dobrze logikę matematyczną i neurofizjologię, jednakże nie miał dotąd okazji do szerszych kontaktów ze środowiskiem technicznym. W szczególności, nie znał pracy dr Shannona i nie zetknął się szerzej z możliwościami elektroniki. Był bardzo poruszony, gdy pokazałem mu nowoczesne lampy elektronowe i wyjaśniłem, że są one idealnymi środkami dla fizycznej realizacji jego obwodów i układów neuronowych. Stało się wówczas dla nas rzeczą jasną, że ultraszybka maszyna licząca, składająca się przecież z układów przełączających, musi stanowić niemal idealny model zjawisk występujących w układzie nerwowym. Zasada „wszystko lub nic" obowiązująca przy pobudzaniu neuronów jest ścisłym odpowiednikiem alternatywnego wyboru dokonywanego przy ustalaniu cyfry w skali dwójkowej, którą już wówczas niejeden z nas uważał za najbardziej odpowiednią podstawę działania maszyn liczących. Synapsa jest niczym innym, jak mechanizmem określającym, czy dana kombinacja sygnałów wejściowych, przychodzących z innych elementów, stanowi bodziec wystarczający do pobudzenia następnego elementu; musi on mieć również swój ścisły odpowiednik w maszynie liczącej. Interpretacja natury pamięci i jej odmian u zwierząt znajduje odpowiadający sobie problem: konstrukcji sztucznej pamięci w maszynie.

W tym czasie okazało się, że konstrukcja maszyn liczących jest dla

---

[1] Turing A. M., *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*, „Proceedings of the London Mathematical Society", Ser. 2, 42 (1936), str. 230÷265.

[2] McCulloch W. S., Pitts W., *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*, Bull. Math. Biophys., 5 (1943), str. 115 - 133.

celów wojennych zadaniem znacznie ważniejszym, niż to sugerowała pierwotnie opinia dr Busha. Prace nad tym zagadnieniem postępowały w kilku ośrodkach w kierunku niezbyt różniącym się od tego, który wskazywałem w swoim wcześniejszym sprawozdaniu. Harvard, Aberdeen Proving Ground i University of Pensylvania już konstruowały maszyny, a Institute for Advanced Study w Princeton i Massachusetts Institute of Technology miały również wkrótce wkroczyć na tę drogę. W pracach nad maszynami liczącymi dawał się zaobserwować stopniowy postęp: od montażu mechanicznego przechodzono do elektrycznego, od skali dziesiętnej do dwójkowej, od przekaźników mechanicznych do elektrycznych; od kierowania przebiegiem operacji przez człowieka do działania kierowanego automatycznie. Krótko mówiąc, każda nowa maszyna była bardziej niż poprzednia zgodna z memorandum, jakie przesłałem do dr Busha. W środowisku osób zainteresowanych tą tematyką panował ciągły ruch. Mieliśmy okazję wymieniać nasze poglądy z kolegami, w szczególności z dr Aikenem z Harvard, dr von Neumannem z Institute for Advanced Study i dr Golstine'm od maszyn Eniac i Edvac z University of Pensylvania. Wszędzie spotykaliśmy się z życzliwym przyjęciem i wkrótce słownik inżynierów został „zanieczyszczony" pojęciami używanymi przez neurofizjologów i psychologów.

W tym stadium badań dr von Neumann i ja uznaliśmy za potrzebne zorganizowanie spotkania wszystkich osób interesujących się tym, co obecnie nazywamy cybernetyką. Spotkanie to odbyło się w końcu zimy 1943 - 44 w Princeton. Reprezentowani byli na nim inżynierowie, fizjologowie i matematycy. Dr Rosenblueth nie mógł być obecny, ponieważ przyjął już zaproszenie do objęcia kierownictwa laboratoriów fizjologicznych Instituto Nacional de Cardiologia w Meksyku, jednak fizjologów reprezentowali dr McCulloch i dr Lorente de Nó z Rockefeller Institute. Nie mógł również przybyć dr Aiken, lecz wśród obecnych na spotkaniu projektantów maszyn liczących był dr Goldstine, a dr von Neumann, Pitts i ja byliśmy matematykami. Fizjologowie przedstawili swój punkt widzenia na zagadnienia cybernetyki, a projektanci maszyn liczących zaprezentowali swoje metody i cele. Przy końcu spotkania stało się dla wszystkich jasne, że istnieje zbiór fundamentalnych koncepcji wspólnych dla tak różnych dziedzin, że naukowcy z każdej z grup już mogą używać pojęć lepiej sprecyzowanych przez innych, wreszcie, że powinno się podjąć próby ustalenia wspólnego słownictwa.

Na długo przedtem kierowana przez dr Warrena Weavera grupa zajmująca się badaniami dla celów wojennych opublikowała dokument, najpierw tajny, potem poufny, zawierający wyniki pokrywające się z pracą Bigelowa i moją na temat urządzeń przewidujących i filtrów elektrycznych. Ustalono tam, że warunki działania artylerii przeciwlotniczej nie usprawiedliwiają prób budowy specjalnych aparatów do krzywoliniowego przewidywania, lecz same ich zasady okazały się prawidłowe i użyteczne, a nawet zostały wykorzystane przez państwo do celów wygładzenia przebiegów występujących w wielu dziedzinach techniki. W szczególności wykazano, że pewien typ równań całkowych, do których sprowadzają się zagadnienia rachunku wariacyjnego, występuje w problemach związanych z falowodami i w licznych innych zagadnieniach, którymi zajmuje się matematyka stosowana. W każdym razie, w ten czy inny sposób w momencie zakończenia wojny koncepcje pochodzące z teorii przewidywania i statystyczne podejście do techniki łączności stały się już własnością znacznej części statystyków i inżynierów łączności w Stanach Zjednoczonych i Wielkiej Brytanii. Pojawił się również w druku mój dokument rządowy (obecnie wyczerpany) i znaczna liczba wypełniających lukę artykułów Levinsona[1], Wallmana, Daniella, Phillipsa i innych. Przygotowałem również obszerny matematyczny dokument, nad którym pracowałem przez kilka lat chcąc utrwalić wyniki moich badań, jednakże niezależne ode mnie okoliczności uniemożliwiły szybkie jego opublikowanie. Wreszcie, po spotkaniu w American Mathematical Society oraz Institute of Mathematical Statistics w Nowym Jorku na wiosnę 1947 r. (było ono poświęcone badaniom nad procesami stochastycznymi, prowadzonymi z punktu widzenia bardzo zbliżonego do cybernetyki) część mego rękopisu przesłałem profesorowi Doobowi z Univeristy of Illinois po to, by została ona przerobiona zgodnie z jego notacją i jego koncepcjami i opublikowana jako książka w serii przeglądów matematycznych (Mathematical Surveys) wydawanych przez American Mathematical Society. Opracowałem też część moich prac w formie wykładów prowadzonych na wydziale matematycznym MIT-u w lecie 1945 r. W tym czasie powrócił z Chin mój dawny uczeń i współpracownik[2] dr Y. W. Lee. Prowadzi on od jesieni 1947 r. wykłady z nowych

---

[1] Levinson J. N., Math. and Physics, 25, str. 261-278, 26, str. 110-119 (1947)

[2] Lee Y. W. J., Math. and Physics, 11 (1932), str. 261-278.

metod projektowania filtrów elektrycznych i podobnych układów na wydziale elektrycznym MIT-u i zamierza opracować materiał tych wykładów w postaci książkowej. Jednocześnie ma być ponownie wydrukowany wydany już poprzednio dokument rządowy[1].

Jak już pisałem, dr Rosenblueth wrócił do Meksyku na początku 1944 roku. Na wiosnę 1945 r. otrzymałem z Mexican Mathematical Society zaproszenie do wzięcia udziału w spotkaniu, które miało się odbyć w czerwcu tegoż roku w Guadalajara. Zaproszenie było poparte przez Comision Instigadora y Coordinadora de la Investigación Cientifica, kierowaną przez dr Manuela Sandoval Vallarta, o którym również już wspomniałem. Dr Rosenblueth zaprosił mnie do udziału w pewnych badaniach naukowych, a Instituto Nacional de Cardiologia pod dyrekcją dr Ignacio Cháveza użyczył mi swej gościnności.

Pozostałem wówczas w Meksyku około dziesięciu tygodni. Wraz z dr Rosenbluethem zdecydowaliśmy się kontynuować kierunek prac, o którym dyskutowaliśmy z dr Walterem B. Cannonem. Uczony ten był również u dr Rosenbluetha; jego pobyt tam okazał się niestety ostatnią wizytą. Praca, którą podjęliśmy, była poświęcona związkom między tonicznymi, klonicznymi i fazowymi skurczami w padaczce a skurczem tonicznym i migotaniem mięśnia sercowego oraz biciem serca. Byliśmy zdania, że mięsień sercowy jest łatwo pobudzalną tkanką, równie dobrze nadającą się do badań nad mechanizmami przewodzenia jak tkanka nerwowa, a anastomozy i skrzyżowania włókien mięśnia sercowego dają zjawiska prostsze niż te, które występują w synapsach komórek nerwowych. Byliśmy również głęboko wdzięczni dr Chávezowi za jego gościnność i mimo że ograniczanie działalności dr Rosenbluetha do badań w dziedzinie kardiologii nigdy nie leżało w zwyczajach Instytutu — byliśmy szczęśliwi, że dano nam możliwość wzniesienia swego przyczynku do podstawowego kierunku prac tej instytucji.

Prace nasze objęły dwa kierunki: badanie zjawisk przewodności i latencji w dwu- lub więcej wymiarowych jednorodnych ośrodkach przewodzących i statystyczne badanie właściwości sieci o przypadkowej strukturze, składających się z włókien przewodzących. Pierwszy z nich doprowadził do

---

[1] Wiener N., *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*, New York 1949, Technology Press and Wiley.

sformułowania podstaw teorii zjawiska trzepotania serca, drugi — do jednego z możliwych sposobów interpretacji zjawiska migotania mięśnia sercowego. Oba kierunki prac zostały przez nas opublikowane w formie artykułu[1] i jakkolwiek nasze wcześniejsze rezultaty wskazywały na potrzebę wprowadzenia znacznych zmian i uzupełnień, to praca o trzepotaniu serca jest obecnie przeglądana i poprawiana przez Olivera G. Selfridge'a z Massachusetts Institute of Technology, a metody statystyczne zastosowane w badaniach sieci złożonych z włókien mięśnia sercowego zostały rozszerzone na badania sieci neuronowych przez Waltera Pittsa, pracującego obecnie jako stypendysta (Fellow) John Simon Guggenheim Foundation. Eksperymentalną część pracy wykonuje obecnie dr Rosenblueth z pomocą dr Garcia Ramos z Instituto Nacional de Cardiologia i meksykańskiej Wojskowej Akademii Medycznej.

Na spotkaniu Meksykańskiego Towarzystwa Naukowego w Guadalajara przedstawiliśmy wspólnie z dr Rosenbluethem niektóre z naszych rezultatów. Uznaliśmy już, że nasze wcześniejsze plany współpracy okazały się wykonalne i szczęśliwie się złożyło, że mieliśmy okazję reprezentowania ich wyników szerszemu audytorium. Wiosną 1946 r. dr McCulloch uzgodnił z Josiah Macy Foundation plany zorganizowania w Nowym Jorku pierwszej serii spotkań poświęconych zagadnieniu sprzężenia zwrotnego. Spotkania te były prowadzone w sposób tradycyjnie obowiązujący w Fundacji wypracowanej głównie przez dr Franka Fremont-Smitha, organizującego je z ramienia wspomnianej instytucji. Zasada ich polegała na tym, by zebrać niewielką, nie przekraczającą dwudziestu osób, grupę naukowców z różnych powiązanych ze sobą dziedzin i zatrzymać ich przez dwa kolejne dni na całodziennych nieformalnych spotkaniach referatowych, dyskusjach i wspólnych posiłkach, aż znajdą okazję do przełamania dzielących ich różnic i nauczą się myśleć tymi samymi kategoriami. Jądro grupy uczestników naszego spotkania stanowił zespół, który zebrał się w Princeton w 1944 roku, jednakże McCulloch i Fremont-Smith trafnie przewidzieli psychologiczne i socjologiczne implikacje poruszanej tematyki i dokooptowali do grupy pewną liczbę znanych psychologów, socjologów i antropologów. Potrzeba dołączenia psychologów była oczywista już od

[1] Wiener N., Rosenblueth A., *The Mathematical Formulation of the Problem of Conduction of Impulses in a Network of Connected Excitable Elements, Specifically in Cardiac Muscle*, Arch. Inst. Cardiol. Mex. 16 (1946), str. 205-265.

samego początku. Kto bada układ nerwowy — nie może zapomnieć o psychice, kto bada psychikę — nie może zapomnieć o układzie nerwowym. Znaczna część dawnej psychologii okazała się być niczym innym, jak tylko fizjologią narządów zmysłów; a zasadniczy punkt ciężkości tych koncepcji, które cybernetyka wnosi do psychologii leży w fizjologii i anatomii wysoko wyspecjalizowanych obszarów kory mózgowej, połączonej z tymi narządami zmysłowymi. Od początku przewidywaliśmy, że okaże się, iż problem percepcji postaci (*Gestalt*) czy percepcyjne tworzenie się pojęć ogólnych są właśnie tej natury. Na czym polega mechanizm dzięki któremu rozpoznajemy, że kwadrat jest kwadratem, niezależnie od jego położenia i rozmiaru? Po to by pomogli nam w tych zagadnieniach, a także po to, byśmy mogli naszymi pomysłami pomóc im w rozumieniu podobnych zjawisk, mieliśmy wśród uczestników spotkań takich psychologów, jak profesor Klüver z University of Chicago, nieżyjący już dziś dr Kurt Lewin z Massachusetts Institute of Technology i dr E. Ericsson z Nowego Jorku.

Co się tyczy socjologii i antropologii, to jest rzeczą jasną, że rola zagadnienia informacji i komunikowania się jako mechanizmów organizujących wykracza poza ramy jednostki i obejmuje całe społeczeństwa. Jest zupełnym niepodobieństwem poznać takie zbiorowiska społeczne jak społeczeństwo mrówek, bez głębokiego poznania ich środków porozumiewania się. Szczęśliwie się złożyło, że pomocą w tych sprawach służył nam dr Schneirla. Z podobnymi problemami organizowania się ludzi szukaliśmy pomocy u antropologów: dr Batesona i dr Margaret Mead, a dr Morgenstern z Institute for Advanced Study był naszym doradcą w sprawach organizmów społecznych widzianych w świetle teorii ekonomicznych. Przy okazji warto wspomnieć, że jego bardzo ważna książka o teorii gier, napisana wspólnie z dr von Neumannem, stanowi niesłychanie ciekawą pracę o organizmach społecznych wykonaną przy użyciu metod ściśle związanych — jakkolwiek odmiennych — z podstawową tematyką cybernetyki. Dr Lewin i inni reprezentowali najnowsze prace nad teorią badania opinii publicznej i techniką jej kształtowania, a dr F. C. S. Northrup zajmował się próbą oceny filozoficznego znaczenia naszych prac.

Nie wyczerpuje to jeszcze pełnej listy uczestników naszych spotkań. Rozszerzyliśmy ją o dalszych inżynierów i matematyków takich, jak Bigelow i Savage; neuroanatomów i neurofizjologów, jak von Bonin i Lloyd i tak dalej. Nasze pierwsze spotkanie odbyło się na wiosnę 1946 r. Poświęcone

było ono głównie referatom o charakterze dydaktycznym, których autorami były osoby biorące poprzednio udział w spotkaniu w Princeton, a jego celem było dokonanie ogólnej oceny ważności całej dziedziny przez wszystkich obecnych. Podczas spotkania ustalono, że idee kryjące się w cybernetyce są w odczuciu wszystkich uczestników na tyle ważne i interesujące, by warto było organizować takie dyskusje regularnie co sześć miesięcy, a przed następnym spotkaniem w pełnym składzie zebrać mniejszą grupę osób o słabszym przygotowaniu matematycznym i w możliwie przystępny sposób wyjaśnić im zasady poruszanych koncepcji matematycznych.

W lecie 1946 r. przy poparciu Rockefeller Foundation, korzystając z gościnności Instituto Nacional de Cardiologia, wróciłem do Meksyku, by kontynuować prace podjęte wspólnie z dr Rosenbluethem. Tym razem postanowiliśmy zająć się bezpośrednio problematyką sprzężeń zwrotnych w układzie nerwowym i stwierdzić, jak daleko da się w tej dziedzinie dojść drogą eksperymentalną. Naszym zwierzęciem doświadczalnym był kot, a badanym mięśniem — quadriceps extensor femoris. Odcięliśmy zaczep mięśnia, przymocowaliśmy go do dźwigni obciążonej znaną siłą i rejestrowaliśmy izometryczne i izotoniczne skurcze mięśnia. Użyliśmy także oscylografu do równoczesnego rejestrowania zmian elektrycznych w samym mięśniu. Prowadziliśmy doświadczenia głównie na kotach, najpierw odmóżdżonych pod narkozą, potem sprowadzonych do postaci preparatu rdzeniowego przez poprzeczne przecięcie rdzenia kręgowego w odcinku piersiowym. W wielu przypadkach zastosowano strychninę do zwiększenia odpowiedzi odruchowych. Obciążaliśmy mięsień aż do punktu, w którym dotknięcie wprawiało go w skurcze o charakterze okresowym, określane w języku fizjologów jako *clonus*. Obserwowaliśmy te skurcze, zwracając jednocześnie uwagę na fizjologiczne warunki zwierzęcia, obciążenie mięśnia, częstotliwość drgań, ich poziom podstawowy i amplitudę. Dane te próbowaliśmy analizować postępując tak, jak gdybyśmy analizowali układ mechaniczny lub elektryczny drgający w podobny sposób. Stosowaliśmy na przykład metody, które podaje MacColl w swej książce o serwomechanizmach. Nie ma tu miejsca na pełne omawianie wyników prac, które zresztą obecnie powtarzamy i przygotowujemy do opublikowania. Można jedynie stwierdzić, że jest pewne lub wysoce prawdopodobne, iż częstotliwość skurczów klonicznych zależy od warunków obciążenia w znacznie mniejszym stopniu

niż oczekiwaliśmy; jest ona określona przez parametry zamkniętego łuku: (nerw odprowadzający) – (mięsień) – (zakończenie nerwowe kinestetyczne) – (nerw doprowadzający) – (synapsa ośrodkowa) – (nerw odprowadzający) silniej niż przez jakiekolwiek inne czynniki. Obwód ten nie składa się nawet w przybliżeniu z operatorów liniowych, jeśli za podstawę oceny liniowości przyjmiemy liczbę impulsów przenoszonych przez nerw odprowadzający w ciągu sekundy, jednakże staje się znacznie bardziej liniowy, jeśli zastąpimy liczbę impulsów przez jej logarytm. Odpowiada to faktowi, że obwiednia krzywej pobudzania nerwu odprowadzającego nie jest zbliżona do sinusoidy, natomiast logarytm tej krzywej jest znacznie bardziej sinusoidalny, a tymczasem wiemy, że w liniowym układzie drgającym o stałej energii kształt krzywej drgań musi być sinusoidalny zawsze z wyjątkiem zbioru przypadków o zerowym prawdopodobieństwie. Pojęcia „torowanie" i „hamowanie" mają charakter znacznie bardziej multiplikatywny, niż addytywny. Całkowite hamowanie oznacza na przykład mnożenie przez zero, a częściowe hamowanie – mnożenie przez małą wielkość. Tak rozumianych pojęć torowania i hamowania użyto[1] w rozważaniach nad łukiem odruchowym. Co więcej, synapsa jest rejestratorem koincydencji impulsów; włókno odprowadzające zostaje pobudzone tylko wówczas, gdy liczba impulsów sumujących się w krótkim przedziale czasu przekracza pewną progową wartość. Jeśli próg ten jest wystarczająco mały w porównaniu z liczbą synaps, to mechanizm synaptyczny służy do mnożenia prawdopodobieństw i jedynie w układzie logarytmicznym możliwe jest, by miał on właściwości choćby w przybliżeniu liniowe. Przybliżony logarytmiczny charakter mechanizmu synaptycznego wiąże się z pewnością z przybliżoną logarytmicznością prawa Webera–Fechnera (prawo intensywności wrażeń), nawet jeśli prawo to stanowi jedynie pierwsze przybliżenie.

Najbardziej uderzającym wynikiem opisanych badań jest fakt, że przy założeniu takiej „logarytmicznej" liniowości układu, mając dane otrzymane z obserwacji przewodzenia pojedynczych impulsów przez różne elementy łuku nerwowo–mięśniowego możemy obliczyć z bardzo dobrym przybliżeniem częstotliwość skurczów klonicznych, stosując metody opracowane już przez automatyków w celu wyznaczania częstotliwości niekontro-

[1] Nieopublikowane artykuły o skurczu klonicznym, Instituto Nacional de Cardiologia, Meksyk.

lowanych oscylacji w uszkodzonych układach ze sprzężeniem zwrotnym. Obliczona przez nas częstotliwość teoretyczna wynosi około 13,9 drgań na sekundę, podczas gdy doświadczalnie obserwowane częstotliwości wykazywały wahania w granicach od 7 do 30 drgań na sekundę, choć najczęściej nie wykraczały poza przedział $12 \div 17$ drgań na sekundę. Jak na warunki doświadczenia zgodność ta jest znakomita.

Częstotliwość skurczów klonicznych nie jest jedynym ważnym zjawiskiem, które możemy zaobserwować; występuje również dość wolna zmiana mięśniowego napięcia podstawowego i jeszcze wolniejsza zmiana amplitudy. Zjawiska te są bez wątpienia liniowe. Odpowiednio wolne zmiany parametrów stałych w liniowym układzie drgającym można w pierwszym przybliżeniu traktować jak zmiany nieskończenie wolne i przyjmować, że w każdym przedziale czasu układ zachowuje się tak, jak zachowywałby się, gdyby jego parametry miały stałą, odpowiadającą temu czasowi wartość. Jest to metoda znana w innych działach fizyki jako metoda perturbacji wiekowych. Może być ona zastosowana również w badaniach nad poziomem podstawowym i amplitudą skurczów klonicznych. Jakkolwiek praca ta nie została jeszcze ukończona, to jednak jasną jest rzeczą, że takie podejście jest zarówno dopuszczalne i obiecujące. Istnieje poważne przypuszczenie, że jakkolwiek czasowe zachowanie się głównego łuku w czasie skurczy klonicznych wskazuje, że jest to łuk dwuneuronowy, to jednak wzmocnienie impulsów jest w jednym lub wielu punktach łuku zmienne, a na część tego wzmocnienia mogą mieć wpływ wolne, wieloneuronowe procesy, przebiegające w wyższych częściach centralnego układu nerwowego niż łańcuch rdzeniowy, odpowiedzialny w pierwszym rzędzie za częstotliwość skurczów klonicznych. Na to zmienne wzmocnienie można wpływać za pośrednictwem ogólnego poziomu aktywności ośrodkowej stosując strychninę, środki anestetyczne, odmóżdżenie i inne metody.

Tak wyglądały główne rezultaty badań, które jesienią 1946 r. przedstawiliśmy wspólnie z dr Rosenbluethem na spotkaniu w Macy Foundation i na posiedzeniu Nowojorskiej Akademii Nauk, zorganizowanym w tym samym czasie po to, aby spopularyzować pojęcia cybernetyki wśród szerszej publiczności. Byliśmy zadowoleni z naszych wyników i całkowicie przekonani o zasadniczej możliwości prowadzenia dalszych prac w tym kierunku, niemniej jednak czuliśmy, że nasza współpraca trwała zbyt krótko i że pracowaliśmy ze zbyt wielkim napięciem, aby można było opubliko-

wać nasze rezultaty bez dalszego potwierdzenia eksperymentalnego. Potwierdzenia tego — co może oczywiście zakończyć się niepowodzeniem — poszukujemy obecnie, na jesieni i w lecie 1947 r.

Rockefeller Foundation dała już dr Rosenbluethowi dotację na wyposażenie nowego budynku laboratoryjnego w Instituto Nacional de Cardiologia. Uznaliśmy, że sytuacja dojrzała do tego, by wystąpić wspólnie do nich — to znaczy do dr Varrena Weavera, kierującego wydziałem nauk fizycznych i do dr Roberta Morisona, kierującego wydziałem nauk medycznych — i położyć podtawy zakrojonej na dłużej naukowej współpracy, będącej realizacją naszych dawnych planów w obecnych spokojniejszych, pokojowych czasach. Zyskaliśmy entuzjastyczne poparcie naszych macierzystych instytucji. Dr George Harrison, dziekan od spraw nauki, był w tych negocjacjach głównym przedstawicielem Massachusetts Institute of Technology, a dr Ingacio Chávez występował w imieniu Instituto Nacional de Cardiologia. W trakcie rozmów ustaliliśmy, że laboratoryjny ośrodek naszej wspólnej działalności powinien znajdować się przy meksykańskim Instytucie, zarówno dlatego, by nie dublować aparatury, jak i dlatego, że Rockefeller Foundation gorąco popierała zakładanie ośrodków naukowych w krajach Ameryki Łacińskiej. Przyjęty ostatecznie plan obejmował pięć lat. W tym czasie miałem spędzić co drugi rok sześć miesięcy w meksykańskim Instytucie, a dr Rosenblueth sześć miesięcy w MIT-cie w pozostałych latach. Przeznaczeniem okresów pracy w Meksyku jest zbieranie i interpretacja danych doświadczalnych związanych z cybernetyką, natomiast pozostałe lata mają być poświęcone na badania o charakterze bardziej teoretycznym, a przede wszystkim — na rozwiązanie bardzo trudnego zadania: opracowania takiego schematu kształcenia osób, pragnących zająć się nową dziedziną wiedzy, który dałby im nie tylko niezbędne wykształcenie matematyczne, fizyczne i techniczne, ale również znajomość metod biologii, psychologii i medycyny.

Na wiosnę 1947 r. dr McCulloch i Pitts wykonali pracę o dużym znaczeniu dla cybernetyki. Dr McCullochowi postawiono zadanie zaprojektowania aparatu, który umożliwiłby niewidomym odczytywanie drukowanego tekstu za pośrednictwem słuchu. Produkowanie, przy pomocy fotokomórki zmiennych dźwięków, odpowiadających znakom drukarskim, jest metodą znaną od dawna i można ją urzeczywistnić na wiele sposobów; trudność polega jednak na tym, by rodzaj dźwięku odpowiadał kształtowi litery niezależ-

nie od jej wielkości. Problem ten wiąże się ściśle z percepcją postaci (*Gestalt*), która umożliwia nam rozpoznanie, że kwadrat jest kwadratem, mimo zmian wielkości i położenia figury. Urządzenie dr McCulocha umożliwiło selektywne odczytywanie znaków drukarskich ze zbioru znaków o różnych stopniach powiększenia. Takie selektywne odczytywanie można prowadzić automatycznie, jako proces wybierania (scanning). Pomysł wybierania, pozwalającego na porównywanie figury danej z figurą standardową o stałej, lecz odmiennej wielkości wysunąłem już przedtem na jednym ze spotkań w Macy Foundation. Schemat aparatu, który miał wykonywać takie selektywne odczytywanie znaków, zwrócił uwagę dr von Bonina, który zapytał natychmiast: „Czy to jest schemat czwartej warstwy kory wzrokowej?" Postępując w myśl tej sugestii dr McCulloch opracował za pomocą Pittsa teorię dotyczącą anatomii i fizjologii wzrokowej kory mózgowej. W teorii tej operacja wybierania określona na zbiorze przekształceń gra ważną rolę. Praca została przedstawiona wiosną 1947 r. na spotkaniu w Macy Foundation i na posiedzeniu Nowojorskiej Akademii Nauk. Na koniec należy wspomnieć, że w procesie wybierania występuje pewien czas o charakterze okresowym, odpowiadający temu, co w telewizji nazywamy czasem wybierania. Na wielkość tego czasu wpływają różne czynniki natury anatomicznej, określające długość łańcucha kolejnych synaps, których działanie jest niezbędne do wykonania jednego cyklu pracy. Powodują one, że czas potrzebny na wykonanie pełnego cyklu działań jest rzędu dziesiątej części sekundy, jest zatem w przybliżeniu zgodny z okresem tak zwanego mózgowego rytmu alfa. Na podstawie innych doświadczeń przypuszczono już dawniej, że rytm alfa jest pochodzenia wzrokowego i ma wielkie znaczenie dla procesu percepcji kształtu.

Na wiosnę 1947 r. otrzymałem zaproszenie do wzięcia udziału w konferencji matematyków w. Nancy, poświęconej analizie harmonicznej. Zaproszenie to przyjąłem i w czasie swej podróży tam i z powrotem spędziłem łącznie trzy tygodnie w Anglii, głównie jako gość mego starego przyjaciela profesora J. B. S. Haldane. Miałem doskonałą okazję, by zetknąć się z większością osób pracujących nad ultraszybkimi maszynami liczącymi, szczególnie w Manchester i w National Physical Laboratory w Teddington; a przede wszystkim, aby porozmawiać o podstawowych koncepcjach cybernetyki z Turingiem. Odwiedziłem również pracownię psychologiczną w Cambridge, co stało się dobrą okazją do podyskutowania o prowadzonych

przez profesora F. C. Bartletta i jego zespół pracach nad rolą czynnika ludzkiego w procesach sterowania. Stwierdziłem, że zainteresowanie cybernetyką i poziom przygotowania w jej zakresie są w Anglii równie wysokie, jak w Stanach Zjednoczonych, a osiągnięcia techniczne — znakomite, choć oczywiście ograniczone mniejszą wysokością funduszy. W wielu ośrodkach napotkałem ogromne zainteresowania i zrozumienia dla możliwości cybernetyki, a profesorowie Haldane, H. Levy i Bernal uważali ją bez wątpienia za jeden z najbardziej aktualnych problemów nauki i filozofii naukowej. Nie stwierdziłem jednak, by w wysiłkach zmierzających do ujednolicenia tej dziedziny i do uzgodnienia różnych kierunków prac badawczych poczyniono postępy takie jak u nas w Stanach Zjednoczonych.

We Francji, w Nancy, na konferencji poświęconej analizie harmonicznej, wygłoszono pewną liczbę referatów jednoczących koncepcje statystyczne z koncepcjami techniki telekomunikacji w sposób całkowicie zgodny z poglądami cybernetyki. Należy tu przede wszystkim wymienić nazwiska panów Blanc-Lapierre i Loéve. Dostrzegłem również znaczne zainteresowanie tą tematyką ze strony części matematyków, fizjologów i fizyko-chemików, szczególnie w zakresie tych jej aspektów termodynamicznych, które ocierają się o znacznie bardziej ogólny problem: samej natury życia. O zagadnieniach tych dyskutowałem jeszcze przed mym wyjazdem, w Bostonie, z węgierskim biochemikiem, profesorem Szent-Györgyi i stwierdziłem, że jego poglądy są zgodne z moimi.

Jeszcze jedno zdarzenie z mego pobytu we Francji zasługuje na przypomnienie właśnie tutaj. Mój kolega, profesor G. de Santillana z MIT-u przedstawił mnie p. Freymannowi z wydawniczej firmy Hermann et Cie, który zamówił u mnie niniejszą książkę. Było mi miło otrzymać taką propozycję, tym bardziej, że p. Freymann jest Meksykaninem, a zarówno napisanie tej książki jak wykonanie znacznej części prowadzących do niej badań jest dziełem czasu spędzonego właśnie w Meksyku.

Jak już wspomniałem, między sugestiami co do kierunku prac, wysuwanymi na spotkaniach w Macy Foundation znajdowała się propozycja, by zająć się znaczeniem pojęcia porozumiewania się i środków porozumiewania się w układach społecznych. Z pewnością prawdą jest, że system społeczny jest tworem zorganizowanym, podobnym do indywidualnego osobnika, że stanowi pewną całość dzięki systemowi porozumiewania się, a w dynamice jego zachowania ważną rolę odgrywają cykliczne procesy o na-

turze sprzężeń zwrotnych. Stwierdzenie to pozostaje słuszne zarówno na terenie bardziej ogólnych nauk: antropologii i socjologii, jak i w nauce bardziej szczegółowej – ekonomii. W kręgu tych koncepcji obraca się, wspomniana już, bardzo ważna praca von Neumanna i Morgensterna o teorii gier. Na tej podstawie dr Gregory Bateson i dr Margaret Mead nalegali na mnie, bym w obliczu narastania socjologicznych i ekonomicznych problemów dzisiejszych niespokojnych czasów poświęcił znaczną część swej energii tym właśnie aspektom cybernetyki.

Jakkolwiek zgadzam się z ich poczuciem powagi sytuacji i spodziewam się, że zarówno oni sami, jak i inni naukowcy podejmą prace nad tego rodzaju problemami (sam zresztą zajmę się nimi w dalszych rozdziałach), to jednak nie podzielam ani ich przekonania, iż ta właśnie dziedzina zasługuje w pewnej kolejności na moją uwagę, ani nadziei, że można będzie w tej dziedzinie osiągnąć postęp tak wielki, by mógł on wywrzeć leczniczy wpływ na współczesne nam schorzenia społeczeństwa. Przede wszystkim nie dość, że główne zmienne wpływające na społeczeństwo mają charakter statystyczny, ale ponadto okresy statystyczne, na których się one opierają są niezwykle krótkie. Łączne traktowanie zagadnień ekonomicznych przemysłu stalowego przed i po wynalezieniu procesu Bessemera nie ma żadnego sensu, podobnie, jak nie ma sensu porównywanie statystyki produkcji kauczuku przed i po powstaniu przemysłu samochodowego, czy zapoczątkowaniu uprawy gatunku *Hevea* na Malajach. Nie ma również uzasadnienia zestawianie w jednej tabeli danych statystycznych o pojawianiu się chorób wenerycznych w okresie przed i po wprowadzeniu salwarsanu, chyba, że specjalnie w celu zbadania skuteczności tego środka. Dla zebrania rzetelnych danych statystycznych o społeczeństwie potrzebujemy długich okresów obserwacji *w zasadniczo niezmiennych warunkach* tak, jak do osiągnięcia dobrej rozróżnialności szczegółów potrzebna jest soczewka o dużej średnicy otworu. Zwiększając jedynie nominalną średnicę otworu nie zwiększymy skutecznej średnicy soczewki, jeśli jednocześnie nie jest ona zbudowana z materiału tak jednorodnego, że opóźnienie światła w poszczególnych jej partiach różni się od teoretycznie przewidywanego o wielkość mniejszą od długości fali świetlnej. Nauki humanistyczne stanowią nieodpowiedni grunt dla wypróbowywania nowych metod matematycznych, podobnie, jak stosowanie mechaniki statystycznej gazów nie jest odpowiednie w przypadku gdy objętość gazu jest porównywalna z rozmiarami cząsteczki, gdyż wówczas fluktuacje, które

pomijamy przy większych objętościach, stają się właśnie zjawiskiem o największym znaczeniu. Ponadto, przy braku bezpiecznych, typowych metod numerycznych rola osobistego osądu specjalisty przy szacowaniu wielkości socjologicznych, antropologicznych i ekonomicznych jest tak wielka, że nie jest to odpowiedni teren pracy dla nowicjusza, nie mającego jeszcze tego zapasu doświadczenia, który czyni z człowieka — eksperta. Na marginesie chciałbym podkreślić, że nowoczesny aparat teorii małych próbek statystycznych, w momencie, gdy wykracza poza określanie własnych, w szczególny sposób zdefinicjowanych parametrów i staje się metodą statystycznego wnioskowania o nowych przypadkach, nie daje w moim odczuciu wiarygodnych wyników, jeśli nie jest stosowany przez statystyka, który explicite zna lub w sposób niejawny czuje główne elementy dynamiki sytuacji.

Mówiłem tu o dziedzinie, w której nie oczekuję od cybernetyki zbyt wiele, gdyż jestem świadom niepewności danych, które spodziewamy się otrzymać. Są jednak dwie inne dziedziny, w których mam nadzieję, że przy pomocy koncepcji cybernetycznych uda się osiągnąć pewne praktyczne sukcesy, jakkolwiek na urzeczywistnienie tej nadziei trzeba będzie trochę poczekać. Jedną z takich dziedzin jest protetyka amputowanych lub sparaliżowanych kończyn. Jak widzieliśmy przy rozważaniach percepcji postaci, McCulloch wykorzystał już koncepcje z dziedziny techniki telekomunikacji do celów zastępowania utraconych narządów zmysłu, budując instrument umożliwiający niewidomym czytanie tekstu drukowanego za pośrednictwem słuchu. Aparat McCullocha przejmuje pewne funkcje nie tylko oka, lecz również kory wzrokowej. Istnieje oczywista możliwość dokonania czegoś podobnego w przypadku sztucznych kończyn. Utrata części kończyny nie tylko oznacza brak biernego fragmentu, stanowiącego zawieszenie dla dalszych części kończyny i mającego znaczenie jako mechaniczne przedłużenie kikuta; i nie tylko stratę na sile pewnych mięśni, lecz pociąga za sobą również zaniknięcie wszystkich wrażeń dotykowych i kinestetycznych pochodzących z tej części ciała. Współcześnie wytwarzane sztuczne kończyny usiłują wyrównać pierwsze dwa z wymienionych braków. Usunięcie trzeciego z nich leży jak dotąd poza zasięgiem ich możliwości. W przypadku najprostszej drewnianej sztywnej protezy nie odgrywa to roli: pręt, który zastępuje utraconą część kończyny nie ma „własnych" stopni swobody, a mechanizm kinestetyczny kikuta całkowicie wystarcza do kontrolowania jego położenia i prędkości. Inaczej dzieje się w przypadku protezy posiadają-

cej ruchomy staw kolanowy i skokowy, poruszanej przez pacjenta za pomocą nieuszkodzonych mięśni. Pacjent nie odbiera odpowiednich sygnałów o położeniu i ruchu stawów, co niekorzystnie wpływa na pewność poruszania się po nierównym terenie. Nie wydaje się, by jakieś nieprzezwyciężalne trudności uniemożliwiły wyposażenie sztucznych stawów i podeszwy stopy protezy w czujniki naprężenia lub ciśnienia, które byłoby połączone elektrycznie lub w inny sposób (np. poprzez wywoływanie wibracji) z nienaruszonymi partiami skóry. Współczesne protezy kończyn usuwają pewne skutki paraliżu powodowanego amputacją, jednakże nie usuwają ataksji. Przy użyciu odpowiednich receptorów ataksja powinna również w znacznym stopniu zaniknąć, a pacjent powinien uzyskać zdolność uczenia się odruchów, podobnych do tych, jakie wykorzystujemy wszyscy przy prowadzeniu samochodu, co umożliwiłoby mu chodzenie znacznie pewniejszym krokiem. To, co powiedzieliśmy wyżej o kończynach dolnych, odnosi się w jeszcze większym stopniu do rąk. Znany wszystkim czytelnikom książek o neurologii człowieczek obrazujący reprezentację ruchową części ciała w korze mózgowej świadczy o tym, że deficyt sensoryczny przy amputacji samego tylko kciuka jest znacznie większy, niż utrata wrażeń sensorycznych przy amputacji nogi nawet na wysokości stawu biodrowego.

Usiłowałem zreferować powyższe rozważania odpowiednim autorytetem, jednakże jak dotąd bez większych sukcesów. Nie wiem, czy te same pomysły wypłynęły już z innych źródeł, czy też może zostały już sprawdzone i okazały się technicznie niewykonalne. Jeśli nie uzyskały one jeszcze głębokiego znaczenia praktycznego, to powinny uzyskać je w najbliższej przyszłości.

Przejdźmy teraz do innej sprawy, która — jak sądzę — zasługuje na uwagę. Od dawna było dla mnie rzeczą jasną, że nowoczesna ultraszybka maszyna licząca stanowi idealny centralny układ nerwowy dla urządzeń automatycznego sterowania, a jej dane wejściowe i wyjściowe nie muszą mieć postaci liczb czy wykresów, lecz równie dobrze mogą — jako dane wejściowe — pochodzić ze sztucznych narządów zmysłów takich jak fotokomórki lub termometry i — jako dane wyjściowe — być sygnałami uruchamiającymi silniki lub elektromagnesy. Stosując czujniki naprężenia lub podobne urządzenia jako sztuczne organy zmysłu kinestetycznego informujące przez sprzężenie zwrotne centralny układ sterujący o działaniu tych ruchomych narządów, jesteśmy już teraz w stanie zbudować sztuczne

maszyny wykazujące niemal dowolnie doskonałą sprawność i precyzję działania. Na długo przed Nagasaki i pojawieniem się bomby atomowej w świadomości publicznej zdałem sobie sprawę, że stoimy przed innym zjawiskiem społecznym o niesłychanej wadze, kryjącym w sobie dobro i zło. Jak odległą wizją jest automatyczna fabryka lub taśma montażowa bez udziału człowieka — zadecyduje tylko to, czy będziemy chcieli włożyć w rozwiązanie pewnych problemów technicznych wysiłek równie wielki jak ten, który włożono na przykład w rozwój techniki radarowej w II wojnie światowej[1].

Powiedziałem, że to nowe osiągnięcia stwarzają nieograniczone możliwości, kryjące w sobie dobro i zło. Z jednej strony, sprawiają one, że metaforyczna dominacja maszyn, jaką wyobrażał sobie Samuel Butler, stanie się problemem niesłychanie bliskim i bynajmniej nie metaforycznym. Dadzą one rasie ludzkiej zastęp nowych i niesłychanie sprawnych mechanicznych niewolników, którzy będą pracować zamiast ludzi. Taka praca mechanizmów ma wszystkie ekonomiczne właściwości pracy niewolniczej, choć w przeciwieństwie do pracy niewolniczej nie nosi piętna ludzkiego okrucieństwa. Jednakże każda praca, godząca się na konkurencję z pracą niewolniczą akceptuje warunki pracy niewolniczej i w zasadzie sama jest pracą niewolniczą. Kluczowym słowem powyższego zdania jest *konkurencja*. Być może dla ludzkości jest bardzo dobrą rzeczą mieć maszyny, uwalniające ją od „czarnej" i niewdzięcznej pracy, a może tak nie jest. Nie wiem. Tym nowym możliwościom nie może wyjść na dobre ocenianie ich w kategoriach rynkowych, operowanie liczbą pieniędzy, które pozwolą zaoszczędzić, a to właśnie są terminy wolnego rynku, owa „piąta wolność" (*fifth freedom*), która stała się hasłem części amerykańskiej opinii, reprezentowanej przez National Association of Manufacturers i Saturday Evening Post. Mówię o amerykańskiej opinii, ponieważ jako Amerykanin znam ją najlepiej, ale pamiętajmy, że kramarze nie uznają granic narodowych.

Wyjaśnię chyba historyczne podłoże obecnej sytuacji, jeśli powiem, że pierwsza rewolucja przemysłowa, rewolucja „ponurych diabelskich młynków" doprowadziła poprzez konkurencję maszyn do dewaluacji ludzkich rąk. Nie ma takiej zapłaty, za którą amerykański robotnik „od łopaty"

---

[1] „Fortune", 32 (październik 1945), str. 139 - 147, (listopad 1945), str. 163 - 169.

mógłby dziś wyżyć, a która byłaby tak niska, by mógł on konkurować z koparką parową. Nowoczesna rewolucja przemysłowa zmierza do zdewaluowania ludzkich mózgów, przynajmniej w dziedzinie podejmowania prostszych, bardziej stereotypowych decyzji. Oczywiście, podobnie jak zdolny stolarz, zdolny mechanik, zdolny krawiec przeżył w pewnym sensie pomyślnie pierwszą rewolucję, tak zdolny naukowiec, czy administrator przeżyje pomyślnie drugą. Jednakże, jeśli dokona się druga rewolucja, przeciętny człowiek o średnich, lub mniej niż średnich uzdolnieniach, nie będzie miał do sprzedania niczego, co byłoby warte czyichkolwiek pieniędzy.

Rozwiązaniem jest oczywiście oparcie społeczeństwa na wartościach ludzkich, a nie na kupnie i sprzedaży. Na to, by dojść do takiego modelu społeczeństwa, trzeba wiele walki; w najlepszym razie — walki na płaszczyźnie idei, a może i poza nią — któż to wie? Uznałem zatem za swój obowiązek zwrócić się z moimi informacjami i oceną obecnej sytuacji do tych, którzy są aktywnie zainteresowani warunkami i przyszłością świata pracy, to znaczy — do związków zawodowych. Skontaktowałem się z jedną czy dwoma osobami, zajmującymi wysokie stanowiska w CIO, i zyskałem w nich bardzo inteligentnych i wdzięcznych słuchaczy. Poza te osobistości ani ja, ani oni sami nie byli w stanie dotrzeć. Zgodnie z ich opinią, pokrywającą się zresztą z moimi poprzednimi spostrzeżeniami i informacjami, zarówno w Stanach Zjednoczonych jak i w Anglii związki zawodowe i ruch zawodowy znajdują się w rękach wysoce ograniczonej grupy ludzi, doskonale wykształconych w specyficznych problemach zarządzania sklepem lub w dysputach o płacach i warunkach pracy, lecz zupełnie nieprzygotowanych do podjęcia szerszych problemów politycznych, technicznych, socjologicznych i ekonomicznych, dotyczących samych podstaw egzystencji świata pracy. Przyczyny tego są łatwo widoczne: urzędnik związkowy zamienia zazwyczaj pracowite życie robotnika na pracowite życie administratora, bez możliwości przejścia szerszego przeszkolenia, a dla tych, którzy takie przeszkolenie przeszli — kariera związkowa zazwyczaj nie jest zachęcająca, a same związki zawodowe — co jest dość naturalne — nie przyjmują chętnie takich ludzi.

Ci z nas, którzy przyczynili się do rozwoju cybernetyki stoją zatem w moralnej sytuacji, która jest, najłagodniej mówiąc, niewygodna. Przyczyniliśmy się do powstania nowej nauki, która, jak mówiłem, obejmuje osiągnięcia techniczne o wielkich możliwościach czynienia dobra i zła. Możemy jedynie

przekazać je światu, który nas otacza, ale jest to świat Bergen-Belsen i Hiroszimy. Nie mamy nawet wyboru czy zataić te osiągnięcia techniczne. Należą one do epoki i przemilczając je oddalibyśmy co najwyżej rozwój całej dziedziny w ręce najbardziej nieodpowiedzialnych i sprzedajnych spośród naszych inżynierów. Najlepsze, co możemy uczynić — to obserwować, jak opinia publiczna rozumie tendencje i kierunki obecnych prac i poświęcić nasz osobisty wysiłek takim dziedzinom, jak fizjologia i psychologia, najbardziej odległym od wojny i wyzysku. Jak widzieliśmy są tacy, którzy mają nadzieję, że dobro płynące z lepszego poznania człowieka i społeczeństwa może uprzedzić i zrównoważyć niezamierzony wkład, którym przyczyniamy się do koncentracji władzy. (Władza koncentruje się zawsze — wynika to z samej zasady jej istnienia — w rękach ludzi najbardziej pozbawionych skrupułów). Piszę to w roku 1947 i muszę powiedzieć, że jest to bardzo słaba nadzieja.

Autor pragnie wyrazić wdzięczność p.p. Walterowi Pittsowi, Oliverowi Selfridge'owi, Georgesowi Dubé i Fredericowi Websterowi za pomoc w poprawianiu rękopisu i przygotowaniu tekstu do opublikowania.

Listopad 1947

INSTITUTO NACIONAL DE CARDIOLOGIA
CIUDAD DE MÉXICO

I

CZAS NEWTONOWSKI I CZAS BERGSONOWSKI

Jest piosenka, którą zna każde niemieckie dziecko:

„Weisst du, wieviel Sternlein stehen
An dem blauen Himmelszelt?
Weisst du, wieviel Wolken gehen
Weithin über alle Welt?
Gott, der Herr, hat sie gezählet
Dass ihm auch nicht eines fehlet
An der ganzen, grossen Zahl."

W. HEY

Co w przekładzie brzmi tak: „Czy wiesz, ile gwiazd tkwi na błękitnym baldachimie nieba? Czy wiesz, ile chmur płynie nad całym światem? A Pan Bóg policzył je, i w całym tym wielkim rachunku nie przeoczył żadnej z nich."

Piosenka ta stanowi interesujący temat dla filozofa i historyka nauki, gdyż stawia obok siebie dwie nauki, które mają ze sobą tyle wspólnego, że zajmują się rozciągającym się nad nami niebem, ale pod prawie każdym innym względem stanowią zupełne przeciwieństwo. Astronomia jest najstarszą z nauk, podczas gdy meteorologia należy do dziedzin, które stosunkowo późno zaczęły zasługiwać na miano nauki. Bardziej znane zjawiska astronomiczne można przewidzieć na wiele wieków naprzód, podczas gdy dokładne przewidywanie pogody na jutro nie jest sprawą łatwą i jego wyniki są niejednokrotnie doprawdy bardzo problematyczne.

Wracając do wiersza, możemy odpowiedzieć na pierwsze postawione w nim pytanie twierdząco; że istotnie, przy pewnych zastrzeżeniach, wiemy,

ile jest gwiazd. Po pierwsze, jeśli pominąć pewne nieścisłości związane z istnieniem gwiazd podwójnych i zmiennych, gwiazda jest obiektem określonym, w ewidentny sposób wygodnym do celów zliczenia i katalogowania, i jeśli nawet ludzkie *Durchmusterung* gwiazd – jak nazywamy takie katalogi – nie obejmuje gwiazd o jasności mniejszej od pewnej ustalonej, to pomysł, że boskie *Durchmusterung* posuwa się o wiele dalej – nie jest dla nas zupełnie nie do przyjęcia.

Z drugiej strony, gdybyśmy spytali meteorologa o podobne *Durchmusterung* chmur, to albo roześmiałby się nam w nos, albo zacząłby cierpliwie wyjaśniać, że w języku meteorologii nie ma pojęcia chmury, określonej jako obiekt o quasi-permanentnej tożsamości, a nawet, gdyby było, to i tak meteorologia nie ma sposobów na przeliczanie chmur ani w istocie nie jest w ogóle zainteresowana ich przeliczaniem. Meteorolog o inklinacjach topologicznych mógłby próbować zdefiniować chmurę jako spójny obszar przestrzeni, w którym gęstość cząstek w stanie płynnym lub stałym przekracza pewną wielkość graniczną, lecz ta definicja nie przedstawiałaby dla nikogo najmniejszej wartości i co najwyżej opisywałaby stan bardzo przejściowy. W rzeczywistości meteorologa obchodzą jedynie pewne stwierdzenia o charakterze statystycznym, jak na przykład takie: „Boston, 17 stycznia 1950, zachmurzenie 38%, typ – cirrocumulus".

Istnieje oczywiście gałąź astronomii, która zajmuje się tym, co możemy nazwać meteorologią kosmiczną: badaniem galaktyk, mgławic i skupisk gwiazd oraz ich właściwości statystycznych – jak to czyni np. Chandrasekhar – jednakże jest to dziedzina młoda, młodsza niż sama meteorologia i leżąca jak gdyby poza tradycjami klasycznej astronomii. Tradycje te, poza aspektami natury czysto klasyfikacyjnego *Durchmusterung*, dotyczyły początkowo bardziej układu słonecznego, niż świata gwiazd stałych. Właśnie astronomia układu słonecznego jest tą dziedziną, z którą przede wszystkim wiążą się nazwiska Kopernika, Keplera, Galileusza i Newtona i która jest mamką nowoczesnej fizyki.

Jest to nauka doprawdy idealnie prosta. Nawet jeszcze przed powstaniem jakiejkolwiek adekwatnej teorii dynamiki, nawet jeszcze za czasów Babilończyków wiedziano, że zaćmienia powtarzają się w regularnych, możliwych do przewidzenia odstępach czasu i że ta regularność rozciąga się zarówno w przeszłość, jak i w przyszłość. Stwierdzono, że czas można mierzyć na podstawie ruchu gwiazd lepiej, niż w jakikolwiek inny sposób. Modelem

wszystkich zjawisk w układzie słonecznym było obracanie się koła lub szeregu kół, i to zarówno w ptolemejskiej teorii epicykli, jak w kopernikowskiej teorii orbit. W każdej z tych teorii przyszłość przebiega na wzór przeszłości. Muzyka sfer niebieskich ma charakter palindromu, a księgę astronomii czyta się tak samo od początku, jak i od końca. Oprócz początkowego położenia i kierunku nic nie różni planetarium obracającego się w jedną stronę od planetarium obracającego się w stronę przeciwną. Na koniec, kiedy Newton sprowadził wszystko to do postaci formalnego zbioru postulatów i prawideł mechaniki, podstawowe prawa tej mechaniki pozostają niezmienne, jeśli zmienimy znak zmiennej czasowej t na przeciwny.

Gdybyśmy zatem sporządzili film o ruchu planet, przyśpieszony tak, by zmiany położenia były dla nas zauważalne i puścilibyśmy go od tyłu, to obserwowalibyśmy znów ruch planet zgodny z mechaniką Newtona. Gdybyśmy natomiast sporządzili podobny film o ruchu chmur we froncie burzowym i odwrócilibyśmy kierunek jego wyświetlania, to otrzymalibyśmy obraz całkowicie błędny. Obserwowalibyśmy wznoszenie tam, gdzie oczekiwalibyśmy opadania, widzielibyśmy jak błyskawica wyprzedza zmiany układu chmur, które zazwyczaj ją poprzedzają i tak dalej w nieskończoność.

Na czym polega zasadnicza odmienność sytuacji w astronomii i meteorologii, odmienność, która pociąga za sobą wszystkie te różnice, w szczególności różnicę między ewidentną odwracalnością czasu astronomicznego a ewidentną nieodwracalnością czasu meteorologicznego? Po pierwsze układ meteorologiczny składa się z ogromnej liczby w przybliżeniu równych sobie cząstek, przy czym niektóre z nich znajdują się bardzo blisko siebie, podczas gdy układ astronomiczny taki, jak system słoneczny zawiera stosunkowo małą liczbę „cząstek", różniących się znacznie wielkością i rozrzuconych na tyle luźno, że wtórne efekty wzajemnego wpływu między nimi nie zmieniają w zasadniczy sposób obserwowanego stanu rzeczy, a efekty wzajemnych oddziaływań bardzo wysokiego rzędu są całkowicie pomijalne. Planety poruszają się w warunkach znacznie korzystniejszych dla wyizolowania pewnego określonego zbioru sił niż warunki, jakie jesteśmy w stanie stworzyć doświadczalnie w laboratorium fizycznym. W porównaniu z dzielącymi je odległościami planety, a nawet słońce, są prawie punktami. Przy występujących wielkościach odkształceń sprężystych i plastycznych planety są albo ciałami prawie doskonale sztywnymi, albo jeżeli nie są, to w każdym razie ich siły wewnętrzne mają znikomo małe znaczenie, gdy

rozpatrujemy względny ruch środka planety. Przestrzeń, w której się poruszają, jest prawie całkowicie pozbawiona hamującej ruch materii, a przy rozpatrywaniu zjawisk wzajemnego przyciągania można uważać, że ich masy skupiają się bardzo blisko środka i są stałe. Niezgodność sił przyciągania z prawem mówiącym o odwrotnej proporcjonalności do kwadratu odległości jest niesłychanie mała. Położenia, prędkości i masy ciał układu słonecznego są dokładnie znane dla każdej chwili i wyliczenie ich przyszłego lub przeszłego położenia jest w swej zasadzie łatwe i precyzyjne, choć nie tak łatwe w szczegółach. Inaczej dzieje się to w meteorologii, liczba interesujących nas cząstek jest tak ogromna, że dokładne zarejestrowanie ich położeń początkowych i prędkości jest zupełnie niemożliwe, a nawet gdyby udało się nam zarejestrować je i wyliczyć ich przyszłe położenia i prędkości, to nie dostalibyśmy nic poza nieprzejrzaną masą danych, wymagających radykalnej reinterpretacji, zanim będą mogły posłużyć nam do czegokolwiek. Pojęcia: „chmura", „temperatura", „zaburzenia", itd. są terminami odnoszącymi się nie do pojedynczej sytuacji fizycznej, lecz do układu możliwych sytuacji, z których tylko jedna naprawdę realizuje się. Gdybyśmy odczytali jednocześnie pomiary wszystkich stacji meteorologicznych na kuli ziemskiej, to nie otrzymalibyśmy nawet bilionowej części danych, potrzebnych do scharakteryzowania — w sensie teorii Newtona — bieżącego stanu atmosfery. Pomiary te dałyby nam jedynie zbiór wartości pewnych stałych, które mogą obowiązywać w nieskończonej ilości różnych atmosfer i które, łącznie z pewnymi założeniami a priori, mogłyby stanowić co najwyżej parametry rozkładu prawdopodobieństwa, będącego miarą określoną na zbiorze możliwych atmosfer. Jedyne co możemy przewidzieć stosując prawa Newtona lub jakikolwiek inny system praw przyczynowych, to rozkład prawdopodobieństwa stałych parametrów układu, a nawet i tego rodzaju zdolność przewidywania maleje wraz ze wzrostem odległości w czasie.

Dalej, nawet w ramach systemu praw Newtona, w których czas jest dokładnie odwracalny, zagadnienia prawdopodobieństwa i przewidywania prowadzą do wyników wykazujących asymetrię między przeszłością a przyszłością, ponieważ pytania na jakie one odpowiadają — mają charakter asymetryczny. Prowadząc doświadczenia fizyczne przenosimy badany układ z przeszłości w teraźniejszość ustalając wartości pewnych stałych i uznając, że mamy uzasadnione prawo zakładać, iż pewne inne wielkości mają znane

rozkłady statystyczne. Po określonym czasie obserwujemy zatem statystyczny rozkład wyników. Jest to proces, którego nie możemy odwrócić. Aby go odwrócić, musielibyśmy wybrać prawidłowy rozkład układów fizycznych, których parametry bez interwencji z naszej strony przyjęłyby w chwili zakończenia doświadczenia wartości, leżące w pewnych statystycznych granicach i musielibyśmy określić warunki, które występowały w systemie o określony odcinek czasu wcześniej. Jednakże zdarzenie, polegające na tym, że parametry układu, startującego od nieznanego położenia przyjmą wartości leżące w granicach wąskiego przedziału statystycznego występuje tak rzadko, że możemy je uważać za cud, a przecież nie możemy opierać naszych danych doświadczalnych na oczekiwaniu i zliczaniu cudów. Krótko mówiąc, jesteśmy ukierunkowani w czasie, a nasz stosunek do przyszłości jest inny, niż do przeszłości. Ta asymetria wpływa na wszystkie stawiane przez nas pytania i w równym stopniu na udzielane na nie odpowiedzi.

Bardzo ciekawe zagadnienie astronomiczne dotyczące kierunku czasu wynika z rozważań nad czasem w astrofizyce, w której dokonujemy obserwacji odległego ciała niebieskiego tylko jeden raz. Wydaje się, że w naturze takiego eksperymentu nie kryje się żadna jednokierunkowość. Dlaczego zatem jednokierunkowa termodynamika opierająca się na eksperymentach ziemskich oddaje w astrofizyce tak wielkie usługi? Odpowiedź jest ciekawa, choć nie od razu oczywista. Gwiazdy obserwujemy za pośrednictwem światła, czyli promieni lub cząstek wybiegających z obserwowanego obiektu i odbieranych przez nas. Możemy odbierać światło dobiegające do nas, lecz nie możemy odbierać światła wybiegającego od nas albo przynajmniej nie da się tego uczynić w tak prosty sposób. Do odbierania przybiegającego do nas światła wystarczy oko lub płyta fotograficzna. Przygotowujemy je do rejestrowania obrazów, pozostawiając je przez pewien czas w izolacji od otoczenia. Oko przyzwyczajamy do ciemności, aby uniknąć powidoków, płyty fotograficzne zawijamy w czarny papier, aby uniknąć prześwietlenia. Jest rzeczą jasną, że takie tylko oko i tylko takie płyty fotograficzne mogą znaleźć zastosowanie. Gdybyśmy bezpośrednio przed obserwacją oglądali inne obrazy, to widzielibyśmy tyle, co ślepy; gdybyśmy zawijali płytę fotograficzną w papier dopiero po użyciu, a rozpakowywali przed użyciem — fotografia byłaby doprawdy trudną sztuką. W tej sytuacji widzimy gwiazdy, które wysyłają promieniowanie do nas i w inne kierunki wszechświata. Gdyby natomiast istniały gwiazdy, których rozwój przebiega w przeciwnym kierun-

ku, to przyciągałyby one promieniowanie z całego nieba, a my w obliczu faktu, że znamy już naszą przeszłość, lecz nie znamy przyszłości, nie bylibyśmy nawet w stanie obserwować w żaden sposób przyciągania naszego światła. Tak więc widziana przez nas część wszechświata musi posiadać zgodne z naszymi relacje między przeszłością a przyszłością, przynajmniej, jeśli chodzi o emisję promieniowania. Sam fakt, że widzimy gwiazdę oznacza, że jej termodynamika jest taka, jak nasza.

Jest doprawdy interesującym eksperymentem intelektualnym wyobrazić sobie inteligentną istotę, której czas biegłby w kierunku przeciwnym niż nasz. Porozumiewanie się takiej istoty z nami byłoby niemożliwe. Każdy sygnał, który z jej punktu widzenia byłby logiczną sekwencją następujących po sobie zdarzeń, z naszego punktu widzenia — byłby sekwencją zdarzeń poprzedzających się. Te poprzedzające się zdarzenia tkwiłyby już w naszym doświadczeniu i mogłyby posłużyć nam jako naturalne wytłumaczenie sygnału, bez uciekania się do założenia, że istnieje wysyłająca je inteligentna istota. Gdyby narysowała ona kwadrat — widzielibyśmy resztki rysunku jako jego początki i oczom naszym przedstawiałaby się przedziwna — zawsze doskonale wytłumaczalna — krystalizacja tych szczątków. Znaczenie rysunku wydawałoby się nam równie przypadkowe, jak kształty twarzy, których doszukujemy się w urwiskach skalnych. Rysowanie kwadratu wyglądałoby dla nas jak nagła, lecz wytłumaczalna przy użyciu naturalnych praw katastrofa, która sprawia, że kwadrat przestaje istnieć. Nasz partner miałby dokładnie takie same wyobrażenie o nas. W obrębie każdego ze światów, z którymi możemy porozumiewać się — czas ma charakter jednokierunkowy.

Wróćmy do różnicy między newtonowską astronomią a meteorologią. Większość nauk leży blisko siebie, jednakże raczej bliżej meteorologii, niż astronomii. Jak widzieliśmy, nawet astronomia zawiera meteorologię kosmiczną. Zawiera ona również niesłychanie interesującą dziedzinę znaną pod nazwą teorii ewolucji przypływów i odpływów, którą zajmuje się Sir George Darwin. Powiedzieliśmy, że względne ruchy Słońca i planet możemy uważać za ruchy ciał sztywnych, jednakże stwierdzenie to nie jest zupełnie ścisłe. Ziemia natomiast jest otoczona oceanami. Woda, znajdująca się bliżej Księżyca niż środek Ziemi jest przyciągana przez Księżyc silniej, niż leżący pod nią grunt stały, a woda po drugiej stronie ziemi przyciągana jest słabiej. Ten stosunkowo nieznaczny efekt powoduje,

że woda formuje się w dwa wzniesienia: jedno od strony Księżyca, drugie — po przeciwnej stronie Ziemi. Gdyby kula ziemska miała powierzchnię doskonale płynną wzniesienia te przesuwałyby się wokół Ziemi zgodnie z obiegiem Księżyca bez większych strat energii i pozostawałyby stale niemal dokładnie w takim samym względnym położeniu pod Księżycem i po przeciwnej stronie Ziemi. W takiej sytuacji przyciągałyby one Księżyc w sposób, który nie wpływałby znacząco na jego kątowe położenie na niebie. Jednak w rzeczywistości fala przypływów i odpływów załamuje się i opóźnia na linii wybrzeży i na płytkich morzach takich, jak Morze Beringa czy Morze Irlandzkie i w konsekwencji pozostaje z tyłu za ruchem Księżyca. Siły powodujące to zjawisko są siłami silnie turbulencyjnymi, rozpraszającymi energię, zbliżonymi swym charakterem do sił występujących w meteorologii i wymagają zastosowania pojęć statystycznych. Oceanografię można istotnie nazwać meteorologią, nie atmosfery wprawdzie, ale hydrosfery.

Opisane siły tarcia hamują obieg Księżyca wokół Ziemi i przyśpieszają obrót naszego globu. Działają one tak, że długość miesiąca różni się coraz mniej od długości dnia. Istotnie, dzień księżycowy jest naszym miesiącem, a Księżyc zawsze zwraca do ziemi tę samą twarz. Wysunięto przypuszczenie, że jest to spowodowane przypływami i odpływami mórz w pradawnych czasach, gdy Księżyc zawierał pewne substancje gazowe lub plastyczne, które mogły odrywać się od niego pod wpływem przyciągania Ziemi powodując w ten sposób rozpraszanie znacznej ilości energii. Występowanie zjawiska ewolucji przypływów i odpływów nie jest ograniczone tylko do Ziemi i Księżyca, lecz może być zaobserwowane w pewnym stopniu we wszystkich układach grawitacyjnych. W odległej przeszłości zjawisko to poważnie modyfikowało obraz układu słonecznego, jednakże w granicach czasów historycznych modyfikacja ta jest nieznaczna w porównaniu z ruchem „sztywnych" planet Słońca.

Tak więc nawet w grawitacyjnej astronomii występują procesy tarcia. Nie ma ani jednej nauki, która pozostawałaby w idealnej zgodzie z czysto newtonowskim modelem. Nauki biologiczne mają własny, obszerny rozdział jednokierunkowych zjawisk. Narodziny nie są dokładną odwrotnością śmierci, ani anabolizm — budowanie tkanki — nie jest odwrotnością katabolizmu — to znaczy jej rozpadu. Podział komórek nie jest procesem symetrycznym w stosunku do czasu, podobnie jak nie jest nim proces

łączenia się komórek płciowych przy zapłodnieniu. Osobnik biologiczny jest strzałą wymierzoną w czasie w jednym kierunku, a cała rasa jest również skierowana od przeszłości w przyszłość.

Spostrzeżenia paleontologii wskazują na istnienie wyraźnej — choć poprzerywanej i skomplikowanej tak, jak tylko to możliwe — długofalowej tendencji postępującej od organizmów prostych do coraz bardziej złożonych. W połowie ubiegłego stulecia istnienie tej tendencji stało się rzeczą oczywistą dla wszystkich uczonych o otwartym umyśle i nie jest dziełem przypadku, że w pracach nad odkryciem mechanizmów tej tendencji wielki krok naprzód uczyniło dwóch uczonych pracujących w tym samym mniej więcej czasie: Karol Darwin i Alfred Wallace. Krok ten polegał na uprzytomnieniu sobie, że zupełnie przypadkowe różnice między osobnikami gatunku mogą uformować się w każdej linii dziedziczenia w postępujący proces, przebiegający w jednym lub kilku kierunkach, regulowany przez prawdopodobieństwa przeżycia różnych odmian. Dotyczy to zarówno pojedynczych osobników, jak i całych ras. Pies — mutant bez nóg z pewnością zginie, podczas, gdy długa, wysmukła jaszczurka, która rozwinęła mechanizm pełzania ma lepszą szansę przeżycia, jeśli linie jej ciała są gładkie i wystające kończyny nie przeszkadzają jej w poruszaniu się. Zwierzę wodne, czy to ryba, jaszczurka, czy ssak będzie pływać lepiej, jeśli ma wrzecionowaty kształt, dobrze umięśnione ciało i rodzaj płetwy na jego końcu. Jeśli żywi się ono polując na szybko uciekający łup, to jego szanse przeżycia mogą zależeć od tego, czy ma ono ten właśnie kształt.

Ewolucja w ujęciu Darwina jest zatem mechanizmem, dzięki któremu mniej lub bardziej przypadkowa zmienność układa się w dość ściśle określony wzorzec. Zasada Darwina obowiązuje aż do dzisiaj, choć obecnie dysponujemy znacznie lepszą znajomością mechanizmu, od którego ona zależy. Badania Mendla umożliwiły nam znacznie bardziej dokładne i „nieciągłe" spojrzenie na sprawy dziedziczenia, a pojęcie mutacji znane od czasów de Vriesa zmieniło całkowicie nasze poglądy na statystyczne podstawy zjawiska mutacji. Zbadaliśmy szczegółowo anatomię chromosomu i zlokalizowaliśmy wewnątrz niego gen. Lista współczesnych genetyków jest długa i zawiera wybitne nazwiska. Kilku z nich, m.in. Haldane, uczyniło ze statystycznych badań teorii Mendla efektywne narzędzie badań nad ewolucją.

Mówiliśmy już o teorii ewolucji przypływów i odpływów, nad którą pracuje Sir George Darwin, syn Karola Darwina. Nie jest dziełem przypadku

ani związek między ideą ojca i syna, ani wybór terminu „ewolucja". Zarówno w ewolucji zjawiska przypływów i odpływów, jak i przy ewolucji gatunków mamy do czynienia z mechanizmem, dzięki któremu przypadkowa zmienność, taka jak zmienność ruchów fal morskich lub cząstek wody podczas przepływu, zostaje przekształcona przez dynamiczny proces w pewien wzorzec zachowania, który postępuje w jednym kierunku. Teoria przypływów i odpływów jest zastosowaniem koncepcji Darwina-ojca w astronomii.

Trzeci z dynastii Darwinów, Sir Charles, jest jedną ze znakomitych osobistości współczesnej mechaniki kwantowej. Ten fakt może być dziełem przypadku, tym niemniej przypomina o coraz dalej postępującym opanowywaniu idei Newtona przez pojęcia statystyki. Ciąg nazwisk: Maxwell – Boltzmann – Gibbs ilustruje stopniowe redukowanie termodynamiki do mechaniki statystycznej, to znaczy sprowadzenie zjawisk związanych z ciepłem i temperaturą do zjawisk, w których mechanika Newtona jest stosowana tam, gdzie mamy do czynienia nie z pojedynczym układem dynamicznym, lecz ze statystycznym rozkładem układów dynamicznych, i gdzie nasze wnioski nie dotyczą wszystkich układów, lecz tylko przeważającej ich większości. Około roku 1900 stało się rzeczą jasną, że w termodynamice kryje się jakiś poważny błąd, dający się we znaki szczególnie tam, gdzie dotyczy ona promieniowania. Eter wykazywał znacznie mniejszą zdolność pochłaniania promieniowania o wysokiej częstotliwości – jak pokazywało prawo Plancka – niż dopuszczała to jakakolwiek istniejąca teoria promieniowania. Planck stworzył quasi-atomową teorię promieniowania – teorię kwantów – która dawała zadowalające wyniki przy tłumaczeniu tego rodzaju zjawisk, lecz pozostawała w niezgodzie z całą resztą fizyki, a Niels Bohr wystąpił z podobnie ad hoc sformułowaną teorią budowy atomu. W ten sposób Newton stworzył tezę, a Planck i Bohr – antytezę heglowskiej antynomii. Syntezę stanowi odkryta przez Heisenberga w 1925 r. teoria, w której statystyczna newtonowska mechanika Gibbsa została zastąpiona statystyczną teorią zbliżoną do teorii Newtona i Gibbsa dla zjawisk w wielkich układach, lecz w której pełny zbiór danych opisujących teraźniejszość i przeszłość nie wystarcza do przewidywania przyszłości w sposób inny, niż tylko statystyczny. Nie posuniemy się zatem zbyt daleko jeśli powiemy, że nie tylko newtonowska astronomia, lecz nawet newtonowska fizyka obrazują jedynie średnie rezultaty sytuacji statystycznej, stają się więc opisem procesu ewolucyjnego.

To przejście od odwracalnego czasu Newtona do nieodwracalnego czasu Gibbsa odbiło się echem w filozofii. Bergson wskazał na różnicę między odwracalnym czasem fizyki, w którym nic nowego się nie zdarza, a nieodwracalnym czasem ewolucji i biologii, w którym zawsze dzieje się coś nowego. Świadomość, że fizyka Newtona nie jest odpowiednią podporą dla biologii, była chyba głównym punktem dawnego sporu między witalistami a mechanistami, choć sytuację komplikowało dodatkowo pragnienie zachowania w tej czy innej formie choćby śladów pojęć „duszy" czy „Boga" w ogólnym zalewie materializmu. W końcu, jak się przekonaliśmy, witaliści poszli zbyt daleko. Zamiast wznieść mur między życiem a fizyką, wznieśli mur otaczający tak wielki obszar, że w jego obrębie znalazła się zarówno materia, jak i życie. Jest prawdą, że w pojęciu nowej fizyki materia jest czymś innym niż w pojęciu Newtona, lecz jednocześnie jest ona chyba równie odległa od antropomorfizujących ciągot witalistów. Prawdopodobieństwo wyboru nie jest dla specjalisty od teorii kwantów tym samym, co etyczna wolność dla zwolennika filozofii św. Augustyna, a Tyche jest równie bezlitosną panią, co Ananke.

Stan techniki jest w każdej epoce odbiciem stanu myśli. Budowniczymi czasów starożytnych byli odkrywcy nowych ziem, astronomowie, nawigatorzy; budowniczymi siedemnastego i osiemnastego stulecia — zegarmistrzowie i szlifierze soczewek. Podobnie jak w starożytności, rzemieślnicy wykonują swoje wyroby na podobieństwo niebios. Zegarek jest niczym innym jak tylko kieszonkowym planetarium, poruszającym się w sposób konieczny, jak sfery niebieskie, a jeśli tarcie i rozpraszanie energii odgrywają w nim jakąś rolę, to efekty tych zjawisk mogą być przezwyciężone tak, że ruch wskazówek będzie możliwie doskonale okresowy i regularny. Głównym osiągnięciem tej techniki, zgodnej z modelem Huygensa i Newtona,był rozkwit nawigacji. Po raz pierwszy stało się możliwe obliczenie długości geograficznych ze znośną dokładnością i handel poprzez wielkie oceany przestał być domeną przypadku i przygody, a stał się opartym na racjonalnych podstawach interesem. To była inżynieria doby kupców.

Po kupcach nastąpili przemysłowcy, po chronometrze — maszyna parowa. Od czasów maszyny Newcomena niemal aż do dzisiaj główną dziedziną zainteresowań techniki było badanie pierwotnych urządzeń napędowych. Ciepło zaczęto przekształcać na użyteczną energię ruchu obrotowego lub prostoliniowego, a prace Rumforda, Carnota i Joule'a uzupełniły

fizykę Newtona. Pojawia się termodynamika: nauka, w której czas jest w ewidentny sposób nieodwracalny. We wcześniejszym stadium jej rozwoju wydawało się, że obejmuje ona zagadnienia pozostające prawie bez związku z dynamiką Newtona, jednakże teoria zachowania energii i późniejsze statystyczne wyjaśnienie zasady Carnota, czyli drugiego prawa termodynamiki (tzn. tej zasady, która stwierdza, że moc maszyny cieplnej zależy od różnicy temperatur roboczych między kotłem a kondensatorem pary) połączyły termodynamikę i dynamikę Newtona i wyjaśniły, że obie te dziedziny reprezentują odpowiednio statystyczne i niestatystyczne aspekty tej samej nauki.

Jeśli wiek siedemnasty i początek osiemnastego stanowiły epokę zegarów, a koniec osiemnastego i wiek dziewiętnasty – epokę maszyn parowych, to dzień dzisiejszy jest epoką komunikacji i sterowania. Elektrotechnikę można podzielić na dwa działy, określone w Niemczech nazwami techniki prądów silnych i techniki prądów słabych; u nas – energetyki i łączności. Podział ten oddziela epokę, która właśnia mija, od tej, w której obecnie żyjemy. W praktyce telekomunikacja może zajmować się prądami o dowolnym natężeniu i silnikami o mocy wystarczająco wielkiej, by mogły przesuwać masywne wieżyczki dział; od elektroenergetyki różni ją jednak to, że głównym tematem jej zainteresowania jest nie ekonomia użytkowania energii, lecz dokładność odtwarzania sygnału. Sygnałem może być naciśnięcie klucza telegraficznego, które powinno być odtworzone jako odpowiednie „stuknięcie" w aparacie odbiorczym; może być nim dźwięk nadawany i odbierany przez aparat telefoniczny; może być nim wreszcie obrócenie koła sterowego, odbierane jako zmiana kątowego położenia steru. Telekomunikacja narodziła się więc w czasach Gaussa, Wheatstone'a i pierwszych telegrafistów w połowie ubiegłego stulecia; po uszkodzeniu pierwszego kabla transatlantyckiego lord Kelvin potraktował ją po raz pierwszy w sposób naukowy, a Heaviside był chyba tym, który na przestrzeni ostatnich siedemdziesięciu lat przyczynił się w największym stopniu do nadania jej współczesnego kształtu. Odkrycie radaru i jego wykorzystanie w czasie drugiej wojny światowej, a także potrzeby sterowania ogniem artylerii przeciwlotniczej, sprowadziły do tej dziedziny dobrych matematyków i fizyków. Nadzieje zbudowania automatycznej maszyny liczącej należą do tego samego kręgu koncepcji. Z pewnością nigdy nie dążono do ich urzeczywistnienia tak aktywnie, jak dziś.

Na każdym poziomie rozwoju techniki, jeszcze od czasów Dedala czy Herona z Aleksandrii intrygowała ludzi możliwość zbudowania sztucznego mechanizmu naśladującego organizm żywy. Pragnienie konstruowania i badania automatów wyrażano zawsze w języku odpowiadającym współczesnemu poziomowi techniki. W epoce magii zrodziła się dziwna i złowieszcza legenda o Golemie, posągu z gliny, w który praski rabin tchnął życie, bluźnierczo nadużywające Niewypowiadalnego Imienia Bożego. W czasach Newtona automat przybrał postać zegarowej pozytywki, na której wieczku obracały się sztywno małe figurki. W wieku dziewiętnastym automatem jest uwielbiana maszyna cieplna, spalająca jakieś paliwo zamiast glikogenu ludzkich mięśni. Automat czasów dzisiejszych otwiera drzwi przy pomocy fotokomórek, nakierowuje działo na punkt, w którym wiązka fal radaru wychwyciła samolot, lub oblicza rozwiązanie równania różniczkowego.

Ani automaty starożytnej Grecji, ani automaty czasów magii nie leżą na głównym szlaku rozwoju współczesnych maszyn. Nie wydaje się również, by miały one jakiś większy wpływ na poważną myśl filozoficzną. Zupełnie inaczej dzieje się w przypadku automatu zegarowego. Choć często zapominamy o tym, jego idea odegrała oryginalną i ważną rolę w początkach nowoczesnej filozofii.

Kartezjusz uważa niższe zwierzęta za automaty. Czyni to, by uniknąć podważania ortodoksyjnego chrześcijańskiego poglądu mówiącego, że zwierzęta nie mają duszy, która mogłaby być zbawiona lub przeklęta. O ile mi wiadomo, Kartezjusz nie prowadzi rozważań o tym, jak działają takie żyjące automaty. Zajmuje się jednakże (choć w zupełnie niezadowalający nas sposób) zbliżonym, poważnym problemem: w jaki sposób dusza ludzka, wraz z jej czuciem i wolą, łączy się ze swą powłoką cielesną. Za miejsce w którym dusza łączy się z ciałem Kartezjusz uważa szyszynkę, jedną ze znanych mu części mózgu. Nie wyjaśnia jednak, jaka jest natura tego połączenia: czy oznacza ono bezpośrednie oddziaływanie umysłu na materię i materii na umysł — czy też nie. Prawdopodobnie uważa je za bezpośrednie oddziaływanie w obu kierunkach, jednakże prawidłowość ludzkiego doświadczenia w postępowaniu ze światem zewnętrznym przypisuje dobroci i prawości Boga.

Rola przypisana Bogu nie jest tu jednoznaczna. Albo Bóg zachowuje zupełną bierność, a wtedy trudno byłoby uznać, że kartezjańskie tłumaczenie

rzeczywiście coś wyjaśnia, albo jest On aktywnym współuczestnikiem naszych poczynań, a wtedy trudno byłoby wykazać, że dana przez Jego dobroć gwarancja poprawności naszego doświadczenia może być czymś więcej, niż tylko aktywnym Jego współuczestniczeniem w akcie odczuwania. Tak więc równolegle z przyczynowym łańcuchem zjawisk materialnych przebiega łańcuch przyczynowy zapoczątkowany działaniem Boga, który w ten sposób daje nam fragmenty doświadczenia, odpowiadające materialnej sytuacji, w której się aktualnie znajdujemy. Jeśli przyjmiemy takie założenie, to całkowicie naturalny staje się pomysł, by podobnej boskiej interwencji przypisać odpowiedniość między naszą wolą a efektami, jakie wywołuje ona w otaczającym nas świecie. Tą drogą myślenia podążyli okazjonaliści, Geulincx i Malebranche. W systemie Spinozy, który w zakresie wielu poglądów był kontynuatorem tej szkoły, doktryna okazjonalizmu przyjęła bardziej racjonalnie uzasadnioną formę założenia, że odpowiedniość między umysłem a materią jest odpowiedniością między dwoma atrybutami Boga; Spinoza nie myśli jednak kategoriami dynamicznymi i niewiele poświęca uwagi mechanizmowi tej odpowiedniości.

Od tej właśnie sytuacji rozpoczyna rozumowanie Leibniz. Myśli on jednak kategoriami dynamicznymi, podczas gdy Spinoza budował swój system w sposób geometryczny. Leibniz zastępuje parę odpowiadających sobie elementów, umysł i materię, przez continuum odpowiadających sobie elementów — monad. Jakkolwiek zostały one stworzone na wzór duszy, to jednak zawierają one wiele czynników, które nie wznoszą się do poziomu takiej świadomości swojej jaźni, jak dusza, i które stanowią część tego świata, który Kartezjusz przypisał materii. Każda z monad żyje w swym własnym, zamkniętym wszechświecie o doskonałej przyczynowości, od momentu stworzenia (czyli minus nieskończoność w czasie) do nieskończenie odległej przyszłości. Monady, choć są w ten właśnie sposób zamknięte, odpowiadają jedne drugim dzięki ustanowionej na początku harmonii Boskiego dzieła. Leibniz porównuje je do zegarów, które zostały nakręcone tak, by pokazywały zgodnie taki sam czas, od chwili stworzenia przez całą wieczność. W przeciwieństwie do zegarów, które są dziełem człowieka, nie rozsynchronizują się one nigdy, dzięki cudownie doskonałemu mistrzostwu Stwórcy.

Leibniz zajmuje się więc światem automatów, które (co jest naturalne u ucznia Huygensa) konstruuje na podobieństwo mechanizmów zegarowych. Jakkolwiek monady stanowią — jedna dla drugiej — odbicie, to nie oznacza

to przenoszenia się między nimi łańcuchów przyczynowych. Każda z nich stanowi całość sama w sobie, podobnie, jak — a raczej bardziej niż — figurki biernie tańczące na wieczku pozytywki. Nie mają one rzeczywistego wpływu na świat zewnętrzny, ani świat zewnętrzny nie ma skutecznego wpływu na nie. Jak mówi Leibniz, nie mają one okien. Organizacja świata, który spostrzegamy, jest czymś pomiędzy fikcją a cudem. Monada jest układem słonecznym Newtona tyle, że doskonalszym.

W dziewiętnastym wieku z zupełnie innego punktu widzenia badano zarówno automaty budowane przez człowieka, jak i inne automaty, naturalne rośliny i zwierzęta materialistów. Hasłem dnia jest wówczas zasada zachowania energii i przemiany postaci energii. Organizm żywy jest przede wszystkim maszyną cieplną spalającą glukozę, czy glikogen, skrobię, tłuszcze i białka na dwutlenek węgla, wodę i mocznik. Zainteresowanie skupia się na równowadze przemiany materii, a kiedy zauważono, że temperatura robocza mięśnia zwierzęcego jest mniejsza, niż temperatura robocza maszyny cieplnej o podobnej sprawności, wytłumaczono szybko ten fakt różnicą między energią chemiczną organizmu żywego a energią cieplną maszyny. Wszystkie podstawowe pojęcia związane są z energią, a głównym z nich jest pojęcie potencjału. Technika działania żywego ciała jest gałęzią techniki energetycznej. Jeszcze dzisiaj ten punkt widzenia obowiązuje u fizjologów bardziej konserwatywnych, o bardziej klasycznym nastawieniu. Cały sposób rozumowania takich biofizyków jak Rashevsky i jego szkoła stanowi świadectwo, że poglądy te utrzymują się nadal.

Obecnie zaczynamy uświadamiać sobie, że żywe ciało jest tworem bardzo odległym od tradycyjnych maszyn, że jego części działają w warunkach, w których dostarczanie energii jest ograniczone w znacznie mniejszym stopniu niż przypuszczaliśmy. Przykład lampy elektronowej dowiódł nam, że układ z zewnętrznym źródłem dostarczającym energii, która marnuje się prawie cała, może znakomicie wykonywać żądane czynności, zwłaszcza, jeśli działa na niskim poziomie energii. Zaczynamy dostrzegać, że takie ważne elementy, jak neurony — atomy naszego układu nerwowego — pracują w warunkach bardzo zbliżonych do lamp elektronowych, pobierając z zewnątrz stosunkowo małą energię, dostarczaną przez układ krążenia. Dostrzegamy, że zasób pojęć najbardziej niezbędnych do opisania działania neuronów nie składa się z pojęć energetycznych. Krótko mówiąc, nowsze badania w dziedzinie automatów, czy to zrobionych z metalu, czy z żywego

ciała, stanowią gałąź techniki telekomunikacji, a ich podstawowymi pojęciami są terminy takie jak: wiadomość, ilość zakłóceń, czyli szumów (termin zapożyczony z telefonii), ilość informacji, metoda kodowania, itd.

W takiej teorii mamy do czynienia z automatami, które są sprzężone ze światem zewnętrznym nie tylko poprzez przepływ energii, czy przemianę materii, lecz również poprzez wymianę wrażeń, sygnałów, czy wiadomości przychodzących z zewnątrz oraz czynności wywoływanych przez sygnały wyjściowe. Organy, które odbierają wrażenia z zewnątrz są odpowiednikami ludzkich i zwierzęcych narządów zmysłów. Są nimi fotokomórki i inne receptory światła: układy radarowe, odbierające swe własne fale elektromagnetyczne; rejestratory stężenia jonów wodorowych, które można porównać do zmysłu smaku, termometry, manometry różnych rodzajów, mikrofony i tak dalej. Efektorami – elementami wykonawczymi – mogą być silniki elektryczne, elektromagnesy, uzwojenia grzejne i inne przyrządy najróżnorodniejszych typów. Pośrednikiem między receptorami, czyli narządami zmysłów, a efektorami jest układ, którego zadaniem jest wykonywanie pewnych operacji na odbieranych wrażeniach i produkowanie żądanej odpowiedzi ze strony efektorów. Informacja wprowadzana do tego centralnego układu sterującego będzie często zawierała informacje dotyczące działania samych efektorów. Odpowiadają one między innymi narządom kinestetycznym i innym proprioreceptorom organizmu ludzkiego, ponieważ my również posiadamy organy, które rejestrują położenie stawu, szybkość skurczu mięśnia itp. Co więcej, informacja odbierana przez automat nie musi być zużytkowana od razu, lecz może być opóźniona lub przechowana tak, by była dostępna w przyszłości. Stanowi to odpowiednik pamięci. Na koniec, dopóki automat działa, jego zasady działania mogą ulegać zmianom w zależności od postaci danych, które były odbierane przez jego receptory w przeszłości. Proces ten jest podobny do uczenia się.

Maszyny, o których mówimy nie są mrzonkami sensacjonalistów ani pieśnią odległej przyszłości: istnieją one już dzisiaj jako termostaty, automatyczne żyrokompasowe układy sterowe statków, pociski z własnym napędem (zwłaszcza takie, które same naprowadzają się na cel), systemy sterowania ogniem artylerii przeciwlotniczej, automatycznie sterowane kolumny destylacji ropy naftowej, ultraszybkie maszyny liczące i tak dalej.

Zaczęto je stosować dawno przed wojną, należy do nich przecież stary regulator dopływu pary w maszynie parowej, lecz pełne uznanie przyniosła im dopiero wielka mechanizacja z czasów II wojny światowej, a potrzeby wykorzystania niesłychanie niebezpiecznej energii atomu wzniosą je zapewne na jeszcze wyższy poziom rozwoju. Nieledwie co miesiąc ukazuje się nowa książka o układach sterowania — serwomechanizmach. Nasz wiek jest wiekiem serwomechanizmów, tak jak wiek dziewiętnasty był wiekiem maszyn parowych, osiemnasty — wiekiem zegarów.

Podsumujmy: liczne automaty dzisiejszej doby są sprzężone z zewnętrznym światem i zarówno w tym sensie, że odbierają z niego wrażenia, jak i w tym, że wykonują w nim pewne czynności. Posiadają one narządy zmysłów i efektory a także odpowiednik układu nerwowego, który zapewnia przepływ informacji między jednymi a drugimi. Nadają się one bardzo dobrze do tego, by opisywać je przy użyciu terminów fizjologicznych. Nie jest wcale rzeczą niezwykłą, że takie automaty i mechanizmy znane z fizjologii mogą być objęte jedną, wspólną teorią.

Szczegółowych badań wymaga stosunek tych mechanizmów do czasu. Jest oczywiście rzeczą jasną, że związek wejścia z wyjściem ma charakter sekwencyjny w czasie i zakłada określony porządek przeszłości i przyszłości. Nie tak jasne jest chyba jednak, że teoria automatów mogących odbierać wrażenia jest teorią statystyczną. Rzadko interesuje nas sprawność takiej maszyny z punktu widzenia jednego tylko sygnału wejściowego. Aby działała ona prawidłowo, musi być sprawna w zadowalający sposób dla całej klasy sygnałów wejściowych, które — statystycznie rzecz biorąc — spodziewa się odbierać. Teoria takiej maszyny jest więc bliższa mechanice statystycznej Gibbsa, niż klasycznej mechanice Newtona. Zbadamy to zagadnienie dokładniej w rozdziale poświęconym teorii komunikacji.

Nowoczesny automat istnieje zatem w bergsonowskim czasie tego samego rodzaju, co organizm żywy; rozważania Bergsona nie uzasadniają zatem, dlaczego zasadniczy sposób funkcjonowania żywego organizmu miałby być inny, niż sposób działania tego rodzaju automatu. Witalizm zwyciężył więc do tego stopnia, że nawet mechanizmy odpowiadają witalistycznej strukturze czasu. Jednak jak mówiliśmy, zwycięstwo to jest całkowitą klęską, ponieważ z każdego punktu widzenia, który choć trochę wiąże się z moralnością lub religią, nowa mechanika jest równie mechanistyczna, co stara. Tylko sprawą słów jest, czy powinniśmy nazywać nowy

punkt widzenia materialistycznym. Przewaga materii jest znacznie bardziej charakterystyczna dla fizyki dziewiętnastowiecznej, niż dla współczesnej, a okazało się, że „materializm" stanowi niewiele więcej, niż tylko luźny synonim „mechanizmu". W istocie, cały spór między mechanistami a witalistami został wtrącony do czyśćca źle postawionych pytań.

II

GRUPY I MECHANIKA STATYSTYCZNA

W początkach naszego wieku dwóch uczonych, jeden w Stanach Zjednoczonych, drugi we Francji, pracowało nad zagadnieniami, które wydawałyby się im samym zupełnie ze sobą nie związane, gdyby każdy z nich miał choćby najmniejsze pojęcie o istnieniu drugiego. W New Haven, Willard Gibbs pracował nad nowym ujęciem mechaniki statystycznej. W Paryżu, Henri Lebesgue konkurował ze swym mistrzem Emilem Borelem, odkrywając dla potrzeb badań nad szeregami trygonometrycznymi ulepszoną teorię całkowania. Obaj odkrywcy byli do siebie podobni tym, że każdy z nich był bardziej człowiekiem myśli, niż eksperymentatorem, jednakże ich poglądy naukowe były diametralnie różne.

Gibbs, choć bez wątpienia matematyk, zawsze uważał matematykę za naukę podporządkowaną fizyce. Lebesgue był natomiast analitykiem najczystszej próby, rzecznikiem najbardziej wymagających nowoczesnych norm matematycznej ścisłości i autorem, którego prace — o ile mi wiadomo — nie zawierają ani jednego przykładu problemu czy metody wywodzącej się bezpośrednio z fizyki. Niemniej jednak prace obu tych uczonych stanowią całość, przy czym pytania postawione przez Gibbsa znajdują odpowiedzi nie w jego własnej pracy, lecz w pracy Lebesgue'a.

Idea Gibbsa była następująca: w dynamice Newtona, w jej pierwotnej formie, mamy do czynienia z pojedynczym układem o danych prędkościach początkowych i pędach. Zachodzą w nim zmiany zgodne z pewnym układem sił, które z kolei podlegają prawom Newtona, wiążącym ze sobą siły i przyspieszenia. W przytłaczającej większości przypadków praktycznych nie znamy jednak wszystkich prędkości początkowych i pędów. Jeśli zało-

żymy pewien początkowy rozkład nie całkowicie znanych położeń i pędów w układzie, to zdeterminuje to nam w dokładnie newtonowski sposób rozkład pędów i położeń w dowolnej chwili przyszłości. Stanie się zatem możliwe wyciąganie wniosków co do postaci tych rozkładów. Niektóre z nich będą miały charakter stwierdzeń, że badany układ będzie w przyczłości wykazywał pewne cechy z prawdopodobieństwem równym jedności, a pewne inne cechy – z prawdopodobieństwem równym zeru.

Pojęcia „prawdopodobieństwo równe jeden" i „prawdopodobieństwo równe zeru" zawierają w sobie całkowitą pewność i całkowitą niemożliwość, lecz również coś więcej. Jeśli strzelam do tarczy pociskiem o wymiarach punktu geometrycznego, to prawdopodobieństwo, że trafię w pewien określony punkt tarczy będzie na ogół równe zeru, jakkolwiek nie jest wcale niemożliwe, że mi się to uda, co więcej, w każdym przypadku rzeczywiście trafiam w pewien punkt, choć prawdopodobieństwo tego zdarzenia jest równe zeru. Zdarzenie, którego prawdopodobieństwo jest równe jedności, polegające na tym, że trafię w *jakiś* punkt tarczy składa się zatem ze zdarzeń o prawdopodobieństwie równym zeru.

W metodach mechaniki statystycznej Gibbsa występuje (jakkolwiek w sposób niejawny i Gibbs nie zdaje sobie z tego jasno sprawy) proces polegający na tym, że zdarzenie złożone rozkłada się na nieskończony ciąg zdarzeń prostszych (zdarzenie pierwsze, drugie, trzecie, ... itd.), z których każde ma znaną wartość prawdopodobieństwa, a prawdopodobieństwo zdarzenia złożonego oblicza się jako sumę prawdopodobieństw zdarzeń prostszych, tworzących ten nieskończony ciąg. *Nie możemy* zatem sumować prawdopodobieństw zawsze wówczas, gdy chcemy obliczyć prawdopodobieństwo zdarzenia złożonego (suma dowolnej liczby zer jest równa zeru), jakkolwiek *możemy* je sumować wówczas, gdy istnieje ciąg zdarzeń (zdarzenie pierwsze, drugie, trzecie, ... itd.), którego każdy wyraz ma określony kolejny numer, będący liczbą naturalną.

Rozróżnienie między tymi dwoma przypadkami wymaga dość subtelnych rozważań dotyczących natury zbioru zdarzeń, a Gibbs, choć znakomity uczony, nie był nigdy subtelnym matematykiem. Czy jest możliwe, by pewna klasa była nieskończona, a jednak zasadniczo różna co do liczności od innej, nieskończonej klasy takiej, jak klasa liczb naturalnych? Problem ten rozwiązał przy końcu ubiegłego wieku Georg Cantor, odpowiadając na postawione pytanie twierdząco. Rozważmy wszystkie

ułamki dziesiętne, okresowe i nieokresowe, leżące między 0 a 1. Wiadomo, że nie można ich uporządkować przypisując im numery 1, 2, 3, ..., itd., jakkolwiek — co jest na pozór dość dziwne — można tak uporządkować wszystkie ułamki *nieokresowe*. W świetle tego faktu rozróżnienie, wymagane przez mechanikę statystyczną Gibbsa nie należy do rzeczy niemożliwych. Pomoc, jaką okazał Lebesgue teorii Gibbsa polega na wykazaniu, że sformułowane przez mechanikę statystyczną w niejawny sposób wymagania co do zdarzeń o prawdopodobieństwie równym zeru i co do dodawania prawdopodobieństw istotnie mogą być spełnione, a teoria Gibbsa nie zawiera sprzeczności.

Praca Lebesgue'a nie wynika jednak bezpośrednio z potrzeb mechaniki statystycznej, lecz z teorii szeregów trygonometrycznych, dziedziny, która jest, jak się wydaje, czymś zupełnie odmiennym. Wraca ona do spraw leżących w kręgu zainteresowań fizyki osiemnastowiecznej: zagadnień drgań i ruchu falowego. Praca ta podejmuje tak dyskutowany wówczas problem syntezy ruchu układu liniowego z prostych drgań, czyli — inaczej mówiąc — z takich drgań, w przypadku których upływ czasu powoduje zwiększenie odchylenia układu od położenia równowagi o dodatnią lub ujemną wielkość zależną jedynie od czasu, a nie od położenia. Pewną funkcję przedstawia się zatem w postaci szeregu. Współczynniki takiego szeregu są wyrażane jako średnie iloczynu funkcji zadanej z przedstawianej funkcji wagowej. Cała teoria zależy od właściwości średniej wartości szeregu, wyrażonej jako funkcja wartości średnich poszczególnych wyrazów szeregu. Zauważmy, że wartość średnia zmiennej, która przyjmuje wartość 1 w przedziale od 0 do A i wartość 0 w przedziale od A do 1 wynosi A i może być uważana za prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że przypadkowo wybrany punkt z przedziału [0, 1] leży w przedziale $[0,A]$. Inaczej mówiąc, teoria pozwalająca na obliczanie średniej wartości szeregu jest bardzo zbliżona do teorii niezbędnej w rozważaniach nad prawdopodobieństwem zdarzeń złożonych z nieskończonego ciągu zdarzeń prostszych. To właśnie jest powodem, że Lebesgue rozwiązując swój własny problem rozwiązał jednocześnie problem Gibbsa.

Rozkłady, którymi zajmuje się Gibbs mają własną interpretację dynamiczną. Jeśli rozważymy pewien bardzo ogólny typ układów dynamicznych zachowawczych o N stopniach swobody, to spostrzeżemy, że współrzędne położenia i prędkości układu można sprowadzić do zbioru $2N$

współrzędnych, z których N można nazwać współrzędnymi uogólnionymi położenia, a N — uogólnionymi pędami. Określają one $2N$-wymiarową przestrzeń, w której można mówić o $2N$-wymiarowej objętości.

Jeśli wybierzemy sobie pewien obszar tej przestrzeni i pozwolimy jego punktom przemieszczać się wraz z upływem czasu, to zaobserwujemy, że wprawdzie każdy zbiór wartości $2N$ współrzędnych zmienia się wraz z upływem czasu, lecz zmiany kształtu granic obszaru nie powodują zmiany jego $2N$-wymiarowej objętości. Ogólnie, w przypadku zbiorów zdefiniowanych nie tak prosto jak wyżej wspomniane obszary, pojęcie objętości wymaga wprowadzenia miary w sensie Lebesgue'a. Po wprowadzeniu tej miary, w przypadku układów dynamicznych zachowawczych, które podlegają takim przekształceniom, że wartość tej miary pozostaje stała, istnieje jeszcze jedna wyrażalna liczbowo wielkość, która również pozostaje stała: energia. Jeśli wszystkie ciała wchodzące w skład układu oddziałują tylko ze sobą i nie ma w układzie sił zewnętrznych przyłożonych do ustalonych punktów lub w ustalonych kierunkach, to powstają również stałe następne dwie wielkości będące wektorami: pęd i moment pędu układu. Nie jest trudno je wyeliminować, można więc nasz układ zastąpić innym, mającym mniejszą liczbę stopni swobody.

W pewnych bardzo szczególnych układach mogą występować jeszcze inne wielkości, nie wyznaczone przez energię, pęd i moment pędu, które pozostają stałe podczas ruchu układu. Wiadomo jednak, że układy, w których istnieją takie dodatkowe wielkości niezmiennicze zależne od początkowych współrzędnych i pędów układu dynamicznego i które są jednocześnie na tyle regularne, by mogły podlegać całkowaniu opartemu na teorii miary Lebesgue'a, występują niesłychanie rzadko[1]. W układach bez innych dodatkowych wielkości niezmienniczych możemy ustalić wartość współrzędnych odpowiadających energii, pędowi i całkowitemu momentowi pędu, a wówczas miara określona przez współrzędne położenia i pędu określi w przestrzeni pozostałych współrzędnych pewną podmiarę, podobnie, jak miara przestrzeni (trójwymiarowej) określa pole pewnej dwuwymiarowej powierzchni z rodziny powierzchni dwuwymiarowych. Dla przykładu, jeśli naszą rodziną jest rodzina koncentrycznych powierz-

[1] Oxtoby J. C., Ulam S. M., *Measure — Preserving Homeomorphism and Metrical Transitivity*, Ann. of Math., Ser 2, 42, (1941), str. 874 - 920.

chni sferycznych, to normalizując objętość obszaru między dwoma blisko siebie leżącymi kulami przez przyjęcie za jedność całkowitej objętości obszaru między dwoma powierzchniami otrzymamy w granicy miarę powierzchni kuli.

Określmy zatem taką nową miarę w obszarze przestrzeni fazowej, dla którego są ustalone: energia, całkowity pęd i całkowity moment pędu. Załóżmy, że nie ma tam żadnych innych mierzalnych wielkości niezmienniczych. Niech całkowita miara tego ograniczonego obszaru będzie stała, lub (co możemy zrobić zmieniając skalę) równa jedności. Ponieważ naszą miarę otrzymaliśmy z miary niezależnej od czasu i w sposób niezależny od czasu, przeto również ona sama będzie niezmiennicza. Miarę tę będziemy nazywali *miarą fazową*, a średnie względem tej miary — *średnimi fazowymi*.

Wielkości zmienne w czasie mogą jednak posiadać również *średnie czasowe*. Jeśli na przykład funkcja $f(t)$ zależy od t, to jej średnia czasowa w przeszłości wynosi

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^{0} f(t)\,\mathrm{d}t, \tag{2.01}$$

a jej średnia w przyszłości

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t)\,\mathrm{d}t. \tag{2.02}$$

W mechanice statystycznej Gibbsa występują średnie czasowe i przestrzenne. Błyskotliwy zamysł Gibbsa polegał na tym, aby wykazać, że oba rodzaje średnich są w pewnym sensie tym samym. Spostrzegając, że te dwa rodzaje średnich są ze sobą związane Gibbs miał absolutną rację, jednakże metoda, za pomocą której chciał on wykazać ich związek była całkowicie i beznadziejnie błędna. Nie można go chyba za to ganić. Nawet w chwili jego śmierci sława całki Lebesgue'a zaczęła dopiero przenikać do Ameryki. Przez następnych piętnaście lat była ona uważana za muzealne kuriozum, przydatne jedynie do tego, by wykazywać młodym matematykom potrzebę ścisłości oraz możliwości, jakie ta ścisłość w sobie kryje. Tak wybitny matematyk, jak W. F. Osgood nie zwrócił na nią uwagi[1]. Dopiero po 1930 roku grupa matematyków — Koopman, von Neumann,

[1] Niemniej pewne wczesne prace Osgooda stanowią ważny krok w kierunku całki Lebesgue'a.

Birkhoff[1] — ustaliła ostatecznie właściwe podwaliny mechaniki statystycznej Gibbsa. Dalej, gdy zajmiemy się teorią ergodyczną, zobaczymy na czym one polegają.

Gibbs sądził, że w przypadku układu, z którego usunięto wszystkie niezmienniki jako dodatkowe współrzędne, prawie wszystkie tory punktów w przestrzeni fazowej przechodzą przez wszystkie współrzędne takiej przestrzeni. Hipotezę tę nazwał on *hipotezą ergodyczną* od greckich słów *εργον* (praca) i *ὅδος* (droga). Należy stwierdzić przede wszystkim, że (jak wykazał Plancherel i inni) w żadnym ze znaczących przypadków hipoteza ta nie jest prawdziwa. Żadna różniczkowalna krzywa, nawet nieskończonej długości, nie może pokryć wszystkich punktów płaszczyzny. Następcy Gibbsa, łącznie chyba z nim samym, niejasno zdawali sobie z tego sprawę i zastąpili tę hipotezę — hipotezą *quasi-ergodyczną*, która stwierdza jedynie, że w miarę upływu czasu układ przechodzi na ogół dowolnie blisko każdego punktu obszaru przestrzeni fazowej, określanego przez znane niezmienniki. Nie ma wątpliwości natury logicznej co do prawdziwości powyższego stwierdzenia. Hipoteza ta nie wystarcza jedynie dla wniosków, które Gibbs opiera na niej. Nie mówi ona nic o względnym czasie, który układ spędza w sąsiedztwie każdego punktu.

Aby ocenić rzeczywiste znaczenie teorii ergodycznej, potrzebujemy oprócz pojęć *średniej* i *miary* (średniej wartości funkcji równej jeden w mierzonym zbiorze i równej zeru poza nim) również bardziej szczegółowej analizy pojęcia niezmiennika i grupy przekształceń. Pojęcia te były Gibbsowi znane. Dowodzą tego jego badania z dziedziny analizy wektorowej. Niemniej jednak można twierdzić, że nie docenił on w pełni ich filozoficznej wartości. Podobnie jak współczesny mu Heaviside, Gibbs należy do uczonych, których fizyczno-matematyczna intuicja wyprzedza często logiczne rozumowanie i którzy najczęściej mają rację, choć nie zawsze umieją wyjaśnić dlaczego.

Dla istnienia jakiejkolwiek nauki, konieczne jest by istniały zjawiska nie pozostające we wzajemnej izolacji. Żyjąc w świecie, rządzonym następstwem cudów wywoływanych przez irracjonalnego Boga, zgodnie z jego nagłymi kaprysami, musieliśmy oczekiwać każdej nowej katastrofy w stanie zakłopotanej bierności. Obrazem takiego świata jest gra w krykieta z *Alicji*

---

[1] Hopf E., Ergodentheorie, Ergeb. Math., 5, No 2, Berlin 1937, Springer.

w krainie czarów, gdzie młotkami są flamingi, piłkami jeże, które najspokojniej rozprostowują się, aby podążyć za swymi własnymi sprawami, bramkami — żołnierze z talii kart, również wykazujący własną inicjatywę w poruszaniu się, a regułami gry — dekrety drażliwej, nieprzewidywalnej w postępowaniu Damy Kier.

Zasadniczą cechą efektywnej reguły gry lub użytecznego prawa fizyki jest to, że daje się ono sformułować „z góry" i że stosuje się do więcej, niż jednego przypadku. Idealnie rzecz biorąc, prawo takie powinno reprezentować tę właściwość rozważanego układu, która pozostaje niezmienna w powodzi okoliczności szczególnych. W najprostszym przypadku jest to właściwość niezmiennicza względem zbioru przekształceń, którym podlega układ. Dotarliśmy w ten sposób do pojęć takich jak: przekształcenie, grupa przekształceń i niezmiennik.

Przekształcenie układu jest to pewna jego zmiana, przy której każdy jego element przechodzi w inny. Modyfikacja układu słonecznego, która ma miejsce przy przejściu od czasu t_1 do t_2 jest przekształceniem zbiorów współrzędnych planet. Podobna zmiana ich współrzędnych, spowodowana przesunięciem lub obrotem układu współrzędnych, jest również przekształceniem. Podobnie, przekształceniem jest zmiana skali, z którą mamy do czynienia wówczas, gdy poddajemy preparat powiększającemu działaniu mikroskopu.

Wynikiem zastosowania przekształcenia B po przekształceniu A jest inne przekształcenie BA, zwane *iloczynem* lub *złożeniem przekształceń*. Zauważmy, że w ogólnym przypadku zależy ono od kolejności B i A. Jeśli na przykład A przekształca współrzędną x we współrzędną y; współrzędną y w $(-x)$; i pozostawia współrzędną z bez zmiany; a B przekształca x w z; z w $(-x)$ i pozostawia bez zmiany y, to BA przekształci x w y, y w $(-z)$, a z w $(-x)$; podczas gdy AB przekształci x w z, y w $(-x)$ i z w $(-x)$. Jeśli AB i BA są takie same, to mówimy, że A i B są przemienne.

Czasami, lecz nie zawsze, przekształcenie A nie tylko przekształca każdy element układu w inny element, lecz ma ponadto tę właściwość, że każdy element jest wynikiem przekształcenia innego elementu. W takim przypadku istnieje jednoznaczne przekształcenie A^{-1} takie, że zarówno AA^{-1} jak $A^{-1}A$ jest pewnym szczególnym przekształceniem, które będziemy oznaczać przez I i nazywać *przekształceniem identycznościowym*. Przekształca ono każdy element w siebie. W tym przypadku A^{-1} nazwiemy

przekształceniem *odwrotnym* względem A. Jest rzeczą jasną, że A jest przekształceniem odwrotnym w stosunku do A^{-1}, że I jest przekształceniem odwrotnym w stosunku do siebie i że przekształceniem odwrotnym w stosunku do AB jest $B^{-1}A^{-1}$.

Istnieją pewne zbiory przekształceń, takie że każde przekształcenie należące do zbioru posiada swoje przekształcenie odwrotne również należące do zbioru i gdzie każdy iloczyn dwóch przekształceń należących do zbioru również należy do zbioru. Zbiory takie określamy nazwą grup przekształceń. Zbiór wszystkich przesunięć na prostej, na płaszczyźnie lub w przestrzeni trójwymiarowej jest grupą przekształceń, co więcej, jest grupą bardzo szczególnego rodzaju, tzw. *grupą abelową*, w przypadku której każde dwa przekształcenia należące do grupy są przemienne. Zbiór obrotów wokół punktu i zbiór wszystkich przesunięć sztywnego ciała w przestrzeni są grupami nieabelowymi.

Załóżmy, że z każdym elementem przekształcanym przez grupę przekształceń związana jest pewna wielkość. Jeśli wielkość ta pozostaje niezmienna, gdy każdy element ulega zmianie wywoływanej przez to samo przekształcenie (dowolne lecz należące do grupy), to jest ona *niezmiennikiem grupy*. Istnieje wiele rodzajów takich niezmienników, a dwa z nich są szczególnie ważne dla naszych rozważań.

Pierwszy z nich to tak zwane *niezmienniki liniowe*. Oznaczmy przez x elementy zbioru przekształcanego przez abelową grupę przekształceń. Niech $f(x)$ będzie funkcją przyjmującą wartości zespolone, określoną na zbiorze tych elementów i mającą pewne odpowiednie własności co do ciągłości lub całkowalności. Wówczas, jeśli przez Tx oznaczymy element powstały z zastosowania przekształcenia T do elementu x i jeśli $f(x)$ jest funkcją o wartości bezwzględnej równej 1, taką, że

$$f(Tx)=\alpha(T)f(x), \tag{2.03}$$

gdzie $\alpha(T)$ jest liczbą o bezwzględnej wartości 1 zależną tylko od T, to będziemy mówili, że $f(x)$ jest *charakterem* grupy. Pojęcie to stanowi pewne uogólnienie pojęcia niezmiennika. Jeśli $f(x)$ i $g(x)$ są charakterami grupy, to oczywiście $f(x)\,g(x)$ jest również charakterem, podobnie jak $[f(x)]^{-1}$. Jeśli możemy przedstawić każdą funkcję $h(x)$ zdefiniowaną na grupie jako kombinację liniową charakterów grupy, np. w postaci

$$h(x)=\sum A_k f_k(x), \tag{2.04}$$

gdzie $f_k(x)$ jest charakterem grupy i jednocześnie $\alpha_k(T)$ wiąże się z $f_k(x)$ tak samo, jak $\alpha(T)$ z $f(x)$ z równania (2.03), to wówczas

$$h(Tx)=\sum A_k \alpha_k(T) f_k(x). \tag{2.05}$$

Tak więc, jeśli potrafimy przedstawić $h(x)$ w postaci szeregu charakterów grupy, to potrafimy również w podobny sposób rozwinąć $h(Tx)$ dla wszystkich T. Wspomnieliśmy, że mnożenie i odwracanie charakterów grupy generuje inne charaktery. Można wykazać, że stała 1 jest charakterem. Mnożenie przez charakter generuje zatem grupę przekształceń samych charakterów. Grupa ta jest zwana grupą charakterów grupy pierwotnej.

Jeśli nasza pierwotna grupa, jest grupą przesunięć na prostej, taką, że operator T przekształca x w $(x+T)$, to równanie (2.03) przyjmuje postać równania

$$f(x+T)=\alpha(T) f(x), \tag{2.06}$$

które jest spełnione wtedy, gdy $f(x)=e^{i\lambda x}$, $\alpha(T)=x^{i\lambda T}$. Charakterami będą funkcje $e^{i\lambda x}$, a grupa charakterów będzie grupą przesunięć, odwzorowujących λ w $\lambda+\tau$, mającą zatem tę samą strukturę co grupa pierwotna. Sytuacja będzie inna w przypadku, gdy pierwotna grupa przekształceń jest grupą obrotów okręgu. Wówczas operator T przekształca x w liczbę różniącą się od $x+T$ o całkowitą wielokrotność 2π, leżącą między 0 a 2π i jakkolwiek równanie (2.06) nadal pozostaje w mocy, mamy dodatkowy warunek

$$\alpha(T+2\pi)=\alpha(T). \tag{2.07}$$

Jeśli teraz, podobnie jak poprzednio, przyjmiemy $f(x)=e^{i\lambda x}$, otrzymamy zależność

$$e^{i2\pi\lambda}=1, \tag{2.08}$$

co oznacza, że λ musi być liczbą rzeczywistą, całkowitą, dodatnią, ujemną lub zerem. Grupa charakterów odpowiada zatem przesunięciom liczb całkowitych. Jeśli z drugiej strony grupa pierwotna jest grupą przesunięć liczb całkowitych, to x i T w równaniu (2.05) przyjmują jedynie wartości całkowite i $e^{i\lambda x}$ jest tylko liczbą leżącą między 0 a 2π, różniącą się od λ o całkowitą wielokrotność 2π. Grupa charakterów jest więc w istocie grupą obrotów okręgu.

W dowolnej grupie charakterów, dla danego charakteru f wartości $\alpha(T)$ rozłożone są w taki sposób, że rozkład ten nie zmieni się, jeśli wszystkie $\alpha(T)$ zostaną pomnożone przez $\alpha(S)$, gdzie S jest dowolnym elementem grupy. Znaczy to, że jeśli istnieje uzasadniony sposób obliczenia wartości średniej, nie ulegający zmianie wówczas, gdy każde przekształcenie należące do grupy zostanie pomnożone przez jedno ustalone przekształcenie z tej samej grupy, to albo $\alpha(T)$ jest zawsze równe 1, albo ta średnia pozostaje niezmienna, gdy mnoży się ją przez liczbę nie równą 1, czyli musi być równa zeru. Można stąd wywnioskować, że średnia iloczynu dowolnego charakteru i charakteru sprzężonego z nim będzie równa 1, a średnia iloczynu dowolnego charakteru i charakteru sprzężonego z innym charakterem będzie równa 0. Innymi słowy, jeśli możemy przedstawić $h(x)$ w postaci takiej, jak w równaniu (2.04), to otrzymamy

$$A_k = \text{średnia}\left[h(x)\overline{f_k(x)}\right]. \tag{2.09}$$

W przypadku grupy obrotów okręgu prowadzi to nas do wniosku, że jeśli

$$f(x) = \sum a_n e^{inx}, \tag{2.10}$$

to

$$a_n = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\, e^{-inx}\, dx, \tag{2.11}$$

a wyniki dla przesunięć wzdłuż prostej wiążą się ściśle z faktem, że jeśli w odpowiednim sensie

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} a(\lambda)\, e^{i\lambda x}\, d\lambda, \tag{2.12}$$

to w pewnym sensie

$$a(\lambda) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, e^{-i\lambda x}\, dx. \tag{2.13}$$

Powyższe wyniki zostały jedynie naszkicowane z grubsza, bez jasnego sformułowania warunków, przy których są one prawdziwe. Po bardziej precyzyjne sformułowanie teorii czytelnik winien sięgnąć do podanej niżej pracy[1].

[1] Wiener N., *The Fourier Integral and Certain of its Applications*, The University Press, Cambridge, England, 1933, Dover Publications Inc, N.Y.

Oprócz teorii liniowych niezmienników grupy istnieje również ogólna teoria niezmienników metrycznych. Istnieją systemy miary Lebesgue'a, które nie ulegają żadnej zmianie wówczas, gdy obiekty przekształcane przez grupę są permutowane przez operatory grupy. Należy tu wspomnieć ciekawą teorię miary grupowej, opracowaną przez Haara[1]. Jak widzieliśmy, każda grupa jest zbiorem obiektów, które przechodzą w siebie przy mnożeniu operacji samej grupy. Jako taka, grupa może mieć miarę niezmienniczą. Haar udowodnił, że pewna dość szeroka klasa grup, posiada jednoznacznie określoną miarę niezmienniczą definiowalną za pomocą struktury samej grupy.

Najważniejszym zastosowaniem teorii metrycznych niezmienników grupy przekształceń jest ich udział w dowodzie o równoważności średnich fazowych i czasowych, który, jak już wiemy, daremnie usiłował przeprowadzić Gibbs. Teoretyczna podstawa, na której opiera się ten dowód jest znana pod nazwą teorii ergodycznej.

Zwykle twierdzenie ergodyczne rozpoczyna się od ustalania zbioru E o mierze jednostkowej przekształcanego w siebie przez zachowujące miarę przekształcenie T lub przez grupę zachowujących miarę przekształceń T^{λ}, gdzie $-\infty<\lambda<\infty$ i gdzie

$$T^{\lambda}\cdot T^{\mu}=T^{\lambda+\mu}. \tag{2.14}$$

Teoria ergodyczna zajmuje się funkcjami $f(x)$ elementów x zbioru E, przyjmującymi wartości zespolone. We wszystkich przypadkach przyjmuje się, że $f(x)$ jest mierzalna względem x, a jeśli zajmujemy się ciągłą grupą przekształceń, to przyjmujemy, że $f(T^{\lambda}x)$ jest mierzalna jednocześnie względem x i λ.

W twierdzeniu ergodycznym Koopmana i von Neumanna $f(x)$ należy do klasy L^2, to znaczy spełnia warunek

$$\int_E |f(x)|^2\,\mathrm{d}x<\infty. \tag{2.15}$$

Wówczas twierdzenie mówi, że funkcja

$$f_N(x)=\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N} f(T^n x) \tag{2.16}$$

---

[1] Haar H., *Der Massbegriff in der Theorie der Kontinuierlichen Gruppen*, Ann. of Math., Ser 2, 34, 147 - 169 (1933).

lub

$$f_A(x)=\frac{1}{A}\int_0^A f(T^\lambda x)\,\mathrm{d}\lambda \tag{2.17}$$

ma średnią zbieżną do granicy $f^*(x)$, gdy $N\to\infty$ lub $A\to\infty$ (odpowiednio) w tym sensie, że

$$\lim_{N\to\infty}\int_E |f^*(x)-f_N(x)|^2\,\mathrm{d}x=0\,, \tag{2.18}$$

$$\lim_{A\to\infty}\int_E |f^*(x)-f_A(x)|^2\,\mathrm{d}x=0\,. \tag{2.19}$$

W twierdzeniu ergodycznym Birkhoffa, mówiącym o zbieżności „prawie wszędzie" $f(x)$ należy do klasy L, co oznacza, że

$$\int_E |f(x)|\,\mathrm{d}x<\infty\,. \tag{2.20}$$

Funkcje $f_N(x)$ i $f_A(x)$ definiowane są tak, jak w równaniach (2.16) i (2.17). Twierdzenie mówi, że prawie wszędzie z wyjątkiem zbioru wartości x o mierze równej 0, istnieje

$$f^*(x)=\lim_{N\to\infty} f_N(x) \tag{2.21}$$

oraz

$$f^*(x)=\lim_{A\to\infty} f_A(x)\,. \tag{2.22}$$

Bardzo interesującym przypadkiem jest przypadek tranzytywności metrycznej lub ergodycznej, w którym żaden zbiór punktów x o mierze różnej od 1 lub 0 nie jest niezmienniczy względem przekształcenia T lub zbioru przekształceń T^λ. Wówczas zbiór wartości, dla których $f^*(x)$ (w obu twierdzeniach ergodycznych) przyjmuje wartości z pewnego przedziału, jest prawie zawsze równy albo 1, albo 0. Wartość, którą $f^*(x)$ wtedy przyjmuje prawie zawsze jest równa

$$\int_0^1 f(x)\,\mathrm{d}x\,. \tag{2.23}$$

Z twierdzenia Koopmana otrzymujemy zatem następującą granicę w sensie zbieżności średniej:

$$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N}f(T^n x)=\int_0^1 f(x)\,\mathrm{d}x, \tag{2.24}$$

a z twierdzenia Birkhoffa

$$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N}f(T^n x)=\int_0^1 f(x)\,\mathrm{d}x \tag{2.25}$$

z wyjątkiem zbioru wartości x o mierze lub prawdopodobieństwie równym 0. Podobne wyniki otrzymamy w przypadku ciągłym. Stanowi to wystarczające uzasadnienie dla dopuszczalnej według Gibbsa równoważności średnich czasowych i fazowych.

Von Neumann wykazał, że jeśli przekształcenie T lub grupa przekształceń T^λ nie jest ergodyczna, to przy pewnych, bardzo ogólnych warunkach, można je zredukować do ergodycznych składników. Znaczy to, że z wyjątkiem zbioru wartości x o mierze 0, E można przedstawić w postaci skończonego lub przeliczalnego zbioru klas E_n i continuum klas $E(y)$ takich, że na każdym z E_n i na $E(y)$ ustalona jest miara niezmiennicza względem T lub T^λ. Wszystkie te przekształcenia są ergodyczne i jeśli $S(y)$ jest przecięciem S z $E(y)$ i S_n z E_n, to

$$\underset{E}{\text{miara}}\,(S)=\int_{E(y)}\text{miary}\,[S(y)]\,\mathrm{d}y+\sum_{E_n}\text{miary}\,(S_n). \tag{2.26}$$

Innymi słowy, cała teoria przekształceń zachowujących miarę da się sprowadzić do teorii przekształceń ergodycznych.

Zauważmy na marginesie, że cała teoria ergodyczna może być zastosowana do bardziej ogólnych grup przekształceń, niż grupy izomorficzne z grupą przesunięć na prostej. W szczególności, można ją zastosować do grupy przesunięć w przestrzeni n-wymiarowej. Fizycznie ważny jest przypadek przestrzeni trójwymiarowej. Przestrzennym odpowiednikiem równowagi czasowej jest przestrzenna jednorodność i takie teorie, jak teoria jednorodnego gazu, cieczy czy ciała stałego wiążą się z zastosowaniem trójwymiarowej teorii ergodycznej. Nawiasem mówiąc okazuje się, że nieergodyczna grupa przesunięć w trójwymiarowej przestrzeni może być

traktowana jako zbiór przesunięć takiej mieszaniny różnych stanów, że w każdej chwili istnieje tylko jeden stan, ale nie mieszanina obu stanów.

Jednym z podstawowych pojęć w mechanice statystycznej, znajdującym również zastosowanie w klasycznej termodynamice, jest pojęcie *entropii*. Opisuje ono przede wszystkim właściwości obszarów przestrzeni fazowej i wyraża logarytm ich miary prawdopodobieństwa. Rozważmy na przykład dynamikę n cząstek znajdujących się w zbiorniku podzielonym na dwie części: A i B. Mówiąc, że w części A znajduje się m cząstek, a w części B $(n-m)$ cząstek, charakteryzujemy obszar mający pewną miarę prawdopodobieństwa w przestrzeni fazowej. Jej logarytm jest entropią następującego rozkładu: „m cząstek w A, $n-m$ w B". Układ będzie przez większość czasu przebywał w stanie bliskim stanowi charakteryzującemu się największą entropią, w tym sensie, że przez większość czasu w części A będzie około m_1 cząstek, a w części B około $n-m_1$ cząstek, przy czym m_1 jest takie, że prawdopodobieństwo kombinacji „m_1 w A, $n-m_1$ w B" jest maksymalne. W przypadku układów o dużej liczbie cząstek i stanów oznacza to, że jeśli przeprowadzimy układ w stan różny od stanu odpowiadającego maksymalnej entropii i będziemy obserwować, co się z układem stanie, to zauważymy prawie zawsze wzrost entropii.

W zwyczajnych termodynamicznych zagadnieniach maszyn cieplnych mamy do czynienia z warunkami, w których znaczne obszary (np. cylinder maszyny) znajdują się w przybliżeniu w stanie równowagi cieplnej. Badania entropii prowadzimy dla stanów bliskich maksymalnej entropii przy danej objętości i w danej temperaturze bądź dla niewielkiej liczby obszarów o danych objętościach i danych temperaturach. Nawet bardziej szczegółowe rozważania na temat maszyn cieplnych (zwłaszcza zbliżonych do turbin, gdzie gaz rozpręża się w sposób bardziej złożony, niż w cylindrze maszyny parowej) nie zmieniają znacząco tych warunków. Wciąż możemy z bardzo dobrym przybliżeniem mówić o temperaturach lokalnych, jakkolwiek nie można dokładnie określić temperatury dla stanu innego niż stan równowagi ani inaczej niż za pomocą metod zakładających istnienie tego stanu. Jednakże w przypadku żywej materii nie mamy do czynienia nawet z tak przybliżoną jednorodnością. Jak wykazały badania przy użyciu mikroskopu elektronowego tkanka białkowa zbudowana jest niesłychanie precyzyjnie, z zachowaniem bardzo ścisłych zasad, a jej fizjologia z pewnością dorównuje dokładnością budowie. Precyzja ta jest o wiele większa, niż czasowo-

-przestrzenna dokładność zwyczajnego termometru, dlatego też pomiar temperatury żywej tkanki za pomocą zwykłego termometru daje nam jako wynik jedynie grube uśrednienie, a nie temperaturę, która byłaby naprawdę potrzebna w rozważaniach termodynamicznych. Mechanika statystyczna Gibbsa może doskonale pełnić rolę adekwatnego modelu zjawisk zachodzących w żywym organizmie, natomiast model, jaki sugeruje zwykła maszyna cieplna z pewnością nie jest odpowiedni. Pojęcie cieplnej sprawności działania mięśnia nie znaczy prawie nic, a jeśli znaczy, to na pewno nie to, co może się nam wydawać.

Bardzo ważnym pojęciem w mechanice statystycznej jest *demon Maxwella*. Wyobraźmy sobie gaz, którego cząsteczki poruszają się z prędkościami, mającymi rozkład odpowiadający statystycznej równowadze dla danej temperatury. W przypadku gazu doskonałego jest to rozkład Maxwella. Załóżmy, że gaz jest zamknięty w sztywnym zbiorniku, przedzielonym na dwie części ścianką, w której znajdują się drzwiczki, zamykane i otwierane przez strażnika. Może być nim antropomorficzna istota — demon lub malutki mechanizm. Kiedy cząstka o prędkości większej niż średnia zbliża się do drzwiczek od strony komory A lub kiedy cząstka o prędkości mniejszej niż średnia zbliża się od strony komory B strażnik otwiera drzwiczki i przepuszcza tę cząsteczkę. Kiedy natomiast od strony części A nadbiega cząsteczka o prędkości mniejszej od średniej lub kiedy od strony B zbliża się cząstka o prędkości większej od średniej — drzwiczki pozostają zamknięte. W ten sposób koncentracja cząstek o większej prędkości w części A wzrasta, a w części B maleje. W wyniku otrzymamy ewidentny spadek entropii i wydaje się, że jeśli połączymy obie części zbiornika z maszyną cieplną, to uzyskamy perpetuum mobile drugiego rodzaju.

Łatwiej jest odrzucić pytanie, jakie nasuwa demon Maxwella, niż na nie odpowiedzieć. Nic łatwiejszego, niż zaprzeczyć możliwości istnienia takich istotek lub mechanizmów. Przekonamy się, że istotnie demon Maxwella w najściślejszym sensie nie może istnieć w układzie znajdującym się w stanie równowagi; gdybyśmy jednak założyli to już na początku i nie próbowali tego wykazać — utracilibyśmy znakomitą okazję do nauczenia się czegoś o entropii i o pewnych układach fizycznych, chemicznych i biologicznych.

Aby demon Maxwella mógł działać, musi odbierać od zbliżających się cząsteczek informację o ich prędkości i o tym, w który punkt ścianki mają zamiar uderzyć. Istnienie takich sygnałów, niezależnie od tego czy

wiąże się z przekazywaniem energii, czy też nie, znaczy, że demon jest w jakiś sposób połączony, sprzężony z gazem. Prawo, mówiące o wzroście entropii stosuje się do układu całkowicie izolowanego, jednakże nie stosuje się do nieizolowanych części tego układu. Dlatego też interesuje nas jedynie entropia układu „gaz–demon", a nie entropia samego gazu. Entropia gazu jest jedynie jednym ze składników całkowitej entropii układu. Czy możemy wyróżnić czynniki, wiążące się z samym demonem, które by podobnie wpływały na tę całkowitą entropię?

Oczywiście tak. Demon może operować jedynie odbieraną informacją, a ta informacja, jak się przekonamy w następnym rozdziale, reprezentuje ujemną entropię. Informacja musi być przenoszona za pośrednictwem jakiegoś zjawiska fizycznego, na przykład za pomocą pewnej formy promieniowania. Można założyć, że przenoszenie tej informacji wymaga bardzo małego poziomu energii i że przepływ energii pomiędzy cząstką a demonem jest przez dłuższy czas o wiele mniej znaczący, niż przepływ informacji. Jednakże, zgodnie z mechaniką kwantową, nie jest możliwe otrzymanie informacji co do położenia i pędu cząsteczki, a tym bardziej o obu tych wielkościach jednocześnie, bez zmiany energii badanej cząsteczki o wielkość, przekraczającą pewne minimum zależne od częstotliwości światła użytego do badania. Tak więc każdy rodzaj sprzężenia jest dokładnie sprzężeniem wymagającym wymiany energii, a układ znajdujący się w stanie statystycznej równowagi jest w stanie równowagi zarówno co do entropii, jak i co do energii. W ciągu dłuższego czasu sam demon Maxwella podlega przypadkowym ruchom odpowiadającym temperaturze jego otoczenia i jak mówi Leibniz o pewnych z jego monad, odbiera wielką liczbę słabszych wrażeń, aż wreszcie zostaje wprawiony w „swojego rodzaju zawrót głowy" i przestaje być zdolny do wyraźnego odbierania sygnałów. Wtedy w istocie przestaje działać jak demon Maxwella.

Niemniej jednak, zanim demon utraci swe zdolności, może upłynąć dość dużo czasu, wystarczająco wiele, byśmy mogli nazwać aktywną działalność demona zjawiskiem metastabilnym. Nie ma żadnych podstaw do przypuszczeń, że metastabilne demony nie istnieją w rzeczywistości. Istotnie, metastabilnymi demonami Maxwella są enzymy, zmniejszające entropię, niekoniecznie na zasadzie oddzielania cząstek wolnych od szybkich, lecz w oparciu o inny, równoważny proces fizyczny. Podobnie możemy spojrzeć na żywe organizmy i samego człowieka. Z pewnością enzymy

i organizmy żywe są metastabilne w podobny sposób. Dla enzymu stanem stabilnym jest niezdolność do działania, dla żywego organizmu stanem stabilnym jest śmierć. Wszystkie katalizatory są w ostatecznym rachunku truciznami, wpływają one jedynie na szybkość reakcji, a nie na sam stan równowagi. Niemniej jednak zarówno katalizatory, jak i człowiek posiadają stan metastabilności wystarczająco dobrze określony na to, by uznać ten stan za sytuację względnie trwałą.

Nie chciałbym zamykać tego rozdziału nie wspomniawszy, że teoria ergodyczna obejmuje zakres znacznie szerszy, niż omówiony wyżej. Istnieją pewne najnowsze prace z dziedziny teorii ergodycznej, w których miara niezmiennicza względem zbioru przekształceń nie jest założona z góry, lecz jest określona bezpośrednio przez sam zbiór. Mam tu szczególnie na myśli pracę Kryłowa i Bogolubowa, niektóre prace Hurewicza i szkoły japońskiej.

Kolejny rozdział będzie poświęcony mechanice statystycznej szeregów czasowych. Jest to następna z dziedzin, w których warunki są bardzo odmienne od występujących w mechanice statystycznej maszyn cieplnych i która z tego powodu doskonale nadaje się jako model tego, co dzieje się w żywym organizmie.

III

SZEREGI CZASOWE, INFORMACJA I WYMIANA INFORMACJI

Istnieje szeroka klasa zjawisk, w przypadku których obserwujemy pewną wielkość numeryczną lub ciąg wielkości numerycznych rozłożonych w czasie. Takimi szeregami czasowymi, ciągłymi lub dyskretnymi, prostymi lub złożonymi, są zarówno wykres temperatury zarejestrowany przez termometr piszący, jak publikowane dzień po dniu notowania giełdowe lub dane meteorologiczne ogłaszane codziennie przez Biuro Pogody. Te szeregi czasowe są stosunkowo wolnozmienne i można przy ich „obróbce" posługiwać się obliczeniami wykonanymi ręcznie lub przy pomocy zwyczajnych narzędzi obliczeniowych takich, jak suwak logarytmiczny czy maszyna licząca. Badania nad nimi należą do bardziej konwencjonalnych działów statystyki.

Nie uświadomiono sobie jednak jeszcze powszechnie, że szybko zmieniające się ciągi napięć w linii telefonicznej, obwodzie telewizyjnym lub we fragmencie aparatury radarowej są również przedmiotem zainteresowania statystyki i teorii szeregów czasowych, chociaż szybkość działania aparatu, który nimi operuje, musi być na ogół bardzo wielka i w praktyce musi być on zdolny do produkowania odpowiedzi *pari passu* z bardzo szybkimi zmianami wejścia. Urządzenia takie — słuchawka telefoniczna, filtr elektryczny, automatyczne urządzenia do kodowania dźwięku, jak Vocoder produkcji Bell Telephone Laboratories, układy modulacji częstotliwości i odpowiadające im odbiorniki — są w zasadzie szybko działającymi urządzeniami arytmetycznymi, odpowiadającymi swym działaniem całej pracowni statystycznej wraz z jej maszynami liczącymi i ich obsługą. Podobnie jak w automatycznych dalmierzach artyleryjskich i urządzeniach do ustawiania

dział systemu sterowania ogniem artylerii przeciwlotniczej, i z tego samego powodu, we wspomniane urządzenia wbudowana została z góry cała pomysłowość, niezbędna do ich sprawnego działania. Łańcuch następujących po sobie czynności musi biec zbyt szybko na to, by można było dopuścić istnienie w nim ogniwa wymagającego ludzkiej interwencji.

Każdy szereg czasowy i aparat, który ma z nimi do czynienia — czy to będzie pracownia obliczeniowa, czy obwód telefoniczny — zajmuje się rejestrowaniem, przechowywaniem, przekazywaniem i wykorzystaniem informacji. Czym jest ta informacja i jak się ją mierzy? Z jedną z najprostszych jednostkowych form występowania informacji mamy do czynienia wówczas, gdy zapisujemy wynik wyboru między dwoma możliwościami o równych prawdopodobieństwach, o których wiemy, że jedna lub druga z nich musi wystąpić, na przykład wynik wyboru między orłem a reszką w rzucie monetą. Taki prosty wybór będziemy nazywali *decyzją*. Zapytujemy teraz, jaką ilość informacji zawiera idealnie dokładny pomiar wielkości o której wiadomo, że leży pomiędzy A i B, przy czym prawdopodobieństwo *a priori* jest jednakowe dla wszystkich punktów przedziału. Możemy przekonać się, że jeśli przyjmujemy $A=0$, $B=1$ i będziemy reprezentować mierzoną wielkość w skali dwójkowej za pomocą liczby dwójkowej $0, a_1 a_2 \ldots a_n$ o nieskończonej długości, gdzie każde z $a_1, a_2, \ldots, a_n$ ma wartość 0 lub 1, to liczba elementarnych wyborów, a w konsekwencji ilość informacji jest nieskończona. W tym przypadku

$$0, a_1 a_2 a_3 \ldots a_n \ldots = \frac{1}{2} a_1 + \frac{1}{2^2} a_2 + \ldots + \frac{1}{2^n} a_n + \ldots \tag{3.01}$$

Jednakże w rzeczywistości nie możemy dokonać pomiaru z idealną dokładnością. Jeśli pomiar jest obciążony błędem o wartości równomiernie rozłożonej w przedziale długości $0, b_1 b_2 \ldots b_n \ldots$, przy czym b_k jest pierwszą cyfrą różną od zera, to decyzje od a_1 do a_{k-1}, a może do a_k, są znaczące, a wszystkie dalsze — nie. Liczba podjętych decyzji nie różni się oczywiście zbytnio od

$$-\log_2 0, b_1 b_2 \ldots b_n \ldots \tag{3.02}$$

i tę właśnie wielkość przyjmujemy za definicję i dokładny wzór na obliczanie ilości informacji.

Możemy to ująć również w następujący sposób: wiemy *a priori*, że zmienna leży pomiędzy 0 a 1 oraz *a posteriori*, że leży w przedziale $[a, b]$ wewnątrz przedziału $[0, 1]$. Wówczas ilość informacji, którą otrzymujemy z naszej wiedzy *a posteriori* jest równa

$$-\log_2 \frac{\text{miara}\,(a, b)}{\text{miara}\,(0, 1)}. \tag{3.03}$$

Rozważmy jednak teraz przypadek, w którym nasza wiedza *a priori* mówi, że prawdopodobieństwo znajdowania się pewnej wielkości w przedziale $(x, x+\mathrm{d}x)$ wynosi $f_1(x)\mathrm{d}x$, a odpowiednie prawdopodobieństwo *a posteriori* wynosi $f_2(x)\mathrm{d}x$. Jak wiele nowej informacji daje nam takie prawdopodobieństwo *a posteriori*?

Problem ten sprowadza się w zasadzie do przypisywania szerokości obszarom pod krzywymi $y=f_1(x)$ i $y=f_2(x)$. Zauważmy, że zakładamy tu, iż zmienna posiada tę własność, że nasze wyniki nie będą na ogół takie same, jeśli zastąpimy x przez x^3 lub dowolną inną funkcją zmiennej x. Ponieważ $f_1(x)$ jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa, mamy więc

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)\,\mathrm{d}x = 1 \tag{3.04}$$

tak, że średni logarytm szerokości obszaru pod krzywą $f_1(x)$ można uważać za pewnego rodzaju średnią logarytmu odwrotności $f_1(x)$. Rozsądną miarą[1] ilości informacji związanej z krzywą $f_1(x)$ jest

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\log_2 f_1(x)]\, f_1(x)\,\mathrm{d}x. \tag{3.05}$$

Wielkość, którą definiujemy tu jako ilość informacji jest równa wziętej z przeciwnym znakiem wielkości definiowanej zazwyczaj w podobnych sytuacjach jako entropia. Podana tu definicja nie jest identyczna z definicją sformułowaną przez R. A. Fishera dla potrzeb statystyki, jakkolwiek jest definicją statystyczną i w metodach statystycznych można by się nią posługiwać zamiast definicji Fishera.

[1] Autor skorzystał tu z osobistych kontaktów z J. von Neumannem.

W szczególności, jeśli $f_1(x)$ przyjmuje wartość stałą w przedziale $[a, b]$, a wartość 0 poza nim, to

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\log_2 f_1(x)] f_1(x)\,dx = \frac{b-a}{b-a} \log_2 \frac{1}{b-a} = \log_2 \frac{1}{b-a}. \tag{3.06}$$

Jeśli wykorzystamy ten wynik do porównania informacji o tym, że punkt ten leży wewnątrz przedziału [0, 1] z informacją o tym, że leży on wewnątrz przedziału $[a, b]$, to jako miarę różnicy otrzymamy

$$\log_2 \frac{1}{b-a} - \log_2 1 = \log_2 \frac{1}{b-a}. \tag{3.07}$$

Podana definicja ilości informacji daje się zastosować również wówczas, gdy zastąpimy zmienną x przez zmienną dwu- lub więcej wymiarową. W przypadku dwuwymiarowości $f_1(x, y)$ jest funkcją taką, że

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, f_1(x, y) = 1, \tag{3.08}$$

a ilość informacji jest określona wzorem

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, f_1(x, y) \log_2 f_1(x, y). \tag{3.081}$$

Zauważmy, że jeśli $f_1(x, y)$ ma postać $\varphi(x)\,\psi(y)$ i jeśli

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)\,dx = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(y)\,dy = 1, \tag{3.082}$$

to wówczas

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, \varphi(x)\,\psi(y) = 1 \tag{3.083}$$

oraz

$$\int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} dy\, f_1(x, y) \log_2 f_1(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} dx\, \varphi(x) \log_2 \varphi(x) + \int_{-\infty}^{\infty} dy\, \psi(y) \log_2 \psi(y), \tag{3.084}$$

co znaczy, że ilość informacji pochodzącej z niezależnych źródeł jest addytywna.

Ciekawą jest rzeczą, jaką ilość informacji zyskuje się przez ustalenie jednej ze zmiennych. Załóżmy na przykład, że zmienna u leży między x a $x+\mathrm{d}x$ z prawdopodobieństwem $\frac{1}{\sqrt{2\pi a}}\exp\left(-\frac{x^2}{2a}\right)\mathrm{d}x$ natomiast zmienna v leży w tych samych granicach z prawdopodobieństwem $\frac{1}{\sqrt{2\pi b}}\exp\left(-\frac{x^2}{2b}\right)\mathrm{d}x$. Ile informacji dotyczącej zmiennej u uzyskujemy, jeśli wiemy, że $u+v=w$? W tym przypadku jest rzeczą jasną, że $u=w-v$, gdzie w jest ustalone. Załóżmy, że rozkłady *a priori* zmiennych u i v są niezależne. Wówczas rozkład *a posteriori* zmiennej u jest proporcjonalny do

$$\exp\left(-\frac{x^2}{2a}\right)\exp\left[-\frac{(w-x)^2}{2b}\right]=c_1\exp\left[-(x-c_2)^2\frac{a+b}{2ab}\right], \qquad (3.09)$$

gdzie c_1 i c_2 są stałymi. Obie te stałe, znikają we wzorze na zysk informacji, otrzymamy przez ustalenie w.

Nadmiar informacji dotyczącej x, jeśli wiemy, że w ma wartość znaną z góry, wynosi

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi[ab/(a+b)]}}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\exp\left[-(x-c_2)^2\frac{a+b}{2ab}\right]\right\}\cdot\left[-\tfrac{1}{2}\log_2 2\pi\frac{ab}{a+b}\right]-$$

$$-(x-c_2)^2\left[\frac{a+b}{2ab}\log_2 \mathrm{e}\right]\mathrm{d}x-\frac{1}{\sqrt{2\pi a}}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\exp\left(-\frac{x^2}{2a}\right)\right]\times$$

$$\times\left(-\tfrac{1}{2}\log_2 2\pi a-\frac{x^2}{2a}\log_2 \mathrm{e}\right)\mathrm{d}x=\tfrac{1}{2}\log_2\frac{a+b}{b}. \qquad (3.091)$$

Zauważmy, że wyrażenie (3.091) ma wartość dodatnią i jest niezależne od w. Jest ono równe połowie logarytmu stosunku sumy wariancji zmiennych u i v do wariancji zmiennej v. Jeśli zakres zmienności zmiennej v jest mały, to ilość informacji dotyczącej u, a uzyskiwanej dzięki znajomości sumy $u+v$, jest wielka i dąży do nieskończoności, gdy b dąży do zera.

Otrzymany rezultat możemy interpretować w następujący sposób: potraktujemy u jako wiadomość użyteczną, a v jako szum. Wówczas, ilość informacji przenoszonej przez samą wiadomość przy braku szumu jest nieskończenie wielka. Przy obecności szumu ilość informacji jest skończona i bardzo szybko zbliża się do zera, jeśli natężenie szumu wzrasta.

Powiedzieliśmy, że ilość informacji będąca ujemnym logarytmem wielkości, którą możemy uważać za prawdopodobieństwo, jest w zasadzie ujemną entropią. Interesującą rzeczą jest wykazać, że ma ona — w sensie średniej — właściwości, które zwykliśmy przypisywać entropii.

Niech $\varphi(x)$ i $\psi(x)$ będą funkcjami gęstości prawdopodobieństwa. Wówczas $(\varphi(x)+\psi(x))/2$ jest również gęstością prawdopodobieństwa. Wtedy

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi(x)+\psi(x)}{2} \log \frac{\varphi(x)+\psi(x)}{2}\,dx \leqslant \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi(x)}{2} \log \varphi(x)\,dx + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi(x)}{2} \log \psi(x)\,dx. \tag{3.10}$$

Wynika to z faktu, że

$$\frac{a+b}{2} \log \frac{a+b}{2} \leqslant \tfrac{1}{2}(a \log a + b \log b). \tag{3.11}$$

Innymi słowy, nakładanie się obszarów pod krzywymi $\varphi(x)$ i $\psi(x)$ zmniejsza maksymalną informację związaną z $\varphi(x)+\psi(x)$. Z drugiej strony, jeśli $\varphi(x)$ jest gęstością prawdopodobieństwa silnie malejącą poza granicami przedziału (a, b), to wyrażenie

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \log \varphi(x)\,dx \tag{3.12}$$

ma wartość minimalną, gdy $\varphi(x)=1/(b-a)$ w przedziale (a, b), a równa się zeru poza nim. Wynika to z faktu, że krzywa logarytmiczna jest wypukła.

Przekonamy się, że procesy wiążące się ze stratą informacji są — jak mogliśmy się spodziewać — ściśle analogiczne do procesów, w których wzrasta entropia. Polegają one na zlewaniu się obszarów prawdopodobieństwa, które pierwotnie były rozłączne. Informację tracimy na przykład wówczas, gdy zastąpimy rozkład pewnej zmiennej przez rozkład funkcji tej zmiennej, przyjmującej taką samą wartość dla różnych argumentów, lub gdy w funkcji kilku zmiennych pozwolimy niektórym zmiennym zmieniać się w sposób niezależny po ich naturalnym zakresie zmienności. Żadna operacja wykonana na wiadomości nie może (średnio rzecz biorąc) zwiększać ilości

informacji. Mamy tu do czynienia dokładnie z zastosowaniem drugiego prawa termodynamiki do techniki łączności. Przeciwnie, bardziej szczegółowe określenie niejednoznacznej sytuacji będzie – jak się przekonaliśmy – prowadziło zawsze do zwiększenia informacji, a nigdy do jej straty.

Z interesującym przypadkiem mamy do czynienia wówczas, gdy rozkład prawdopodobieństwa jest opisany n-wymiarową funkcją gęstości $f(x_1, \ldots, x_n)$ zmiennych $(x_1, \ldots. x_n)$, gdzie występuje m zależnych zmiennych $y_1, \ldots, y_m$. Jak wiele informacji uzyskujemy przez ustalenie tych zmiennych? Ustalmy je najpierw w granicach $y_1^*, y_1^*+\mathrm{d}y_1^*, \ldots, y_m^*, y_m^*+\mathrm{d}y_m^*$. Weźmy teraz nowy zbiór zmiennych: $x_1, x_2, \ldots, x_{n-m}, y_1, y_2, \ldots, y_m$. Wówczas dystrybuanta określona na nowym zbiorze zmiennych będzie proporcjonalna do $f_1(x_1, \ldots, x_n)$ w obszarze R określonym nierównościami $y_1^* \leqslant y_1 \leqslant y_1^*+\mathrm{d}y_1^*, \ldots, y_m^* \leqslant y_m \leqslant y_m^*+\mathrm{d}y_m^*$, a równa zeru poza tym obszarem. Tak więc, *ilość informacji uzyskana przez ograniczenie zmiennych* y będzie równa

$$\frac{\underbrace{\int \mathrm{d}x_1 \ldots \int}_{R} \mathrm{d}x_n f(x_1, \ldots, x_n) \log_2 f(x_1, \ldots, x_n)}{\underbrace{\int \mathrm{d}x_1 \ldots \int}_{R} \mathrm{d}x_n f(x_1, \ldots, x_n)} =$$

$$= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_{n-m} \left| J \begin{pmatrix} y_1^*, \ldots, y_m^* \\ x_{n-m+1}, \ldots, x_n \end{pmatrix} \right|^{-1} f(x_1, \ldots, x_n) \times \log_2 f(x_1, \ldots, x_n) - \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_n f(x_1, \ldots, x_n) \log_2 f(x_1, \ldots, x_n)}{\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_{n-m} \left| J \begin{pmatrix} y_1^*, \ldots, y_m^* \\ x_{n-m+1}, \ldots, x_n \end{pmatrix} \right|^{-1} f(x_1, \ldots, x_n) - \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_1 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_n f(x_1, \ldots, x_n) \log_2 f(x_1, \ldots, x_n)}. \tag{3.13}$$

Z problemem tym wiąże się ściśle uogólnienie rozpatrywanego wyżej przypadku ile mamy informacji dotyczącej samych tylko zmiennych $x_1, \ldots, x_{n-m}$? Gęstość prawdopodobieństwa a priori, tych zmiennych jest tu równa

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_{n-m+1} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}x_n f(x_1, \ldots, x_n), \tag{3.14}$$

a nienormalizowana gęstość prawdopodobieństwa po ustaleniu zmiennych y^* wynosi

$$\sum \left| J \begin{pmatrix} y_1^*, \ldots, y_m^* \\ x_{n-m+1}, \ldots, x_n \end{pmatrix} \right|^{-1} f(x_1, \ldots, x_n), \tag{3.141}$$

gdzie sumowanie $\sum$ zachodzi po wszystkich zbiorach punktów $(x_{n-m+1}, \ldots, x_n)$ odpowiadających danemu zbiorowi zmiennych y^*. Opierając się na tym moglibyśmy łatwo zapisać rozwiązanie naszego problemu, jakkolwiek byłoby ono nieco przydługie. Jeśli przyjmiemy, że zmienne $(x_1, \ldots, x_{n-m})$ stanowią uogólnioną wiadomość, $(x_{n-m+1}, \ldots, x_n)$ — uogólniony szum, a zmienne y^* — uogólnioną zniekształconą wiadomość, to stwierdzimy, że otrzymaliśmy rozwiązanie uogólnienia problemu z równania (3.141).

Otrzymaliśmy przynajmniej formalne uogólnienie sformułowanego poprzednio problemu sygnału i szumu. Zbiór obserwacji zależy zatem w arbitralny sposób od zbioru sygnałów i szumów o znanym sumarycznym rozkładzie. Pragniemy upewnić się, jak wiele informacji o samych sygnałach dają nam te obserwacje. Jest to centralny problem techniki łączności. Umożliwia nam on ocenę różnych systemów modulacji (modulacja amplitudy, częstotliwości, fazy) pod względem sprawności przekazywania informacji. Jest to zagadnienie techniczne, niezbyt nadające się do tego, by zajmować się nim tu szczegółowo, jednakże pewne uwagi byłyby na miejscu. Po pierwsze, przy podanej wyżej definicji informacji i przy założeniu, że przypadkowe zakłócenia w eterze są równomiernie rozłożone (co do mocy) w całym zakresie częstotliwości, a wiadomość zajmuje ograniczone pasmo częstotliwości i ma w tym pasmie skończoną moc — można wykazać, że żadna metoda przekazywania informacji nie jest bardziej efektywna, niż modulacja amplitudy, choć inne środki przekazywania informacji mogą być równie efektywne. Z drugiej strony, informacja przekazywana przy użyciu modulacji amplitudy niekoniecznie musi mieć postać najwygodniejszą dla odbioru przez nasze ucho lub dowolny inny receptor. Charakterystyczne właściwości ludzkiego ucha i innych receptorów należy rozważyć w świetle teorii bardzo zbliżonej do tej, którą sformułowaliśmy wyżej. Ogólnie mówiąc, zastosowanie modulacji amplitudy lub dowolnego innego typu modulacji należy uzupełnić zastosowaniem odpowiednich urządzeń dekodujących, transformujących odbieraną informację na postać, wygodną dla odbioru przez ludzkie ucho lub receptory mechaniczne. Podobnie, pier-

wotny sygnał musi być zakodowany tak, by w czasie transmisji miał jak najbardziej skondensowaną postać. Zagadnienie to podjęto, przynajmniej częściowo, w czasie projektowania urządzenia zwanego Vocoder w Bell Telephone Laboratories. Odpowiednią ogólną teorię tego urządzenia przedstawił w bardzo poprawny sposób dr C. Shannon, pracujący w tychże laboratoriach.

Tyle o definicji i mierzeniu informacji. Teraz zajmiemy się natomiast metodą przedstawiania informacji w postaci jednorodnej w czasie. Zauważmy, że działaniu większości urządzeń telekomunikacyjnych nie przypisuje się w istocie jakiejś konkretnej początkowej chwili czasu. W rzeczywistości, istnieje przekształcenie sygnału, które zdaje się przeczyć temu stwierdzeniu, ale jedynie pozornie. Tym przekształceniem jest modulacja. W swej najprostszej postaci przekształca ona sygnał $f(t)$ na sygnał $f(t)\sin(at+b)$. Jeśli jednak potraktujemy czynnik $\sin(at+b)$ jako dodatkowy sygnał wprowadzony do aparatury, zauważymy, że sytuacja sprowadzi się do naszych podstawowych założeń. Dodatkowy sygnał, który nazywamy falą nośną, nie zmienia w niczym szybkości, z jaką system przekazuje informację. Cała informacja, jaką ten sygnał zawiera, zostaje przekazana w dość krótkim okresie czasu, a potem sygnał ten nic już nowego nie mówi.

Wiadomość, jednorodną w czasie, lub – jak to nazywają statystycy – szereg czasowy w stanie statystycznej równowagi, jest zatem pojedynczą funkcją czasu lub zbiorem funkcji czasu, stanowiącym element rodziny takich zbiorów o dobrze określonym rozkładzie prawdopodobieństwa, nie ulegającym zmianie przy przejściu od t do $t+\tau$. Innymi słowy, grupa przekształceń składająca się z operatorów T_λ, które zmieniają $f(t)$ na $f(t+\lambda)$ pozostawia niezmienne prawdopodobieństwo określone dla tej rodziny. Grupa spełnia warunek

$$T^\lambda[T^\mu f(t)] = T^{\mu+\lambda} f(t) \qquad \begin{cases} -\infty < \lambda < \infty, \\ -\infty < \mu < \infty. \end{cases} \tag{3.15}$$

Wynika to z faktu, że jeśli $\Phi[f(t)]$ jest „funkcjonałem" $f(t)$, tzn. jest liczbą zależną od całej historii $f(t)$, i jeśli średnia funkcji $f(t)$ w całej rodzinie jest skończona, to mamy prawo zastosować wspomniane w poprzednim rozdziale twierdzenie ergodyczne Birkhoffa i wyciągnąć wniosek, że z wyjątkiem zbioru wartości $f(t)$ o zerowym prawdopodobieństwie

istnieje średnia czasowa $\Phi[f(t)]$, czyli

$$\lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_0^A \Phi\left[f(t+\tau)\right]\mathrm{d}\tau=\lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_{-A}^0 \Phi\left[f(t+\tau)\right]\mathrm{d}\tau\,. \tag{3.16}$$

Kryje się tu jeszcze coś więcej. W poprzednim rozdziale sformułowaliśmy inne, pochodzące od von Neumanna, twierdzenie ergodyczne, zgodnie z którym dowolny element (z wyjątkiem zbioru elementów o zerowym prawdopodobieństwie) przechodzący w siebie pod wpływem grupy przekształceń zachowujących miarę (jak w równaniu (3.15)) należy do podzbioru (może być on równy całemu zbiorowi), który przechodzi w siebie pod wpływem tego samego przekształcenia, posiada miarę również niezmienniczą względem tego przekształcenia i ma ponadto taką właściwość, że dowolna część tego podzbioru, zachowująca miarę względem grupy przekształceń, ma miarę albo równą maksymalnej mierze zbioru, albo równą zeru. Jeśli odrzucimy wszystkie elementy z wyjątkiem tych, które należą do wspomnianego podzbioru i zastosujemy odpowiednią miarę, to okaże się, że średnia czasowa (3.16) jest w prawie wszystkich przypadkach średnią funkcjonału $\Phi[f(t)]$ w całej przestrzeni funkcji $f(t)$, czyli tak zwaną *średnią fazową*. Tak więc w przypadku rodziny funkcji $f(t)$, z wyjątkiem zbioru przypadków o zerowym prawdopodobieństwie, możemy wyprowadzić średnią wartość dowolnego statystycznego parametru rodziny (a nawet dowolny przeliczalny zbiór takich parametrów jednocześnie) na podstawie pomiarów dowolnego składowego szeregu czasowego, wykorzystując średnią czasową zamiast średniej fazowej. Co więcej, musimy znać jedynie przeszłość co najwyżej jednego szeregu czasowego danej klasy. Inaczej mówiąc, jeśli znamy historię szeregu czasowego, o którym wiemy, że należy do rodziny będącej w stanie statystycznej równowagi aż do bieżącej chwili, to możemy wyliczyć (z prawdopodobnym błędem równym zeru) pełny zbiór statystycznych parametrów rodziny, do której ten szereg należy. Aż do tej pory rozważania nasze dotyczyły prostych szeregów czasowych, są jednak one równie prawdziwe w przypadku szeregów czasowych złożonych, gdzie zamiast jednej wielkości zmiennej występuje kilka wielkości zmieniających się jednocześnie.

Jesteśmy teraz w stanie rozważyć różne zagadnienia dotyczące szeregów czasowych. Szczególną uwagę poświęcimy tym przypadkom, w których cała przeszłość szeregu czasowego może być opisana za pomocą przeli-

ciągłego zbioru pewnych wielkości. Na przykład, dla dość szerokiej klasy funkcji $f(t)$ $(-\infty<t<\infty)$ możemy określić w pełni f, jeśli znamy zbiór wielkości

$$a_n=\int_{-\infty}^{0} e^t t^n f(t)\,dt \quad (n=0,1,2,\ldots). \tag{3.17}$$

Niech A będzie pewną funkcją wartości t w przyszłości, to znaczy dla argumentów większych od zera. Wówczas na podstawie przeszłości dowolnego pojedynczego szeregu czasowego możemy wyznaczyć łączny rozkład $(a_0, a_1, \ldots, a_n, A)$, jeśli znamy zbiór wartości f w najwęższym z możliwych sensie. W szczególności, jeśli wszystkie $a_0, \ldots, a_n$ są dane, to możemy określić rozkład A. Odwołujemy się tu do znanego twierdzenia Nikodyma o prawdopodobieństwach warunkowych. To samo twierdzenie zapewnia nas, że rozkład ten przy bardzo ogólnych warunkach dąży (przy $n\to\infty$) do granicy, której znajomość daje nam całą wiedzę potrzebną do określenia rozkładu dowolnej zmiennej w przyszłości. W podobny sposób możemy określić rozkład łączny dowolnego zbioru przyszłych zmiennych lub zbioru zmiennych zależnych zarówno od przeszłości jak i przyszłości, jeśli przeszłość jest znana. Jeśli teraz podamy właściwe znaczenie pojęcia „wartość najlepsza" dla dowolnego z tych parametrów statystycznych (na przykład w odniesieniu do wartości średniej, mediany lub mody parametru), to możemy wyliczyć je ze znanego rozkładu i otrzymać przewidywanie, które czyniłoby zadość dowolnemu wymaganemu kryterium poprawności przewidywania. Możemy obliczyć poprawność przewidywania, biorąc za podstawę dowolną wielkość statystyczną: błąd kwadratowy średni, błąd maksymalny, błąd przeciętny itd. Możemy obliczyć ilość informacji dotyczącej dowolnego parametru statystycznego lub zbioru parametrów statystycznych, jaką daje nam ustalenie przeszłości. Możemy nawet obliczyć całą ilość informacji, jaką znajomość przeszłości daje nam na temat całej przyszłości wykraczającej poza pewien punkt, jakkolwiek kiedy ten punkt stanie się teraźniejszością, będziemy go znać z przeszłości, a nasza wiedza o teraźniejszości będzie zawierała nieskończoną ilość informacji.

Z inną ciekawą sytuacją mamy do czynienia w przypadku złożonych szeregów czasowych, gdy znamy dokładnie przeszłość jedynie kilku z jego składowych. Rozkład dowolnej wielkości, która wiąże się z czymś więcej, niż to znana nam przeszłość, można badać przy użyciu metod bardzo zbliżonych do tych, które już zasugerowaliśmy. W szczególności możemy życzyć

sobie znać rozkład wartości innej składowej, lub zbiór wartości innych składowych w pewnym punkcie czasu: przeszłym, obecnym lub przyszłym. Z tą klasą zagadnień wiążą się filtry elektryczne. Mamy tam sygnał, tworzący wspólnie z szumem zniekształconą wiadomość, której przeszłość jest nam znana. Znamy również łączny statystyczny rozkład sygnału i szumu, traktowanych jako szereg czasowy. Pytamy natomiast o rozkład wartości sygnału użytecznego, niosącego wiadomość, w pewnym zadanym czasie: przeszłym, obecnym i przyszłym. Potrzebny jest nam zatem operator, który zastosowany do przeszłości sygnału zniekształconego da nam najlepszą postać „prawdziwego" sygnału użytecznego w pewnym zadanym statystycznym sensie. Na koniec może nas interesować ilość posiadanych informacji o sygnale.

Istnieje pewna klasa szczególnie prostych i ważnych szeregów czasowych, szeregi związane z ruchami Browna. Ruchom Browna podlegają cząsteczki gazu, doznające przypadkowych zderzeń z innymi cząsteczkami, znajdującymi się w stanie pobudzenia cieplnego. Ich teorią zajmowało się wielu autorów, między innymi Einstein, Smoluchowski, Perrin i autor niniejszej książki[1]. Jeśli skala czasu nie jest na tyle drobna, by pojedyncze zderzenia cząsteczek były zauważalne, to ruch cząstek charakteryzuje się nieróżniczkowalnością bardzo szczególnego rodzaju. Średni kwadrat ruchu w danym kierunku i w danym przedziale czasu jest proporcjonalny do długości przedziału czasu, a ruchy w kolejnych chwilach są zupełnie nieskorelowane. Pozostaje to w ścisłej zgodzie z obserwacjami fizycznymi. Jeśli znormalizujemy skalę ruchu Browna tak, by dopasować ją do skali czasu i będziemy rozpatrywać jedynie współrzędną x, przy założeniu, że $x(t)$ dla $t=0$ jest równe zeru, to wówczas prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że (przy $0 \leqslant t_1 \leqslant t_2 \leqslant \ldots \leqslant t_n$) cząstki leżą w chwili t_1 pomiędzy x_1 a $x_1+\mathrm{d}x_1$, ..., w chwili t_n pomiędzy x_n a $x_n+\mathrm{d}x_n$, wynosi

$$\frac{\exp\left[-\frac{x_1^2}{2t_1}-\frac{(x_2-x_1)^2}{2(t_2-t_1)}-\ldots-\frac{(x_n-x_{n-1})^2}{2(t_n-t_{n-1})}\right]}{\sqrt{\left|(2\pi)^n t_1(t_2-t_1)\ldots(t_n-t_{n-1})\right|}}\,\mathrm{d}x_1\ldots\mathrm{d}x_n. \tag{3.18}$$

[1] Paley R. E. A.C. i Wiener N., *Fourier Transforms in the Complex Domain*, „Colloquium Publications", vol. 19, American Mathematical Society, New York 1934, r. 10.

Na podstawie odpowiadającego powyższemu twierdzeniu jednoczesnego układu prawdopodobieństw możemy doprowadzić do tego, by zbiór torów odpowiadających różnym możliwym ruchom Browna był zależny od parametru α leżącego między 0 a 1 w taki sposób, że każdy tor jest funkcją $x(t, \alpha)$, zależną od czasu i parametru rozkładu α, a prawdopodobieństwo, że dany tor należy do pewnego zbioru S jest takie samo jak miara zbioru wartości α odpowiadających torom należącym do S. Na tej podstawie prawie wszystkie tory będą ciągłe i nieróżniczkowalne.

Interesującym zagadnieniem jest obliczenie średniej $x(t_1, \alpha), \ldots x(t_n, \alpha)$ względem α. Wynosi ona

$$\int_0^1 d\alpha\, x(t_1, \alpha)\, x(t_2, \alpha) \ldots x(t_n, \alpha) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \left[t_1(t_2 - t_1) \ldots (t_n - t_{n-1})\right]^{-\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_1 \ldots \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_n\, \xi_1\, \xi_2 \ldots \xi_n \exp\left[-\frac{\xi_1^2}{2t_1} - \frac{(\xi_2 - \xi_1)^2}{2(t_2 - t_1)} - \ldots - \frac{(\xi_n - \xi_{n-1})^2}{2(t_n - t_{n-1})} \right], \tag{3.19}$$

przy założeniu, że $0 \leqslant t_1 \leqslant \ldots \leqslant t_n$. Połóżmy teraz

$$\xi_1 \ldots \xi_n = \sum A_k\, \xi_1^{\lambda_{k,1}} (\xi_2 - \xi_1)^{\lambda_{k,2}} \ldots (\xi_n - \xi_{n-1})^{\lambda_{k,n}}, \tag{3.20}$$

gdzie $\lambda_{k,1} + \lambda_{k,2} + \ldots + \lambda_{k,n} = n$. Wyrażenie (3.19) przyjmie wówczas wartość:

$$\sum A_k (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \left[t_1^{\lambda_{k,1}} (t_2 - t_1)^{\lambda_{k,2}} \ldots (t_n - t_{n-1})^{\lambda_{k,n}}\right]^{-\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \prod_j \int_{-\infty}^{\infty} d\xi\, \xi^{\lambda_{k,j}} \exp\left[-\frac{\xi^2}{2(t_j - t_{j-1})} \right] =$$

$$= \sum A_k \prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \xi^{\lambda_{k,j}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) d\xi\, (t_j - t_{j-1})^{-\frac{1}{2}} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ jeśli którekolwiek } \lambda_{k,j} \text{ jest nieparzyste,} \\ \sum\limits_k A_k \prod\limits_j (\lambda_{k,j} - 1)(\lambda_{k,j} - 3) \ldots 5 \cdot 3 \cdot (t_j - t_{j-1})^{-\frac{1}{2}}, \text{ jeśli każde } \lambda_{k,j} \text{ jest} \\ \text{parzyste} \end{array} \right\} =$$

$$=\sum_k A_k \prod_j (\text{liczba sposobów podziału składników } \lambda_{k,j} \text{ na pary}) \cdot (t_j - t_{j-1})^{\frac{1}{2}} =$$

$$=\sum_k A_k \text{ (liczba sposobów podziału } n \text{ składników na pary, których oba elementy należą do tej samej z grup składników } \lambda_{k,j}, \text{ na które zostało podzielone } \lambda) \cdot (t_j - t_{j-1})^{\frac{1}{2}} =$$

$$=\sum_j A_j \sum \prod \int_0^1 d\alpha [x(t_k, \alpha) - x(t_{k-1}, \alpha)][x(t_q, \alpha) - x(t_{q-1}, \alpha)]. \tag{3.21}$$

W powyższym wzorze pierwszy znak $\sum$ oznacza sumowanie po j; drugi — sumowanie po wszystkich możliwych sposobach podziału odpowiednio n składników w blokach liczb $\lambda_{k,1}, \ldots, \lambda_{k,n}$ na pary, a iloczyn $\prod$ bierze się po wszystkich parach wartości k i q, gdzie $\lambda_{k,1}$ oznacza liczbę elementów t_1 wybranych z t_k i t_q, $\lambda_{k,2}$ — liczbę elementów t_2 z t_k i t_q, itd. Stąd bezpośrednio wynika, że

$$\int_0^1 d\alpha\, x(t_1, \alpha) x(t_2, \alpha) \ldots x(t_n, \alpha) = \sum \prod \int_0^1 d\alpha\, x(t_j, \alpha) x(t_k, \alpha), \tag{3.22}$$

gdzie $\sum$ oznacza sumowanie po wszystkich podziałach $t_1, \ldots, t_n$ na pary, a $\prod$ — mnożenie po wszystkich parach w ramach każdego podziału. Innymi słowy, jeśli znamy wartości średnie iloczynów par $x(t_j, \alpha)$, to znamy również wartości średnie wszystkich wielomianów tych zmiennych, a zatem cały ich rozkład stytystyczny.

Rozważaliśmy do tej pory ruchy Browna $x(t, \alpha)$, gdzie t jest dodatnie. Jeśli przyjmiemy

$$\left.\begin{aligned} \xi(t, \alpha, \beta) &= x(t, \alpha), \quad (t \geqslant 0), \\ \xi(t, \alpha, \beta) &= x(-t, \beta), \quad (t < 0), \end{aligned}\right\} \tag{3.23}$$

gdzie α i β mają niezależne i jednakowe rozkłady w przedziale (0, 1) to otrzymamy rozkład wielkości $\xi(t, \alpha, \beta)$, gdzie czas t przebiega całą oś rzeczywistą. W matematyce jest dobrze znany sposób odwzorowywania kwadratu w odcinek prostej w ten sposób, że pole przechodzi w długość. Wystarczy w tym celu zapisać współrzędne punktów kwadratu w postaci ułamków dziesiętnych

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= 0, \alpha_1 \alpha_2 \ldots \alpha_n \ldots, \\ \beta &= 0, \beta_1 \beta_2 \ldots \beta_n \ldots \end{aligned}\right\} \tag{3.24}$$

i podstawić

$$\gamma = 0, \alpha_1 \beta_1 \alpha_2 \beta_2 \ldots \alpha_n \beta_n \ldots,$$

a otrzymamy żądane odwzorowanie, będące odwzorowaniem jedno-jednoznacznym dla prawie wszystkich punktów zarówno kwadratu, jak i odcinka. Korzystając z tego podstawienia możemy zdefiniować

$$\xi(t, \gamma) = \xi(t, \alpha, \beta). \tag{3.25}$$

Chcielibyśmy teraz określić

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t)\, \mathrm{d}\xi(t, \gamma). \tag{3.26}$$

Najbardziej oczywistym rozwiązaniem byłoby zdefiniowanie tej wielkości jako całki Stieltjesa[1], jednakże ξ jest bardzo nieregularną funkcją t, co uniemożliwia zastosowanie takiej definicji. Jeśli jednak k dąży wystarczająco szybko do zera w $\pm\infty$ i jest funkcją wystarczająco gładką, to jest rzeczą rozsądną przyjąć, że

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t)\, \mathrm{d}\xi(t, \gamma) = -\int_{-\infty}^{\infty} K'(t)\, \xi(t, \gamma)\, \mathrm{d}t. \tag{3.27}$$

W tych warunkach otrzymujemy formalnie

$$\begin{aligned} \int_0^1 \mathrm{d}\gamma \int_{-\infty}^{\infty} K_1(t)\, \mathrm{d}\xi(t, \gamma) \int_{-\infty}^{\infty} K_2(t)\, \mathrm{d}\xi(t, \gamma) = \\ = \int_0^1 \mathrm{d}\gamma \int_{-\infty}^{\infty} K_1'(t)\, \xi(t, \gamma)\, \mathrm{d}t \int_{-\infty}^{\infty} K_2'(t)\, \xi(t, \gamma)\, \mathrm{d}t = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} K_1'(s)\, \mathrm{d}s \int_{-\infty}^{\infty} K_2'\, \mathrm{d}t \int_0^1 \xi(s, \gamma)\, \xi(t, \gamma)\, \mathrm{d}\gamma. \end{aligned} \tag{3.28}$$

Jeśli teraz s i t są przeciwnych znaków, to

$$\int_0^1 \xi(s, \gamma)\, \xi(t, \gamma)\, \mathrm{d}\gamma = 0, \tag{3.29}$$

---

[1] Stieltjes T. J., „Annales de la Fac. des Sc. de Toulouse", 1894, p. 165; Lebesgue H., *Leçons sur l'intégration*, Paris 1928, Gauthier — Villars.

natomiast jeśli mają one ten sam znak i $|s|<|t|$, to

$$\int_0^1 \xi(s,\gamma)\xi(t,\gamma)\,d\gamma = \int_0^1 x(|s|,\alpha)x(|t|,\alpha)\,d\alpha =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{|s|(|t|-|s|)}} \int_{-\infty}^{\infty} du \int_{-\infty}^{\infty} dv\, uv \exp\left[-\frac{u^2}{2|s|} - \frac{(v-u)^2}{2(|t|-|s|)}\right] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} u^2 \exp\left(-\frac{u^2}{2|s|}\right) du = |s| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} u^2 \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = |s|. \quad (3.30)$$

Tak więc

$$\int_0^1 d\gamma \int_{-\infty}^{\infty} K_1(t)\,d\xi(t,\gamma) \int_{-\infty}^{\infty} K_2(t)\,d\xi(t,\gamma) =$$

$$= -\int_0^{\infty} K_1'(s)\,ds \int_0^s tK_2'(t)\,dt - \int_0^{\infty} K_2'(s)\,ds \int_0^s tK_1'(t)\,dt + \int_{-\infty}^0 K_1'(s)\,ds \int_s^0 tK_2'(t)\,dt +$$

$$+ \int_{-\infty}^0 K_2'(s)\,ds \int_s^0 tK_1'(t)\,dt = -\int_0^{\infty} K_1'(s)\,ds\left[sK_2(s) - \int_0^s K_2(t)\,dt\right] -$$

$$- \int_0^{\infty} K_2'(s)\,ds\left[sK_1(s) - \int_0^s K_1(t)\,dt\right] + \int_{-\infty}^0 K_1'(s)\,ds\left[-sK_2(s) - \int_s^0 K_2(t)dt\right] +$$

$$+ \int_{-\infty}^0 K_2'(s)\,ds\left[-sK_1(s) - \int_s^0 K_1(t)\,dt\right] = -\int_{-\infty}^{\infty} ds\left[K_1(s)K_2(s)\right] =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} K_1(s)K_2(s)\,ds. \quad (3.31)$$

W szczególności,

$$\int_0^1 d\gamma \int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau_1)\,d\xi(t,\gamma) \int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau_2)\,d\xi(t,\gamma) =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau_2-\tau_1)\,ds. \quad (3.32)$$

Co więcej,

$$\int_0^1 d\gamma \prod_{k=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau_k)\,d\xi(t,\gamma) = \sum \prod \int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau_j-\tau_k)\,ds, \quad (3.33)$$

gdzie sumowanie zachodzi po wszystkich podziałach $\tau_1, \ldots, \tau_n$ na pary, a mnożenie — po wszystkich parach w ramach każdego podziału.

Wyrażenie

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)=f(t,\gamma) \tag{3.34}$$

reprezentuje bardzo ważną rodzinę szeregów czasowych o zmiennej t, zależnych od parametru rozkładu γ. Wykazaliśmy wyżej, co powoduje, że wszystkie momenty, a zatem wszystkie parametry statystyczne tego rozkładu, zależą od funkcji

$$\Phi(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} K(s)\,K(s+\tau)\,\mathrm{d}s=\int_{-\infty}^{\infty} K(s+\tau)\,K(s+t+\tau)\,\mathrm{d}s, \tag{3.35}$$

która jest znaną statystykom funkcją autokorelacji z opóźnieniem τ. Statystyki rozkładu $f(t,\gamma)$ są więc takie same, jak statystyki $f(t+t_1,\gamma)$ i można wykazać, że jeśli

$$f(t+t_1,\gamma)=f(t,\Gamma), \tag{3.36}$$

to przekształcenie γ w Γ zachowuje miarę, a inaczej mówiąc, nasz szereg czasowy $f(t,\gamma)$ jest w stanie statystycznej równowagi.

Co więcej, jeśli rozważymy średnią wyrażenia

$$\Big[\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\Big]^m\Big[\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\sigma-\tau)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\Big]^n, \tag{3.37}$$

to będzie się ono składać dokładnie z członów

$$\int_0^1 \mathrm{d}\gamma\Big[\int_{-\infty}^{\infty} K(\tau-t)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\Big]^m \int_0^1 \mathrm{d}\gamma\Big[\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\sigma-\tau)\,\mathrm{d}\xi(t,\gamma)\Big]^n \tag{3.38}$$

oraz skończonej liczby członów zawierających jako czynniki potęgi wyrażeń

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(\sigma+\tau)\,K(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{3.39}$$

i jeśli dąży ona do zera gdy $\sigma\to\infty$, to wyrażenie (3.38) będzie granicą wyrażenia (3.37). Innymi słowy, rozkłady $f(t,\gamma)$ i $f(t+\sigma,\gamma)$ stają się asymptotycznie niezależne, gdy $\sigma\to\infty$. Przy pomocy bardziej ogólnie sformułowanego, lecz zupełnie podobnego rozumowania można wykazać, że jednoczesny rozkład $f_1(t_1,\gamma), \ldots, f(t_n,\gamma)$ oraz $f(\sigma+s_1,\gamma), \ldots, f(\sigma+s_m,\gamma)$ dąży

do łącznego rozkładu pierwszego i drugiego zbioru, gdy $\sigma \to \infty$. Inaczej mówiąc, dowolny ograniczony mierzalny funkcjonał (czyli wielkość zależna od całkowitego rozkładu wartości funkcji $f(t, \gamma)$ zmiennej t), który możemy zapisać jako $\mathscr{F}[f(t, \gamma)]$, musi posiadać następującą właściwość:

$$\lim_{\sigma \to \infty} \int_0^1 \mathscr{F}[f(t, \gamma)] \mathscr{F}[f(t+\sigma, \gamma)] \, d\gamma = \{\int_0^1 \mathscr{F}[f(t, \gamma)] \, d\gamma\}^2 . \tag{3.40}$$

Jeśli teraz $\mathscr{F}[f(t, \gamma)]$ jest niezmienniczy względem przesunięcia zmiennej t i przyjmuje tylko wartości 0 lub 1, to otrzymujemy zależność

$$\int_0^1 \mathscr{F}[f(t, \gamma)] \, d\gamma = \int_0^1 \{\mathscr{F}[f(t, \gamma)] \, d\gamma\}^2, \tag{3.41}$$

a więc grupa przekształceń $f(t, \gamma)$ w $f(t+\sigma, \gamma)$ jest *metrycznie tranzytywna*. Wynika stąd, że jeśli $\mathscr{F}[f(t, \gamma)]$ jest dowolnym całkowalnym funkcjonałem funkcji f zmiennej t, to na mocy twierdzenia ergodycznego

$$\int_0^1 \mathscr{F}[f(t, \gamma)] \, d\gamma = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathscr{F}[f(t, \gamma)] \, dt = \lim_{T \to \infty} \int_{-T}^0 \mathscr{F}[f(t, \gamma)] \, dt \tag{3.42}$$

dla wszystkich wartości γ z wyjątkiem ich zbioru o zerowej mierze. Możemy zatem prawie zawsze odczytać dowolny parametr (a nawet dowolny przeliczalny zbiór parametrów) szeregu czasowego znając przeszłość pojedynczego szeregu. W rzeczywistości, w przypadku szeregów czasowych, dla których znamy

$$\lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^0 f(t, \gamma) f(t-\tau, \gamma) \, dt, \tag{3.43}$$

znamy również prawie zawsze $\Phi(t)$. Dysponujemy zatem całkowitą statystyczną znajomością takiego szeregu czasowego.

Z szeregami czasowymi tego rodzaju związane są pewne wielkości o dość interesujących własnościach. W szczególności, możemy życzyć sobie znać wartość średnią wyrażenia

$$\exp[i \int_{-\infty}^{\infty} K(t) \, d\xi(t, \gamma)] . \tag{3.44}$$

Formalnie można tę wartość wyznaczyć następująco:

$$\int_0^1 d\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^n}{n!}\Big[\int_{-\infty}^{\infty} K(t)\,d\xi(t,\gamma)\Big]^n =$$

$$= \sum_m \frac{(-1)^m}{(2m)!}\left\{\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2 dt\right\}^m (2m-1)(2m-3)\ldots 5\cdot 3\cdot 1 =$$

$$= \sum_m^{\infty} \frac{(-1)^m}{2^m m!}\left\{\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2 dt\right\}^m = \exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2 dt\right\}. \qquad (3.45)$$

Bardzo ciekawe jest następujące zagadnienie: jak zbudować szereg czasowy o możliwie jak najogólniejszej postaci z szeregów czasowych odpowiadających prostym ruchom Browna? Przykład rozwinięcia Fouriera sugeruje, że przy tego rodzaju konstrukcji wygodnymi „cegiełkami" są rozwinięcia takie, jak (3.44). W szczególności, zbadajmy szereg czasowy w następującej postaci:

$$\int_a^b d\lambda \exp\Big[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau,\lambda)\,d\xi(\tau,\gamma)\Big]. \qquad (3.46)$$

Załóżmy, że znamy $\xi(\tau,\gamma)$ równie dobrze, jak wyrażenie (3.46). Wówczas, podobnie jak w równaniu (3.45), jeśli $t_1 > t_2$, to

$$\int_0^1 d\gamma \exp\{is[\xi(t_1,\gamma)-\xi(t_2,\gamma)]\}\cdot\int_a^b d\lambda \exp\Big[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau,\lambda)\,d\xi(t,\gamma)\Big] =$$

$$= \int_a^b d\lambda \exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2 dt - \frac{s^2}{2}(t_2-t_1) - s\int_{t_2}^{t_1} K(t,\lambda)\,dt\right\}. \qquad (3.47)$$

Jeżeli pomnożymy przez $\exp[s^2(t_2-t_1)/2]$ i zakładając, że $s(t_2-t_1)=i\sigma$ oraz $t_2\to t_1$, to otrzymujemy

$$\int_a^b d\lambda \exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2 dt - i\sigma K(t_1,\lambda)\right\}. \qquad (3.48)$$

Weźmy $K(t_1,\lambda)$ oraz nową zmienną niezależną μ i wyznaczmy λ. Otrzymamy

$$\lambda = Q(t_1,\mu). \qquad (3.49)$$

Wówczas wyrażenie (3.48) przyjmie postać

$$\int_{K(t_1,a)}^{K(t_1,b)} e^{i\mu\sigma} d\mu \frac{\partial Q(t_1,\mu)}{\partial \mu} \exp\left(-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \{K[t+\tau, Q(t_1,\mu)]\}^2 dt\right). \tag{3.50}$$

Stąd na mocy transformaty Fouriera, możemy określić

$$\frac{\partial Q(t_1,\mu)}{\partial \mu} \exp\left(-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \{K[t+\tau, Q(t_1,\mu)]\}^2 dt\right) \tag{3.51}$$

jako funkcję μ, gdzie μ leży między $K(t_1, a)$ a $K(t_1, b)$. Jeśli scałkujemy tę funkcję względem μ, określimy

$$\int_a^{\lambda} d\lambda \exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} [K(t+\tau,\lambda)]^2 dt\right\} \tag{3.52}$$

jako funkcję $K(t_1, \lambda)$ oraz t_1. Znaczy to, że istnieje znana funkcja $F(u, v)$ taka, że

$$\int_a^{\lambda} d\lambda \exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} [K(t+\tau,\lambda)]^2 dt\right\} = F[K(t_1,\lambda), t_1]. \tag{3.53}$$

Ponieważ lewa strona tego równania nie zależy od t_1, możemy zapisać ją jako $G(\lambda)$ i podstawić

$$F[K(t_1,\lambda), t_1] = G(\lambda). \tag{3.54}$$

F jest tu funkcją znaną i możemy znaleźć jej funkcję odwrotną względem pierwszego argumentu i napisać

$$K(t_1,\lambda) = H[G(\lambda), t_1]. \tag{3.55}$$

Wówczas

$$G(\lambda) = \int_a^{\lambda} d\lambda \exp\left(-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \{H[G(\lambda), t+\tau]\}^2 dt\right). \tag{3.56}$$

Tak więc funkcja

$$\exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} [H(u,t)]^2 dt\right\} = R(u) \tag{3.57}$$

będzie funkcją znaną, a

$$\frac{dG}{d\lambda} = R(G). \tag{3.58}$$

Stąd

$$\frac{dG}{R(G)}=d\lambda, \tag{3.59}$$

czyli

$$\lambda=\int\frac{dG}{R(G)}+\text{const}=S(G)+\text{const}. \tag{3.60}$$

Występująca tu stała da się wyznaczyć z warunku

$$G(a)=0 \tag{3.61}$$

lub

$$a=S(0)+\text{const}. \tag{3.62}$$

Łatwo wykazać, że jeśli a jest skończone, to nie ma znaczenia, jaką wartość mu nadamy. Nasz operator nie ulega bowiem zmianie, jeśli dodamy stałą do wszystkich wartości λ. Możemy zatem przyjąć, że $a=0$. W ten sposób określimy λ jako funkcję G, a G jako funkcję λ. Stąd, na mocy równania (3.55) określiliśmy $K(t,\lambda)$. Aby doprowadzić do końca określenie wyrażenia (3.46), musimy już tylko znać b. Możemy je wyznaczyć z porównania całki

$$\int_a^b d\lambda \exp\left\{-\tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t,\lambda)]^2 dt\right\} \tag{3.63}$$

z całką

$$\int_0^1 d\gamma \int_a^b d\lambda \exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t,\lambda)\,d\xi(t,\gamma)\right]. \tag{3.64}$$

Tak więc przy pewnych warunkach, które w dalszym ciągu muszą być jeszcze ostatecznie sprecyzowane, jeśli szereg czasowy można zapisać w postaci wyrażenia (3.46) i jeśli znamy $\xi(t,\gamma)$, to w wyrażeniu (3.46) możemy określić funkcję $K(t,\lambda)$ oraz liczby a i b z dokładnością do stałych; stałe te można dodawać do a, λ i b. Nie powstają żadne dodatkowe trudności, jeśli $b\to+\infty$, nie jest również trudno rozszerzyć rozumowanie na przypadek $a\to-\infty$. Pozostaje oczywiście poważne zadanie przedyskutowania problemu znajdowania funkcji odwrotnych w przypadku funkcji, które nie są funkcjami jednej zmiennej oraz ogólnych warunków poprawności omawianego rozwinięcia. W każdym razie uczyniliśmy pierwszy krok w kierunku rozwiązania problemu sprowadzania szerokiej klasy

szeregów czasowych do postaci kanonicznej, a to jest najważniejsze dla celów praktycznego zastosowania teorii przewidywania i teorii mierzenia informacji, które naszkicowaliśmy na początku niniejszego rozdziału.

Pozostaje jeszcze jedno oczywiste ograniczenie, które powinniśmy usunąć z przedstawionej teorii szeregów czasowych. Polega ono na tym, że przedstawiając szereg czasowy w formie wyrażenia (3.46) musimy jednocześnie znać $\xi(t, \gamma)$. Powstaje pytanie, przy jakich warunkach możemy przedstawić szereg czasowy o znanych parametrach statystycznych jako szereg określony przez ruch Browna lub przynajmniej jako granicę (w takim czy innym sensie) szeregu określonego przez ruchy Browna? Możemy ograniczyć się do rozpatrywania jedynie szeregów mających własności tranzytywności metrycznej, a nawet silniejszą własność polegającą na tym, że jeśli weźmiemy przedziały czasu o ustalonej długości, lecz odległe w czasie, to rozkłady dowolnych funkcjonałów części składowych szeregu czasowego w tych przedziałach dążą do niezależności, gdy przedziały oddalają się od siebie[1]. Teoria, którą należy opracować, została już naszkicowana przez autora niniejszej książki.

Jeśli $K(t)$ jest funkcją wystarczająco ciągłą, to można wykazać, że zera wyrażenia

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma) \tag{3.65}$$

mają na mocy twierdzenia M. Kaca prawie zawsze określoną gęstość i że tę gęstość można dowolnie zwiększać dobierając odpowiednio K. Niech K_D będzie dobrane tak, by ta gęstość była równa D. Wówczas ciąg zer wyrażenia $\int_{-\infty}^{\infty} K_D(t+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)$ od $-\infty$ do $+\infty$ oznaczymy przez $Z_n(D, \gamma)$, $-\infty < n < \infty$. W numeracji tych zer, n jest oczywiście określone z dokładnością do stałej całkowitej.

Niech teraz $T(t, \mu)$ będzie dowolnym szeregiem czasowym w zmiennej ciągłej t, a μ parametrem rozkładu szeregu czasowego, zmieniającym się w przedziale (0, 1). Niech

$$T_D(t, \mu, \gamma) = T\left[t - Z_n(D, \gamma), \mu\right], \tag{3.66}$$

---

[1] Jest to własność Koopmana będąca wystarczającym i koniecznym założeniem ergodycznym w mechanice statystycznej.

gdzie Z_n jest zerem poprzedzającym bezpośrednio t. Wykażemy, że dla dowolnego skończonego zbioru wartości $t_1, t_2, \ldots, t_v$ rozkład jednoczesny $T_D(t_q, \mu, \gamma)$ $(k=1, 2, \ldots, v)$ będzie dążył (gdy $D\to\infty$) do rozkładu jednoczesnego $T(t_k, \mu)$ dla tego samego t_k, dla prawie każdej wartości μ. Szereg $T_D(t, \mu, \gamma)$ jest jednak określony w pełni przez t, μ, D oraz $\xi(\tau, \gamma)$. Nie jest zatem drogą niewłaściwą usiłować wyrazić $T_D(t, \mu, \gamma)$ dla zadanych wartości D i μ albo bezpośrednio w postaci wyrażenia (3.46), albo — w taki czy inny sposób — jako szereg czasowy o rozkładzie, który jest granicą (w sensie luźno naszkicowanym wyżej) rozkładów tej postaci.

Należy zauważyć, że przedstawione rozumowanie trzeba traktować raczej jako program badawczy na przyszłość, a nie jako zagadnienie już rozwiązane. Niemniej jednak, w opinii autora, jest to program postępowania rokujący największe nadzieje na racjonalne, poprawne rozwiązanie licznych problemów związanych z nieliniowym przewidywaniem, nieliniowym filtrowaniem, oceną przesyłania informacji w sytuacjach nieliniowych oraz teorią gęstych gazów i turbulencji. Do tej klasy zagadnień należą chyba najbardziej palące problemy telekomunikacji.

Przejdźmy teraz do zagadnień przewidywania szeregu czasowego o postaci takiej, jak w równaniu (3.34). Widzimy, że jedynym niezależnym parametrem statystycznym szeregu czasowego jest $\Phi(t)$ przedstawione w równaniu (3.35), co znaczy, że jedyną znaczącą wielkością związaną z $K(t)$ jest

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(s)\,K(s+t)\,\mathrm{d}s, \tag{3.67}$$

gdzie oczywiście K jest rzeczywiste.

Podstawmy

$$K(s)=\int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)\,\mathrm{e}^{i\omega s}\,\mathrm{d}\omega, \tag{3.68}$$

stosując transformację Fouriera. Znajomość $K(s)$ pozwala określić $k(\omega)$ i odwrotnie. Wówczas

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K(s)\,K(s+\tau)\,\mathrm{d}s=\int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)\,k(-\omega)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\tau}\,\mathrm{d}\omega. \tag{3.69}$$

Znajomość $\Phi(\tau)$ jest więc równoznaczna ze znajomością $k(\omega)\,k(-\omega)$. Ponieważ jednak $K(s)$ jest rzeczywiste, przeto

$$K(s)=\int_{-\infty}^{\infty}\overline{k(\omega)}\,e^{-i\omega s}d\omega. \tag{3.70}$$

Skąd $k(\omega)=-k(\omega)$. Zatem $|k(\omega)|^2$ jest funkcją znaną, co znaczy, że część rzeczywista $\log|k(\omega)|$ jest również funkcją znaną.

Jeśli napiszemy

$$F(\omega)=\mathscr{R}\{\log[k(\omega)]\}, \tag{3.71}$$

to określenie $K(s)$ staje się równoznaczne z określeniem części urojonej $\log|k(\omega)|$. Zagadnienia tego nie daje się rozwiązać, jeśli nie wprowadzi się dalszych ograniczeń na $k(\omega)$. Wprowadźmy ograniczenie: $\log k(s)$ musi być funkcją analityczną wystarczająco wolno rosnącą w funkcji ω w górnej półpłaszczyźnie. Aby to ograniczenie narzucić, założymy, że $k(\omega)$ oraz $[k(\omega)]^{-1}$ rosną algebraicznie na osi rzeczywistej. Wówczas $[F(\omega)]^2$ będzie funkcją parzystą i co najwyżej logarytmicznie nieskończoną. Będzie istniała wartość główna Cauchy'ego

$$G(\omega)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{F(u)}{u-\omega}du. \tag{3.72}$$

Przekształcenie opisane równaniem (3.72), znane jako przekształcenie Hilberta, zmienia $\cos\lambda\omega$ w $\sin\lambda\omega$, a $\sin\lambda\omega$ w $(-\cos\lambda\omega)$. Wówczas $F(\omega)+iG(\omega)$ jest funkcją o postaci

$$\int_0^{\infty}e^{i\lambda\omega}d[M(\lambda)] \tag{3.73}$$

i spełnia wymagane warunki na $\log|k(\omega)|$ w dolnej półpłaszczyźnie. Jeśli teraz podstawimy

$$k(\omega)=\exp[F(\omega)+iG(\omega)], \tag{3.74}$$

to można wykazać, że $k(\omega)$ jest funkcją, która przy bardzo ogólnych warunkach ma tę własność, że $K(s)$ zdefiniowane w równaniu (3.68) staje się zerem dla wszystkich ujemnych argumentów. Tak więc

$$f(t,\gamma)=\int_{-t}^{\infty}K(t+\tau)\,d\xi(\tau,\gamma). \tag{3.75}$$

Z drugiej strony można wykazać, że możemy zapisać $1/k(\omega)$ w postaci

$$\lim_{n\to\infty}\int_0^\infty e^{i\lambda\omega}dN_n(\lambda), \tag{3.76}$$

gdzie wszystkie N_n są właściwie określone oraz że możemy to uczynić tak, by

$$\xi(t,\gamma)=\lim_{n\to\infty}\int_0^\tau dt\int_{-t}^\infty Q_n(t+\sigma)f(\sigma,\gamma)d\sigma, \tag{3.77}$$

przy czym wszystkie Q_n muszą mieć formalną własność

$$f(t,\gamma)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^\infty K(t+\tau)d\tau\int_{-t}^\infty Q_n(t+\sigma)f(\sigma,\gamma)d\sigma. \tag{3.78}$$

Będziemy mieli na ogół

$$\psi(t)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^\infty K(t+\tau)d\tau\int_{-\tau}^\infty Q_n(\tau+\sigma)\psi(\sigma)d\sigma \tag{3.79}$$

albo, jeśli przyjmiemy (jak w równaniu (3.68))

$$\left.\begin{aligned} K(s)&=\int_{-\infty}^\infty k(\omega)e^{i\omega s}d\omega,\\ Q_n(s)&=\int_{-\infty}^\infty q_n(\omega)e^{i\omega s}d\omega,\\ \psi(s)&=\int_{-\infty}^\infty \Psi(\omega)e^{i\omega s}d\omega,\end{aligned}\right\} \tag{3.80}$$

to

$$\Psi(\omega)=\lim_{n\to\infty}(2\pi)^{3/2}\Psi(\omega)q_n(-\omega)k(\omega). \tag{3.81}$$

Wówczas

$$\lim_{n\to\infty}q_n(-\omega)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}k(\omega)}. \tag{3.82}$$

Przekonamy się, że ta zależność jest przydatna przy sprowadzaniu operatora przewidywania do postaci dotyczącej częstotliwości, a nie czasu.

Tak więc przeszłość i teraźniejszość $\xi(t,\gamma)$ lub ściślej – „różniczki" $d\xi(t,\gamma)$ określa przeszłość i teraźniejszość $f(t,\gamma)$ i odwrotnie.

Jeśli $A>0$, to

$$f(t+A,\gamma)=\int_{-t-A}^{\infty} K(t+A+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)=$$

$$=\int_{-t-A}^{-t} K(t+A+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)+\int_{-t}^{\infty} K(t+A+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma). \tag{3.83}$$

Pierwszy człon ostatniej części powyższej równości jest całkowicie niezależny od drugiego członu i zależy od zakresu zmienności $\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)$, o którym znajomość $f(\sigma,\gamma)$, dla $\sigma\leqslant t$ nic nam nie mówi. Jego średni kwadrat wynosi

$$\int_{-t-A}^{t}[K(t+A+\tau)]^2\,\mathrm{d}\tau=\int_{0}^{A}[K(\tau)]^2\,\mathrm{d}\tau \tag{3.84}$$

i to mówi nam wszystko o jego statystycznych własnościach. Można skonstruować rozkład Gaussa o takiej wartości średniego kwadratu. Wyraz ten jest błędem najlepszego możliwego przewidywania funkcji $f(t+A,\gamma)$.

Samo najlepsze możliwe przewidywanie jest ostatnim członem równania (3.83)

$$\int_{-t}^{\infty} K(t+A+\tau)\,\mathrm{d}\xi(\tau,\gamma)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty} K(t+A+\tau)\,\mathrm{d}\tau\int_{-\tau}^{\infty} Q_n(\tau+\sigma)f(\sigma,\gamma)\,\mathrm{d}\sigma. \tag{3.85}$$

Jeśli teraz podstawimy

$$k_A(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\infty} K(t+A)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}\,\mathrm{d}t \tag{3.86}$$

i jeśli zastosujemy operator z równania (3.85) do $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$ otrzymując

$$\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty} K(t+A+\tau)\,\mathrm{d}\tau\int_{-\tau}^{\infty} Q_n(\tau+\sigma)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\sigma}\,\mathrm{d}\sigma=A(\omega)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}, \tag{3.87}$$

to stwierdzimy, że podobnie jak w równaniu (3.81)

$$A(\omega)=\lim_{n\to\infty}(2\pi)^{3/2}q_n(-\omega)\,k_A(\omega)=k_A(\omega)/k(\omega)=$$

$$=\frac{1}{2\pi k(\omega)}\int_{A}^{\infty}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega(t-A)}\,\mathrm{d}t\int_{-\infty}^{\infty}k(u)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}ut}\,\mathrm{d}u. \tag{3.88}$$

Jest to częstotliwościowa postać najlepszego operatora przewidywania.

Problem filtrowania w przypadku szeregów czasowych takich, jak w równaniu (3.34) wiąże się bardzo ściśle z zagadnieniami przewidywania. Niech sygnał zakłócony szumem ma postać

$$m(t)+n(t)=\int_0^{\infty} K(\tau)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma), \tag{3.89}$$

a sam sygnał niech ma postać

$$m(t)=\int_{-\infty}^{\infty} Q(\tau)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma)+\int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau,\delta), \tag{3.90}$$

gdzie γ i δ są niezależnie rozłożone w przedziale (0, 1). Wówczas możliwą do przewidzenia częścią $m(t+a)$ jest oczywiście

$$\int_0^{\infty} Q(\tau+a)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau,\gamma), \tag{3.901}$$

a błąd średni kwadratowy przewidywania wynosi

$$\int_{-\infty}^{a} [Q(\tau)]^2\,\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty} [R(\tau)]^2\,\mathrm{d}\tau. \tag{3.902}$$

Załóżmy, że znamy następujące wielkości:

$$\begin{aligned}
\varphi_{22}(t)&=\int_0^1 \mathrm{d}\gamma \int_0^1 \mathrm{d}\delta\, n(t+\tau)\,n(\tau)=\\
&=\int_{-\infty}^{\infty}[K(|t|+)\tau-Q)(|t|+\tau)]\,[K(\tau)-Q(\tau)]\,\mathrm{d}\tau=\\
&=\int_0^{\infty}[K(|t|+\tau)-Q(|t|+\tau)]\,[K(\tau)-Q(\tau)]\,\mathrm{d}\tau+\\
&\quad+\int_{-|t|}^{0}[K(|t|+\tau)-Q(|t|+\tau)]\,[-Q(\tau)]\,\mathrm{d}\tau+\\
&\quad+\int_{-\infty}^{-|t|} Q(|t|+\tau)\,Q(\tau)\,\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty} R(|t|+\tau)\,R(\tau)\,\mathrm{d}\tau=\\
&=\int_0^{\infty} K(|t|+\tau)\,K(\tau)\,\mathrm{d}\tau-\int_{\infty}^{\infty} K(|t|+\tau)\,Q(\tau)\,\mathrm{d}\tau+\\
&\quad+\int_{-\infty}^{\infty} Q(|t|+\tau)\,Q(\tau)\,\mathrm{d}\tau+\int_{-\infty}^{\infty} R(|t|+\tau)\,R(\tau)\,\mathrm{d}\tau,
\end{aligned} \tag{3.903}$$

$$\varphi_{11}(\tau)=\int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta\, m(|t|+\tau)m(\tau)=$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty} Q(|t|+\tau)Q(\tau)\,d\tau+\int_{-\infty}^{\infty} R(|t|+\tau)R(\tau)\,d\tau, \tag{3.904}$$

$$\varphi_{12}(\tau)=\int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta\, m(t+\tau)n(\tau)=$$

$$=\int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta\, m(t+\tau)[m(\tau)+n(\tau)]-\varphi_{11}(\tau)=$$

$$=\int_0^1 d\gamma \int_{-t}^{\infty} K(\sigma+t)\,d\xi(\tau-\sigma,\gamma)\int_{-t}^{\infty} Q(\tau)\,d\xi(\tau-\sigma,\gamma)-\varphi_{11}(\tau)=$$

$$=\int_{-t}^{\infty} K(t+\tau)Q(\tau)\,d\tau-\varphi_{11}(\tau). \tag{3.905}$$

Transformaty Fouriera tych trzech wielkości wynoszą odpowiednio:

$$\left.\begin{aligned}
\Phi_{22}(\omega)&=|k(\omega)|^2+|q(\omega)|^2-q(\omega)\overline{k(\omega)}-k(\omega)\overline{q(\omega)}+|r(\omega)|^2,\\
\Phi_{11}(\omega)&=|q(\omega)|^2+|r(\omega)|^2,\\
\Phi_{12}(\omega)&=k(\omega)\overline{q(\omega)}-|q(\omega)|^2-|r(\omega)|,
\end{aligned}\right\} \tag{3.906}$$

gdzie

$$\left.\begin{aligned}
k(\omega)&=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K(s)e^{-i\omega s}\,ds,\\
q(\omega)&=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \overline{Q(s)}e^{-i\omega s}\,ds,\\
r(\omega)&=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} R(s)e^{-i\omega s}\,ds.
\end{aligned}\right\} \tag{3.907}$$

Tak więc

$$\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\overline{\Phi_{12}(\omega)}+\overline{\Phi_{22}(\omega)}=|k(\omega)|^2 \tag{3.908}$$

oraz

$$q(\omega)\overline{k(\omega)}=\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega), \tag{3.909}$$

gdzie dla symetrii użyliśmy $\Phi_{21}(\omega)=\overline{\Phi_{12}(\omega)}$. Możemy teraz z równania (3.908) określić $k(\omega)$, podobnie, jak poprzednio określaliśmy $k(\omega)$ na podstawie równania (3.74). Podstawiamy $\Phi(t)$ zamiast $\Phi_{11}(t)+\Phi_{22}(t)+2\mathscr{R}[\Phi_{12}(t)]$. Daje to nam w wyniku

$$q(\omega)=\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}. \tag{3.910}$$

Skąd

$$Q(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}e^{i\omega t}\,d\omega \tag{3.911}$$

i najlepszym określeniem $m(t)$, z najmniejszym błędem kwadratowym średnim, jest

$$\int_0^{\infty}d\xi(t-\tau,\gamma)\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}e^{i\omega(t+\alpha)}\,d\omega. \tag{3.912}$$

Zestawiając ten wynik z równaniem (3.89) i stosując rozumowanie podobne do tego, które doprowadziło nas do otrzymania równania (3.88), spostrzegamy, że operator, którego zastosowanie do $m(t)+n(t)$ daje nam „najlepszą" reprezentację $m(t+a)$ w dziedzinie częstotliwości, ma postać

$$\frac{1}{2\pi k(\omega)}\int_a^{\infty}e^{-i\omega(t-a)}\,dt\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(u)+\Phi_{21}(u)}{\overline{k(u)}}e^{iut}\,du. \tag{3.913}$$

Operator ten jest charakterystycznym operatorem tego, co inżynierowie elektrycy nazywają *filtrem elektrycznym*. Wielkość a jest przesunięciem filtru. Może mieć ono wartość dodatnią lub ujemną. Aparat odpowiadający wyrażeniu (3.913) można zawsze zbudować tak, by jego dokładność odpowiadała naszym życzeniom. Szczegóły jego budowy są potrzebne bardziej specjalistom elektrykom, niż czytelnikom niniejszej książki. Można je znaleźć w innych pracach[1].

[1] Mamy tu na myśli szczególnie ostatnie prace dr Y. W. Lee.

Kwadratowy średni błąd filtrowania można przedstawić jako sumę średniego kwadratu błędu filtrowania dla a równego nieskończoności

$$\int_{-\infty}^{\infty}[R(\tau)]^2\,d\tau=\Phi_{11}(0)-\int_{-\infty}^{\infty}[Q(\tau)]^2\,d\tau=$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{11}(\omega)\,d\omega-\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{\Phi_{11}(\omega)-\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}\right|^2 d\omega=$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\Phi_{11}(\omega)-\frac{|\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)|^2}{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)+\Phi_{22}(\omega)}\right]d\omega=$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\begin{vmatrix}\Phi_{11}(\omega) & \Phi_{12}(\omega)\\ \Phi_{21}(\omega) & \Phi_{22}(\omega)\end{vmatrix}}{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)+\Phi_{22}(\omega)}\,d\omega \tag{3.914}$$

oraz części zależnej od a

$$\int_{-\infty}^{a}[Q(\tau)]^2\,dt=\int_{-\infty}^{a}dt\left|\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}e^{i\omega t}\,d\omega\right|^2. \tag{3.915}$$

Można przekonać się, że średniokwadratowy błąd filtrowania jest monotonicznie malejącą funkcją przesunięcia.

Inne interesujące pytanie, wiążące się z sygnałami i szumami opartymi na ruchach Browna, dotyczy szybkości przekazywania informacji. Rozważmy dla przejrzystości przypadek, gdy sygnał i szum są niekoherentne, to znaczy

$$\Phi_{12}(\omega)\equiv\Phi_{21}(\omega)\equiv 0. \tag{3.916}$$

Rozważmy w tym przypadku

$$\left.\begin{aligned} m(t)&=\int_{-\infty}^{\infty}M(\tau)\,d\xi(t-\tau,\gamma),\\ n(t)&=\int_{-\infty}^{\infty}N(\tau)\,d\xi(t-\tau,\delta),\end{aligned}\right\} \tag{3.917}$$

gdzie γ i δ mają rozkłady niezależne. Załóżmy, że znamy $m(t)+n(t)$ w prze-

dziale $(-A, A)$. Jak wiele mamy informacji o samym sygnale $m(t)$? Na zasadzie rozumowania heurystycznego możemy spodziewać się, że ta ilość informacji nie powinna zbytnio różnić się od ilości informacji dotyczącej

$$\int_{-A}^{A} M(\tau)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau, \gamma), \tag{3.918}$$

którą dysponujemy wówczas, gdy znamy wszystkie wartości wyrażenia

$$\int_{-A}^{A} M(\tau)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau, \gamma) + \int_{-A}^{A} N(\tau)\,\mathrm{d}\xi(t-\tau, \delta), \tag{3.919}$$

gdzie γ i δ mają niezależne rozkłady. Można jednakże wykazać, że n-ty współczynnik rozwinięcia Fouriera dla wyrażenia (3.918) ma rozkład Gaussa, niezależny od wszystkich innych współczynników Fouriera i że jego średnia wartość kwadratowa jest proporcjonalna do

$$\left| \int_{-A}^{A} M(\tau) \exp\left(\mathrm{i}\frac{\pi n \tau}{A}\right) \mathrm{d}\tau \right|^2. \tag{3.920}$$

Tak więc, na mocy równania (3.09), całkowita ilość dostępnej dla nas informacji dotyczącej M jest równa

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \log_2 \frac{\left| \int_{-A}^{A} M(\tau) \exp\left(\mathrm{i}\frac{\pi n \tau}{A}\right) \mathrm{d}\tau \right|^2 + \left| \int_{-A}^{A} N(\tau) \exp\left(\mathrm{i}\frac{\pi n \tau}{A}\right) \mathrm{d}\tau \right|^2}{\left| \int_{-A}^{A} N(\tau) \exp\left(\mathrm{i}\frac{\pi n \tau}{A}\right) \mathrm{d}\tau \right|^2}, \tag{3.921}$$

a czasowa gęstość przekazywania energii jest równa tej wielkości podzielonej przez $2A$. Jeśli teraz $A \to \infty$, to wyrażenie (3.921) dąży do

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}u \log_2 \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} M(\tau) \exp \mathrm{i}u\tau\,\mathrm{d}\tau \right|^2 + \left| \int_{-\infty}^{\infty} N(\tau) \exp \mathrm{i}u\tau\,\mathrm{d}\tau \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} N(\tau) \exp \mathrm{i}u\tau\,\mathrm{d}\tau \right|^2}. \tag{3.922}$$

Ten właśnie wynik otrzymali autor niniejszej książki i Shannon jako wzór na szybkość przesyłania informacji w opisanym przypadku. Jak się przekonamy, zależy ona nie tylko od szerokości pasma częstotliwości zastosowanego do przekazywania informacji, ale również od poziomu szumu. W istocie rzeczy, występuje tu ścisły związek z audiogramami stosowanymi przy pomiarach słuchu i stopnia upośledzenia słuchu różnych osób. Odciętą jest tu częstotliwość, rzędną dolnej granicy jest logarytm natężenia progu słyszalności (który możemy uważać za natężenie własnego szumu układu odbiorczego), a górnej granicy — logarytm natężenia najsilniejszego sygnału, na jaki układ jest przygotowany. Obszar między nimi, którego rozmiar podaje wyrażenie (3.922), uważa się za miarę szybkości przekazywania informacji, z którą może poradzić sobie badane ucho.

Teoria sygnałów zależnych liniowo od ruchu Browna ma wiele ważnych odmian. Jej podstawowymi wzorami są równania (3.88) i (3.914) oraz wyrażenie (3.922) oczywiście łącznie z definicjami niezbędnymi dla ich właściwej interpretacji. Istnieje kilka odmian tej teorii. Pierwsza z nich daje wskazówki do projektowania najlepszych z możliwych układów przewidujących i filtrów elektrycznych w przypadkach, gdy sygnały i szumy reprezentują odpowiedź liniowych rezonatorów na ruchy Browna. W przypadkach bardziej ogólnych, wyniki tej teorii dają podstawy do projektowania przynajmniej znośnych filtrów i układów przewidujących. Nie będą to rozwiązania najlepsze w sensie bezwzględnym, pozwolą jednak na zmniejszenie średniokwadratowego błędu przewidywania i filtrowania tak dalece, jak tylko jest to możliwe w urządzeniach działających liniowo. Niemniej jednak będą istniały urządzenia nieliniowe, mające sprawność lepszą niż dowolny układ liniowy.

Po drugie zauważmy, że zajmowaliśmy się wyżej prostymi szeregami czasowymi, w których od czasu zależy pojedyncza zmienna numeryczna. Istnieją również złożone szeregi czasowe, w przypadku których większa liczba takich zmiennych jednocześnie zależy od czasu. One właśnie mają największe znaczenie w ekonomice, meteorologii i innych podobnych dziedzinach. Taki szereg stanowi na przykład kompletna mapa pogody Stanów Zjednoczonych, obserwowana dzień po dniu. W tym przypadku musimy wyrazić pewną liczbę funkcji jednocześnie w postaci zależnej od częstotliwości, a wielkości takie, jak występujące w równaniu (3.35)

oraz wartości $|k(\omega)|^2$ dla argumentów wynikających z równania (3.70) zastąpić uporządkowanymi zbiorami par, czyli macierzami. Problem wyznaczania $k(\omega)$ w zależności od $|k(\omega)|^2$ tak, by były spełnione pewne dodatkowe warunki na płaszczyźnie zespolonej staje się znacznie trudniejszy szczególnie dlatego, że mnożenie macierzy nie jest operacją przemienną. Niemniej jednak problemy wiążące się z taką teorią wielowymiarowych szeregów czasowych zostały już rozwiązane, przynajmniej częściowo, przez Kreina i autora niniejszej książki.

Teoria wielowymiarowych szeregów czasowych stanowi komplikację teorii przedstawionej wyżej. Istnieje jednak inna, ściśle z nią związana teoria, która stanowi jej uproszczenie. Jest to teoria przewidywania, filtrowania i ilości informacji dyskretnych szeregów czasowych. Szereg taki jest ciągiem funkcji $f_n(\alpha)$ o parametrze α, gdzie n przebiega zbiór wszystkich liczb całkowitych od $-\infty$ do ∞. Wielkość α jest podobnie jak poprzednio parametrem rozkładu i można przyjąć, że przebiega przedział (0, 1). Mówimy, że szereg czasowy jest w stanie statystycznej równowagi, jeśli zmiana n na $n+\nu$ (ν — liczba całkowita) jest równoważna zachowującemu miarę przekształceniu w siebie przedziału (0, 1), przebieganego przez parametr α.

Teoria dyskretnych szeregów czasowych jest pod wieloma względami prostsza niż teoria szeregów ciągłych. O wiele łatwiej jest na przykład sprawić, by dyskretny szereg czasowy był ciągiem niezależnych od siebie decyzji. Każdy człon (w przypadku przemieszania) da się przedstawić jako kombinacja członów poprzednich i wielkości od poprzednich członów niezależnej, mającej równomierny rozkład w przedziale (0, 1), a ciągiem tych niezależnych czynników można zastąpić ruch Browna, który był tak ważny w przypadku szeregów ciągłych.

Jeśli $f_n(\alpha)$ jest szeregiem czasowym w stanie statystycznej równowagi i jest metrycznie tranzytywny, to jego współczynnik autokorelacji wynosi

$$\varphi_m = \int_0^1 f_m(\alpha) f_0(\alpha)\, d\alpha \tag{3.923}$$

i dla prawie wszystkich α

$$\varphi_m = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N+1} \sum_0^N f_{k+m}(\alpha) f_k(\alpha) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N+1} \sum_0^N f_{-k+m}(\alpha) f_{-k}(\alpha). \tag{3.924}$$

Podstawmy

$$\varphi_n=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\Phi(\omega)\,e^{in\omega}\,d\omega \tag{3.925}$$

lub

$$\Phi(\omega)=\sum_{-\infty}^{\infty}\varphi_n e^{-in\omega}. \tag{3.926}$$

Niech

$$\frac{1}{2}\log\Phi(\omega)=\sum_{-\infty}^{\infty}p_n\cos n\omega \tag{3.927}$$

i niech

$$G(\omega)=\frac{p_0}{2}+\sum_{1}^{\infty}p_n e^{in\omega}. \tag{3.928}$$

Niech

$$e^{G(\omega)}=k(\omega). \tag{3.929}$$

Wówczas, w bardzo ogólnych warunkach, $k(\omega)$ będzie wartością graniczną w kole jednostkowym dla funkcji bez zer lub punktów osobliwych wewnątrz koła jednostkowego, jeśli ω jest kątem. Będziemy mieli

$$|k(\omega)|^2=\Phi(\omega). \tag{3.930}$$

Jeśli teraz za najlepsze liniowe przewidywanie $f_n(\alpha)$ z wyprzedzeniem ν przyjmiemy

$$\sum_{0}^{\infty}f_{n-\nu}(\alpha)\,W_\nu, \tag{3.931}$$

to stwierdzimy, że

$$\sum_{0}^{\infty}W_\mu e^{i\mu\omega}=\frac{1}{2\pi k(\omega)}\sum_{\mu=\nu}^{\infty}e^{i\omega(\mu-\nu)}\int_{-\pi}^{\pi}k(u)\,e^{-i\mu u}\,du. \tag{3.932}$$

Zależność ta stanowi odpowiednik równania (3.88). Zauważmy, że jeśli podstawimy

$$k_\mu=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}k(u)\,e^{-i\mu u}\,du, \tag{3.933}$$

to wówczas

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\nu\omega} \frac{\sum_\nu^\infty k_\mu e^{i\mu\omega}}{\sum_0^\infty k_\mu e^{i\mu\omega}} = e^{-i\nu\omega} \left[1 - \frac{\sum_0^{\nu-1} k_\mu e^{i\mu\omega}}{\sum_0^\infty k_\mu e^{i\mu\omega}} \right]. \tag{3.934}$$

Ze sposobu tworzenia $k(\omega)$ wynika jasno, że dla bardzo ogólnego zbioru przypadków możemy przyjąć, że

$$\frac{1}{k(\omega)} = \sum_0^\infty q_\mu e^{i\mu\omega}. \tag{3.935}$$

Wówczas równanie (3.934) przyjmuje postać

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\nu\omega}\left(1 - \sum_0^{\nu-1} k_\mu e^{i\mu\omega} \sum_0^\infty q_\lambda e^{i\lambda\omega}\right). \tag{3.936}$$

Wtedy gdy $\nu = 1$

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\omega}\left(1 - k_0 \sum_0^\infty q_\lambda e^{i\lambda\omega}\right) \tag{3.937}$$

lub

$$W_\mu = -q_{\lambda+1} k_0. \tag{3.938}$$

Tak więc przy przewidywaniu o jeden krok naprzód, najlepszą wartością $f_{n+1}(\alpha)$ jest

$$-k_0 \sum_0^\infty q_{\lambda+1} f_{n-\lambda}(\alpha) \tag{3.939}$$

i stosując metodę przewidywania krok po kroku możemy rozwiązać cały problem liniowego przewidywania dyskretnego szeregu czasowego. Podobnie, jak w przypadku ciągłym, będzie to przewidywanie bezwzględnie najlepsze z możliwych, jeśli

$$f_n(\alpha) = \int_{-\infty}^\infty K(n-\tau)\, d\xi(\tau, \alpha). \tag{3.940}$$

Przeniesienie problemu filtrowania z przypadku ciągłego na dyskretny wymaga bardzo podobnego toku rozumowania. Wzór (3.913) podający

częstotliwościową charakterystykę najlepszego filtru przyjmuje postać

$$\frac{1}{2\pi k(\omega)} \sum_{\nu=a}^{\infty} e^{-i\omega(\nu-a)} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[\Phi_{11}(u)+\Phi_{21}(u)]e^{iu\nu}}{\overline{k(u)}} du, \tag{3.941}$$

przy czym wszystkie wyrazy są zdefiniowane tak samo, jak w przypadku ciągłym z tym wyjątkiem, że wszystkie wartości całkowite ω lub u pochodzą z przedziału $(-\pi, \pi)$ zamiast z przedziału $(-\infty, \infty)$, a dyskretne sumowanie po ν zastępuje całkowanie po t. Filtry dla dyskretnych szeregów czasowych nie są zazwyczaj fizycznie istniejącymi urządzeniami, współpracującymi z obwodami elektrycznymi. Są one raczej matematycznymi procedurami, które umożliwiają statystykom otrzymanie najlepszych rezultatów z nienajlepszych danych.

Na koniec, wzór na szybkość przenoszenia informacji przez dyskretny szereg czasowy o postaci

$$\int_{-\infty}^{\infty} M(n-\tau)\, d\xi(\tau, \gamma), \tag{3.942}$$

w obecności szumu

$$\int_{-\infty}^{\infty} N(n-\tau)\, d\xi(\tau, \delta), \tag{3.943}$$

gdzie γ i δ są niezależne, będzie dokładnym odpowiednikiem wyrażenia (3.922), a mianowicie przyjmie postać

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} du \log_2 \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau) e^{iu\tau} d\tau\right|^2 + \left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau) e^{iu\tau} d\tau\right|^2}{\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau) e^{iu\tau} d\tau\right|^2}, \tag{3.944}$$

gdzie w przedziale $(-\pi, \pi)$ wartość

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau) e^{iu\tau} d\tau\right|^2 \tag{3.945}$$

reprezentuje widmo mocy sygnału, a wartość

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau) e^{iu\tau} d\tau\right|^2 \tag{3.946}$$

reprezentuje widmo mocy szumu.

W przedstawionych wyżej teoriach statystycznych zakładaliśmy, że dysponujemy pełną wiedzą o przeszłości obserwowanego szeregu czasowego. W każdym konkretnym przypadku musimy jednak zadowolić się mniejszą wiedzą, ponieważ nie możemy objąć obserwacją nieskończenie odległej przeszłości. Posunięcie naszej teorii poza ten punkt, czyli stworzenie praktycznej teorii statystycznej, wymaga rozszerzenia istniejących metod próbkowania. Autor niniejszej książki i inni badacze uczynili już pierwszy krok w tym kierunku. Prace na ten temat wymagają rozpatrzenia wszystkich szczegółów wiążących się ze stosowaniem prawa Bayesa lub tych terminologicznych sztuczek teorii wiarygodności[1], które pozwalają na pozór uniknąć stosowania prawa Bayesa, lecz w istocie przerzucają tylko odpowiedzialność za jego stosowanie na statystyka, prowadzącego praktyczne obliczenia lub na osobę, która w ostatecznym rozrachunku wykorzystuje otrzymane przez niego wyniki. Jak dotąd, statystyk zajmujący się teorią może w każdym razie stwierdzić dość szczerze, że nie powiedział niczego, co nie byłoby dokładnie ścisłe i niepodważalne.

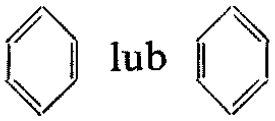
Niniejszy rozdział powinien zakończyć się rozważaniami na temat współczesnej mechaniki kwantowej. Tu bowiem mamy do czynienia z najbardziej intensywną inwazją teorii szeregów czasowych na tereny współczesnej fizyki. W fizyce Newtona ciąg zjawisk fizycznych jest w pełni zdeterminowany przez swą przeszłość, a w szczególności — przez wszystkie położenia i pędy w każdej z chwil. W ramach pełnej teorii Gibbsa pozostaje wciąż prawdą, że przy doskonałym określeniu złożonego szeregu czasowego opisującego całe otoczenie, znajomość wszystkich położeń i momentów w każdej z chwil pozwala na określenie całej przyszłości układu. Dzieje się tak tylko dlatego, że pomijane, nie objęte obserwacją współrzędne i momenty powodują, że występujące w praktyce szeregi czasowe wykazują właściwość przemieszania, z którą zapoznaliśmy się wyżej przy okazji rozważań o szeregach czasowych pochodzących od ruchów Browna. Wielką zasługą Heisenberga dla fizyki było zastąpienie quasi-newtonowskiego świata Gibbsa takim modelem rzeczywistości, w którym szeregu czasowego nie można przedstawić w postaci zespołu elementarnych zmian w czasie, mających charakter deterministyczny. W mechanice kwantowej cała przeszłość układu nie determinuje w bez-

[1] Patrz prace R. A. Fishera i J. von Neumanna.

względny sposób jego przyszłości, a jedynie określa rozkład „możliwych przyszłości" układu. Wielkości, których znajomość jest w fizyce klasycznej warunkiem znajomości całego zachowania się układu, nie dają się ściśle zaobserwować jednocześnie, jedynie w sposób luźny i przybliżony. Niemniej jednak ten przybliżony sposób obserwacji jest z punktu widzenia potrzeb fizyki klasycznej wystarczająco precyzyjny *w tym zakresie dokładności, w którym jest tam praktycznie potrzebny*. Warunki wymagane przy pomiarze pędu i położenia są ze sobą sprzeczne. Aby określić z odpowiednio wysoką dokładnością położenie układu, musimy obserwować układ przy pomocy fal świetlnych, elektronowych lub innych środków o wysokiej zdolności rozdzielczej lub o małej długości fali. Tymczasem oddziaływanie światła na cząstkę zależy jedynie od częstotliwości fali świetlnej, zatem oświetlenie ciała światłem o wielkiej częstotliwości oznacza wywołanie zmiany jego pędu, rosnącej wraz z częstotliwością. Z drugiej strony, fale świetlne o małej częstotliwości dają wprawdzie najmniejszą zmianę pędów oświetlonych cząstek, ale jednocześnie mają zbyt małą zdolność rozdzielczą, by można było przy ich użyciu ściśle określić położenia. Zastosowanie pośrednich częstotliwości prowadzi do zmniejszenia dokładności pomiaru zarówno położeń, jak pędów. Ogólnie mówiąc, nie istnieje taki zbiór obserwacji, który mógłby nam dać o przeszłości układu informację wystarczająco wielką na to, byśmy mogli odczytać z niej kompletną informację o jego przyszłości.

Niemniej jednak, tak jak w przypadku złożonych szeregów czasowych, daje się tu zastosować przedstawiona wyżej teoria ilości informacji i wynikająca stąd teoria entropii. Ponieważ jednak mamy teraz do czynienia z szeregami czasowymi mającymi własność przemieszania nawet wówczas, gdy dysponujemy danymi możliwie pełnymi, możemy stwierdzić, że nasz układ nie ma narzuconych jakichś bezwzględnie obowiązujących ograniczeń, że w miarę upływu czasu każdy stan układu może (i istotnie będzie) przekształcać się w inny stan. Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia zależy w długim okresie czasu od względnego prawdopodobieństwa czyli miary tych dwóch stanów. Okazuje się, że to prawdopodobieństwo jest szczególnie wysokie dla tych stanów, które są przekształcone w siebie przez wielką liczbę przekształceń, czyli używając języka teorii kwantów, dla tych stanów, które mają silny rezonans wewnętrzny lub silną degenerację kwantową. Pierścień benzenowy jest przykładem takiego układu,

ponieważ dwa jego stany są równoważne. Pozwala to przypuszczać, że w układzie takim, jak



którego poszczególne „cegiełki" mogą łączyć się ze sobą na różne sposoby (jak wówczas, gdy mieszanina aminokwasów organizuje się w łańcuchy białkowe), sytuacja, w której występuje wiele podobnych do siebie łańcuchów łączących się ściśle ze sobą może być bardziej stabilna, niż sytuacja, w której łańcuchy są od siebie różne. Haldane zasugerował, że może być to metoda, za pomocą której reprodukują się geny i wirusy i jakkolwiek nie podtrzymał on stanowczo tej sugestii, to jednak nie widzę powodu, by nie przyjąć jej za próbną hipotezę. Jak podkreślił sam Haldane, w teorii kwantów żadna pojedyncza cząstka nie ma ostro wyróżnionej indywidualności, przeto nie można w tym przypadku orzec z zupełną pewnością, który z dwóch egzemplarzy genów powstałych w takim procesie reprodukcji jest wzorcem, a który – kopią.

Wiadomo, że to samo zjawisko degeneracji kwantowej występuje bardzo często w materii żywej. Szent-Gÿorgyi wysunął przypuszczenie, że jest ono ważne dla procesu skurczu mięśnia. Substancje o silnej degeneracji mają na ogół ogromną zdolność przechowywania zarówno energii, jak informacji, a takie przechowywanie z pewnością przy skurczu mięśnia występuje.

Te same zjawiska, które biorą udział w reprodukcji materii mają prawdopodobnie wpływ na niezwykłą specyficzność substancji chemicznych występujących w żywym organizmie, specyficzność różniącą między sobą nie tylko gatunki, lecz nawet osobniki tego samego gatunku. Rozważania takie mogą być bardzo ważne dla immunologii.

IV

SPRZĘŻENIE ZWROTNE I DRGANIA

Do kliniki neurologicznej przybywa pacjent. Nie jest on sparaliżowany i może na polecenie poruszać kończynami. Niemniej jednak jest ciężko upośledzony. Chodzi szczególnym, niepewnym krokiem, z oczami utkwionymi w ziemię i we własne nogi. Każdy krok rozpoczyna jakby kopnięciem, wyrzucając kończynę w przód. Jeśli zasłonić mu oczy, nie może utrzymać się na nogach i zatacza się. Co mu jest?

Przybywa inny pacjent. Dopóki siedzi spokojnie na fotelu, wydaje się, że nic mu nie dolega. Jeśli jednak poczęstujemy go papierosem, to wyciągnie rękę zbyt daleko poza papieros i będzie usiłował go uchwycić. Po tym ruchu nastąpi równie bezskuteczny ruch w przeciwnym kierunku, po nim kolejne wahnięcie w przód, aż wreszcie ruch zamieni się w gwałtowne i nie prowadzące do celu oscylacje. Dajmy mu szklankę wody, a wyleje ją w czasie takich drgań, zanim zdąży zbliżyć ją do ust. Co mu jest?

U obu pacjentów występuje w tej, czy innej formie objaw zwany *ataksją*. Ich mięśnie są dostatecznie silne i zdrowe, jednakże nie potrafią oni zorganizować działania tych mięśni. Pierwszy pacjent cierpi na *tabes dorsalis*. Część jego rdzenia kręgowego, która zazwyczaj odbiera wrażenia, została uszkodzona lub zniszczona przez późne następstwa kiły. Przychodzące sygnały są osłabione, jeśli nie zaniknęły w ogóle. Znajdujące się w stawach, ścięgnach, mięśniach i podeszwach jego stóp receptory, które zazwyczaj sygnalizują o położeniu i stanie ruchu kończyny, obecnie nie wysyłają sygnałów, które centralny układ nerwowy mógłby wychwycić i przekazać. Chcąc otrzymać informację o postawie swego ciała pacjent musi zdać się na swój wzrok i narząd równowagi znajdujący się w uchu wewnętrznym. W żargonie

fizjologów mówi się, że pacjent utracił ważną część zmysłu kinestetycznego, czyli proprioceptywnego.

U drugiego pacjenta nie stwierdzamy żadnego upośledzenia zmysłu kinestetycznego. Uszkodzenie jest umiejscowione gdzie indziej: w móżdżku, a opisany objaw jest nazywany drżeniem móżdżkowym lub zamiarowym. Wydaje się, że jedno z zadań móżdżku polega na dostosowywaniu odpowiedzi mięśni do sygnałów proprioceptorowych i drżenie może być jedną z konsekwencji zakłócenia tej zdolności.

Widzimy zatem, że dla sprawnego funkcjonowania w otaczającym nas świecie nie wystarcza posiadanie dobrych efektorów. Działanie tych efektorów musi być również we właściwy sposób sygnalizowane z powrotem ośrodkowemu układowi nerwowemu, a sygnały te muszą być we właściwy sposób kojarzone z innymi informacjami przychodzącymi z narządów zmysłów, po to, by mógł być wyprodukowany właściwy, odpowiednio dostosowany, nowy sygnał dla efektorów. Z czymś podobnym mamy do czynienia w układach mechanicznych. Weźmy za przykład nastawnię kolejową. Dyżurny ruchu ma do dyspozycji pewną liczbę dźwigni włączających i wyłączających sygnały i ustawiających położenie zwrotnic. Nie może on jednak zakładać ślepo, że sygnały i zwrotnice zachowują się zgodnie z jego rozkazami. Może się zdarzyć, że zwrotnice zamarzną lub ciężar śniegu unieruchomi ramię semafora, a wtedy to, co uważa on za rzeczywisty stan zwrotnic i sygnałów jego układów wykonawczych, czyli efektorów, nie będzie odpowiadało wydanym poprzednio rozkazom. Aby uchronić nas przed tym niebezpieczeństwem, każdy efektor, zwrotnica czy semafor, jest połączony zwrotnie z nastawnią poprzez urządzenie kontrolne sygnalizujące dyżurnemu rzeczywisty stan. Jest to mechaniczny odpowiednik obowiązującej w marynarce zasady powtarzania rozkazów. Zgodnie z przepisami każdy podwładny po odebraniu rozkazu musi powtórzyć go przełożonemu, aby pokazać, że usłyszał i zrozumiał ten rozkaz. Dyżurny musi uwzględnić w swym działaniu takie „powtórzenia".

Zauważmy, że w opisanym układzie jednym z ogniw łańcucha obiegu informacji (który będziemy nazywali od tej chwili pętlą sprzężenia zwrotnego) jest człowiek. Nie ma on zupełnej swobody postępowania. System zwrotnic i sygnałów zaopatrzony jest w blokadę mechaniczną lub elektryczną tak, że dyżurny ruchu nie może ustawić pewnych kombinacji grożących szczególnym niebezpieczeństwem. Istnieją jednak również i takie układy ze sprzę-

żeniem zwrotnym, w których człowiek w ogóle nie bierze udziału. Jednym z nich jest zwyczajny termostat, stosowany do regulacji lokalnego ogrzewania mieszkania. Ustawia się go na wymaganą temperaturę i jeśli temperatura w mieszkaniu spadnie poniżej tego poziomu, to zostaje uruchomione urządzenie otwierające zasuwę w kominie lub zwiększające dopływ płynnego paliwa do pieca, dzięki czemu temperatura podnosi się do żądanej wysokości. Jeśli natomiast temperatura przewyższa założony poziom, zasuwa zamyka się lub zmniejsza się (czy całkiem wyłącza) dopływ ropy. W ten sposób temperatura mieszkania utrzymuje się na poziomie w przybliżeniu stałym. Zauważmy, że stałość tego poziomu zależy od jakości termostatu. Źle zbudowany termostat może sprawić, że temperatura będzie podlegać gwałtownym wahaniom, zbliżonym charakterem do ruchów człowieka cierpiącego na drżenie zamiarowe.

Innym przykładem całkowicie mechanicznego urządzenia ze sprzężeniem zwrotnym jest regulator z maszyny parowej — ten właśnie *governor*, którym zajmował się Clark Maxwell — służący do regulacji szybkości obrotów przy zmiennym obciążeniu. W swej pierwotnej postaci, zaprojektowanej przez Watta, składa się on z dwóch kulek, zamocowanych na wahliwych prętach z dwóch stron wału napędowego. Kulki ciążą w dół pod wpływem własnego ciężaru lub sprężyny, a są podnoszone w górę przez siłę odśrodkową zależną od kątowej prędkości obrotów wału. W rezultacie działania tych sił przyjmują one położenie pośrednie również zależne od kątowej prędkości wału. Położenie to jest przenoszone przez inne dźwignie na kołnierz umieszczony na wale, a ten z kolei jest połączony z dźwignią, która otwiera zawór wlotowy cylindra wówczas, gdy maszyna zwalnia bieg i kulki opadają w dół, a zamyka go wówczas, gdy maszyna przyspiesza i kulki odchylają się w górę. Zauważmy, że sprzężenie zwrotne stara się sprzeciwiać temu, co układ właśnie czyni, jest zatem sprzężeniem zwrotnym ujemnym.

Poznaliśmy układ ujemnego sprzężenia zwrotnego do stabilizacji temperatury i ujemnego sprzężenia zwrotnego do stabilizacji prędkości. Istnieją również ujemne sprzężenia zwrotne do stabilizacji położenia, jak sprzężenie zastosowane w przypadku okrętowego urządzenia sterowego, gdzie kątowa różnica między położeniami koła sterowego i steru oddziaływa zawsze tak, by sprowadzić położenie steru do zgodności z położeniem koła. Taki sam charakter ma sprzężenie zwrotne czynności zamiarowych. Ruchów

pewnych mięśni nie wywołujemy świadomie, w istocie nie wiemy nawet, które mięśnie należy poruszać, aby osiągnąć zamierzony cel; chcemy tylko — powiedzmy — wziąć papierosa. Nasz ruch jest regulowany przez pewną wielkość, zależną od tego, o ile ruch ten różni się od zamierzonego.

Informacja podawana zwrotnie do centrum sterującego usiłuje zapobiec odchyleniu się wielkości sterowanej od sterującej, jednak jej zależność od tego odchylenia może być bardzo różnorakiego rodzaju. Najprostsze układy sterowania są liniowe. Wyjście układu wykonawczego (efektora) jest tam związane z jego wejściem zależnością liniową i kiedy zwiększamy sygnał wejściowy zwiększamy również sygnał (lub efekt) wyjściowy. Wyjście jest rejestrowane przez pewien, również liniowy, aparat. Zarejestrowany w ten sposób wynik odejmuje się po prostu od sygnału wejściowego. Chcielibyśmy podać dokładną teorię opisującą zachowanie się takiego urządzenia, zwłaszcza — jego błędne zachowanie się oraz warunki, w jakich wpada ono w drgania w przypadku niewłaściwego użycia lub przeciążenia.

W niniejszej książce unikaliśmy w miarę możliwości symboliki matematycznej i matematycznych metod, jakkolwiek w pewnych momentach, szczególnie w poprzednim rozdziale, byliśmy zmuszeni do odstąpienia od tej zasady. W dalszej części bieżącego rozdziału będziemy mieli również do czynienia z zagadnieniami, dla których wyrażenia najodpowiedniejszym językiem jest język symboli matematycznych. Moglibyśmy tego uniknąć jedynie stosując długie omówienia, prawie nieczytelne dla laika, a dla czytelnika oswojonego z matematyką czytelne tylko dlatego, że potrafiłby on przełożyć je właśnie na język matematycznych symboli. Najlepszym kompromisem, na jaki możemy się zdecydować jest uzupełnianie symboliki obszernymi wyjaśnieniami słownymi.

Niech $f(t)$ będzie funkcją czasu t, który przebiega od $-\infty$ do $+\infty$, to znaczy, niech $f(t)$ będzie wielkością przyjmującą wartość liczbową dla każdego czasu t. W każdej chwili t są dla nas dostępne wielkości $f(s)$ dla s mniejszych lub równych t, lecz nie dla s większych od t. Istnieją urządzenia, elektryczne lub mechaniczne, które opóźniają sygnał wejściowy o ustalony czas. Dają one w przypadku sygnału wejściowego $f(t)$ sygnał wyjściowy $f(t-\tau)$, gdzie τ jest właśnie ustalonym opóźnieniem.

Możemy zestawić ze sobą kilka urządzeń tego rodzaju, produkujących sygnały wyjściowe $f(t-\tau_1), f(t-\tau_2), \ldots, f(t-\tau_n)$. Każdy z tych sygnałów

wyjściowych możemy pomnożyć przez ustalone dodatnie lub ujemne wielkości. Do mnożenia napięcia przez stałą liczbę dodatnią mniejszą od 1 możemy użyć na przykład potencjometru, a nie jest zbyt trudną rzeczą opracować automatyczne urządzenia równoważące i wzmacniacze, mnożące napięcie przez stałą ujemną lub większą od 1. Nie jest również trudno zbudować proste obwody elektryczne, które dodawałyby napięcia w sposób ciągły i przy pomocy których moglibyśmy otrzymać sygnał wyjściowy o postaci

$$\sum_{1}^{n} a_k f(t-\tau_k). \tag{4.01}$$

Zwiększając liczbę opóźnień τ_k i dobierając odpowiednio współczynniki a_k możemy z dowolnie dokładnym przybliżeniem otrzymać sygnał wyjściowy o postaci

$$\int_{0}^{\infty} a(\tau) f(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau. \tag{4.02}$$

Ważną jest rzeczą zdać sobie sprawę z tego, że w powyższym wyrażeniu całkujemy w przedziale od 0 do ∞, a nie od $-\infty$ do $+\infty$. Gdyby tak nie było, moglibyśmy dzięki zastosowaniu do wyniku całkowania różnych, istniejących w praktyce urządzeń otrzymać $f(t+\sigma)$, gdzie σ jest dodatnie. Oznacza to jednak znajomość przyszłości $f(t)$, a tymczasem $f(t)$ może być wielkością, która podobnie jak współrzędne położenia tramwaju mogącego skręcić na skrzyżowaniu w lewo lub prawo nie jest determinowana przez swą przeszłość. Jeżeli *wydaje się*, że fizyczny proces daje nam operator, zamieniający $f(t)$ na

$$\int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) f(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau, \tag{4.03}$$

przy czym $a(\tau)$ nie znika dla ujemnych wartości τ, to oznacza to, że przestajemy mieć do czynienia z prawdziwym operatorem na $f(t)$, określonym jednoznacznie przez jej przeszłość. Istnieją fizyczne przypadki, w których może się to zdarzyć. Układ dynamiczny bez sygnału wejściowego może na przykład wpaść w trwałe drgania lub nawet drgania o nieokreślonej amplitudzie, rosnące do nieskończoności. W takim przypadku przeszłość układu nie determinuje jego przyszłości i możemy znaleźć taki formalizm, który sugerowałby na pozór zależność operatora od przyszłości.

Operacja, dzięki której otrzymujemy wyrażenie (4.02) z $f(t)$ ma dalsze dwie następujące ważne własności:

1) jest niezależna od przesunięcia początku osi czasu;

2) jest liniowa.

Pierwszą własność można wyrazić następująco: jeśli

$$g(t)=\int_0^\infty \alpha(\tau) f(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau, \tag{4.04}$$

to wówczas

$$g(t+\sigma)=\int_0^\infty \alpha(\tau) f(t+\sigma-\tau)\,\mathrm{d}\tau. \tag{4.05}$$

Drugą własność można zapisać w formie następującego stwierdzenia: jeśli

$$g(t)=A f_1(t)+B f_2(t), \tag{4.06}$$

to

$$\int_0^\infty a(\tau) g(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau = A\int_0^\infty a(\tau) f_1(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau + B\int_0^\infty a(\tau) f_2(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau. \tag{4.07}$$

Można wykazać, że w odpowiednim sensie *każdy operator działający na przeszłości $f(t)$, liniowy i niezmienniczy względem przesunięcia początku osi czasu, ma albo postać wyrażenia* (4.02), *albo jest granicą ciągu operatorów tej postaci.* Na przykład $f'(t)$ jest wynikiem zastosowania operatora o tych własnościach do $f(t)$ i

$$f'(t)=\lim_{\varepsilon\to 0}\int_0^\infty \frac{1}{\varepsilon^2} a\left(\frac{\tau}{\varepsilon}\right) f(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau, \tag{4.08}$$

gdzie

$$a(x)=\begin{cases} 1 & 0\leqslant x<1,\\ -1 & 1\leqslant x<2,\\ 0 & 2\leqslant x. \end{cases} \tag{4.09}$$

Jak przekonaliśmy się poprzednio, funkcje e^{zt} są z punktu widzenia operatora (4.02) szczególnie ważnymi funkcjami $f(t)$, ponieważ

$$\mathrm{e}^{z(t-\tau)}=\mathrm{e}^{zt}\cdot\mathrm{e}^{-z\tau} \tag{4.10}$$

i operator opóźnienia staje się po prostu mnożnikiem zależnym od z.

Operator (4.02) przyjmuje wówczas postać:

$$e^{zt}\int_0^\infty a(\tau)e^{-z\tau}d\tau \tag{4.11}$$

i jest również operatorem mnożenia zależnym wyłącznie od z. Mówimy, że wyrażenie

$$\int_0^\infty a(\tau)e^{-z\tau}d\tau=A(z) \tag{4.12}$$

stanowi *przedstawienie operatora* (4.02) *jako funkcji częstotliwości.* Jeśli z jest zespolone, tzn. $z=x+iy$, gdzie x i y są rzeczywiste, to powyższe wyrażenie przyjmuje postać

$$\int_0^\infty a(\tau)e^{-x\tau}e^{-iy\tau}d\tau\,. \tag{4.13}$$

Stąd, na mocy dobrze znanej nierówności Schwarza, jeśli $y>0$ oraz

$$\int_0^\infty |a(\tau)|^2\,d\tau<\infty\,, \tag{4.14}$$

otrzymujemy

$$|A(x+iy)|\leqslant\Big[\int_0^\infty |a(\tau)|^2\,d\tau\int_0^\infty e^{-2x\tau}d\tau\Big]^{\frac{1}{2}}=\left[\frac{1}{2x}\int_0^\infty |a(\tau)|^2\,d\tau\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{4.15}$$

Znaczy to, że $A(x+iy)$ jest ograniczoną funkcją holomorficzną zmiennej zespolonej w każdej półpłaszczyźnie $x\geqslant\varepsilon>0$ i że funkcja $A(iy)$ reprezentuje w pewnym bardzo określonym sensie wartości graniczne takiej funkcji.

Podstawmy

$$u+iv=A(x+iy)\,, \tag{4.16}$$

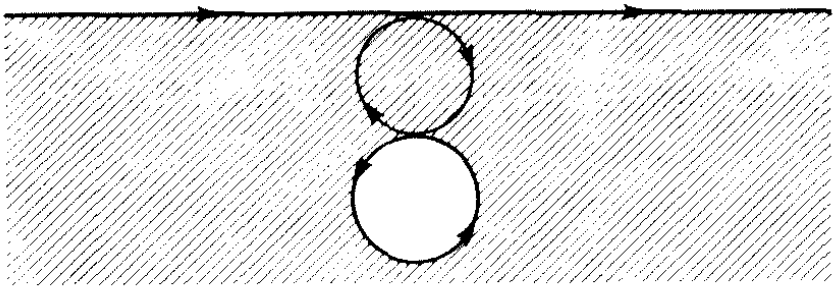
gdzie u i v są rzeczywiste. Wówczas $x+iy$ będzie określone jako funkcja (niekoniecznie jednoznaczna) $u+iv$. Funkcja ta będzie analityczna, choć meromorficzna, z wyjątkiem punktów $u+iv$, odpowiadających takim punktom $z=x+iy$, dla których $\dfrac{\partial A(z)}{\partial z}=0$. Ograniczenie $x=0$ przejdzie w krzywą o równaniu parametrycznym

$$u+iv=A(iy)\,, \tag{4.17}$$

gdzie y — rzeczywiste.

Ta nowa krzywa może przecinać samą siebie dowolną liczbę razy, jednak w ogólnym przypadku podzieli płaszczyznę na dwa obszary. Rozważmy taką krzywą (4.17) skierowaną zgodnie z kierunkiem wzrostu y od $-\infty$ do $+\infty$. Jeśli oddalimy się od równania (4.17) w prawo, posuwając się torem ciągłym nie przecinającym krzywej (4.17), to możemy osiągnąć pewne punkty. Punkty nie należące do zbioru takich punktów ani do krzywej (4.17) będziemy nazywali *punktami zewnętrznymi*. Tę część krzywej (4.17), która zawiera punkty graniczne obszaru punktów zewnętrznych będziemy nazywali *granicą efektywną*. Wszystkie inne punkty będziemy określali nazwą *punktów wewnętrznych*.

Tak więc na rys. 1, gdzie linia graniczna jest krzywą opatrzoną strzałkami, granica efektywna jest zaznaczona grubiej, a punkty wewnętrzne są zakreskowane.



Rys. 1

Warunek, że A jest ograniczona w każdej prawej półpłaszczyźnie mówi nam, że *punkt leżący w nieskończoności nie może być punktem wewnętrznym*. Może być on punktem granicznym, jakkolwiek istnieją pewne bardzo określone ograniczenia co do tego, jakiego typu punktem granicznym może on być. Dotyczą one „grubości" zbioru punktów wewnętrznych rozciągającego się aż do nieskończoności.

Stajemy teraz przed zagadnieniem matematycznego wyrażenia problemu liniowego sprzężenia zwrotnego. Niech sieć działań (nie schemat połączeń!) pewnego układu sterowania będzie taki, jak na rys. 2. Wejściem dla silnika jest wielkość Y, będąca różnicą między pierwotnym wejściem X a wyjściem układu mnożącego, dokonującego mnożenia wyjścia (mocy silnika) AY przez współczynnik λ. W takim razie

$$Y = X - \lambda AY, \tag{4.18}$$

czyli

$$Y=\frac{X}{1+\lambda A}, \tag{4.19}$$

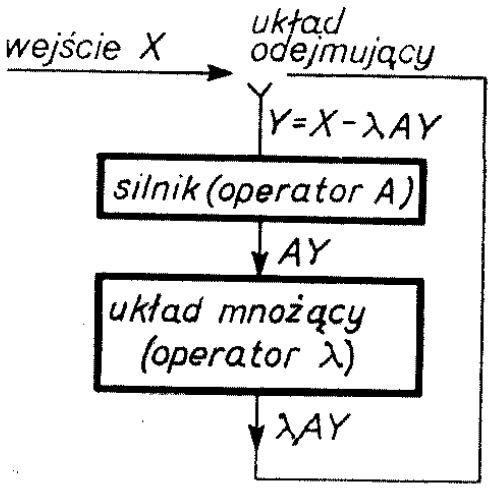
a więc wyjściem silnika jest

$$AY=X\frac{A}{1+\lambda A}. \tag{4.20}$$

Operator produkowany przez cały układ sprzężenia zwrotnego ma więc postać $A(1+\lambda A)$. Wyrażenie to jest nieskończone wtedy i tylko wtedy, gdy $A=-1/\lambda$. Krzywa z równania (4.17) dla tego nowego operatora jest wyrażeniem

$$u+iv=\frac{A(iy)}{1+\lambda A(iy)}, \tag{4.21}$$

a nieskończoność jest jego punktem wewnętrznym wtedy i tylko wtedy, gdy $-1/\lambda$ jest punktem wewnętrznym równania (4.17).



Rys. 2

W tym przypadku sprzężenie zwrotne z mnożnikiem λ spowoduje z pewnością jakąś katastrofę, a w istocie katastrofą będzie fakt, że układ wpadnie w nieograniczone i rosnące oscylacje. Z drugiej strony, jeśli $-1/\lambda$ jest punktem zewnętrznym, to można wykazać, że nie będzie żadnych kłopotów i sprzężenie zwrotne jest stabilne. Jeśli $-1/\lambda$ leży na granicy efektywnej, to konieczne jest przeprowadzenie bardziej szczegółowych rozważań. W większości wypadków układ taki może wpaść w drgania o nierosnącej amplitudzie.

Warto chyba rozpatrzyć kilka postaci operatorów A i zakresu sprzężeń zwrotnych, dopuszczalnych przy ich zastosowaniu. Zajmiemy się również nie tylko operatorami takimi jak w równaniu (4.02), lecz także ich granicami, przyjmując przy tym, że stosują się do nich takie same zasady rozumowania.

W przypadku, gdy operator A jest operatorem różniczkowania, $A(z)=z$, gdy y zmienia się od $-\infty$ do $+\infty$, to $A(y)$ również, a punktami wewnętrznymi są punkty zawarte na prawej półpłaszczyźnie. Punkt $-1/\lambda$ jest zawsze zewnętrznym i dopuszczalny jest dowolny stopień sprzężenia zwrotnego.

Jeśli

$$A(z)=\frac{1}{1+kz}, \tag{4.22}$$

to krzywa z równania (4.17) ma postać

$$u+\mathrm{i}v=\frac{1}{1+k\mathrm{i}y} \tag{4.23}$$

lub

$$u=\frac{1}{1+k^2y^2}, \qquad v=\frac{-ky}{1+k^2y^2}, \tag{4.24}$$

co możemy zapisać jako

$$u^2+v^2=u. \tag{4.25}$$

Jest to okrąg o promieniu 1/2, o środku w punkcie (1/2, 0). Kierunek obiegu po tym okręgu jest zgodny z ruchem wskazówek zegara, a punkty wewnętrzne zajmują to, co potocznie uważamy za wnętrze okręgu. Również i w tym przypadku sprzężenie nie podlega ograniczeniom, ponieważ $-1/\lambda$ leży zawsze poza okręgiem. Odpowiadające temu operatorowi $a(t)$ ma postać

$$a(t)=\frac{\mathrm{e}^{-\frac{t}{k}}}{k}. \tag{4.26}$$

Załóżmy teraz, że

$$A(z)=\left(\frac{1}{1+kz}\right)^2. \tag{4.27}$$

Wówczas równanie (4.17) ma postać

$$u+iv=\left(\frac{1}{1+kiy}\right)^2=\frac{(1-kiy)^2}{(1+k^2y^2)^2}, \tag{4.28}$$

zatem

$$u=\frac{1-k^2y^2}{(1+k^2y^2)^2}, \qquad v=\frac{-2ky}{(1+k^2y^2)^2}. \tag{4.29}$$

Daje to zależność

$$u^2+v^2=\frac{1}{(1+k^2y^2)^2}, \tag{4.30}$$

czyli

$$y=\frac{-v}{(u^2+v^2)2k}. \tag{4.31}$$

Wówczas

$$u=(u^2+v^2)\left[1-\frac{k^2v^2}{4k^2(u^2+v^2)^2}\right]=(u^2+v^2)-\frac{v^2}{4(u^2+v^2)}. \tag{4.32}$$

We współrzędnych biegunowych, gdy $u=\rho\cos\varphi$, $v=\rho\sin\varphi$, otrzymujemy

$$\rho\cos\varphi=\rho^2-\frac{\sin^2\varphi}{4}=\rho^2-\frac{1}{4}+\frac{\cos^2\varphi}{4}, \tag{4.33}$$

czyli

$$\rho-\frac{\cos\varphi}{2}=\pm\frac{1}{2}. \tag{4.34}$$

Stąd

$$\rho^{\frac{1}{2}}=-\sin\frac{\varphi}{2}, \qquad \rho^{\frac{1}{2}}=\cos\frac{\varphi}{2}. \tag{4.35}$$

Można wykazać, że te dwa równania opisują tylko jedną krzywą: kardioidę o wierzchołku w początku układu współrzędnych i „wybrzuszeniu" skierowanym w prawo. Wnętrze tej krzywej nie zawiera punktów z ujemnej półosi rzeczywistej i nie ma ograniczeń na dopuszczalne wzmocnienie, podobnie jak w poprzednim przypadku. Operator $a(t)$ jest tu równy

$$a(t)=\frac{t}{k^2}e^{\frac{-t}{k}}. \tag{4.36}$$

Niech teraz

$$A(z)=\left(\frac{1}{1+kz}\right)^3. \tag{4.37}$$

Niech ρ i φ będą zdefiniowane tak, jak poprzednio. Wówczas

$$\rho^{\frac{1}{3}}\cos\frac{\varphi}{3}+\mathrm{i}\rho^{\frac{1}{3}}\sin\frac{\varphi}{3}=\frac{1}{1+kiy}. \tag{4.38}$$

Podobnie, jak w pierwszym przypadku prowadzi to do zależności

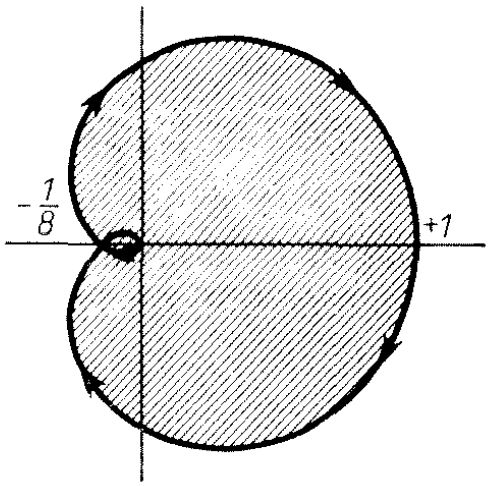
$$\rho^{\frac{2}{3}}\cos^2\frac{\varphi}{3}+\rho^{\frac{2}{3}}\sin^2\frac{\varphi}{3}=\rho^{\frac{1}{3}}\cos\frac{\varphi}{3}. \tag{4.39}$$

Zatem

$$\rho^{\frac{1}{3}}=\cos\frac{\varphi}{3}, \tag{4.40}$$

co opisuje krzywą o kształcie takim, jak na rys. 3. Obszar zakreskowany oznacza punkty wewnętrzne. Sprzężenie zwrotne o współczynniku większym od 1/8 nie jest możliwe. Odpowiednie $a(t)$ wynosi

$$a(t)=\frac{t^2}{2k^3}\mathrm{e}^{\frac{-t}{k}}. \tag{4.41}$$



Rys. 3

Na koniec niech nasz operator A będzie prostym opóźnieniem o T jednostek czasu. Wtedy

$$A(z)=\mathrm{e}^{-Tz}. \tag{4.42}$$

Wówczas

$$u+\mathrm{i}v=\mathrm{e}^{-\mathrm{i}Ty}=\cos Ty-\mathrm{i}\sin Ty. \tag{4.43}$$

Krzywa z równania (4.17) będzie jednostkowym okręgiem o środku w początku układu, obieganym zgodnie z ruchem wskazówek zegara z jednostkową prędkością. Wnętrze krzywej będzie wnętrzem w zwyczajnym sensie, a granicą intensywności sprzężenia zwrotnego będzie 1.

Można stąd wyciągnąć bardzo ciekawy wniosek. Operator $1/(1+kz)$ da się zastąpić dowolnie silnym sprzężeniem zwrotnym, które da nam wartość $A/(1+\lambda A)$ dowolnie bliską jedności przy dowolnie szerokim zakresie częstotliwości. Można zatem zastąpić trzy kolejne operatory tego typu trzema, lub nawet dwoma, kolejnymi sprzężeniami zwrotnymi. Nie jest jednak możliwe zastąpienie z dowolnie wielką dokładnością przez pojedyncze sprzężenie zwrotne operatora $1/(1+kz)^3$, który jest wynikiem kaskadowego połączenia trzech operatorów $1/(1+kz)$. Operator $1/(1+kz)^3$ można zapisać również jako

$$\frac{1}{2k^2}\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}z^2}\frac{1}{1+kz} \tag{4.44}$$

i można uważać go za granicę addytywnego połączenia trzech operatorów o mianownikach będących wyrażeniami pierwszego stopnia. Okazuje się zatem, że suma różnych operatorów, z których każdy może być zastąpiony pojedynczym sprzężeniem zwrotnym, nie może być sama jako całość zastąpiona w ten sposób.

MacColl w swej ważnej książce podaje przykład złożonego systemu, do stabilizacji którego należy użyć nie jednego, a dwóch sprzężeń zwrotnych. Jest to układ występujący przy sterowaniu statkiem za pomocą żyrokompasu. Kąt pomiędzy kursem ustalonym przez nawigatora a wskazaniem kompasu wpływa na położenie steru, który, jeśli statek porusza się, wytwarza moment obrotowy zmieniający kurs statku tak, by różnica między kursem wymaganym a rzeczywistym uległa zmniejszeniu. Jeśli w tym celu bezpośrednio otwiera się zawory z jednej strony urządzenia sterowego, a zamyka z drugiej i to w ten sposób, że prędkość obracania się steru jest proporcjonalna do odchylenia statku od wymaganego kursu, to możemy uważać, że kątowe położenie steru jest w przybliżeniu proporcjonalne do momentu obrotowego statku, a zatem do jego przyśpieszenia kątowego. W takiej sytuacji wielkość o jaką obróci się statek jest proporcjonalna (z ujemnym współczynnikiem proporcjonalności) do trzeciej pochodnej odchylenia od kursu, a operacja, którą mamy stabilizować posługując się

sprzężeniem zwrotnym z żyrokompasu – ma postać kz^3, gdzie k jest dodatnie. Otrzymujemy wówczas następujące równanie krzywej z równania (4.17):

$$u+\mathrm{i}v=-k\mathrm{i}y^3, \tag{4.45}$$

a ponieważ obszarem wewnętrznym jest w tym przypadku lewa półpłaszczyzna, więc żaden serwomechanizm nie ustabilizuje tego układu.

W powyższym rozumowaniu uprościliśmy problem zbyt dalece. W rzeczywistości występują pewne siły tarcia tak, że siła obracająca statek nie określa całkowicie przyśpieszenia. Mamy natomiast do czynienia z zależnością

$$\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}t^2}=c_1\varphi-c_2\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}, \tag{4.46}$$

gdzie Θ jest kątowym położeniem statku, a φ – kątowym położeniem steru w stosunku do statku. Mamy również

$$u+\mathrm{i}v=-k_1\mathrm{i}y^3-k_2y^2. \tag{4.47}$$

Tę krzywą można zapisać w postaci

$$v^2=-k_3u^3, \tag{4.48}$$

co oznacza, że żadne sprzężenie zwrotne nie może być tu zastosowane. Kiedy y przebiega od $-\infty$ do ∞, u przebiega od ∞ do $-\infty$ i *wnętrze* krzywej znajduje się z lewej strony.

Gdyby jednak *położenie* steru było proporcjonalne do odchylenia od kursu, to operator, który mamy stabilizować za pomocą sprzężenia zwrotnego, miałby postać $k_1z^2+k_2z$, a równanie (4.17) stałoby się zależnością

$$u+\mathrm{i}v=-k_1y^2+k_2\mathrm{i}y. \tag{4.49}$$

Krzywą tę można zapisać jako

$$v^2=-k_3u. \tag{4.50}$$

Gdy y przebiega od $-\infty$ do ∞, v postępuje tak samo, zatem krzywa jest skierowana od $y=-\infty$ do $y=+\infty$. W tym przypadku zewnętrze krzywej znajduje się z lewej strony i możliwe jest zastosowanie dowolnego wzmocnienia w sprzężeniu zwrotnym.

Aby to osiągnąć możemy wykorzystać dodatkowy stopień sprzężenia zwrotnego. Jeśli przy regulacji położenia zaworów urządzenia sterowego wykorzystamy nie odchylenie kursu rzeczywistego od zadanego, lecz różnicę między tą wielkością a kątowym położeniem steru, to będziemy mogli utrzymać z dowolną dokładnością proporcjonalność kątowego położenia steru i odchylenia statku od zadanego kursu, pod warunkiem że damy dostatecznie silne sprzężenie zwrotne, tzn. otworzymy zawory dostatecznie szeroko. Taki układ sterowania z podwójnym sprzężeniem zwrotnym rzeczywiście znajduje zastosowanie przy automatycznym sterowaniu statkiem za pomocą żyrokompasu.

W przypadku ciała ludzkiego ruch ręki lub palca oznacza uruchomienie układu zawierającego pewną liczbę stawów. Wyjście tego układu jest wektorową sumą wyjść wszystkich stawów. Przekonaliśmy się wyżej, że w ogólnym przypadku złożony układ, będący — jak ten właśnie — sumą układów prostszych, nie da się stabilizować przy użyciu pojedynczego sprzężenia zwrotnego. Dlatego też zamiarowe sprzężenie zwrotne, regulujące wykonanie zadania poprzez ciągłą obserwację, o ile aktualny stan układu różni się od zamierzonego, wymaga pomocy innych sprzężeń zwrotnych. Nazywamy je sprzężeniami zwrotnymi posturalnymi postawy, a związane są one z utrzymywaniem napięcia mięśniowego. W przypadkach urazu móżdżku przerwaniu lub zakłóceniu ulega zamiarowe sprzężenie zwrotne, skoro pozostające w wyniku tego urazu drżenie nie ujawnia się, dopóki pacjent nie usiłuje wykonać czynności zamiarowej. Takie drżenie przy którym pacjent nie jest w stanie podnieść szklanki nie rozlewając jej zawartości, różni się zupełnie charakterem od drżenia występującego przy parkinsonizmie (*paralysis agitans*). Parkinsonizm objawia się w swej najbardziej typowej postaci wówczas, gdy pacjent znajduje się w spoczynku, a często zmniejsza się znacznie, kiedy usiłuje on wykonać pewną czynność. Istnieją nawet chirurdzy parkinsonicy, którzy potrafią operować zupełnie sprawnie. Wiadomo, że parkinsonizm nie wywodzi się ze zmian chorobowych móżdżku, lecz wiąże się z istnieniem ogniska patologicznego w pniu mózgu. Jest to zaledwie jedno ze schorzeń sprzężeń zwrotnych postawy. Wiele innych musi brać swój początek z bardzo różnorodnie usytuowanych uszkodzeń części układu nerwowego. Jednym z wielkich zadań cybernetyki fizjologicznej jest rozszyfrowanie i lokalizacja poszczególnych elementów składowych złożonego systemu sprzężeń zwrotnych zamiarowych i posturalnych.

Przykładami takich odruchów składowych mogą być: odruch drapania się i odruch chodzenia.

Kiedy sprzężenie zwrotne daje się zastosować i jest ono stabilne, to, jak już powiedzieliśmy, ma ono tę zaletę, że działanie układu staje się mniej zależne od obciążenia. Załóżmy, że obciążenie zmienia wielkość A o dA. Zmiana względna wynosi dA/A. Jeśli operator układu ze sprzężeniem zwrotnym ma postać

$$B=\frac{A}{C+A}, \tag{4.51}$$

to otrzymamy

$$\frac{dB}{B}=\frac{-d\left(1+\frac{C}{A}\right)}{1+\frac{C}{A}}=\frac{\frac{C}{A^2}dA}{1+\frac{C}{A}}=\frac{dA}{A}\frac{C}{A+C}. \tag{4.52}$$

Sprzężenie zwrotne zmniejsza więc zależność układu od charakterystyki silnika i stabilizuje go dla wszystkich częstotliwości, dla których spełniony jest warunek:

$$\left|\frac{A+C}{C}\right|>1. \tag{4.53}$$

Warunek ten mówi, że cała linia graniczna między punktami wewnętrznymi a zewnętrznymi musi leżeć wewnątrz okręgu o promieniu C i środku w punkcie $(-C)$. Nie jest on spełniony już w pierwszym z dyskutowanych wyżej przypadków. Efektem zastosowania silnego sprzężenia zwrotnego, jeśli jest ono w ogóle stabilne, będzie zwiększenie stabilności układu dla małych częstotliwości, ale ogólnie mówiąc, kosztem jego stabilności dla pewnych częstotliwości wysokich. Niemniej w wielu przypadkach nawet taki rodzaj sprzężenia zwrotnego jest korzystny.

Bardzo ważny problem, wiążący się z konsekwencjami zbyt silnego sprzężenia zwrotnego stanowi częstotliwość powstających drgań. Określa ją wartość y, odpowiadająca temu punktowi iy z linii granicznej między obszarem wewnętrznym i zewnętrznym (równanie (4.17)), który leży najbardziej na lewo na ujemnej części osi u. Wielkość y ma oczywiście charakter częstotliwości.

Dotarliśmy teraz do końca naszych elementarnych rozważań o drganiach liniowych, które badaliśmy w świetle teorii sprzężeń zwrotnych. Liniowy układ drgający ma pewne szczególne właściwości. Jedna z nich polega na tym, że taki układ drgający może wytwarzać, i w istocie najczęściej wytwarza (przy nieobecności innych równoczesnych niezależnych drgań), drgania o postaci

$$A \sin (Bt + C) e^{Dt}. \tag{4.54}$$

Występowanie okresowych niesinusoidalnych drgań nasuwa zawsze podejrzenie, że dla co najmniej tej właśnie, obserwowanej zmiennej układ nie jest liniowy. W pewnych, niezwykle zresztą rzadkich, przypadkach można sprowadzić układ do postaci liniowej obierając nową zmienną niezależną.

Inna, bardzo ważna różnica między drganiami liniowymi a nieliniowymi polega na tym, że w pierwszym przypadku amplituda drgań jest zupełnie niezależna od ich częstotliwości, podczas gdy w drugim istnieje zazwyczaj jedna amplituda lub co najwyżej dyskretny zbiór amplitud, z jakimi układ może drgać przy zadanej częstotliwości, a zbiór dopuszczalnych dla danego układu częstotliwości drgań jest również dyskretny. Zjawiska te można dobrze zilustrować badając to, co dzieje się w piszczałce organowej. Istnieją dwie teorie opisujące działanie piszczałek organowych: teoria przybliżona liniowa i dokładniejsza nieliniowa. Pierwsza z nich uważa piszczałkę za układ zachowawczy. Nie zajmuje się ona tym, w jaki sposób piszczałka zaczyna drgać, a poziom drgań jest zupełnie nieokreślony. W drugiej teorii uważa się, że drgania piszczałki wiążą się z rozpraszaniem energii, przy czym energia ta pochodzi od strumienia powietrza, wtłaczanego do zwężenia piszczałki. Teoretycznie istnieje taka ustalona wielkość przepływu powietrza przez zwężenie, która nie powoduje zamiany energii na żaden z rodzajów drgań piszczałki, jednak przy pewnych szybkościach strumienia powietrza taki stan ustalony jest niestabilny. Najmniejsze, przypadkowe odchylenie od tej szybkości spowoduje zasilenie energią jednego lub kilku rodzajów liniowych drgań własnych piszczałki i odtąd aż do pewnego momentu ilość energii zamienianej na odpowiedni rodzaj drgań będzie wzrastać. Szybkością dostarczania energii i szybkością odprowadzania energii na skutek rozpraszania cieplnego itp. rządzą inne prawa, jednak na to, aby układ osiągnął ustalony stan drgań, obie te wielkości muszą być identyczne. Poziom drgań nieliniowych jest zatem określony równie dokładnie, jak ich częstotliwość.

Sytuacja, którą omówiliśmy wyżej jest przykładem występowania tak zwanych drgań relaksacyjnych, w przypadku których układ równań, niezmienniczy względem przesunięcia w czasie, prowadzi do rozwiązań okresowych (lub okresowych w pewnym uogólnionym sensie), określonych co do amplitudy i częstotliwości, lecz nie co do fazy. W omówionym wyżej przypadku częstotliwość drgań układu jest bliska częstotliwości drgań pewnej, w przybliżeniu liniowej jego części. B. van der Pol, jeden z największych autorytetów w dziedzinie drgań relaksacyjnych wykazał, że nie zawsze ma to miejsce, że istnieją również takie drgania relaksacyjne, w przypadku których podstawowa częstotliwość nie jest zbliżona do częstotliwości liniowych drgań jakiejkolwiek części układu. Dzieje się tak na przykład wówczas, gdy strumień gazu wpływa do połączonej z atmosferą komory, w której pali się stały płomyk. Kiedy stężenie gazu przekracza pewną wartość krytyczną, może nastąpić wybuch spowodowany zapłonem od płomyka, jednak czas, po jakim wybuch nastąpi, zależy jedynie od szybkości wlotowej gazu, szybkości z jaką do komory przedostaje się powietrze, szybkości z jaką produkty spalania wydostają się na zewnątrz oraz od procentowego składu wybuchowej mieszaniny powietrza i gazu.

Układy równań nieliniowych są zazwyczaj trudne do rozwiązania. Istnieje jednak pewien szczególnie wygodny przypadek, gdzie układ różni się tylko nieznacznie od liniowego, a czynniki, które stanowią o tej różnicy zmieniają się na tyle wolno, że można je w zasadzie uważać za stałe w ramach okresu drgań. W takim przypadku możemy badać układ nieliniowy tak, jak gdyby był on układem liniowym o wolno zmiennych parametrach. O takich układach mówi się, że są one zmienne w sposób wiekowy. Ich teoria gra bardzo ważną rolę w astronomii grawitacyjnej.

Jest rzeczą dość prawdopodobną, że niektóre znane z fizjologii rodzaje drżenia można z pewnym przybliżeniem traktować jako układy liniowe zmieniające się w sposób wiekowy. Można dość przekonywająco uzasadniać, dlaczego w takim układzie poziom amplitudy drgań ustalonych może być określony równie ściśle, jak ich częstotliwość. Niech jednym z elementów takiego układu będzie wzmacniacz, którego wzmocnienie maleje, podczas gdy średnia wartość wejściowa układu za długi okres czasu wzrasta. Wówczas wraz z narastaniem drgań układu może następować spadek wzmocnienia, aż do momentu, w którym zostanie osiągnięty stan równowagi.

Niektóre przypadki nieliniowych układów o relaksacyjnym charakterze drgań badano przy użyciu metod opracowanych przez Hilla i Poincaré'go[1]. Klasyczne badania tego rodzaju zajmują się drganiami, w przypadku których równania opisujące układ są równaniami różniczkowymi, szczególnie niższego rzędu. O ile mi wiadomo, nie istnieją porównywalne z tymi metodami metody badania odpowiednich równań całkowych, które wystąpią wówczas, gdy przyszłe zachowanie się układu zależy od jego zachowania się w przeszłości. Nie jest jednak trudną rzeczą naszkicować przynajmniej ogólny kształt takiej teorii, zwłaszcza gdybyśmy ograniczyli się jedynie do poszukiwania rozwiązań okresowych. W takim przypadku drobna modyfikacja stałych w równaniu powinna prowadzić do drobnej, a zatem prawie liniowej zmiany równań ruchu. Niech na przykład $Op[f(t)]$ będzie funkcją t, która powstaje w wyniku wykonania nieliniowej operacji na $f(t)$ i która zostaje poddana przesunięciu. Wówczas $\delta Op[f(t)]$ (wariacja $Op[f(t)]$ odpowiadająca wariacyjnej zmianie $\delta f(t)$ funkcji $f(t)$) oraz znana zmiana dynamiki systemu są liniowe, lecz nie jednorodne względem $\delta f(t)$, choć nie liniowe względem $f(t)$. Jeśli znamy rozwiązanie $f(t)$ równania

$$Op[f(t)]=0 \tag{4.55}$$

i zmienimy dynamikę układu, to otrzymamy liniowe niejednorodne równanie opisujące $\delta f(t)$. Jeśli

$$f(t)=\sum_{-\infty}^{\infty} a_n e^{in\lambda t} \tag{4.56}$$

i $f(t)+\delta f(t)$ jest również okresowe o postaci

$$f(t)+\delta f(t)=\sum_{-\infty}^{\infty}(a_n+\delta a_n)e^{in(\lambda+\delta\lambda)t}, \tag{4.57}$$

to wówczas

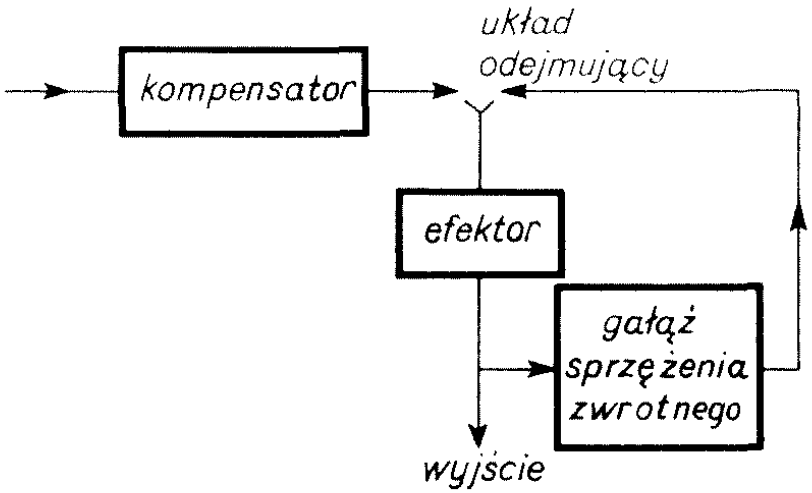
$$\delta f(t)=\sum_{-\infty}^{\infty}\delta a_n e^{in\lambda t}+\sum_{-\infty}^{\infty} a_n e^{in\lambda t} in\delta\lambda t. \tag{4.58}$$

Wszystkie współczynniki liniowych równań opisujących $\delta f(t)$ będą rozwijalne w szereg względem $e^{in\lambda t}$, ponieważ samą $f(t)$ można również rozwinąć w ten sposób. Otrzymamy zatem nieskończony układ liniowych, nie-

[1] Poincaré H., *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*, Paris 1892-1899, Gauthier-Villars.

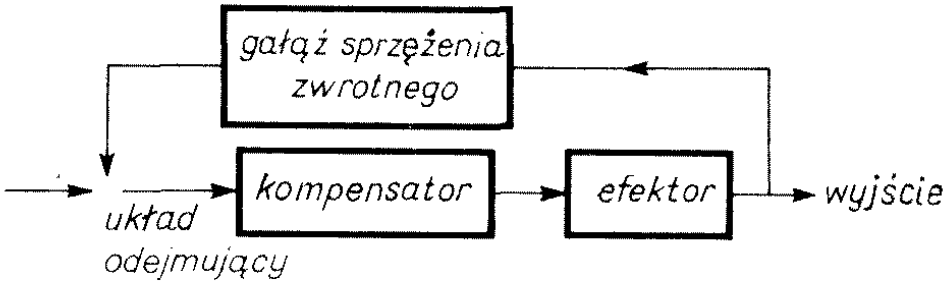
jednorodnych równań, w których wystąpią $\delta a_n + a_n$, $\delta\lambda$ oraz λ. Taki układ równań można rozwiązać przy pomocy metod Hilla. Można sobie przynajmniej wyobrazić, że wychodząc od równań liniowych (niejednorodnych) i usuwając stopniowo ograniczenia można dojść do rozwiązania bardzo ogólnej klasy nieliniowych problemów z dziedziny drgań relaksacyjnych. Praca taka jest jednak sprawą przyszłości.

Układy sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, którymi zajmowaliśmy się w niniejszym rozdziale oraz układy kompensacyjne, którym był poświęcony rozdział poprzedni, są do pewnego stopnia konkurencyjne względem siebie. Zarówno jedne jak i drugie służą do tego, by sprowadzić złożone relacje między wejściem a wyjściem efektora do postaci zbliżonej do prostej proporcjonalności. Jak się przekonaliśmy, układy ze sprzężeniem zwrotnym posuwają się dalej. W ich przypadku sprawność całego układu jest stosunkowo niezależna od charakterystyki i od zmian w charakterystyce elementu wykonawczego (efektora). To, która z tych dwóch metod sterowania jest względnie lepsza, zależy zatem od stałości charakterystyki efektora. Naturalnym się wydaje przypuszczenie, że w pewnych sytuacjach korzystne może być połączenie obu metod. Istnieją na to różne sposoby. Jedno z najprostszych rozwiązań pokazane jest na rys. 4.



Rys. 4

W takim przypadku cały układ sprzężenia zwrotnego można uważać za rozszerzony efektor. Nie wnosi on nic nowego, należy tylko wspomnieć, że kompensator musi być zaprojektowany tak, by kompensował to, co stanowi w pewnym sensie uśrednioną charakterystykę układu sprzężenia zwrotnego. Inny schemat pokazano na rys. 5.



Rys. 5

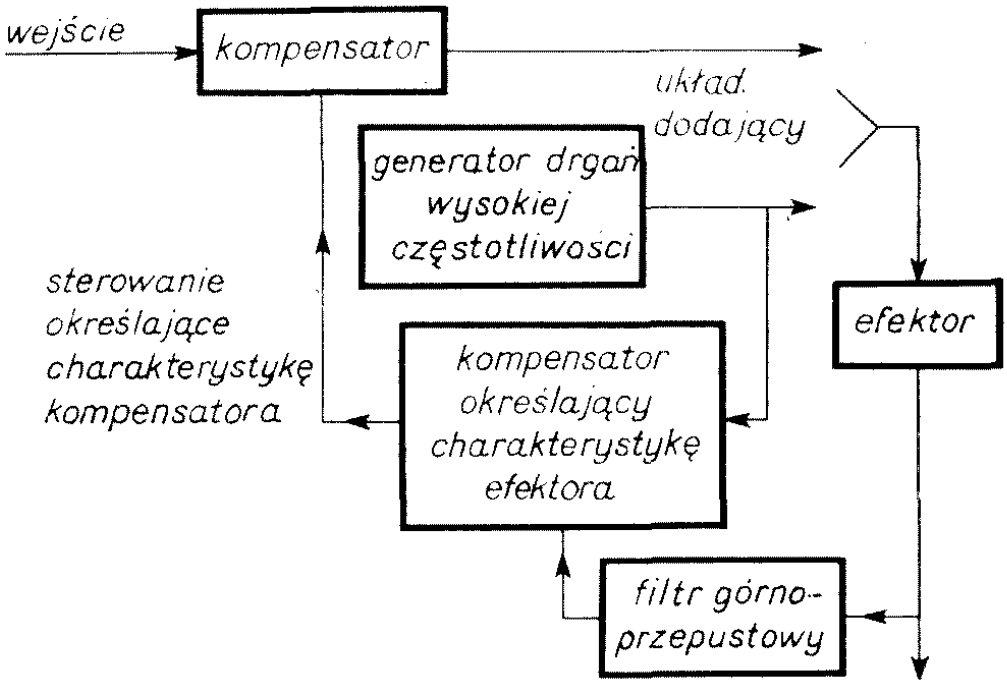
Tu z kolei kompensator i efektor połączone są tak, że tworzą razem rozszerzony efektor. Taka zmiana konfiguracji wpłynie na ogół na wartość maksymalnego dopuszczalnego wzmocnienia w gałęzi sprzężenia zwrotnego i nie jest wcale łatwo wykazać w jaki sposób można zazwyczaj doprowadzić do zwiększenia dopuszczalnego poziomu wzmocnienia. Z drugiej strony, przy tym samym poziomie sprzężenia zwrotnego taki właśnie sposób połączeń poprawia w najbardziej zdecydowany sposób sprawność całego układu. Jeśli na przykład charakterystyka efektora mówi, że jest on układem zasadniczo opóźniającym, to kompensator będzie układem przewidującym zaprojektowanym stosownie do statystycznych właściwości zbioru jego wejść. W tym przypadku sprzężenie zwrotne, które możemy nazywać sprzężeniem zwrotnym przewidującym, będzie dążyło do przyśpieszenia działania mechanizmu efektora.

W odruchach ludzi i zwierząt daje się z pewnością stwierdzić udział sprzężeń zwrotnych tego rodzaju. Strzelając do kaczki usiłujemy zminimalizować nie różnicę między położeniem dubeltówki a aktualnym położeniem celu, lecz różnicę między położeniem strzelby a przewidywanym położeniem celu. Przed podobnym problemem stoi każdy system sterowania ogniem artylerii przeciwlotniczej. Warunki stabilności i sprawność układów ze sprzężeniem zwrotnym przewidującym wymagają rozważań bardziej wnikliwych niż te, które do tej pory na ich temat przeprowadzano.

Inną, ciekawą odmianę układów ze sprzężeniem zwrotnym odkryjemy zastanawiając się nad techniką prowadzenia samochodu podczas gołoledzi. Przebieg jazdy zależy od naszej wiedzy o śliskości nawierzchni, to znaczy od naszej znajomości charakterystyk sprawnościowych układu samochód-jezdnia. Jeśli będziemy chcieli ustalić je w oparciu o właściwości układu w normalnych warunkach, to ocknęlibyśmy się w rowie, zanim byśmy doszli do konstruktywnych wniosków. Wykonujemy zatem kierownicą szybkie,

drobne ruchy. Na tyle małe, by nie wprawiły samochodu w większy poślizg, lecz wystarczające do tego, by donieść naszemu zmysłowi kinestetycznemu o niebezpieczeństwie poślizgu i technikę kierowania samochodem dostosowujemy do ich efektów.

Taka metoda sterowania — możemy ją nazwać *sterowaniem przy pomocy informacyjnego sprzężenia zwrotnego* — daje się stosunkowo łatwo wykonać w postaci mechanicznego urządzenia i może się okazać cenna w praktyce. Efektorowi odpowiada kompensator, którego charakterystyka może ulegać zmianom pod wpływem warunków zewnętrznych. Na przychodzący z zewnątrz sygnał nakładamy słaby sygnał wejściowy o dużej częstotliwości, a z całkowitego wyjścia efektora oddzielamy za pomocą odpowiedniego filtru część sygnału wyjściowego, posiadającą tę samą dużą częstotliwość. Badając relacje między amplitudą i fazą obu sygnałów wysokiej częstotliwości otrzymujemy charakterystykę sprawnościową efektora. Na jej podstawie modyfikujemy w odpowiedni sposób charakterystykę kompensatora. Blokowy schemat takiego układu pokazany jest na rys. 6.



Rys. 6

Do zalet tego typu sprzężenia zwrotnego należy fakt, że odpowiedni dobór kompensatora umożliwia osiągnięcie stabilności dla dowolnego rodzaju stałego obciążenia. Zaletą jest także fakt, że jeśli charakterystyka obciążenia zmienia się dostatecznie wolno w porównaniu ze zmianami sygnału

wejściowego (w sposób, który nazwaliśmy wiekowym) i jeśli pomiar warunków obciążenia jest dokładny, to układ nie ma tendencji do wpadania w drgania. Znamy wiele przypadków, w których zmiany obciążenia są w poważnym sensie wiekowe. Na przykład, opór tarcia przy ruchach wieżyczki armatniej zależy od gęstości smaru a ta z kolei od temperatury. Gęstość smaru nie zmienia się jednak w zasadniczy sposób po kilku ruchach wieżyczki.

Takie informacyjne sprzężenie zwrotne będzie oczywiście działać prawidłowo jedynie wówczas, gdy charakterystyka obciążenia dla wysokich częstotliwości będzie taka sama jak charakterystyka dla częstotliwości niskich lub przynajmniej będzie stanowiła jej dobre odbicie. Będzie to miało często miejsce wtedy, gdy charakterystyka obciążenia, a zatem i sam efektor, zawiera względnie mało zmiennych parametrów.

Informacyjne sprzężenie zwrotne i przytoczone wyżej jako przykłady sprzężenia zwrotne z kompensatorami, są jedynie szczególnymi przypadkami bardziej złożonej teorii, która jak dotąd była badana w sposób niedoskonały. Cała ta dziedzina zaczyna rozwijać się w sposób niesłychanie gwałtowny. Zasługuje ona na znacznie większą uwagę w najbliższej przyszłości.

Zanim zamkniemy niniejszy rozdział, nie możemy zapomnieć o innym ważnym dla fizjologii zastosowaniu zasady sprzężenia zwrotnego. W tym co znamy pod nazwą homeostazy kryje się wielka grupa przypadków, w których pewien rodzaj sprzężenia zwrotnego nie tylko ujawnia się w zjawiskach fizjologicznych, lecz ma absolutnie podstawowe znaczenie dla utrzymania życia. Granice zmienności warunków, w których procesy życiowe wyższych zwierząt przebiegają prawidłowo są dość wąskie. Zmiana temperatury ciała o pół stopnia Celsjusza jest najczęściej oznaką choroby, a trwałe jej odchylenie o pięć stopni od normy wyklucza możliwość przeżycia. Ciśnienie osmotyczne i stężenie jonów wodorowych we krwi musi być utrzymywane w ramach ścisłych granic. Zbędne produkty przemiany materii muszą zostać wydalone zanim nagromadzą się do stężenia toksycznego. Poza tym należy utrzymywać na odpowiednim poziomie ilość leukocytów i chemiczne środki obrony organizmu przed infekcją; tętno i ciśnienie krwi nie mogą być ani zbyt niskie, ani zbyt wysokie; cykl procesów płciowych musi być dostosowany do potrzeb reprodukcji gatunku; metabolizm wapnia nie może doprowadzać ani do rozmiękania kości ani do zwapnienia

tkanek; i tak dalej. Krótko mówiąc, nasz wewnętrzny system zarządzania organizmem musi zawierać zespół termostatów, automatycznych układów sterowania stężeniem jonów wodorowych, regulatorów i podobnych im narzędzi, których starczyłoby dla wielkiej fabryki chemicznej. Stanowią one łącznie to, co znamy pod nazwą mechanizmu homeostazy.

Sprzężenia zwrotne homeostazy różnią się od sprzężeń zwrotnych zamiarowych i posturalnych jedną generalną właściwością: są one na ogół wolniejsze. Tylko bardzo nieliczne spośród zmian mechanizmu fizjologicznej homeostazy (nie należy do nich nawet niedokrwistość mózgu) powodują poważne lub trwałe uszkodzenie w ciągu ułamka sekundy. Włókna nerwowe zarezerwowane dla procesów homeostazy, układ sympatyczny i parasympatyczny, są często niezmielinizowane i wiadomo, że dysponują znacznie mniejszą szybkością przenoszenia sygnałów, niż włókna zmielinizowane. Typowe efektory biorące udział w procesach homeostazy, mięśnie gładkie i gruczoły, również działają wolniej niż mięśnie prążkowane, które są typowymi efektorami czynności zamiarowych i posturalnych. Wiele sygnałów w układzie homeostazy przenosi się drogami nienerwowymi, przez bezpośrednie połączenia włókien mięśnia sercowego lub za pośrednictwem nośników chemicznych, takich jak hormony, zawartość dwutlenku węgla we krwi itd., a te drogi przenoszenia sygnałów, poza przypadkiem mięśnia sercowego, zapewniają również na ogół mniejszą szybkość przesyłania informacji, niż zmielinizowane włókna nerwowe.

Pełny podręcznik cybernetyki powinien zawierać głębsze, szczegółowe rozważania na temat procesów homeostazy, z których zresztą wiele omówiono już w literaturze dość dokładnie[1]. Niniejsza książka jest jednak bardziej wprowadzeniem w pewną dziedzinę wiedzy, niż obszerną rozprawą, a teoria procesów homeostazy wymaga od czytelnika zbyt szczegółowej znajomości fizjologii ogólnej, by można się było nią zająć w tym miejscu.

---

[1] Cannon W., *The Wisdom of the Body*, New York 1932, W. W. Norton. Henderson L. J., *The Fitness of the Environment*, New York 1913, Macmillan.

V

MASZYNY LICZĄCE A UKŁAD NERWOWY

Maszyny liczące są w zasadzie maszynami do rejestrowania liczb, operowania liczbami i podawania wyników w postaci liczbowej. Znaczna część ich kosztu – zarówno w sensie finansowym, jak w sensie wysiłku konstruktorskiego – przypada na proste zagadnienie zapisu liczb w sposób przejrzysty i dokładny. Wydaje się, że najprostszą metodą zapisu liczby jest posłużenie się podziałką, nad którą przesuwa się pewnego rodzaju wskazówka. Jeśli chcemy zarejestrować pewną liczbę z dokładnością „jeden do n", to musimy zapewnić, by w każdym obszarze podziałki wskazówka przyjmowała wymagane położenie z tą właśnie dokładnością. Znaczy to, że dla ilości informacji równej $\log_2 n$ musimy ukończyć każdy etap przesunięcia wskazówki z tym właśnie stopniem dokładności, a koszt zarejestrowania liczby będzie postaci An, gdzie A jest zbliżone do stałej. Ściślej mówiąc, zauważmy, że jeśli określimy dokładnie $(n-1)$ obszarów na podziałce, to ostatni obszar będzie również dokładnie określony. Tak więc koszt zapisania ilości informacji równej I wyniesie około

$$(2^I-1)A. \tag{5.01}$$

Rozdzielmy teraz tę informację na dwie podziałki, z których każda wyskalowana jest mniej dokładnie. Koszt zapisania tej informacji będzie bliski następującej wielkości

$$2\cdot(2^{I/2}-1)A. \tag{5.02}$$

Jeśli informację rozłożymy na N podziałek, to przybliżony koszt wyniesie

$$N(2^{I/N}-1)A. \tag{5.03}$$

Wielkość ta osiąga minimum, gdy

$$2^{I/N}-1=\frac{I}{N}2^{I/N}\log 2\,, \tag{5.04}$$

czyli jeśli podstawimy

$$\frac{I}{N}\log 2=x\,, \tag{5.05}$$

gdy

$$x=\frac{e^x-1}{e^x}=1-e^{-x}. \tag{5.06}$$

Ma to miejsce wtedy i tylko wtedy, gdy $x=0$. Innymi słowy, na to, by koszt zapamiętania informacji był najmniejszy, N powinno być możliwie wielkie. Pamiętajmy, że $2^{I/N}$ musi być liczbą całkowitą, przy czym 1 jest wartością nieodpowiednią, ponieważ w takim przypadku mielibyśmy nieskończoną liczbę podziałek, z których każda nie zawiera informacji w ogóle. Najlepszą wartością $2^{I/N}$ jest 2. W tym przypadku zarejestrujmy naszą liczbę za pomocą pewnej ilości niezależnych podziałek, z których każda podzielona jest na dwie równe części. Innymi słowy, przedstawiamy wówczas liczby w systemie dwójkowym przy użyciu pewnej ilości skal, a o każdej z nich wiemy jedynie tyle, że pewna wielkość leży w jednej lub drugiej połowie skali i prawdopodobieństwo tego, że nie wiemy dokładnie, w której z połówek leży obserwowana wielkość, staje się pomijalnie małe. Innymi słowy, przedstawiamy liczbę v w postaci

$$v=v_0+\frac{1}{2}v_1+\frac{1}{2^2}v_2+\ldots+\frac{1}{2^{n_j}}v_n+\ldots\,, \tag{5.07}$$

gdzie każde v_n jest równe 1 albo 0.

Istnieją obecnie dwa zasadnicze typy maszyn liczących. Pierwsze, jak np. analizator równań różniczkowych Busha[1], są nazywane *maszynami analogowymi*, a dane są w nich reprezentowane przez pomiar na pewnej ciągłej skali tak, że dokładność konstrukcji skali determinuje dokładność

[1] „Journal of the Franklin Institute", różne prace od 1930 roku.

całej maszyny. Drugie, jak np. zwykłe arytmometry ręczne, nazywamy *maszynami numerycznymi*, a dane są w ich przypadku przedstawiane jako zbiór wyborów między pewną liczbą możliwości, przy czym dokładność maszyny zależy od ostrości, z jaką te możliwości wyboru różnią się od siebie, od liczby alternatywnych wyników w każdym z wyborów i wreszcie od liczby samych wyborów. Widzimy, że do obliczeń z wysoką dokładnością maszyny numeryczne nadają się lepiej niż analogowe. Dotyczy to przede wszystkim maszyn numerycznych zbudowanych w oparciu o skalę dwójkową, w przypadku których każdy z wyborów ma dwa możliwe alternatywne wyniki. Szerokie zastosowanie maszyn opartych na skali dziesiętnej pochodzi jedynie stąd, że na skutek historycznego zbiegu okoliczności dziesiętny system liczenia za pomocą palców rąk był już w użyciu w momencie gdy Hindusi odkryli znaczenie zera i korzyści płynące z pozycyjnego systemu notacji liczb. Warto o tym pamiętać dziś, kiedy znaczna część pracy obliczeniowej wykonywanej przy pomocy maszyny polega na wpisywaniu do niej liczb przedstawionych w konwencjonalnej dziesiętnej formie i wyprowadzenia z maszyny liczb również w tej samej, konwencjonalnej postaci.

Tak pracują już zwykłe kalkulatory, stosowane w bankach, biurach i wielu pracowniach statystycznych. Większe i bardziej zautomatyzowane maszyny liczące wprowadza się nie dlatego, że są one lepsze. Najczęściej powodem wprowadzenia każdej maszyny liczącej jest fakt, że zmechanizowane metody obliczeniowe są szybsze niż ręczne. W przypadku zastosowania mieszanych metod obliczeniowych, podobnie jak w przypadku złożonego ciągu reakcji chemicznych, rząd wielkości stałej czasowej całego systemu określa najwolniejsza z nich. Jest zatem rzeczą korzystną wyeliminować w miarę możliwości czynnik ludzki z długiego łańcucha obliczeń, dopuszczając interwencję człowieka jedynie tam, gdzie jest ona absolutnie konieczna, na samym początku i na samym końcu procesu obliczeniowego. Pod tym warunkiem opłaca się mieć instrument, który dokonywałby zmiany systemu zapisu liczb na początku i na końcu łańcucha obliczeń, a pośrednie procesy obliczeniowe wykonywałby w skali dwójkowej.

Idealna maszyna licząca musi zatem otrzymać wszystkie niezbędne dane na początku obliczeń i musi być w miarę możliwości uwolniona od interwencji człowieka aż do ich zakończenia. Znaczy to, że należy jej podać na początku nie tylko dane liczbowe, lecz również reguły postępowania

z nimi. Reguły te muszą mieć postać instrukcji, przewidzianych na każdą sytuację, która może powstać w czasie procesu obliczeniowego. Maszyna licząca musi być zatem maszyną logiczną równie jak arytmetyczną i musi postępować z pojawiającymi się możliwościami według systematycznego algorytmu. Istnieje wiele algorytmów, które *mogłyby być* w tym celu użyte. Najprostszy z nich jest znany jako algebra logiki *par excelence*, czyli algebra Boole'a. Algorytm, ten podobnie jak arytmetyka dwójkowa, opiera się na dychotomii, na wyborze pomiędzy *tak* a *nie*, na ustalaniu, czy coś należy do pewnej klasy, czy do niej nie należy. Argumenty uzasadniające jego wyższość nad innymi mają ten sam charakter, co argumenty uzasadniające wyższość arytmetyki dwójkowej nad innymi rodzajami arytmetyki.

Tak więc, wszystkie dane numeryczne lub logiczne wprowadzane do maszyny mają postać zbioru decyzji wyboru pomiędzy dwoma alternatywnymi możliwościami, a wszystkie operacje na tych danych polegają na uzależnieniu zbioru nowych decyzji od wyników decyzji poprzednich. Kiedy dodajemy do siebie dwie jednocyfrowe liczby A i B, otrzymamy w wyniku dwucyfrową liczbę zaczynającą się od 1 jeśli zarówno A jak i B są równe 1, a zaczynają się od 0 w przeciwnym przypadku. Jeśli $A \neq B$, to drugą cyfrą jest 1, w przeciwnym przypadku cyfrą tą jest 0. Dodawanie liczb więcej niż jednocyfrowych podlega podobnym, choć bardziej złożonym zasadom. Mnożenie liczb w systemie dwójkowym można sprowadzić (podobnie jak w systemie dziesiętnym) do posługiwania się tabliczką mnożenia i dodawania a reguły mnożenia liczb dwójkowych są szczególnie proste i można je opisać za pomocą następującej tabeli:

×	0	1
0	0	0
1	0	1

(5.08)

Mnożenie jest zatem po prostu metodą określania zbioru nowych cyfr na podstawie danego zbioru cyfr „starych".

Przejdźmy do operacji logicznych. Jeśli O oznacza decyzję negatywną, a I pozytywną, to każdy operator logiczny da się wyprowadzić z trzech

następujących operatorów *negacji*, która przekształca *I* w *O*, a *O* w *I*; *dodawania logicznego*, opisanego tabelką

$\oplus$	*O*	*I*
O	*O*	*I*
I	*I*	*I*

(5.09)

oraz *mnożenia logicznego*, które można opisać tabelką identyczną z tabelką arytmetycznego mnożenia w systemie zero-jedynkowym, a mianowicie

$\odot$	*O*	*I*
O	*O*	*O*
I	*O*	*I*

(5.10)

Znaczy to, że każda sytuacja, która może powstać w czasie pracy maszyny wymaga po prostu dokonania nowych decyzji wyboru między dwoma możliwościami: *I* oraz *O*, przy czym decyzje te zależne są w sposób zgodny z ustalonymi regułami od decyzji podjętych poprzednio. Innymi słowy maszyna jest zespołem przełączników, z których każdy może przyjmować dwa położenia („włączone" i „wyłączone") i każdy z nich przyjmuje w każdym kroku obliczeń takie położenie, jakie narzucają mu położenia niektórych (lub wszystkich) przełączników w kroku poprzednim. Kolejne kroki obliczeń można „taktować" za pomocą centralnego zegara (lub zegarów) lub można wstrzymywać działanie każdego przełącznika do chwili, kiedy wszystkie przełączniki biorące udział we wcześniejszych etapach obliczeń zakończą przechodzenie przez wyznaczone im stany.

Przełączniki stosowane w maszynach liczących mogą mieć bardzo różny charakter. Mogą być one urządzeniami czysto mechanicznymi lub elektromechanicznymi, jak przekaźniki elektromagnetyczne, w których pewien element pozostaje w jednym z dwóch możliwych położeń równowagi aż do chwili, gdy odpowiedni impuls przerzuci go w drugie położenie. Mogą mieć one charakter układów czysto elektrycznych o dwóch stanach równowagi, jak lampy gazowane lub — o wiele szybciej działające — lampy próżniowe. Przy braku zewnętrznych bodźców albo oba stany wyróżnione układu przełączającego są stabilne, albo jeden z nich jest stabilny, a drugi —

przejściowy. W drugim przypadku zawsze, a pierwszym często, pożądane jest mieć urządzenie, które podtrzymywałoby impuls tak, by mógł być on wykorzystany w przyszłości i chroniłoby system przed „zatkaniem się", grożącym wówczas, gdy jeden z przełączników nie robi nic innego tylko w nieskończoność powtarza swój własny stan. Zagadnieniu temu, a jest to zagadnienie pamięci, poświęcimy więcej miejsca później.

Warto zauważyć, że ludzki i zwierzęcy układ nerwowy, o którym wiemy, że może działać jako układ liczący, zawiera elementy idealnie nadające się do pracy jako układy przełączające. Elementami tymi są tak zwane *neurony*, czyli komórki nerwowe. Ich zachowanie się pod wpływem prądu elektrycznego jest dość złożone, jednakże ich normalne, fizjologiczne działanie pozostaje w bardzo ścisłej zgodności z zasadą „wszystko albo nic". Znaczy to, że neuron znajduje się albo w stanie spoczynku, albo w stanie pobudzenia, przy czym pobudzenie powoduje serię zmian prawie niezależnych od charakteru i natężenia bodźca. Po pierwszej, aktywnej fazie pobudzenia, która przenosi się od jednego do drugiego końca neuronu ze skończoną prędkością, natępuje okres refrakcji, w czasie którego neuron nie może zostać ponownie pobudzony, w każdym razie nie w normalny, fizjologiczny sposób. Po upływie tego okresu komórka nerwowa pozostaje w stanie nieaktywnym, lecz może znowu ulegać pobudzeniu.

Nerw można zatem uważać za przełącznik o dwóch w zasadzie stanach aktywności: stanie pobudzenia i stanie spoczynku. Każdy nerw (poza tymi, które odbierają sygnały z wolnych zakończeń, czyli z narządów zmysłów) otrzymuje sygnały od innych neuronów za pośrednictwem punktów stykowych, zwanych *synapsami*. Liczba synaps dla danego neuronu odprowadzającego waha się od kilku aż do kilkuset. To, czy neuron zostanie pobudzony, czy nie, zależy właśnie od stanu impulsów przychodzących do jego synaps i od poprzedniego stanu samego neuronu. Jeśli nie jest on w fazie pobudzenia ani w okresie refrakcji, a liczba synaps pobudzonych jednocześnie w ciągu bardzo krótkiego przedziału czasu przekracza pewien próg, to neuron zostaje pobudzony po znanym, prawie stałym czasie opóźnienia synaptycznego.

Naszkicowany obraz jest może nieco zbyt uproszczony, „próg" pobudzenia może zależeć nie tylko od liczby synaps, lecz także od ich „wag" i ich geometrycznego wzajemnego ułożenia w stosunku do neuronu z którym się stykają. Istnieją również bardzo przekonywające dowody na to,

że istnieją pewne synapsy, zwane „synapsami hamującymi", mające odmienny charakter. Mogą one całkowicie uniemożliwiać pobudzenie neuronu albo co najmniej podnoszą wartość progu pobudzenia neuronu przez synapsy zwykłe. Jest jednak rzeczą dość oczywistą, że pewne kombinacje impulsów w neuronach, połączonych z danym neuronem, powodują jego pobudzenie, a inne nie. Nie znaczy to, że nie mogą istnieć inne, nie neutronowe zjawiska — choćby natury humoralnej — które wywołują powolne zmiany, prowadzące do tego, że coraz to inne kombinacje impulsów są potrzebne do pobudzenia.

Bardzo ważną właściwością układu nerwowego, a jak wspomnieliśmy potrzebną także w maszynach liczących, jest zdolność *pamiętania*, to znaczy przechowywania rezultatów pewnych działań w celu ich wykorzystania w przyszłości. Przekonamy się, że różnych sposobów użytkowania pamięci znamy bardzo wiele i jest mało prawdopodobne, by jakiś jeden mechanizm mógł sprostać wymaganiom każdego z nich. Pewien rodzaj pamięci jest potrzebny przy wykonywaniu bieżącej czynności, takiej jak mnożenie, gdzie wyniki pośrednie przestają mieć wartość w chwili zakończenia procesu, a urządzenie liczące należy zwolnić dla dalszych obliczeń. Tego rodzaju pamięć powinniśmy móc szybko zapisywać, szybko odczytywać i szybko wymazywać. Z drugiej strony, istnieje pamięć, która ma stanowić część większego zbioru trwale zarejestrowanej informacji, potrzebnej maszynie lub mózgowi, stanowiącej podstawę całego przyszłego zachowania się przynajmniej w ramach jednego „seansu" działania maszyny. Zauważmy na marginesie, że między sposobem korzystania z maszyny a sposobem korzystania z mózgu istnieje bardzo ważna różnica: maszyną zamierzamy posługiwać się wielokrotnie, każdy „seans" jej pracy nie zależy (lub zależy w minimalnym stopniu) od poprzedniego tak, że pomiędzy kolejnymi okresami pracy można ją „wyzerować", natomiast mózgu nie można w normalnej sytuacji nawet w przybliżeniu oczyścić z zarejestrowanej w nim informacji. Mózg stanowi zatem w normalnych warunkach nie odpowiednik maszyny liczącej, lecz raczej odpowiednik pojedynczego „seansu" pracy takiej maszyny. Przekonamy się później, że to spostrzeżenie ma głębokie znaczenie dla psychopatologii i psychiatrii.

Wracając do zagadnienia pamięci zauważmy, że bardzo dobrym sposobem na zbudowanie pamięci krótkookresowej jest przetrzymanie ciągu impulsów tak, by krążyły one w zamkniętym obwodzie dopóty, dopóki

obwód nie zostanie przerwany przez interwencję z zewnątrz. Wiele przemawia za tym, że taki właśnie proces zachodzi w naszym mózgu w czasie zjawiska polegającego na przedłużaniu czasu trwania impulsów i znanego pod nazwą powidoków [1]. Metodę tę naśladowano w kilku urządzeniach, które zastosowano następnie w maszynach liczących. Urządzenie takie powinno spełniać dwa warunki: po pierwsze impuls powinien przechodzić przez ośrodek, w którym można w stosunkowo łatwo uzyskać znaczne opóźnienie, po drugie jego kształt należy odtworzyć z możliwie wielką wyrazistością, zanim zakłócenia nieodłącznie związane z działaniem aparatury spowodują zbyt znaczne zniekształcenie. Pierwszy z wymienionych warunków przemawia na niekorzyść urządzeń opartych na opóźnieniu przewodzenia światła, lub nawet w wielu przypadkach na opóźnieniu sygnału przez obwody elektryczne, zachęca natomiast do wykorzystania pewnych zjawisk związanych z wibracjami elastycznymi. Drgania te rzeczywiście zostały w tych celach wykorzystane w maszynach liczących. Jeśli do opóźniania impulsów zastosujemy obwody elektryczne, okaże się, że opóźnienie w czasie każdego obiegu jest stosunkowo niewielkie, lub — jak w przypadku wszystkich układów liczących — zniekształcenie sygnału ma charakter kumulatywny i bardzo szybko przekracza dopuszczalne granice. Aby tego uniknąć, musimy uwzględnić drugi warunek i powinniśmy umieścić gdzieś w pętli obiegu sygnału przełącznik, który nie powtarzałby postaci przychodzącego doń sygnału, lecz raczej produkowałby na zasadzie mechanizmu spustowego nowy sygnał o ustalonej z góry formie. Bardzo łatwo osiąga się to w układzie nerwowym, gdzie w istocie całe przenoszenie sygnału jest w mniejszym lub większym stopniu zjawiskiem spustowym. W przemyśle elektrycznym aparaty służące do tego celu są od dawna znane i stosowane w obwodach telegraficznych. Nazywamy je *retransmiterami telegraficznymi*. Podstawowa trudność przy stosowaniu ich w pamięciach o dłuższym czasie przechowywania informacji, polega na tym, że muszą tam one pracować bez zarzutu przez ogromną liczbę cykli. Tym bardziej godny podkreślenia jest fakt, że urządzenie tego rodzaju o jednostkowym opóźnieniu rzędu setnej części sekundy, wchodzące w skład aparatury zbudowanej przez Williamsa z University of Manchester, pracowało sprawnie przez kilka godzin. Sukces ten zasługuje na uwagę jeszcze dlatego, że aparatura ta nie

[1] W oryginale *specious present* (Przyp. tłum.).

przechowywała jedynie pojedynczego wyniku decyzji, pojedynczego „tak" lub „nie", lecz treść tysięcy takich decyzji.

Podobnie jak inne typy urządzeń służących do przechowywania wielkiej liczby decyzji, również i to urządzenie pracuje na zasadzie wybierania (*scanning*). Jednym z najprostszych sposobów na przechowanie informacji przez stosunkowo krótki czas jest naładowanie kondensatora. Jeśli uzupełnimy układ retransmiterem, to otrzymamy całkowicie zadowalającą pamięć. Aby wykorzystać możliwie najpełniej obwody dołączone do takiego układu pamiętającego powinniśmy mieć możliwość bardzo szybkiego przełączania retransmitera kolejno z jednego kondensatora na inny. W zwyczajnych urządzeniach, służących do przełączania, występuje zjawisko mechanicznej bezwładności elementów, które zawsze uniemożliwia bardzo szybkie działanie. Znacznie lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie wielkiej liczby kondensatorów, w których jedną elektrodę stanowi mała płytka metalu napylona na warstwie dielektryku lub niedokładnie izolująca powierzchnia samego dielektryka, a jednym z odprowadzeń z elektrod kondensatora jest strumień promieni katodowych, poruszający się pod wpływem kondensatorów i magnesów układu odchylającego, tak jak porusza się pług po zaorywanym polu. Istnieją różne praktyczne warianty tej metody. Została ona wykorzystana w nieco odmienny sposób przez Radio Corporation of America, zanim zastosował ją Williams.

Omówione wyżej metody zapamiętywania informacji umożliwiają przechowanie sygnału przez dość znaczny czas, może nawet porównywalny z czasem ludzkiego życia. Mamy również do wyboru szerokie możliwości rejestrowania informacji w sposób jeszcze bardziej trwały. Nawet pomijając tak niewygodne, wolne i niewymazywalne rodzaje pamięci, jak karty dziurkowane i taśma dziurkowana, mamy do dyspozycji taśmę magnetyczną ze wszystkimi jej najnowszymi ulepszeniami, eliminującymi w znacznym stopniu tendencję „rozpływania" się sygnałów w materiale magnetycznym; substancje fosforyzujące, a przede wszystkim fotografię. Fotografia jest doprawdy idealna pod względem trwałości i szczegółowości zapisu, tym bardziej, że jednocześnie czas potrzebny do zarejestrowania obserwowanej wielkości jest krótki. Ma ona jednak dwie poważne wady: po pierwsze czas potrzebny do wywołania, jakkolwiek skrócono go już do kilku sekund, jest wciąż zbyt długi na to, by fotografia miała posłużyć do realizacji pamięci krótkotrwałej, po drugie w chwili obecnej (1947) zapisu fotograficznego

nie można szybko wymazać tak, by można było szybko umieścić na jego miejscu nowy zapis. Pracownicy firmy Eastman pracują nad tymi właśnie problemami. Nie wydaje się, by były one nierozwiązalne i jest możliwe, że znajdą się sposoby ich rozwiązania.

Bardzo wiele spośród omówionych tutaj metod przechowywania informacji ma jeden wspólny ważny aspekt fizyczny. Jak się wydaje, opierają się one na zastosowaniu układów o silnej degeneracji kwantowej, czyli inaczej mówiąc, o wielkiej liczbie rodzajów drgań tej samej częstotliwości. Stwierdzenie to jest z pewnością prawdziwe zarówno w przypadku ferromagnetyzmu, jak i w przypadku materiałów o wyjątkowo wielkiej stałej dielektrycznej, które z tego właśnie powodu nadają się szczególnie dobrze do zastosowania w kondensatorach służących do przechowywania informacji. Fosforescencja jest również zjawiskiem związanym z silną degeneracją kwantową, a podobne efekty występują także w procesach fotograficznych, gdzie wiele spośród substancji działających jako wywoływacze ma znaczny rezonans wewnętrzny. Wydaje się, że degeneracja kwantowa wiąże się ze zdolnością wywoływania przez małe zmiany stabilnych i znacznych efektów. Z rozdziału II wiemy, że substancje o silnej degeneracji kwantowej pojawiają się w licznych procesach związanych z przemianą materii i rozmnażaniem się. Najprawdopodobniej nie jest dziełem przypadku, że tu, w środowisku materii nieożywionej, odkrywamy ich związki z trzecią podstawową właściwością charakterystyczną dla materii żywej, ze zdolnością do odbierania impulsów, organizowania ich i wywierania za ich pośrednictwem wpływu na otoczenie.

Na przykładzie fotografii i zbliżonych do niej procesów przekonaliśmy się, że można przechować sygnał w postaci trwałych zmian pewnych elementów pamiętających. Wprowadzając tę informację do układu musimy spowodować, by zmiany te wywierały wpływ na sygnały przechodzące przez układ. Najprościej byłoby w tym celu mieć takie elementy pamiętające, które normalnie uczestniczyłyby w przesyłaniu sygnałów, i byłyby jednocześnie tej natury, by zmiana ich właściwości, spowodowana zapamiętaniem informacji wpływała w przyszłości na sposób przenoszenia przez nie sygnałów. W układzie nerwowym elementami tego rodzaju są neurony i synapsy. Wydaje się dość prawdopodobne, że informacja jest przechowywana przez dłuższy czas w postaci zmian wartości progów pobudzania neuronów lub, co można uważać za określenie tego samego innymi słowami,

w postaci zmian przewodności każdej synapsy. Przy braku lepszego wytłumaczenia wielu z nas przypuszcza, że przechowywanie informacji przez mózg polega właśnie na tym. Można sobie wyobrazić, że taki sposób zapamiętywania polega na otwieraniu pewnych nowych lub zamykaniu pewnych starych dróg przepływu informacji. Ustalono w przekonywający sposób, że w mózgu od chwili narodzin nie tworzą się żadne nowe neurony. Jest rzeczą możliwą, choć nie pewną, że nie powstają również żadne nowe synapsy. Słuszne jest także na pozór przypuszczenie, że zasadnicze zmiany progu pobudzenia w czasie procesu zapamiętywania polegają na zwiększaniu jego wartości. Gdyby tak było naprawdę, nasze życie przebiegałoby na wzór balzakowskiego *Peau de Chagrin* i sam proces zapamiętywania i uczenia się wyczerpywałby możliwości zapamiętywania i uczenia się dopóty, dopóki samo życie nie roztrwoni naszego początkowego zapasu energii życiowej. Możliwe, że zjawisko to nie występuje w rzeczywistości. Jest to tylko jeden z możliwych sposobów wyjaśniania procesu starzenia się. W rzeczywistości starość jest jednak zjawiskiem zbyt skomplikowanym, by można było wyjaśnić je przy pomocy tylko takiego rozumowania.

Nazwaliśmy już poprzednio maszynę liczącą, a zatem i mózg, maszyną logiczną. Z pewnością warto zastanowić się, jakie światło rzucają na logikę takie naturalne czy sztuczne maszyny. Podstawowa praca na ten temat jest dziełem Turinga[1]. Wspomnieliśmy poprzednio, że *machina ratioconatrix*, to nic innego, tylko *calcuclus ratiocinator* Leibniza ucieleśniony w formie mechanizmu, a skoro współczesna logika matematyczna wywodzi się z tego rachunku, to jest rzeczą nieuniknioną, że jego obecny odpowiednik techniczny musi rzucić pewne nowe światło właśnie na logikę. Nauka dnia dzisiejszego ma charakter operatywny, to znaczy uważa, że każde wypowiadane przez nią sformułowanie dotyczy w istocie jakiegoś eksperymentu lub obserwowalnego procesu. Zgodnie z tym stanowiskiem, badania nad logiką muszą sprowadzić się do badań maszyny logicznej ze wszystkimi jej niedoskonałościami i ograniczeniami.

Niektórzy czytelnicy mogą powiedzieć, że sprowadza się w ten sposób logikę do psychologii, a obie te nauki różnią się od siebie w zauważalny i wykazywalny sposób. Zdanie to jest prawdziwe w tym sensie, że liczne

[1] Turing A. M., *On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem*, „Proceedings of the London Mathematical Society", Ser. 2, 42 (1936), str. 230 - 265.

stany psychologiczne i liczne ciągi myślowe nie pozostają w zgodzie z kanonami logiki. Psychologia zawiera wiele tego, co jest obce logice, lecz — i to jest ważne — każda logika, która coś dla nas znaczy nie może zawierać niczego, czego ludzki umysł, a zatem ludzki układ nerwowy, nie byłby w stanie objąć. *Cała logika jest ograniczona tym co stanowi ograniczenie ludzkiego umysłu wówczas, gdy zajmuje się on czynnością zwaną logicznym myśleniem.*

Znaczna część matematyki jest na przykład poświęcona rozważaniom związanym z pojęciem nieskończoności, jednakże rozważania te i towarzyszące im dowody nie są w istocie nieskończone. Żaden uznany dowód nie składa się z więcej niż skończonej liczby kroków. Stwierdzenie to jest prawdziwe. Wydaje się nam wprawdzie, że dowód oparty na zasadzie indukcji matematycznej zawiera nieskończoną ilość kroków, ale dzieje się tak tylko na pozór. W rzeczywistości zawiera on tylko następujące kroki:

1. P_n jest twierdzeniem zawierającym liczbę n.
2. Dowodzi się, że P_n jest prawdziwe dla $n=1$.
3. Jeśli P_n jest prawdziwe, to P_{n+1} jest prawdziwe.
4. Zatem P_n jest prawdziwe dla każdej naturalnej liczby n.

Prawdą jest, że gdzieś pośród naszych założeń logicznych musi znajdować się takie, które uprawnia w naszych oczach ten sposób rozumowania. Niemniej jednak przedstawiona wyżej indukcja matematyczna różni się znacznie od indukcji zupełnej na nieskończonym zbiorze. Stwierdzenie to pozostaje prawdziwe również w odniesieniu do bardziej udoskonalonych form indukcji matematycznej, takich, jak np. indukcja pozaskończona, występująca w pewnych działach matematyki.

Powstaje zatem bardzo ciekawa sytuacja. Mając wystarczająco dużo czasu i dysponując wystarczającymi pomocami obliczeniowymi możemy być w stanie udowodnić każdy szczególny przypadek twierdzenia P_n, jednakże, jeśli nie ma żadnego systematycznego sposobu na podporządkowanie tych dowodów jednemu schematowi rozumowania, niezależnemu od n (przy indukcji matematycznej mieliśmy do czynienia z takim podporządkowaniem), to może okazać się niepodobieństwem udowodnić P_n dla *wszystkich* n. Na tę możliwość zwróciła uwagę metamatematyka, dziedzina tak znakomicie rozwinięta przez Gödela i jego szkołę.

Dowód jest to logiczny proces, dzięki któremu dochodzimy do określonego wniosku za pomocą skończonej liczby kroków. Jednakże maszyna

logiczna działająca według określonych reguł nie musi koniecznie zawsze dojść do ostatecznego wniosku. Może ona przechodzić przez różne kroki postępowania nie zbliżając się do punktu końcowego, jeżeli postępuje według wzorca zachowania o wciąż rosnącej złożoności lub jeśli wpadnie w powtarzalny proces zbliżony do pata, końcówki szachowej z cyklicznie powtarzającym się szachem. Sytuacja taka występuje w przypadku niektórych paradoksów Cantora i Russella. Rozważmy klasę wszystkich klas, które nie zawierają same siebie. Czy ta klasa jest elementem samej siebie? Jeśli tak, to nie jest ona na pewno elementem samej siebie, jeśli nie, to z równą pewnością jest elementem samej siebie. Maszyna, która miałaby odpowiedzieć na to pytanie dawałaby kolejno przejściowe odpowiedzi: „tak", „nie", „tak", „nie" i nigdy nie doszłaby do stanu równowagi.

Podane przez Bertranda Russella rozwiązanie jego własnych paradoksów polega na tym, że przypisuje się każdemu zdaniu pewną wielkość, tak zwany typ, służący do tego byśmy mogli zróżnicować, na pozór identyczne (formalnie) zdania w zależności do charakteru obiektów, których dotyczą, tzn. w zależności od tego, czy obiekty te są „rzeczami" w najprostszym sensie, klasami „rzeczy", czy klasami klas „rzeczy" itd. Rozwiązanie tego rodzaju paradoksów możemy oprzeć również na przypisaniu każdemu zdaniu parametru, określającego czas, w jakim zdanie to zostało wypowiedziane. W obu przypadkach wprowadzamy coś, co możemy nazwać parametrem uniformizacji i rozwiązujemy w ten sposób niejednoznaczność, wynikającą po prostu z jego pominięcia.

Widzimy zatem, że logika maszyny przypomina logikę ludzką. Wzorując się na Turingu możemy rzucić przy jej pomocy światło na logikę człowieka. Czy maszyna posiada również i tę najbardziej ewidentnie ludzką cechę, jaką jest zdolność uczenia się? Aby przekonać się, że może mieć ona także i tę właściwość, zajmiemy się dwoma ściśle ze sobą związanymi pojęciami, kojarzeniem idei oraz odruchem warunkowym.

W myśl poglądów brytyjskiej empirycznej szkoły filozoficznej od Locke'a do Hume'a uważano, że zawartość ludzkiego umysłu składa się z pewnych elementów, które Locke nazywa ideami, a późniejsi autorzy, ideami i wrażeniami. Zakładano, że proste idee lub wrażenia egzystują w umyśle zupełnie biernym, równie wolnym od wpływu idei, które w sobie mieści, jak czysta tabliczka, wolna od wpływu symboli, które mogą być na niej zapisane. Zakładano, że dzięki pewnemu rodzajowi wewnętrznej aktywności,

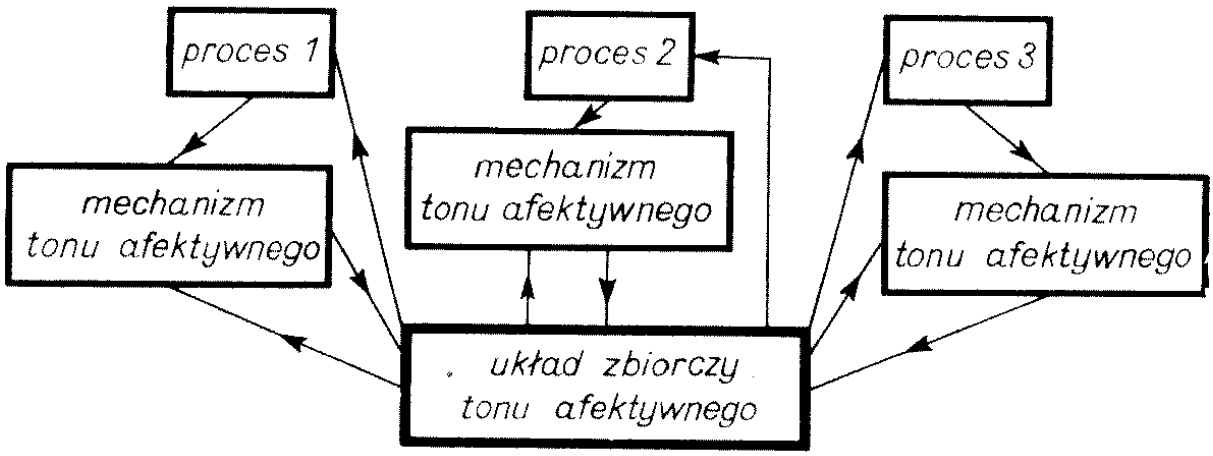
nie zasługującej właściwie na miano siły, idee te łączą się w zespoły zgodnie z zasadami podobieństwa, styczności oraz przyczyny i skutku. Spośród wymienionych zasad najważniejszą jest chyba zasada styczności. Przypuszczano, że idee czy wrażenia występujące często razem w czasie lub przestrzeni mają zdolność wywoływania siebie nawzajem tak, że obecność jednej z nich wytwarza cały ich zespół.

W tym wszystkim kryje się pewna dynamika, jednak idee dynamiki nie przeniknęły wówczas jeszcze z fizyki do nauk biologicznych i psychologicznych. Typowym biologiem osiemnastego wieku był Linneusz, zbieracz i klasyfikator o zapatrywaniach dość przeciwstawnych w stosunku do poglądów ewolucjonistów, fizjologów, genetyków i eksperymentalnych embriologów dzisiejszej doby. Wówczas, gdy tak wiele w świecie było jeszcze do zbadania, stan poglądów biologów doprawdy nie mógł być inny. Podobnie działo się w psychologii, pojęcie treści umysłowej dominowało nad pojęciem procesu umysłowego. Mogło to być spowodowane przetrwaniem scholastycznych poglądów kładących nacisk na substancje. W ówczesnym świecie hipostazowano rzeczownik, a czasownikowi przypisywano małe lub wręcz żadne znaczenie. W każdym razie jest rzeczą zupełnie jasną, że dokonano kroku naprzód: od takich statycznych idei do dzisiejszych, bardziej dynamicznych poglądów, których przykładem jest dzieło Pawłowa. Pawłow pracował więcej na zwierzętach niż na ludziach i rejestrował raczej obserwowalne czynności, niż introspektywne stany umysłu. Ustalił on, że obecność pokarmu powoduje u psów zwiększone wydzielanie śliny i soków żołądkowych. Jeśli więc w obecności pożywienia — i tylko wówczas — demonstruje się psom pewien wizualny obiekt, to widok tego obiektu nabiera takich właściwości, że staje się on sam zdolny do wywołania zwiększonego wydzielenia śliny i soków żołądkowych. Związek na zasadzie styczności, obserwowany introspektywnie przez Locke'a w przypadku idei staje się teraz podobnym związkiem wzorców zachowania.

Istnieje jednak poważna różnica między poglądami Pawłowa i Locke'a, wynikająca właśnie stąd, że Locke zajmuje się ideami, a Pawłow wzorcami działania. Reakcje obserwowane przez Pawłowa mają na celu doprowadzenie pewnego procesu do pomyślnego zakończenia — lub uniknięcie katastrofy. Wydzielanie śliny jest ważne dla połykania i trawienia, a unikanie bodźca bólowego ma na celu ochronę zwierzęcia przed urazem

ciała. W odruchu warunkowym pojawia się zatem coś, co możemy nazwać *tonem afektywnym*. Nie musimy tego kojarzyć z naszymi własnymi odczuciami przyjemności i bólu ani z tym, co jest korzystne dla zwierzęcia. Zasada polega na tym, że ton afektywny jest ustawiony na pewnego rodzaju skali rozciągającej się od ujemnego „bólu" do dodatniej „przyjemności"; że przez znaczny czas lub zawsze, zwiększenie tonu afektywnego uprzywilejowuje wszystkie procesy, które w danej chwili przebiegają w układzie nerwowym, dając im wtórną zdolność zwiększania tonu afektywnego, a zmniejszenie tonu afektywnego hamuje biegnące w danej chwili procesy i daje im wtórną zdolność zmniejszania tonu afektywnego.

Mówiąc językiem bardziej biologicznym, wyższy ton afektywny występuje oczywiście przede wszystkim w sytuacjach korzystnych dla przedłużenia istnienia gatunku lub pojedynczego osobnika, a niższy w sytuacjach niekorzystnych lub wręcz grożących zagładą. Każdy gatunek, nie spełniający tego wymagania, będzie zachowywał sie jak Bread-and-Butter-Fly Lewisa Carrolla i zawsze zginie. Tym niemniej nawet u skazanej na zagładę rasy mechanizm ten może działać tak długo, jak długo ona istnieje. Innymi słowy, nawet najbardziej samobójcze zakłócenie mechanizmu tonu afektywnego będzie produkowało określony wzorzec postępowania.



Rys. 7

Zauważmy, że sam mechanizm tonu afektywnego jest mechanizmem ze sprzężeniem zwrotnym. Można nawet podać jego schemat, tak jak to pokazano na rys. 7.

Układ zbiorczy zestawia ze sobą w krótkim przedziale czasu tony afektywne przychodzące z poszczególnych mechanizmów tonu afektyw-

nego, zgodnie z pewną zasadą, której nie musimy teraz precyzować. Połączenia prowadzące do oddzielnych mechanizmów tonu afektywnego służą do modyfikowania wewnętrznego tonu afektywnego każdego z procesów zgodnie z kierunkiem zmian wyjścia układu zbiorczego, przy czym modyfikacja ta trwa dopóty, dopóki nie zmieni się późniejszy sygnał z układu zbiorczego. Połączenia zwrotne prowadzące od układu zbiorczego do mechanizmów poszczególnych procesów służą do obniżania progów, kiedy całkowity ton afektywny wzrasta, a podnoszenia ich, gdy całkowity ton afektywny maleje. Działają one również przez dłuższy czas, dopóty, dopóki nie zmieni ich inny impuls z układu zbiorczego. Taka zasada trwałego działania dotyczy jednak wyłącznie procesów, które rzeczywiście trwają w momencie przyjścia sygnału powrotnego. Podobne ograniczenie obowiązuje również w przypadku oddziaływania na poszczególne mechanizmy tonu afektywnego.

Chciałbym podkreślić, że nie powiedziałem, iż procesy odruchu warunkowego przebiegają zgodnie z podanym wyżej mechanizmem. Mówiłem tylko, że *mogą* one przebiegać w ten sposób. Jeśli jednak przyjmiemy za obowiązujący ten lub inny podobny mechanizm, to będziemy mogli poczynić na jego temat wiele ważnych spostrzeżeń. Jednym z nich jest fakt, że mechanizm taki ma zdolność uczenia się. Stwierdzono już, że odruch warunkowy jest mechanizmem uczenia się, a koncepcję tę wykorzystali behawioryści w badaniach nad uczeniem się szczurów w labiryncie. Musimy przy tym pamiętać jedynie, że występujące w doświadczeniu nagrody i kary mają odpowiednio, dodatni i ujemny wpływ na ton afektywny. Stwierdzenie to jest z pewnością prawdziwe, a eksperymentator poznaje naturę takiego tonu afektywnego poprzez doświadczenie, a nie przez proste rozważania *a priori*.

Innym godnym uwagi punktem rozumowania jest fakt, że w mechanizmie takim występuje pewien zbiór sygnałów, które wysyłane są z układu nerwowego do wszystkich elementów, które są w stanie je odebrać. Taki charakter mają sygnały zwrotne produkowane przez układ zbiorczy, a w pewnym zakresie również sygnały biegnące z mechanizmów tonu afektywnego do układów zbiorczych. W istocie układ zbiorczy nie musi być oddzielnym elementem, może jedynie reprezentować pewien naturalny efekt łączenia się sygnałów przechodzących z poszczególnych mechanizmów tonu afektywnego. Takie sygnały, zaadresowane ogólnie „do wszystkich

zainteresowanych" można przekazywać najbardziej skutecznie i przy najmniejszym koszcie drogami innymi niż nerwowe. Z podobną sytuacją mamy do czynienia w kopalni: jej zwykły system porozumiewania się może składać się z centrali telefonicznej, przewodów i aparatów telefonicznych. Kiedy jednak chcemy pośpiesznie opróżnić kopalnię, nie polegamy na tym systemie, lecz wpuszczamy merkaptan, związek chemiczny o silnym zapachu, do wlotu przewodów wentylacyjnych. Nośniki chemiczne, takie jak ten lub takie jak hormony, są najprostszymi i najbardziej skutecznymi środkami przekazywania wiadomości nie zaadresowanych do konkretnego odbiorcy. Pozwólmy sobie teraz przez chwilę na rozważania, o których wiem, że są czystą fantazją. W wysokim stopniu emocjonalna, a zatem związana z tonem afektywnym treść zjawisk hormonalnych daje nam wiele do myślenia. Nie znaczy to, że „czysto" nerwowy mechanizm nie ma zdolności uczenia się czy reagowania na ton afektywny, jednakże znaczy to, że badając ten aspekt naszej działalności umysłowej nie możemy zamykać oczu na możliwości transmisji hormonalnej. Może zbyt daleko wyjdziemy w sferę fantazji, jeśli powiążemy to spostrzeżenie z faktem, że w teoriach Freuda pamięć, czynność przechowywania informacji w układzie nerwowym, występuje obok płci. Płeć z jednej, a wszystkie treści afektywne z drugiej strony, zawierają bardzo silny czynnik hormonalny. To przypuszczenie co do ważności płci i hormonów podsunęli mi dr J. Letvin i Oliver Selfridge. Jakkolwiek w obecnej chwili nie ma dostatecznego świadectwa, mogącego wykazać jego prawdziwość, to jednak nie jest ono w swej zasadzie jawnym absurdem.

W naturze maszyny liczącej nie ma niczego takiego, co uniemożliwiałoby jej wykazywanie odruchów warunkowych. Pamiętajmy, że w swym działaniu maszyna licząca jest czymś więcej niż tylko zestawem przełączników i mechanizmów pamiętających, które wbudował w nią jej konstruktor. Zawiera ona również zawartość mechanizmów pamiętających, które nigdy nie ulegną zniszczeniu podczas jednego „seansu" pracy. Wspomnieliśmy już, że właśnie jeden „seans" pracy, a nie cała egzystencja mechanicznej struktury maszyny liczącej stanowi odpowiednik życia pojedynczego osobnika. Mówiliśmy również, że jest rzeczą wysoce prawdopodobną, iż w „nerwowej" maszynie liczącej informację przechowuje się w postaci zmian przepuszczalności synaps i że jest całkowicie możliwe budowanie sztucznych maszyn, w których informacja byłaby przechowywana w ten

sam sposób. Jest na przykład rzeczą całkowicie możliwą zbudowanie układu, w którym każdy sygnał przechodzący do pamięci powoduje permanentną lub semi-permanentną zmianę poziomu napięcia początkowego na siatce jednej lub wielu próżniowych lamp elektronowych i w ten sposób modyfikuje liczbową wartość sumacji impulsów, wprawiających lampę (lub lampy) w stan przewodzenia.

Bardziej szczegółowe rozważania na ten temat mechanizmu uczenia się w maszynach liczących i sterujących można pozostawić inżynierom, nie zajmując się nimi w książce o tak wstępnym charakterze, jak ta. Byłoby chyba lepiej poświęcić resztę niniejszego rozdziału bardziej znanym, normalnym dziedzinom zastosowań współczesnych maszyn liczących. Jednym z takich głównych zastosowań jest rozwiązywanie równań różniczkowych cząstkowych. Już liniowe równania różniczkowe cząstkowe wymagają zarejestrowania ogromnej masy danych, ponieważ dane te zawierają dokładny opis funkcji jednej lub więcej zmiennych. W przypadku równań typu hiperbolicznego, jak równanie falowe, typowy problem polega na rozwiązaniu równania przy znanych danych początkowych i można to wykonać przechodząc w sposób progresywny od danych początkowych do rezultatów. Podobnie dzieje się w przypadku większości równań typu parabolicznego. Jeśli jednak chodzi o równania typu eliptycznego, gdzie naturalnymi danymi są raczej wartości graniczne, a nie wartości początkowe, to naturalne metody ich rozwiązywania polegają na iteracyjnym obliczeniu kolejnych przybliżeń. Proces ten powtarza się bardzo wiele razy tak, że bardzo szybkie metody obliczeniowe, jak te, w których stosuje się nowoczesne maszyny liczące, stają się nieomal koniecznością.

W przypadku nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych tracimy nawet to, co mieliśmy przy równaniach liniowych: odpowiednią, czysto matematyczną teorię. Metody obliczeniowe są tu potrzebne nie tylko po to, by rozwiązywać szczególne, numeryczne przypadki, lecz, jak wykazał von Neumann, po to, byśmy mogli zapoznać się z dużą liczbą szczególnych przypadków, bez których nie bylibyśmy w stanie sformułować ogólnej teorii. W pewnym zakresie posługujemy się przy tym bardzo kosztowną aparaturą doświadczalną, taką jak tunele aerodynamiczne. Możemy w ten sposób poznać bardziej złożone właściwości fal uderzeniowych, powierzchni ślizgowych, zjawisk turbulencji itp., w przypadku których rzadko jesteśmy w stanie sformułować adekwatną teorię matematyczną.

Nie wiemy jak wiele jest nieodkrytych jeszcze zjawisk podobnej natury. Maszyny analogowe są o tyle mniej dokładne i w wielu przypadkach o tyle wolniejsze od cyfrowych, że raczej właśnie w maszynach cyfrowych pokładamy większe nadzieje na przyszłość.

Staje się już rzeczą oczywistą, że stosowanie tych nowych maszyn wymaga zupełnie swoistych metod matematycznych, dość odmiennych od tych, na których opierają się przy obliczeniach ręcznych lub wykorzystujących maszyny o mniejszych możliwościach. Na przykład nawet zastosowanie maszyn do obliczania wyznaczników umiarkowanie wysokiego rzędu lub do rozwiązywania układów dwudziestu lub trzydziestu równań liniowych ujawnia trudności, które w ogóle nie pojawiają się przy analogicznych problemach niższego rzędu. Dopóki nie poświęci się więcej uwagi samemu ustawieniu problemu, to trudności te mogą zupełnie uniemożliwić rozwiązanie jakichkolwiek bardziej istotnych zagadnień. Truizmem jest stwierdzenie, że tak doskonałe, efektywne narzędzie jak ultraszybkie maszyny liczące są nie na miejscu w rękach ludzi, których techniczne umiejętności nie są na tyle wysokie, by mogli je w pełni wykorzystać. Pojawienie się ultraszybkich maszyn liczących nie zmniejsza na pewno zapotrzebowania na matematyków o wysokim poziomie umiejętności i wyszkolenia technicznego.

Przy mechanicznej lub elektrycznej konstrukcji maszyn liczących obowiązuje kilka reguł, które zasługują na uwagę. Jedna z nich mówi, że stosunkowo często używane mechanizmy, takie, jak mechanizm mnożący lub dodający, powinny mieć postać względnie znormalizowanych podzespołów, przystosowanych do jednego tylko sposobu użytkowania, podczas gdy mechanizmy używane rzadziej powinny być zestawiane na czas pracy z elementów, które są również dostępne dla innych celów. Z tą uwagą jest ściśle związana inna zasada: części takich mechanizmów o szerszym zastosowaniu powinny być szerzej dostępne, zgodnie z ich uniwersalnymi właściwościami, i nie powinny być łączone na stałe z innymi fragmentami urządzenia. W skład urządzenia powinna wchodzić pewna część, zbliżona działaniem do automatycznej centrali telefonicznej, która wyszukiwałaby wolne części składowe i elementy łączące i przydzielałaby je zgodnie z bieżącymi potrzebami. Wyeliminowałoby to znaczną część kosztu, jaki płacimy za posiadanie wielkiej liczby elementów, które są wykorzystywane tylko wówczas, gdy wykorzystany jest cały duży zespół, do którego należą.

Zauważmy na zakończenie, że wielka maszyna licząca, czy to mająca postać aparatu mechanicznego lub elektrycznego, czy też nawet mózgu, zużytkowuje znaczną ilość energii, która cała ulega zniszczeniu i zostaje rozproszona w postaci ciepła. Krew odpływająca z mózgu jest o ułamek stopnia cieplejsza, niż krew dopływająca do mózgu. Żadna inna maszyna licząca nie zbliża się nawet do takiego poziomu oszczędności energii, jak mózg. W wielkich urządzeniach, takich jak Eniac lub Edvac, obwody żarzenia lamp zużywają energię mierzoną w kilowatach i jeśli nie zapewni się odpowiednich urządzeń do wentylacji i chłodzenia, cały układ zacznie mieć coś w rodzaju „maszynowej gorączki", aż wreszcie parametry maszyny zmienią się w zasadniczy sposób pod wpływem ciepła i przestanie ona sprawnie działać. Niemniej jednak energia zużywana w ramach pojedynczej operacji jest prawie znikomo mała i jej wielkość nie może stanowić adekwatnej miary sprawności urządzenia. Mechaniczny mózg nie wydziela myśli, jak wątroba wydziela żółć (był to pogląd wczesnych materialistów), ani nie nadaje im formy energii tak, jak mięsień. Informacja jest informacją, a nie sprawą energii. Żaden materializm, który nie zgadza się z tym stwierdzeniem nie może przetrwać w dzisiejszych czasach.

VI

GESTALT I POJĘCIA OGÓLNE

Pośród zagadnień, którymi zajmowaliśmy się w poprzednim rozdziale, znalazła się możliwość powiązania mechanizmów nerwowych z teorią Locke'a kojarzenia idei. Według Locke'a kojarzenie to zachodzi zgodnie z trzema zasadami: zasadą styczności, zasadą podobieństwa i zasadą skutku i przyczyny. Trzecią z nich sprowadził Locke, a jeszcze bardziej zdecydowanie Hume po prostu do stałego współistnienia, podporządkowując ją w ten sposób zasadzie styczności. Zasada druga podobieństwa zasługuje jednak na bardziej szczegółową dyskusję.

Jak to się dzieje, że rozpoznajemy tożsamość rysów twarzy człowieka, niezależnie od tego, czy widzimy go z profilu, czy en face, czy w ustawieniu trzy-czwarte? W jaki sposób rozpoznajemy, że koło jest kołem, niezależnie od tego, czy jest ono duże, czy małe, blisko czy daleko od nas; wreszcie niezależnie od tego, czy leży ono w płaszczyźnie prostopadłej do linii łączącej nasze oko z jego środkiem — i wygląda jak koło, czy też jest inaczej zorientowane w przestrzeni — i wygląda jak elipsa? W jaki sposób rozpoznajemy twarze, zwierzęta czy kontury lądów w kształtach chmur lub w plamach testu Rorschacha? Wszystkie wymienione przykłady dotyczą wzroku, lecz podobne zagadnienia rozciągają się również na inne zmysły, a niektóre z nich dotyczą relacji między różnymi zmysłami. Na jakiej zasadzie wyrażamy słowami głosy ptaków lub brzęczenie owadów? W jaki sposób rozpoznajemy dotykiem, że moneta jest okrągła?

Ograniczymy się na razie do zmysłu wzroku. Jednym z ważnych czynników przy porównywaniu postaci różnych obiektów jest z pewnością współdziałanie między okiem a różnymi rodzajami mięśni: mieśniami

znajdującymi się wewnątrz gałki ocznej, mięśniami poruszającymi gałką oczną, poruszającymi głową, czy wreszcie poruszającymi całym ciałem. Pewien rodzaj wzrokowo-mięśniowego układu sprzężenia zwrotnego występuje już u tak niskich przedstawicieli królestwa zwierząt, jak robaki płaskie. Ich ujemny fototropizm, tendencja do unikania światła jest, jak się wydaje, sterowany na zasadzie kompensacji impulsów przychodzących z dwóch plamek wzrokowych. Sygnał kompensacyjny jest podawany zwrotnie do mięśni tułowia, które odwracają ciało zwierzęcia od światła i w połączeniu z ogólnym impulsem nakazującym poruszanie się naprzód powodują przemieszczenie się zwierzęcia w najciemniejszy z dostępnych rejonów. Ciekawą jest rzeczą zauważyć, że połączenie dwóch fotokomórek wyposażonych w odpowiednie wzmacniacze, z mostkiem Wheatstone'a służącym do kompensacji ich sygnałów wyjściowych i innymi wzmacniaczami produkującymi sygnały wejściowe dla dwóch silników mechanizmu napędowego o dwóch śrubach stanowi prawidłowy układ sterowania dla małej łodzi, wykazujący cechy ujemnego fototropizmu. Byłoby rzeczą trudną lub wręcz niemożliwą sprowadzić ten mechanizm do wymiarów takich, jak ciało robaka, jednakże stanowi to tylko jeszcze jedno potwierdzenie znanego już czytelnikowi faktu, że organizmy żywe mają wymiary o wiele mniejsze, niż mechanizmy dopasowane do możliwości ludzkich metod konstrukcyjnych, jednak z drugiej strony elektrotechnika daje sztucznym mechanizmom znaczną przewagę w dziedzinie szybkości nad organizmami żywymi.

Omijając wszystkie stadia pośrednie przejdźmy od razu do sprzężeń wzrokowo-mięśniowych u człowieka. Niektóre z nich mają charakter czysto homeostatyczny: źrenica oka rozszerza się w ciemności, a zwęża w pomieszczeniu oświetlonym, dzięki czemu strumień światła dobiegającego do oka utrzymuje się w granicach węższych, niż byłoby to bez tego zjawiska możliwe. Działanie innych wiąże się z faktem, że w ludzkim oku najlepsze widzenie kształtu i barwy ogranicza się do stosunkowo małego obrazu dołka środkowego, natomiast percepcja ruchu jest lepsza w zewnętrznych partiach siatkówki. W momencie, kiedy zewnętrzna część siatkówki wychwyci obiekt o podejrzanej jasności, kontrastowości, barwie a zwłaszcza ruchu, uruchamia się odruchowe sprzężenie zwrotne, przenoszące ten obiekt na obszar dołka środkowego. Sprzężeniu temu towarzyszy złożony system podległych mu, wzajemnie splatających się sprzę-

żeń, mających na celu ustawienie zbieżności oczu tak, by przyciągający uwagę obiekt znalazł się w takiej samej części pola widzenia każdego z nich, oraz ustawienie ogniskowania soczewek tak, by kontury stały się możliwie ostre. Czynnościom tym towarzyszą ruchy głowy i całego ciała, dzięki którym przenosimy obiekt do centrum pola widzenia, jeśli nie da się tego dokonać za pomocą ruchu samych tylko gałek ocznych lub dzięki którym przenosimy na obszar pola widzenia obiekt, który znajdował się dotąd poza nim, a został wychwycony przez jakiś inny zmysł. W przypadku obiektów, które bardziej przyzwyczailiśmy się oglądać w jednym położeniu kątowym (pismo, ludzkie twarze, krajobrazy, itp.) istnieje również mechanizm, który usiłuje sprowadzić je do właściwego położenia.

Wszystkie te procesy można podsumować jednym zdaniem: każdy obiekt, który przyciąga naszą uwagę usiłujemy sprowadzić do standardowego położenia i orientacji w przestrzeni tak, aby obraz wzrokowy, który sobie na jego podstawie wytwarzamy, ulegał zmianom w możliwie jak najmniejszym zakresie. Nie wyczerpuje to klasy procesów, które biorą udział w postrzeganiu formy i znaczenia obiektu, na pewno jednak ułatwia wszystkie dalsze procesy, które właśnie do tego zmierzają. Te dalsze procesy przebiegają w oku i w korze wzrokowej. Istnieją poważne dowody na to, że każdy krok takiego procesu zmniejsza liczbę kanałów neuronowych, biorących udział w przekazywaniu informacji wzrokowej i zbliża o trochę tę informację do postaci, w jakiej jest ona wykorzystywana i przechowywana w pamięci.

Pierwszy etap takiej koncentracji informacji wzrokowej ma miejsce przy przejściu między siatkówką a nerwem wzrokowym. Zauważmy, że na obszarze dołka środkowego liczba włókien nerwu wzrokowego jest prawie równa liczbie czopków i pręcików, natomiast w zewnętrznych partiach siatkówki jedno włókno nerwu wzrokowego odpowiada dziesięciu lub więcej fotoreceptorom. Jest to dość zrozumiałe w świetle faktu, że podstawową funkcją włókien zewnętrznych jest raczej nie samo widzenie, tylko alarmowanie ogniskująco-nakierowującego mechanizmu oka.

Jednym z najciekawszych zjawisk z dziedziny widzenia jest zdolność do rozpoznawania szkicowych rysunków. Jest rzeczą oczywistą, że rysunek taki, przedstawiający na przykład twarz człowieka, w bardzo nieznacznym tylko stopniu przypomina „prawdziwą" twarz barwą lub rozmieszczeniem

świateł i cieni, niemniej jednak może stanowić doskonale rozpoznawalny portret. Najbardziej, jak się wydaje, wiarygodne wyjaśnienie tego zjawiska polega na tym, że gdzieś w toku procesu widzenia znaczenie konturów obrazu wzrasta, a znaczenie innych jego aspektów maleje. Procesy takie biorą swój początek w samym oku. Siatkówka, podobnie jak inne organy zmysłowe, podlega akomodacji, polegającej na tym, że trwałe utrzymywanie się bodźca zmniejsza zdolność siatkówki do jego odbierania i przenoszenia. Zjawisko to występuje najbardziej wyraźnie w przypadku receptorów, które rejestrują wnętrze wielkiego bloku obrazów o stałej barwie i intensywności, ponieważ wówczas nawet drobne, nieuchronnie związane z widzeniem fluktuacje mechanizmu ogniskowania i ustalania punktu fiksacji nie powodują zmian charakteru odbierającego obrazu. Inaczej dzieje się wtedy, gdy mamy do czynienia z granicą dwóch kontrastujących obszarów. Wspomniane fluktuacje powodują wówczas przechodzenie na przemian od jednego bodźca do drugiego, co (jak dowodzi zjawisko powidoków) nie tylko nie prowadzi do wyczerpania mechanizmu wzrokowego na skutek akomodacji, ale nawet powoduje zwiększenie jego czułości. Opisane zjawisko występuje zarówno wówczas, gdy przylegające do siebie obszary są kontrastowe pod względem natężenia światła, jak i wówczas, gdy różnią się one od siebie barwą. Zauważmy także, że trzy czwarte wszystkich wókien nerwu wzrokowego reaguje jedynie na „włączenie" światła. Stwierdzamy zatem, że oko odbiera najsilniejsze wyrażenia na granicy obszarów, a więc każdy obserwowany przez nas obraz ma w swej naturze coś ze szkicowego rysunku.

Prawdopodobnie nie cały ten proces przebiega w obwodowych partiach układu nerwowego. Z fotografiki wiadomo, że pewne metody obróbki kliszy zwiększają jej kontrastowość. Zjawiska takie, mające charakter nieliniowy, z pewnością nie leżą poza zakresem możliwości układu nerwowego. Są one zbliżone do zjawisk występujących w retransmiterze telegraficznym, o którym wspomnieliśmy już poprzednio. Podobnie jak tam, polegają one na wykorzystaniu wrażenia, które nie zostało jeszcze zbytnio zniekształcone, do produkowania (na zasadzie mechanizmu spustowego) nowego wrażenia o standardowej ostrości. Zjawiska takie zmniejszają w każdym razie całkowitą, bezużyteczną informację niesioną przez obraz i przyczyniającą się prawdopodobnie do zmniejszenia liczby włókien na różnych poziomach kory wzrokowej.

Wyznaczyliśmy w ten sposób kilka rzeczywistych lub przynajmniej prawdopodobnych etapów schematyzowania wrażeń wzrokowych. Ześrodkowujemy obserwowane przez nas obrazy w pobliżu ogniska uwagi i redukujemy je w większym lub mniejszym stopniu do konturów. Musimy teraz porównywać je ze sobą, lub przynajmniej ze standardowymi wyrażeniami takimi, jak „koło" lub „kwadrat", przechowywanymi w pamięci. Można to zrealizować na wiele sposobów. Naszkicowaliśmy już z grubsza, jak można „zmechanizować" Locke'a zasadę styczności. Przypomnijmy, że zasada ta obejmuje w większości inną zasadę Locke'a: zasadę podobieństwa. Różne aspekty tego samego przedmiotu dają się często zaobserwować w toku tych procesów, które wiążą się z ześrodkowaniem uwagi na obiekcie oraz podczas tych ruchów, które prowadzą do oglądania go raz z tej, raz z innej odległości, raz pod tym, a raz pod innym kątem. Jest to zasada ogólna, której zastosowanie nie ogranicza się do jakiegoś konkretnego zmysłu i która ma niewątpliwie wielkie znaczenie dla porównywania naszych bardziej złożonych doświadczeń. Niemniej jednak proces ten nie jest jedynym, który prowadzi do formowania się specyficznie wzrokowych pojęć ogólnych lub, jak nazwałby je Locke, idei złożonych. Nasza kora wzrokowa jest zbyt wysoko zorganizowana, a jej budowa zbyt specyficzna, by wolno było przypuszczać, że działa ona zgodnie z taką, mimo wszystko bardzo ogólnikową zasadą. Pozostaje wrażenie, że mamy tu do czynienia z mechanizmem dość szczególnym, który nie jest podzespołem zestawionym chwilowo z uniwersalnych elementów o wymiennych częściach, lecz podzespołem o charakterze trwałym, zbliżonym do podzespołu dodającego i mnożącego w maszynie liczącej. W takiej sytuacji warto jest zastanowić się, jak podzespół taki mógłby działać i jak moglibyśmy zabrać się do jego zaprojektowania.

Możliwe perspektywiczne przekształcenia obiektu tworzą grupę, w sensie, który już zdefiniowaliśmy w rozdziale II. Grupa ta określa kilka podgrup przekształceń: grupę afiniczną, w ramach której zajmujemy się tylko takimi przekształceniami, które pozostawiają w nietkniętym stanie obszar znajdujący się w nieskończoności; grupę jednorodnych powiększeń względem danego punktu, przy których zachowuje się bez zmian jeden punkt, kierunki osi oraz identyczność skali we wszystkich kierunkach; grupę przekształceń zachowujących długość; grupę obrotów w dwóch lub trzech

wymiarach wokół punktu; zbiór wszystkich przesunięć i tak dalej. Te spośród wszystkich grup, które wymieniliśmy wyżej są ciągłe, co znaczy, że należące do nich operacje są określane przez wartości pewnej ilości zmieniających się w sposób ciągły parametrów w odpowiedniej przestrzeni. Tworzą one zatem wielowymiarowe konfiguracje w przestrzeni *n*-wymiarowej i zawierają podzbiory przekształceń, tworzących obszary takiej przestrzeni.

Obszar zwykłej, dwuwymiarowej przestrzeni można poddać znanemu inżynierom elektronikom procesowi wybierania i w oparciu o ten proces można uważać, że prawie równomiernie rozłożony zbiór punktów próbkowania obszaru reprezentuje cały obszar. Podobnie i tu można opisać każdy obszar przestrzeni grup posługując się procesem *wybierania grupowego*. Proces taki, z pewnością nie ograniczający się do przestrzeni trójwymiarowej, polega na tym, że przebiega się w jednowymiarowej kolejności sieć wyróżnionych punktów przestrzeni, przy czym punkty sieci są rozłożone tak, że znajdują się blisko (w pewnym odpowiednio zdefiniowanym sensie) każdego punktu obszaru; tak blisko jak sobie tego życzymy. Jeśli takie „punkty", czyli zbiory parametrów, zostaną zastosowane do generowania odpowiednich przekształceń, to będzie to znaczyło, że wynik przekształcenia zadanego obszaru przez te przekształcenia będzie tak bliski, jak sobie życzymy, dowolnemu przekształceniu obrazu przez operator przekształcenia leżący w zadanym obszarze. Jeśli nasz proces wybierania jest wystarczająco dokładny, a przekształcony obszar ma największą liczbę wymiarów spośród wszystkich obszarów przekształcanych przez rozpatrywaną grupę, to znaczy to, że przekształcenia, rzeczywiście przebiegane w toku procesu wybierania, dadzą w wyniku obszar nakładający się na dowolny wynik przekształcenia pierwotnego obszaru w takim ułamku jego powierzchni, jaki sobie życzymy.

Zacznijmy zatem od przypadku, w którym mamy do czynienia z ustalonym obszarem wzorcowym i obszarem, który ma być z nim porównany. Jeśli na jakimś etapie procesu przebiegania (wybierania) grupy przekształceń obraz obszaru porównywanego, otrzymany w wyniku jednego z przebieganych przekształceń, jest zgodny z ustalonym wzorcem z dokładnością większą niż założone granice tolerancji, to uznajemy te dwa obszary za podobne do siebie. Jeśli nie zdarzy się to w żadnym z kroków procesu

wybierania, to uznajemy je za niepodobne do siebie. Proces ten nadaje się doskonale do zmechanizowania i może posłużyć jako metoda identyfikacji kształtu obrazu niezależnie od jego wielkości, orientacji w przestrzeni lub wszelkich innych możliwości przekształceń, które mogą należeć do przebieganego obszaru przestrzeni grup.

Jeśli obszar ten nie jest całą przestrzenią, to może się zdarzyć, że obszar A może być uznany za podobny do obszaru B, obszar B podobny do obszaru C, ale obszary A i C uznamy za niepodobne do siebie. Sytuacja taka występuje na pewno w rzeczywistości. Rysunek może nie wykazywać szczególnego podobieństwa do tego samego rysunku odwróconego „do góry nogami" przynajmniej dopóty, dopóki rozważamy wrażenie bezpośrednie, nie wymagające uruchomienia wyższych procesów. Niemniej jednak w każdym kroku czynności odwracania rysunku istnieje spory zakres sąsiednich położeń, które wydają się podobne. Uniwersalne „idee" tworzone na tej zasadzie nie są zatem dokładnie od siebie odgraniczone, lecz przechodzą jedno w drugie w sposób płynny.

Istnieją również bardziej wymyślne metody posługiwania się wybieraniem grupowym dla wyróżnienia przekształceń w grupie. Grupy, którymi się tu zajmujemy, posiadają miarę grupową, gęstość prawdopodobieństwa, zależną jedynie od samej grupy przekształceń, nie zmieniającą się natomiast wówczas, gdy wszystkie przekształcenia grupy ulegną modyfikacji na skutek poprzedzenia ich lub następowania po nich dowolnego określonego przekształcenia z tej samej grupy. Można zatem w procesie wybierania przebiegać grupę tak, by gęstość wybierania dowolnego obszaru ze znacznej ich klasy, to znaczy czas, jaki zmienny element wybierający zużywa na przebywanie w granicach danego obszaru podczas jednego pełnego obiegu całej grupy, była ściśle proporcjonalna do jego miary. Przypuśćmy, że w przypadku takiego równomiernego wybierania istnieje pewna wielkość zależna od zbioru S elementów przekształcanych przez grupę, a zbiór ten może podlegać przekształceniu przez wszystkie przekształcenia grupy. Niech $Q(S)$ oznacza tę wielkość zależną od S, a TS niech oznacza wynik przekształcenia zbioru S przez przekształcenie T. Wówczas $Q(TS)$ będzie wartością, na jaką zmienia się $Q(S)$, gdy S zmienia się na TS. Jeśli uśrednimy ją (scałkujemy) względem miary grupy przekształceń T, otrzymamy wielkość, którą możemy zapisać w postaci

$$\int Q(TS)\,\mathrm{d}T, \tag{6.01}$$

gdzie całkowanie zachodzi po mierze grupy. Wielkość (6.01) będzie identyczna dla wszystkich zbiorów S, wzajemnie zastępowalnych ze względu na przekształcenia należące do grupy, to znaczy dla wszystkich zbiorów S, które mają w pewnym sensie tę samą postać, czyli *Gestalt*. Jest możliwe otrzymywanie przybliżonej porównywalności postaci, gdy całkowanie w wyrażeniu (6.01) zachodzi w obszarze mniejszym niż cała grupa, jeśli wielkość całkowana $Q(TS)$ jest mała w pomijanym obszarze. Na tym zakończymy rozważania dotyczące miary grupowej.

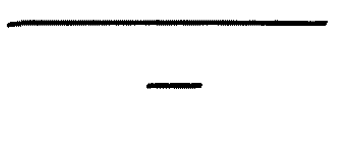
W ostatnich latach poświęca się wiele uwagi problemowi wykorzystania innych zmysłów przy budowaniu protez zmysłów utraconych. Spośród tego rodzaju usiłowań najbardziej sensacyjny charakter mają próby zbudowania urządzeń czytających dla niewidomych. Zasada pracy tych urządzeń opiera się na zastosowaniu fotokomórek. Przyjmijmy, że ograniczają się one do czytania tylko tekstu drukowanego, a nawet tekstu drukowanego jednym typem lub małą liczbą typów czcionki. Przyjmijmy także, że posuwanie się wzdłuż wiersza, nakierowanie na wiersz i przechodzenie do następnego wiersza tekstu wykonuje się ręcznie lub, co można równie dobrze wykonać, automatycznie. Można zauważyć, że wymienione czynności stanowią odpowiednik tej części procesu określania postaci (*Gestalt*), która zależy od mięśniowych sprzężeń zwrotnych i normalnego działania mechanizmów nakierowywania, ogniskowania i zbieżności oczu. Pozostaje teraz problem określania kształtu poszczególnych liter w trakcie sekwencyjnego przebiegania ich przez aparat wybierający. Wysunięto sugestię, by dokonywać tego przy użyciu kilku fotokomórek rozmieszczonych na pionowej linii i połączonych z aparatami produkującymi dźwięki o różnej wysokości. Urządzenie takie może rejestrować zaczernioną część litery jako brak lub obecność dźwięku. Przyjmijmy to drugie rozwiązanie i załóżmy, że mamy do czynienia z trzema fotoelektrycznymi receptorami, umieszczonymi jeden nad drugim. Niech produkują one trzy dźwięki akordu, przy czym niech dźwięk najwyższy odpowiada górnej, a najniższy – dolnej części litery. Wówczas litera F będzie brzmiała jak:

——————— czas trwania najwyższej nuty,

——————— czas trwania środkowej nuty,

— czas trwania dolnej nuty.

Litera *Z* będzie brzmiała jak:



a litera *O* jak

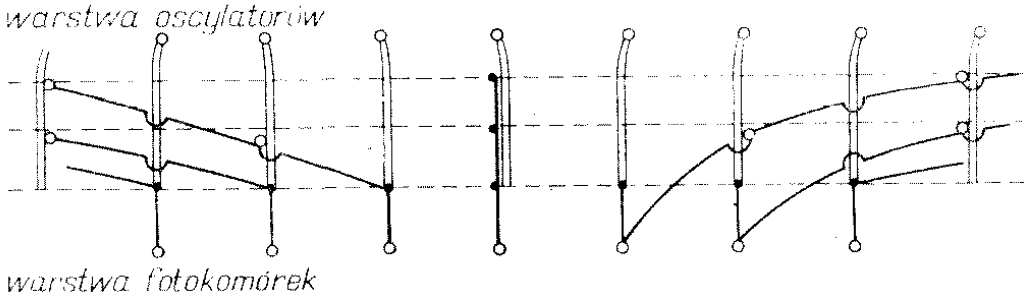
i tak dalej. Przy pomocy naszej zdolności do dokonywania tłumaczeń, czytanie takiego dźwiękowego alfabetu nie powinno przedstawiać specjalnych trudności, większych, niż na przykład czytanie tekstu pisanego alfabetem Braille'a.

Zależy to jednak od jednego czynnika: od właściwego rozmieszczenia fotokomórek w stosunku do pionowych rozmiarów liter. Nawet w przypadku znormalizowanych czcionek różnice wielkości są wciąż znaczne. Byłoby zatem rzeczą pożądaną, byśmy mogli rozciągać lub ścieśniać pionową skalę liter, by móc sprowadzić do normy wrażenie wywoływane przez daną literę. Musimy mieć możność posługiwania się, ręcznie lub automatycznie, przynajmniej niektórymi przekształceniami z grupy zmniejszeń i powiększeń wymiarów pionowych.

Wymaganie to można spełnić w różny sposób. Moglibyśmy dostrajać mechanicznie pionowe położenie fotokomórek. Zamiast tego rozwiązania możemy zastosować dłuższą pionową kolumnę fotokomórek i zmieniać w zależności od rozmiaru czcionki sposób przyporządkowania fotokomórkom wysokości dźwięku tak, by te z nich, które znajdują się powyżej lub poniżej litery, nie produkowały dźwięku w ogóle. Można się przy tym posłużyć układem zawierającym dwa zespoły styczników, o wejściach wybiegających z fotokomórek i połączonych z rozszerzającym się drzewem przełączników i wyjścia w postaci szeregu pionowych linii, jak na rys. 8.

Pojedynczą kreską narysowano tu przewody wychodzące z fotokomórek, a kreską podwójną – połączenia prowadzące do generatorów dźwięku. Kółeczka na liniach przerywanych oznaczają punkty połączeń między przewodami doprowadzającymi a odprowadzającymi, a same linie przerywane oznaczają przewody, za pomocą których uruchamia się po-

szczególne zestawy generatorów. Takie właśnie urządzenie do dostrajania się do wysokości czcionki zaprojektował McCulloch, wspominaliśmy o tym we wstępie. W pierwszej wersji projektu, wybór odpowiedniej linii przerywanej dokonywany był ręcznie.



Rys. 8

Właśnie schemat tego urządzenia, pokazany dr von Boninowi, nasunął mu skojarzenie z czwartą warstwą kory wzrokowej. Kółeczka, oznaczające połączenia, nasuwają skojarzenie z ciałami tworzących tę warstwę komórek nerwowych, układających się w podwarstwy o równomiernie zmieniającej się gęstości i rozmiarach zmieniających się w kierunku przeciwnym niż gęstość. Połączenia poziome są prawdopodobnie pobudzane w pewnej cyklicznej kolejności. Wydaje się, że cały ten aparat jest dość dobrze przystosowany do wykonywania procesu wybierania grupowego. Musi oczywiście mieć miejsce również jakiś proces, polegający na czasowej rekombinacji górnych wyjść w czasie.

Urządzenie zaproponowane przez McCullocha było więc w zasadzie tym, co rzeczywiście wykorzystuje się w mózgu dla celów wzrokowego wykrywania kształtu (*Gestalt*). Jest ono tego rodzaju, że umożliwia dokonywanie dowolnego typu wybierania grupowego. Coś podobnego ma miejsce również w przypadku innych zmysłów. W przypadku ucha, transpozycja muzyki z jednej tonacji do drugiej nie jest niczym innym, niż przesunięciem logarytmu częstotliwości dźwięków. Czynność tę może zatem wykonywać aparat wybierania grupowego.

Urządzenie do wybierania grupowego ma więc dobrze określoną, odpowiednią budowę anatomiczną. Koniecznych przełączeń mogą dokonywać niezależne przewody poziome, dostarczające bodźców wystarczających do przesunięcia progów na każdym poziomie do takiej właśnie wielkości, przy której pobudzenie następuje równocześnie z pojawieniem się

pobudzenia w przewodzie. Jakkolwiek nie znamy wszystkich szczegółów działania takiego mechanizmu, to jednak nie jest wcale trudno określić przypuszczalną konstrukcję maszyny, zgodnej z zasadami anatomii. Krótko mówiąc, układ wybierania grupowego jest dobrze przystosowany do roli trwałego podzespołu mózgowego, któremu odpowiadają w maszynie liczącej *sumatory i układy mnożące*.

Na koniec, aparat wybierania powinien mieć charakterystyczny, wewnętrzny okres działania, który można wyróżnić obserwując działanie mózgu. Rząd wielkości tego okresu powinien przejawić się w postaci minimalnego czasu, potrzebnego do dokonania bezpośredniego porównania kształtów obiektów o różnych rozmiarach. Można go zmierzyć jedynie wówczas, gdy różnica wymiarów porównywanych obiektów nie jest zbyt wielka. W przeciwnym razie porównywanie jest procesem długotrwałym, sugerującym wykorzystanie układów niespecyficznych dla wybierania. Kiedy bezpośrednie porównanie jest, jak się wydaje, możliwe, okazuje się, że zabiera ono czas rzędu dziesiątych części sekundy. Wydaje się również, że pozostaje to w zgodzie z rzędem wielkości czasu, potrzebnego do pobudzenia w cyklicznej kolejności wszystkich warstw połączeń.

Ten cykliczny proces mógłby być określony w skali lokalnej, ponieważ jednak mamy dowody na istnienie powszechnego synchronizmu działania różnych partii kory, to nasuwa się przypuszczenie, że jest on kierowany z jakiegoś ośrodka zegarowego. Istotnie, rząd wielkości jego częstotliwości odpowiada znanemu z elektroencefalogramów mózgowemu rytmowi alfa. Możemy podejrzewać, że rytm alfa wiąże się z percepcją postaci i jest zbliżony swym charakterem do rytmu przeszukiwania, podobnego do tego, z jakim mamy do czynienia w toku telewizyjnego procesu wybierania. Znika on w czasie głębokiego snu, natomiast — dokładnie tak, jak mogliśmy oczekiwać — nakłada się i przeplata z innymi rytmami wówczas, gdy naprawdę patrzymy na coś i rytm przeszukiwania działa jako swojego rodzaju nośnik dla innych rytmów i czynności. Najwyraźniej daje się go zaobserwować wówczas, gdy zamkniemy oczy, czuwając lub wpatrujemy się w przestrzeń nie obserwując niczego szczególnego, jak w stanie wyobcowania znanym z jogi[1]. Wykazuje on wówczas niemal doskonałą okresowość.

[1] Na podstawie prywatnych kontaktów z doktorem W. Grey Walterem, Bristol, Anglia.

Przekonaliśmy się, że budowa protez zmysłowych, zastępowanie informacji przenoszonej normalnie przez utracony zmysł informacją pochodzącą z innych dostępnych zmysłów, jest zagadnieniem ważnym i chyba rozwiązywalnym. Dodatkowe nadzieje budzi fakt, że pola pamięciowe i kojarzeniowe, wykorzystywane zazwyczaj przez jeden ze zmysłów nie są zamknięte na cztery spusty przed innymi, lecz mogą przechowywać wrażenia odbierane przez zmysły inne niż ten, do którego normalnie należą. Człowiek, który utracił wzrok, chyba w przeciwieństwie do człowieka niewidomego od urodzenia, nie tylko zachowuje w pamięci wrażenia wizualne z okresu przed wypadkiem, lecz nawet jest zdolny przechowywać wrażenia dotykowe i słuchowe w postaci wzrokowej. Może on poruszać się wokół pokoju posługując dotykiem, lecz jednocześnie może mieć obraz tego, jak jego pokój powinien wyglądać.

Dostępna jest więc dla niego część normalnego mechanizmu widzenia. Jednakże utracił on więcej, niż oczy. Utracił również możliwość użytkowania tej części jego kory wzrokowej, którą można uważać za połączony na stałe układ do organizowania wrażeń wzrokowych. Jest zatem rzeczą konieczną wyposażenie go nie tylko w sztuczne receptory wzrokowe, lecz również w sztuczną korę wzrokową, która będzie tłumaczyła wrażenia świetlne z nowych receptorów na postać tak powiązaną z normalnym wyjściem jego kory wzrokowej, że obiekty, które zazwyczaj podobnie wyglądały teraz będą podobnie brzmiały.

Możliwość zastąpienia wzroku przez słuch zależy zatem przynajmniej częściowo od stosunku liczby rozpoznawalnie różnych wzorców wzrokowych i liczby rozpoznawalnie różnych wzorców słuchowych *na poziomie kory*. Jest to porównanie różnych ilości informacji. Ze względu na to, że organizacja różnych części kory zmysłowej jest nieco podobna, stosunek ten nie będzie prawdopodobnie różnił się zbytnio od stosunku powierzchni rozpatrywanych kory wzrokowej i słuchowej, a ten natomiast wynosi około 100 : 1 na korzyść wzroku. Gdybyśmy całą korę słuchową wykorzystali dla potrzeb widzenia, to moglibyśmy oczekiwać, że będziemy mogli odbierać około 1 procenta tej informacji, która dociera do nas za pośrednictwem oka. Z drugiej strony, zwykła skala, za pomocą której oceniamy wzrok, opiera się na określeniu względnej odległości, z jakiej uzyskuje się pewien stopień rozdzielczości widzenia obrazu, tak więc wzrok określany stosunkiem 10/100 oznacza, że przepływ informacji wynosi około 1 procenta

normy. Taki wzrok jest bardzo słaby, ale na pewno nie jest to ślepota, a ludzie z takim stopniem upośledzenia wzroku niekoniecznie muszą uważać się za niewidomych.

Jeśli spojrzymy w odwrotnym kierunku, otrzymamy jeszcze korzystniejszy obraz sytuacji. Oko jest w stanie wykryć wszelkie niuanse słuchowe zużytkowując na ten cel zaledwie 1 procent swych możliwości, przy czym sam wzrok pozostanie wciąż na znakomitym poziomie 95/100. Zagadnienie protez sensorycznych jest zatem niesłychanie obiecującym terenem badań.

VII

CYBERNETYKA A PSYCHOPATOLOGIA

Muszę rozpocząć niniejszy rozdział od zastrzeżenia. Nie jestem psychopatologiem ani psychiatrą i brak mi doświadczenia w tej dziedzinie, gdzie właśnie kierowanie się doświadczeniem jest jedyną rzeczą godną zaufania. Z drugiej jednak strony nasza wiedza o prawidłowym działaniu mózgu i układu nerwowego, a więc *a fortiori* również nasza wiedza o jego nieprawidłowym działaniu, jest daleka od takiej doskonałości, by jakaś teoria sformułowana *a priori* zasługiwała w ogóle na wiarę. Dlatego też chciałbym ostrzec z góry, że nie wolno nam twierdzić jakoby jakakolwiek konkretna jednostka psychopatologiczna (jak na przykład stany chorobowe opisywane przez Kraepelina i jego uczniów) była wynikiem pewnego konkretnego uszkodzenia organizacji mózgu, traktowanego tak, jak maszyna licząca. Ci, którzy wyciągną tak szczególne wnioski z niniejszych rozważań niech uczynią to na własne ryzyko.

Tym niemniej spostrzeżenie, że mózg i maszyna licząca mają ze sobą wiele wspólnego, może nam podsunąć nowe i poprawne spojrzenie na psychopatologię, a nawet psychiatrię. Dziedziny te rozpoczynają się chyba od momentu postawienia bardzo prostego pytania: w jaki sposób mózg unika wielkich błędów, wielkich zakłóceń swej działalności, które mogłyby wyniknąć z niesprawności poszczególnych jego fragmentów. Podobna kwestia, w przypadku odniesienia jej do maszyny liczącej ma ogromne znaczenie praktyczne, gdyż łańcuch operacji, z których każda trwa ułamek milisekundy, może ciągnąć się przez całe godziny lub dni. Jest rzeczą zupełnie możliwą, by ciąg operacji obliczeniowych zawierał 10^9 oddzielnych kroków. W takiej sytuacji na pewno nie wolno nam pominąć możliwości, że

przynajmniej jedna z operacji zostanie wykonana błędnie, nawet pomimo że niezawodność współczesnej aparatury elektronicznej w istocie znacznie przekroczyła najbardziej optymistyczne oczekiwania.

Przy zwyczajnych obliczeniach, prowadzonych ręcznie lub za pomocą prostych arytmometrów biurowych powszechną praktyką jest sprawdzanie każdego kroku obliczeń i lokalizowanie znalezionego błędu na zasadzie przeglądania obliczeń wstecz od punktu, w którym błąd zauważono po raz pierwszy. Na to, by można było stosować tę metodę w przypadku szybkiej maszyny liczącej, sprawdzanie musiałoby przebiegać równie szybko jak same obliczenia, gdyż inaczej cała efektywna szybkość maszyny będzie taka, jak szybkość wolniejszego procesu sprawdzania. Co więcej, gdyby maszyna musiała przechowywać wszystkie pośrednie wyniki swej działalności, to jej złożoność i wymiary wzrosłyby niedopuszczalnie, prawdopodobnie znacznie więcej, niż dwu- lub trzykrotnie.

Znacznie lepszą metodą sprawdzania, istotnie stosowaną w praktyce, jest wykonywanie każdej operacji przez dwa lub trzy oddzielne mechanizmy. W przypadku dwóch maszyn ich odpowiedzi porównuje się automatycznie ze sobą i jeśli wystąpi niezgodność, to maszyna zatrzymuje się, a do operatora zostaje wysłany sygnał, że coś jest nie w porządku. Operator porównuje wówczas wyniki i na podstawie tego wyszukuje niesprawną część maszyny, być może lampę, która przepaliła się i wymaga wymiany. Jeśli w każdym kroku wykorzystuje się trzy maszyny, a pojedyncze błędy są tak rzadkie, jak w rzeczywistości, to praktycznie rzecz biorąc zawsze dwie z trzech maszyn będą zgadzały się ze sobą, dając w ten sposób żądany wynik. W takim przypadku mechanizm porównujący wyniki rejestruje zdanie większości i maszyna nie musi zatrzymywać się. Zostaje natomiast wyprodukowany sygnał o tym, gdzie i w jaki sposób zdanie mniejszości różni się od zdania większości. Jeśli wystąpi to szybko, w pierwszym momencie po zaistnieniu niezgodności, to wskazanie umiejscowienia błędu może być bardzo dokładne. W dobrze zaprojektowanej maszynie, poszczególne elementy nie są przypisane „na sztywno" poszczególnym krokom ciągu operacji, lecz w każdym takim kroku wykonuje się proces przeszukiwania, podobny do występującego w automatycznych centralach telefonicznych, który wynajduje pierwszy dostępny element zadanego typu i włącza go w ciąg czynności. W takim przypadku wymiana uszkodzonych elementów nie musi być źródłem znaczniejszych opóźnień w pracy maszyny.

Można sobie wyobrazić, że przynajmniej dwa elementy tego procesu występują również w układzie nerwowym. Nie możemy chyba oczekiwać, że przenoszenie jakiejś ważnej wiadomości powierza się pojedynczemu neuronowi lub, że jakąś ważną czynność powierza się pojedynczemu mechanizmowi neuronowemu. Mózg, podobnie jak maszyna licząca, pracuje prawdopodobnie na znanej zasadzie, którą wyłożył Lewis Carroll w *Hunting of the Snark*: „Prawdą jest to, co powtórzę ci trzy razy". Jest również rzeczą nieprawdopodobną, by różne kanały służące do przenoszenia informacji biegły zawsze od swego początku do końca bez żadnych skrzyżowań. O wiele bardziej prawdopodobne jest, że wiadomość osiągająca pewien poziom układu nerwowego może przedostać się na następny poziom poprzez jeden z alternatywnie obieranych elementów tworzących „bank elementów łączących". Mogą oczywiście istnieć również takie części układu nerwowego, w przypadku których wymienność jest znacznie ograniczona lub zabroniona, są nimi zapewne wysoko wyspecjalizowane części kory, jak na przykład te, które stanowią wewnętrzne przedłużenie narządów zmysłu. Zasada pozostaje jednak w mocy prawdopodobnie głównie w odniesieniu do stosunkowo mało wyspecjalizowanych obszarów korowych, które służą celom kojarzenia i temu, co nazywamy wyższymi czynnościami umysłowymi.

Zajmowaliśmy się do tej pory błędami działania, które są w zasadzie „prawidłowe", a patologiczne są prawidłowe tylko w rozszerzonym sensie. Wróćmy teraz do tych błędów, które są patologiczne w sposób bardziej oczywisty. Psychopatologia stanowi chyba rozczarowanie dla instynktownego materializmu lekarzy, którzy stoją na stanowisku, że każdej chorobie musi towarzyszyć materialne uszkodzenie pewnej specyficznej dla tego schorzenia tkanki. Prawdą jest, że określonym uszkodzeniom mózgu, takim jak urazy, guzy, zakrzepy itp., mogą towarzyszyć objawy psychiczne i że pewne choroby umysłowe, takie jak niedowład, są następstwem ogólnej choroby somatycznej i wiążą się z patologicznym stanem tkanki mózgowej. Jednakże nie istnieje sposób, za pomocą którego można by zidentyfikować mózg schizofrenika sklasyfikowanego według jednego z typów Kraepelina, pacjenta z psychozą maniakalno-depresyjną lub paranoika. Takie zaburzenia nazywamy czynnościowymi, a podział ten zdaje się przeczyć dogmatowi nowoczesnego materializmu, według którego każde zaburzenie czynności ma swą podstawę fizjologii lub anatomii biorących w niej udział tkanek.

Rozważania na temat maszyn liczących rzucają wiele światła na zagadnienie podziału chorób na organiczne i czynnościowe. Jak się już przekonaliśmy, odpowiednikiem mózgu, a przynajmniej dorosłego mózgu, jest nie sama fizyczna struktura maszyny liczącej, lecz połączenie tej struktury z instrukcjami dawanymi jej na początku łańcucha operacji oraz ze wszystkimi dodatkowymi informacjami zapamiętanymi i pobieranymi z zewnątrz w czasie trwania łańcucha czynności. Informacje te są przechowywane w pewnej fizycznej postaci, w postaci zapisów pamięciowych przy czym część z nich ma charakter zapisów pamięciowych cyrkulujących w zamkniętej pętli, a ich fizyczne zasady powodują, że znikają one, gdy maszyna zostaje wyłączona lub gdy mózg umiera. Natomiast część ma postać zapisów pamięciowych utrzymujących się przez długi czas, przechowywanych w sposób, który możemy tylko odgadywać, lecz prawdopodobnie również tak, że zanikają one wraz ze śmiercią. Nie znamy jednak jeszcze metody, która pozwalałaby ustalić w czasie sekcji zwłok, jaki próg miała dana synapsa podczas życia; a nawet, gdybyśmy znali, to nie potrafilibyśmy wyśledzić łańcucha neuronów i synaps komunikujących się z nią, ani określić znaczenia tego łańcucha dla treści ideacyjnej, którą rejestruje. Nie ma zatem nic zaskakującego w uważaniu czynnościowych zaburzeń umysłowych za, w zasadzie choroby pamięci, zakłócenia w krążeniu informacji podtrzymywanym przez mózg lub zaburzenia w długookresowej przewodności synaps. Nawet większe zaburzenia, takie jak niedowład mogą wywoływać znaczną część swych następstw nie tyle poprzez uszkodzenie odpowiednich tkanek czy zmianę wartości progowych synaps, co poprzez wtórne zakłócenia (przeciążenie nienaruszonych części układu nerwowego i konieczność wytworzenia nowych dróg przesyłania), które muszą towarzyszyć pierwotnym urazom.

W układzie zawierającym wielką liczbę neuronów procesy cyrkulacyjne nie mogą być stabilne przez dłuższy czas. Albo jak w przypadku tzw. pozornej rzeczywistości biegną one swym torem przez jakiś czas, a potem rozpraszają się i zamierają, albo też wciągają w krąg swego działania coraz więcej neuronów, aż wreszcie zajmują nadmierną część całej ich puli. Można sobie wyobrazić, że tak właśnie dzieje się w przypadku uporczywych stanów przygnębienia, towarzyszących nerwicom lękowym. Możliwe, że pacjent wówczas nie ma po prostu miejsca, nie ma odpowiedniej liczby neuronów na to, by prowadzić swe normalne procesy myślowe. W takiej

sytuacji mózg może mniej intensywnie obciążać pracą neurony, które jeszcze nie zostały dotknięte opisanym zjawiskiem, przez co tym łatwiej wpadają one w zależność od narastającego procesu. Co więcej, w zależności te wplątuje się coraz bardziej pamięć o charakterze trwałym i patologiczny proces, który pojawił się zrazu na poziomie pamięci cyrkulującej może powtarzać się w jeszcze bardziej uporczywej postaci na poziomie pamięci trwałej. W ten sposób to, co rozpoczęło się jako zwyczajne i przypadkowe zakłócenie stabilności może rozbudować się do rozmiarów procesu całkowicie uniemożliwiającego normalną działalność umysłową.

Patologiczne procesy nieco zbliżonej natury nie są obce mechanicznym czy elektrycznym maszynom liczącym. Koło zębate może ześlizgnąć się tak, że żadne inne koło zębate, z którym ono współpracuje nie może cofnąć go do normalnego położenia, a szybka elektryczna maszyna licząca może wpaść w cykliczny proces, na którego zatrzymanie zdaje się nie być sposobu. Takie sytuacje mogą zależeć od pojawienia się w układzie bardzo mało prawdopodobnych, chwilowych konfiguracji i kiedy im zaradzimy mogą nie powtórzyć się nigdy więcej, lub bardzo rzadko. Niemniej jednak, wówczas gdy się pojawiają, wytrącają na jakiś czas maszynę ze sprawnego działania.

Jak radzimy sobie z takimi wypadkami w praktyce eksploatacji maszyn? Pierwszą rzeczą, którą usiłujemy zrobić, jest usunięcie z maszyny całej informacji w nadziei, że gdy rozpocznie ona znów pracę z innymi danymi, to kłopoty nie powtórzą się. Jeśli się to nie uda, jeśli trudności umiejscowione są w punkcie, chwilowo lub na stałe niedostępnym dla mechanizmu zerującego, to potrząsamy maszyną, lub jeśli jest ona urządzeniem elektrycznym, poddajemy ją działaniu nienormalnie silnego impulsu elektrycznego, mając nadzieję, że osiągniemy w ten sposób niedostępną część i przerzucimy ją w takie położenie, że błędny krąg czynności ulegnie przerwaniu. Jeżeli i to nie da rezultatów, to możemy odłączyć uszkodzoną część aparatury, ponieważ istnieje możliwość, że to co z niej pozostanie wystarczy do naszych celów.

Żaden normalny proces, poza śmiercią, nie może całkowicie oczyścić mózgu ze wszystkich minionych wrażeń, a po śmierci nie można już wprowadzić ich znowu i uruchomić mózgu ponownie. Spośród wszystkich prawidłowych procesów sen jest najbliższy nie-patologicznemu oczysz-

czeniu mózgu z informacji. Jakże często stwierdzamy, że zmartwienie czy trudne sytuacje najlepiej byłoby przespać! Sen nie usuwa jednak głębszych zapisów pamięciowych, a stan uporczywego przygnębienia doprawdy nie daje się pogodzić ze spokojnym snem. Dlatego często jesteśmy zmuszeni do gwałtowniejszej interwencji w cykl zjawisk pamięciowych. Najbardziej brutalnym rodzajem takiego działania jest interwencja chirurgiczna w obrębie mózgu, pozostawiająca po sobie trwałe uszkodzenie, kalectwo i zmniejszenie możliwości życiowych ofiary. Centralny układ nerwowy ssaków nie ma bowiem, jak się wydaje, w ogóle zdolności regeneracji. Podstawowym stosowanym w praktyce typem interwencji chirurgicznej jest lobotomia przedczołowa, polegająca na usunięciu lub oddzieleniu części przedczołowego płata kory. Cieszy się ona ostatnio pewną popularnością, prawdopodobnie nie bez związku z tym, że zastosowanie jej ułatwia opiekę pielęgniarską nad wieloma pacjentami. Zauważmy na marginesie, że uśmiercenie chorego ułatwia opiekę nad nim jeszcze bardziej. Niemniej jednak lobotomia przedczołowa wywiera autentyczny efekt na stany depresyjne, nie przez to, że przybliża pacjentowi możliwość rozwiązania jego problemów, lecz przez to, że upośledza lub niszczy całkowicie zdolność pozostawania w stanie przygnębienia, znaną z terminologii innej profesji jako *sumienie*. Ogólniej mówiąc, zdaje się ona ograniczać wszystkie aspekty pamięci cyrkulacyjnej, zdolność przechowywania w umyśle sytuacji innej, niż aktualna.

Różne formy terapii wstrząsowej — wstrząsy elektryczne, insulinowe, metrazolowe — są mniej drastycznymi środkami prowadzącymi do osiągnięcia bardzo podobnych efektów. Nie uszkadzają one tkanki mózgowej, a przynajmniej nie mają tego na celu, lecz wywierają zdecydowanie niszczący wpływ na pamięć. Dopóki zajmujemy się cyrkulującymi zapisami pamięciowymi, dopóki głównie one właśnie są zakłócone przez ostatni okres choroby umysłowej i najprawdopodobniej nie są warte przechowywania, dopóty terapia wstrząsowa jest czymś, co można zalecać na miejsce lobotomii. Jednakże nie zawsze jest ona wolna od niszczącego wpływu na pamięć trwałą i osobowość pacjenta. W swej obecnej formie terapia wstrząsowa jest jeszcze jedną gwałtowną, nie w pełni zrozumiałą i nie w pełni kontrolowaną metodą przerywania umysłowego „błędnego koła". Mimo tego zastosowanie jej jest dziś w wielu przypadkach najlepszą rzeczą, jaką możemy zrobić.

Lobotomia i terapia wstrząsowa są metodami, które ze swej natury są bardziej przystosowane do oddziaływania na błędne cyrkulujące zapisy pamięciowe i stany depresyjne, niż na zapisy pamięciowe umiejscowione głębiej, jakkolwiek nie jest rzeczą niemożliwą, że również i na nie wywierają one pewien efekt. Jak mówiliśmy, w chronicznych przypadkach zaburzeń umysłowych, pamięć trwała jest równie zaburzana jak pamięć cyrkulująca. Nie posiadamy żadnej czysto farmakologicznej czy chirurgicznej broni, która umożliwiłaby wybiórczą interwencję w rejony pamięci trwałej. Zaczynają tu odgrywać rolę pojęcia z dziedziny psychoanalizy i innych zbliżonych do niej metod psychoterapeutycznych. Zarówno w ortodoksyjnej, freudowskiej psychoanalizie, jak i w zmodyfikowanej psychoanalizie w sensie Junga czy Adlera, czy wreszcie w psychoterapii nie opierającej się w ogóle na zasadach psychoanalizy, terapia opiera się na założeniu, że informacja przechowywana w naszym umyśle jest rozłożona na różnych poziomach dostępności; że jest ona o wiele bogatsza i różnorodniejsza niż informacja osiągalna na drodze bezpośredniej, samodzielnej introspekcji; że wpływają na nią w istotny sposób doświadczenia afektywne, nie zawsze wykrywalne poprzez taką introspekcję albo dlatego, że nie zostały nigdy wyrażone w naszym dorosłym języku, albo dlatego, że ukrył je głęboko pewien określony mechanizm afektywny, na ogół nieświadomy; wreszcie, że zarówno treść tych przechowywanych doświadczeń, jak ich ton afektywny warunkują w znacznym stopniu naszą późniejszą działalność w sposób, który może być patologiczny. Technika psychoanalizy polega na zastosowaniu szeregu środków, zmierzających do odkrycia i zinterpretowania tych ukrytych zapisów pamięciowych, na sprawieniu, by pacjent zaakceptował rację ich istnienia i poprzez tę akceptację zmodyfikował jeśli już nie ich treść, to przynajmniej ton afektywny, zmniejszając w ten sposób ich szkodliwość. Wszystkie te fakty pozostają w doskonałej zgodzie z poglądami wyrażonymi w niniejszej książce. Wyjaśniają one chyba również, dlaczego w pewnych sytuacjach wskazane jest równoległe stosowanie leczenia wstrząsowego i psychoterapii, czyli łączenie terapii fizycznej lub farmakologicznej wpływającej na zjawiska rewerberacji w układzie nerwowym i terapii psychologicznej oddziałującej na długotrwałe zapisy pamięciowe, które bez takiej interwencji mogłyby odnowić się w postaci zapisów pochodzących z „wnętrza" błędnego koła przerwanego przez leczenie wstrząsowe.

Wspomnieliśmy już o problemach komunikacyjnych obiegu informacji w układzie nerwowym. Wielu autorów, jak np. D'Arcy Thompson[1], jest zdania, że każda struktura ma górną granicę wielkości, powyżej której nie może funkcjonować. Organizacja ciała owada jest ograniczona długością lejka, przy której może działać mechanizm dostarczania powietrza bezpośrednio tkance oddechowej drogą dyfuzji, zwierzę lądowe nie może być tak wielkie, by jego kończyny lub inne części stykające się z podłożem uległy zmiażdżeniu pod ciężarem ciała; rozmiary drzewa ogranicza mechanizm przenoszenia wody i związków mineralnych od korzeni do liści, a produktów fotosyntezy od liści do korzeni i tak dalej. Tę samą sytuację obserwujemy w przypadku konstrukcji technicznych. Rozmiary drapacza chmur ogranicza fakt, że powyżej pewnej wysokości windy potrzebne dla wyższych pięter zajmują zbyt wielką część powierzchni pięter niższych. Powyżej pewnej długości nawet najlepszy most wiszący, który możemy zbudować z materiałów o zadanych właściwościach plastycznych, zerwie się pod własnym ciężarem, a powyżej pewnych rozmiarów wręcz każda konstrukcja zawali się pod własnym ciężarem. Podobnie ograniczona jest wielkość centrali telefonicznej, skonstruowanej zgodnie z ustalonym, nierozbudowalnym planem. Ograniczenie to jest przedmiotem szczegółowych badań inżynierów od spraw telefonii.

W systemie telefonicznym ważnym czynnikiem ograniczającym jest względny czas, przez który abonent nie może uzyskać połączenia. Dziewięćdziesięciodziewięcioprocentowe prawdopodobieństwo zrealizowania połączenia zadowoli nawet najbardziej wymagających, 90 procent pomyślnych połączeń prawdopodobnie wystarczy nam dla względnie łatwego załatwiania naszych spraw, przy 75-procentowym prawdopodobieństwie będziemy odczuwali niewygodę, lecz możemy jako tako prowadzić swą działalność, jednak jeśli połowa prób uzyskania połączenia zakończy się niepowodzeniem, abonenci zaczną prosić o zabranie im telefonów. Powyższe przykłady opisują sytuację jedynie całościowo. Jeśli uzyskanie połączenia telefonicznego wymaga przejścia przez n różnych stopni połączeń, a prawdopodobieństwo błędu jest na każdym stopniu niezależne i równe, to na to aby prawdopodobieństwo sukcesu całego połączenia było równe p konieczne jest, by to

---

[1] D'Arcy Thompson., *On Growth and Form*, New York 1942, Macmillan.

prawdopodobieństwo dla każdego ze stopni wynosiło $p^{1/n}$. Tak więc, aby uzyskać 75 procent prawdopodobieństwa uzyskania połączenia poprzez pięć stopni, musimy mieć w każdym ze stopni około dziewięćdziesięciopięcioprocentowe prawdopodobieństwo sukcesu. Aby osiągnąć całkowitą sprawność równą 90 procent, musimy mieć w każdym stopniu prawdopodobieństwo sukcesu równe 98 procentom, a dla sprawności pięćdziesięcioprocentowej, prawdopodobieństwo równe 87 procentom. Można zauważyć, że im większa jest liczba stopni przełączania, tym szybciej jakość obsługi abonentów zaczyna się ogromnie pogarszać, jeśli zostanie przekroczony pewien krytyczny poziom prawdopodobieństwa niezrealizowania pojedynczego połączenia, natomiast polepsza się znacznie, jeśli ten krytyczny poziom nie zostanie osiągnięty. Tak więc obsługa polegająca na wielostopniowym przełączaniu, zaprojektowana przy założeniu pewnego poziomu prawdopodobieństwa nie uzyskania połączenia, nie wykazuje żadnych widocznych oznak niesprawności, dopóki natężenie ruchu nie przekroczy pewnego punktu krytycznego, a potem dezorganizuje się całkowicie i powstaje katastrofalny zator.

Jest zatem rzeczą prawdopodobną, że człowiek, istota o najlepiej ze wszystkich zwierząt rozwiniętym układzie nerwowym, której zachowanie jest prawdopodobnie uzależnione od sprawnego działania najdłuższych łańcuchów neuronowych, demonstruje złożone zachowania, zbliżające się bardzo blisko do stanu przeciążenia, który grozi poważnymi i katastrofalnymi konsekwencjami. Przeciążenie to może powstać w wyniku kilku przyczyn: na skutek przekroczenia pewnego granicznego natężenia ruchu w obiegu informacji, w wyniku fizycznego usunięcia kanałów obsługujących ten ruch, lub na skutek nadmiernego obciążenia takich kanałów pracą przez niepożądane czynniki, takie jak układy przenoszące cyrkulujące zapisy pamięciowe, które urosły do patologicznych rozmiarów. We wszystkich tych przypadkach nadchodzi dość niespodziewanie moment, w którym na normalny ruch informacji nie starcza miejsca i następuje rodzaj załamania umysłowego, przyczyniający się najprawdopodobniej do powstania choroby umysłowej.

Zjawisko to wywrze wpływ najpierw na te czynności umysłowe, które wymagają wykorzystania najdłuższych łańcuchów neuronowych. Istnieją poważne przesłanki pozwalające przypuszczać, że procesy te są właśnie tymi, które w zwyczajnej skali oceny uważamy za najwyższe. Wiadomo miano-

wicie, że wzrost temperatury w granicach bliskich fizjologicznej normie ułatwia przebieg większości, jeśli nie wszystkich procesów neuronowych. Efekt ten staje się coraz wyraźniejszy, jeśli przechodzimy do procesów coraz wyższych, w przybliżeniu w takim porządku, w jakim zazwyczaj oceniamy ich „wysokość". Każde ułatwienie procesów zachodzących w pojedynczym układzie neuron–synapsa powinno kumulować się, gdyż jeden neuron łączy się szeregowo z innymi. W takiej sytuacji stopień ułatwienia przebiegu procesu na skutek wzrostu temperatury powinien stanowić przybliżoną miarę długości biorącego w nim udział łańcucha neuronów.

Widzimy zatem, że wyższość ludzkiego mózgu w zakresie długości łańcuchów neuronowych jest przyczyną, dla której choroby umysłowe są bez wątpienia najbardziej widoczne i powszechne właśnie u ludzi. Istnieje również inny sposób na osiągnięcie bardzo podobnych wniosków. Rozważmy dwa mózgi, geometrycznie podobne, o identycznym stosunku wagi substancji białej i szarej, lecz o różnych wymiarach liniowych, mających się do siebie jak $A : B$. Niech objętość ciała komórkowego komórek szarej substancji i przekrój włókien substancji białej będą takie same w obu mózgach. Wówczas liczba ciał komórek w obu przypadkach pozostaje do siebie w stosunku $A^3 : B^3$, a liczba długodystansowych połączeń w stosunku $A^2 : B^2$. Znaczy to, że przy tej samej gęstości aktywności komórek, gęstość aktywności włókien jest w mózgu większym $A : B$-krotnie wyższa, niż w mózgu małym.

Jeśli porównamy mózg człowieka z mózgiem niższych ssaków, stwierdzimy, że jest on znacznie bardziej pofałdowany. Względna grubość substancji szarej jest prawie taka sama, jednakże u człowieka jest ona rozłożona w znacznie bardziej rozbudowany układ zakrętów i bruzd. Wynikiem tego jest zwiększenie ilości substancji szarej kosztem białej. W obrębie zakrętu takie zmniejszenie ilości substancji białej polega na raczej zmniejszeniu długości, a nie liczby włókien, ponieważ przeciwstawne powierzchnie zakrętu leżą bliżej siebie, niż mogłyby leżeć w mózgu o tych samych rozmiarach, lecz o gładkiej powierzchni. Z drugiej strony jeśli chodzi o włókna łączące różne zakręty, to na skutek pofałdowania mózgu muszą one przebiegać dłuższą drogę. Wydaje się zatem, że ludzki mózg jest dość dobrze wyposażony w połączenia krótkie, natomiast gorzej w połączenia długie. Znaczy to, że w przypadku „zatoru komunikacyjnego" jako pierwsze ucierpią te procesy, które wykorzystują stosunkowo odległe od siebie części

mózgu. Innymi słowy, procesy wymagające uruchomienia kilku ośrodków, pewnej liczby różnych czynności motorycznych i znacznej liczby pól kojarzeniowych, należą do najmniej stabilnych w przypadku choroby umysłowej. Są to właśnie te procesy, które klasyfikujemy jako wyższe. Otrzymujemy w ten sposób dodatkowe, i jak się wydaje, weryfikowane doświadczeniem potwierdzenie przypuszczenia, że choroba upośledza najpierw wyższe procesy mózgowe.

Istnieją pewne dowody na to, że długodystansowe drogi mózgowe wybiegają całkowicie poza mózg i przecinają niższe ośrodki. Wskazuje na to fakt, że uszkodzenie spowodowane przecięciem niektórych długich pętli mózgowych substancji białej jest stosunkowo niewielkie. Wygląda to nieledwie tak, jak gdyby powierzchniowe połączenia były na tyle nieodpowiednie, że powierza się im jedynie małą część naprawdę niezbędnych połączeń.

W świetle tych faktów ciekawe stają się zjawiska prawo- i leworęczności oraz dominacji półkul mózgowych. Jak się wydaje, prawo- i leworęczność występuje już u niższych ssaków, jakkolwiek w stopniu mniej wyraźnym niż u człowieka, prawdopodobnie częściowo dlatego, że wykonywane przez nie czynności wymagają niższego stopnia organizacji i specjalizacji. W każdym razie różnica między sprawnością mięśniową strony lewej i prawej wydaje się u niższych naczelnych mniejsza niż u człowieka.

Praworęczność normalnego człowieka wiąże się, jak powszechnie wiadomo, z dominacją lewej półkuli, a leworęczność u mniejszości ludzi — z przewagą prawej półkuli. Znaczy to, że czynności mózgowe nie są rozłożone parzyście między obie półkule i jedna z nich, półkula dominująca, przejmuje lwią część czynności wyższych. Liczne, zasadniczo bilateralne czynności — jak na przykład te, które dotyczą pól wzrokowych — są reprezentowane odpowiednio w obu półkulach, jednakże stwierdzenie to nie dotyczy *wszystkich* czynności bilateralnych. Większość „wyższych" pól zamyka się w obrębie półkuli dominującej. Tak więc na przykład u człowieka dorosłego skutki rozległego urazu w obrębie półkuli drugorzędnej są o wiele mniej poważne, niż skutki podobnego urazu w obrębie półkuli dominującej. Pasteur, w dość wczesnym okresie swej kariery, doznał prawostronnego wylewu mózgowego, który pozostawił po sobie jednostronny paraliż (hemiplegię) umiarkowanego stopnia. Po śmierci Pasteura zbadano jego mózg i stwierdzono, że prawostronny uraz, jakiego doznał, był tak rozległy, że uczony miał po nim „jedynie połowę mózgu". Powstały

tam z pewnością rozległe uszkodzenia okolicy ciemieniowej i skroniowej. Mimo to już po doznaniu urazu Pasteur wykonał część swych najbardziej wartościowych prac. Podobny lewostronny uraz mózgu dorosłego praworęcznego człowieka byłby prawie na pewno śmiertelny, a już z pewnością sprowadziłby go do animalnego stanu kalectwa umysłowego i nerwowego.

Spotyka się pogląd, że sytuacja jest znacznie lepsza we wczesnym dzieciństwie; że rozległy uraz w obrębie dominującej półkuli w pierwszych sześciu miesiącach życia może zmusić półkulę zazwyczaj drugorzędną do objęcia roli półkuli dominującej tak, że stan pacjenta zdaje się być o wiele bliższy normalnemu, niż byłby, gdyby uraz nastąpił u pacjenta w późniejszym wieku. Pozostaje to w zgodzie z faktem, że układ nerwowy jest na ogół bardzo giętki w pierwszych tygodniach życia, a jego „sztywność" rozwija się szybko później. Jest rzeczą możliwą, że wyjąwszy przypadki poważnych urazów, lewo- lub praworęczność jest u bardzo małego dziecka cechą dość giętką. Niemniej jednak naturalna prawo- lub leworęczność i dominacja jednej z półkul mózgowych ustalają się na całe życie na długo przed osiągnięciem przez dziecko wieku szkolnego. Sądzi się zazwyczaj, że leworęczność jest poważną wadą społeczną. Do pewnego stopnia jest to prawdą, jeśli zważyć, że większość narzędzi, tablic szkolnych i akcesoriów sportowych produkuje się przede wszystkim dla potrzeb ludzi praworęcznych. Co więcej, w przeszłości traktowano leworęczność z przesadną dezaprobatą, towarzyszącą tak często wielu drobnym odchyleniom od normy, jak znamiona na skórze, lub rude włosy. Pod wpływem złożonych motywów wielu rodziców usiłowało zmienić, a nawet doprowadziło do skutku na drodze wychowania zewnętrzną zmianę lateralizacji u swych dzieci, nie mogąc jednak oczywiście zmienić fizjologicznych podstaw zjawiska dominacji półkul. U bardzo wielu osób poddanych takiej zmianie stwierdzono jąkanie i inne defekty mowy, czytania i pisania w takim stopniu, że poważnie ograniczały one ich perspektywy życiowe i zmniejszały widoki normalnej kariery.

Widzimy teraz co najmniej jedno możliwe wytłumaczenie tego zjawiska. Wraz z kształceniem „drugorzędnej" ręki musiało postępować częściowe kształcenie tej części drugorzędnej półkuli mózgowej, która ma do czynienia ze złożonymi ruchami, takimi, jak pisanie. Ponieważ jednak wykonywanie takich ruchów kojarzy się niesłychanie ściśle z czytaniem, mową i innymi czynnościami, nierozdzielnie związanymi z działal-

nością półkuli dominującej, przeto łańcuchy neuronowe biorące udział w tych procesach muszą przechodzić z jednej półkuli do drugiej i z powrotem, a w przypadku procesów choćby trochę złożonych — tam i z powrotem wiele razy. W mózgu tak wielkim, jak ludzki — bezpośrednie połączenia między półkulami — spoidła mózgowe — są tak nieliczne, że są bardzo mało przydatne i komunikacja między półkulami musi biec okrężnymi trasami przez pień mózgu. Drogi te znamy bardzo mało dokładnie, lecz są one z pewnością długie, skąpe i łatwo ulegające przerwaniu. W takiej sytuacji procesy związane z mówieniem i pisaniem mogą się łatwo dostawać w „zator komunikacyjny", a jąkanie się jest rzeczą najnaturalniejszą w świecie.

Znaczy to, że mózg ludzki jest już chyba zbyt wielki na to, by mógł efektywnie wykorzystywać wszystkie środki, które zdają się być anatomicznie dostępne. Wydaje się, że u kota zniszczenie dominującej półkuli powoduje stosunkowo mniejsze straty niż u człowieka, a zniszczenie półkuli drugorzędnej — straty chyba stosunkowo większe. W każdym razie podział funkcji między dwie półkule jest bardziej równomierny. U człowieka zysk osiągnięty dzięki zwiększeniu rozmiarów i złożoności mózgu redukuje się częściowo na skutek tego, że mniejszą część tego organu można efektywnie wykorzystać na raz. Ciekawą jest rzeczą zastanowić się, że być może stoimy przed jednym z tych ograniczeń przyrody, na mocy których wysoko wyspecjalizowane narządy osiągają poziom zaniku efektywności, co w końcu prowadzi do wymarcia gatunku. Być może mózg ludzki jest tak daleko posunięty w zgubnej specjalizacji, jak wielki róg na czaszce u ostatnich zwierząt z gatunku titanothera.

VIII

INFORMACJA, JĘZYK I SPOŁECZEŃSTWO

Koncepcja organizacji, której elementy są same małymi organizacjami, nie jest ani nieznana, ani nowa. Luźne federacje starożytnej Grecji, Święte Cesarstwo Rzymskie i w podobny sposób ukonstytuowane współczesne mu państwa feudalne, Zjednoczone Królestwo Holandii, Stany Zjednoczone Ameryki Północnej i liczne państwa w Ameryce Południowej, Związek Socjalistycznych Republik Radzieckich — to wszystko przykłady hierarchicznych organizacji, wzięte ze sfery polityki. Lewiatan Hobbesa, Człowiek-Państwo składający się z niższych istot, jest ilustracją tej samej idei na szczeblu niższym o jeden, a poglądy Leibniza, uważającego żywy organizm za zgromadzenie, w ramach którego żyją swoim życiem inne organizmy, takie, jak ciałka krwi, są niczym innym, jak tylko kolejnym krokiem w tym samym kierunku. Stanowią one niewiele więcej, niż tylko fizjologiczną antycypację teorii komórkowej, zgodnie z którą większość zwierząt i roślin o średnich rozmiarach, a wszystkie zwierzęta i rośliny większe są zbudowane z pewnych jednostek, komórek, którym przypisujemy liczne, jeśli nie wszystkie atrybuty niezależnych organizmów żywych. Organizmy wielokomórkowe mogą same być cegiełkami organizmów wyższego szczebla, takich jak żeglarz portugalski (*Physalia*), będący złożoną strukturą zróżnicowanych jamochłonów - polipów, w ramach której pewne osobniki ulegają różnym modyfikacjom tak, by służyły celom odżywiania, poruszania się, wydalania, rozmnażania i podtrzymywania całości kolonii.

Ściśle mówiąc, taka kolonia stanowiąca fizycznie jedność, nie ma problemów organizacyjnych w filozoficznym sensie głębszych niż te, które powstają w przypadku struktur będących na niższym poziomie indywidua-

lizacji. Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku człowieka i innych zwierząt społecznych, w przypadku stad pawianów czy bydła, kolonii bobrów, rojów pszczół, gniazd os czy osiedli mrówek. Szczebel integracji życia takiej społeczności może zbliżyć się do poziomu, jaki obserwujemy w zachowaniu się pojedynczego osobnika, jednakże pojedynczy osobnik ma zapewne ustalony układ nerwowy o trwałych topograficznych relacjach między jego elementami i o trwałych połączeniach, natomiast społeczność składa się z osobników, których wzajemne relacje zmieniają się w czasie i przestrzeni i między którymi nie ma trwałych nierozerwalnych fizycznych połączeń. Całą tkanką nerwową roju pszczelego jest tkanka nerwowa pojedynczej pszczoły. Dlaczego więc rój pszczeli zachowuje się jak jedność, i to tak bardzo zmienna, dostosowana, zorganizowana jedność? Tajemnica kryje się oczywiście w komunikowaniu się jego członków.

Złożoność i treść pojęcia komunikowania się może być bardzo różna. W przypadku człowieka, obejmuje ono wszystkie zawiłości języka i literatury, a także wiele ponadto. W przypadku mrówek ogranicza się ono zapewne do rozróżniania kilku zaledwie zapachów. Jest rzeczą bardzo mało prawdopodobną, by mrówka umiała odróżnić jedną mrówkę od drugiej. Umie ona z pewnością odróżnić mrówkę z własnego mrowiska od mrówki z mrowiska obcego i współpracować z jedną, a zniszczyć drugą. Z kilku zewnętrznych relacji tego rodzaju można wnioskować, że umysł mrówki jest prawie tak samo sztywno ukształtowany i ciasno ograniczony chitynowym pancerzem, jak jej ciało. Jest to tyle, ile mogliśmy się spodziewać *a priori* po zwierzęciu, w którego życiu okres rozwoju i okres uczenia się są sztywno ograniczone od okresu dojrzałej działalności. Jedyne środki porozumienia się, jakie jesteśmy w stanie u nich wyśledzić, są równie niespecyficzne i rozproszone jak hormonalny system komunikowania się w obrębie ciała. Tak ogólny i bezkierunkowy zmysł jak węch, jeden ze zmysłów chemicznych, istotnie nie różni się bardzo od wpływów hormonalnych wewnątrz ciała.

Zauważmy na marginesie, że piżmo, perfumy piżmowe i inne pobudzające seksualnie substancje u ssaków można uważać za społeczne, zewnętrzne hormony, niezbędne — szczególnie w przypadku zwierząt żyjących samotnie — do przywoływania się osobników różnej płci w odpowiednim czasie i służące celom przedłużenia gatunku. Nie chciałbym przez

to twierdzić, że wewnętrzne działanie tych substancji, od chwili gdy dotrą one do narządu węchu, ma charakter bardziej hormonalny niż nerwowy. Przy tak małych ilościach substancji jak te, które są już łatwo wyczuwalne trudno sobie wyobrazić, by oddziaływania takie były czysto hormonalne. Z drugiej jednak strony o działaniu hormonów wiemy zbyt mało, byśmy mogli odrzucić możliwość że znikomo małe ilości takich substancji działają na drodze hormonalnej, tym bardziej, że długie poskręcane pierścienie węglowe, wykryte w substancjach znajdujących się w piżmie nie potrzebują wielkich zmian na to, by mogły utworzyć wielopierścieniowe struktury charakterystyczne dla hormonów płciowych, niektórych witamin i niektórych substancji rakotwórczych. Nie chcę wyrażać swojej opinii w tej sprawie; pozostawiam ją jako temat do ciekawych spekulacji.

Zapachy odbierane przez mrówkę zdają się prowadzić do wysoce unormowanych rodzajów zachowań, jednakże wartość tak prostego bodźca jak zapach dla celów przenoszenia informacji zależy nie tylko od informacji przenoszonej przez sam bodziec, lecz również od całej konstytucji nerwowej nadawcy i odbiorcy bodźca. Przypuśćmy, że znajdę się w lesie z inteligentnym dzikusem i ani on nie umie mówić moim językiem, ani ja jego. Nawet bez jakiegoś języka znaków wspólnego nam obu mogę się od niego wiele nauczyć. W tym celu muszę jedynie zważać na te momenty, w których okazuje on znaki emocji lub zainteresowania. Rozejrzę się wówczas dokoła, być może zwracając szczególną uwagę na kierunek jego spojrzenia i zarejestruję w pamięci to, co widzę i słyszę. Po niedługim czasie odkryję rzeczy, które są dla niego ważne; wcale nie dlatego, że zakomunikował mi to przy pomocy języka, lecz dlatego, że ja sam go obserwowałem. Inaczej mówiąc, sygnał bez wewnętrznej treści może zyskiwać w jego umyśle znaczenie dzięki temu, co obserwuje on w danej chwili, a także może zyskiwać znaczenie w moim umyśle dzięki temu, co ja obserwuję w tej chwili. Zdolność drugiego człowieka do wychwytywania momentów mojego szczególnego, aktywnego zainteresowania jest sama w sobie językiem tak różnorodnym w swych możliwościach, jak zakres wrażeń, który obaj jesteśmy zdolni objąć. Zwierzęta społeczne mogły zatem dysponować aktywnymi, inteligentnymi, giętkimi środkami porozumiewania się na długo przed wykształceniem języka.

Niezależnie od tego, jakie środki porozumiewania się ma dana rasa, możliwe jest określenie i zmierzenie ilości informacji dostępnej całej rasie

i odróżnienie jej od ilości informacji, dostępnej pojedynczemu osobnikowi. Z pewnością żadna informacja dostępna osobnikowi nie jest dostępna całej rasie, jeżeli nie modyfikuje zachowania jednego osobnika w stosunku do innego, a nawet takie zachowanie nie ma znaczenia dla rasy, jeżeli inne osobniki nie mogą odróżnić tej formy zachowania od innych. Tak więc odpowiedź na pytanie, czy pewien fragment informacji jest własnością rasy, czy własnością czysto prywatną, zależy od tego, czy informacja ta powoduje przyjmowanie przez osobnika form zachowania, które rozpoznawane przez innych członków rasy jako zachowanie wyróżniające się tak, że wpływa to z kolei na ich aktywność i tak dalej.

Mówiłem tu o rasie. W rzeczywistości jest to termin zbyt szeroki w stosunku do zakresu większości informacji o charakterze społecznym. Właściwie mówiąc, granice społeczności sięgają jedynie dotąd, dokąd sięga skuteczne przekazywanie informacji. Możliwe jest podanie pewnego rodzaju miary grupy społecznej, przez porównanie liczby decyzji przychodzących do grupy z zewnątrz z liczbą decyzji, podejmowanych w obrębie grupy. Możemy w ten sposób mierzyć stopień autonomii grupy. Miara efektywnej wielkości grupy jest określona jako wielkość, którą musi mieć grupa jeśli ma osiągnąć pewien ustalony stopień autonomii.

Grupa może dysponować informacją grupową, większą lub mniejszą niż jej członkowie. Grupa, zestawiona czasowo z osobników niespołecznych gatunków zwierząt, zawiera bardzo niewiele informacji grupowej, choć jej członkowie — jako oddzielne osobniki — mogą dysponować znaczną informacją. Informacja grupowa jest tu bardzo mała dlatego, że zachowanie jednego z członków grupy jest zauważane i podchwytywane przez innych tak, że rozprzestrzenia się na całą grupę. Z drugiej strony ludzki organizm zawiera z całym prawdopodobieństwem znacznie więcej informacji, niż którakolwiek z jego komórek. Nie ma zatem żadnych koniecznych związków w jednym lub drugim kierunku między ilością informacji rasowej, plemiennej czy społecznej a ilością informacji dostępnej pojedynczemu osobnikowi.

Podobnie jak w przypadku pojedynczego osobnika, nie cała informacja dostępna w pewnej chwili rasie, jest dostępna bez szczególnego wysiłku. Wiadomo dobrze, że biblioteki dławią się własną zawartością, a nauki rozwijają się do takiego poziomu specjalizacji, że specjalista jest często nieukiem poza granicami swej wąziutkiej dziedziny. Dr Vannevar Bush

sugerował, by przy przeszukiwaniu ogromnych mas materiału posłużyć się urządzeniami mechanicznymi. Mają one prawdopodobnie swoje zastosowanie, jednakże ogranicza je fakt, że nie mogą one sklasyfikować książki pod nieznanym tytułem, jeśli pewna konkretna osoba nie ustali przedtem, że ten tytuł ma związek z tą konkretną książką. W przypadku, gdy dwa różne dzieła operują tymi samymi metodami i mają tę samą treść intelektualną, lecz należą do znacznie odmiennych dziedzin, praca ta wciąż wymaga osoby o uniwersalności zainteresowań, godnej nieomal Leibniza.

W zestawieniu z pojęciem efektywnej ilości informacji społecznej jedną z najbardziej zdumiewających właściwości polityki zbiorowości ludzkiej jest całkowity brak skutecznych procesów homeostatycznych. W wielu krajach utrzymuje się przekonanie, podniesione w Stanach Zjednoczonych do godności oficjalnego artykułu wiary, że sama wolna konkurencja jest procesem homeostatycznym, że w warunkach wolnego rynku egoizm przekupniów rozglądających się gdzie jak najdrożej sprzedać, a jak najtaniej kupić, doprowadzi w końcu do stabilnej dynamiki cen z największym pożytkiem dla społeczeństwa. Wiąże się to z bardzo wygodnym przekonaniem, że indywidualny przedsiębiorca działając we własnym interesie jest jednocześnie w pewnym sensie publicznym dobroczyńcą, a zatem zasługuje na wielkie nagrody, którymi obsypuje go społeczeństwo. Niestety świadectwo rzeczywistości przemawia przeciw takiej prymitywnej teorii. Rynek jest grą, która nawet zyskała swój wizerunek w postaci gry towarzyskiej znanej pod nazwą Monopol. Podlega on zatem ściśle ogólnej teorii gier, opracowanej przez von Neumanna i Morgensterna. Teoria ta opiera się na założeniu, że każdy gracz, w każdym posunięciu, według aktualnie dostępnej mu informacji, postępuje zgodnie z całkowicie świadomą strategią, która ma mu zapewnić w końcu największą wartość oczekiwaną wygranej. Jest to więc gra rynkowa, rozgrywana między doskonale inteligentnymi, doskonale bezlitosnymi graczami. Już w przypadku dwóch graczy teoria jest skomplikowana, choć często prowadzi do wyboru określonej linii gry. W wielu przypadkach, gdy graczy jest trzech, a w przytłaczającej większości przypadków, gdy liczba graczy jest wielka, wyniki charakteryzują się jednak znaczną nieokreślonością i niestabilnością. Chciwość zmusza graczy do tworzenia koalicji, jednakże koalicje te nie powstają w jakiś jeden, określony sposób i kończą się zazwyczaj w zamęcie zdrad,

podstępów i oszustw, co stanowi jedynie bardzo prawdziwy obraz życia sfer wielkiego biznesu lub ściśle z nim związanej polityki, dyplomacji i wojny. Na dłuższą metę nawet najbardziej błyskotliwy i pozbawiony zasad kramarz musi spodziewać się ruiny, lecz niech tylko ci kramarze poczują się zmęczeni sytuacją i zgodzą się żyć między sobą w pokoju, a największa wygrana przypadnie temu, który czeka na stosowną chwilę by złamać tę ugodę i zdradzić swych towarzyszy. Nie ma tu żadnej homeostazy. Jesteśmy wplątani w cykl gospodarczych koniunktur i załamań, w następstwo dyktatur i rewolucji, w ciąg wojen, na których każdy traci, a które są tak realną cechą dzisiejszych czasów.

Oczywiście, występujący u von Neumanna obraz gracza, będącego osobą doskonale inteligentną i doskonale pozbawioną skrupułów, jest abstrakcją i przeinaczeniem faktów. Rzadko zdarza się, by wiele sprytnych i pozbawionych zasad osób rozgrywało grę między sobą. Gdzie zbiorą się łotrzy, tam zaraz znajdą się głupcy, a gdzie głupców jest dostatecznie wielu, tam stanowią oni dla łotrów bardziej zyskowny obiekt eksploatacji. Psychologia głupca stała się dla łotra sprawą wartą głębokiego zainteresowania. Głupiec zamiast pilnować, na wzór von Neumannowskiego gracza, swych długofalowych interesów, zachowuje się w sposób na ogół równie łatwy do przewidzenia jak szamotanie się szczura w labiryncie. Ta polityka kłamstw, lub raczej stwierdzeń niezgodnych z prawdą, skłoni go do kupowania pewnego gatunku papierosów; tamta znów skłoni go, przynajmniej tak spodziewa się partia, do głosowania na konkretnego i to jakiegokolwiek kandydata, lub do przyłączenia się do politycznego polowania na czarownice. Pewna precyzyjna mieszanina religii, pornografii i pseudonaukowości zapewni gazecie ilustrowanej pokupność. Pewne połączenie pochlebstwa, przekupstwa i zastraszania nakłoni młodego naukowca do podjęcia prac nad pociskami kierowanymi lub bombą atomową. Dla określenia tych czynników mamy całą machinę zestawiania list ulubieńców słuchaczy radiowych, próbnych głosowań, badań opinii publicznej i innych metod psychologicznego śledztwa, których obiektem jest szary człowiek. Zawsze znajdą się statystycy, socjologowie i ekonomiści, którzy sprzedadzą swe usługi tego rodzaju przedsięwzięciom.

Na szczęście dla nas, ci żerujący na łatwowierności handlarze kłamstw nie doszli jeszcze do takiej perfekcji, aby wszystko układało się po ich myśli. Dzieje się tak dlatego, że żaden człowiek nie jest tylko albo głupcem,

albo łotrem. Przeciętny człowiek jest dość świadomy w ocenie tego co znalazło się w kręgu jego bezpośredniego zainteresowania i dość altruistyczny w sprawach dobra publicznego lub osobistych cierpień, które staną przed jego oczami. W małej społeczności wiejskiej, której historia jest wystarczająco długa na to, by mogły rozwinąć się w niej pewne zuniformizowane wzory świadomości i zachowania, obowiązują bardzo wysokie normy w zakresie opieki nad ludźmi dotkniętymi nieszczęściem, w zakresie zarządzania drogami i innymi urządzeniami publicznymi, czy tolerancji w stosunku do tych, którzy raz czy dwa wystąpili przeciw społeczeństwu. W końcu ludzie tacy istnieją i reszta społeczności musi ułożyć sobie z nimi życie. Z drugiej strony, w społeczności takiej nie ma pobłażania dla człowieka, który zwykł oszukiwać swych sąsiadów. Istnieją sposoby, by dać mu odczuć ciężar opinii publicznej. Po krótkim czasie stwierdzi on, że jest ona tak wszechobecna, tak nieubłagana, tak ograniczająca swobodę i przygniatająca, że w odruchu samoobrony będzie musiał opuścić tę społeczność.

Małe, posplatane ścisłymi powiązaniami społeczności wykazują więc bardzo znaczny poziom homeostazy i to niezależnie od tego, czy są oświeconymi społecznościami krajów cywilizowanych, czy wioskami prymitywnych dzikusów. Choć zwyczaje wielu barbarzyńców mogą nam się wydawać dziwaczne, czy nawet odrażające, to mają one jednak na ogół bardzo określoną homeostatyczną wartość, a rolą antropologów jest między innymi jej zinterpretowanie. Bezwzględność może osiągnąć najwyższy poziom jedynie w wielkim społeczeństwie, gdzie „władców wszystkiego" bogactwo chroni przed głodem, izolacja i anonimowość — przed opinią publiczną, a procesy o zniesławienie i posiadanie środków rozpowszechniania informacji — przed osobistą krytyką. Spośród wszystkich tych antyhomeostatycznych czynników najskuteczniejszym i najważniejszym jest kontrola nad środkami masowego porozumiewania się.

Jedną z nauk, jakie płyną z niniejszej książki jest fakt, że każdy organizm zachowuje jedność działania dzięki temu, że posiada środki dla odbierania, wykorzystania, przechowywania i przekazywania informacji. W społeczeństwach zbyt wielkich na to, by bezpośrednie porozumiewanie się między jego członkami było możliwe, środkami tymi są: prasa (zarówno książki, jak gazety), radio, telefon, telegraf, poczta, teatr, kino, szkoła i kościół. Poza swym istotnym zadaniem jakim jest przekazywanie infor-

macji, spełniają one również pewne drugorzędne funkcje. Gazeta podobnie zresztą jak film i radio – jest narzędziem reklamy i źródłem zysku dla właściciela. Szkoła i kościół są nie tylko schronieniem dla uczonego i świętego; stanowią one również teren podległy działalności kuratora i biskupa. Książka, na której wydawca nie zarobi, najprawdopodobniej nie zostanie wydrukowana, a już z pewnością nie będzie wznowiona.

W społeczeństwie takim jak nasze, jawnie opartym na zasadach kupna i sprzedaży, w którym wszystkie zasoby naturalne i ludzkie uważa się za absolutną własność pierwszego biznesmana, który okazał się wystarczająco przedsiębiorczy, aby je eksploatować, takie wtórne aspekty środków porozumiewania się zaczynają coraz bardziej przesłaniać ich pierwotne zadania. Przyczynia się do tego pracochłonność i – co za tym idzie – kosztowność samych środków porozumiewania się. Prowincjonalna gazeta może wciąż korzystać z usług własnych reporterów w pogoni za mało miasteczkowymi plotkami, lecz wiadomości krajowe, sensacje publikowane przez syndykat i komentarze polityczne kupuje tak, jak stereotypowe wyroby żelazne. Dochód radia jest uzależniony od reklamujących się za jego pośrednictwem towarzystw, a zawsze kto płaci, ten wymaga. Wydawcy koncentrują się na publikowaniu książek, które mają szanse na to, że będą zaakceptowane przez jakiś klub książki, który wykupi cały ogromny nakład. Prezydent college'u i biskup, nawet jeśli nie mają osobistych ambicji władzy, muszą prowadzić kosztowne instytucje i zdani są na poszukiwanie pieniędzy gdzie się tylko da.

Mamy więc do czynienia z trzema tylko czynnikami powodującymi wyzbywanie się przez środki rozpowszechniania informacji ich pierwotnych funkcji. Po pierwsze, środki mniej zyskowne eliminuje się na korzyść przynoszących większy zysk. Po drugie, środki te znajdują się w rękach bardzo ograniczonej klasy ludzi bogatych, naturalną jest więc rzeczą, że wyrażają one opinie tej klasy. Po trzecie, stanowią one jedne z głównych wrót prowadzących do osobistej i politycznej władzy, przeto przyciągają przede wszystkim tych, którzy mają ambicje rządzenia. Aparat, który bardziej niż inne winien przyczyniać się do osiągnięcia społecznej homeostazy, dostał się wprost w ręce ludzi najbardziej zainteresowanych grą o władzę i pieniądze; grą, która, jak się już przekonaliśmy, jest głównym antyhomeostatycznym czynnikiem w społeczeństwie. Nic więc dziwnego, że większe społeczności podlegające takim rozłamowym wpływom, zawie-

rają o wiele mniej społecznie dostępnej informacji, niż społeczności mniejsze, nie mówiąc już o oddzielnych ludziach, z których składa się każda społeczność. Państwo, jak stado wilków — choć miejmy nadzieję, że w mniejszym stopniu — jest głupsze, niż większość jego obywateli.

Przeczy to poglądom głoszonym w kręgach kierowników przedsiębiorstw, wielkich zakładów badawczych itp., według których społeczeństwo, ponieważ jest większe, niż jednostka, jest również obdarzone większą inteligencją. Poglądy te wynikają częściowo z dziecinnego zachwytu nad wielkością i szczodrością, a częściowo z poczucia faktu, że wielka organizacja ma możliwości czynienia dobra. Poczucie to w dużej mierze jest niczym więcej, niż tylko rozglądaniem się za możliwościami wzbogacenia się i pożądaniem doczesnych korzyści.

Istnieje również grupa ludzi, którzy nie spodziewają się niczego dobrego po anarchii współczesnego społeczeństwa, a których optymistyczne przekonanie, że musi znaleźć się jakieś wyjście, doprowadziło do przeceniania występujących w społeczeństwie czynników homeostatycznych. Jakkolwiek możemy sympatyzować z poglądami takich osób i doceniać trudność emocjonalnej sytuacji w jakiej się znalazły, to jednak nie możemy przypisywać takiemu życzeniowemu myśleniu zbyt wielkiego znaczenia. Jest to sposób rozumowania myszy, które stoją przed problemem jak przywiązać kotu dzwoneczek. Niewątpliwie nam, myszom byłoby bardzo przyjemnie, gdyby wszystkie drapieżniki tego świata miały zawieszone dzwoneczki, ale kto ma tego dokonać? Któż może nam zagwarantować, że bezwzględna władza nie znajdzie się znów w rękach tych, którzy są jej najbardziej żądni?

Wspominam o tych sprawach dlatego, że niektórzy z moich przyjaciół budują sobie wielkie i moim zdaniem fałszywe — nadzieje co do społecznej przydatności zawartych w niniejszej książce nowych metod rozumowania. Są oni pewni, że nasza kontrola nad otoczeniem materialnym przerosła znacznie naszą kontrolę nad otoczeniem społecznym oraz jego rozumienie. Dlatego za główne zadanie najbliższej przyszłości uważają oni rozwój antropologii, socjologii, ekonomiki i nauk przyrodniczych w nadziei, że osiągnie się w ten sposób podobne sukcesy w naukach społecznych. Od przekonania, że jest to konieczne, przechodzą oni do przekonania, że jest to możliwe. Tak rozumując, wykazują, moim zdaniem, nadmierny optymizm i niezrozumienie natury wszelkich osiągnięć naukowych.

Wszystkich wielkich osiągnięć w naukach ścisłych dokonano w tych dziedzinach, gdzie obserwowane zjawisko jest w znacznym stopniu odizolowane od obserwatora. W przypadku astronomii izolacja ta wynika z faktu, że skala zjawiska jest tak wielka wporównaniu z człowiekiem, że największe nawet wysiłki człowieka (nie mówiąc już o samej tylko obserwacji) nie mogą wywrzeć najmniejszego zauważalnego wpływu na świat gwiazd. Z kolei we współczesnej fizyce atomowej, nauce o rzeczach niewypowiedzianie małych, wszystko co robmy ma wpływ na wiele oddzielnych cząstek i to znaczny wpływ *z punktu widzenia takiej cząstki*. Niemniej jednak sami nie żyjemy ani w czasowej, ani w przestrzennej skali obserwowanych cząstek i zdarzenia, które miałyby największe nawet znaczenie dla obserwatora zgodnego z ich skalą, wylają się nam, co prawda z pewnymi wyjątkami, jak na przykład w doświadczeniach z komorą Wilsona, jedynie uśrednionymi, masowymi efektani, w których bierze udział ogromna ilość cząstek. Dopóki zajmujemy się takimi efektami, obserwowane przeciały czasu są długie z punktu widzeniapojedynczych cząstek i ich ruchu, i mamy właściwe podstawy do stosowana naszych teorii statystycznych. Krótko mówiąc jesteśmy zbyt mali, byśny mogli wpłynąć na bieg gwiazd, a zbyt duzi, byśmy mogli zważać na coś innego niż tylko na masowe efekty w świecie cząstek, atomów i elektronów. W obu przypadkach jesteśmy sprzężeni z badanymi zjawiskami na tyle luźno, że możemy wyjaśnić całkowicie naturę tego sprzężenia, choć może nie byćono na tyle luźne, byśmy mogli ignorować je zupełnie.

Właśnie w naukach społecznych sprzężenie pomiędzy obserwatorem a obserwowanym zjawiskiem jest tym, co najtrudniej jest zmniejszyć. Po pierwsze, obserwator może wywrzeć znaczny wpływ na zjawiska, które znalazły się w kręgu jego zainteresowania. Przy całym szacunku dla inteligencji, umiejętności i szczerości celów moich przyjaciół antropologów, nie sądzę, by jakakolwiek społeczność, którą badali, pozostała potem wciąż taka sama. Wielu misjonarzy nadało własnemu niezrozumieniu prymitywnego języka formę ustalonego prawa poprzez sprowadzenie go do postaci pisanej. Wiele ludzkich zwyczajów społecznych ulega zniekształceniu przez sam fakt, że ktoś się o nie wypytuje. W innym niż zazwyczaj sensie, *traduttore traditore*.

Z drugiej strony uczony z dziedziny nauk społecznych pozbawiony jest korzyści, jakie płyną z oglądania przedmiotu swych badań z chłodnych

wyżyn wieczności i wszechobecności. Być może, mogłaby istnieć socjologia masy ludzkich żyjątek, obserwowanych tak, jak obserwuje się populację *Drosophila* w probówce, lecz nie jest to ta socjologia, którą my, będący sami ludzkimi żyjątkami, jesteśmy szczególnie zainteresowani. Nie zajmujemy się ludzkimi wzlotami i upadkami, przyjemnościami i cierpieniami *sub specie aeternitatis*. Antropolog donosi o zwyczajach związanych z życiem, kształceniem, karierą i śmiercią ludzi, których życie przebiega w takiej samej skali, jak jego. Ekonomista jest najbardziej zainteresowany przewidywaniem takich cykli gospodarczych, które zamykają się w czasie krótszym niż jedno pokolenie lub przynajmniej mają różny wpływ na losy człowieka na różnych szczeblach jego kariery. Nieliczni tylko filozofowie, zajmujący się dziś sprawami polityki chcą ograniczać się do badań obracających się w kręgu idei Platona.

Innymi słowy, w dziedzinie nauk społecznych mamy do czynienia z krótkotrwałymi przebiegami statystycznymi i nie możemy być pewni, czy znaczna część tego, co obserwujemy, nie jest wytworem naszej własnej działalności. Badania giełdowe mogą wzburzyć rynek giełdowy. Jesteśmy zbyt silnie związani z przedmiotami naszych badań, byśmy byli dobrymi ich rejestratorami. Niezależnie od tego, czy nasze badania w dziedzinie nauk społecznych mają charakter statystyczny, czy dynamiczny — a powinny mieć częściowo i taki, i taki — wyniki ich nie będą miały dokładności większej, niż zaledwie kilka miejsc dziesiętnych i krótko mówiąc, nigdy nie dadzą nam one pewnej ilości dającej się sprawdzić, znaczącej informacji, która stałaby się porównywalna z tym, czego nauczyliśmy się oczekiwać od nauk przyrodniczych. Chcąc nie chcąc wielką część tych dziedzin musimy pozostawić we władanie „nienaukowym", opisowym metodom zawodowych historyków.

UWAGA

Istnieje pewne zagadnienie, które należy właściwie do treści niniejszego rozdziału, jakkolwiek nie stanowi w żadnym wypadku kulminacyjnego punktu prowadzonego w nim toku rozumowania. Jest to zagadnienie następujące: czy możliwe jest zbudowanie maszyny grającej w szachy i czy tego rodzaju możliwość oznacza istnienie zasadniczej różnicy między możli-

wościami maszyny i mózgu? Zauważmy, że nie musimy stawiać pytania, czy możliwe jest zbudowanie maszyny, która grałaby optymalnie w sensie teorii von Neumanna. Nawet najlepszy mózg ludzki nie zbliża się do takiej doskonałości. Skądinąd, jest rzeczą bezsprzecznie możliwą zbudowanie maszyny, która grałaby w szachy w tym sensie, że zachowywałaby reguły gry, bez wnikania w jej meritum. Nie jest to w swej zasadzie zadaniem trudniejszym, niż zbudowanie systemu blokad dla nastawni kolejowej. Prawdziwy problem polega na czym innym: jak skonstruować maszynę, która byłaby ciekawym przeciwnikiem dla szachisty o takim poziomie umiejętności, jaki spotyka się wśród ludzi.

Sądzę, że jest rzeczą możliwą zbudowanie względnie prymitywnego, choć nie zupełnie trywialnego aparatu do tych celów. Maszyna musi rzeczywiście uwzględniać w grze, z możliwie dużą szybkością, wszystkie własne dopuszczalne posunięcia i wszystkie dopuszczalne kontrposunięcia przeciwnika na dwa lub trzy ruchy naprzód. Każdemu ciągowi ruchów powinna przypisywać pewną umowną wartość. Danie przeciwnikowi mata jest zawsze wartościowane najwyżej, dostanie mata – najniżej, a szach, utrata własnej bierki, bicie bierki przeciwnika i inne występujące w szachach sytuacje otrzymają oceny niezbyt różniące się od tych, które przypisałby im dobry szachista. Pierwszy ruch całej partii powinien być oceniany tak, jak oceniłaby go teoria von Neumanna. Gdy maszyna ma wykonać jeden ruch i jej przeciwnik jeden ruch, wartość posunięcia maszyny powinna odpowiadać minimalnej ocenie sytuacji po wykonaniu przez przeciwnika wszystkich możliwych ruchów. W sytuacji, w której maszyna i jej przeciwnik powinni wykonać po dwa ruchy, wartość gry z punktu widzenia maszyny jest minimalna ze względu na pierwszy ruch przeciwnika o wartości maksymalnej ze względu na ruch maszyny podjęty w sytuacji, gdy przeciwnik już wykonał jeden ruch, a maszyna miała wykonać swój ruch.

Proces ten można rozszerzyć na przypadek, gdy każdy z graczy wykonuje trzy ruchy i tak dalej. Maszyna wyszukuje zatem każdy z ruchów, mających maksymalną wartość dla sytuacji o n ruchów naprzód, przy czym o wielkości n decyduje konstruktor maszyny i przyjmuje ją za swój sposób postępowania.

Maszyna taka grałaby w szachy nie tylko zgodnie z regułami, lecz nawet w sposób, który nie byłby tak zły, żeby aż był śmieszny. W każdej sytuacji, jeśli możliwy byłby mat w dwóch lub trzech posunięciach, maszyna dałaby

przeciwnikowi mata, jeśli możliwe byłoby uniknięcie mata, grożącego w dwóch lub trzech posunięciach ze strony przeciwnika, maszyna uniknęłaby go. Taka maszyna wygrałaby prawdopodobnie z graczem głupim lub nieostrożnym, a przegrałaby z bardziej biegłym, uważnym szachistą. Innymi słowy, byłaby graczem równie dobrym, jak znaczna większość ludzi. Nie znaczy to, że osiągnęłaby biegłość oszukańczej maszyny Maelzela, lecz mogłaby dojść do dość wysokiego poziomu umiejętności.

CZĘŚĆ II

ROZDZIAŁY DODATKOWE

1961

IX

O MASZYNACH UCZĄCYCH SIĘ I SAMOREPRODUKUJĄCYCH SIĘ

Za charakterystyczne dla układów żywych uważamy dwa zjawiska: zdolność uczenia się i zdolność do reprodukowania się. Własności te, jakkolwiek na pozór odmienne, wiążą się ściśle ze sobą. Zwierzę, które się uczy, może zostać przekształcone przez otoczenie w inną istotę, ma zatem zdolność dostosowywania się do otoczenia w czasie swego indywidualnego życia. Zwierzę, które się rozmnaża ma zdolność tworzenia innych zwierząt na swój wzór i podobieństwo przynajmniej w przybliżeniu, jednak nie tak ściśle na swoje podobieństwo, by nie mogły one zmieniać się wraz z upływem czasu. Jeśli taka zmienność sama nie podlega dziedziczeniu, to dostarcza ona surowego materiału, na którym działa proces doboru naturalnego. Jeśli dziedziczna niezmienność dotyczy wzorców zachowania, to niektóre pośród dziedziczonych wzorców zachowania okażą się korzystne dla przedłużenia gatunku i ustalą się, natomiast inne, które są dla przedłużenia gatunku szkodliwe, zostaną wyeliminowane. Wynikiem jest pewien rodzaj rasowego, czyli filogenetycznego uczenia się, różnego od ontogenetycznego uczenia się osobnika. Uczenie się, zarówno ontogenetyczne, jak filogenetyczne jest sposobem dostosowywania się zwierzęcia do otoczenia.

Występowanie uczenia się zarówno ontogenetycznego, jak filogenetycznego, a już z pewnością drugiego z nich, nie ogranicza się wyłącznie do zwierząt, lecz rozciąga się również na rośliny, a w istocie na wszystkie organizmy, które można w jakimkolwiek sensie uważać za żywe. Znaczenie tych dwóch typów uczenia się dla różnych rodzajów istot żywych zmienia się jednak w szerokich granicach. U człowieka, a w mniejszym zakresie u innych ssaków, ontogenetyczne uczenie się i osobnicza zdolność dostosowywania wzniosła się na najwyższy poziom. Można doprawdy powiedzieć, że w przy-

padku człowieka znaczną część filogenetycznego uczenia się przeznacza się na stworzenie możliwości dobrego ontogenetycznego uczenia się.

W swym podstawowym dziele o psychice ptaków Julian Huxley wskazał[1], że ptaki mają małą zdolność ontogenetycznego uczenia się. Podobne stwierdzenie odnosi się również do owadów. W obu przypadkach może się to wiązać z faktem, że latanie narzuca osobnikowi ogromne wymagania i co za tym idzie, okupuje możliwości układu nerwowego, które w innym przypadku mogłyby zostać zastosowane do celów ontogenetycznego uczenia się. Wzorce zachowania ptaków, choć złożone — latanie, zaloty, opieka nad młodymi, budowanie gniazd — są realizowane bezbłędnie już od pierwszego razu, bez dłuższych pouczeń ze strony matki.

Jest rzeczą zupełnie właściwą poświęcić rozdział niniejszej książki tym dwu związanym ze sobą tematom. Czy maszyny budowane przez człowieka mogą uczyć się i reprodukować się? W niniejszym rozdziale postaramy się wykazać, że mogą one istotnie uczyć się i reprodukować oraz omówimy metodę, potrzebną dla obu tych czynności.

Z dwóch wymienionych procesów prostsze jest uczenie się i w tej właśnie dziedzinie osiągnięcia techniczne są najwyższe. Będę tu mówił zwłaszcza o uczeniu się maszyn rozgrywających gry, uczeniu się, które umożliwia im ulepszanie strategii i taktyki postępowania w oparciu o doświadczenie.

Istnieje uznana teoria gier sformułowana przez von Neumanna[1]. Zajmuje się ona taktyką postępowania, którą najlepiej jest prześledzić postępując od końca gry, a nie od jej początku. W ostatnim posunięciu gry gracz usiłuje wykonać ruch prowadzący do zwycięstwa, a jeśli nie jest to możliwe, ruch prowadzący co najmniej do remisu. W poprzednim posunięciu jego przeciwnik usiłuje wykonać ruch, który zapobiegłby wykonaniu przez naszego gracza ruchu wygrywającego lub remisującego. Gdyby on sam mógł wykonać w tej sytuacji ruch wygrywający, wykonałby go i byłoby to nie przedostatnie, lecz ostatnie posunięcie gry. Pierwszy z graczy będzie usiłował w ruchu poprzedzającym ten ruch działać tak, by najlepsze nawet pomysły przeciwnika nie przeszkodziły mu w wykonaniu końcowego, wygrywającego ruchu i tak dalej.

Istnieją gry takie, jak „kółko i krzyżyk", gdzie cała strategia jest znana

[1] Huxley J., *Evolution: The Modern Synthesis*, New York 1943, Harper Bros.

[2] von Neuman J., Morgenstern O., *Theory of Games and Economie, Behavior*, Princeton N. J. 1944, Princeton University Press.

i można rozpocząć jej stosowanie już od samego początku. Gdy jest to wykonalne, to stanowi w oczywisty sposób najlepszą metodę postępowania w czasie gry. W wielu jednak grach, takich jak szachy i warcaby, nasza wiedza nie wystarcza do ustalenia całościowej strategii tego typu i wówczas możemy jedynie przybliżać się do niej. Przybliżona teoria, którą podał von Neumann, usiłuje skłonić gracza do postępowania z największą ostrożnością, przy założeniu, że jego przeciwnik jest idealnym mistrzem.

Pogląd taki nie zawsze jest jednak usprawiedliwiony. W czasie wojny, która jest rodzajem gry, będzie on na ogół prowadził do postępowania niezdecydowanego, które często jest niewiele lepsze od przegranej. Pozwolę sobie przytoczyć dwa przykłady z historii. Gdy Napoleon walczył z Austriakami we Włoszech, część jego sukcesu pochodziła stąd, że uważał on austriacką myśl wojskową za tradycyjną i ograniczoną. Był więc całkiem usprawiedliwiony, gdy zakładał, że nie są oni zdolni do wykorzystania nowych metod wojennych wymagających szybkiej decyzji, opracowanych przez żołnierzy Rewolucji Francuskiej. Gdy Nelson walczył z połączonymi flotami Europy kontynentalnej, miał tę przewagę, że dowodził machiną morską, która rządziła na morzach przez całe lata i wypracowała sobie metody myślenia, do których — z czego Nelson dobrze zdawał sobie sprawę — jego przeciwnicy nie byli zdolni. Gdyby nie wykorzystał w pełni tej przewagi, gdyby działał ostrożnie, zakładając, że ma do czynienia z nieprzyjacielem równie jak on doświadczonym w walce morskiej, to mógłby wprawdzie wygrać po długiej wojnie lecz nie wygrałby tak szybko i zdecydowanie, by można było ustanowić szczelną blokadę morską, która przyczyniła się ostatecznie do upadku Napoleona. Tak więc w obu przypadkach czynnikiem decydującym o linii postępowania była znana przeszłość dowódcy i jego przeciwników, uwidoczniona statystycznie na ich minionych działaniach, a nie usiłowanie, by rozgrywać wyidealizowaną grę z wyidealizowanym przeciwnikiem. Bezpośrednie zastosowanie metod teorii gier von Neumanna do tych przypadków okazało się bezpłodne.

Podobnie, książek o teorii szachowej nie pisze się z pozycji teorii von Neumanna. Stanowią one zbiory zasad, wywiedzionych z praktycznych doświadczeń szachistów, grających przeciw innym szachistom o wysokiej biegłości i rozległej wiedzy i ustalają pewne wartości, czy też przypisują wagi utracie każdej bierki, aktywności, rozwinięciu pozycji i innym czynnikom, które mogą ulegać zmianom w kolejnych posunięciach partii.

Nie jest rzeczą trudną zbudować maszyny, które będą grały w swojego rodzaju szachy. Samo podporządkowanie się regułom gry tak, aby wykonywane były jedynie prawidłowe ruchy, da się z łatwością zmieścić w granicach możliwości dość prostych maszyn liczących. Nie jest doprawdy trudno przystosować do tych celów zwykłą maszynę cyfrową.

Powstaje teraz kwestia doboru taktyki w ramach obowiązujących reguł gry. Każdą ocenę wartości bierki, aktywności, rozwoju i tak dalej, można sprowadzić do postaci liczbowej, a kiedy to się uczyni można posłużyć się zasadami z podręcznika szachowego do określenia najlepszego posunięcia w każdym momencie gry. Maszyny takie już zbudowano. Będą one grały prawidłowo w szachy na poziomie amatorskim, lecz w chwili obecnej nie rozegrają partii po mistrzowsku.

Wyobraźmy sobie, że rozgrywamy partię szachów przeciw takiej maszynie. Aby sytuacja była sprawiedliwa załóżmy, że gra toczy się korespondencyjnie, nie wiemy, że gramy przeciw maszynie i nie mamy wszystkich tych uprzedzeń, jakie może wzbudzać ta świadomość. Oczywiście, jak zawsze w szachach, wytworzymy sobie sąd o osobowości naszego przeciwnika. Stwierdzimy, że jeśli na szachownicy sytuacja powtórzy się, reakcja naszego przeciwnika będzie za każdym razem taka sama i dojdziemy do wniosku, że ma on osobowość bardzo sztywną. Jeśli jakaś nasza sztuczka powiedzie się raz, to w takiej samej sytuacji powiedzie się zawsze. Dla doświadczonego gracza nie jest więc rzeczą trudną rozszyfrowanie takiego mechanicznego przeciwnika i zwyciężanie go za każdym razem.

Istnieją jednak maszyny, których nie można pokonać w tak trywialny sposób. Przypuśćmy, że po każdych kilku partiach maszyna przerywa grę i wykorzystuje swe możliwości do innych celów. W tym czasie nie rozgrywa ona ze swym przeciwnikiem gry, lecz bada wszystkie poprzednie partie, które zarejestrowała w swej pamięci po to, aby określić, jakie wartości wagowe przypisane figurom, aktywności i tak dalej prowadzą najczęściej do wygranej. W ten sposób uczy się ona nie tylko na własnych błędach, lecz również na sukcesach przeciwnika. Maszyna zastępuje teraz poprzednie oceny nowymi i podejmuje znów grę jako maszyna nowa i lepsza. Taka maszyna nie będzie już miała równie sztywnej osobowości jak przedtem, a sztuczki, które poprzednio zastosowano z powodzeniem przeciwko niej, w ostatecznym rachunku zawiodą. Co więcej, może ona przyswajać sobie wraz z upływem czasu pewne elementy taktyki jej przeciwników.

Wszystko to jest bardzo trudno urzeczywistnić w przypadku szachów i w istocie rzeczy, omówionej metody nie opracowano w tak pełnym kształcie, by mogła z niej wyrosnąć maszyna grająca w szachy po mistrzowsku. Z łatwiejszymi zagadnieniami stykamy się w warcabach. Fakt, że wartości wszystkich kamieni warcabowych są jednakowe, znacznie zmniejsza liczbę kombinacji, które należy uwzględniać. Co więcej, częściowo na skutek tej jednorodności, partia warcabów dzieli się na odrębne stadia mniej wyraźnie, niż partia szachów. Nawet w warcabach główny probelm gry końcowej polega już nie na biciu figur przeciwnika, lecz na nawiązaniu takiego kontaktu z nieprzyjacielem, by móc bić jego bierki. Podobnie, oceny ruchów w partii szachów powinno się dokonywać oddzielnie dla różnych stadiów gry. Nie tylko gra końcowa różni się od gry środkowej w najważniejszych swych założeniach, lecz również debiuty szachowe w znacznie większym stopniu niż gra środkowa są poświęcone wyrabianiu figurom pozycji, dających im swobodę ruchów w ataku i obronie. Rezultat jest taki, że nie możemy nawet w przybliżeniu zadowalać się jednakową oceną różnych czynników wagowych dla gry jako całości, lecz musimy dzielić proces uczenia się na pewną liczbę odrębnych stadiów. Tylko wówczas możemy mieć nadzieję na zbudowanie maszyny uczącej się, która będzie mogła grać w szachy po mistrzowsku.

W niniejszej książce wspomniano już wcześniej (w związku z problemem przewidywania) o koncepcji połączenia programowania pierwszego rzędu, które może być w pewnych przypadkach liniowe, z programowaniem drugiego rzędu, które posługując się znacznie większym fragmentem przeszłości określa linię postępowania obowiązującą programowanie pierwszego rzędu. Urządzenie przewidujące wykorzystuje najbliższą przeszłość lotu samolotu jako narzędzie, służące do określenia jego przyszłości za pomocą operacji liniowych, jednakże określenie najlepszego sposobu liniowego działania jest zagadnieniem statystycznym, w którym statystyczną podstawę stanowi długi okres przeszłości tego i wielu innych podobnych lotów.

Badania statystyczne, niezbędne do tego, by posługując się dalszą przeszłością określić linię postępowania, którą należy przyjąć w bliskiej przyszłości, są wysoce nieliniowe. W istocie rzeczy, w przypadku stosowania równania Wienera–Hopfa do celów przewidywania[1] określenia współ-

[1] Wiener N., *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications,* The New York 1949, Technology Press of M.I.T. and J. Wiley & Sons.

czynników tego równania dokonuje się w sposób nieliniowy. Maszyna ucząca się działa na ogół przy wykorzystaniu nieliniowego sprzężenia zwrotnego. Maszyna grająca w warcaby, opisana przez Samuela[1] i Watanabe[2] może nauczyć się regularnego pokonywania człowieka, który ją programował, po $10 \div 20$ roboczogodzinach programowania.

Filozoficzne koncepcje Watanabe'a na temat zastosowań maszyn programujących są niesłychanie interesujące. Metodę dowodzenia elementarnego twierdzenia geometrycznego, która powinna być w optymalny sposób zgodna z pewnymi kryteriami elegancji i prostoty dowodu, Watanabe traktuje jako naukę gry, którą rozgrywa się nie przeciwko konkretnemu, indywidualnemu przeciwnikowi, lecz przeciwko wyimaginowanej postaci, którą w golfie nazywamy „pułkownikiem Bogey". Podobną grę, również badaną przez Watanabe, rozgrywamy w przypadku indukcji logicznej, gdy dążąc do zbudowania teorii optymalnej w analogicznym quasi-estetycznym sensie (w sensie ekonomiczności, prostoty, itp) określamy ocenę skończonej liczby wolnych parametrów. Jest to co prawda jedynie ograniczona indukcja logiczna, niemniej jednak zasługuje na uwagę.

Teoria maszyn rozgrywających gry rzuca wiele światła na liczne formy aktywności występujące w walce, których zazwyczaj nie uważamy za grę. Ciekawy przykład stanowi walka między ichneumonem a wężem. Jak podkreśla Kipling w *Rikki-Tikki-Tavi*, ichneumon nie jest odporny na jad kobry, choć przed ukąszeniem węża chroni go do pewnego stopnia gęsta sierść. Jak pisze Kipling, walka ta jest tańcem ze śmiercią, próbą zwinności i sprawności mięśni. Nie ma podstaw do przypuszczenia, że poszczególne ruchy ichneumona są szybsze i dokładniejsze, niż kobry, jednakże ichneumon prawie nieodmiennie zabija kobrę, sam wychodząc z walki bez szwanku. Jak mu się to udaje?

Podaję tu wyjaśnienie, według mego przekonania prawidłowe, które nasunęło mi się, gdy obejrzałem taką walkę jak również zdjęcia filmowe z podobnych walk. Nie gwarantuję prawidłowości moich obserwacji ani interpretacji. Na początku ichneumon pozoruje atak który prowokuje węża do wyrzutu ciała. Ichneumon robi unik i znów pozoruje atak, tak,

[1] Samuel A. L., *Some Studies in Machine Learning, Using the Game of Checkers*, „IBM Journal of Research and Development", 3 (1959), str. 210 - 229.

[2] Watanabe S., *Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation*, „IBM Journal of Research and Development", 4 (1960), str. 66 - 82.

że obserwujemy rodzaj rytmicznego zachowania się obu zwierząt. Taniec ten nie ma jednak charakteru statycznego, lecz stopniowo rozwija się. W miarę upływu czasu ichneumon wykonuje pozorowane ataki coraz wcześniej w stosunku do wyrzutów ciała kobry, aż w końcu atakuje, gdy kobra rozciągnie się na całą długość i nie jest w stanie szybko poruszać się. Tym razem ichneumon nie pozoruje ataku, lecz zabójczo dokładnym ukąszeniem wgryza się w mózg kobry.

Inaczej mówiąc, wzorzec postępowania kobry ogranicza się do wykonywania oddzielnych, niezależnych od siebie wyrzutów, natomiast ichneumon w swym zachowaniu uwzględnia dość znaczną, jeśli nie bardzo długą część całego przeszłego przebiegu walki. W tym sensie ichneumon działa podobnie do maszyny uczącej się, a rzeczywista skuteczność jego śmiercionośnych ataków polega na tym, że ma on znacznie wyżej zorganizowany układ nerwowy.

Jak pokazano w filmie Walta Disneya sprzed kilku lat, bardzo podobna sytuacja ma miejsce wówczas, gdy jeden z ptaków zachodniej części naszego kraju atakuje grzechotnika. Jakkolwiek ptak walczy dziobem i szponami, a ichneumon przy pomocy zębów, to jednak wzorzec postępowania jest bardzo podobny. Doskonałym przykładem takiej samej sytuacji jest walka z bykiem. Należy pamiętać, że walka z bykiem nie jest sportem, lecz igraniem ze śmiercią, które ma uwidocznić piękno wzajemnie splatających się poczynań byka i człowieka. Nie ma tu miejsca na dawanie bykowi uczciwych szans i w naszym rozumowaniu możemy pominąć wstępne czynności drażniące i osłabiające byka, które mają na celu doprowadzenie walki do takiego etapu, w którym najpełniej ujawnia się wzajemne relacje wzorców zachowania obu przeciwników. Dobry toreador ma obszerny repertuar możliwych działań: powiewanie muletą, różne uniki, piruety itd., które mają na celu doprowadzenie byka do zatrzymania się w miejscu i wyciągnięcia ciała dokładnie w chwili, gdy toreador jest gotów do wbicia mu szpady w serce.

To, co powiedziałem o walce między ichneumonem a kobrą, czy toreadorem a bykiem, odnosi się również do fizycznej walki między dwoma ludźmi. Weźmy pod uwagę pojedynek na rapiery. Składa się on z szeregu zwodów, odparowań i pchnięć, przy czym zamiarem każdego z szermierzy jest odepchnięcie rapiera przeciwnika tak daleko, aby można było zadać celne pchnięcie bez wystawiania się na jednoczesne trafienie z jego strony.

Podobnie, przy grze w tenisa na mistrzowskim poziomie nie wystarcza prawidłowe serwowanie lub odbijanie piłki w każdym uderzeniu oddzielnie, strategia polega na zmuszeniu przeciwnika do takiej wymiany piłek, aby przeciwnik stopniowo przesuwał się na coraz gorszą pozycję, aż wreszcie nie będzie sposobu, by odbił on piłkę prawidłowo.

Zarówno omówione fizyczne starcia, jak i takie gry, w które według naszych przypuszczeń mają grać maszyny, zawierają ten sam element uczenia się w oparciu o doświadczenie na temat zwyczajów przeciwnika i swoich własnych. To, co jest właściwe dla gier polegających na fizycznym starciu, jest również właściwe dla tych rodzajów walki, w których element intelektualny zaznacza się silniej, tak jak w przypadku wojny lub naśladujących ją gier wojennych, w czasie których nasi oficerowie sztabowi zyskują elementy swego doświadczenia bojowego. Stwierdzenie to jest prawdziwe w odniesieniu zarówno do konwencjonalnych wojen na lądzie i morzu, jak i do nowego, dotąd nie praktykowanego rodzaju działań wojennych — wojny z użyciem broni atomowej. We wszystkich tego rodzaju wojnach możliwe jest wprowadzenie pewnego stopnia mechanizacji, analogicznej do mechanizacji gry w warcaby za pomocą maszyn uczących się.

Nie można wyobrazić sobie nic bardziej niebezpiecznego, niż trzecia wojna światowa. Warto zastanowić się, czy część tego niebezpieczeństwa nie wywodzi się z możliwości nierozważnego użycia maszyn uczących się. Wielokrotnie słyszałem pogląd, że maszyny uczące się nie tworzą dla nas żadnego nowego niebezpieczeństwa, ponieważ zawsze możemy wyłączyć je, gdy uznamy to za stosowne. Tylko czy istotnie możemy? Aby rzeczywiście wyłączyć maszynę, musimy dysponować informacją o tym, czy nadszedł już niebezpieczny moment. Sam fakt, że to my zbudowaliśmy tę maszynę nie stanowi jeszcze gwarancji, że otrzymamy informację, potrzebną do takiego działania. Wątpliwość ta kryje się już w stwierdzeniu, że maszyna grająca w warcaby może pokonać człowieka, który ją programował, i to po bardzo ograniczonym czasie nauki. Co gorsza, ogromna szybkość działania współczesnych maszyn cyfrowych przeciwstawia się naszym możliwościom zauważenia i przemyślenia oznak niebezpieczeństwa.

Pomysł istnienie pozaludzkich urządzeń, dysponujących potężną mocą i możliwością realizowania własnej linii postępowania nie jest niczym nowym. Nowością jest jedynie fakt, że obecnie rzeczywiście posiadamy, mogące skutecznie działać urządzenia tego typu. Dawniej podobne możliwości

przypisywano siłom magii, która stanowi temat tak wielu legend i baśni ludowych. W baśniach tych analizuje się dokładnie moralną sytuację czarownika. Niektórymi aspektami etyki magii z legend zajmowałem się już we wcześniejszej książce noszącej tytuł „Cybernetyka i społeczeństwo"([1]). Powtarzam tu niektóre fragmenty prowadzonych tam rozważań, po to, by powiązać je ściślej z tematyką maszyn uczących się.

Jedną z najbardziej znanych opowieści o magii jest Goethego „Uczeń czarnoksiężnika". Czarnoksiężnik pozostawia swego ucznia i powiernika, nakazując mu przynieść wody. Ponieważ chłopiec jest leniwy a pomysłowy, powierza więc to zadanie miotle, wypowiadając nad nią słowa zaklęcia, które słyszał z ust mistrza. Miotła posłusznie wykonuje za niego pracę i nie chce zatrzymać się. Chłopiec o mało nie tonie. Stwierdza, że nie nauczył się, lub też nie pamięta drugiego zaklęcia, które mogłoby zatrzymać miotłę. Zdesperowany chwyta miotłę, łamie ją na kolanie i z przerażeniem widzi, że każda z części nosi wodę dalej. Na szczęście, tuż przed ostateczną katastrofą mistrz wraca, wypowiada magiczne słowa, które unieruchamiają miotłę i daje uczniowi porządną burę.

Innym opowiadaniem jest arabska baśń z tysiąca i jednej nocy o rybaku i dżinnie. Rybak wyłowił w swej sieci dzban, zamknięty pieczęcią Salomona. Był to jeden z dzbanów, w których Salomon uwięził zbuntowanych dżinnów. Dżinn wydostał się z dzbana jako chmura dymu i zakomunikował rybakowi, że choć w pierwszych latach niewoli przyrzekał sobie nagrodzić swego wyswobodziciela władzą i bogactwem, to jednak teraz postanawia, że zabije go tu, na miejscu. Na szczęście rybakowi udaje się namówić dżinna do wejścia z powrotem do butli, a potem rzucić ją na dno oceanu.

Bardziej, niż te dwie legendy, przerażające jest opowiadanie o małpiej łapce, pióra W. W. Jacobsa, angielskiego pisarza z początku naszego wieku. Emerytowany angielski robotnik siedzi przy stole z żoną i przyjacielem, sierżantem, który wrócił z Indii. Sierżant pokazuje przyjacielowi amulet: zasuszoną małpią łapkę. Pewien indyjski święty mąż, który chciał wykazać, jak nierozsądną rzeczą jest wyzywanie losu, nadał jej tę moc, że spełni ona trzy życzenia trzech ludzi. Żołnierz mówi, że nie wie nic o pierwszych dwóch

([1]) Wiener N., *The Human Use of Human Beings; Cybernetics and Society*, Boston 1950, Houghton Mifflin Company.

Przekład polski: Wiener N., *Cybernetyka i społeczeństwo.*

życzeniach poprzedniego właściciela, lecz ostatnie było prośbą o śmierć. On sam jest, jak powiada, drugim właścicielem, lecz nie powie nic o własnych okropnych doświadczeniach. Wrzuca łapkę w ogień, lecz jego przyjaciel wyciąga ją stamtąd i chce wypróbować jej moc. Pierwszym jego życzeniem jest otrzymać 200 funtów. Wkrótce potem rozlega się stukanie do drzwi i do pokoju wchodzi przedstawiciel firmy, w której pracuje jego syn. Ojciec dowiaduje się, że syn jego został zabity przez maszynę a firma, choć nie czuje się za wypadek odpowiedzialna i nie jest zobowiązana prawnie — pragnie wypłacić ojcu 200 funtów tytułem odszkodowania. Zrozpaczony ojciec wypowiada drugie życzenie: żeby jego syn wrócił, a kiedy rozlega się drugie stukanie do drzwi i drzwi się otwierają — pojawia się w nich coś, co (nie mówi się nam o tym wiele) jest widmem syna. Ostatnim życzeniem jest, aby widmo zniknęło.

Puenta wszystkich tych opowiadań polega na tym, że magiczne siły pojmują wszystko dosłownie i jeśli prosimy je o coś, musimy prosić o to, czego rzeczywiście chcemy, a nie o to o czym jedynie myślimy, że chcemy. Nowe i praktycznie istniejące możliwości maszyny uczącej się działają również na zasadzie dosłowności. Jeśli programujemy maszynę mając na celu wygranie wojny, musimy dobrze przemyśleć, co rozumiemy pod pojęciem wygranej. Maszyna ucząca się musi być programowana na drodze doświadczenia. Jedynym doświadczeniem z terenu wojny nuklearnej, które nie grozi bezpośrednio katastrofą jest doświadczenie płynące z gry wojennej. Jeśli mamy posłużyć się tym doświadczeniem jako wskazówką postępowania w przypadku prawdziwego starcia, to opisujące wygraną wartości, które zastosowaliśmy w programujących grach muszą być takie same, jak wartości opisujące w naszym najszczerszym przekonaniu wynik prawdziwej wojny. Pomyłka może prowadzić jedynie do natychmiastowej, zupełnej i nieodwracalnej katastrofy. Nie możemy żywić nadziei, że maszyna będzie nas naśladować w tych uprzedzeniach i emocjonalnych kompromisach, dzięki którym potrafimy nadawać zniszczeniu miano zwycięstwa. Jeśli chcemy zwycięstwa, a nie wiemy, co rozumiemy pod tym pojęciem, to usłyszymy widmo stukające do naszych drzwi.

Tyle na temat maszyn uczących się. Powiedzmy teraz coś niecoś o maszynach rozmnażających się. Ważne są tu oba słowa: *maszyna* oraz *rozmnażanie się*. Maszyna jest nie tylko pewnym tworem materialnym, lecz również urządzeniem służącym do osiągania pewnych określonych celów. Roz-

mnażanie się jest nie tylko tworzeniem materialnej kopii; jest ono tworzeniem kopii, zdolnej do pełnienia takich samych funkcji.

Nasuwają się tutaj dwa odmienne sposoby podejścia do zagadnienia. Jeden z nich, czysto kombinatoryczny, stawia pytanie, czy maszyna może mieć wystarczająco wiele części i wystarczająco złożoną strukturę na to, by samoreprodukowanie się można było zaliczyć do jej właściwości. Na to pytanie odpowiedział twierdząco nieżyjący już dziś von Neumann. Drugie zagadnienie dotyczy praktycznej, konstruktywnej procedury budowania maszyn samoreprodukujących się. Ograniczę się tu do rozpatrzenia pewnej klasy maszyn, która, jakkolwiek nie obejmuje wszystkich maszyn, charakteryzuje się znaczną ogólnością. Mam na myśli przetworniki nieliniowe.

Maszyny takie są aparatami, dla których wejście stanowi pewna pojedyncza funkcja czasu, a wyjście inna funkcja czasu. Sygnał wyjściowy jest w pełni określony przez przeszłość sygnału wejściowego, jednak w ogólnym przypadku dodawanie sygnałów wejściowych nie powoduje dodawania odpowiadających im sygnałów wyjściowych. Urządzenia takie nazywamy przetwornikami. Jedną z właściwości wszystkich przetworników, liniowych czy nieliniowych, jest niezmienniczość względem przesunięcia w czasie. Jeśli maszyna wykonuje pewną funkcję, to wówczas przesunięcie sygnału wejściowego wstecz w czasie powoduje przesunięcie również sygnału wyjściowego wstecz o tę samą wielkość.

Podstawą naszej teorii maszyn samoreprodukujących się jest pewna kanoniczna postać opisu przetworników nieliniowych. Pojęcia impedancji i admitancji, które grają tak podstawową rolę w teorii urządzeń liniowych, nie są w pełni odpowiednie w naszym przypadku. Będziemy musieli sięgnąć do pewnych nowszych metod takiego opisu; metod opracowanych częściowo przeze mnie, a częściowo przez profesora Dennisa Gabora z University of London.

Choć obie metody, zarówno prof. Gabora, jak moja, zmierzają do zbudowania przetworników nieliniowych, to jednak są one liniowe w tym sensie, że sygnał wyjściowy przetwornika nieliniowego przedstawia się jako sumę wyjść pewnego zbioru przetworników nieliniowych o tym samym sygnale wejściowym. Wyjścia te sumuje się mnożąc je przez zmienne liniowe współczynniki. Pozwala to nam na zastosowanie teorii rozwinięć liniowych do projektowania i określania właściwości przetwornika nie-

liniowego. W szczególności, metoda ta powala na otrzymanie współczynników odpowiadających elementom składowym poprzez zastosowanie metody najmniejszych kwadratów. Jeśli zasadę tę połączymy z metodą statystycznego uśredniania w zbiorze wszystkich sygnałów wejściowych naszego aparatu, to otrzymamy w zasadzie dział teorii rozwinięć ortogonalnych. Taką statystyczną podstawę teorii przetworników nieliniowych można uzyskać w wyniku badań statystyk przeszłych sygnałów wejściowych, zastosowanych w każdym z przypadków.

Tak wyglądają w ogólnych zarysach metody prof. Gabora. Moja jest w swej istocie podobna, choć jej statystyczne podstawy są nieco odmienne.

Wiadomo, że prąd elektryczny nie jest ciągły, lecz jest strumieniem elektronów, który musi podlegać pewnym statystycznym odchyleniom. Te statystyczne fluktuacje można opisać całkiem poprawnie przy użyciu teorii ruchu Browna lub podobnej teorii efektu śrutowego czy szumu lampowego, o których mam zamiar powiedzieć coś niecoś w następnym rozdziale. W każdym razie, można zbudować urządzenie, które generuje standardowy efekt śrutowy o ściśle określonym statystycznym rozkładzie. Urządzenia takie wytwarza się nawet na skalę przemysłową. Zauważmy, że szum lampowy jest w pewnym sensie uniwersalnym sygnałem wejściowym, gdyż jego fluktuacje w odpowiednio długim okresie czasu będą wcześniej czy później zbliżać się do dowolnej zadanej krzywej. Dla przypadku takiego szumu lampowego istnieje bardzo prosta teoria jego całkowania i uśredniania.

Posługując się statystyką szumu lampowego możemy z łatwością określić zamknięty zbiór normalnych i ortogonalnych operacji nieliniowych. Jeśli sygnały wejściowe, na których wykonuje się te operacje, mają statystyczny rozkład właściwy dla szumu lampowego, to średnia (względem statystycznego rozkładu szumu lampowego) iloczynu wyjść dwóch podzespołów składowych naszego urządzenia będzie równa zeru. Co więcej, średni kwadrat sygnału wyjściowego każdego urządzenia można unormować do jedności. W rezultacie, rozwinięcie uogólnionego przetwornika nieliniowego w postaci zależnej od tych części składowych wyniknie z zastosowania znanej teorii funkcji ortonormalnych.

Mówiąc konkretniej, poszczególne części urządzenia produkują sygnały wyjściowe będące iloczynami wielomianów Hermite'a od współ-

czynników Laguerre'a dla ubiegłego odcinka sygnału wejściowego. Omawiam to szczegółowo w mojej książce *Nonlinear Problems in Random Theory*.

Bezpośrednie uśrednianie w zbiorze możliwych sygnałów wejściowych jest oczywiście rzeczą trudną. Zadanie to staje się wykonalne dzięki temu, że sygnały wejściowe wywoływane na zasadzie efektu śrutowego mają własność, którą nazywamy tranzytywnością metryczną lub ergodycznością. Dowolna całkowalna funkcja parametru rozkładu sygnału wejściowego opartego na efekcie śrutowym ma prawie zawsze średnią w czasie równą średniej w zbiorze. Dzięki temu, mając dwa urządzenia o wspólnym wejściu, będącym szumem śrutowym, możemy określić średnią ich iloczynu w całym zbiorze możliwych sygnałów wejściowych obliczając ich iloczyn i uśredniając go w czasie. Repertuar operacji, niezbędnych dla wykonania wszystkich tych procesów nie wykracza poza dodawanie i mnożenie napięć oraz uśrednianie w czasie. Dla wszystkich tych czynności istnieją odpowiednie urządzenia. Podstawowe urządzenia, których wymaga metoda prof. Gabora są w istocie identyczne z tymi, które są potrzebne w mojej metodzie. Jeden ze studentów prof. Gabora wynalazł szczególnie sprawne i tanie urządzenie mnożące oparte na zasadzie efektu piezoelektrycznego w krysztale umieszczonym w polu dwóch cewek magnetycznych.

Dzięki temu możemy symulować dowolny, nieznany przetwornik nieliniowy za pomocą sumy liniowych członów, z których każdy ma ustaloną charakterystykę i regulowany współczynnik. Współczynnik ten można znaleźć jako średnią wartość iloczynu sygnałów wyjściowych przetwornika nieznanego i danego przetwornika znanego, gdy do wejść obu tych przetworników przyłączony jest ten sam generator szumu śrutowego. Co więcej, zamiast odczytywać tę wartość na skali przyrządu, a potem przenosić ją ręcznie do odpowiedniego przetwornika, rozdrabniając w ten sposób symulację urządzenia na kawałki, możemy bez większych trudności zrealizować przenoszenie współczynników automatycznie poprzez układy sprzężeń zwrotnych. Zbudowaliśmy zatem białą skrzynkę, która potencjalnie może przybrać charakterystykę dowolnego przetwornika nieliniowego, a następnie nadaliśmy jej cechy podobieństwa do danego przetwornika (czarnej skrzynki), podając do obu przetworników ten sam sygnał wejściowy o charakterze przypadkowym i łącząc wyjścia obu urządzeń

tak, by osiągnięcie odpowiedniej kombinacji zachodziło bez interwencji z naszej strony.

Pytam, czy filozoficznie rzecz biorąc jest to sytuacja bardzo różna od tej, gdy gen działa jako szablon przy tworzeniu innych cząsteczek tego samego genu z nieokreślonej mieszaniny aminokwasów i kwasów nukleinowych, albo kiedy wirus daje początek innej cząsteczce tego samego wirusa, posługując się tkankami i sokami organizmu gospodarza? Nie twierdzę bynajmniej, że procesy te są podobne we wszystkich szczegółach, ale twierdzę, że stanowią one zjawiska w filozoficznym sensie bardzo podobne.

X

FALE MÓZGOWE I UKŁADY SAMOORGANIZUJĄCE SIĘ

W poprzednim rozdziale rozważałem zagadnienia uczenia się i samoreprodukowania się, odnoszące się zarówno do maszyn, jak i – przynajmniej przez analogię – do układów żywych. Powtórzę tutaj pewne uwagi, które zamieściłem w przedmowie, z których mam zamiar zrobić tu bezpośredni użytek. Jak podkreślałem, oba wymienione zjawiska wiążą się ściśle ze sobą, gdyż jedno stanowi podstawę przystosowywania się osobnika do otoczenia w oparciu o doświadczenie; a drugie, ponieważ dostarcza surowca, którym może operować proces doboru naturalnego, stanowi podstawę filogenetycznego uczenia się. Jak już wspomniałem, ssaki, a w szczególności człowiek, przystosowują się do otoczenia głównie poprzez ontogenetyczne uczenie się, podczas gdy u ptaków, które nie uczą się swych wysoce różnorodnych zachowań w czasie osobniczego życia, o wiele większe znaczenie ma uczenie się filogenetyczne.

Przekonaliśmy się jak ważne są nieliniowe sprzężenia zwrotne dla inicjowania tych procesów. Rozdział niniejszy jest poświęcony omówieniu konkretnego układu samoorganizującego się, w którym zjawiska nieliniowe odgrywają znaczną rolę. Opiszę tutaj to, co moim zdaniem, dzieje się w przypadku samoorganizacji elektroencefalogramów, czyli fal mózgowych.

Zanim będziemy mogli prowadzić rozsądne rozważania na ten temat, muszę powiedzieć coś o tym, czym są fale mózgowe i w jaki sposób ich struktura może być poddana ścisłej matematycznej obróbce. Od wielu lat wiadomo, że działalności układu nerwowego towarzyszą pewne po-

tencjały elektryczne. Pierwsze obserwacje z tej dziedziny pochodzą z początków ubiegłego stulecia, a wykonali je Volta i Galvani badając nerwowo-mięśniowe preparaty z nogi żaby. Były to narodziny nowej nauki: elektrofizjologii. Nauka ta rozwijała się jednak stosunkowo powoli aż do końca pierwszej ćwierci naszego wieku.

Warto zastanowić się, dlaczego rozwój tej gałęzi fizjologii był tak powolny. Aparaty, które początkowo stosowano do badania potencjałów elektrycznych w fizjologii, składały się z galwanometrów. Miały one dwie słabe strony. Pierwsza niedogodność polegała na tym, że cała energia, potrzebna do poruszenia cewki lub wskazówki galwanometru pochodziła z samego nerwu i była niesłychanie mała, druga zaś na tym, że ówczesne galwanometry były przyrządami, których ruchome części miały znaczną bezwładność i do przesunięcia wskazówki w określone położenie potrzebna była dość duża siła. Znaczy to, że w tym przypadku galwanometr był przyrządem nie tyle rejestrującym, co zniekształcającym wynik pomiaru. Najlepszym z galwanometrów, stosowanych pierwotnie w fizjologii był galwanometr strunowy Einthovena, w którym części ruchome zredukowano do pojedynczego drutu. Choć przyrząd ten był znakomity w świetle ówczesnych norm, to jednak nie był na tyle dobry, by mógł rejestrować małe potencjały elektryczne bez poważnych zakłóceń.

Elektrofizjologia musiała więc zaczekać na nową metodę pomiarów. Była nią metoda elektroniczna, która znalazła tu dwie formy zastosowania. Jedna z nich opierała się na odkryciu przez Edisona pewnych zjawisk związanych z przewodzeniem w gazach, skąd wyrosła możliwość wykorzystania lamp próżniowych do celów wzmacniania. Możliwe się stało wystarczająco wierne przekształcanie napięć słabych na silne. Dzięki temu do poruszenia końcowych elementów urządzenia pomiarowego możemy użyć energii nie dostarczanej, lecz tylko sterowanej przez nerw.

Drugi wynalazek wiąże się również z przewodzeniem elektryczności *in vacuo*. Nazywamy go oscylografem. W urządzeniu tym zastosowano część ruchomą o wiele lżejszą niż w każdym z poprzednich galwanometrów, a mianowicie strumień elektronów. Posługując się łącznie lub oddzielnie tymi dwoma urządzeniami fizjologowie naszego stulecia mogą dokładnie śledzić czasowe przebiegi małych napięć, co wykraczało całkowicie poza zakres możliwości najdokładniejszych przyrządów pomiarowych dziewiętnastego wieku.

Dysponując tymi środkami możemy dokładnie zarejestrować czasowy przebieg bardzo małych napięć między dwoma elektrodami umieszczonymi na skórze czaszki lub implantowanymi w mózgu. Napięcia te zaobserwowano wprawdzie już w dziewiętnastym wieku, jednak możliwość uzyskania nowych, dokładnych zapisów pomiarowych wzbudziło przed dwudziestu lub trzydziestu laty wielkie nadzieje wśród fizjologów. Pionierami wykorzystania takich urządzeń do bezpośredniego badania czynności mózgu byli: w Niemczech — Berger, w Anglii — Adrian i Matthews, a w Stanach Zjednoczonych — Jasper, Davis i małżonkowie Gibbs.

Trzeba przyznać, że późniejszy rozwój elektroencefalografii nie ziścił jak dotąd optymistycznych nadziei, jakie pokładali w niej pierwsi badacze. Otrzymywane dane rejestrowali oni przy pomocy pisaka atramentowego. Zapisy te miały postać bardzo złożonych i nieregularnych krzywych i jakkolwiek można było wyróżnić w nich pewne dominujące częstotliwości, jak np. rytm alfa o częstotliwości równej około 10 drganiom na sekundę, to jednak zapis otrzymany z pisaka atramentowego nie był wygodny dla celów dalszej obróbki matematycznej. W rezultacie elektroencefalografia stała się bardziej sztuką, niż nauką i opierała się na umiejętności rozróżniania przez wyszkolonego obserwatora pewnych cech zapisu na podstawie obszernego doświadczenia. Miało to tę dość podstawową wadę, że interpretacja elektroencefalogramów stała się sprawą wysoce subiektywną.

W końcu lat dwudziestych i na początku lat trzydziestych zainteresowałem się analizą harmoniczną procesów ciągłych. Jakkolwiek fizycy zajmowali się takimi procesami już wcześniej, to jednak matematyczna strona analizy harmonicznej ograniczała się prawie całkowicie do badania procesów albo okresowych, albo takich, które w pewnym sensie dążą do zera wraz ze wzrostem czasu w kierunku dodatnim lub ujemnym. Moja praca była najwcześniejszą próbą ustawienia analizy harmonicznej procesów ciagłych na solidnych matematycznych podstawach. Ustaliłem przy tym, że podstawowym pojęciem jest tu pojęcie autokorelacji, którym posłużył się był już G. I. Taylor (obecnie sir Geoffrey Taylor) w badaniach nad turbulencją[1].

---

[1] Taylor G. I., *Diffusion by Continuous Movements*, „Proceedings of the London Mathematical Society", Ser. 2, 20 (1921 - 1922), str. 196 - 212.

Dla funkcji czasu $f(t)$, funkcja autokorelacji jest średnią (w czasie) iloczynu $f(t+\tau)$ i $f(t)$. Wygodnie jest wprowadzić zespolone funkcje czasu, nawet jeśli w praktycznych przypadkach mamy do czynienia jedynie z funkcjami rzeczywistymi. Wówczas funkcja autokorelacji staje się średnią iloczynu $f(t+\tau)$ i liczby sprzężonej z $f(t)$. Niezależnie od tego, czy mamy do czynienia z funkcjami rzeczywistymi, czy z zespolonymi, widmo mocy $f(t)$ jest określone przez transformatę Fouriera funkcji autokorelacji.

Mówiłem już o nieprzydatności zapisów otrzymanych z pisaka atramentowego dla celów dalszego opracowywania wyników na drodze matematycznej. Aby z koncepcji funkcji autokorelacji mogło coś wyniknąć, konieczne było zastąpienie ich innymi zapisami, którymi byłoby łatwiej operować.

Jedną z najlepszych metod rejestrowania małych, zmiennych napięć elektrycznych do celów późniejszego ich opracowywania jest zapisywanie ich na taśmie magnetycznej. Metoda ta pozwala na przechowywanie zmiennych napięć elektrycznych w trwałej postaci tak, że później można je wykorzystać w razie potrzeby. Urządzenie takie zostało opracowane w Research Laboratory of Electronics w Massachusetts Institute of Technology, pod kierownictwem prof. Waltera A. Rosenblitha i dr. Mary A. B. Brazier.

W urządzeniu tym zastosowano zapis i odczyt taśmy magnetycznej metodą modulacji częstotliwości. Postąpiono tak dlatego, że odczytywanie taśmy magnetycznej wymazuje zawsze nieco tę taśmę. W przypadku taśmy z modulacją amplitudy wymazywanie to powoduje zmianę przenoszonego sygnału tak, że przy kolejnych odczytywaniach taśmy sygnał w istocie zmienia się.

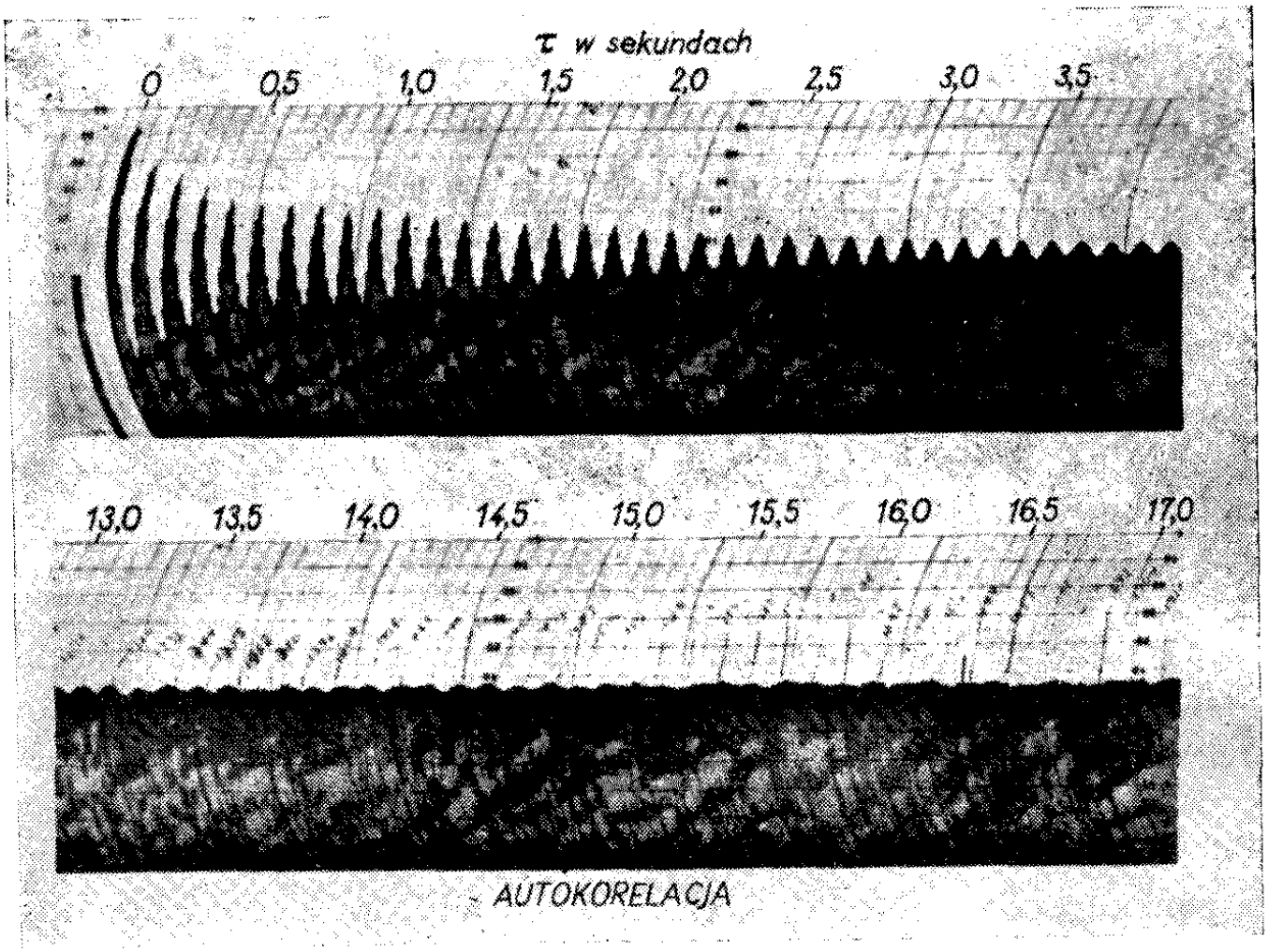
W przypadku modulacji częstotliwości takie częściowe wymazywanie występuje również, lecz przyrządy, za pomocą których odczytujemy taśmę są stosunkowo mało czułe na amplitudę, a odczytują jedynie częstotliwość. Jeśli taśma nie jest tak dalece wymazana, by była zupełnie nieczytelna — częściowe wymazanie taśmy nie zniekształca w poważniejszy sposób przenoszonego przez nią sygnału. W rezultacie, taśmę można odczytywać wielokrotnie, przy czym dokładność odczytu jest w zasadzie taka sama, jak za pierwszym razem.

Z samej natury funkcji autokorelacji wynika, że jednym z przyrządów niezbędnych przy jej badaniu jest mechanizm, który będzie opóźniał

odczyt z taśmy o regulowany odcinek czasu. Jeśli taśmę magnetyczną o długości (czasowej) A przegrywamy przy użyciu urządzenia wyposażonego w dwie głowice odczytujące, umieszczone jedna za drugą, to zostaną wyprodukowane dwa identyczne sygnały przesunięte względem siebie w czasie. Wielkość przesunięcia czasowego zależy od odległości między głowicami oraz szybkości przesuwu taśmy i można ją dowolnie zmieniać. Jeden z sygnałów możemy uznać za $f(t)$, a drugi – za $f(t+\tau)$, gdzie τ oznacza przesunięcie czasowe. Iloczyn ich można utworzyć posługując się na przykład prostownikami o charakterystyce kwadratowej i liniowymi układami sumującymi, w oparciu o zależność

$$4ab=(a+b)^2-(a-b)^2\,. \tag{10.01}$$

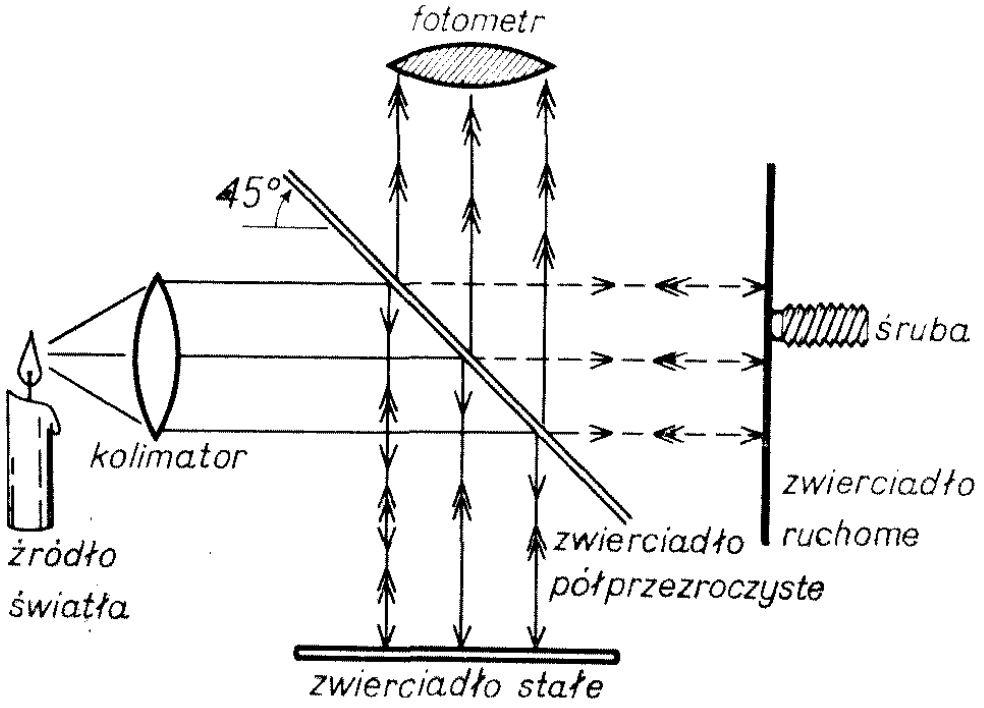
Iloczyn ten można uśrednić w sposób przybliżony, całkując go przy użyciu obwodu oporowo-pojemnościowego o stałej czasu dużej w stosunku do czasu A trwania danej próbki. Otrzymana średnia jest proporcjonalna do



Rys. 9

wartości funkcji autokorelacji dla opóźnienia τ. Powtórzenie tego procesu dla różnych wartości τ da nam zbiór wartości autokorelacji, a ściślej, funkcji autokorelacji sygnału próbkowanego w długim czasie A. Załączony rysunek (rys. 9) pokazuje wykres autokorelacji tego rodzaju dla pewnego konkretnego przypadku. Zauważmy, że pokazana jest tylko połowa krzywej, ponieważ wartości funkcji autokorelacji dla czasów ujemnych byłyby takie same jak dla dodatnich, przynajmniej wówczas, gdy krzywa, której autokorelację badamy, jest rzeczywista.

Zauważmy, że podobne krzywe autokorelacji stosowano w optyce od wielu lat, a przyrządem, dzięki którym je otrzymano jest interferometr Michelsona (rys. 10). Przy pomocy systemu zwierciadeł i soczewek, inter-



INTERFEROMETR MICHELSONA

Rys. 10

ferometr Michelsona dzieli strumień światła na dwie części, które następnie biegną drogami o różnej długości i łączą się znów w jeden strumień. Różna długość dróg pociąga za sobą różnicę opóźnienia czasowego i strumień wyjściowy jest sumą dwóch kopii strumienia wejściowego, które możemy znów oznaczyć przez $f(t)$ i $f(t+\tau)$. Jeśli natężenie strumienia zmierzymy za pomocą czułego fotometru rejestrującego moc, to odczyt z fotometru będzie proporcjonalny do kwadratu $f(t)+f(t+\tau)$, będzie więc zawierał człon proporcjonalny do funkcji autokorelacji. Innymi słowy, natężenie

interferencyjnych prążków określi nam wartości funkcji autokorelacji z dokładnością do przekształcenia liniowego.

Wszystko to kryło się w niejawny sposób w osiągnięciu Michelsona. Można dostrzec, że interferometr, wykonując na prążkach interferencyjnych przekształcenie Fouriera daje nam widmo mocy światła i jest w istocie spektrometrem. W istocie jest to najdokładniejszy ze znanych nam typów spektrometrów.

Ten typ spektrometru znalazł uznanie dopiero w ostatnich latach. Mówiono mi, że został on zaakceptowany jako ważne narzędzie dokładnych pomiarów. Ma to znaczenie o tyle, że metody, które przedstawię niżej, dają się również zastosować w spektroskopii i oferują sposoby, dzięki którym informację dostarczaną przez interferometr można wykorzystać do końca.

Zajmijmy się metodą otrzymywania widma fali mózgowej z funkcji autokorelacji. Niech $C(t)$ będzie funkcją autokorelacji $f(t)$. Wówczas $C(t)$ można zapisać w postaci:

$$C(t)=\int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i\omega t}\,dF(\omega). \tag{10.02}$$

We wzorze tym F jest zawsze rosnącą lub co najmniej niemalejącą funkcją ω, którą nazwiemy widmem całkowym funkcji f. Widmo całkowe składa się na ogół z trzech addytywnych części. Liniowa część widma wzrasta jedynie w przeliczalnym zbiorze punktów. Po jej odrzuceniu pozostaje widmo ciągłe. Jest ono samo sumą dwóch części: jednej rosnącej jedynie w zbiorze o mierze zero i drugiej, która jest bezwzględnie ciągła i jest całką dodatniej, całkowalnej funkcji.

Załóżmy teraz dla celów dalszych rozważań, że pierwszych dwóch części (części nieciągłej oraz części ciągłej rosnącej w zbiorze o mierze zero) nie ma. W takim przypadku możemy napisać

$$C(t)=\int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i\omega t}\,\varphi(\omega)\,d\omega, \tag{10.03}$$

gdzie $\varphi(\omega)$ jest gęstością widmową. Jeśli $\varphi(\omega)$ należy do klasy Lebesgue'a L^2, to możemy napisać

$$\varphi(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} C(t)\,e^{-2\pi i\omega t}\,dt. \tag{10.04}$$

Jak przekonamy się z obserwacji funkcji autokorelacji fal mózgowych, dominująca część mocy widma leży w sąsiedztwie częstotliwości równej 10 Hz. W takim przypadku kształt $\varphi(\omega)$ będzie zbliżony do przedstawionego na poniższym rysunku:

Dwa grzbiety w pobliżu $+10$ i -10 stanowią wzajemne odbicie zwierciadlane.

Istnieją różne metody numerycznego wykonywania analizy Fouriera, zakładające użycie urządzeń całkujących i numerycznych procesów obliczeniowych. W obu przypadkach niewygodę stanowi fakt, że główne grzbiety leżą w pobliżu 10 i -10, a nie w pobliżu 0. Są jednak sposoby, pozwalające na przeniesienie analizy harmonicznej w pobliże częstotliwości zerowej, co znacznie upraszcza obliczenia. Zauważmy, że

$$\varphi(\omega-10)=\int_{-\infty}^{\infty} C(t)\,e^{20\pi i t}\,e^{-2\pi i\omega t}\,dt. \tag{10.05}$$

Inaczej mówiąc, jeśli pomnożymy $C(t)$ przez $e^{20\pi i t}$, to nasza nowa analiza harmoniczna da nam jedną wstęgę w sąsiedztwie częstotliwości równej zeru, a drugą — w sąsiedztwie częstotliwości $+20$. Jeżeli zatem wykonamy takie mnożenie i usuniemy część pasma, leżącą w pobliżu $+20$, za pomocą metod uśredniania, równoważnych zastosowaniu filtru elektrycznego, to sprowadzimy naszą analizę harmoniczną do analizy harmonicznej w pobliżu częstotliwości zerowej.

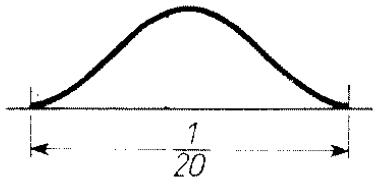
Dalej

$$e^{20\pi i t}=\cos 20\pi t+i\sin 20\pi t. \tag{10.06}$$

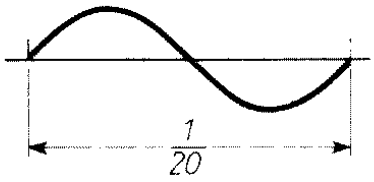
Tak więc część rzeczywista i urojona funkcji $C(t)\cdot e^{20\pi i t}$ są równe odpowiednio $C(t)\cos 20\,\pi t$ oraz $iC(t)\sin 20\,\pi t$. Częstotliwość z otoczenia $+20$ można usunąć, przepuszczając te dwie funkcje przez filtr dolnoprzepustowy, co jest równoważne uśrednieniu ich w przedziale o długości dwudziestej części sekundy lub dłuższym.

Załóżmy, że mamy do czynienia z krzywą, w której większość mocy leży w pobliżu częstotliwości 10 Hz. Jeśli pomnożymy ją przez cosinus

lub sinus $20\pi t$, to otrzymamy krzywą, która jest sumą dwóch składowych, z których jedna ma lokalny przebieg taki:



natomiast druga – taki:



Uśrednienie drugiej krzywej w przedziale o długości dziesiątej części sekundy da w wyniku zero. Uśrednienie pierwszej – połowę wartości maksymalnej: Dzięki temu, wygładzając $C(t)\cos 20\pi t$ oraz $iC(t)\sin 20\pi t$ otrzymujemy dobre przybliżenie odpowiednio rzeczywistej i urojonej części funkcji, której wszystkie częstotliwości grupują się w pobliżu zera, przy czym funkcja ta będzie miała taki sam rozkład częstotliwości w pobliżu zera, jak jedna ze składowych $C(t)$ miała w pobliżu 10. Niech teraz $K_1(t)$ będzie wynikiem wygładzania $C(t)\cos 20\pi t$, a $K_2(t)$ wynikiem wygładzania $C(t)\sin 20\pi t$. Pragniemy otrzymać

$$\int_{-\infty}^{\infty}\left[K_1(t)+iK_2(t)\right]e^{-2\pi i\omega t}\,dt=$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\left[K_1(t)+iK_2(t)\right]\left[\cos 2\pi\omega t-i\sin 2\pi\omega t\right]dt. \qquad (10.07)$$

Wyrażenie to musi być rzeczywiste, ponieważ jest to widmo. Będzie więc ono równe

$$\int_{-\infty}^{\infty}K_1(t)\cos 2\pi\omega t\,dt+\int_{-\infty}^{\infty}K_2(t)\sin 2\pi\omega t\,dt. \qquad (10.08)$$

Innymi słowy, jeśli wykonamy cosinusowe przekształcenie K_1 i sinusowe przekształcenie K_2, i dodamy je do siebie, to otrzymamy przesunięte widmo funkcji f. Można wykazać, że K_1 jest parzyste, a K_2 – nieparzyste. Znaczy to, że jeśli wykonamy cosinusowe przekształcenie K_1 i dodamy do niego lub od niego odejmiemy sinusowe przekształcenie K_2, to otrzyma-

my widmo odpowiednio przesunięte w prawo lub w lewo o wielkość ω od częstotliwości centralnej. Tę metodę otrzymywania widma nazwiemy metodą heterodynowania.

W przypadku autokorelacji, które są lokalnie sinusoidalne o okresie równym, powiedzmy 0,1 (takim, jaki występuje w autokorelacji fal mózgowych na rys. 9), obliczenia, których wymaga opisana metoda można uprościć. Próbkujmy naszą funkcję autokorelacji co jedną czterdziestą sekundy. Weźmy następnie ciąg wartości funkcji autokorelacji dla 0, 1/20 sekundy, 2/20 sekundy, 3/20 sekundy i tak dalej i zmieńmy znak autokorelacji dla tych ułamków, których licznik jest liczbą nieparzystą. Uśredniajmy te wartości kolejno w dość długim okresie czasu, a otrzymamy wielkość bliską $K_1(t)$. Jeśli wykonamy analogiczne obliczenia dla wartości funkcji autokorelacji w 1/40 sekundy, 3/40 sekundy, 5/40 sekundy i tak dalej, zmieniając znaki kolejnych wyrazów i wykonując, jak poprzednio, proces uśredniania, to otrzymamy przybliżenie $K_2(t)$. Dalsze postępowanie jest oczywiste.

Uzasadnienie dla tej procedury obliczeniowej stanowi fakt, że rozkład dyskretny, który jest równy

$$1 \text{ w punktach } 2\pi n,$$

$$-1 \text{ w punktach } (2n+1)\pi,$$

a zero we wszystkich pozostałych punktach, po poddaniu go analizie harmonicznej będzie zawierał składnik cosinusoidalny o częstotliwości równej 1, a nie będzie zawierał składnika sinusoidalnego. Analogicznie, rozkład dyskretny, który jest równy

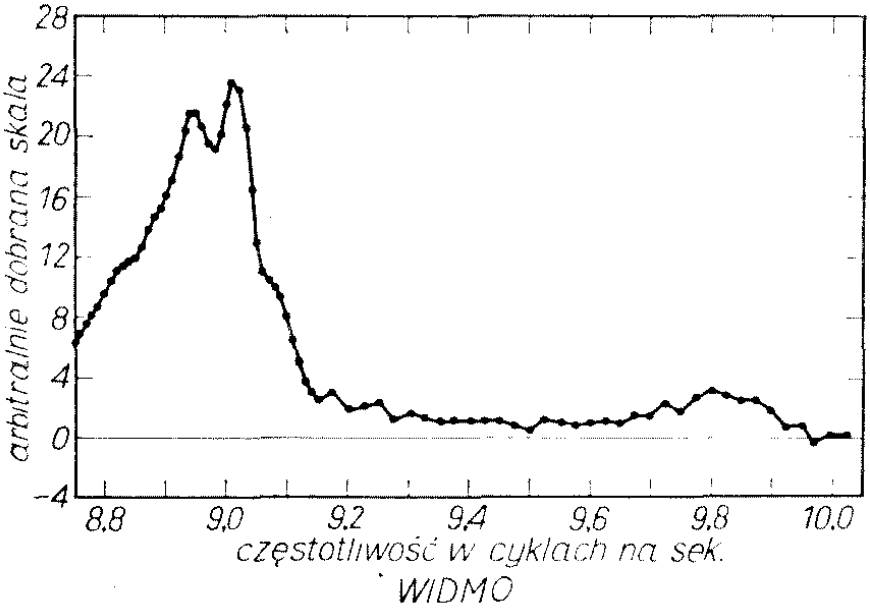
$$1 \text{ dla } (2n+\tfrac{1}{2})\pi,$$

$$-1 \text{ dla } (2n-\tfrac{1}{2})\pi,$$

natomiast 0 wszędzie indziej, będzie zawierał składnik sinusoidalny o częstotliwości 1, a nie będzie zawierał składnika cosinusoidalnego. Oba rozkłady będą również zawierały składniki o częstotliwościach N, lecz ponieważ pierwotna analizowana krzywa nie zawiera lub prawie nie zawiera takich częstotliwości, przeto człony te będą bez znaczenia. Ułatwia to znacznie nasze postępowanie, ponieważ czynniki, przez które mamy mnożyć, są równe jedynie $+1$ lub -1.

Metodę heterodynowania uznaliśmy za bardzo przydatną dla celów analizy harmonicznej fal mózgowych wówczas, gdy dysponujemy jedynie ręcznymi środkami obliczeniowymi, a praca przybiera przytłaczające rozmiary, jeśli brniemy przez wszystkie szczegóły analizy harmonicznej nie posługując się heterodynowaniem. Wszystkie nasze początkowe prace nad analizą harmoniczną widm mózgowych prowadziliśmy przy pomocy metody heterodynowania. Później jednak okazało się możliwe skorzystanie z maszyny cyfrowej, w przypadku której upraszczanie obliczeń nie jest tak bardzo konieczne, przeto znaczną część późniejszych prac nad analizą harmoniczną wykonaliśmy metodą bezpośrednią bez heterodynowania. Wciąż jednak wiele jest do zrobienia w miejscach, gdzie maszyny cyfrowe nie są osiągalne, nie uważam więc metody heterodynowania za przestarzałą.

Przedstawiam niżej fragmenty pewnej konkretnej funkcji autokorelacji, którą otrzymaliśmy w ramach naszych prac. Ponieważ funkcja autokorelacji obejmuje wielką ilość danych, przeto nie byłoby wygodnie reprodukować ją tu w całości. Podajemy jedynie jej odcinek początkowy, leżący w sąsiedztwie $\tau=0$ oraz pewien jej dalszy fragment.



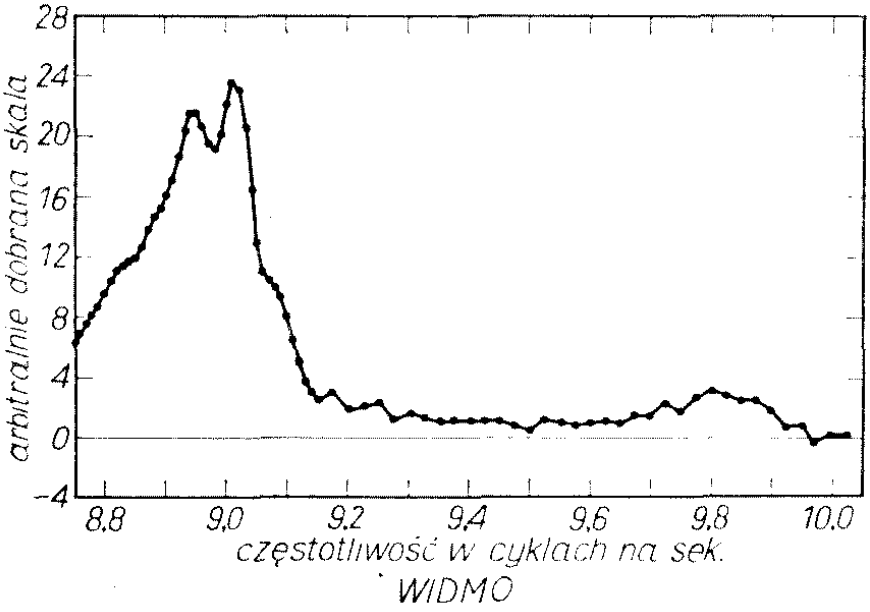
Rys. 11

Na rysunku 11 pokazano wyniki analizy harmonicznej autokorelacji, której część przedstawiono na rys. 9. W tym przypadku wyniki otrzymaliśmy z szybkiej maszyny cyfrowej[1], lecz stwierdziliśmy dużą ich zgod-

[1] Posłużono się maszyną IBM 709 z Ośrodka Obliczeniowego MIT.

Metodę heterodynowania uznaliśmy za bardzo przydatną dla celów analizy harmonicznej fal mózgowych wówczas, gdy dysponujemy jedynie ręcznymi środkami obliczeniowymi, a praca przybiera przytłaczające rozmiary, jeśli brniemy przez wszystkie szczegóły analizy harmonicznej nie posługując się heterodynowaniem. Wszystkie nasze początkowe prace nad analizą harmoniczną widm mózgowych prowadziliśmy przy pomocy metody heterodynowania. Później jednak okazało się możliwe skorzystanie z maszyny cyfrowej, w przypadku której upraszczanie obliczeń nie jest tak bardzo konieczne, przeto znaczną część późniejszych prac nad analizą harmoniczną wykonaliśmy metodą bezpośrednią bez heterodynowania. Wciąż jednak wiele jest do zrobienia w miejscach, gdzie maszyny cyfrowe nie są osiągalne, nie uważam więc metody heterodynowania za przestarzałą.

Przedstawiam niżej fragmenty pewnej konkretnej funkcji autokorelacji, którą otrzymaliśmy w ramach naszych prac. Ponieważ funkcja autokorelacji obejmuje wielką ilość danych, przeto nie byłoby wygodnie reprodukować ją tu w całości. Podajemy jedynie jej odcinek początkowy, leżący w sąsiedztwie $\tau=0$ oraz pewien jej dalszy fragment.



Rys. 11

Na rysunku 11 pokazano wyniki analizy harmonicznej autokorelacji, której część przedstawiono na rys. 9. W tym przypadku wyniki otrzymaliśmy z szybkiej maszyny cyfrowej[1], lecz stwierdziliśmy dużą ich zgod-

[1] Posłużono się maszyną IBM 709 z Ośrodka Obliczeniowego MIT.

procesu o zadanym widmie. Jakkolwiek model ten nie stanowi dokładnej kopii procesu, który generuje fale mózgowe, to jednak jest do niego wystarczająco zbliżony, by mógł nam dać znaczącą informację o wielkości błędu średniokwadratowego, jakiego możemy oczekiwać w przypadku takiego widma fal mózgowych, które były omówione już wyżej w niniejszym rozdziale.

Podam tu bez dowodu niektóre własności pewnej funkcji rzeczywistej $x(t, \alpha)$, sformułowane już w mojej pracy o uogólnionej analizie harmonicznej, jak również w innych pracach[1]. W funkcji rzeczywistej $x(t, \alpha)$, zmienna t przebiega od $-\infty$ do $+\infty$, a zmienna α od 0 do 1. Funkcja ta reprezentuje jedną zmienną przestrzenną ruchu Browna, zależnego od czasu t i parametru α rozkładu statystycznego.

Wyrażenie

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t)\,\mathrm{d}x(t, \alpha) \tag{10.09}$$

jest określone dla wszystkich funkcji $\varphi(t)$ należących do klasy Lebesgue'a L^2 w przedziale od $-\infty$ do $+\infty$. Jeśli $\varphi(t)$ posiada pochodną należącą do klasy L^2, to wyrażenie (10.09) przyjmuje postać

$$-\int_{-\infty}^{\infty} x(t, \alpha)\,\varphi'(t)\,\mathrm{d}t \tag{10.10}$$

i poprzez zastosowanie pewnego dobrze określonego przejścia granicznego może być wyznaczone dla wszystkich funkcji $\varphi(t)$ należących do L^2. Inne całki

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \dots, \tau_n)\,\mathrm{d}x(\tau_1, \alpha) \dots \mathrm{d}x(\tau_n, \alpha) \tag{10.11}$$

są określone w podobny sposób. Podstawowe twierdzenie, z którego korzystamy mówi, że

$$\int_0^1 \mathrm{d}\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \dots, \tau_n)\,\mathrm{d}x(\tau_1, \alpha) \dots \mathrm{d}x(\tau_n, \alpha) \tag{10.12}$$

otrzymujemy podstawiając

$$K_1(\tau_1, \dots, \tau_{n/2}) = \sum K(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), \tag{10.13}$$

[1] Patrz notka na str. 240.

gdzie zmienne τ_k tworzy się na wszystkie możliwe sposoby przez utożsamianie par zmiennych σ_K (jeśli n jest parzyste) oraz tworząc

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau_1, \dots, \tau_{n/2}) \, d\tau_1 \dots d\tau_{n/2} . \tag{10.14}$$

Jeśli n jest nieparzyste, to

$$\int_0^1 d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \dots, \tau_n) \, dx(\tau_1, \alpha) \dots dx(\tau_n, \alpha) = 0 . \tag{10.15}$$

Inne ważne twierdzenie o tych całkach stochastycznych mówi, że jeśli $\mathscr{F}\{g\}$ jest funkcjonałem $g(t)$, takim, że $\mathscr{F}[x(t, \alpha)]$ jest funkcją należącą do L względem α i zależną jedynie od różnic $x(t_2, \alpha) - x(t_1, \alpha)$, to dla każdego t_1 i dla prawie wszystkich wartości α spełniona jest zależność

$$\lim_{A \to \infty} \frac{1}{A} \int_0^A \mathscr{F}[x(t, \alpha)] \, dt = \int_0^1 \mathscr{F}[x(t_1, \alpha)] \, d\alpha . \tag{10.16}$$

Jest to twierdzenie ergodyczne Birkhoffa, udowodnione przez autora[1] i przez innych.

We wspomnianym już artykule opublikowanym w *Acta Mathematica* ustalono, że jeśli U jest rzeczywistym jednostkowym przekształceniem funkcji $K(t)$, to

$$\int_{-\infty}^{\infty} UK(t) \, dx(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t) \, dx(t, \beta) , \tag{10.17}$$

gdzie β różni się od α jedynie o zachowujące miarę przekształcenie przedziału (0,1) w siebie.

Niech teraz $K(t)$ należy do L^2 i niech

$$K(t) = \int_{-\infty}^{\infty} q(\omega) e^{2\pi i \omega t} \, d\omega \tag{10.18}$$

---

[1] Wiener N., *The Ergodic Theorem*, „Duke Mathematical Journal", 5 (1939) str. 1 - 39; również w: *Modern Mathematics for the Engineer*, wyd. E. F. Beckenbach, New York 1956, Mc Graw-Hill, str. 166 - 168, tłumaczenie polskie: *Nowoczesna matematyka dla inżynierów*, Warszawa 1962, PWN.

w sensie Plancherela[1]. Zbadajmy funkcję rzeczywistą

$$f(t,\alpha)=\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\,\mathrm{d}x(\tau,\alpha), \tag{10.19}$$

która stanowi odpowiedź przetwornika liniowego na sygnał wejściowy mający charakter ruchu Browna. Jej funkcja autokorelacji będzie równa

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} f(t+\tau,\alpha)\overline{f(t,\alpha)}\,\mathrm{d}t, \tag{10.20}$$

a wyrażenie to, na mocy twierdzenia ergodycznego, dla prawie wszystkich wartości α będzie miało wartość

$$\int_0^1 \mathrm{d}\alpha \int_{-\infty}^{\infty} K(t_1+\tau)\,\mathrm{d}x(t_1,\alpha)\int_{-\infty}^{\infty}\overline{K(t_2)}\,\mathrm{d}x(t_2,\alpha)=\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\,\overline{K(t)}\,\mathrm{d}t. \tag{10.21}$$

Wówczas widmo będzie prawie zawsze równe

$$\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{e}^{-2\pi\mathrm{i}\omega\tau}\mathrm{d}\tau\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\,\overline{K(t)}\,\mathrm{d}t=\Big|\int_{-\infty}^{\infty} K(\tau)\,\mathrm{e}^{-2\pi\mathrm{i}\omega\tau}\mathrm{d}\tau\Big|^2=|q(\omega)|^2. \tag{10.22}$$

Jest to jednak widmo przebiegu ciągłego. Funkcja autokorelacji przebiegu próbkowanego w czasie uśredniania A (w naszym przypadku 2700 sekund) wyniesie

$$\frac{1}{A}\int_0^A f(t+\tau,\alpha)\,\overline{f(t,\alpha)}\,\mathrm{d}t=$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}x(t_1,\alpha)\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{d}x(t_2,\alpha)\,\frac{1}{A}\int_0^A K(t_1+\tau+s)\,\overline{K(t_2+s)}\,\mathrm{d}s. \tag{10.23}$$

Wynikowe widmo przebiegu próbkowanego będzie miało średnią czasową prawie zawsze równą

$$\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{e}^{-2\pi\mathrm{i}\omega\tau}\mathrm{d}\tau\,\frac{1}{A}\int_0^A\mathrm{d}s\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau+s)\,\overline{K(t+s)}\,\mathrm{d}t=|q(\omega)|^2. \tag{10.24}$$

[1] Wiener N., *Plancherel's Theorem. The Fourier Integral and Certain of its Applications*, Cambridge, England 1933, The University Press, str. 46 - 71; New York, Dover Publications.

Znaczy to, że widma przebiegu próbkowanego i ciągłego mają tę samą wartość średniej czasowej.

Dla wielu celów potrzebne nam jest widmo przybliżone, w którym całkowanie po τ wykonuje się jedynie w przedziale $(0, B)$, przy czym w naszym konkretnym przypadku B jest równe 20 sekund. Pamiętajmy, że $f(t)$ jest funkcją rzeczywistą oraz że funkcja autokorelacji jest funkcją symetryczną. Możemy zatem zastąpić całkowanie od 0 do B całkowaniem od $-B$ do B:

$$\int_{-B}^{B} e^{-2\pi i u\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_1, \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_2, \alpha) \frac{1}{A} \int_{0}^{A} K(t_1+\tau+s)\,\overline{K(t_2+s)}\,ds. \tag{10.25}$$

Wartość średnia tego wyrażenia wyniesie

$$\int_{-B}^{B} e^{-2\pi i u\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\,\overline{K(t)}\,dt =$$

$$= \int_{-B}^{B} e^{-2\pi i u\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 e^{2\pi i \tau\omega} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin 2\pi B(\omega-u)}{\pi(\omega-u)} d\omega. \tag{10.26}$$

Kwadrat przybliżonego widma w przedziale $(-B, B)$ będzie równy

$$\left| \int_{-B}^{B} e^{-2\pi i u\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_1, \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_2, \alpha) \frac{1}{A} \int_{0}^{A} K(t_1+\tau+s)\,\overline{K(t_2+s)}\,ds \right|^2 .$$

a jego wartość średnia wyniesie

$$\int_{-B}^{B} e^{-2\pi i u\tau} d\tau \int_{-B}^{B} e^{2\pi i u\tau_1} d\tau_1 \frac{1}{A^2} \int_{0}^{A} ds \int_{0}^{A} d\sigma \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} dt_2 \times$$

$$\times \left[K(t_1+\tau+s)\,\overline{K(t_1+s)}\,\overline{K(t_2+\tau_1+\sigma)}\,K(t_2+\sigma) + \right.$$

$$+ K(t_1+\tau+s)\,\overline{K(t_2+s)}\,\overline{K(t_1+\tau_1+\sigma)}\,K(t_2+\sigma) +$$

$$\left. + K(t_1+\tau+s)\,\overline{K(t_2+s)}\,\overline{K(t_2+\tau_1+\sigma)}\,K(t_1+\sigma) \right] =$$

$$= \left[\int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin 2\pi B(\omega-u)}{\pi(\omega-u)} d\omega \right]^2 +$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_1)|^2\,d\omega_1\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_2)|^2\,d\omega_2\left[\frac{\sin 2\pi B(\omega_1-u)}{\pi(\omega_1-u)}\right]^2\frac{\sin^2 A\pi(\omega_1-\omega_2)}{\pi^2A^2(\omega_1-\omega_2)^2}+$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_1)|^2\,d\omega_1\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_2)|^2\,d\omega_2\,\frac{\sin 2\pi B(\omega_1+u)}{\pi(\omega_1+u)}\,\frac{\sin 2\pi B(\omega_2-u)}{\pi(\omega_2-u)}\times$$

$$\times\frac{\sin^2 A\pi(\omega_1-\omega_2)}{\pi^2A^2(\omega_1-\omega_2)^2}\,. \tag{10.27}$$

Jak wiadomo, jeśli m oznacza wartość średnią, to

$$m\left[\lambda-m(\lambda)\right]^2=m(\lambda^2)-\left[m(\lambda)\right]^2. \tag{10.28}$$

Stąd pierwiastek błędu kwadratowego średniego przybliżonego widma próbkowego będzie równy

$$\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_1)|^2\,d\omega_1\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_2)|^2\,d\omega_2\,\frac{\sin^2 A\pi(\omega_1-\omega_2)}{\pi^2A^2(\omega_1-\omega_2)^2}\times}$$

$$\overline{\times\left(\frac{\sin^2 2\pi B(\omega_1-u)}{\pi^2(\omega_1-u)^2}+\frac{\sin 2\pi B(\omega_1+u)}{\pi(\omega_1+u)}\,\frac{\sin 2\pi B(\omega_2-u)}{\pi(\omega_2-u)}\right)}. \tag{10.29}$$

Ale

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin^2 A\pi u}{\pi^2A^2u^2}\,du=\frac{1}{A}\,, \tag{10.30}$$

więc całka

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(\omega)\,\frac{\sin^2 A\pi(\omega-u)}{\pi^2A^2(\omega-u)^2}\,d\omega \tag{10.31}$$

jest równa $1/A$ mnożonemu przez bieżącą średnią ważoną $g(\omega)$. Jeżeli uśredniona wielkość jest prawie stała w małym przedziale $1/A$, co w naszym przypadku jest założeniem rozsądnym, to jako przybliżoną główną

część pierwiastka błędu średniokwadratowego w dowolnym punkcie widma otrzymamy

$$\sqrt{\frac{2}{A}\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega)|^4\frac{\sin^2 2\pi B(\omega-u)}{\pi^2(\omega-u)^2}\mathrm{d}\omega}\,. \tag{10.32}$$

Zauważmy, że jeśli przybliżone widmo próbkowe ma maksimum w punkcie $u=10$, to jego wartość w tym punkcie będzie równa

$$\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega)|^2\frac{\sin 2\pi B(\omega-10)}{\pi(\omega-10)}\mathrm{d}\omega\,, \tag{10.33}$$

co w przypadku gładkiej funkcji $q(\omega)$ nie różni się zbytnio od $|q(10)|^2$. Pierwiastek błędu kwadratowego średniego widma, odniesiony do tej wielkości jako do jednostki, będzie równy

$$\sqrt{\frac{2}{A}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{q(\omega)}{q(10)}\right|^4\frac{\sin^2 2\pi B(\omega-10)}{\pi^2(\omega-10)^2}\mathrm{d}\omega}\,, \tag{10.34}$$

a zatem nie większy, niż

$$\sqrt{\frac{2}{A}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin^2 2\pi B(\omega-10)}{\pi^2(\omega-10)}\mathrm{d}\omega}=2\sqrt{\frac{B}{A}}\,. \tag{10.35}$$

W rozpatrywanym przypadku wynosi on

$$2\sqrt{\frac{20}{2700}}=2\sqrt{\frac{1}{135}}\approx\frac{1}{6}\,. \tag{10.36}$$

Jeśli przyjmiemy, że wklęsłość w linii widma rzeczywiście występuje, albo nawet tylko, że krzywa rzeczywiście nagle opada przy częstotliwości około 9,05 Hz, to warto wysunąć kilka kwestii natury fizjologicznej, dotyczących tego faktu. Trzy podstawowe pytania dotyczą fizjologicznego znaczenia zaobserwowanych zjawisk, fizjologicznego mechanizmu ich powstawania oraz tego, w jaki sposób można by było wykorzystać te obserwacje w medycynie.

Zauważmy, że obecność ostro wyróżnionej częstotliwości jest równoważna obecności dokładnego zegara. Ponieważ mózg jest w pewnym sensie urządzeniem sterującym i liczącym, to jest rzeczą naturalną zastanowić się, czy zegary znajdują zastosowanie w innych rodzajach urządzeń sterujących i liczących. Istotnie, w większości takich urządzeń zegary są stosowane. Są one tam wykorzystywane do celów bramkowania. Wszystkie urządzenia tego typu muszą zestawiać ze sobą dużą liczbę impulsów produkując w ten sposób pojedyncze impulsy. Gdyby przekazywanie takich impulsów polegało tylko na włączaniu i wyłączaniu pewnego obwodu, to czasowe ustawienie impulsów miałoby małe znaczenie i bramkowanie nie byłoby potrzebne. Jednakże w przypadku takiej metody przenoszenia impulsów cały obwód pozostaje zajęty dopóty, dopóki nie skończy się przenoszona wiadomość, a to oznacza wyłączenie znacznej części urządzenia z działania na bliżej nieokreślony czas. Jest więc rzeczą pożądaną, by w urządzeniu sterującym lub liczącym wiadomości były przenoszone przez złożone ciągi sygnałów polegających na włączaniu i wyłączaniu. Rozwiązanie to umożliwia natychmiast urządzeniu dalsze działanie. Aby mogło to mieć miejsce, wiadomości muszą być przechowywane tak, by mogły być jednocześnie wysyłane i kombinowane ze sobą w czasie, gdy znajdują się jeszcze w maszynie. Do tego potrzebne jest bramkowanie impulsów, które można łatwo urzeczywistnić posługując się zegarem.

Wiadomo, że przynajmniej w przypadku dłuższych włókien nerwowych, impulsy nerwowe mają kształt niezależny od sposobu, w jaki są produkowane. Kombinowanie impulsów jest zadaniem mechanizmu synaptycznego. W synapsach pewna liczba włókien doprowadzających łączy się z włóknem odprowadzającym. Jeśli w ramach bardzo krótkiego okresu czasu ulegnie pobudzeniu właściwa kombinacja włókien doprowadzających, to włókno odprowadzające zostaje pobudzone. W pewnych przypadkach działanie włókien doprowadzających ma charakter addytywny tak, że jeśli liczba pobudzonych włókien jest większa od pewnej ustalonej, to zostaje osiągnięty próg, który pozwala na pobudzenie włókna odprowadzającego. W innych przypadkach niektóre z włókien doprowadzających działają hamująco, uniemożliwiając pobudzenie całkowicie lub przynajmniej zwiększając próg dla innych włókien. W obu przypadkach zasadniczą sprawą jest istnienie krótkiego okresu czasu kombinacji dla impulsów. Jeżeli przy-

chodzące sygnały nie leżą w granicach tego wąskiego przedziału, to nie kombinują się ze sobą. Konieczne jest więc posiadanie pewnego rodzaju mechanizmu bramkującego, który zapewniłby przychodzącym sygnałom jednoczesność. W przeciwnym przypadku synapsa przestanie działać jako mechanizm kombinujący impulsy[1].

Byłoby jednak pożądane mieć jakieś dalsze dowody na istnienie takiego bramkowania. Tu godne uwagi są pewne prace profesora Donalda B. Lindsley'a z wydziału psychologii w University of California w Los Angeles. Badał on czasy reakcji na sygnały wzrokowe. Jak wiadomo, gdy odbieramy sygnał wzrokowy, reakcja mięśniowa, którą ten sygnał pobudza pojawia się nie od razu, lecz z pewnym opóźnieniem. Prof. Lindsay wykazał, że opóźnienie to nie jest stałe, lecz jak się wydaje, składa się z trzech części. Jedna z nich ma długość stałą, natomiast długość pozostałych dwóch ma rozkład równomierny w przedziale o długości około $^1/_{10}$ sekundy. Jest to tak, jak gdyby ośrodkowy układ nerwowy był w stanie wychwytywać przychodzące impulsy jedynie co $^1/_{10}$ sekundy i tak, jak gdyby impulsy zstępujące do mięśni mogły wybiegać z ośrodkowego układu nerwowego też jedynie co $^1/_{10}$ sekundy. Stanowi to doświadczalne potwierdzenie zjawiska bramkowania, a związek tego zjawiska z dziesiątą częścią sekundy, czasem, który stanowi przybliżony okres mózgowego rytmu alfa, najprawdopodobniej nie jest przypadkowy.

Tyle, jeśli chodzi o funkcję centralnego rytmu alfa. Powstaje teraz pytanie, jaki mechanizm produkuje ten rytm. Należy tu podnieść fakt, że rytmem alfa można kierować za pomocą migotania. Jeśli przed oczyma osoby badanej znajduje się światło, błyskające z okresem bliskim $^1/_{10}$ sekundy, to mózgowy rytm alfa zmienia się dopóty, dopóki pojawi się w nim silna składowa o okresie równym okresowi migotania. Bez wątpienia, migotanie światła wywołuje „elektryczne migotanie" w siatkówce oka, a prawie na pewno również w ośrodkowym układzie nerwowym.

---

[1] Jest to uproszczony obraz zjawiska, zwłaszcza w odniesieniu do kory mózgowej, ponieważ obowiązywanie w działaniu neuronów zasady „wszystko albo nic" zależy od tego, czy neuron ma długość wystarczającą na to, aby odtwarzanie przez sam neuron kształtu przychodzących do niego impulsów miało prawie asymptotyczny charakter. Niemniej jednak, w korze, ze względu na małą długość neuronów, synchronizacja jest nadal konieczna, choć szczegóły tego procesu są o wiele bardziej złożone.

Istnieją jednak pewne bezpośrednie dowody na to, że migotanie czysto elektryczne wywołuje efekt podobny do efektu wywoływanego przez migotanie świetlne. Doświadczenie takie przeprowadzono w Niemczech. Podłogę pokoju wykonano z przewodzącego materiału, a na suficie zawieszano odizolowaną, przewodzącą metalową płytę. Osobę badaną umieszczono w tym pokoju, a podłogę i sufit dołączano do generatora wytwarzającego zmienne napięcie elektryczne o częstotliwości bliskiej 10 cyklom na sekundę. Osoby badane doświadczały nieprzyjemnych wrażeń, zbliżonych bardzo do tych, jakie wywołuje analogiczny efekt migotania światła.

Doświadczenia te trzeba będzie oczywiście powtórzyć w bardziej kontrolowanych warunkach, wykonując jednocześnie osobom badanym elektroencefalogram. Tym niemniej, nawet już takie doświadczenia wskazują, że elektryczne migotanie wytwarzane na zasadzie indukcji elektrostatycznej może powodować taki sam efekt, jak migotanie świetlne.

Ważną jest rzeczą zauważyć, że jeśli częstotliwość drgań oscylatora może ulegać zmianie pod wpływem impulsów o odmiennej częstotliwości, to mechanizm działania oscylatora musi być nieliniowy. Mechanizm liniowy, wytwarzający drgania o określonej częstotliwości może produkować wyłącznie drgania o tejże częstotliwości, różniące się w ogólnym przypadku co do fazy i amplitudy. Inaczej dzieje się w przypadku mechanizmów nieliniowych, które mogą wytwarzać drgania będące sumami i różnicami różnych rzędów częstotliwości oscylatora i częstotliwości wymuszającej. Mechanizm taki może dokonywać przesunięcia częstotliwości, a w rozważanym wyżej przypadku przesunięcie to będzie miało charakter „przyciągania" dwóch częstotliwości do siebie. Nie jest wykluczone, że przyciąganie takie będzie zjawiskiem długookresowym, czyli wiekowym, a w krótkich przedziałach czasu układ pozostanie w przybliżeniu liniowy.

Przypuśćmy, że mózg zawiera pewną liczbę oscylatorów o częstotliwościach bliskich 10 cyklom na sekundę, i że częstotliwości te mogą w pewnych granicach „przyciągać się" do siebie. W takiej sytuacji częstotliwości zgromadzą się prawdopodobnie w jedną lub kilka grupek, przynajmniej w pewnych obszarach widma. Te częstotliwości, które zbiegną się w takie grupki, będą musiały opuścić swe miejsce gdzie indziej, powodując w ten sposób powstawanie w widmie luk — obszarów — gdzie moc jest mniejsza niż moglibyśmy oczekiwać. Że zjawisko takie może istotnie mieć miejsce w przypadku osoby, której autokorelację pokazano na rys. 9 wskazuje na

to nagły spadek mocy dla częstotliwości powyżej 9 Hz. Zjawisko to byłoby trudno wykryć, przy pomocy analizy harmonicznej o tak niskiej „zdolności rozdzielczej", jak ta, którą posługiwali się wcześniejsi autorzy[1].

Aby można było przyjąć takie wyjaśnienie pochodzenia fal mózgowych, musimy jeszcze zbadać, czy w mózgu istnieją takie hipotetyczne oscylatory i jaka jest ich natura. Prof. Rosenblith z MIT-u doniósł mi o istnieniu zjawiska zwanego wyładowaniem następczym[2]. Po oświetleniu oka błyskiem światła skorelowane z błyskiem napięcia w korze mózgowej nie powracają od razu do zera, lecz zanim zanikną, zmieniają kilkakrotnie fazę z dodatniej na ujemną i odwrotnie. Przebieg tego napięcia poddano analizie harmonicznej i ustalono, że znaczna część mocy leży w pobliżu 10 Hz. Spostrzeżenie to co najmniej nie stoi w sprzeczności z podaną tu teorią samoorganizacji fal mózgowych. Grupowanie się takich krótkotrwałych oscylacji w drgania o charakterze trwałym zaobserwowano w przypadku innych rytmów organizmu, na przykład w przypadku około $23^1/_2$ godzinnego rytmu dobowego stwierdzonego u wielu istot żywych[3]. Zmiany w środowisku zewnętrznym mogą przekształcić ten rytm w 24-godzinny rytm dnia i nocy. Z biologicznego punktu widzenia nie jest ważne, czy naturalny rytm istot żywych jest dokładnie 24-godzinny, jeśli tylko może on zostać przekształcony w rytm 24-godzinny przez środowisko zewnętrzne. Ciekawy eksperyment, który mógłby rzucić światło na prawdziwość mojej hipotezy co do fal mózgowych, można by chyba wykonać badając świetliki lub inne zwierzęta, takie jak świerszcze i żaby, które nie tylko wysyłają impulsy świetlne lub dźwiękowe, ale również mogą takie impulsy odbierać. Zauważano często, że świetliki zgromadzone na jednym drzewie

---

(1) Muszę zauważyć, że pewne dowody na istnienie centralnych rytmów o wąskim pasmie uzyskał dr W. Grey-Walter z Burden Neurological Institute w Bristol, Anglia. Nie znam wszystkich szczegółów metodologii jego badań, lecz przypuszczam, że zjawisko, o którym mówi, polega na tym, że w otrzymanych przez niego toposkopowych wykresach fal mózgowych promienie oznaczające częstotliwości skupiają się w stosunkowo wąskich wycinkach.

(2) Barlow, J. S., *Rhytmic Activity Induced by Photic Stimulation in Relation to Intrinsic Alpha Activity of the Brain of Man*, EEG Clin. Neurophysiol., 12 (1960), str. 317 - 326.

(3) *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, vol. XXV (Biological Clocks), The Biological Laboratory, Cold Spring Harbor, L. I, N. Y. 1960.

rozbłyskują jednocześnie, lecz oczywiste to zjawisko składano na karb złudzenia optycznego. Słyszałem, że w przypadku pewnych świetlików z południowo-wschodniej Azji zjawisko to jest tak wyraźne, że nie może być chyba przypisane złudzeniu. Świetlik działa w dwojaki sposób: po pierwsze, jest on nadawcą impulsów o charakterze mniej lub bardziej okresowym, po drugie – posiada receptory dla odbierania tych impulsów. Czy nie występuje tu czasem to samo hipotetyczne zjawisko grupowania się częstotliwości? Do takich badań niezbędne są dokładne zapisy rozbłysków, które byłyby jednocześnie wystarczająco dobre na to, by mogły być poddane dokładnej analizie harmonicznej. Co więcej, powinniśmy poddać świetliki działaniu okresowego światła, na przykład z neonowej lampy błyskowej i określić, czy światło takie ma tendencję do „wciągania" ich w rytm własnej częstotliwości. Gdyby tak było, moglibyśmy spróbować uzyskać zapis spontanicznych rozbłysków świetlików i poddać go analizie autokorelacji, analogicznej do tej, jaką przeprowadziliśmy dla fal mózgowych. Nie ośmielam się przewidywać wyników nie wykonanych doświadczeń, ale ten kierunek badań wydaje mi się uderzająco obiecujący i jednocześnie niezbyt trudny do przeprowadzenia.

Zjawisko przyciągania częstotliwości występuje również w pewnych sytuacjach, nie związanych z materią żywą. Rozpatrzmy pewną liczbę prądnic prądu zmiennego, których częstotliwością sterują regulatory dołączone do silników napędowych. Regulatory te utrzymują częstotliwości w stosunkowo wąskich granicach. Przypuśćmy, ze wyjścia prądnic są łączone równolegle do szyn zbiorczych, którymi prąd płynie do obciążenia zewnętrznego, podlegającego na ogół bardziej lub mniej przypadkowym fluktuacjom na skutek włączania i wyłączania oświetlenia, itp. Aby uniknąć problemów, związanych z udziałem człowieka w procesie przełączania, które występują w przypadku stacji sterujących starego typu, będziemy zakładali, że włączanie i wyłączanie prądnic wykonuje się automatycznie. Jeśli prądnica osiągnie szybkość i fazę bliską szybkości i fazie innych prądnic systemu, automatyczne urządzenie dołączy ją do szyn zbiorczych. Jeśli natomiast przypadkiem szybkość i faza odchylają się zbyt daleko od właściwych wartości, analogiczne urządzenie automatycznie wyłączy prądnicę. W takim systemie prądnica, która usiłuje obracać się zbyt szybko, a więc mieć zbyt wielką częstotliwość przyjmuje na siebie część obciążenia większą niż wynosi jej normalny udział, natomiast prądnica obracająca się

zbyt wolno obsługuje mniejszą niż normalnie część obciążenia. W wyniku powstaje przyciąganie między częstotliwościami prądnic. Cały układ działa tak, jak gdyby był wyposażony w ogólny, zasadniczy regulator dokładniejszy niż regulatory poszczególnych prądnic, na który składają się te regulatory wraz z układem wzajemnego elektrycznego współdziałania prądnic. Temu, przynajmniej po części, zawdzięczamy dokładną regulację częstotliwości systemów wytwarzania energii elektrycznej i właśnie dzięki temu możemy posługiwać się zegarami elektrycznymi o wysokiej dokładności.

Wysuwam zatem sugestię, aby wyjścia takich systemów zbadać zarówno eksperymentalnie, jak i teoretycznie w sposób analogiczny do tego, w jaki badaliśmy fale mózgowe.

Jest rzeczą z historycznego punktu widzenia ciekawą, że w początkach techniki prądu zmiennego usiłowano łączyć prądnice o stałym napięciu (tego samego typu, jak stosowane we współczesnych elektrowniach) nie równolegle, lecz szeregowo. Okazało się, że wzajemne oddziaływanie częstotliwości poszczególnych prądnic ma charakter raczej odpychania, a nie przyciągania. W rezultacie układy takie były wysoce niestabilne, chyba, że wirniki poszczególnych prądnic były osadzone sztywno na wspólnym wale lub połączone przekładniami. Okazało się natomiast, że równoległe połączenia prądnic do szyn zbiorczych charakteryzują się specyficzną wewnętrzną stabilnością, która umożliwia łączenie prądnic z różnych stacji w układ, stanowiący jedną całość. Posługując się analogią do biologii można powiedzieć, że układy równoległe charakteryzowały się homeostazą lepszą niż szeregowe i dlatego przetrwały, natomiast układy szeregowe zostały wyeliminowane drogą doboru naturalnego.

Widzimy zatem, że nieliniowe współdziałanie pewnych elementów, powodujące przyciąganie częstotliwości może prowadzić do powstawania układów samoorganizujących się, tak, jak to dzieje się w przypadku fal mózgowych czy w przypadku sieci prądu zmiennego. Występowanie tej zdolności do samoorganizowania się na pewno nie jest ograniczone do bardzo małych częstotliwości, charakterystycznych dla obu omówionych zjawisk. Możemy wyobrazić sobie układy samoorganizujące się na poziomie częstotliwości, powiedzmy, promieniowania podczerwonego lub mikrofal.

Jak powiedzieliśmy wyżej, jednym z podstawowych problemów w biologii jest sposób, w jaki główne substancje tworzące geny lub wirusy, czy

też być może specyficzne substancje wywołujące raka, reprodukują się z materiałów, które są pozbawione tej specyficzności, jak mieszanina aminokwasów i kwasów nukleinowych. Wyjaśnia się to zazwyczaj tak, że jedna cząsteczka tych substancji działa jako szablon, według którego mniejsze cząsteczki układają się i łączą, tworząc podobną makrocząsteczkę. Wyjaśnienie to jest w istocie unikiem słownym, gdyż opisuje tylko w nieco inny sposób podstawowe zjawisko życia, polegające na tym, że jedne makrocząsteczki są tworzone na wzór innych, już istniejących makrocząsteczek. Niezależnie od tego, jak przebiega ten proces, jest on procesem dynamicznym i wiąże się z występowaniem sił lub ich równoważników. Całkowicie dopuszczalnym sposobem wyjaśnienia natury tych sił jest założenie, że aktywnym nośnikiem specyficzności cząsteczki jest częstotliwościowy wzorzec jej promieniowania cząsteczkowego, którego ważna część może leżeć w pasmie częstotliwości elektromagnetycznego promieniowania podczerwonego lub nawet niżej. Być może, specyficzne substancje wirusowe emitują w pewnych warunkach drgania podczerwone, które mają zdolność ułatwiania tworzenia się innych cząsteczek wirusa z niezróżnicowanej mieszaniny aminokwasów i kwasów nukleinowych. Jest rzeczą dość prawdopodobną, że zjawisko takie można by uważać za rodzaj przyciągających interakcji między częstotliwościami. Ponieważ cała ta hipoteza stoi jeszcze *sub judice*, a jej szczegóły nie są nawet jeszcze sformułowane, przeto wstrzymam się od bardziej konkretnych rozważań. Nasuwającą się w sposób oczywisty metodą badań nad tą hipotezą jest badanie widma absorpcyjnego i emisji większych ilości substancji wirusowej, na przykład — wirusa mozaiki tytoniowej w postaci krystalicznej i obserwowanie wpływu światła o tych częstotliwościach na wytwarzanie nowych pokoleń wirusa z odpowiedniej pożywki. Mówiąc o widmach absorpcyjnych mówię o zjawisku, które występuje prawie na pewno, jeśli natomiast chodzi o widma emisyjne, to z czymś podobnym mamy do czynienia w przypadku fluorescencji.

Każde tego rodzaju badania wiążą się ze stosowaniem wysoce dokładnych metod szczegółowego badania widma w obecności silnego światła o widmie ciągłym. Przekonaliśmy się już, że przed podobnymi problemami stajemy w przypadku mikroanalizy fal mózgowych, a matematyczne metody spektrografii opartej o użycie interferometru są w zasadniczych aspektach takie same jak te, które stosowaliśmy w naszych rozważaniach. Pro-

ponuję zatem z naciskiem, by wypróbować pełne możliwości tej metody w badaniach widm cząsteczkowych, zwłaszcza widm wirusów, genów i raka. Przedwcześnie byłoby czynić przewidywania co do wartości tych metod, zarówno dla badań czysto biologicznych, jak i dla medycyny, jednakże żywię wielką nadzieję, że mogą one okazać się dla obu tych dziedzin niesłychanie cenne.

SKOROWIDZ

Adler A. 193
Adrian E. D. 231
Aiken H. H. 39
akomodacja 177
Akutowicz E. I. 16
algebra Boole'a 37, 157
American Mathematical Society 40
analiza Fouriera 104, 110, 121
– harmoniczna 12, 48, 231, 236, 239, 241
analizator równań różniczkowych (Busha) 26, 29, 155
Ananke 66
anastomozy (skrzyżowania włókien) 41, 189
antropologia 42, 43, 206, 208
artyleria przeciwlotnicza patrz kierowanie ogniem artylerii przeciwlotniczej
arytmetyka dwójkowa 26, 156, 157
astrofizyka 61
atronomia 57÷60, 62
ataksja 31, 51, 52
Augustyn św. 66
automaty w filozofii 68, 69
– w historii 68÷70

Barlow I. S. 250
Bartlett F. C. 49
Bateson G. 43, 50
Bayesa prawo 127
Bell Telephone Laboratories 26, 34, 91, 99
Berger H. 231
Bergson H. 66, 72
Bernal I. D. 49
biała skrzynka 13, 14, 227
Bigelow J. 31, 32, 36, 40, 43
Birkhoff G. D. 79, 85, 88, 99, 100, 242
Blanc-Lapierre A. 49
błąd kwadratowy średni (jako kryterium) 16, 226
Bogolubow N. N. 90
Bohr Niels 65
Boltzman L. 65
Bonaparte (Napoleon) 217
Bonin von 43, 48, 183
Bose A. G. 14
Boston City Hospital 38
Braille 182
bramkowanie w układzie nerwowym 247, 248
Brazier M. A. B. 232
Browna ruchy 13, 102, 109, 112, 120, 122, 241, 243
Bush V. 25, 26, 27, 29, 39, 155, 203
Butler S. 53

Calculus ratiocinator 36, 164
Caldwell S. H. 19
całka Stieltjesa 105
Carnap R. 37
Carnot M. L. S. 66, 67

Cannon W. B. 23, 41, 153
Cantor G. 37, 75, 166
Carroll, Lewis (C. L. Dodson) 168, 189
Cauchy A. L. 114
Chandrasekhar S. 58
charakter grupy 81
Chavez I. 41, 47
choroby organiczne a czynnościowe 190
CIO (amerykańskie związki zawodowe) 84
Comision Instigadora y Coordinadora de la Investigacion Cientifica 41
cybernetyka a nauki społeczne 50, 51, 209, 210
–, pochodzenie nazwy 35
czarna skrzynka 13, 14, 227
czas w biologii a czas w fizyce (patrz także nieodwracalność czasu) 66

Daniell P. J. 40
Darwin C. R. 24, 64
Darwin G. H. 62, 64
Darwin, Sir Charles G. 64
Davis H. 231
Demon Maxwella 80÷89
Disney W. 221
dodawanie logiczne 158
dokładność a ilość informacji 92
– w fizyce klasycznej 128
dominacja jednej z półkul mózgowych 197
Doob J. L. 40
drgania (patrz także układy drgające) 134÷138
– i ich częstotliwość 46, 145
– kloniczne 40÷46
– liniowe a nieliniowe 196
– relaksacyjne 147
– w układzie ze sprzężeniem zwrotnym 30, 131, 138
druga zasada termodynamiki 87, 97
drżenie móżdżkowe 31, 131, 132
Dubé G. 55
dwójkowy system 26, 38, 39, 154, 155
dziedziczność 64, 215, 253

Edison Th. 230
Edvac 39, 173
efektor 131, 133, 149 i dalsze
efekt śrutowy 13, 14, 226
Einstein A. 102
Einthoven W. 230
elektroencefalogram 184, 229, 231, 239, [240
elektrofizjologia 230
element wykonawczy patrz efektor
Eniac 39, 173
entropia 87, 89, 93, 96, 128
– a informacja 93, 96
epicykl 10
ergodyczność 79, 84÷86, 90, 99, 100, 127, 242
Ericsson 43

Faraday M. 24
filogeneza 215
filozofia a automaty 68, 69
filtr elektryczny 119
– – dla dyskretnych szeregów czasowych 126
filtrowanie 117, 119, 120, 122
– szeregów dyskretnych a filtrowanie szeregów ciągłych 125, 126
filtry elektryczne i ich projektowanie (patrz także filtrowanie) 33, 34, 122
Fisher R. A. 34, 93, 127
fototropizm 175
Fouriera analiza 109, 110, 121
– transformata 113
Fremont-Smith F. 42
Freud S. 170
funkcja autokorelacji 107, 123, 232
funkcje przypadkowe 12

Gabor D. 14, 15, 225, 227
Galileusz (Galileo Galilei) 58
Gauss K. 24, 67, 116, 121
genetyka 64, 167, 252, 253
Gestalt 43, 48, 181, 183
Geulincx A. 69

Gibbs E. L. 231
Gibbs F. L. 231
Gibbs Willard 65, 74÷79, 84, 86, 88, 127
Goethe J. W. von 223
Goldstine H. H. 39
Gödel K. 165
grupa 80
– abelowa 81
– charakterów 82
– liczb całkowitych 82
– perspektywicznych przekształceń obiektów 178, 179
– przekształceń zachowujących miarę 84
– przesunięć 11
Guggenheim (John Simon) Foundation 42

Haar H. 84
Haldane J. B. S. 48, 49, 64, 129
hamowanie w łuku neuronowym 45
Harrison G. P. 47
Harvard University (Harvard Medical School) 7, 23, 29
Heaviside O. 67, 79
Hegel G. W. F. (antynomia heglowska) 65
Heisenberg W. 33, 65, 127
Henderson L. J. 153
Hermite'a wielomiany 13, 226
heterodynowanie (metoda) 238
Hey W. 57
Hilbert D. 37
Hill G. W. 148, 149
Hobbes T. 200
homeostaza w organizmie żywym 152
– w społeczeństwie 204÷207
– w układach technicznych 252
– w warunkach wolnej konkurencji 204
Hopf E. 79
hormony 170, 201, 202
Hume D. 166, 174
Hurewicz W. 90
Huxley J. S. 216
Huygens C. 66, 69

IBM (International Business Machines Corporation) 17, 239
ilość informacji 34, 92÷98, 154, 185
indukcja logiczna 220
– matematyczna 36, 37, 165
informacja (patrz także szum, szybkość przekazywania informacji, ilość informacji) a entropia 93, 96
– a współczesne automaty 71
– dostępna społecznie 202, 203, 204, 208
Institute for Advanced Study (Princeton) 39, 43
Instituto Nacional de Cardiologia 23, 39, 41, 42, 44, 55

Jacobs W. W. 223
Jasper H. H. 231
joga 184
Josiah Macy Foundation 36, 42
Joule J. P. 66
Jung C. G. 193

Kac M. 112
Kallianpur G. 16
Kartezjusz (R. Descartes) 68, 69
Kelvin, lord (W. Thomson) 67
Kepler J. 58
kierowanie ogniem artylerii przeciwlotniczej 27, 28, 67, 92
Kipling R. 220
Klüver H. 43
kojarzenie idei 166, 174, 178
Kołmogorow A. N. 34
komora Wilsona 209
Koopman B. O. 78, 84, 86, 112
Kopernik Mikołaj 58
kora mózgowa 177, 178, 183, 189, 248, 250
Kraepelin E. 189
Krein 123
Kryłow A. M. 90

Laguerre E. 227
lampa Williamsa 162

Lebesgue H. 74, 76, 77, 78, 84, 235, 241
Lee Y. W. 26, 40, 119
Leibniz G. W. von 24, 36, 69, 89, 164, 200, 204
Letvin J. 38, 170
Levinson N. 40
Levy H. 49
Lewin K. 43
leworęczność 197
Lindsley D. B. 248
liniowe układy sterowania 133 i nast.
Linneusz 167
Lloyd D. P. C. 43
lobotomia 192
Locke J. 166, 174, 178
Loéve M. 49
logika matematyczna (patrz również algebra Boole'a) 36, 37
Lorente de Nŏ, R. 39

Łańcuchy neuronowe 195, 196, 199
łuk odruchowy 45

MacColl L. A. 30, 44, 142
machina ratiocinatrix 36, 164
macierze 123
Macy Foundation patrz Josiah Macy Foundation
Maelzela maszyna 212
Malebranche N. D. 69
Masani 16
maszyny liczące 26, 27, 38, 39, 67, 91, 178
— — a gra w warcaby i w szachy 210, 217, 218
— — a indukcja logiczna 220
— — analogowe a numeryczne (cyfrowe) 155, 156
— — a prace niewolnicze 53
— — a trzecia wojna światowa 222
— — jako centralny układ nerwowy 52
— rozmnażające się 224
matematyka a psychologia 165
Matthews B. H. C. 231
Maxwell J. C. 35, 65, 88, 89, 132
Maxwella demon 88, 89
McCulloch W. S. 36, 37, 38, 39, 42, 47, 48, 51, 183
Mead Margaret 43, 50
Mendel G. 64
metamatematyka 165
meteorologia 57÷60, 62, 63
miara fazowa 78
— grupowa 180, 181
Michelson A. A. 234
MIT (Massachusetts Institute of Technology) 10, 18, 23, 29, 37÷39, 42, 47, 250
mnożenie logiczne 158
modulacja (amplitudy, częstotliwości, fazy) 98
monady Leibniza 69, 70
Morgenstern O. 43, 50, 204, 216
Morison R. S. 47
mózg (patrz także kora mózgowa) 164, 173, 189÷192, 196, 197, 199, 247

Narządy zmysłów urządzeń technicznych 71
National Association of Manufacturers 53
National Physics Laboratory at Teddington 37, 48
nawigacja 66
Nelson H. 217
Neumann J. von 39, 43, 50, 78, 84, 86, 93, 100, 127, 171, 204, 211, 216, 217, 225
neuron (patrz także układ nerwowy, łańcuchy neuronowe) 38, 45, 70, 159, 163, 190, 191, 247
Newcomen 66
Newton I. 58÷60, 65, 66, 67, 70, 72, 74, 127
nieliniowe układy a drgania 146, 249÷252
— —, analiza i synteza 12÷14

nieliniowe układy a uczenie się 219, 220
nieodwracalność czasu 61÷67
nierówność Schwarza 136
niezawodność 188
niezmienniki grup 11, 81
— liniowe 81
— metryczne 84
Nikodym O. M. 101
Northrup F. C. S. 43
Nowojorska Akademia Nauk 46, 48

Oceanografia 63
odruch warunkowy 166, 169, 170
okazjonalizm 69
ontogeneza 215, 216
operacje logiczne 157, 158
oscylograf 230
Osgood W. F. 78
Oxtoby J. C. 77

Padaczka 41
Paley R. E. A. C. 102
pamięć a hipoteza co do sposobu pamiętania w układzie nerwowym 163, 164
— a jej schorzenia u ludzi 190÷193
— a metody jej technicznego konstruowania 160, 161, 163
— a teoria Freuda 170, 193
— trwała a cyrkulacyjna 190÷193
— w organizmach żywych a w maszynach 160, 170, 171, 190
parkinsonizm 144
Pascal B. 36
Pasteur L. 197
Pawłow I. P. 167
perpetuum mobile drugiego rodzaju 88
Perrin J. B. 102
perturbacje wiekowe 46, 147, 152, 249
Pitts W. H. 37, 38, 42, 47, 55
Plancherel M. 243
Planck Max 65
Platon 210
Poincaré H. 148
prawo Bayesa 127
— intensywności wrażeń (Webera–Fechnera) 145
praworęczność 197
protezy 47, 51, 181÷186
próg pobudzenia neuronu 45, 159
przechowywanie informacji patrz pamięć
przekształcenia identycznościowe 80
— i ich grupy 81, 178÷181
— i ich niezmienniki 80
— metrycznie tranzytywne 108, 112
— odwrotne 81
— o mierze stałej 77
— perspektywiczne obiektów wizualnych 178
— przemienne 80
— zachowujące miarę 84, 86, 100, 107
przestrzeń fazowa 77, 78, 87
przetworniki nieliniowe 225÷227
przewidywanie szeregów czasowych 16, 33, 40, 101, 112, 113, 116, 117, 122, 123, 124
— — — dyskretnych a ciągłych 32, 124
— — — liniowe a nieliniowe 16, 40, 113, 122
psychoanaliza 193
psychologia 164, 165
Ptolemeusz 11

Rachunek rozumowania (patrz również algebra Boole'a, *calculus ratiocinator*) 36
radar 29, 53, 67
Ramos F. G. 42
Rashevsky N. 37, 70
relaksacyjne drgania 147
retransmiter telegraficzny 161, 177
rewolucja przemysłowa 53
Rockefeller Foundation 44, 47
Rorschach H. 174
Rosenblith W. A. 232, 250
Rosenblueth A. 23÷27, 32, 35, 38, 39, 41, 42, 44, 46, 47
Royce J. 24

rozmnażanie się maszyn 124
równania różniczkowe cząstkowe (rozwiązywanie) 171
równoważność średnich czasowych i fazowych 78, 86, 100
ruchy Browna 13, 102, 109, 112, 122, 241, 243
Russel B. A. W. 37, 166
rytm alfa 48, 184
— — a czas reakcji 248
— — a wyładowania następcze 250
— — jako centralny rytm zegarowy 247

Salomon 223
samoorganizujące się układy (przykłady) 18, 227, 251, 252
Samuel A. L. 17, 220
Santillana G. D. de 49
Savage L. J. 43
scanning patrz wybieranie
Schneirla T. C. 43
Schrödinger E. 35
Selfridge O. 42, 55, 170
serwomechanizmy 30, 44, 72
Shannon C. E. 34, 37, 38, 99, 122
sieci o połączeniach przypadkowych 41
skurcze kloniczne 41, 44, 45
Smoluchowski R. 102
socjologia 42, 208
Spinoza B. 69
sprzężenie zwrotne (patrz także homeostaza), definicja 29, 131
— — informacyjne 154
— — posturalne (postawy) 144, 153
— — przewidujące 150
— —, przykłady 29, 30, 113÷133, 142, 150, 169, 175, 176
— — stabilne 137, 138, 145, 151
— — ujemne 132
— — w eksperymentach na kotach 44
— — w społeczeństwie 49
— — wzrokowo-mięśniowe 175
sprzężenie zwrotne zamiarowe 144
Stanley-Jones D. 18
Stanley-Jones K. 18
sumienie 192
synapsa 37, 38, 45, 48, 159, 160, 163, 164, 170, 190, 247, 248
system dwójkowy a dziesiętny 26, 157
— ptolemejski a kopernikański 10, 11, 59
systemy liczbowe 156
szachy 210÷212, 217÷219
Szent-Györgi A. 49, 129
szeregi czasowe (patrz także ruchy Browna i przewidywanie szeregów czasowych) a mechanika kwantowa 127
— — a wiadomość 32, 99
— — dyskretne a ciągłe 123 i nast.
— —, przykłady 91, 92
— — wielowymiarowe 122, 123
sztuczne narządy zmysłów u ludzi patrz protezy
— — — w urządzeniach technicznych 71
szum 33, 71, 95, 98, 117, 120, 126
szybkość przekazywania informacji 120, 121, 126

Średnia czasowa 78, 80, 100
— fazowa 78, 86, 100
środki masowego przekazu 206, 207

Tables dorsalis 31, 130
Taylor G. L. 231
telewizja 26, 48
teoria epicykli 10, 59
— ergodyczna 79, 84÷86, 90, 99, 100, 242
— ewolucji (w biologii) 64, 65
— — przepływów i odpływów 65
— gier 43, 50, 204, 211, 216÷220
— małych próbek statystycznych 51
— miary 77, 84
— orbit 59
terapia wstrząsowa a pamięć 192, 193
termodynamika 35, 61, 65, 67

termodynamika a entropia 87, 97
— a nieodwracalność czasu 67
— , druga zasada 67, 97
termostat 132
Thompson D'Arcy 194
ton afektywny 168, 169
tranzytywność metryczna (patrz także ergodyczność) 227
Turing A. M. 37, 48, 164
Tyche 66

Uczące się maszyny a gra w szachy 218
— — — a gra w warcaby 17, 219, 220
— — — a trzecia wojna światowa 222, 224
uczenie się a nieliniowe sprzężenie zwrotne 220
— — a odruch warunkowy 169
— — jako cecha organizmów żywych 215, 216
— — ontogenetyczne i filogenetyczne 215, 216
— — w układach biologicznych 15÷18
układ mnożący 14, 15
— nerwowy (patrz także mózg, neuron, synapsa) 30, 31, 38, 72, 159, 160, 163, 177, 201, 216, 221
— słoneczny 59
— sympatyczny i parasympatyczny 153
— zagadnienia obiegu informacji 194
układy drgające a widmo mocy fal alfa 249
— — nieliniowe 146, 249
— — w biologii 15, 16, 44÷46, 248÷÷254
— — w mózgu 244
— głosujące (większościowe) 188, 189
— kompensacyjne a układy ze sprzężeniem zwrotnym 149
— przełączające 26, 48
— samoorganizujące się (przykłady) 18, 227, 251, 252
Ulam S. M. 77

University of California 248
University of Illinois 36, 40
University of London 14, 15, 225
University of Pensylvania 39
uraz móżdżku patrz drżenie móżdżkowe
urazy mózgu 189, 197, 198

Vallarta Manuel S. 23, 41
Van der Pol B. 147
vocoder 91, 99
Volta A. 230
Vries H. de 64

Wallace A. 64
Wallman H. 40
Walter W. Grey 184, 250
warcaby 17, 18, 219, 220
wartość główna Cauchy'ego 114
Watanabe S. 17, 220
Watt James 132
Weaver Warren 40, 47
Webera–Fechnera prawo 45
Webster F. 55
Weyl H. 37
Wheatstone'a mostek 175
wiadomość (patrz także informacja) 32
widmo mocy fal mózgowych 187, 235, 243, 249, 250
wielomiany Hermite'a 13, 226
Wiener N. 11, 16, 32, 36, 41, 42, 83, 102, 219, 223, 242, 243
Wilsona komora 209
wstrząsy insulinowe, elektryczne, metrazolowe 192, 193
wybieranie (scanning) 26, 48, 162, 183, 184
— grupowe 179 i nast.
wyładowanie następcze 250

Zasada nieoznaczoności (Heisenberga) 33, 127, 128
— zachowania energii 67
zmysł kinestetyczny 31, 51, 71, 131

nr inw.: BG - 102919

BG 102919

SERIA INFORMACJA I STEROWANIE

wydawana przez

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

w porozumieniu z

POLSKIM TOWARZYSTWEM CYBERNETYCZNYM

Ukazały się

O Lange, Wstęp do cybernetyki ekonomicznej, Warszawa 1965

M Greniewski, Robot kierownictwa (Automatyczne przetwarzanie danych), Warszawa 1967

A Idzkiewicz, PERT (Metody analizy sieciowej), Warszawa 1967

J Gościński, Elementy cybernetyki w zarządzaniu, Warszawa 1968

M Kempisty, Pamięć skojarzeniowa, Warszawa 1968

H Greniewski, Cybernetyka niematematyczna Warszawa 1969

L Brillouin, Nauka a teoria informacji, Warszawa 1969

J Konieczny, Cybernetyka walki, Warszawa 1970

W przygotowaniu

J Gościński, Projektowanie systemów zarządzania

J L Kulikowski, Cybernetyczne układy rozpoznające