

HIERARCHICZNE STRUKTURY STEROWANIA *

WŁADYSŁAW
FINDEISEN

Członek rzeczywisty PAN

Geneza i racja istnienia. Mniej więcej 35 lat temu rozpoczął się w dziedzinie teorii i techniki sterowania proces rozwojowy, poszukujący racjonalnych odpowiedzi na następujące pytanie:

- jak ukształtować strukturę sterowania, czyli układ jednostek decyzyjnych i powiązań między nimi, aby w zadowalający sposób wpływać na procesy przebiegające w złożonym systemie?

Chodzi tutaj o sytuacje, gdzie mamy do czynienia z dużą liczbą wielkości sterujących, z potrzebą ciągłej albo prawie ciągłej interwencji, a jednocześnie brać trzeba pod uwagę długi horyzont czasowy — w szczególności wówczas, gdy w grę wchodzi zjawiska ekonomiczne, zmiany środowiska, inwestycje itd.

Zastanawiamy się zatem nad strukturą bądź organizacją, w której podejmować trzeba wiele szczegółowych decyzji, aby zapewnić bieżące funkcjonowanie, a równocześnie potrzebne są refleksje średnio- i długofalowe.

Potrzeba analizowania systemów złożonych jest, być może, jednym ze znaków współczesnego czasu. Występuje ona w bardzo różnych dziedzinach, że wymienię procesy technologiczne i produkcyjne, systemy transportowe i energetyczne, sieci telekomunikacyjne, zarządzanie w przedsiębiorstwach, ochronę środowiska, gospodarkę zasobami naturalnymi.

Powróćmy jednak do sformułowania problemu: trzeba podejmować, jednocześnie i równolegle, bardzo wiele decyzji, w długiej perspektywie czasowej. Jak to zorganizować?

Zawarcie całości w jednym wielkim komputerze, jednym wielkim programie, który wie wszystko o wszystkich i o wszystkim decyduje, z pewnością mija się ze zdrowym rozsądkiem z wielu względów, z których dwa przedstawię.

Po pierwsze, określona interwencja bieżąca w działanie systemu z reguły nie potrzebuje korzystać ze wszystkich obserwacji, a tylko z obserwacji najbliższego otoczenia — można zatem używać lokalnych jednostek decyzyjnych, powierzając im jakąś część potrzebnych decyzji; eliminuje to zarazem opóźnienia informacyjne oraz wrażliwość na uszkodzenia, jaka

* Wykład prof. dr. W. FINDEISENA przedstawiony podczas uroczystości nadania doktoratu *honoris causa* Politechniki Gdańskiej 5 listopada 1997 r.

może cechować nadmiernie scentralizowaną strukturę. Po drugie, trzeba sobie zdawać sprawę z tego, że decyzje długofalowe i dotyczące złożonego systemu z reguły nie dają się sformalizować w stopniu wystarczającym na to, by mogły być jednoznacznie określone lub podpowiadane przez komputer. Oznacza to, że na wyższych szczeblach struktury sterowania potrzebne są mechanizmy decyzyjne, korzystające z intuicji i osądu człowieka — tylko człowiek może mieć zdolność wyważania czynników i wartości nie dających się kwantyfikować, zdolność oceny i podejmowania ryzyka, oraz — co najważniejsze — tylko on może być decydem przyjmującym odpowiedzialność za swe rozstrzygnięcia. Zdolności decyzyjne człowieka są jednak ograniczone ilościowo: nie jest on w stanie podejmować decyzji zbyt licznych w krótkim czasie.

Jest w tym istotna wskazówka dla kształtowania hierarchicznej struktury sterowania czy struktury decyzyjnej: należy zadbać o to, by na wyższych szczeblach zredukowana była zarówno liczba podejmowanych decyzji, jak częstość ich podejmowania — tym bardziej, im bardziej złożone i wymagające refleksji jest zadanie decyzyjne.

Nie wyklucza to bynajmniej stosowania, w każdym miejscu hierarchicznej struktury, programów komputerowych — realizujących całość sterowania na niższych szczeblach, np. tam gdzie chodzi o utrzymanie zadanego biegu procesu technologicznego, albo służących jako wspomaganie decyzji na szczeblach wyższych. Komputer oferuje szybkość przetwarzania informacji oraz sprawną analizę wielu wariantów w krótkim czasie, człowiek dokonuje wartościowania i przyjmuje odpowiedzialność.

W rezultacie, w każdej niemal hierarchicznej strukturze różna jest częstotliwość interwencji podejmowanych przez jednostki decyzyjne różnych szczebli (wyższe szczeble interweniują rzadziej), oraz zróżnicowany jest horyzont czasowy (zwiększa się idąc wzwyż hierarchii). Zawsze, i to jest sprawa zasadnicza, jednostka decyzyjna znajdująca się na szczycie obejmuje swoją kompetencją cały system (w odróżnieniu od jednostek lokalnych) oraz bierze pod uwagę pełny horyzont czasowy działania systemu.

Przyjęcie odpowiedniego dla danej decyzji (czyli dla danego szczebla w strukturze decyzyjnej) horyzontu czasowego stanowi problem sam w sobie, o dużym znaczeniu praktycznym. Warto tu m.in. zwrócić uwagę na pewną subtelność, dosyć łatwą do przeoczenia: horyzont czasowy decyzji podejmowanej w danej chwili powinien być tak długi, jak daleko sięgać by mogły skutki tej decyzji. Jeżeli jest to, np., decyzja o intensywności wypuszczania wody z dużego zbiornika retencyjnego, to trzeba brać pod uwagę całą perspektywę czasową spodziewanej fali opadów i spływu wód. Potrzeby takiego spojrzenia nie eliminuje fakt (to jest właśnie ta subtelność), że za kilka godzin podejmować będziemy decyzję następną; nie wolno bowiem dla tej następnej decyzji świadomie stworzyć sytuacji mniej korzystnej dla całości procesu, niż to jest możliwe.

Nie chcę przez to powiedzieć, że perspektywa ewentualnej korekty postępowania za pomocą następnej decyzji nie ma znaczenia przy podejmowaniu decyzji pierwszej — wiąże się to jednak nie tyle z horyzontem czasowym, co z oceną zagrożeń płynących z niepewności: wiedząc o możliwości dokonania korekty za kilka godzin możemy mniej się zabezpieczać.

Chciałbym jeszcze, po tym przedstawieniu genezy i cech ogólnych hierarchicznych struktur sterowania, zwrócić uwagę na dwie kwestie szczegółowe, bardzo dla tych struktur charakterystyczne: na konflikty między jednostkami decyzyjnymi oraz na zróżnicowanie informacji.

Konflikty i koordynacja. Stwierdziliśmy już, że sterowanie dużym systemem nie jest racjonalne i nie jest nawet możliwe przy pomocy jednej — centralnej — jednostki decyzyjnej, jeśli rozumieć przez to będziemy podejmowanie wszystkich potrzebnych decyzji.

Wielość jednostek decyzyjnych działających we wspólnym systemie może jednak prowadzić do różnorodnych konfliktów.

Projektant struktury decyzyjnej, a następnie osoba odpowiedzialna za funkcjonowanie całego systemu, to jest za spełnianie pewnego celu globalnego, musi te konflikty przewidzieć oraz mieć możliwość przeciwdziałania.

Zacznijmy od tego, że konfliktów może nie być: nie ma ich mianowicie wówczas, gdy każda jednostka decyzyjna (z wyjątkiem być może tej, która jest na szczycie) zgadza się postępować ściśle według zasad i przepisów, ustalonych *a priori* z punktu widzenia całości systemu. W teorii sterowania mówimy tu o „regułach decyzyjnych”; jeżeli je wprowadzimy, to obojętne się staje, czy — fizycznie rzecz biorąc — jednostką decyzyjną będzie komputer czy też człowiek, zwany w tej sytuacji „operatorem”, a nie „decydentem”.

Ustalenie, czyli zaprojektowanie reguł decyzyjnych dla złożonego systemu, poddanego nieznanemu z góry wpływowi otoczenia, jest rzeczą trudną; trzeba tu bowiem mieć dokładną znajomość zarówno samego systemu, jak pełnego wachlarza okoliczności zewnętrznych. W rezultacie praktycznym reguły decyzyjne są zazwyczaj zachowawcze w tym sensie, że przedkładają stabilność systemu (czyli bezpieczeństwo działania) ponad wydobycie z niego wszystkich możliwości; mogą więc np. być właściwe w systemie energetycznym, a niewłaściwe w przedsiębiorstwie, gdzie samo przeżycie systemu zależne jest od efektów ekonomicznych.

W większości systemów, jakie są dzisiaj przedmiotem zainteresowania, można osiągnąć więcej, gdy jednostkom decyzyjnym niższych szczebli pozostawi się swobodę podejmowania szczegółowych decyzji; stawiamy im cele i narzucamy ograniczenia, ale nie ściśle reguły postępowania.

Cele lokalne, np. wielkość zysku osiąganego przez każdy z podsystemów składających się na jedną firmę, będą ze sobą w konflikcie: zysk całkowity będzie wprawdzie sumą zysków osiągniętych przez podsystemy,

ale decydent lokalny może osiągnąć więcej, gdy nie liczy się z całością. W powiązonym w jedną całość systemie decydenci tacy znajdują się w sytuacji gry między sobą: zysk mój zależy nie tylko od moich decyzji, ale także od rozstrzygnięć innych, równoległych jednostek decyzyjnych.

Sytuacja gry między jednostkami lokalnymi może być dla całości systemu niekorzystna, a nawet zgubna, jeśli gra ta nie będzie miała tzw. stabilnego punktu równowagi. Konieczna staje się interwencja, czyli oddziaływanie nadrzędne na jednostki decyzyjne, zmierzające do dwóch celów: do neutralizacji konfliktu, czyli do eliminacji konkurencyjnej gry między częściami systemu, oraz do spowodowania, by autonomicznie podejmowane decyzje lokalne sprzyjały celowi globalnemu, czyli interesom całościowym.

Interwencja, o której teraz mówimy, nazywa się w teorii sterowania „koordynacją”; różne mogą być jej instrumenty — czyli wielkości, za pomocą których chcemy wpływać pośrednio na decyzje lokalne — oraz różne zasady postępowania jednostki koordynującej. Wiemy, np., że w sytuacji zwanej „zgodnością celów” owocem koordynacji mogą być decyzje lokalne w pełni sprzyjające interesom jednostki nadrzędnej. Zależnie od wybranych instrumentów oddziaływania różne będą zakresy potrzebnej koordynatorowi informacji i różna jego wrażliwość na jej zafalszowanie przez jednostki lokalne; zafalszowanie, które może jednostkom lokalnym przynosić wymierne korzyści.

Istotą rzeczy pozostaje fakt, że interesy jednostek decyzyjnych lokalnych są ze sobą w konflikcie; koordynacja konfliktu tego nie likwiduje, lecz tylko neutralizuje, tzn. nie pozwala, aby doszedł on do głosu w działaniu całości systemu. Oznacza to m.in., że przy koordynacji niedostatecznej lub w inny sposób wadliwej funkcjonowanie systemu może być zakłócone wspomnianą wyżej grą między decydentami lokalnymi.

Zagrożenie, o którym mowa nie powinno prowadzić do rezygnacji z istnienia lokalnych jednostek decyzyjnych w złożonym systemie: decydent lokalny jest w stanie wiedzieć więcej o powierzony sobie części systemu, lepiej go rozumieć i lepiej znać jego aktualne otoczenie — może podejmować lepsze decyzje. To jest jak gdyby „zasada pomocniczości” *a fortiori*: teoria sterowania podpowiada, że miejscowa jednostka decyzyjna nie tylko może podejmować lokalne decyzje (jest dla nich wystarczająco kompetentna), ale zrobi to lepiej, niż mogłaby to uczynić jednostka centralna.

Dotyczy to w szczególności decyzji podejmowanych w warunkach różnego rodzaju niepewności, ryzyka i ograniczeń.

Informacja i język porozumiewania. Wydaje się rzeczą dosyć oczywistą, że jednostki działające na różnych szczeblach hierarchicznej struktury decyzyjnej potrzebują informacji różnego rodzaju i zakresu. Urządzenia automatyki, dbające o utrzymanie zadanych temperatur albo

ciśnien w instalacji technologicznej, korzystają z informacji o przebiegających zjawiskach fizycznych, na ogół podawanej w sposób ciągły albo prawie ciągły; z podobnego rodzaju informacji korzysta w sposób ciągły pilot samolotu, stanowiącego część przedsiębiorstwa lotniczego. Innego rodzaju informacja potrzebna będzie na szczeblu nieco wyższym, np. tam gdzie czuwa się nad płynnym przebiegiem produkcji lub obsługi pasażerów, albo — jeszcze wyżej — nad dostosowaniem działania systemu do zapotrzebowania rynku.

Jest pewnego rodzaju prawidłowością, że im wyżej w hierarchii jednostek decyzyjnych, tym mniej szczegółowa jest używana tam informacja o procesach i zjawiskach fizycznych w samym systemie, a bogatsza musi być informacja o jego otoczeniu, o środowisku ekonomicznym, nie wyłączając odpowiednich prognoz.

Jednostki decyzyjne różnych szczebli, albo — jak je nazywamy — warstw sterowania, rozpatrują różne rodzaje zjawisk, różne przejawy rzeczywistości tego samego systemu: na samym dole mogą to być np. przebiegi temperatur lub ciśnień, wyżej — wielkości produkcji, być może podzielone według skali czasu (doba, miesiąc, rok), a wyżej jeszcze wystąpią rozważania czysto ekonomiczne — jaką produkcję podjąć, jakie półprodukty wytwarzać, a jakie kupować, itd.

Wszystko to składa się na jedną całość, jedną strukturę; istotą rzeczy stają się związki między jej szczeblami oraz to, że język poleceń przekazywanych w dół z jednego szczebla do drugiego musi być zrozumiały dla nich obu, podobnie jak zrozumiały dla obu musi być język przekazywanej w odwrotnym kierunku informacji.

Warto pomyśleć o sytuacji jednostki decyzyjnej umieszczonej w konkretnym miejscu hierarchicznej struktury; według jej oglądu świata „systemem sterowanym” jest wszystko to, co znajduje się poniżej: będzie tam ów system fizyczny, np. instalacje technologiczne rafinerii albo samoloty przedsiębiorstwa lotniczego, lecz także jednostki decyzyjne niższych szczebli. Jeśli są to jednostki działające ze świadomością swoich celów lokalnych, a nie na podstawie narzuconych reguł decyzyjnych, trzeba możliwości swobodnego postępowania tych jednostek odpowiednio uwzględnić w obrazie i opisie postrzeganego systemu.

Projektowanie struktur hierarchicznych. Ekstrapolując nieco nasze dotychczasowe rozważania, podkreślmy główne cechy charakterystyczne hierarchicznej struktury:

- jednostki niższych szczebli obejmują zasięgiem swoich kompetencji mniejsze części systemu, niż jednostki szczebli wyższych (zróźnicowanie „rozległości sterowania”); operują też zazwyczaj krótszym horyzontem czasowym,
- jednostka decyzyjna znajdująca się na szczycie obejmuje swym zasięgiem cały system oraz pełny horyzont czasowy jego działania,

- szczegółowość decyzji oraz częstotliwość interwencji jednostek decyzyjnych maleje na wyższych szczeblach hierarchii; bardziej skomplikowane i wymagające refleksji są natomiast występujące tam zadania decyzyjne,
- interesy jednostek równoległych, tj. znajdujących się na tym samym szczeblu, są zazwyczaj w konflikcie; konflikt ten może być zneutralizowany przez jednostkę nadrzędną, jeśli rozporządza ona wystarczającymi instrumentami koordynacji,
- jednostki różnych szczebli dysponują różnym zakresem informacji o systemie sterowanym i jego otoczeniu; może istnieć motywacja do przekazywania informacji nieprawdziwej.

Projekt struktury sterowania dla konkretnego systemu rozpocząć się musi od rozstrzygnięć podstawowych, tj. od określenia:

- kto, czyli która jednostka decyzyjna, podejmuje określony rodzaj decyzji — „alokacja kompetencji”,
- jakie jest zadanie stawiane przed daną jednostką decyzyjną (uniezależnienie od niepewności otoczenia, maksymalizacja zysku itp.) — „alokacja zadań”,
- na jakiej podstawie będą podejmowane decyzje tej jednostki — „alokacja informacji”,
- jakie mają być użyte mechanizmy decyzyjne w poszczególnych miejscach rozważanej struktury (reguły decyzyjne, programy optymalizacji, komputerowe wspomaganie intuicji decydenta i in.).

Jest tu oczywiście miejsce na wielką liczbę wariantów, które trzeba poddawać analizie; nie ma po temu innego skutecznego narzędzia jak przeprowadzana przy użyciu komputera symulacja, korzystająca z matematycznego modelu sterowanego systemu, modelu jego otoczenia i modeli przyszłych jednostek decyzyjnych.

Korzystanie z symulacji komputerowej, wbrew pierwszemu wrażeniu, jest bardzo *pracochłonne*. Wiąże się to z dużą liczbą wariantów albo ich mutacji, jakie trzeba analizować w każdym zadaniu o nieco większej złożoności — potrzeba dużej wiedzy, intuicji i doświadczenia, by generować warianty potencjalnie lepsze na podstawie wyników symulacji wariantów poprzednich. Praca ta bywa ułatwiona przez specjalnie przygotowane systemy oprogramowania.

Warto może w tym momencie wskazać, jakie miejsce w analizie i projektowaniu struktur złożonych zajmuje dziś teoria sterowania. Wyrażam przekonanie, że jest to miejsce znaczące — wprawdzie nie można na drodze czysto teoretycznej określić pełnego rozwiązania jakiegokolwiek problemu o realnych rozmiarach i uwarunkowaniach, ale można w istniejącej i dość już okrzeplej teorii znaleźć przesłanki do wyboru instrumentów i metod koordynacji, sposobów użycia informacji, postępowania w sytuacjach konfliktowych, uwzględniania ryzyka itd.

Uprawnione jest sformułowanie ostrzeżenia: prowadzenie badań symulacyjnych bez „drogowskazów”, wynikających ze znajomości istniejącej

teorii może być nie tylko bardziej pracochłonne, ale grozi rozpatrywaniem wariantów dalekich od wykorzystania możliwości systemu, niedostrzeżeniem rozwiązań najbardziej skutecznych.



Rozwój teorii i techniki sterowania w odniesieniu do złożonych systemów, prowadzący do struktur hierarchicznych, rozpoczął się — jak już wspomniałem — ponad trzydzieści lat temu. Były tu dwa główne nurty, wzajemnie się przeplatające w praktyce.

Pierwszy nurt wziął swój początek z dziedziny programowania matematycznego — wywodzi się on mianowicie od stosowanych tam metod dekompozycji i koordynacji dużych zadań obliczeniowych.

Przeniesienie owych koncepcji w dziedzinę sterowania wymagało uwzględnienia wielu nowych aspektów, a mianowicie: działania w czasie rzeczywistym, tj. w trakcie trwania procesu sterowanego, wpływu zmian w otoczeniu, korzystania ze sprzężenia zwrotnego, czyli obserwacji bieżącej procesu, a także istnienia konfliktów między jednostkami decyzyjnymi.

Drugi nurt powstał na drodze rozumowania inżynierów, którzy spostrzegli, że optymalne prowadzenie procesu w systemie można podzielić na dwie części: stabilizację (ciągłą) biegu procesu oraz odnawianą tylko co pewien czas optymalizację, gdyż jest ona z reguły zadaniem bardziej złożonym i pracochłonnym.

Podobne źródło — realizm techniczny — ma także koncepcja zróżnicowania horyzontu sterowania na kolejnych szczeblach hierarchii (z równoczesnym uproszczeniem stosowanych tam modeli), w Gdańsku zapoczątkowana już w połowie lat sześćdziesiątych przez FRANCISZKA MILKIEWICZA i dotąd rozwijana przez jego zespół naukowy w różnych zastosowaniach.