CZESŁAW KULIK

UJEDNOLICONY PROGRAM ANALIZY STATYSTYCZNEJ ASTA W STEROWANIU PROCESAMI PRZEMYSŁOWYMI NA ELEKTRONICZNYCH MASZYNACH CYFROWYCH

Rozwój produkcji maszyn elektronicznych, zarówno na świecie jak i w Polsce, wzrasta w bardzo szybkim tempie. Temu procesowi towarzyszy również lawinowy wzrost publikacji na temat konstrukcji, zastosowań i programowania, głównie maszyn cyfrowych. W krajowej literaturze jednak, poświęca się zbyt mało uwagi problemom kontroli i sterowania procesów wytwórczych, mimo, że jest to dziedzina, w której współczesne maszyny liczące znajdą szerokie zastosowanie.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie programu analizy statystycznej ASTA. stosowanego w przodujących krajach, w kontroli i sterowaniu procesów przemysłowych [1]. Ponieważ jest to bardzo obszerny temat, zostanie on tu omówiony w sposób syntetyczny, aby przez rozpraszanie się w szczegółach nie utrudniać czytelnikom przyswojenia sobie istoty koncepcji programu ASTA.

Również skrótowo, w punktach zostaną podane pojęcia wstępne, ich klasyfikacja, podstawowe schematy, a także zarys problemów objętych omawianym programem.

P r o c e s   p r o d u k c y j n y. Podstawowe elementy każdego procesu przemysłowego są następujące:

1. właściwa produkcja — przetworzenie surowca, energii, zmiana organizacji produktu (formy struktury produktu) itp.,
2. rozdział — sortowanie, transport, przechowywanie produktu,
3. kontrola — otrzymywanie informacji od produktu,
4. sterowanie — przetwarzanie informacji w zmiany organizacji produktu,
5. rozwiązanie — przetwarzanie informacji, często związane z operacjami obliczeniowymi i logicznymi.

[1] Zob C. Kulik, *Niekotoryje metody statisticzeskogo analiza obiektów uprawlienia. Izwiestia wuzow,* Elektromechanika 1962, nr 4.

Procesy przemysłowe rozpatrywane według cech strukturalnych można podzielić, jak następuje:

1. z nieprzerywanymi (ciągłymi) połączeniami,
2. ze skokowymi połączeniami (logicznymi), przełączającymi się w zależności od określonych warunków (logicznych),
3. ze skokowymi połączeniami (okresowymi, impulsyjnymi) zamykającymi się okresowo w czasie,
4. z mieszanymi połączeniami (kombinacja wariantów 1, 2 i 3).

Informacje. Informacje krążące po zewnętrznych połączeniach obiektu sterowania dzielą się na:

1. wejściowe (zmienne niezależne systemu),
2. wyjściowe (zmienne zależne systemu).

Ad 1. Wejściowymi zmiennymi są często regulowane czynniki tzw. parametry procesu (temperatura, ciśnienie, rozciągliwość, przemieszczenie, szybkość przepływu, rozchód, moc, zużycie energii, itp.) oraz nieregulowane czynniki (drgania, szumy fluktuacyjne, przypadkowe zaburzenia środowiska zewnętrznego, stan surowca itp.).

Ad 2. Wyjściowymi zmiennymi procesu przemysłowego są tzw. charakterystyki produktu (skład chemiczny, gęstość, kształt, ciężar, grubość itp.) oraz wskaźniki techniczno-ekonomiczne (koszt własny, wydajność itp.).

Schemat kontroli i sterowania. Badanie schematu kontroli i sterowania należy łączyć z analizą zależności zmiennych parametrów. Analizę związków wygodnie jest przedstawić w jednolitej postaci, zestawiając tablicę (macierz) współczynników korelacji zmiennych procesu.

Analizę korelacji powinna poprzedzić szczegółowa analiza statystyczna, szybkości zmian parametrów w czasie, zakres tych zmian lub wielkość dyspersji parametrów itd.

Dyspersję (D) dla kwantowanego sygnału $\mu_i(t)$ przedstawionego przy pomocy współrzędnych $\mu_i = \mu_{(ti)}$ określa się jako

$$D = \lim_{N \to \infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} [\mu_i - M_{(\mu)}]^2 \right\}$$

przy $i=1, 2, \ldots, N$,

gdzie

$M_{(\mu)}=$ nadzieja matematyczna dla μ,

$$M_{(\mu)} = \lim_{N \to \infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mu i \right\}.$$

W praktyce dla krańcowego doboru μ_i liczebności N, oblicza się szacunki właściwe dyspersji

$$D=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}[\overline{\mu}_i-M_{(\mu)}]^2$$

oraz nadziei matematycznej

$$M_{(\mu)}=\overline{\mu}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mu_i.$$

Jeśli ciągła funkcja $\mu_{(t)}$ jest przedstawiona jako szereg rzędnych o przedziale Δt, to taki szereg obrazuje funkcję rozwiązań $\mu_{[n]}$ z okresem kwantowania Δt. Przy tym $n=0,1,2,\ \dots$ oraz $t_n=n\Delta t$.

Okres kwantowania Δt wystarczający dla zmiany ciągłego sygnału $\mu_{(t)}$ funkcji rozwiązań $\mu_{[n]}$ bez straty informacji określa się jako

$$\Delta t=\frac{1}{2\Delta f},$$

gdzie Δf = pas przepływu sygnału.

W praktyce często przeprowadza się wstępne badania eksperymentalne tzw. eksperymenty czynnikowe, które mają na celu zbadanie wpływu poszczególnych czynników lub zmiennych na badany proces. Najczęściej stosowana jest forma zapisu objaśniona w pracy Barnetta[2], oparta na ogólnej metodzie Boxa-Wilsona. Ogólna liczba doświadczeń N nie powinna być mniejsza od m^n gdzie: m = liczba poziomów ze zmieniającymi się czynnikami, n = liczba czynników.
Oczywiście konieczne jest dokonanie szacunków statystycznych wiarygodności tego, że obserwowane zmiany na wyjściu są wynikiem wpływu zmieniających się czynników, a nie przeszkód przypadkowych. Wielkość zmiany wyjścia np. Y można ocenić przez wielkość błędu ε lub wielkość przedziału ufności $(Y+\varepsilon\ ,\ Y—E)$.

Dla przypadku $Y<\varepsilon$ wynik jest wiarygodny (istotny). Ponieważ ε jest wielkością losową, to dla jej określenia należy posługiwać się prawem rozdziału tej wielkości $f(p)$ i konkretną wartością argumentu p, który nazywa się prawdopodobieństwem dokonanego szacunku losowego błędu ε. Przyjmuje się na ogół, że Y posiada rozkład normalny. Wówczas ε charakteryzuje się rozkładem Studenta. Przyjmuje się przy tym określoną wartość p, np. 0,95, lub inaczej 95% ufności. Wówczas błąd prawdopodobny określa się jako

$$\varepsilon=t\sqrt{\frac{D}{K}}$$

gdzie:

t = wielkość posiadająca rozkład Studenta,
k = liczba obserwacji (liczba cykli),
D = dyspersja mierzonej wielkości.

[2] E. H. Barnett, *Introduction to Evolutionary Operation,* IEC 1960, nr 6.

Wielkość t zależy od liczby stopni swobody k' oraz p, i jest określona przy pomocy tablic statystycznych.

Za pomocą omówionego kryterium można ocenić istotność wpływu na siebie badanych zmiennych, oddzielić efekty nieistotne oraz wnieść korekty do macierzy zależności.

Opis ciągłych i impulsowych systemów z niezmiennymi związkami. Prowadzenie ciągłych systemów (np. wytwórczych) z uśrednionymi parametrami, opisuje się w ogólnym przypadku za pomocą zwykłych równań różniczkowych, które są jedną z form przedstawienia algorytmu prowadzenia danego dynamicznego systemu.

Oznaczając wejściową (zmieniającą się, niezależną) zmienną przez $\mu_{(t)}$ zaś wyjściową (zależną) zmienną przez $\varphi_{(t)}$ oraz dodatkowo operator przetwarzania sygnału $\mu_{(t)}$ w sygnał $\varphi_{(t)}$ przez F, zapisuje się algorytm przetwarzania informacji w tym systemie, w postaci operatorowej:

$$\mu F = \varphi .$$

Kolejnemu połączeniu dwóch systemów z operatorami F_1 oraz F_2 odpowiada zapis

$$\mu_1 F_1 F_2 = \varphi_2$$

oznaczający, że informacja μ_1, podlega opracowaniu według algorytmu F_1 a następnie otrzymany wynik, opracowuje się według F_2 w wyjściową informację φ_2.

Przedstawiony zapis można również rozpatrywać jako symboliczny ekwiwalent strukturalnego schematu systemu, zestawionego z elementów μ_i, Fi oraz φ_i.

Przez μ można rozumieć nie tylko sygnał lecz także operator (algorytm) i następnie wprowadzić pojęcie operatora przekształcenia operatorów. Znanym przykładem tego jest operator Laplace'a L przekształcający funkcję zmiennej rzeczywistej t, w funkcję kompleksowej zmiennej p:

$$\varphi(t)L = w(p) = \int_0^\infty w(t)\, e^{tp} dt .$$

Zastosowanie operatora Laplace'a do algorytmu prowadzenia dynamicznego systemu wyrażonego równaniem:

$$\varphi(t) = \int_0^\infty w(\tau)\mu(t-\tau) d\tau$$

przekształca go w równoważne równanie algebraiczne

$$\varphi(p) = w(p)\mu(p) .$$

W celu opisu cech strukturalnych liniowych, ciągłych obiektów, można zbudować systemem algebraicznych przekształceń na podstawie wyżej wprowadzonej symboliki.

Aparat matematyczny opisu liniowych, impulsowych systemów jest analogiczny z aparatem dla systemów ciągłych. Interesujące omówienie podobieństw tych systemów można znaleźć w pracy Cypkina [3]. W oparciu o te podobieństwa można zastosować algebrę operatorów również w systemach impulsowych.

Dodając operatory i kwantowania przekształcające ciągły sygnał $\mu_{(t)}$, w impulsyjny $\mu_{(n)}$ i na odwrót, można wprowadzić algebrę operatorów odpowiednią dla systemów kombinowanych impulsyjno-ciągłych.

Rachunek operatorowy nie jest stosowany wszędzie w omawianym zakresie, bowiem nie zawsze tworzy system uniwersalny, czy też najwygodniejszy. Np. do matematycznego opisu procesów produkcyjnych przy uruchamianiu i zatrzymywaniu agregatów i maszyn, przy przełączaniu wewnętrznych powiązań itp., wygodny jest aparat logiki matematycznej (dwuwartościowej). Należy zaznaczyć, że funkcje dwójkowych zmiennych również można rozpatrywać jako operatory.

Budowa modelu teoretycznego. Metody otrzymywania matematycznego opisu złożonych obiektów (np. przemysłowych) można podzielić na teoretyczne i eksperymentalne. Podział ten jest umowny, ponieważ analizy teoretyczne i eksperymentalne są wzajemnie powiązane. Teoretyczne wywody wymagają eksperymentalnego sprawdzenia, a eksperyment nie może być zaplanowany i opracowany bez odpowiednich teoretycznych założeń.

Jeżeli istnieje możliwość eksperymentowania z obiektem, lub jego fizycznym modelem, to maksymalne wykorzystanie wstępnych informacji c obiekcie i w skrajnym przypadku jakościowa analiza teoretyczna, znacznie ułatwiają eksperyment i zwiększają cenność końcowych wyników.

Badanie teoretyczne jest zazwyczaj trudne, jednak w niektórych przypadkach ta droga jest jedynie możliwa np. przy projektowaniu nowych obiektów.

Badanie teoretyczne opiera się na ogólnych prawach właściwych dla danego zakresu fizycznych zjawisk. Te prawa w istocie jednak przedstawiają doświadczenia nagromadzone wcześniej przy innych badaniach analogicznych systemów.

Najczęściej wykorzystuje się: prawa Kirchhoffa (w elektrotechnice), reguły Dalamberta (w mechanice), równania kinetyki reakcji chemicznych, równania bilansu energetycznego, równania zachowania materii, oparte na ogólnych prawach zachowania masy i energii itp. Przy bezpośrednim stosowaniu ogólnych praw konieczne jest odrębne podejście do każdego konkretnego przypadku. Jeśli jednak badaczowi lepiej jest znana dana dziedzina czy dział od innych, to doświadczenia można przenosić i wykorzystywać.

[3] J. Z. Cypkin, *Tieoria impulsnych systiem,* Moskwa 1958.

Pewne systematyczne metody tego rodzaju są oparte na teorii podobieństw [4].

Analiza cech strukturalnych. W teorii automatycznego regulowania, pod pojęciem analiza strukturalna rozumie się badanie pewnych cech ogólnych obiektu czy systemu według znanych cech oddzielnych elementów, których operatory są dane w ogólnej postaci np.: analiza stabilności strukturalnej (trwałość); analiza aperiodyczności (fluktuacji) itp.

Praktyczna potrzeba takiej analizy, wynika przy badaniu złożonych procesów wytwórczych rozpatrywanych łącznie z regulatorami, technologicznymi sprzężeniami zwrotnymi itp., dlatego niezbędne jest opracowanie maszynowych algorytmów analizy strukturalnej.

Po ogólnym zapoznaniu się ze strukturą i fizyczno-technologicznymi charakterystykami procesu należy dokonać przeglądu danych ekonomicznych.

Dane ekonomiczne. Należą do nich:

1. produkcyjność (projektowana, planowana, rzeczywiście osiągnięta, dzienna, miesięczna itp.),
2. koszt własny (kalkulacja kosztów własnych produkcji ogółem i oddzielnych etapów procesu wytwórczego),
3. wskaźniki jakości (stopień zgodności z normami, gatunek, trwałość niezawodność),
4. rytmiczność (średnie odchylenie rzeczywistego wykonania planu w pewnym odcinku czasu w stosunku do zadań planowanych),
5. współczynniki wykorzystania wyposażenia w sprzęt, narzędzia, maszyny. Tu często stosuje się współczynniki wykorzystania maszyn, nakładu kapitału na jednostkę mocy, wielkość produkcji przypadającą na jednostkę powierzchni produkcyjnej, liczbę i długotrwałość awarii, czas remontów maszyn i narzędzi itp.

Do oceny wartości wymienionych danych ekonomicznych stosuje się różnego rodzaju kryteria optymalizacji procesu, które zostaną omówione w odrębnym opracowaniu.

Zestaw programów analizy statystycznej. Jeśli przeanalizuje się algorytmy stosowane w analizie statystycznej, to łatwo jest wykazać podobieństwo, a często i tożsamość znacznej liczby odrębnych podalgorytmów. Często rozwiązanie zadań analizy, formalnie pokrywa się z rozwiązaniem zadań syntezy. Obliczanie sum iloczynów, średnich, odchyleń od średnich, jest potrzebne w analizach wariancji i regresji, przy obliczaniu funkcji korelacyjnych itp.

Dlatego zamiast zestawu podprogramów odpowiadających odrębnie analizie regresji, analizie czynnikowej itp. można dla tych samych zadań

[4] Por. J. M. Tetelbaum, *Elektriczeskoje modielirowanije,* Moskwa 1959.

ułożyć system podprogramów odpowiadających np. obliczaniu sum iloczynów, odwracaniu macierzy, mnożeniu macierzy przez wektor itp.

Ponieważ ze względu na ograniczoną pojemność pamięci maszyny sterującej, nie udaje się zbudować uniwersalnego programu, to każdy podprogram przewiduje się dla pewnych typowych przypadków np. dla liczby zmiennych $n \leq 15$, i dla $n > 15$, dla stałego i zmiennego przecinka, podwójnej i połowicznej dokładności przedstawiania liczb itp.

Jeden z możliwych zestawów programów analizy statystycznej procesów wytwórczych średniej złożoności dla małej maszyny stałoprzecinkowej, ma następującą postać:

1. Ogólne programy:

A = odwracanie macierzy (np. metodą głównych elementów) dla ≤ 15,
B = mnożenie macierzy przez wektor,
C = obliczanie sum parzystych iloczynów,
D = obliczanie średnich i odchyleń od średnich,
E = obliczanie dyspersji,
F = obliczanie według wzorów rekurencyjnych

$$\varphi_{[n]} = \sum_{i=0}^{k} a_i x_i[n],$$

$$x_i[n] = e^{-b}/x_i[n-1] + c_i^1 x_{i-1}[n-1] + \ldots$$

$$\ldots\ldots + c_i^j x_j x_i[n-1] + \ldots\ldots x_0[n-1],$$

$$c_i^j = \frac{i(i-1)\ldots\ldots(i-j+1)}{j!}$$ dla $k \leqslant 7$ i dwóch zmiennych μ_i.

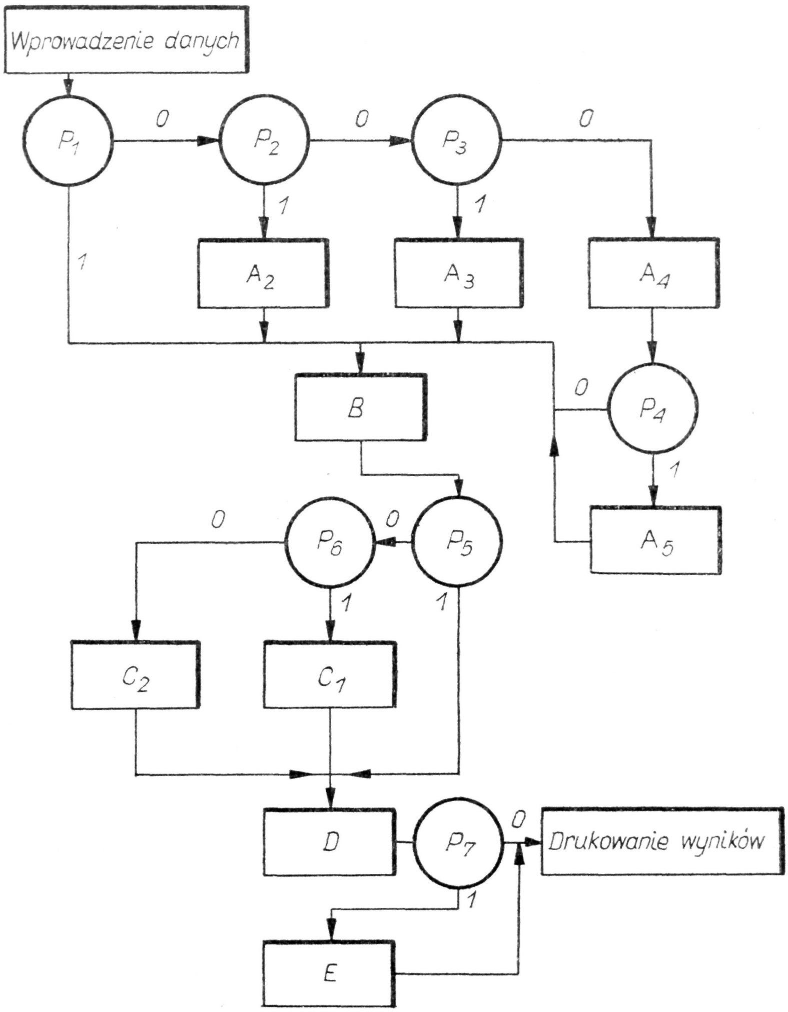
2. Indywidualne programy:

G = obliczanie współczynników szeregu Fourie,
H = obliczanie funkcji korelacyjnych gęstości widmowych,
I = przygotowanie danych dla analizy czynnikowej,
J = nieliniowa analiza dynamiczna.

3. Programy pomocnicze:

K = program interpretacyjny dla obliczeń ze zmiennym przecina kiem,
L = przekład liczb z systemu dwójkowego na dziesiętny,
M = przekład liczb z systemu dziesiętnego na dwójkowy,
N = obliczanie współczynników dwumianu Newtona,
O = obliczanie funkcji trygonometrycznych itd.

P r o g r a m ASTA. W systemie ASTA przeznaczonym dla maszyn analizujących lub sterujących, zestaw podprogramów jest ujednolicony w jeden program przewidziany na dostatecznie szeroką klasę zadań, które zdarzają się w określonych przedsiębiorstwach. Posiada on strukturę przedstawioną na rycinie.



Ryc. 1. Algorytm statystyczny analizy ASTA

P_1 — analiza statyczna?
$P_2=P_5=P_7$ — uogólniona analiza harmoniczna?
A_2 — przygotowanie obliczenia współczynników szeregu Fourie
$P_3=P_6$ — analiza wariancji (analiza czynnikowa)?
A_3 — przygotowanie danych do analizy wariancji (analizy czynnikowej),
A_4 — dynamiczna analiza regresji?
P_4 — nieliniowa dynamiczna analiza?
A_5 — obliczanie nieliniowej dynamicznej regresji,
B — podprogram obliczania sum iloczynów,
C_1 — odwracanie macierzy równań normalnych,
C_2 — obliczanie dyspersji,
D — ocena istotności wyników,
E — obliczanie widmowej gęstości funkcji korelacyjnej,
1 — tak, 0 — nie.

Ponieważ często maszyna sterująca jest bezpośrednio związana z obiektem, to można wykorzystywać metody zmniejszenia objętości pamięci np. przez program określania dynamicznych charakterystyk zestawiony następująco:

1. wprowadzanie danych (n wartości każdej zmiennej) oraz obliczenie $\sum x_{ij}$, $\sum x_{ij} \cdot x_{ij}$, $\sum x_{ij}\varphi$ (nie więcej niż k^2 wartości),

2. powtarzanie pkt. 1 do otrzymania dostatecznej informacji (N+M wartości),

3. odwracanie macierzy układu równań normalnych i rozwiązywanie układu. Ocena istotności i drukowanie wyników.

Celem zmniejszenia objętości pamięci zajmowanej przez program wprowadza się ponadto podprogram interpretacyjny.

System ASTA obejmuje również algorytmy podstawowych metod uproszczenia analitycznych wyrażeń, takich jak: 1. linearyzacja i aproksymacja, 2. nieliniowa aproksymacja, 3. interpolacja funkcyjna, 4. interpolacja średniokwadratowa, 5. statystyczna linearyzacja i nieliniowa interpolacja, 6. odsiewanie nieistotnych zmiennych, 7. minimalizacja liczby parametrów analitycznych wyrażeń i inne.

Funkcje maszyn sterujących. Maszyny sterujące procesami w systemach pełnej automatyzacji, po otrzymaniu z różnego rodzaju czujników, mierników itp. informacji przetworzonych w programie ASTA, mogą spełniać następujące funkcje:

1. określanie i podtrzymywanie optymalnego stanu procesu według wybranego kryterium sterowania,

2. precyzowanie i korygowanie algorytmu sterowania na podstawie doświadczeń z poprzedniej pracy układu,

3. określanie optymalnego czasu trwania poszczególnych cykli procesów, jak również wskazanych momentów przełączania agregatów z jednego stanu pracy na inny, odstawiania agregatów do remontu itp.,

4. sterowanie rozruchem i odłączaniem agregatów oraz sterowanie procesem przy niedopuszczalnych naruszeniach warunków technologicznych,

5. sygnalizowanie i rejestrowanie parametrów procesu przekraczających dopuszczalne granice,

6. rejestracja parametrów,

7. obliczanie i rejestrowanie bieżących i uśrednionych wskaźników technicznych i ekonomicznych np. koszt własny produkcji, wydajność, bilans cieplny i materiałowy itp.,

8. opracowanie poleceń dotyczących optymalizacji administracyjnego kierowania produkcją,

9. planowanie bieżące (operatywne),

10. bieżące i wynikowe bilansowanie produkcji, surowców, energii, pracy itp.,

11. okresowe wzorcowanie przyrządów pomiarowych, analizatorów składu chemicznego, innej aparatury,

12. kontrola słuszności opracowywanych poleceń, kontrola sprawności samej maszyny i całego systemu zbierania informacji,

13. przeprowadzanie różnych obliczeń technicznych nie związanych bezpośrednio ze sterowanym procesem.

System ASTA, jak widać obejmuje szeroką klasę zagadnień i jest dość uniwersalny, dlatego też zasługuje na szersze omówienie oraz wprowadzenie do użytku.

THE UNIFORM PROGRAM OF ASTA STATISTICAL ANALYSIS IN THE STEERING OF INDUSTRIAL PROCESSES ON ELECTRONIC COMPUTERS

Summary

The paper presents an exemplary scheme of the uniform program of ASTA statistical analysis. It may be applied in the investigation of productive processes steered by means of modern computers.

The paper deals with basic terms and describes such aspects as: 1. the productive process, 2. information, 3. the scheme of control and steering, 4. the description of continuous and impulsive systems, 5. the structure of the theoretical model, 6. the analysis of structural features, 7. economic data, 8. the program of statistical analysis.

The last paragraph of the paper includes the scheme (with a diagram and description) of the ASTA universal program embracing a wide range of problems connected with the steering and control of productive processes.