

Inženjersko projektovanje

Prof. dr Darko Bajić
Mašinski fakultet Podgorica
darko@ucg.ac.me

METODE METODIČKOG KONSTRUISANJA

- ▼ Zwicky metoda ili metoda morfološke kutije,
- ▼ Metoda "matrice otkrića" (Males),
- ▼ Hansenova metoda sistematike konstruisanja,
- ▼ Hansenova metoda sistematike konstruisanja,
- ▼ Algoritam za rešavanje naučnih zadataka (Aris),
- ▼ Metoda sistematske heuristike (Müller),
- ▼ Metoda postepenog prilaznja rešenju zadatka, (Fraser),
- ▼ Metode funkcionalnog pronalaženja (Jones),
- ▼ Integraciona metoda (Metra),
- ▼ Rodenackerovo metodičko konstruisanje,
- ▼ Rothov algoritamski postupak za konstruisanje pomoću kataloga,
- ▼ Kollerova algoritamsko-fizikalno orijentisana metoda konstruisanja,
- ▼ Ujedinjena heuristička metoda,
- ▼ Kesselringova konstruktivna metoda,
- ▼ Metoda konstruisanja i teorija sistema

Zwicky metoda ili metoda morfološke kutije

- Metoda morfološke kutije objavljena je 1942. godine. Zwicky ju je primjenio u Americi u ranoj fazi raketnog istraživanja i razvoja. Na temelju ove metode došlo se do mnogih tehničkih rešenja u gradnji raketa. Neke od tih ideja kasnije su i realizovane.
- Metoda morfološke kutije jedna je od mnogih koje je objavio Zwicky, a koja se najviše koristi.
- Osnova ove metode leži u sistematskom traženju svih uopšte mogućih varijanti koje proizilaze iz zakonitosti morfološke razrade obrađivanog objekta.

(morfologija = nauka o postanku i razvitku oblika: organskih tijela, Zemljine kore, riječi)

Prva etapa

- Problem (zadatak) koji treba riješiti **mora biti tačno i precizno formulisan**. Pri tome treba proučavati morfološki karakter svih vrsta npr. ugiba motornih postrojenja, sredstava transporta, pumpi itd. Ukoliko je u pitanju konkretni uređaj ili neki sistem, traženje rešenja prema ovoj metodi proteže se odmah na sve moguće uređaje i sisteme i kao rezultat daje neki uopšteni odgovor.

Druga etapa

- Moraju biti obuhvaćene sve važnije funkcije objekta i parametara od kojih zavisi rešenje problema. Tačna formulacija zadatka, odnosno u spomenutom slučaju uređaja, omogućuje da se o glavnim funkcijama ili parametrima zaključuje, što olakšava traženje novih rešenja.

Treća etapa

- Moguće varijante svake funkcije razrađuju se pomoću matrice (morfološke karte ili kutije). Svaka funkcija P_j raspolaže određenim brojem k_j različitih nezavisnih svojstava (parametara) $P_j^1, P_j^2, P_j^3, \dots, P_j^{k_j}$.
- Ako je u svakom redu matrice definiran jedan od elemenata, diferencijalni elementi svih redova matrice omogućuju jednu moguću varijantu rešenja zadatka. Ako se prikazanim sistemom matrice koristimo za izgradnju n -dimenzionalnog prostora, dobijamo morfološku kutiju.
- U tom slučaju ukupan broj mogućih rešenja je:

$$N = \prod_{j=1}^n k_j$$

- Posebno je važno da se do ovog trenutka ne istražuje vrijednost jednog ili drugog rešenja. Tek kada su sva rešenja utvrđena, pojedine varijante mogu biti podvrgnute nekom sistemu kriterijuma upoređivanja.

Četvrta etapa

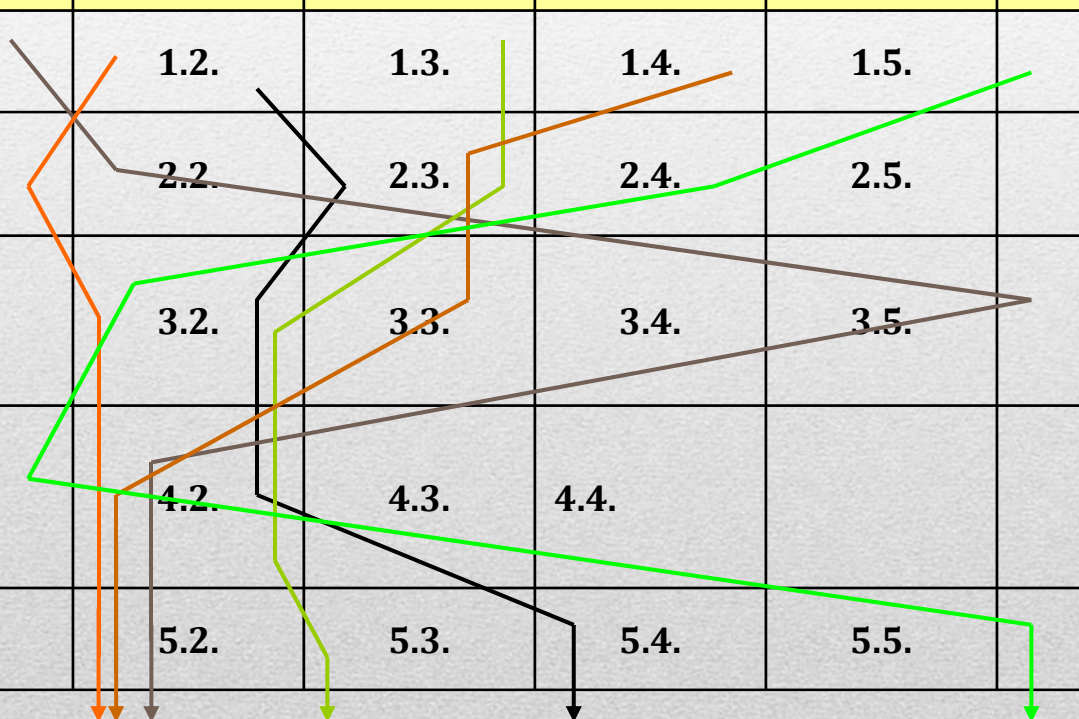
- Nakon utvrđivanja funkcionalne vrijednosti svih postignutih rešenja, nastupa glavna etapa metode morfološke kutije. Da se ne bi dezorjentisali u velikom broju varijanti i pojedinosti, funkcije se moraju vrednovati na univerzalan i po mogućnosti pojednostavljen način.

Peta etapa

- Konačno, varijantu čini izbor odgovarajućeg najpovoljnijeg rešenja.
- Ova metoda omogućava sistematski pregled svih mogućih rešenja nekog problema, usmjerava mišljenje u pravcu koji omogućava da se dobiju informacije i kombinacije koje kod nesistematskog intuitivnog načina mišljenja ne bi mogle biti uočene.
- Morfološka metoda je najpogodnija za primjenu kod opštih konstruktivnih zadataka, kod projektovanja mašina i traženja rešenja oblikovanja i šema spajanja. Ona isto tako omogućava prognoziranje razvoja TS.

- Zwicky je među prvima morfološku metodu primijenio na tehničke probleme.
- Pomoćno sredstvo za primjenu morfološke metode predstavlja Zwickyjeva morfološka kutija.

Parcijalne funkcije	Izvršioци (nosioci parcijalnih funkcija)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1.1.	1.2.	1.3.	1.4.	1.5.	1.6.	1.7.
2	2.1.	2.2.	2.3.	2.4.	2.5.		
3	3.1.	3.2.	3.3.	3.4.	3.5.	3.6.	
4	4.1.	4.2.	4.3.	4.4.			
5	5.1.	5.2.	5.3.	5.4.	5.5.	5.6.	5.7.



- Izrada morfološke kutije zahtijeva tačnu analizu problema, apstrakciju, razradu ukupne funkcije, funkcionalne strukture s većim brojem parcijalnih funkcija.
- **Parcijalne funkcije postavljaju se vertikalno u morfološkoj kutiji.**
- **Horizontalno se daju** moguća rešenja za pojedine parcijalne funkcije, **odnosno nosioce parcijalnih funkcija ili principi rešenja.**
- Kombinacijom parcijalnih rešenja dobijamo različita moguća rešenja sadržana u morfološkoj kutiji.
- Ukupan teoretski mogući broj rešenja iznosi:

$$Z = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_k$$


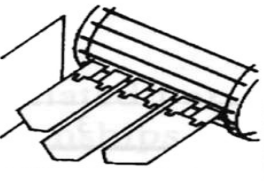
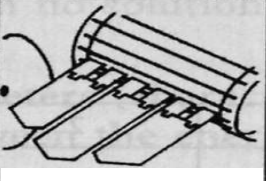
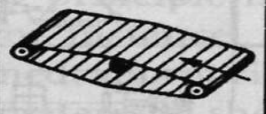
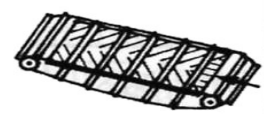


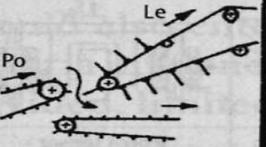
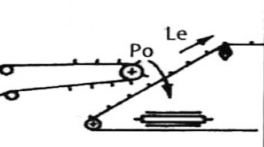
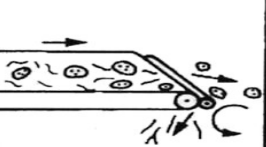
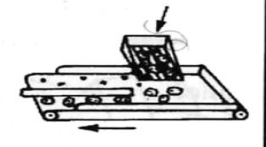
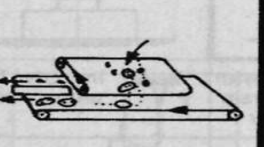


gdje $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k$ predstavljaju broj nosilaca funkcija za 1, 2, 3 ... k-tu funkciju.

- Veliki broj kombinacija otežava izbor optimalnog rešenja, jer sva rešenja moraju biti vrednovana prema određenoj shemi.
- **Za izradu morfološke kutije potrebno je:**
 - ❖ utvrđivanje glavne funkcije,
 - ❖ raščlanjivanje glavne funkcije na parcijalne funkcije i
 - ❖ spajanje pojedinih rešenja po sistemu snošljivosti.

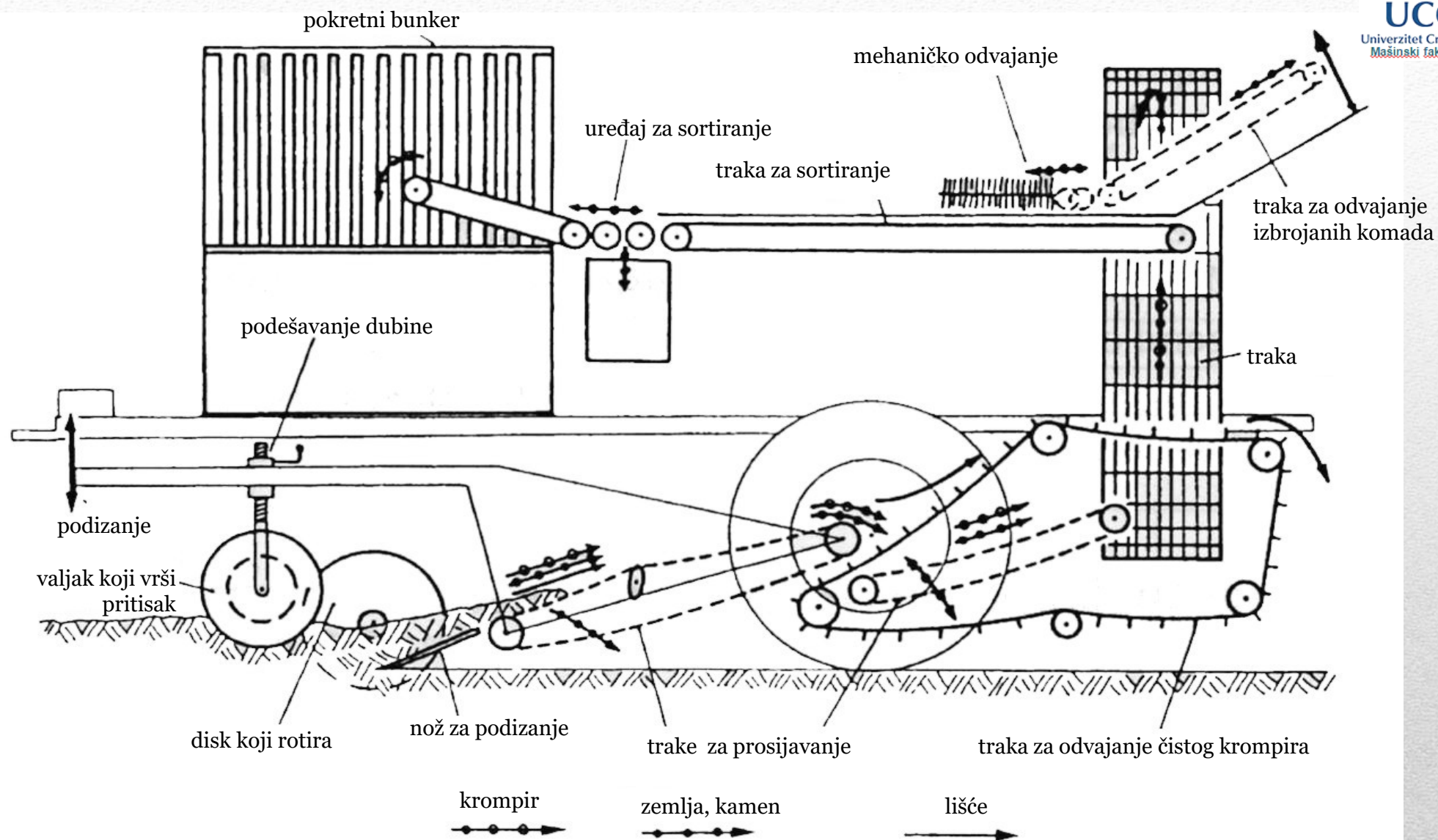
- Između tri navedena koraka rešavanja morfološke kutije, najvažniji je svakako onaj koji govori o tome koji su elementi rešenja ili principi rešenja međusobno snošljivi, što znači **da se mogu međusobno kombinovati**.
- Teoretski moguća širina polja mora se, prema tome, sužavati na onu širinu koja se može realizovati.
- Osim navedenog odbacivanja, traženje rešenja obuhvata još jedan važan zadatak:
 - **odbacivanje neprikladnih principa rešenja ili elemenata.**
- Preporučuje se da se najprije započne s izbacivanjem neprikladnih rešenja. Time se dobija a'_1 a'_2 ... a'_k mogućih rešenja, tzv. **redukcionio polje mogućih rešenja**.
- Ovaj zadatak će sigurno biti olakšan ako konstruktor u redove matrice unosi **ne samo verbalno objašnjenje predloženog rešenja**, već i ako **ucrta principijelne skice predloženog rešenja**. Nekad može biti korisno prije konačne razrade morfološke kutije rasporediti predložena parcijalna rešenja, odnosno nosioce funkcija u tzv. gruboj šemi.
- "Morfološko raščlanjivanje", kako zovemo takvu grubu šemu, predviđa da se slične parcijalne funkcije, za koje pod određenim uslovima dolaze u obzir ista principijelna rešenja, poredaju **ne po redosledu određenom funkcionalnom strukturuom, već po redosledu nosilaca funkcija**.
- Na taj način omogućeno je lakše prepoznavanje onih nosilaca funkcija koji mogu izvršavati veći broj parcijalnih funkcija i time omogućiti racionalnija rešenja. Za izbor odgovarajućih kombinacija povoljno je ako se za ovakvu grubu matricu analiziraju i unesu prednosti i nedostaci.

- Konstrukcijske faze pronalaženja funkcije, obrada principa, oblikovanje, zahtijevaju u svakoj fazi pri rešavanju zadatka različite informacije. Informacije se pretežno odnose na funkcionalni princip, radni princip, princip oblikovanja, uključujući sve karakteristične podatke nosioca funkcije.
- Za izvršenje pojedine funkcije dolaze u obzir veći broj funkcionalnih principa, principa rada i oblikovanja. Sve ovo omogućuje veći broj alternativnih principa rešenja za pojedinu funkciju. Konstruktor mora iz većeg broja nosilaca funkcija pronaći one koje najbolje odgovaraju njegovim zahtjevima.
- Budući da sistem mora imati numeričku osnovu, može se pristup traženom nosiocu funkcije ostvariti:
 - manuelno pomoću kataloga nosioca funkcija,
 - elektronski računaram i
 - preko ekrana na osnovu memorije mikrofilmova.
- Popunjavanje morfološke kutije, tj. dodjeljivanje alternativno mogućih nosilaca funkcije svakoj parcijalnoj funkciji je veoma važan korak.
- Pri dodjeljivanju nosilaca funkcije parcijalnim funkcijama potrebno je paziti da se međusobno kombinuju oni elementi rešenja koji su međusobno snošljivi.
- Mogućnost kontrole snošljivosti raste proporcionalno sa stepenom konkretizacije.

- Svaki nosilac funkcije predstavlja već sam za sebe komplikovan parcijalni sistem.
- Za olakšano traženje optimalne kombinacije za svaki princip rešenja vrši se vrednovanje prema VDI 2225 i utvrđenje tehničke i ekonomske dobrote i faktor veličine značaja koji određuje značaj svake parcijalne funkcije prema ukupnoj funkciji.
- *Nakon popunjavanja morfološke kutije, može se započeti sa kombinovanjem nosilaca funkcija.*
- Da bi se dobila rešenja mora doći do koraka kombinovanja. Dobijena rešenja daju ukupan broj
$$Z = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_k$$
- gdje $a_1, a_2, a_3 \dots, a_k$ predstavljaju broj nosilaca funkcija za 1, 2, 3, ..., k-tu parcijalnu funkciju.
- Glavni problem s kombinatornim tehnikama je obezbeđenje fizičke i geometrijske kompatibilnosti načela rada što osigurava neometan protok energije, materijala i signala.
- Drugi problem je izbor tehnički i ekonomski povoljnog rešenja u prostoru velikog broja teorijski mogućih kombinacija.
- Budući da morfološka kutija prema broju parcijalnih funkcija i njegovih nosilaca može dati hiljadu i više principijelnih rešenja, ovaj korak zahtijeva mnogo rada. Osim toga, velikim brojem rešenja otežan je izbor optimalnog rešenja.
- Da bi se postupak morfološke sinteze mogao primijeniti, pojedini koraci moraju biti automatizovani. Budući da je riječ o procesu kombinovanja s manuelnim matematičkim postupkom, posao se može prepustiti računaru. Istovremeno je potrebno odabrati odgovarajući program postupka izbora pomoću kojeg bi već sam računar isključivao neodgovarajuća rešenja, tako da samo manji broj kombinacija bude prihvaćen.

Nosioc funkcije / Parcijalna funkcija		1	2	3	4	...
		1	Podizanje			
2	prosjijavanje	 remenom	 Mrežom	 bubnjem	 točkom	...
3	Odvajanje lišća			
4	Odvajanje kamenja					...
5	Sortiranje krompira	Ručno	Mašinski	Kontrola veličine napravom	Kontrola mase vaganjem	...
6	skupljanje	Pokretni magacin	Konvejer	Mehanizam za punjenje džakova

↓
Kombinacija principa
VARIJANTNO REŠENJE



Tablica za utvrđivanje tehničke dobrote

Tehnički utucajni faktori	WG	rešenja					
		Idealno		A		B	
		EG	WF	EG	WF	EG	WF
Broj obrtaja	3	3	9	2	6		
Max snaga	3	3	9	2	6		
-----	2	2	4	1	2		
-----	1	1	1	1	1		
	Σ	23		15			
	XT%	100		$(=15/23*100)$ 65,22			

WG – stepen značaja

EG – stepen ispunjenja

WF – faktor dobrote = $WG*EG$

Tablica za utvrđivanje ekonomske dobrote

Ekonomski utucajni faktori	WG	rešenja					
		Idealno		A		B	
		EG	WF	EG	WF	EG	WF
Troškovi razvoja	3	3	9	2	6		
Troškovi plasmana	3	3	9	3	9		
Troškovi montaže	2	2	4	2	4		
-----	3	3	9	1	3		
	Σ	31		22			
	YE%	100		(=22/31*100) 70,97			

WG – stepen značaja

EG – stepen ispunjenja

WF – faktor dobrote = $WG \cdot EG$

- Konstruktor pri ocjeni koristi samo one uticajne faktore **za koje može dati siguran sud (ocjenu)**.
- Uticajne veličine koje moraju bezuslovno biti ispunjene imaju stepen značaja – WG=3
- Uticajne veličine koje mogu biti ispunjene ako je moguće, ali ne i bezuslovno bez kompromisa imaju stepen značaja – WG=2
- Uticajne veličine čije izvršenje diktira ekonomska opravdanost imaju stepen značaja – WG=1

Utvrđivanje faktora dobrote

Stepen značaja - WG		3	2	1
		Najveći zahtjev	Najmanji zahtjev	Željeni zahtjev
Bodovna vrijednost - Wi				
3	Vrlo dobro	WF=9	WF=6	WF=3
2	Dobro	WF=6	WF=4	WF=2
1	Za nužnu upotrebu	WF=3	WF=2	WF=1
0	Neupotrebljivo	WF=0	WF=0	WF=0

- Varijante rešenja s faktorom dobrote $WF=0$ isključuju se iz morfološke kutije ili se prerađuju.
- Ukupna tehnička dobrota XT , ekonomska dobrota YE za svaku kombinaciju može se dobiti iz dobrota sadržanih u dobrotama funkcionalnih jedinica nižih stepena. Uzimanjem u obzir vaganog faktora veličine G koji može imati vrijednosti od 0 do 10 dobija se:

$$XT_z = \frac{\sum_{i=1}^k T_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^k G_i}$$

$$YE_z = \frac{\sum_{i=1}^k E_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^k G_i}$$

- Ukupna dobrota rešenja X_z predstavlja vezu tehničke (XT) i ekonomske dobrota (YE). Postoji veći broj modela ove veze, a najčešće korišćeni su:
 - ukupna dobrota određena na osnovu linearnog postupka

$$X_z = \frac{XT_{uk} + YE_{uk}}{2}$$

- ukupna dobrota određena na osnovu postupka kružnog luka.

$$X_z = \sqrt{\frac{(XT_{uk} \cdot 10)^2 + (YE_{uk} \cdot 10)^2}{2}}$$

- ukupna dobrota određena na osnovu postupka hiperbole

$$X_z = \sqrt{XT_{uk} \cdot YE_{uk}}$$

- Dobile vrijednosti se unose u S-dijagram. Za mali broj rešenja, vizuelno se vrši pregled S-dijagrama i izbor povoljnog rešenja.

Kesselringova konstruktivna metoda

- Kesselringova metoda dala je osnovu VDI-smjernice 2225.
- Kesselringovih pet principa projektovanja glasi:
 - princip minimalnih troškova izrade (jeftina konstrukcija),
 - princip minimalnog prostora,
 - princip minimalne težine (laka gradnja),
 - princip lakog rukovanja i
 - princip najmanjih gubitaka.
- Iz navedenih tehnički i ekonomski opravdanih zahtjeva projektovanja razvijene su dvije metode:
 - projektovanje na principu konvergentnog postupka približavanja,
 - projektovanje pomoću matematičkih metoda.
- Osnovu Kesselringova postupka predstavlja vrednovanje razrađenih varijanti projekta pomoću tehničkih svojstava.
- Osnovu ekonomskog vrednovanja čine troškovi.
- Za ocjenu uspješnosti konstrukcije uzima se tehnička i ekonomska dobrota (vrijednost).

- Za ocjenu tehničke dobrote koristi se bodovanje. Za to se uzima neka uporedna veličina konstrukcije koja je ostvarila sve relevantna svojstva - idealno rešenje.
- Konstrukcije koje treba ocijeniti upoređuju se s idealnim rešenjem. Svako svojstvo koje se približava idealnom ocjenjuje se određenom količinom bodova. Zbir bodova za sva ocijenjena svojstva stavlja se u odnos prema zbiru svojstava idealnog rešenja. Rezultat daje tehničku dobrotu.
- Za ekonomsko vrednovanje služe troškovi proizvodnje odabrane konstruktivne varijante. Ekonomsku dobrotu predstavlja odnos idealnih troškova proizvodnje prema stvarnim troškovima proizvodnje.
- Za uporedno vrednovanje konstrukcije predviđa se tzv. **S-dijagram**.
- U S-dijagram unosi se na apcisu tehnička dobrotu, a na ordinatu ekonomska dobrotu. Prema položaju konstrukcije u takvom dijagramu (S-tačke) mogu se izvući mjere potrebne za poboljšanje rešenja konstrukcije.
- Velika prednost ove metode konstruisanja je u postojanju odgovarajućeg softvera.

Izbor optimalne varijante

Ocjena tehničke dobrote

$$X_i = \frac{\sum_{j=1}^n k_j p_j}{\sum_{j=1}^n k_j p_{\max}}$$

Ocjene > 0.8 vrlo dobra konceptijska varijanta.
Ocjene > 0.7 grupa dobrih konceptijskih varijanti.
Ocjene < 0.6 nezadovoljavajuća konceptijska varijanta.

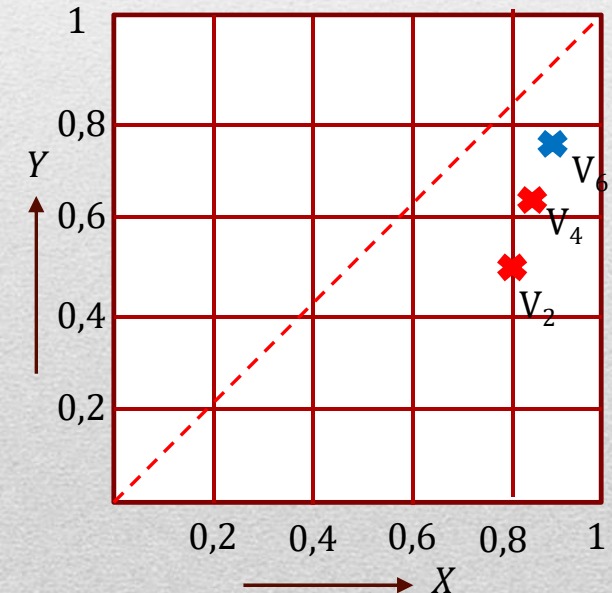
- broj k_j različitih nezavisnih svojstava (parametara) p_j

Ocjena ekonomske dobrote

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^n k_j p_j}{\sum_{j=1}^n k_j p_{\max}}$$

Tehnička ograničenja	V2	V4	V6	Idealno rešenje
Kapacitet	1	3	3	4
Produktivnost	3	3	4	4
Preciznost	4	4	3	4
Pouzdanost	4	4	4	4
Rukovanje	4	3	4	4
Zbir	16	17	18	20
Koordinata X	0.8	0.85	0.9	1

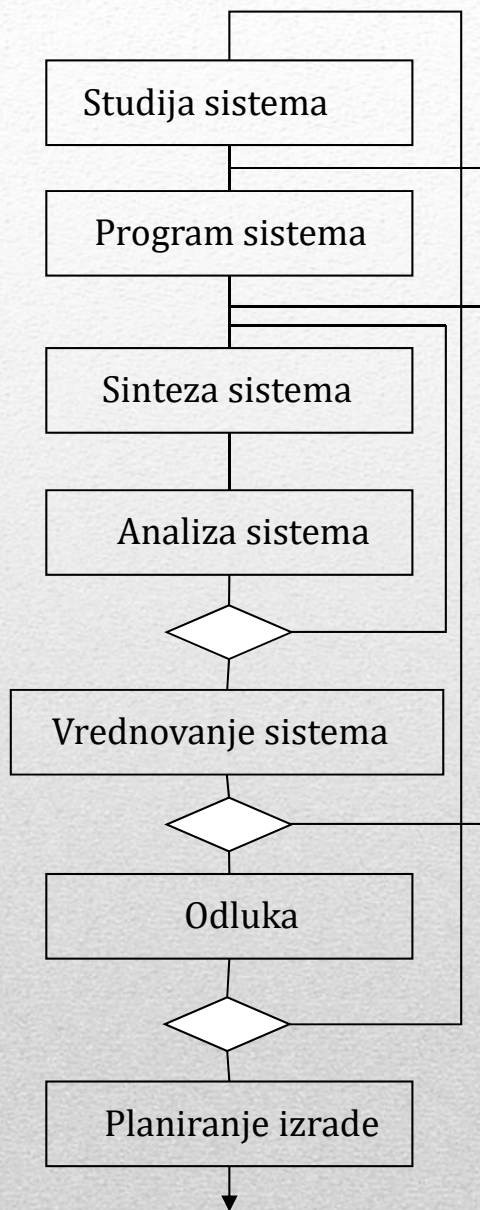
Ekonomska ograničenja	V2	V4	V6	Idealno rešenje
Broj dijelova	2	2	3	4
Složenost	2	3	3	4
Složenost montaže	2	3	3	4
Zbir	6	8	9	12
Koordinata Y	0.5	0.66	0.75	1



Metoda konstruisanja i teorija sistema

- Teorija sistema kao interdisciplinarna nauka omogućuje primjenu metoda, postupaka i pomoćnih metoda za analizu, planiranje, izbor optimalnog oblikovanja kompleksnih sistema.
- Beitz temelji sistematski postupak na opštem saznanju da se kompleksni zadatak može riješiti pomoću čvrsto određenih radnih koraka. Ovi koraci moraju biti orijentisani na glavne faze svake razvojne djelatnosti, na **analizu** i **sintezu**.

Analiza znači prikupljanje informacija, a sinteza obradu informacija.



Slika prikazuju redosled koraka teorije sistema.

Prvi korak: počinje se prikupljanjem informacija o planiranom TS. U tehnici sistema ovaj se korak zove *studija sistema*. Rezultat studije predstavlja jasno formulisanu definiciju problema.

Drugi korak: postavlja se program za postizanje cilja.

Treći korak: sintezom sistema razvijaju se varijante rešenja.

Četvrti korak: analizom sistema utvrđuju se svojstva i ponašanje pojedinih varijanti.

Peti korak: vrednovanje varijanti u odnosu na definiciju problema zove se *vrednovanje sistema*.

Šesti korak: odlukom se dobija koncepcija rešenja.

Sedmi korak: vrši se priprema realizacije.

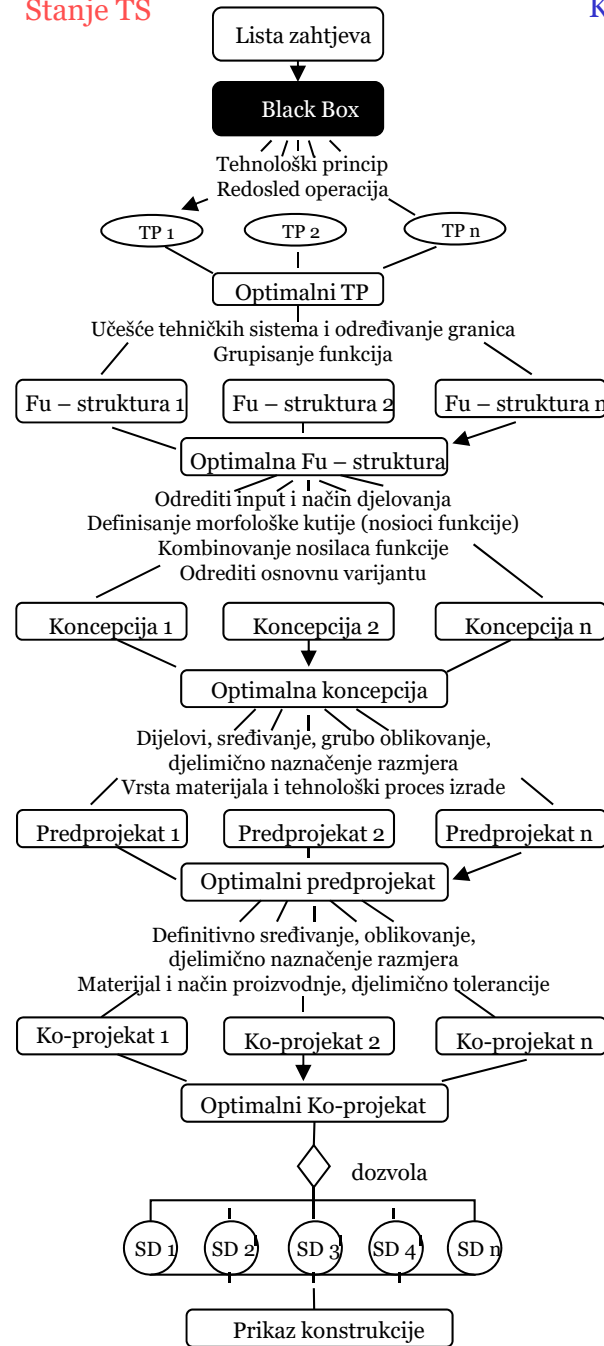
OPŠTI MODEL TOKA PROCESA KONSTRUISANJA

Zahtjevi koji se postavljaju su:

- Proces konstruisanja mora biti strukturan tako da omogućuje pregledne i svjesne korake u smislu rešenja.
- Po mogućnosti, model treba da bude neutralan i da se može konkretizovati.
- Potrebno je da model bude za jasno definisane predulove.
- Mora postojati jasan odnos s drugim oblastima nauke o konstruisanju.
- Mora postojati obrazloženje za pojedine korake.
- Potrebno je uzeti u obzir rezultate i drugih modela.
- Mora biti razumljiv po obliku za konstruktora iz prakse.

Grafički prikaz stanja TS u toku procesa konstruisanja dat je na sledećoj slici.

Stanje TS



Konstruktivski element

Lista zahtjeva

Black box dijagram

TP-blok dijagram

Shema funkcionalne strukture

Morfološka kutija

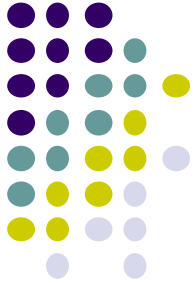
Koncepcijska shema
Koncepcijska skica

Skice predprojekta

Projekat u mjerama

Detaljni crteži,
dimenzije, tolerancije
površinska obrada, materijal

Sastavni crtež,
sastavnica



Literatura:

E.Oberšmit: *Nauka o konstruisanju, metodičko konstruisanje i konstruisanje pomoću računara*, Zagreb 1985.godine

M.Ognjanović: *Razvoj i dizajn mašina*, Mašinski fakulte Beograd, 2007.

G.Pahl, W. Beitz, J.Feldhusen, K.H.Grote: *Engineering Design 3rd Ed.*, Springer-Verlag London, 2007.

M.Ognjanović: *Inovativni razvoj tehničkih sistema*, Mašinski fakulte Beograd, 2014.