

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Katedra za proizvodno mašinstvo

Laboratorija za kibernetiku i mehatronske sisteme - CMSysLab

Predmet: Projektovanje obradnih sistema

Predmetni nastavnik: Prof. Petar B. Petrović

Beograd 2023.02.27

Sadržaj modula:

1. Opšta teorija inženjerskog projektovanja
 - a. Šta je projektovanje?
 - b. Proces projektovanja
 - c. Definicija problema i formulisanje funkcionalnih zahteva
 - d. Hijerarhija funkcionalnih zahteva (FZ) i parametara projektovanja (PP) – dekompozicija procesa projektovanja
 - e. Ograničenja u projektovanju

2. Aksiomatski pristup projektovanju
 - a. Aksiome projektovanja
 - b. Jednačina projektovanja
 - c. Aksioma nezavisnosti i njene implikacije
 - d. Informaciona aksioma i njene implikacije
 - e. Merenje informacija kontekstu proizvodnog sistema
 - f. Robusnost projektnog rešenja

3. TRIZ

4. C-K Teorija

1. Opšta teorija inženjerskog projektovanja

Jedna od osnovnih odrednica ljudskog roda, nešto po čemu se bitno razlikujemo od ostalog živog sveta, je u tome što posedujemo sposobnost da osmišljavamo i stvaramo veštačke tvorevine kojima zadovoljavamo svoje potrebe. Taj proces je u svojoj osnovi kreativan, odnosno počiva na idejama koje su nove, koje ranije nisu postojale. On nužno uključuje maštu, prepoznavanje zavisnosti i relacija, pronalaženje i korišćenje analogija, iterativnost i optimizaciju, divergentno (analitičko i istraživačko) i konvergentno (sintetičko) mišljenje, korišćenje naučnih znanja, odnosno prirodnih zakona i principa na kojima počivaju prirodni fenomeni, takodje i korišćenje heuristike, ... U modernom svetu, taj stvaralački proces pripada inženjerstvu, i zato ga nazivamo inženjerskim projektovanjem.

Inženjersko projektovanje počiva na inženjerskom metodi.

Inženjersko projektovanje se u svojoj suštini ne razlikuje od projektovanja koje prepoznajemo u ranijim istorijskim fazama razvoja modernog čoveka. Razlika je u alatima koje danas koristimo, metodama i organizaciji procesa projektovanja. Ali, suština je ostala nepromenjena. Sve počinje prepoznavanjem potrebe ili prilike. U njima se uvek krije problem. Proces koji prati rešavanje tog problema je proces projektovanja, bez obzira na kojoj metodološkoj i tehnološkoj osnovi on počiva. Proces projektovanja uvek započinje prepoznavanjem problema i osmišljavanjem koncepta rešenja. Rezultat projektovanja je rešenje problema, koje se kasnije, proizvodnim procesom, pretvara u neki fizički artefakt. Tim fizičkim artefaktom zadovoljavamo potrebu ili koristimo priliku kojom je sve inicirano.

Mada prethodno navedeno počiva na elementarnoj logici i ostavlja utisak vrlo jednostavnog konceptualnog konstrukta, njegova praktična realizacija je izuzetno složena. Proces projektovanja je verovatno najsloženiji proces koji obavlja naš mozak. Pronalaženje rešenja ponekad traje hiljadama godina i često je kolektivni poduhvat na kojem rade generacije stvaralaca i entuzijasta.

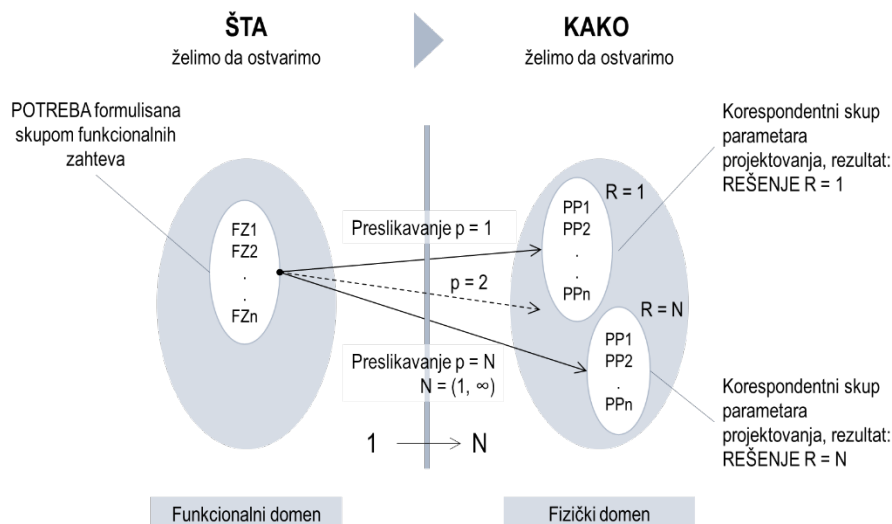
Tako na primer, kada je čovek pokušao da osmisli i konstruiše mašinu za letenje, pokušao je da to uradi tako što je imitirao prirodu. Uzor je bio ptica. To je izgledalo vrlo logično. Ipak, rezultat je bio neuspeh. Funkcionalni zahtev za ovu mašinu je bio da podigne teret sa zemlje nasuprot gravitacione sile i prebaci ga u bilo kojem pravcu, krećući se kroz vazduh letenjem.

Digresija: priroda je takodje projektant. Fenomen kretanja u prostoru jasno potvrđuje ovu tvrdnju. Priroda je evolutivnim procesima (iterativnim i kompetitivnim mehanizmom) sintetisala veliki broj različitih rešenja za kretanje bioloških stvorenja po tlu, u vodi i u vazduh. Neka od tih rešenja su gotovo fascinantna, kao kretanje biljaka ili kretanje paukova koji nošeni strujanjem vazduha na niti paučine mogu da prelete prostor između kontinenata, prostor između Afrike i Amerike! Sledi da projektovanje nije samo svojstveno čoveku, već da je to prirodni fenomen, možda univerzalna odrednica fenomena adaptacije, koji ima svoje različite pojavne oblike. Projektovanje je često bazirano na imitaciji, koja je takodje stvaralački proces. Kada imitiramo prirodu, odnosno kada kao uzor ili inspiraciju koristimo neki živi, biološki sistem, onda takav pristup nazivamo bionikom.

1.1 Šta je projektovanje

Projektovanje predstavlja neprekidno preplitanje između onoga ŠTA želimo da postignemo i toga KAKO to želimo da postignemo.

U slučaju prethodno spomenutog primera projektovanja mašine za letenje, jasno je bilo ŠTA smo želeli da postignemo. Problem je nastao u tome KAKO smo želeli da to postignemo. Sledi da postoje dva osnovna domena u procesu projektovanja: funkcionalni domen i fizički domen. Projektovanje u svom najopštijem smislu znači preslikavanje između funkcionalnog i fizičkog domena na svakom od hijerarhijskih nivoa procesa projektovanja. Naredna slika prikazuje grafički ovaj proces.



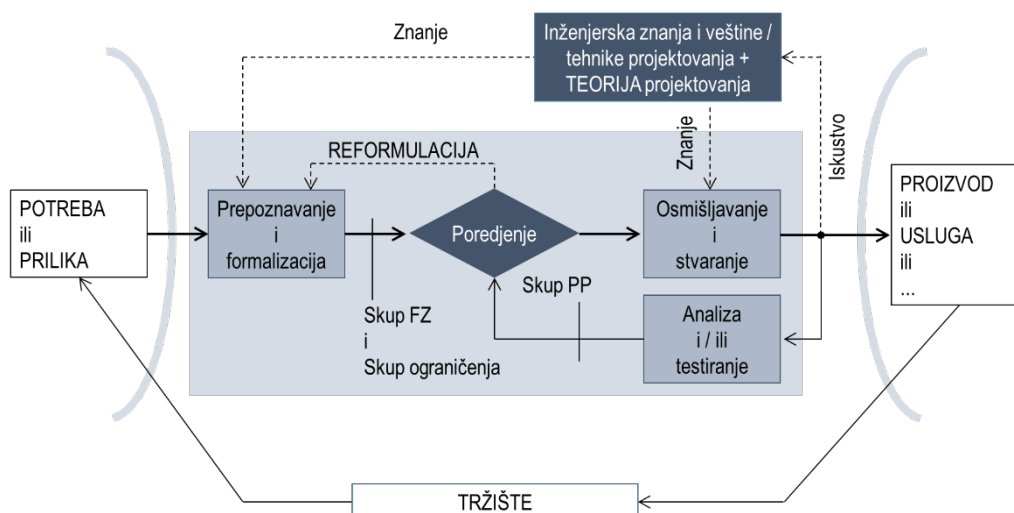
Slika 1: Proces projektovanja kao (kreativno) preslikavanje iz funkcionalnog u fizički domen.

Formalno, projektovanje se može definisati kao stvaranje sintetizovanih rešenja u obliku proizvoda, procesa ili organizacionih struktura (uključujući i usluge), koji su dobijeni kroz preslikavanje usvojenog skupa funkcionalnih zahteva (FZ) iz funkcionalnog domena u korespondentni skup parametara projektovanja (PP) u fizičkom domenu, koji ispunjava uslov da zadovoljava usvojeni skup FZ.

Proces preslikavanja ove vrste je nejednoznačan. Jedan skup funkcionalnih zahteva može da se preslika u dva ili više skupa parametara projektovanja, odnosno dva ili više rešenja. U opštem slučaju, moguć je beskonačan broj rešenja - $N = (1, \infty)$. Takođe i tehnika projektovanja. Neodređenost ove vrste čini proces projektovanja kompleksnim. Heuristika i aksiome projektovanja obezbeđuju principe koji proces projektovanja redukuju na racionalne razmere i time ga čine fizički izvodljivim, upravljivim i konvergentnim. Takođe, kreativnim (inteligentno ponašanje je ovde imperativ!).

1.2 Proces projektovanja

Proces projektovanja započinje definisanjem polaznog skupa FZ u funkcionalnom domenu u cilju stvaranja željenog fizičkog objekta ili procesa, ili nekog apstraktnog konstrukta koji ih zadovoljava. Organizaciona struktura procesa projektovanja u obliku dijagrama toka navodi se na slici 2.



Slika 2: Osnovna organizaciona struktura i tok procesa projektovanja

Definisanje polaznog skupa funkcionalnih zahteva nije apriorni proces. On podrazumeva neke spoljašnje uticaje, nametnute postojećim kontekstom u kojem se pojavljuje neka potreba koja se projektnim rešenjem treba da zadovolji. Drugo, definisanje polaznog skupa funkcionalnih zahteva je povezano i sa prepoznavanjem problema, odnosno prepreka koje se pojavljuju u procesu projektovanja i otežavaju proces projektovanja ili u potpunosti sprečavaju projektanta da sintetiše racionalno rešenje koje zadovoljava te funkcionalne zahteve. Prepoznavanje problema je vrlo značajan momenat, koji zahteva duboko promišljanje i veliko iskustvo.

Posle definisanja polaznog skupa funkcionalnih zahteva, proces projektovanja prelazi u fazu osmišljavanja i stvaranja, odnosno sinteze projektnog rešenja. Taj proces započinje idejom, zatim prelazi u koncept i dalje se nastavlja razradom tog koncepta, kroz ulazak u detalje i proizvodnju konkretnih rešenja koja su fizički izvodljiva.

Po okončanju faze osmišljavanja i stvaranja kao rezultat pojavljuje se konkretan proizvod, koji dalje ide na testiranje čiji je cilj da se provere njegovi parametri projektovanja i utvrdi saglasnost između ostvarene i željene funkcije. Ovde proces projektovanja dobija kibernetiku dimenziju, jer se kroz testiranje, poredjenje i pripadajuće odlučivanje, u proces projektovanja uvodi povratna sprega. Ta povratna sprega omogućava da proces projektovanja dobije i komponentu optimizacije i kvaliteta.

Proces projektovanja je u suštini iterativni proces. U opštem slučaju, sekvenca stvaranja i testiranja se po pravilu ponavljaju u nizu, veći broj puta, dok se ne dosegne zadovoljavajuće rešenje.

Postoje situacije, a vešt projektant ili rukovodilac projektovanja treba da poseduje sposobnost da ih uvek prepozna, nemaju potrebnu konvergentnost koja će posle konačnog broja sekvenci stvaranja i testiranja dovesti do rešenja i time okončati proces projektovanja. U tom slučaju se ulazi u novu povratnu spregu koja proces projektovanja vodi na početak, ka fazi prepoznavanja i formalizacije, koja ima za cilj da se reformuliše polazni skup funkcionalnih zahteva i produkuje novi, za koji se veruje da će dovesti do upotrebljivog rešenja.

Kada se u nekom trenutku dostigne željeno rešenje i time produkuje proizvod, onda taj proizvod ulazi u eksploataciju, odnosno dolazi na tržište. Tržište takodje ima regulatornu funkciju. Tržište je konačni sudija ne samo u upotrebnoj već i o ukupnoj vrednosti sintetisanog rešenja. Za razliku od svih prethodno spomenutih povratnih sprega i njihovih regulatornih uticaja, ova, eksterna povratna sprega uključuje i konkurenciju, odnosno poredjenje između različitih rešenja nastalih u različitim i međusobno nezavisnim procesima projektovanja. Ova povratna sprega ima jak uticaj na proces projektovanja i po pravilu podstiče dalju optimizaciju proizvoda, koja se odvija kroz indirektni uticaj korisnika projektnog rešenja.

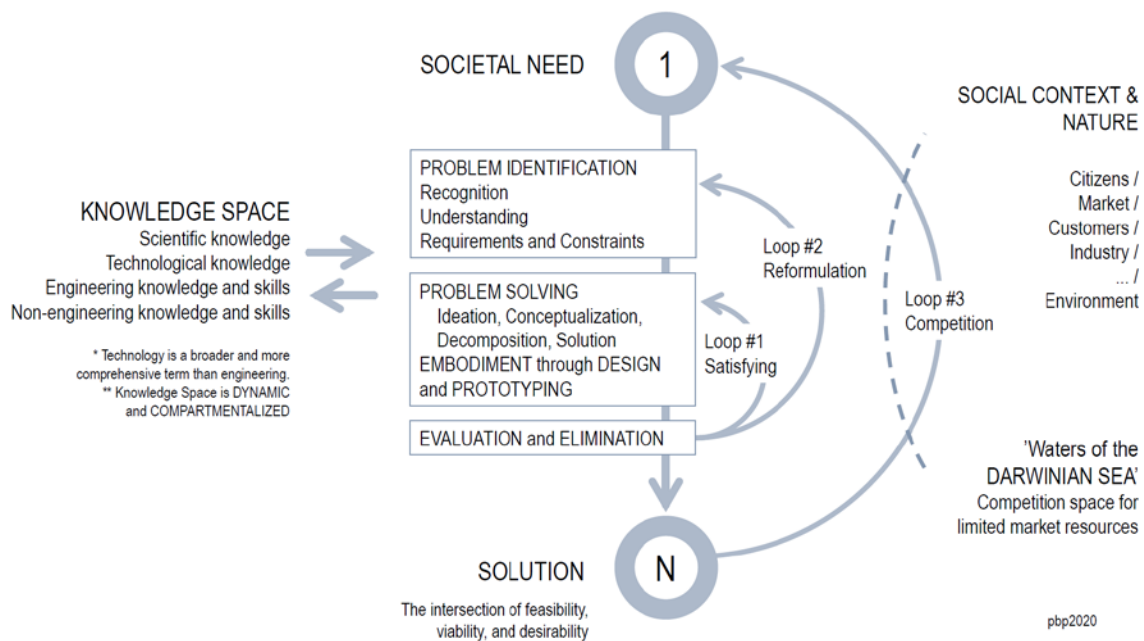
Dakle, proces projektovanja je iterativan i u svojoj osnovi kibernetike prirode, jer sadrži višestruke asinhronu povratne spregu i na bazi njih izvedenu regulatornu funkciju.

Pored prethodno navedenih, proces projektovanja sadrži druge unutrašnje procese. Jedan od tih dodatnih, ili sekundarnih procesa je učenje. Kroz projektovanje, projektant neprekidno produkuje nova iskustva, koja se daljom sistematikom mogu unaprediti u specifični stil projektovanja ili neke druge forme znanja koje možemo smestiti u okvir teorije projektovanja.

Pored kompleksnosti po sebi, koja dolazi od kompleksnosti preslikavanja iz funkcionalnog u fizički domen, kompleksnost procesa projektovanja u značajnoj meri dolazi od prethodno navedenih povratnih sprega i sa njima povezanim multikriterijumskim optimizacijama. Smanjenje kompleksnosti je moguće smanjenjem dimenzionalnosti. Kako broj funkcionalnih zahteva raste, raste i dimenzionalnost procesa projektovanja, a konsekvencija i kompleksnost rešenja. Zato je ključno pravilo procesa projektovanja da je neophodno zadovoljiti samo minimalni skup funkcija koje stoje iza neke konkretne potrebe. Te funkcije nazivamo esencijalnim. Dobar projektant poseduje sposobnost da identifikuje (prepozna) samo najznačajnije zahteve i ignoriše one od sekundarnog značaja, koje će razmatrati u

kasnijim fazama projektovanja ili evolucije projektnog rešenja. Ovo svojstvo dobrih projekatata se može razvijati, ali samo umereno i uz velike napore.

Struktura i sa njom povezan dinamizam procesa projektovanja, prikazano na slici 2, mogu se reformulisati stavljajući težište na takozvanu inženjersku metodu (metoda / starogrčki: μέθοδος, doslovce znači traganje za znanjem, način istraživanja ili sistem istraživanja, podrazumevajući zapravo proceduru koja se sprovodi u cilju izvršenja nekog zadatka), u čijem središtu se nalazi proces projektovanja. Inženjerska metoda se kontrastira naučnom metodom, gde se ukazuje na suštinske razlike. Inženjerska metoda i kompletno inženjersko delovanje se zasniva na rešavanje problema (problem kao pojam ovde nema negativnu konotaciju, već je to konstatacija kvalitativnog stanja bilo kog zadatka, koji po svojoj prirodi sadrži neizvesnost, nesigurnost, poteškoće i slično u njegovom izvršavanju, a pre svega izlazak izvan okvira postojećih znanja) koji su povezani sa zadovoljavanjem neke društvene potrebe ili nekog društvenog izazova. Ili, u vremenu modernog homoekonomikusa, prilike da se napravi neki poslovni poduhvat. Nasuprot tome, naučna metoda i ukupni naučni rad je vodjenjen isključivo znatiželjom, odnosno potrebom ljudskog duha za razumevanjem sveta u kojem egzistira, dakle sticanjem znanja samog po sebi. Problem i projektovanje kao proces rešavanja tog problema su suština inženjerstva. Ovde je korisno da se navede čuvena fraza (po kojoj je nazvana i knjiga) velikog imena moderne filozofije nauke, Karla Popera, koji je, istražujući pitanje metode, napisao: 'Sav život je rešavanje problema' (Whole life is problem solving), pritom uveren da pokušaj i greška stoje iza svakog rešavanja problema, i takodje, učenja i rasta znanja. Poper taj proces naziva 'nagađanjem i pobijanjem' (conjecture and refutation).



Slika 2+: Proces projektovanja i inženjerska metoda.

Dijagram na slici 2+ koji prikazuje algoritamsku strukturu inženjerske metode, polazi od potrebe (predstavljeno kao društvena potreba / societal need) i okončava se rešenjem problema (solution), pri čemu je njegova osnovna odlika iterativnost, jer počiva na nagađanju i pobijanju, odnosno pokušajima kojima se u fizičkom prostoru pronalazi skup parametara projektovanja koji zadovoljavaju zadati ili prepoznati skup funkcionalnih zahteva. To snažno prisustvo iterativnosti poduprto je sa tri povratne sprege (Loop #1 do Loop #3), koje su prethodno već spomenute, a predstavljaju ključnu komponentu regulacionog mehanizma koji je prirodno ugrađen u svaki proces projektovanja, a u čijem središtu je proces odlučivanja, odnosno prosudjivanja. Bitno je da se razume da prisustvo greške, odnosno odstupanja od očekivanog i potrebnog, koja se prepoznaje kroz proces prosudjivanja i odlučivanja, nikako ne predstavlja slabost, niti nešto nepoželjno u inženjerskoj metodi. Naprotiv! Upravo greška, pre

nego uspeh, u kontekstu prethodno spomenute tri povratne sprege, predstavlja mehanizam kojim se unutar procesa projektovanja pored stvaranja i odlučivanja, ugrađuje i proces učenja, odnosno produkcije znanja. Znanje koje podupire proces projektovanja sastoji se iz četiri komponente: a) naučno znanje (prirodne nauke), b) tehnološko znanje, c) inženjersko znanje (inženjerska nauka i struka) i veštine i d) neinženjersko znanje i veštine. Proces učenja čini ovaj korpus znanja dinamičnim. A način izvodjenja zaključaka, i mišljenja uopšte, neprekidno osciluje između divergentnog i konvergentnog mišljenja, što je druga komponenta dinamike procesa projektovanja.

Some problem-solving strategies include:

- Abstraction: solving the problem in a tractable model system to gain insight into the real system
- Analogy: adapting the solution to a previous problem which has similar features or mechanisms
- Brainstorming: (especially among groups of people) suggesting a large number of solutions or ideas and combining and developing them until an optimum solution is found
- Critical thinking
- Divide and conquer: breaking down a large, complex problem into smaller, solvable problems
- Hypothesis testing: assuming a possible explanation to the problem and trying to prove (or, in some contexts, disprove) the assumption
- Lateral thinking: approaching solutions indirectly and creatively
- Means-ends analysis: choosing an action at each step to move closer to the goal
- Morphological analysis: assessing the output and interactions of an entire system
- Proof of impossibility: try to prove that the problem cannot be solved. The point where the proof fails will be the starting point for solving it
- Reduction: transforming the problem into another problem for which solutions exist
- Research: employing existing ideas or adapting existing solutions to similar problems
- Root cause analysis: identifying the cause of a problem
- Trial-and-error: testing possible solutions until the right one is found
- Help-seeking

Empathy

See also: Empathic design

In their book *Creative Confidence*, Tom and David Kelley note the importance of empathy with clients, users, and customers as a basis for innovative design.[31][32] Designers approach user research with the goal of understanding their wants and needs, what might make their life easier and more enjoyable and how technology can be useful for them. Empathic design transcends physical ergonomics to include understanding the psychological and emotional needs of people—the way they do things, why and how they think and feel about the world, and what is meaningful to them.

Ideation: divergent and convergent thinking

Ideation is idea generation. The process is characterized by the alternation of divergent and convergent thinking, typical of design thinking process.

To achieve divergent thinking, it may be important to have a diverse group of people involved in the process. Design teams typically begin with a structured brainstorming process of "thinking outside the box". Convergent thinking, on the other hand, aims for zooming and focusing on the different proposals to select the best choice, which permits continuation of the design thinking process to achieve the final goals.

After collecting and sorting many ideas, a team goes through a process of pattern finding and synthesis in which it has to translate ideas into insights that can lead to solutions or opportunities for change. These might be either visions of new product offerings, or choices among various ways of creating new experiences.[30]

Идеја (од античкогрчког *idéa* [idéa]) или замисао[1] је термин који се користи у свакодневном говору али и значајан појам промишљања унутар филозофије. Идеја је тако

филозофска величина која различитим приступима упућује на концепт априорне менталне слике. По Платону идеја је темељ онтолошке стварности, она је праслика. По њему идеје стварају мотив преко којег бива свет, то су форме с којима га је Демијург створио. По Канту идеја је праслика употребе разума, трансцендентан појам који прекорачује границу сазнања. Хегел идеји даје атрибут јединог реалног бића. По њему она је појам, реалитет појма и јединство једног и другог, она је вечно произвођење. По Шопенхауеру она је сваки одређен и чврст степен објективизације воље, она је ствар по себи која је туђа мноштву, њени се ступњеви према свим појединим стварима односе као њихови вечни облици или њихови обрасци.

Идеја може да представља основну замисао о изгледу и функционисању неког предмета, уређаја или машине. Да бисмо лакше реализовали идеју, корисно је урадити шематски приказ.

Implementation and prototyping

The third space of the design thinking innovation process is implementation, when the best ideas generated during ideation are turned into something concrete.[30]

At the core of the implementation process is prototyping: turning ideas into actual products and services that are then tested, evaluated, iterated, and refined. A prototype, or even a rough mock-up helps to gather feedback and improve the idea. Prototypes can speed up the process of innovation because they allow quick identification of strengths and weaknesses of proposed solutions, and can prompt new ideas.

1.3 Kreativnost u procesu projektovanja

Procese projektovanja je kreativni proces. Kako projektant postaje kreativan?

Kreativna ličnost iz perspektive projektovanja poseduje skup vrlo posebnih osobina:

- **AFINITET / EMPATIJA** Talenat i prirodna / urodjena potreba za rešavanje problema kroz osmišljavanje / sintetisanje / stvaranje fizičkih i drugih artefakata. Motivaciona komponenta, odnosno volja ove vrste, praćena pozitivnim emocijama je ključni preduslov kreativnosti, a prema kognitivnoj psihologiji, ona je nužnost.
- **HRABROST** Tendencija ka riziku i sposobnost suočavanja sa greškom; Ovo je očigledno još jedna emotivna komponenta, inhibitornog karaktera. Ako ne postoji hrabrost ove vrste, onda to može da bude velika prepreka za valorizaciju eventualno prisutnih sposobnosti. Strah je veliki neprijatelj projektovanja. Stvaranje ne sme da bude ničim sputavano, a posebno strahom.
- **MULTIDISCIPLINARNOST** Odlična memorija koja se prostire na veliki broj različitih oblasti;
- **ASOCIJATIVNOST** Zna kako da koristi analogije i kako da ekstrapolira i interpolira;
- **ANALITIČNOST** Zna kako da redukuje masovnost činjenica različitih prirode i značaja, na ogranični skup kritičnih promenljivih za proces projektovanja;
- **KREATIVNOST / INOVATIVNOST** Sposobnost da kombinuje poznate činjenice i stvara novo (neočekivano, ali smisleno) rešenje.

1.4 Definicija problema i funkcionalni zahtevi

Prepoznavanje i definisanje problema, a zatim na osnovu toga formulisanje funkcionalnih zahteva, je najkritičnija faza procesa projektovanja. Prvo je potrebno identifikovati problem, odnosno prepoznati ga i opisati, a zatim pronaći odgovarajuću bazu znanja za njegovo rešavanje.

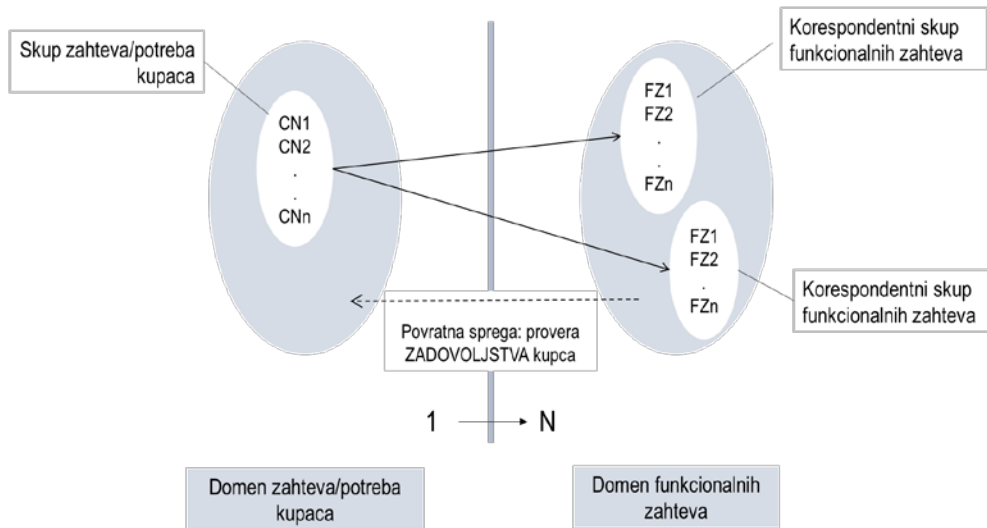
Ovde generalno, postoje dva pristupa:

1. Formulisanje FZ kod novog proizvoda (procesa)
 - a. Potreba se direktno prevodi u skup funkcionalnih zahteva tehničkim formalizacijama,
 - b. Proces je najčešće iterativan (reformulacija polaznog skupa funkcionalnih zahteva),
 - c. Formira se prvo koncept, a zatim se kroz iteracije unapređuju performanse rešenja;
2. Formulisanje FZ kod unapređjanje postojećeg proizvoda

U postojeće rešenje uključuju se zahtevi kupaca/korisnika, odnosno njihova reakcija na postojeće rešenje (treća povratna sprema u modelu procesa projektovanja prikazanom na slici

2+), a kod personalizovane proizvodnje, odnosno proizvodnje po zahtevu, traži se saglasnost korisnika.

Prethodno navedeno u razmatranje procesa projektovanja uvodi domen potreba, odnosno domen zahteva kupaca, gde prepoznajemo novo preslikavanje, ovog puta izmedju domena zahteva kupaca i domena funkcionalnih zahteva (slika 3). Domen potreba (neutralna formulacija) odnosno, domen kupaca (formulacija koja potrebu dovodi u kontekst tržišta i potrošačkog društva!) sadrži attribute koji definišu potrebu, po pravilu na netehnički način, opisno.



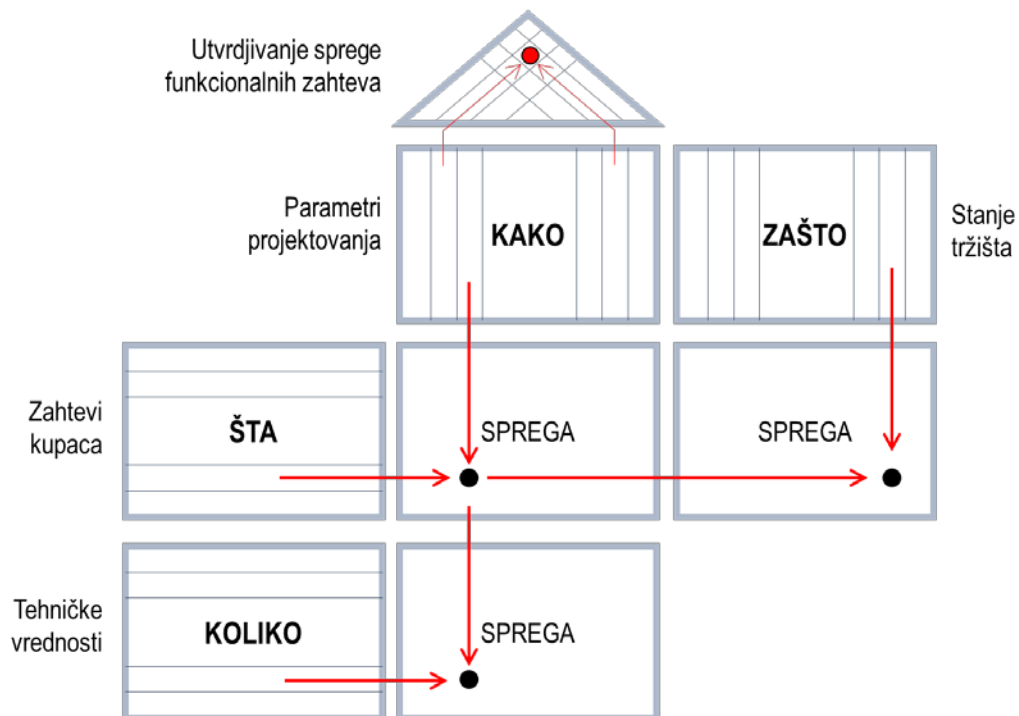
Slika 3: Domen zahteva kupaca i preslikavanje izmedju domena zahteva kupaca u domen funkcionalnih zahteva (ekstenzija koncepta domena procesa projektovanja navedenog na slici 1).

Sa prethodnim u vezi, uvodi se novi metodološki okvir koji se metaforički naziva 'kuća kvaliteta' a baziran je formalizaciji procesa projektovanja kroz njegovo dovodjenje u kontekst tri ključna ontološka pitanja: ZAŠTO (svrha), KAKO (proces, koji vodi do rešenja) i ŠTA (rešenje, rezultat). Grafički prikaz kuće kvaliteta navodi se na slici 4. Inače, iz ugla upravljanja procesom projektovanja, bitna su još tri ontološka pitanja: KO, GDE i KADA, ali se taj aspekt ovde ne razmatra, bez obzira na njegov veliki praktični značaj.

Ontološke podprostore kuće kvaliteta metaforički nazivamo sobama:

- Soba ŠTA: Podprostor koji predstavlja skup zahteva i potreba kupaca; Definišu se primarni, sekundarni i tercijarni zahtevi
- Soba KAKO: Podprostor koji sadrži tehnička rešenja kojima će biti ostvareni funkcionalni zahtevi, odnosno potrebe kupaca (potrebe kupaca izražene tehničkim specifikacijama);
- Soba KOLIKO: Prostor u kojem se navodi kvantifikacija tehničkih parametara;
- Soba ZAŠTO: Prostor u kojem se nalaze odgovori na stanje tržišta, analiza konkurencije i parametara njihovih proizvoda;
- Soba ODNOSI: Prostor koji predstavlja jezgro kuće kvaliteta; Sadrži relacije izmedju ŠTA i KAKO;
- KROV: Prostor u kojem se identifikuje sprega izmedju funkcionalnih zahteva.

Nasuprot metaforičnom karakteru, logički pristup sadržan u 'kući kvaliteta' je logički sistematičan i metodološki visokovredan, pre svega zbog njegove ontološke osnove.



Slika 4: Kuća kvaliteta – metafora ontološkog pristupa procesa projektovanja.

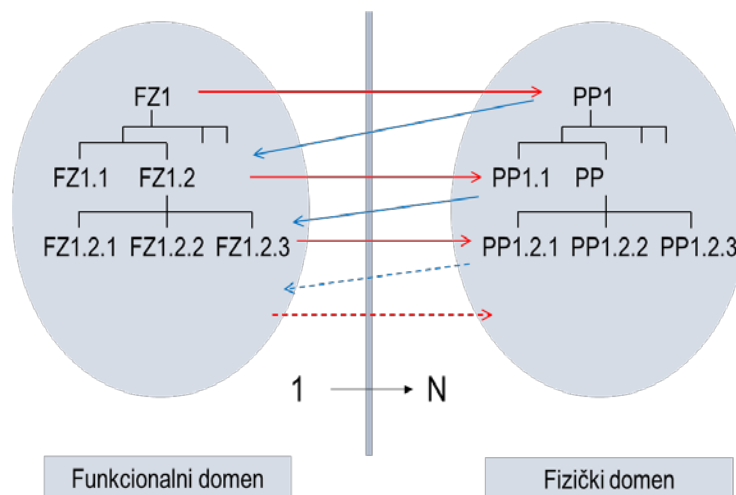
1.5 Hijerarhija funkcionalnih zahteva i parametara projektovanja

Hijerarhija funkcionalnih zahteva i parametara projektovanja omogućava dekompoziciju procesa projektovanja. Dekompozicija sistema ili procesa je od suštinskog značaja za pitanje kompleksnosti. Kompleksnost nekog problema se redukuje njegovom dekompozicijom, na manje, jednostavnije probleme koji se parcijalno rešavaju.

Sa ovim u vezi, postoje dve vrlo značajne činjenice:

1. Funkcionalni zahtevi i parametri projektovanja imaju hijerarhijsku strukturu i mogu se dekomponovati;
2. Funkcionalni zahtevi na i-tom nivou ne mogu se dekomponovati bez prethodnog prolaska kroz fizički domen i pronalaženja skupa parametara projektovanja rešenja koje zadovoljava zadati skup funkcionalnih zahteva. Sledi da u procesu projektovanja moramo da sukcesivno prolazimo iz funkcionalnog domena u fizički domen, i obrnuto. Sinteza rešenja uključuje i identifikaciju hijerarhijske strukture organizovanja funkcionalnih zahteva i parametara projektovanja.

Prethodno navedeno svojstvo procesa projektovanja i njegove dekompozicije grafički je prikazano na slici 5.



Slika 5: Hijerarhijska organizacija procesa projektovanja

1.6 Ograničenja u procesu projektovanja

Ograničenja u procesu projektovanja određuju granice prihvatljivog rešenja. Ograničenja sužavaju fizički prostor u kojem se mogu naći rešenja za postavljeni skup funkcionalnih zahteva (zabranjeni podprostori).

Postoje dve vrste ograničenja:

1. Ulazna ograničenja – ograničenja u projektnim zahtevima, koje po pravilu nameće korisnik, odnosno kupac (na primer, troškovi);
2. Sistemska ograničenja – ograničenja nametnuta sistemom u okviru kojeg se projektno rešenje mora da nadje (na primer, sve ugrađene komponente moraju da budu iz domaće proizvodnje, ili sve upravljačke komponente moraju da budu neelektrične, i slično).

Ponekad je teško napraviti razliku između ograničenja i funkcionalnog zahteva.

Po definiciji, ograničenje se razlikuje od funkcionalnog zahteva po tome što ograničenje ne mora da bude nezavisno od ostalih funkcionalnih zahteva i ograničenja. Uslov nezavisnosti ovde ne postoji. Svako ograničenje se postavlja samo za sebe, kao kategorički zahtev koji se nameće projektantu. Pored toga, ograničenja najčešće nemaju tolerancije, dok funkcionalnih zahtevi to imaju. Na primer, troškovi najčešće imaju status ograničenja a ne funkcionalnog zahteva – njihova precizna vrednost nije kritična sve dok se ne predje zadata vrednost. Ograničenja su kao ograničenja brzine vozila na putu – prekoračenje nije prihvatljivo!

2. Aksiomatski pristup projektovanju

Osnovni cilj aksiomatskog pristupa projektovanju je da se uspostave naučno zasnovane osnove u oblasti projektovanja, koje će predstavljati formalno-konsekventnu bazu za stvaranje proizvoda, procesa, usluga, sistema, softvera, organizacionih struktura i drugih fizičkih i/ili apstraktnih artefakata koji su rezultat procesa inženjerskog projektovanja. Ovakvim pristupom se bitno udaljavamo od konvencionalnog pristupa, koje je dominantno zasnovan na iskustvu (empiriji) i intuiciji.

Bez naučnog, odnosno formalnog određenog pristupa, oblast projektovanja se ne može sistematizovati, čime projektovanje ostaje inženjerska aktivnost koju je teško razumeti, a time i objasniti, kodirati, a na kraju učiti i vežbati.

Aksiomatski pristup počiva na potpunom razumevanju fenomena koji se razmatra i zato poseduje visok stepen opštosti, čime se stvara jaka osnova za donošenje odluka. Donošenje odluka je sastavni deo procesa projektovanja, povezano sa tri povratne sprege (povratne sprege kao komponente regulacionog mehanizma obuhvataju i funkciju odlučivanja). Dajke, projektant je neko ko donosi odluke.

Pored aksiomatskog pristupa, proces projektovanja se može formalizovati i kroz okvir algoritamskog pristupa. Kod algoritamskog pristupa, cilj je definisanje procesa, odnosno uredjenog niza aktivnosti čija je ishodišna tačka rešenje polaznog problema. Algoritamski pristup po pravilu ne podrazumeva potpuno znanje o fenomenu, ima ograničenu opštost i značajnim delom se oslanja na iskustvo i praksu.

Teoretske osnove aksiomatskog pristupa projektovanju postavio je Nam P. Suh, profesor Massachusetts Institute of Technology (MIT), Park Center for Complex Systems. Polazni koncepti izneti su u knjizi: Suh, N.P. (1990) The Principles of Design, Oxford University Press, New York.

2.1 Šta su aksiome, teoreme i korolarijumi - podsećanje

Aksioma je fundamentalna istina, koja je očigledna sama po sebi, koja uvek važi, koja se ne dokazuje i koja nema izuzetka.

Teorema je tvrdnja koja se nije očigledna sama po sebi, ali se može dokazati pomoću aksioma. Ona je, prema tome, jednaka zakonu ili principu.

Koloralijum je tvrdnja koja izvodi iz aksioma i teorema, ili ostalih tvrdnji koje nisu dokazane, tako što je ta tvrdnja očigledna posledica koja ne zahteva dokazivanje.

2.2 Aksiome projektovanja

Postoje dve aksiome koje čine osnovu projektovanja:

Aksioma 1: **Aksioma nezavisnosti**

Funkcionalni zahtevi u projektovanju moraju da budu medjusobno nezavisni.

Aksioma 2: **Informaciona aksioma**

Informacioni sadržaj procesa projektovanja mora da bude minimalan.

Navedene aksiome se mogu alternativno formulisati.

Alternativne formulacija prve aksiome projektovanja:

V11: Optimalno projektno rešenje uvek ima medjusobno nezavisne funkcionalne zahteve.

V12: Kod prihvatljivog projektog rešenja PP i FZ su u takvom odnosu da se određeni PP može da menja u cilju zadovoljenja korespondentnog FZ, bez uticaja na ostale FZ.

Alternativna formulacija druge aksiome projektovanja:

V21: Najbolje projektno rešenje je ono funkcionalno nespergnuto rešenje koje ima minimalni informacioni sadržaj.

2.3 Korolarijumi

Neke od konsekvenci aksioma projektovanja je skup korolarijuma.

Kolaralijum 1: Rasprezanje spregnutog rešenja

Treba raspregnuti odvojene delove ili aspekte projektnog rešenja u predloženoj konstrukciji.

Kolaralijum 2: Treba minimizirati polazni skup FZ i ograničenja.

Kolaralijum 3: Treba integrisati delove konstrukcionog rešenja u jedan fizički deo / sklop, ukoliko FZ ostaju nezavisni.

Kolaralijum 4: Treba koristiti standardne ili zamenljive delove ukoliko su oni u skladu sa FZ i ograničenjima.

Kolaralijum 5: Koristiti simetrične delove ukoliko to nije u suprotnosti sa FZ i ograničenjima.

Kolaralijum 6: Koristiti najšira moguća tolerancijska polja kod definisanja FZ.

2.4 Matematička reprezentacija aksiome nezavisnosti – JEDNAČINA PROJEKTOVANJA

Formalno, projektovanje je proces preslikavanja usvojenog skupa funkcionalnih zahteva u njemu korespondentan skup parametara projektovanja kojima je određeno konkretno rešenje u fizičkom prostoru za neku konkretnu potrebu.

Matematički, preslikavanje iz funkcionalnog u fizički domen se može iskazati sledećom matricnom relacijom:

$$\{FZ\} = [A]\{PP\} \quad (1)$$

pri čemu je:

$\{FZ\}$ - Vektor kolona funkcionalnih zahteva $\{FZ\} = \{FZ_1, FZ_2, \dots, FZ_n\}^T$

$\{PP\}$ - Vektor kolona parametara projektovanja $\{PP\} = \{PP_1, PP_2, \dots, PP_m\}^T$

$[A]$ - Matrica projektovanja, u opštem slučaju pravougaona

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{1,n} & \dots & A_{n,m} \end{bmatrix}$$

Iz jednačine (1) sledi da je svaki od funkcionalnih zahteva definisan sledećom relacijom:

$$FZ_i = \sum_{j=1}^m A_{i,j} PP_j \quad (2)$$

odnosno, možemo da za slučaj $n = m = 3$ jednačinu (1) napišemo u razvijenom obliku, kao sistem od tri linearne jednačine:

$$\begin{Bmatrix} FZ_1 \\ FZ_2 \\ FZ_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_3 \end{Bmatrix} = \begin{cases} A_{1,1}PP_1 + A_{1,2}PP_2 + A_{1,3}PP_3 \\ A_{2,1}PP_1 + A_{2,2}PP_2 + A_{2,3}PP_3 \\ A_{3,1}PP_1 + A_{3,2}PP_2 + A_{3,3}PP_3 \end{cases}$$

ili

$$FZ_1 = A_{1,1}PP_1 + A_{1,2}PP_2 + A_{1,3}PP_3$$

$$FZ_2 = A_{2,1}PP_1 + A_{2,2}PP_2 + A_{2,3}PP_3$$

$$FZ_3 = A_{3,1}PP_1 + A_{3,2}PP_2 + A_{3,3}PP_3$$

Iz jednačine (2) sledi da je u slučaju da su svi članovi matrice projektovanja različiti od nule, svaki funkcionalni zahtev zavisao od svih parametara projektovanja nekog hipotetičkog projektnog rešenja. Ovakav slučaj bi mogli da nazovemo prvim specijalnim slučajem matrice projektovanja. U opštem slučaju proizvoljan broj proizvoljno lociranih članova matrice je jednak nuli. To znači da su mogući i drugačiji posebni oblici matrice projektovanja, odnosno posebni slučajevi projektovanja koji potencijalno nude neke pogodnosti za proces projektovanja. Zato, pitanje posebnih oblika matrice projektovanja treba sistematski istražiti.

U zavisnosti od vrednosti članova matrice projektovanja, u opštem slučaju moguća su tri posebna slučaja, a odatle i tri vrste projektog rešenja (matrica projektovanja napisana za slučaj $m = n = 3$):

1 - SPREGNUTO REŠENJE (*Coupled Design*)

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix}, A_{i,j} \neq 0 \quad (3)$$

Članovi matrice projektovanja uzimaju slučajne vrednosti.

Matrica projektovanja se reorganizacijom (proizvoljnom zamenom mesta vrsta) ne može svesti na neki drugi poseban oblik.

2 - NESPREGNUTO REŠENJE (*Uncoupled Design*)

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & A_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & A_{3,3} \end{bmatrix}, A_{i,j} \neq 0, i \neq j \quad (4)$$

Nespregnuto rešenje je rešenje kod kojeg je matrica projektovanja dijagonalna. To je idealan slučaj projektovanja, potpuna suprotnost prvom posebnom slučaju, jer se njime u potpunosti zadovoljava prva aksioma projektovanja, a konsekvntno, jednačina (2) svodi na nespregnuti oblik, odnosno na oblik u kojem svaki od funkcionalnih zahteva zavisi samo od jednog, njemu korespondentnog parametra projektovanja.

3 - RASPREGNUTO REŠENJE (*Decoupled Design*)

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1} & 0 & 0 \\ A_{2,1} & A_{2,2} & 0 \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Raspregnutom projektom rešenju odgovara trougaona matrica projektovanja. Postoje dva suštinski identična oblika: donje-trougaona matrica (oblik prikazan navedenom jednačinom) i gornje-trougaona matrica. U praksi je ovo najčešći slučaj i taj oblik se najjednostavnije postiže prekompozicijom vrsta opšteg slučaja polazne matrice projektovanja. Raspregnuto rešenje uslovljava proces projektovanja, time što se zadovoljavanje funkcionalnih zahteva mora da ostvari od funkcionalnog zahteva koji je nespregnut, u navedenom primeru to je FZ1, da se zatim ispuni FZ2 u čijoj se jednačini (2), koja je spregnuta, pojavljuje samo jedna nepoznata i zatim, se proces završava zadovoljavanjem zahteva FZ3, u čijoj se jednačini projektovanja (2), koja je takodje spregnuta, ipak pojavljuje samo jedna nepoznata, jer su prethodne dve već određene, odnosno poznati su FZ1 i FZ2. Iz prethodno navedenog, sledi da je raspregnuto rešenje zapravo uslovno spregnuto, ili kvazi-spregnuto rešenje.

Prethodno razmatrani varijantni oblici matrice projektovanja uradjeni su za slučaj kvadratne matrice projektovanja, odnosno za slučaj kada je broj funkcionalnih zahteva identičan broju parametara projektovanja, kada važi $m = n$.

Medjutim, u praksi su mogući i slučajevi kada je broj funkcionalnih zahteva različit od broja parametara projektovanja, odnosno kada je $m \neq n$. Taj slučaj kao posledicu ima pravougaonu matricu projektovanja.

2.5 Pravougaona matrica projektovanja

Kod pravougaone matrice projektovanja moguća su dva karakteristična slučaja.

Slučaj $n > m$

U ovom slučaju je broj funkcionalnih zahteva veći od broja parametara projektovanja. Na primer, kada je $n = 3$ i $m = 2$ sledi:

$$\begin{Bmatrix} FZ_1 \\ FZ_2 \\ FZ_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \\ A_{3,1} & A_{3,2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

odakle sledi da matrica projektovanja može da se svede na dva posebna slučaja:

$$[A] = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \\ X & X \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ X & 0 \\ X & X \end{bmatrix}$$

odakle direktno sledi zaključak da pravougaona matrica vodi ka spregnutom rešenju ili rešenju u kojem neki od funkcionalnih zahteva nije zadovoljen (drugi oblik matrice projektovanja u koje oba člana u prvoj vrsti imaju nultu vrednost, pa shodno tome FZ1 nije zadovoljen!). Odavde se mogu formulisati dve teoreme.

Teorema 1: Kada je broj PP manji od broja FZ onda sledi da je projektno rešenje ili spregnuto ili neki od funkcionalnih zahteva nije zadovoljen.

Teorema 2: Kada je konstrukciono rešenje spregnuto zbog većeg broja FZ od PP, raspredanje je moguće uvođenjem dodatnih PP.

Slučaj $n < m$

U ovom slučaju je broj funkcionalnih zahteva manji od broja parametara projektovanja. Na primer, kada je $n = 2$ i $m = 3$ sledi:

$$\begin{Bmatrix} FZ_1 \\ FZ_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_{13} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

odakle sledi da matrica projektovanja može da se svede na dva karakteristična slučaja:

$$[A] = \begin{bmatrix} X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \end{bmatrix}$$

odakle neposredno sledi zaključak da pravougaona matrica vodi ka spregnutom rešenju ili ka rešenju u kojem je neki od parametara projektovanja prekobrajan (redundantan). Odavde se mogu formulisati dve teoreme:

Teorema 3: Kada je broj PP veći od broja FZ onda sledi da je projektno rešenje ili spregnuto ili redundantno.

Teorema 4: Kod idealnog rešenja, broj PP mora da bude jednak broju FZ.

2.6 Definicija i karakteristike funkcionalnih zahteva

Funkcionalni zahtevi predstavljaju minimalan skup nezavisnih zahteva koje u potpunosti opisuju projektne zahteve za konkretnu potrebu.

Funkcionalni zahtevi moraju da budu raspregnuti (medjusobno nezavisni!), odakle sledi da se svaki funkcionalni zahtev mora postavljati nezavisno od drugih funkcionalnih zahteva.

Dobar projektan mora da ima sposobnost da izabere minimalan skup funkcionalnih zahteva na svakom od hijerarhijski organizovanih nivoa projektovanja. Previše funkcionalnih zahteva znači kompleksnije projektovanje i konsekventno, kompleksnije rešenje (čime se ugrožava druga aksioma projektovanja, aksioma minimuma informacionog sadržaja). Projektant koji pokazuje tendenciju ka takvim rešenjima mora se vratiti nazad i pokušati da nadje jednostavnije rešenje. Ova osobina, odnosno **sposobnost pronalaženja minimalnog skupa funkcionalnih zahteva i minimalnog rešenja je jedna od najznačajnijih (najvrednijih) osobina dobrog projektanta.**

3. Aksioma nezavisnosti i njene implikacije

Mada konceptualno sasvim jasna, aksioma nezavisnosti nameće širok spektar pitanja vezanih za njenu praktičnu primenu na koje nije jednostavno pronaći zadovoljavajuće odgovore:

- S obzirom na činjenicu da je u prirodi sve međusobno zavisno, da koje granice se sme dozvoliti, ili do koje granice je prihvatljiva međuzavisnost FZ a da se ne ugrozi aksioma #1? Pojam nezavisnosti se ovde dovodi u kontekst tolerancija i odbacivanje njegovog ekstremnog razumevanja kao kategoričkog kriterijuma za odlučivanje.
- Kako se može meriti sprega FZ? Ovo pitanje je povezano sa problemom definisanja metrike kojom se kvantifikuju funkcionalni zahtevi, kao i problem neheterogenosti FZ koja je u opštem slučaju neizbežna. Ovo pitanje je zapravo pitanje praktične primene aksiome nezavisnosti na realni problem u najdirektnijem smislu.
- Kako možemo da aksiomu #1 izrazimo koristeći poznati matematički aparat?
- Kako možemo da napravimo razliku između funkcionalnih zahteva i ograničenja? Da li je kriterijumu tolerancija dovoljan, ili se ovo pitanje mora da dublje istraži i pronađu neki drugi atributi koji će razliku učiniti suštinskom? Ovde ne treba postaviti pitanje smisla ograničenja kao kategorije, jer je ograničenje jedna od ključnih odrednica ne samo procesa projektovanja, već i inženjerskog metoda uopšte.
- Kada zavisnost između funkcionalnih zahteva, FZ, i parametara projektovanja, PP, nije linearna, kako se mogu odrediti članovi matrice projektovanja, i šire, kakav se matematički aparat može primeniti kao zamena za jednačinu projektovanja $\{FZ\} = [A]\{PP\}$?
- Kako dokazujemo teoreme i korolarijume koje izvodimo iz aksioma projektovanja?

3.1 Grafičko predstavljanje jednačine projektovanja

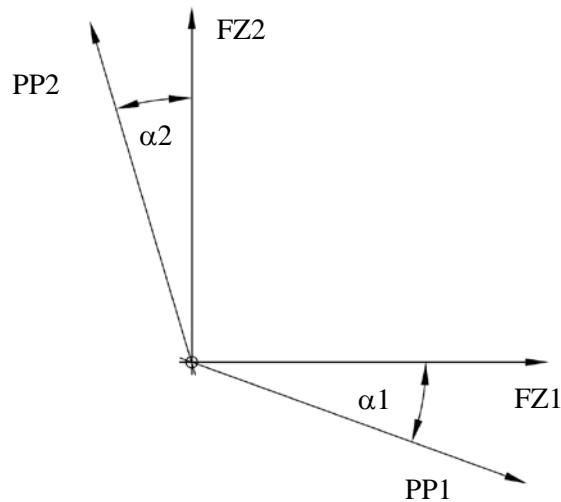
Jednačina projektovanja definisana relacijom $\{FZ\} = [A]\{PP\}$ u slučaju dvodimenzionalnog problema glasi:

$$\{FZ\} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{bmatrix} \{PP\} \longrightarrow \begin{aligned} FZ_1 &= A_{1,1}PP_1 + A_{1,2}PP_2 \\ FZ_2 &= A_{2,1}PP_1 + A_{2,2}PP_2 \end{aligned}$$

Pošto su FZ1 i FZ2 međusobno nezavisni, sledi da su FZ ose ortogonalne. Ortogonalnost u funkcionalnom prostor podrazumeva da je aksioma #1 zadovoljena.

Ipak, to ne podrazumeva da ortogonalnost postoji i u fizičkom domenu, odnosno da su korespondentne PP1 i PP2 ose međusobno ortogonalne. Aksioma #1 ne zahteva ovu vrstu ortogonalnosti, niti bi takav zahtev bio logičan, jer se rešenja u fizičkom domenu proizvoljno biraju, pa samim tim sledi da je i ugao između PP osa takodje proizvoljan.

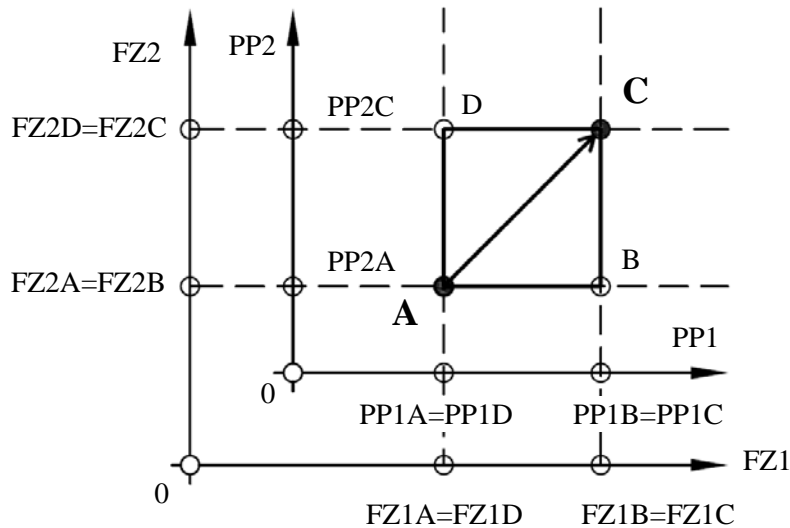
Veza između funkcionalnog i fizičkog domena određena je uglovima koji predstavljaju uglove između FZi i PPi osa respektivno. Ovi uglovi su prikazani na slici 6.



Slika 6: Uglovi između koordinatnih osa funkcionalnog i fizičkog domena za slučaj 2d matrice projektovanja.

Dalje se detaljnije razmatraju tri karakteristična slučaja vrednosti uglova α_1 i α_2 .

Slučaj I: $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$



U ovom karakterističnom slučaju koordinatne ose funkcionalnog i fizičkog domena su međusobno paralelne, odakle sledi da su koordinatne ose fizičkog domena su ortogonalne. To dalje implicira da su FZ1 zavisi samo od PP1 i da FZ2 zavisi samo od PP2.

Osnovni zadatak projektovanja je da se projektno rešenje prevedu iz neke inicijalne tačke A, određene sa (FZ1A, FZ2A) i (PP1A, PP2A), u neku željenu tačku C određenu sa (FZ1C, FZ2C) i (PP1C, PP2C), u oba domena, funkcionalnom i njegovoj slici, fizičkom domenu. Projektovanje se po pravilu sekvencijalno odvija, tako što se zadovoljava jedan po jedan funkcionalni zahtev.

Ukoliko projektant krene od zadovoljavanja funkcionalnog zahteva FZ1, onda će korigovati PP1, počev od PP1A sve dok FZ1A ne prevede u željenu vrednost FZ1B=FZ1C kojoj odgovara PP1B=PP1C. Zatim se prelazi na zadovoljavanje drugog funkcionalnog zahteva, korigovanjem parametra projektovanja PP2, počev od PP2B do pronalaženja one vrednosti PP2C koja FZ2B prevodi u FZ2C. Uočava se da zbog ortogonalnosti u fizičkom domenu, promena FZ2 ne utiče ni na koji način na već ostvarenu vrednost FZ1C. Ovaj proces ostvaren je kroz sekvencu ABC.

Analogno prethodno navedenoj sekvenci, projektant može da prevodjenje projektog rešenja iz tačke A u C ostvari tako što bi krenuo od funkcionalnog zahteva FZ2. Menjajući parametar PP2A do dostizanja neke vrednosti PP2D koja FZ2A prevodi u FZ2D=FZ2C. Zatim se prelazi na zadovoljavanje funkcionalnog zahteva FZ1, tako što se promenom PP1D u PP1C funkcionalni zahtev FZ1 prevodi iz FZ1D u FZ1C, čime se postavljeni zahtev u potpunosti ispunjava. I u ovom slučaju je očigledno da zbog ortogonalnosti koordinatnih osa u fizičkom domenu, promena FZ1 ne utiče na već ostvarenu vrednost FZ2. Ovaj proces evolucije projektog rešenja ostvaren je kroz sekvencu ADC.

Očigledno je da su dva varijantna procesa projektovanja, odnosno prevodjenja projektog rešenja iz inicijalnog stanja A u željeno C, ostvarena kroz dve ekvivalentne putanje, odnosno:

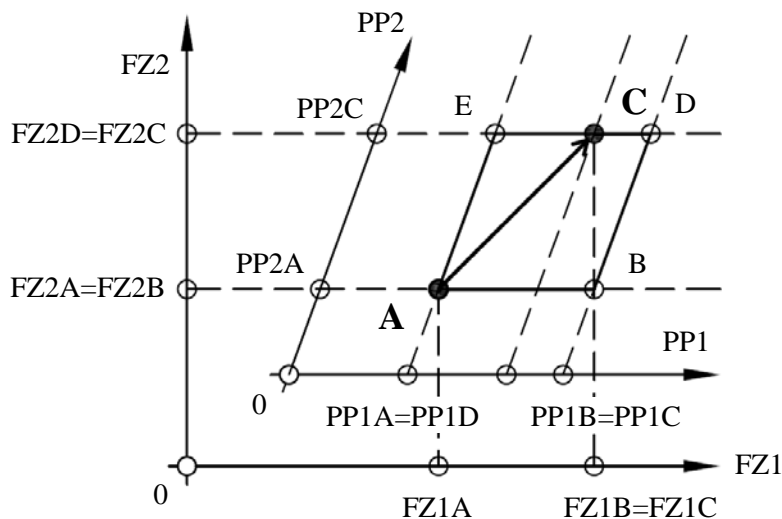
$$A \longrightarrow C \Rightarrow \widehat{ABC} \sim \widehat{ADC} \quad (8)$$

Ovaj slučaj odgovara nespregnutom projektom rešenju, pa jednačina projektovanja glasi:

$$\{FZ\} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & 0 \\ 0 & A_{2,2} \end{bmatrix} \{PP\} \longrightarrow \begin{aligned} FZ_1 &= A_{1,1}PP_1 \\ FZ_{12} &= A_{2,2}PP_2 \end{aligned}$$

Kod nespregnutog rešenja možemo da menjamo bilo koji PPi bez bojazni od mogućih implikacija na ostale FZj. To je osnovna odlika nespregnutog tehničkog rešenja.

Slučaj II: $\alpha_1 = 0, \alpha_2 \neq 0$



Analogno prethodnom slučaju, moguće je, slobodnim izborom, krenuti od zadovoljavanja funkcionalnog zahteva FZ1 promenom korespondentnog parametra projektovanja PP1. Polazeći od vrednosti PP1A, parametar projektovanja PP1 se menja do vrednosti PP1B kojom se FZ1 dovodi do željene vrednosti FZ1C. Zatim se prelazi na zadovoljavanje funkcionalnog zahteva FZ2. Polazeći od vrednosti PP2A, parametar projektovanja PP2 se menja do vrednosti PP2C kojom FZ2 dostiže željenu vrednost FZ2C. Međutim, zbog neparalelnosti FZ1 i PP1 ose, kretanjem duž izolinijske putanje se

podešava vrednost FZ2, ranije dostignuta vrednost PP1B=PP1C se remeti, a dosezanjem FZ2C parametar projektovanja PP1 dobija neželjenu vrednost PP2D dok prvi funkcionalni zahtev dobija takodje neželjenu vrednost FZ1D. Zbog toga je neophodno uraditi još jedan korak, vratiti se na funkcionalni zahtev FZ1 i ponovnim podešavanjem PP1 parametra projektovanja prevesti FZ1D u željenu vrednost FZ1C. Ovim je projektno rešenje prevedeno iz početnog stanja A u željeno stanje C. Putanja kojom je to postignuto je ABDC, i sadrži tri koraka.

Medjutim, prevodjenje projektog rešenja iz stanja A u stanje C moguće je ostvariti drugačijim redosledom zadovoljavanja funkcionalnih zahteva. Ukoliko se krene od funkcionalnog zahteva FZ2, sledi da će se variranjem parametra projektovanja PP2 dostići željena vrednost FZ2C. Zatim, variranjem parametra projektovanja PP1 od početne vrednosti PP1A do vrednosti PP1C, funkcionalni zahtev FZ1 se dovodi do željene vrednosti FZ1C. Treba uočiti da u ovom slučaju nije potrebno uraditi bilo kakav dodani korak, jer promena PP1 nije uticala na FZ2, pa je projektno rešenje u drugom koraku dovedeno do željene vrednosti C(FZ1C, FZ2C). U ovom slučaju putanja kojom je postignuta ova promena je AEC, odnosno, možemo da napišemo sledeće:

$$A \longrightarrow C \Rightarrow \widehat{ABCD} \neq \widehat{AEC} \quad (9)$$

i dalje, da je putanja AEC bolje rešenje.

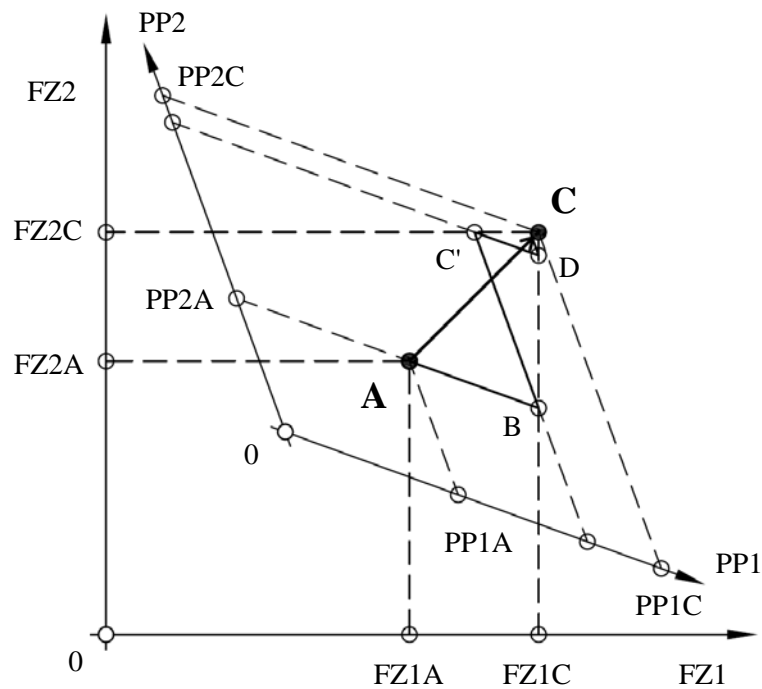
Ovaj slučaj odgovara raspregnutom projektom rešenju, sa trougaonom matricom projektovanja kojoj odgovara sledeća jednačina projektovanja:

$$\{FZ\} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ 0 & A_{2,2} \end{bmatrix} \{PP\} \longrightarrow \begin{matrix} FZ_1 = A_{1,1}PP_1 + A_{1,2}PP_2 \\ FZ_{12} = A_{2,2}PP_2 \end{matrix}$$

Ovim je pokazano da raspregnuto rešenje zavisi od putanje kojom se krećemo u fizičkom domenu. Izbor putanje, odnosno redosleda zadovoljavanja funkcionalnih zahteva je bitno iz dva razloga. Prvo, pogrešnim izborom se ugrožava aksioma #1. Drugo, proces projektovanja postaje bitno složeniji.

U praksi, mnoga projektna rešenja su raspregnuta zato što većina iterativnih procesa imaju tendenciju da vode ka raspregnutim rešenjima. Ovim se jasno ukazuje na suštinu planiranja procesa projektovanja, njegov značaj, kao i potrebe njegovog istraživanja i praktične pažljive primene.

Slučaj III: $\alpha_1 \neq 0, \alpha_2 \neq 0$



U ovom slučaju, promena bilo kog parametra projektovanja, PP1 ili PP2, dovodi do promene vrednosti oba funkcionalna zahteva. Neortogonalnost u fizičkom domenu kao posledicu ima spregnuto rešenje, čija jednačina projektovanja glasi:

$$\{FZ\} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \end{bmatrix} \{PP\} \longrightarrow \begin{aligned} FZ_1 &= A_{1,1}PP_1 + A_{1,2}PP_2 \\ FZ_{12} &= A_{2,1}PP_1 + A_{2,2}PP_2 \end{aligned}$$

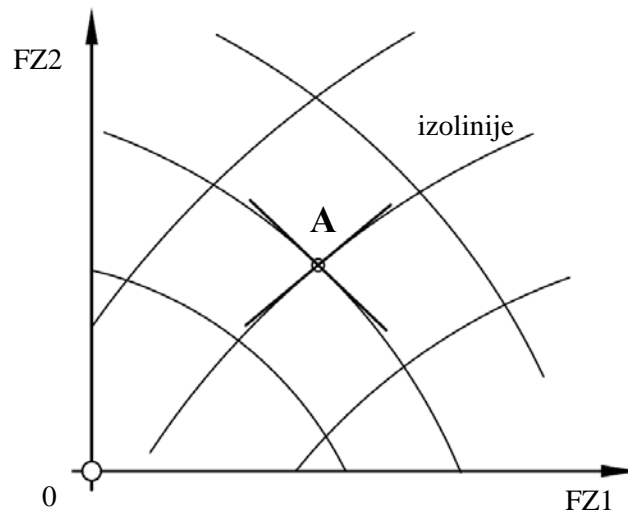
Posledično, proces projektovanja je iterativan i kreće se dugom putanjom ABCD ..., postepeno se približavajući željenom stanju C. Redosled zadovoljavanja funkcionalnih zahteva u ovom slučaju nije bitan. Na ovom jednostavnom primeru, sa samo dva funkcionalna zahteva, pokazano je kako kompleksnost procesa projektovanja dramatično raste ukoliko je projektno rešenje spregnuto.

3.2 Nelinearna matrica projektovanja

U ovom slučaju jednačina projektovanja definisana relacijom $\{FZ\} = [A]\{PP\}$ je linearna, ali je matrica projektovanja $[A]$ nelinearna, pa su shodno tome, njeni članovi nelinearni i važi:

$$A_{i,j} = \frac{\partial(FZ_i)}{\partial(PP_j)} = f(PP_1, PP_2 \dots PP_n) \quad (10)$$

Ovakva matrica projektovanja dovodi to do toga da čak i kod nespregnutog rešenja projektovanje postaje spregnuto. Rešenje ovog problema se može potražiti u lokalnoj linearizaciji, koja nelinearne izolije prevodi u linearne uvodjenjem njihovih lokalnih tangenti, kako je to prikazano na slici 7.



Slika 7: Lokalna linearizacija nelinearne matrice projektovanja.

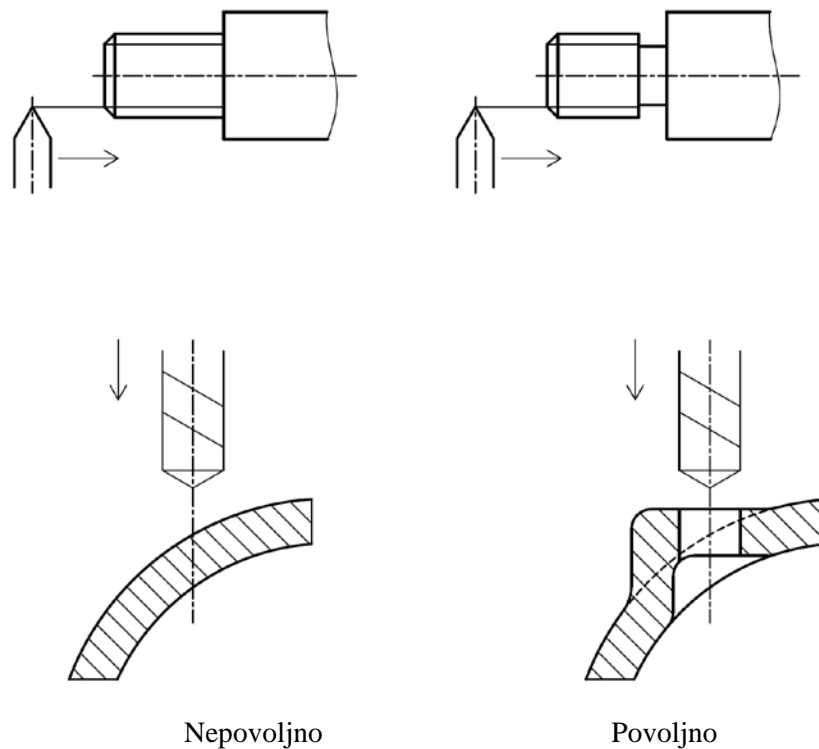
3.3 Projektovanje za proizvodnju

Korišćenjem znanja o tome šta se i kako može izraditi (obraditi, proizvesti) na osnovu postojećih proizvodnih tehnologija, ili raspoloživih tehnologija u nekom konkretnom kontekstu, moguće je ostvariti bolja projektna rešenja.

Generalno, prethodno navedeni stav je jedna od polaznih premisa inženjerskog projektovanja uopšte, a posebno u kada se radi o inženjerima proizvodnog mašinstva. Na slici 8 navode se dva konkretna primera.

Prvi primer se odnosi na izradu navoja struganjem, gde je sasvim očigledno da geometrijski razlozi onemogućavaju izradu navoja po čitavoj dužini, kako je zahtevano u prvom varijantnom rešenju i da se, u cilju rešavanja tog problema mora, takodje struganjem, izraditi jedna pomoćna tehnološka forma u obliku žleba, koja se u proizvodnim tehnologijama naziva 'izlaz alata'. Taj žleb mora da poseduje širinu koja će biti dovoljna da se spreči kolizija noža sa stepenastom delom obratka koji sledi neposredno iza navojnog dela. Naravno, ovaj tehnološki detalj zahteva razmatranje efekta koncentracije napona, što se načelno rešava odgovarajućim standardizovanim oblicima žleba, sa precizno definisanim radijusima na prelazima. Kod takozvanih 'odgovornih' delova, na primer ankera za prednaprezanje tela frikcionne prese ili sličnih sklopova koji su visokopterećeni, oblik izlaza alata je predmet posebnih studija.

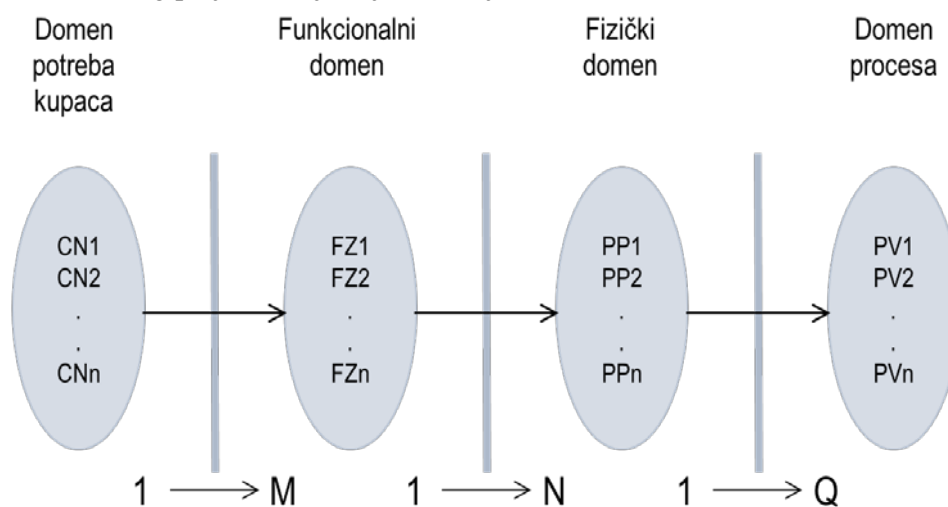
Drugi primer se odnosi na izradu otvora bušenjem na kućištu izradjenog tehnologijom livenja. Sasvim je očigledno da pristup burgije u polaznom rešenju nije tehnološki povoljan jer generiše radialnu komponentu koja generalno, nije predviđena da postoji u slučaju bušenja burgijom. U najmanjem, to će proizvesti grešku lokacije otvora, a može da dovede i do loma burgije. Zato, projektant koji razume tehnološku dimenziju stvaranja nekog inženjerskog rešenja, mora da razreši ovaj problem. On se jednostavno rešava tehnološkim detaljem koji je naveden na slici 8. Stvaranjem površine koja je upravna na pravac bušenja, čini proces formiranja otvora bitno jednostavnijim.



Slika 8: Primeri konstrukcionih rešenja koja su neprilagodjena i prilagodjena konkretnom obliku tehnologije obrade

Prethodno navedeni primeri i ponudjena rešenja imaju za cilj samo da ilustruju potrebu razmatranja procesnog domena u fazi stvaranja inženjerskih rešenja koja kao svoj konačni ishod imaju fizički proizvod. Za navedene konkretne slučajeve, moguće je ponuditi i neka druga rešenja (nejednoznačnost je invarijanta procesa projektovanja!), koja bitno unapređuju polazno rešenje, ali to ovde nije primarni cilj. Takodje, bitno je naglasiti i to da se pitanje procesnog domena treba da razmatra na integrisani način, odnosno da se u obzir uzme ukupni domen proizvodnih procesa relevantnih za konkretan skup funkcionalnih zahteva. To po pravilu uključuje i tehnologiju montaže. Sledi da je procesni domen vrlo složen i da traganje za dobrim rešenjem, odnosno rešenjem koje zadovoljava obe aksiome projektovanja nije ni malo jednostavan inženjerski zadatak.

Kao ishod prethodno navedenog, sledi da je pored domena kupaca, domena funkcionalnih zahteva i fizičkog domena, koji su do sada razmatrani, neophodno uvesti i četvrti domen, domen proizvodnih procesa. Ovim se proces projektovanja posmatra kao niz od **tri sukcesivna preslikavanja** nad ukupnim prostorom aksiomatskog projektovanja koji se sastoji iz **četiri domena** (slika 9).



Slika 9: Četvrti domen aksiomatskog projektovanja – domen proizvodnih procesa

Dakle, posle prvog preslikavanja funkcionalnog u fizički domen kojim se kroz zadovoljavanje usvojenog skupa funkcionalnih zahteva pronalazi korespondentni skup parametara projektovanja kojim se definiše proizvod, sledi drugo preslikavanje kojim se parametri projektovanja, koji uslovno postaju funkcionalni zahtevi za proizvodni proces, određuje odgovarajući skup procesnih promenljivih, PV (procesne varijable), kojima se definiše proizvodni proces, kao druga komponenta projektnog rešenja. I ovo preslikavanje treba da zadovolji obe aksiome projektovanja. Formalno, ovo preslikavanje se može opisati novom jednačinom projektovanja:

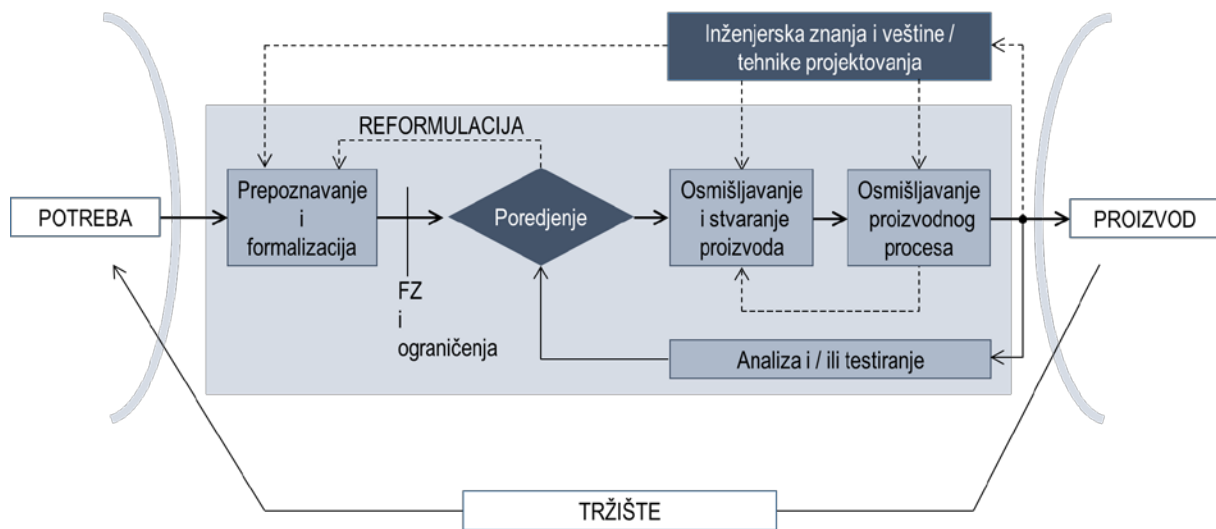
$$\{PP\} = [B]\{PV\} \quad (11)$$

Dodavanjem prethodno formulisane jednačine projektovanja za proizvod, $\{FZ\} = [A]\{PP\}$ sledi:

$$\{FZ\} = [A][B]\{PV\} = [C]\{PV\} \quad (12)$$

Model procesa projektovanja prikazan na slici 2 se sada može proširiti na sva četiri domena kako je to navedeno na slici 10. Treba učiti da je ranije definisan blok koji se odnosio na osmišljavanje i stvaranje na ovom dijagramu toka prikazan kroz dva bloka, jedan koji se odnosi na proizvod, a drugi na proizvodni proces koji omogućava njegovu fizičku realizaciju. Projektovanje proizvoda i projektovanje tehnologije su dva jako spregnuta procesa. Po pravilu, ovde imamo tehnologiju kao osnovu iz koje nastaju proizvodi (tehnologija kao generator proizvoda!). Zato bi adekvatnije bilo da se ova dva bloka prikažu kao

paralelni blokovi sa medjusobnom dvosmernom spregom koja omogućava neprekidnu interakciju, odnosno stvaranje proizvoda koje nije samo vodjeno postavljenim skupom funkcionalnih zahteva, već i tehnološkim mogućnostima kojim stoje na raspolaganju.



Slika 10: Prošireni model procesa aksiomatskog projektovanja sa integrisana 4 domena.

Primenjujući koncept aksiomatskog projektovanja na projektovanje proizvoda i projektovanje njemu pripadajućeg proizvodnog procesa, sledi naredna teorema.

Teorema 9: Za proizvod koji se može proizvesti, matrica projektovanja za proizvod, $[A]$, pomnožena matricom projektovanja za proizvodni proces, $[B]$, mora da produkuje dijagonalnu ili trougaonu matricu $[C]$, u suprotnom, proizvod se ne može proizvesti.

4. Informaciona aksioma i njene implikacije

Druga aksioma se odnosi na minimizaciju informacionog sadržaja. Ovo praktično znači da je između velikog broja izvodljivih rešenja koja zadovoljavaju usvojeni skup funkcionalnih zahteva, i zadovoljavaju Aksiomu 1, najbolje ono koje ima najmanji informacioni sadržaj.

Pitanja koje se ovde nameću po sebi i na koje se mora ponuditi konkretan odgovor su sledeća:

1. Šta je priroda informacije u procesu projektovanja?
2. Šta se podrazumeva pod informacionim sadržajem?
3. Kako se meri informacija u projektovanju?

Dalje se nude neki od mogućih odgovora na ova i povezana pitanja. Ali pre toga, bitno je da se ukaže na jedan vrlo značajan aspekt informacione aksiome u kontekstu teorije aksiomatskog projektovanja.

Preslikavanje između prostora funkcionalnih zahteva u fizički prostor rešenja koja zadovoljavaju postavljani skup funkcionalnih zahteva je nejednoznačan. Za jedan skup funkcionalnih zahteva moguće je beskonačni broj rešenja koja zadovoljavaju taj skup funkcionalnih zahteva. Aksioma nezavisnosti, mada kategorička jer odbacuje takozvana spregnuta rešenja, u suštini ničim ne utiče na neodređenost ove vrste. Čak ni uvođenje ograničenja u proces preslikavanja, nasuprot očiglednoj činjenici da redukuju fizički prostor u koje je moguće tragati za onim skupom parametara projektovanja koji zadovoljavaju zadati skup funkcionalnih zahteva, suštinski ne utiče na neodređenost preslikavanja. Ona ostaje očuvana. Međutim, to nije slučaj sa Informacionom aksiomom. Informaciona aksioma u proces preslikavanja unosi regulacionu komponentu, kroz kategoričku tvrdnju da je najbolje ono rešenje koje ima najmanji informacioni sadržaj. Ovim se neodređenost tipa nejednoznačnosti preslikavanja razrešava, jer se u beskonačnom skupu mogućih rešenja može se uvek izdvojiti jedno, koje zadovoljava Aksiomu nezavisnosti. Dakle, Informaciona aksioma obezbeđuje da se preslikavanje jednog skupa funkcionalnih zahteva u beskonačni skup rešenja može redukovati na jednoznačno preslikavanje: preslikavanje jednog skupa funkcionalnih zahteva u jedan korespondentni skup parametara projektovanja, odnosno jedno rešenje. Ovo je vrlo bitna odlika Informacione aksiome. Ona je suštinski bitan komplement aksiome nezavisnosti!

4.1 Definicija i metrika informacije

Informacioni sadržaj procesa projektovanja može se definisati kao **količina znanja** potrebnog da se zadovolji usvojeni skup funkcionalnih zahteva na određenom nivou hijerarhije funkcionalnih zahteva.

Znanje neophodno da se zadovolji neki konkretan funkcionalni zahtev zavisi od **verovatnoće** njegovog ostvarivanja. Ukoliko je zadatak tako definisan da se on uvek može da ostvari, bez prethodnog ili dodatnog znanja, onda je verovatnoća uspeha jednaka jedinici, dok je potrebna količina informacija jednaka nuli. Kod realnih problema, ovaj trivijalni slučaj nije moguć. Uvek je potrebno određeno znanje da bi se zadovoljili različiti aspekti nekog funkcionalnog zahteva. U projektovanju mi se uvek trudimo da obezbedimo dovoljno znanja, tako da se verovatnoća ostvarivanja tog funkcionalnog zahteva kroz odgovarajuća rešenja u fizičkom domenu bude što veća. Ipak, nezavisno od naših napora, ona uvek ostaje manja od jedinice.

Pošto verovatnoća uspeha u rešavanju postavljenog problema zavisi od njegove kompleksnosti, informacije je konsekvantno tome povezana sa kompleksnošću. Sa tim u vezi, projektno rešenje se naziva kompleksnim onda kada je verovatnoća njegove uspešne realizacije mala. To se dešava onda kada je informacioni sadržaj neophodan za zadovoljenje postavljenog skupa funkcionalnih zahteva veliki. Ovakva situacija nastaje onda (a)kada su tolerancije funkcionalnog zahteva male, što zahteva veliku tačnost za njegovo ostvarenje, ili onda (b)kada je broj delova (sadržaj) projektnog rešenja veliki – veliki informacioni sadržaj da bi se sistem u celini učinio funkcionalnim.

Model informacije:

1. Model u obliku racionalnog izraza:

$$I = 1/p_i \quad (13)$$

pri čemu je p_i individualna verovatnoća ostvarivanja nekog od funkcionalnih zahteva, ili neke od njegovih komponenti. Mada intuitivno privlačan, ovakav model informacionog sadržaja je matematički i praktično nepogodan za modeliranje ukupnog informacionog sadržaja projektnog rešenja, posebno za slučaj postojanja takozvanih spregnutih verovatnoća, koje se normalno pojavljuju kod raspregnutog i spregnutog rešenja. Nepogodnost je praktične prirode, jer sumiranje racionalnih članova vodi ka vrlo složenim i nepreglednim (netraktabilnim) rešenjima. Takodje, kada je verovatnoća $p_i = 0$, tada informacioni sadržaj teži beskonačnosti, što odstupa od prethodno navedene ideje normiranja informacionog sadržaja, odnosno njegovog ograničavanja na interval $I = (0, 1)$.

2. Model u obliku logaritamske funkcije:

$$I = \log_2(1/p) = -\log_2(p) \quad (14)$$

odakle sledi da je $I = 0$ uvek kada je $p = 1$. U ovom slučaju, jedinica informacije je bit. Dalje sledi, u slučaju spregnute verovatnoće, da se model informacionog sadržaja prevodi u aditivni model, što je vrlo pogodno iz perspektive praktične primene:

$$I = \log_2 \frac{1}{p_i + p_j} = -[\log_2(p_i) + \log_2(p_j)] = I_1 + I_2 \quad (15)$$

što je vrlo pogodno iz perspektive praktične primene, jer se ukupni informacioni sadržaj projektnog rešenja ovim iskazuje kao zbir individualnih informacionih sadržaja.

4.2 Merenje informacije u kontekstu proizvodnog sistema

U kontekstu proizvodnog sistema, projektovanje je uvek povezano sa tehnološkim mogućnostima sistema.

Projektant uz svoja rešenja specificira geometriju, svojstva materijala, ... koji se moraju zadovoljiti u proizvodnom procesu. Stoga, informacije koje odredjuju projektno rešenje su povezane sa specifikacijama i tehnološkim mogućnostima proizvodnog sistema.

Informacioni sadržaj je mera uspešnosti u postizanju postavljenih funkcionalnih zahteva (kod projektovanja proizvoda) ili parametara projektovanja (kod projektovanja procesa). Verovatnoća uspeha projektnog rešenja se dobija razmatranjem svih funkcionalnih zahteva u slučaju FZ / PP preslikavanja, ili svih parametara projektovanja u slučaju PP/PV preslikavanja. Na osnovu toga, informacionih sadržaj je odredjen sumiranjem individualnih informacionih sadržaja I_i , $i = (1, n)$. Verovatnoća zadovoljenja

svakog pojedinačnog funkcionalnog zahteva je određena time koliko dobro je specificirani funkcionalni zahtev ostvaren u proizvodnju, dok za slučaj parametra projektovanja, koliko dobro je specificirani parametar projektovanja zadovoljen proizvodnim procesom. Relacija između specifikacija projektanta i tehničkih mogućnosti sistema ilustrovana je na narednoj slici (slika 11).

Logika koja stoji iza ovog pristupa je da se ispita odnos između mogućnosti proizvodnog sistema i specifikacija (zahteva) projektanta. Mogućnost proizvodnog sistema da zadovolji proizvodne specifikacije posmatra se kao statistička veličina, koja je definisana svojim opsegom, SR, i funkcijom gustine verovatnoće koja ima zvonasti oblik (Gausova kriva) i koja je simetrična, sa centralnom tačkom, u kojoj proizvodni sistem ima najveću verovatnoću realizovanja svoje tehnološke funkcije u skladu sa postavljenim zahtevima. Ukupna površina koju zahvata ova kriva je jednaka jedinici. Sa druge strane, specifikacije projektanta se takođe definišu opsegom, DR, koji je jednak širini tolerancijskog polja. Kao i u slučaju SR, i polje DR ima svoju centralnu vrednost, odnosno nominalnu vrednost zahteva projektanta.

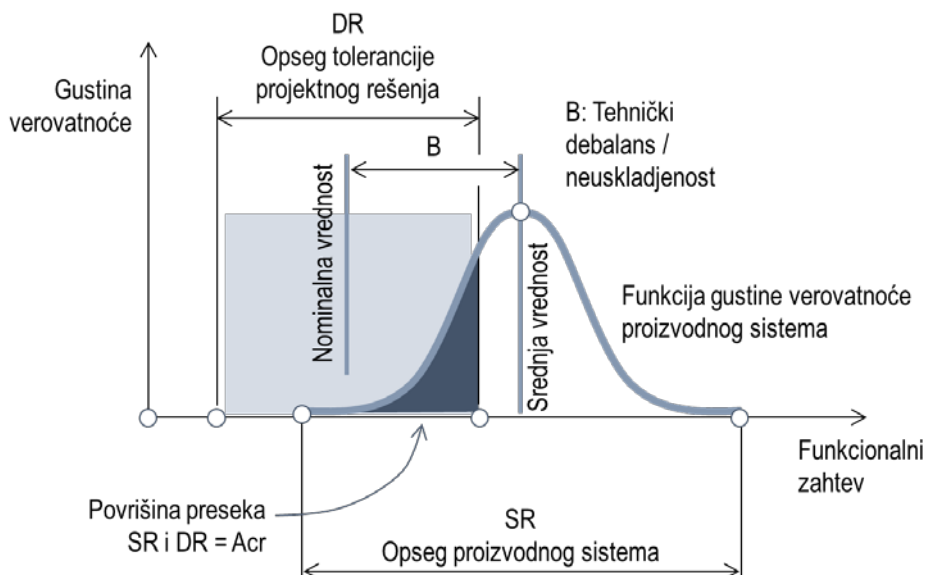
Na slici 11 je prikazan slučaj kada SR i DR imaju delimično preklapanje, i tu površinu označićemo sa A_{CR} .

Generalno, površina preklapanja SR i DR, odnosno A_{CR} , može da uzme vrednost u intervalu (0, 1), odnosno moguća su dva ekstremna slučaja: a) slučaj kada nema preklapanja između zahteva projektanta, DR, i tehnoloških mogućnosti proizvodnog sistema, SR, pa je shodno tome $A_{CR} = 0$, i b) slučaj kada je opseg mogućnosti proizvodnog sistema, SR, manji ili jednak opsegu zahteva projektanta, DR, i kada DR z potpuno preklapa SR, pa je shodno tome $A_{CR} = 1$.

Polazeći od prethodno navedenog, informacioni sadržaj se može definisati sledećom relacijom:

$$I = \log_2(1/A_{CR}), \quad A_{CR} = DR \cap SR$$

$$0 \leq A_{CR} \leq 1 \rightarrow I = (0, \infty) \quad (16)$$



Slika 11: Informacioni sadržaj kao odnos specifikacija (zahteva) projektanta i mogućnosti proizvodnog sistema.

Na slici 11 se može uočiti još jedna bitna promenljiva. To je promenljiva označena slovom B . Ona se odnosi na neuskладjenost mogućnosti proizvodnog sistema i specifikacije, odnosno zahteva projektanta. Ovu neuskладjenost bi mogli da nazovemo i otklonom, što je doslovni prevod za englesku reč 'bias' koju izvorno koristi prof. Nam Suh u svojim teoretskim analizama. Suštinski uslov dobrog projektog rešenja je da otklon B bude što manji, a idealno, jednako nuli.

4.3 Robusnost projektog rešenja

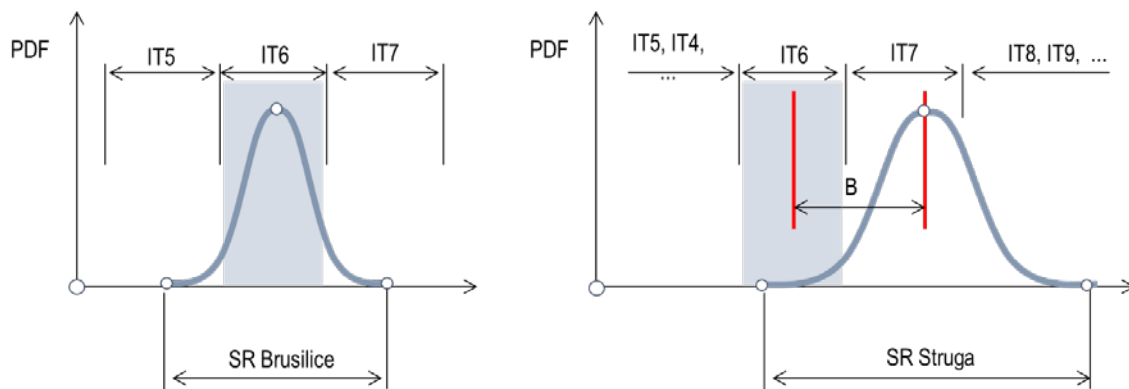
Osnovni cilj procesa projektovanja u kontekstu proizvodnog sistema je redukcija informacionog sadržaja projektog rešenja kojim se zadovoljava usvojeni skup funkcionalnih zahteva. Rešenje koje dozvoljava velike varijacije parametara projektovanja (široka tolerancijska polja iskazana kroz promenljivu DR) se naziva robusno projektno rešenje.

Da bi se postigao visok stepen robusnosti neophodno je:

1. minimizirati (eliminirati) neuskладjenost / otklon B , i
2. smanjiti relativnu disperziju proizvodnog sistema, SR.

Neuskладjenost / otklon B : Promenljiva B je po definiciji mera neuskладjenosti projektog rešenja sa performansama proizvodnog sistema u okviru kojeg se to rešenje želi da fizički realizuje. Na primer, fina obrada na strugu i fina obrada na brusilici. Ono što se na brusilici može da rutinski postigne, na strugu se postiže sa velikim naporom, ili se uopšte ne može da postigne. Ukoliko proizvodni sistem ne poseduje tehnologiju brušenja, onda će to proizvoditi velike teškoće. Ukoliko se taj nedostatak ne može da eliminiše, projektant mora da potraži drugačije rešenja u fizičkom domenu, odnosno da pronadje rešenje sa širim tolerancijama.

Generalno, neuskладjenost projektog rešenja sa performansama proizvodnog sistema je mnogo širi pojam od prethodno navedene neuskладjenosti na nivou mašine alatke. Svaki proizvodni sistem nosi odgovarajući skup kolektivnih ponašanja i kapaciteta, koji zajedno čine nešto što bi mogli da nazovemo tehnološkom kulturom te sredine. Osnovni zadatak projektanta je da uskladi zahteve projektog rešenja sa ukupnom tehnološkom kulturom sredine u kojoj se namerava da to rešenje bude fizički realizovano. Neuskладjenost na nivou ukupne kulture je velika prepreka, barijera koja sprečava da taj sistem realizuje određenu klasu proizvoda, i ne može se rešiti samo kroz unapredjenje performansi obradnih sistema, odnosno tehničke komponente ukupnog proizvodnog sistema.



Slika 12: Grafička ilustracija mere neuskладjenosti B .

Disperzija SR: Disperzija, odnosno vrednost SR, predstavlja meru rasturanja proizvodnih performansi proizvodnog sistema u odnosu na njegovu srednju statističku vrednost. Ovaj fenomen je

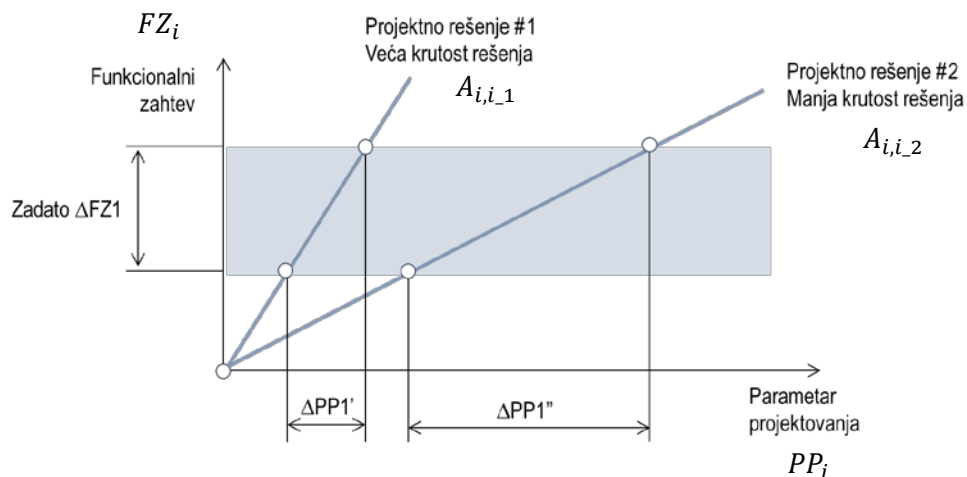
uslovljen čitavim nizom faktora koji se javljaju u realnim uslovima eksploatacije sistema, a mogu se grupisati na tehničke i subjektivne, odnosno one koji su uslovljeni ljudskim faktorom.

Jedan od načina na koji se disperzija proizvodnog sistema može redukovati je bazirana na redukciji informacionog sadržaja smanjenjem krutosti. Krutost je u ovom kontekstu metaforički pojam, koji je povezan sa vrednostima koeficijenata matrice projektovanja, odnosno $FZ_1 = A_{11}PP_1$ i analogijom sa definicijom mehaničke krutosti. Smisao krutosti ilustrovan je na slici 13.

Rešenje sa manjom relativnom vrednošću koeficijenta A (element matrice projektovanja), zahteva manji informacioni sadržaj za realizaciju korespondentnog funkcionalnog zahteva. Takvo rešenje ima manju krutost, odnosno tolerantnije je na varijacije proizvodnog sistema jer dozvoljava veću varijaciju korespondentnog parametra projektovanja, kao što je to ilustrovano na slici 13. Ovim se redukuje relativna disperzija proizvodnog sistema.

Generalno, a kao dodatak Informacionoj aksiomi koja ima regulacioni karakter, krutost se takodje može razumeti kao regulacioni kriterijum, jer među k rešenja, ono rešenje koje ima najmanju vrednost koeficijenta A je najbolje rešenje:

$$PP_{i,optimal} = \min_{k=1, \dots, \infty} A_{ii,k}, k=(1, \infty) \quad (17)$$



Slika 13: Grafička ilustracija koncepta krutosti projektog rešenja.

5. TRIZ

Ovde se navode osnovni okviri jednog posebnog pristupa procesu projektovanja u odnosu na teoriju aksiomatskog projektovanja. Kao i u slučaju teorije aksiomatskog projektovanja, i kroz TRIZ se čini pokušaj da se napravi otklon od tradicionalnog pristupa projektovanju: pokušaji i greške, pristup koji u fizičkom prostoru beskonačnog broja rešenja za isti skup funkcionalnih zahteva traga za najboljim intuitivnim putem, koristeći iskustvo sadržano u heuristici i prilagodjavajući već postojeća rešenja, novim potrebama. Intuitivni pristup je u osnovi iterativni pristup, zato u suštini sporo konvergentan, sa mnogo neizvesnosti, a iz perspektive ekonomije, skup.

Zato je ruski inženjer inovativnog duha, Альтшуллер Генрих Саулович, (1926-1998), pokušao da uvede neki red u tradicionalni pristup projektovanju, da postavi neki novi metodološki okvir koji će proces projektovanja učiniti razumljivijim, upravljivijim i konvergentnijim. I tako je nastala: *Теория Решения Изобретательских Задач* (Teorija inventivnog rešavanja problema), или - ТРИЗ — *набор методов решения технических задач и усовершенствования технических систем; идея ТРИЗ заключается в том, что разные технические задачи иногда решаются одними и теми же методами.*



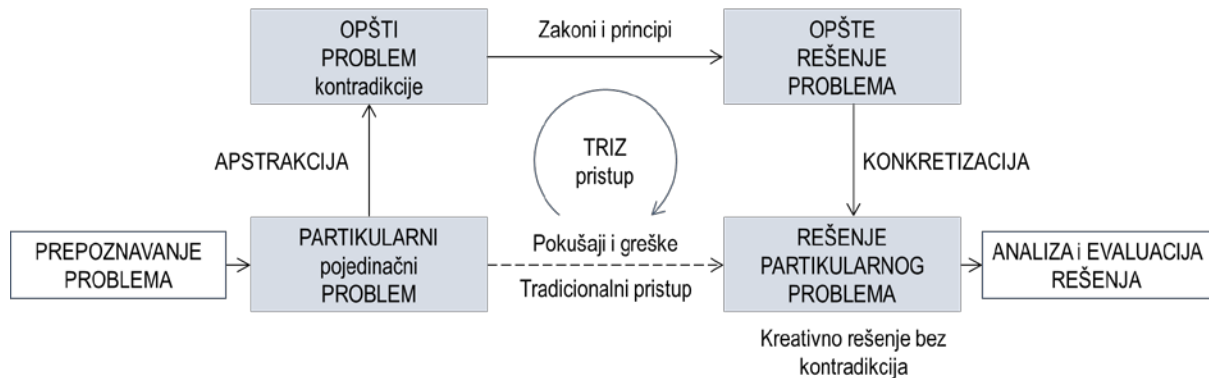
Альтшуллер Генрих Саулович (1926-1998)

TRIZ je danas široko poznat metodološki okvir, takodje i široko rasprostranjen. U Evropi postoji The European TRIZ Association, ETRIA, koja je formirana u 2000 godine u Nemačkoj i koja funkcioniše globalno kao neprofitna organizacija, sa ciljem sistemskog razvoja TRIZ metodologije na dugoročnim osnovama.

Altšuler je, odmah posle Drugog svetskog rata, krenuo sa istraživačkim aktivnostima na razvoju jedne opšte metodologije projektovanja, polazeći od ideje da sva kreativna rešenja problema počivaju na jednoj zajedničkoj metodološkoj matrici. Da bi to dokazao sistematski je analizirao oko 40.000 patenata. Rezultat ovog rada je TRIZ koji u svojoj osnovi ima 40 principa kreativnog rešavanja problema, uz nekoliko zakona evolucije tehničkih sistema.

TRIZ je baziran na logici koja se prikazuje na slici 14. Polazna tačka je partikularni problem, nastao kao posledica partikularne potrebe za nekim proizvodom, procesom, organizacionom strukturom. Dakle, i tu je polazna tačka neka društvena potreba, ili potreba tržišta. Trivijalni pristup u rešavanju ovako nastalog problema je da se kroz pokušaje i greške dodje do pojedinačnog rešenja koje taj problem rešava. Međutim, Altšuler je ustanovio da je, prividno duža putanja, zapravo mnogo izvesnija putanja, upravljivija, konvergentnija i jeftinija. To je putanja koja pojedinačni problem, dakle izolovani specifični problem, prevodi u širi kontekst opšteg problema, odnosno opšteg problema koji obuhvata širu klasu problema koji su međusobno slične prirode i koji su slični i polaznom partikularnom

problemu. Dakle, prvi korak je APASTRAKCIJA, kojom se od pojedinačnog krećemo ka opštem. U prostoru rešavanja opšteg problema, suština je u pronalaženju takozvanih kontradikcija. Rezultat aktivnosti u prostoru opšteg problema su neki novi princip i zakonitosti koje vode ka narednom koraku, a to je pronalaženje opšteg rešenja za razmatranu klasu problema. Dostizanjem opšteg rešenja, ide se ka narednom, trećem i poslednjem koraku, ka pojedinačnom rešenju. Taj korak je KONKRETIZACIJA. Konkretizacijom opšteg rešenja dolazi se do željenog partikularnog rešenja, kojim je sve inicirano. Rezultat je KREATIVNO rešenje, bez KONTRADIKCIJA. Naravno, rezultat je i opšte rešenje i pripadajuća teorijska osnova, odnosno njemu relevantni principi i zakoni, kojim se obogaćuje prostor znanja inženjerskih nauka i inženjerske struke.



Slika 14: Metodološki prostor TRIZ

Ranije spomenute **kontradikcije**, odnosno konflikti sa kojima se projektant sreće u traganju za izvodljivim rešenjem postavljenog problema, dele se na dve grupe za koje se vezuju pripadajući operatori:

Operator **TEHNIČKE** kontradikcije: definiše konflikte između elemenata sistema, odnosno tehničkog rešenja postavljenog problema.

Operator **FIZIČKE** kontradikcije: odnosi se na konflikte u zahtevima unutar jednog elementa sistema koje su fizičke prirode.

Dalje, TRIZ poznaje i takozvanu funkciju idealnosti, koja se definiše kao:

$$Idealnost = \frac{KORISNI\ sadržaji\ rešenja}{LOŠI\ (štetni)\ sadržaji\ rešenja}$$

Idealnost rešenja problema, odnosno evolutivno kretanje ka tom cilju, ostvaruje se smanjivanjem ili eliminacijom kontradikcija.

6. C-K teorija

C-K teorija projektovanja je još jedan alternativni pristup formalizaciji procesa projektovanja, koji se bazira na dve osnovne kategorije: koncept i znanje. Odakle dolazi i naziv ovog teorijskog pristupa (Concept-Knowledge Theory).

C-K teorija je istovremeno i **teorija projektovanja** i **teorija rezonovanja**, odnosno zaključivanja u projektovanju. Ona procesu projektovanja kroz okvir zaključivanja kao logičkog procesa koji u sebi sadrži mehanizam ekspanzije, odnosno širenja prostora znanja i koncepata, koji kao svoj konačni ishod ima produkciju prethodno nepoznatih objekata ili generalno, nepoznatih entiteta. Pod pojmom nepoznati entitet, podrazumeva se novo projektno rešenje, nov proizvod, proces ili organizaciona struktura, u fizičkom ili apstraktnom svetu informacija. Kretanje ka nepoznatom u procesu stvaranja, što je suština procesa projektovanja, podrazumeva ekspanziju, odnosno kreativnost kao čisto psihološku kategoriju, jednu od mnogih koje svrstavamo u korpus mentalnih procesa ljudskog mozga, a koja je osnova ne samo inženjerskog projektovanja po sebi, već i onoga što nazivamo otkrićem, invencijom i inovacijom.

C-K teorija nastala je krajem devedesetih godina prošlog veka, kada je Armand Hatchuel svoja istraživanja fokusirao na aspekte kreativnosti i mišljenja u procesu inženjerskog projektovanja (Hatchuel, Armand (1996). *Théories et modèles de la conception*, Cours d'ingénierie de la conception. Paris: École des Mines de Paris). U stvari, težište ove teorije je usmereno na objašnjavanje procesa projektovanja iz perspektive psihologije, odnosno traganja za odgovorom na pitanje **kako ljudski mozak stvara nove koncepte i nova znanja u procesu projektovanja i kakve veze postoje između koncepta i znanja u tom procesu.**

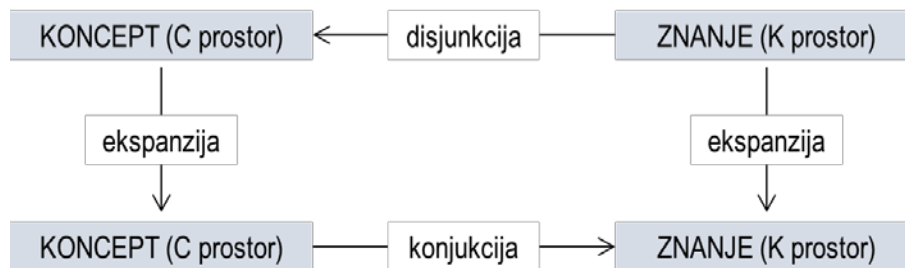
Prostor znanja u procesu projektovanja definišemo kao **skup propozicija sa logičkim statusom**, koji **projektant koristi u procesu projektovanja**. Prostor znanja opisuje sve objekte i istine koje su uspostavljene i koje postoje kao konzistentan skup, gledano iz perspektive projektanta. Prostor znanja je proširiv, odnosno otvoren za nove istine koje se sazajnim procesima mogu pojaviti, a koje imaju uticaj na proces inženjerskog projektovanja.

Koncept se definiše kao **propozicija bez logičkog statusa u prostoru znanja**. Ključna pozicija u C-K teoriji je hipoteza da je **koncept nužna polazna tačka u procesu projektovanja**. Bez koncepta, proces projektovanja se redukuje na standardnu optimizaciju, odnosno rešavanje problema. Koncepti dodeljuju postojanje nepoznatog entiteta, koji ima neke osobenosti željene od strane projektanta. Koncepti se mogu deliti ili uključivati, ali se ne mogu pretraživati niti istraživati.

C-K teorija ima svoje operatore. Postoji četiri operatora: $C \rightarrow K$, $K \rightarrow C$, $C \rightarrow C$, $K \rightarrow K$, odnosno

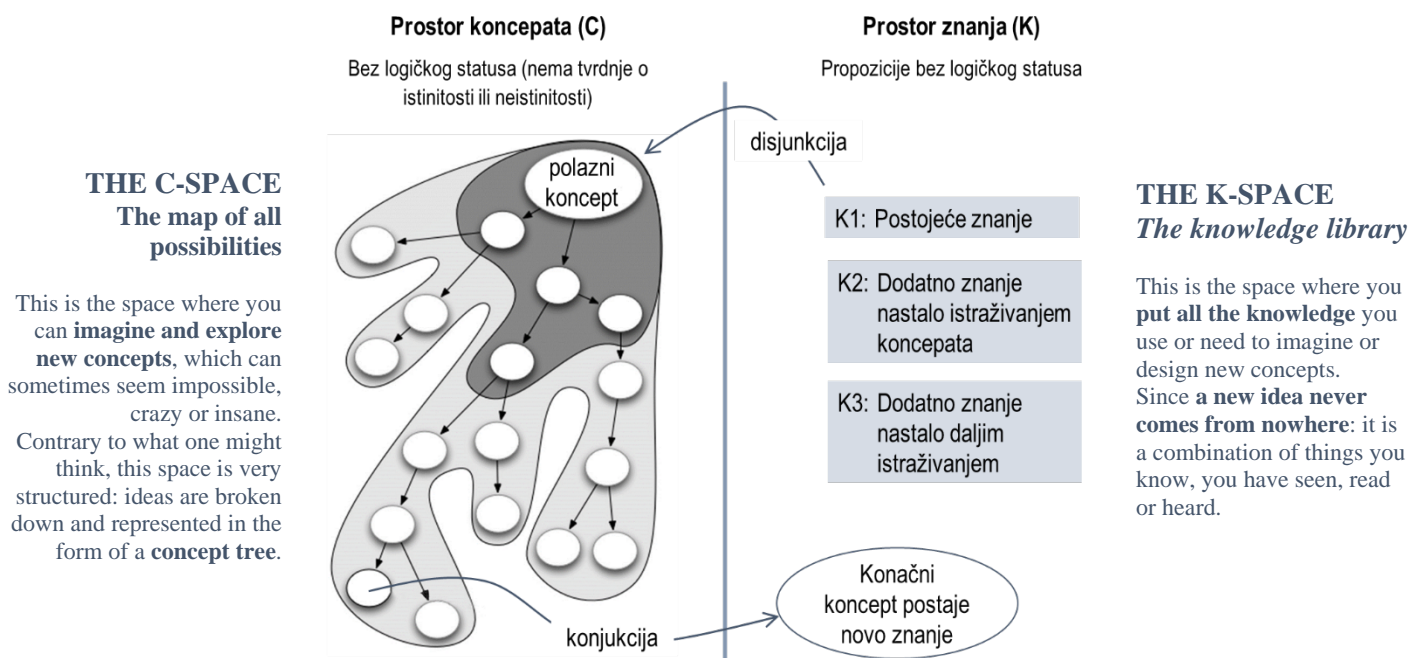
- Početni koncept se deli pomoću propozicija iz prostora znanja $K: K \rightarrow C$
- Ova particija dodaje nova svojstva konceptima i stvaraju nove koncepte: $C \rightarrow C$
- Konjunkcija $C \rightarrow K$ omogućava da ovo širenje u prostoru koncepata C može posledično izazvati širenje u prostoru znanja $K: K \rightarrow K$

Slika 15 ilustruje procese koji se dešavaju u prostoru koncepata i prostoru znanja.



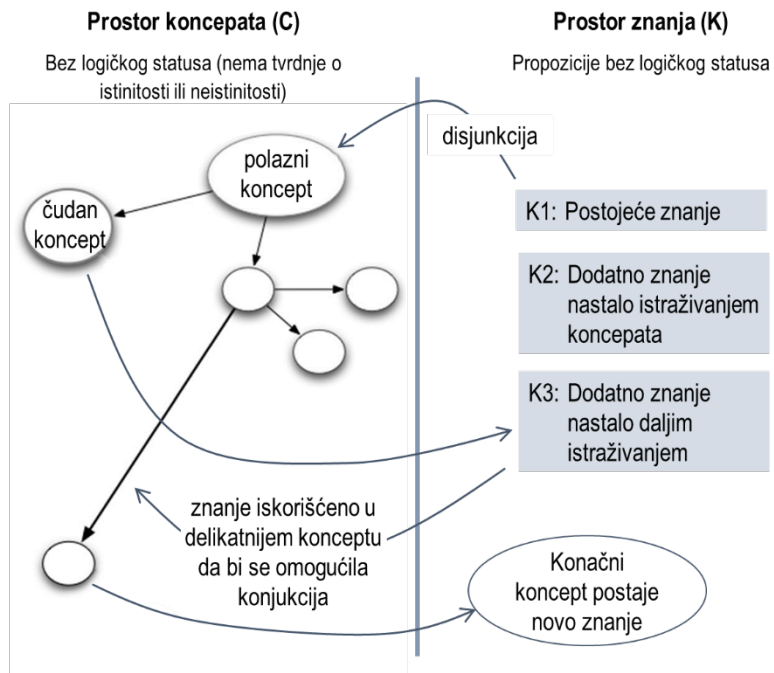
Slika 15: Grafički prikaz četiri operatora C-K teorije projektovanja u prostoru znanja i konceptata.

Na slici 16 ilustrovan je ukupni koncept C-K teorije, kao procesa u kojem se ekspanzija konceptata o novom rešenju pretvara u nova znanja. Uočava se nejednoznačnost procesa projektovanja, odnosno svojstvo procesa projektovanja da za jedan te isti skup funkcionalnih zahteva, odnosno jedan te isti problem, generiše neograničeni skup rešenja.



Slika 16: Grafički prikaz ekspanzije konceptualnog prostora i prostora znanja u okviru C-K teorije projektovanja.

Na slici 17 prikazana je vrednost takozvanog 'čudnog' odnosno apsurdnog koncepta, koji sigurno ne vodi ka realizaciji, ali se njime proširuje prostor raspoloživog znanja za projektovanje i time doprinosi stvaranju boljih realno ostvarivih konceptata.



Slika 17: Vizuelizacija uloge 'čudnog', koncepta i njegove uloge u procesu projektovanja.

Par misli, potencijalno korisnih za dobrog projektanta:

'Sve istine su lake za razumevanje onog trenutka kada ih pronadjemo. Problem je u njihovom pronalaženju!'

Galileo Galilei

'Razmišljaj o kraju pre početka!'

Leonardo da Vinči

'Nije dobro kada pokušavamo da zaustavimo proces stvaranja novog znanja. Neznanje nikada nije vrednije od znanja!'

Enriko Fermi

'There is nothing so practical as a good theory'

'If you want truly to understand something, try to change it'

Kurt Lewin

'If you want to make enemies, try to change something'

Woodrow Wilson
