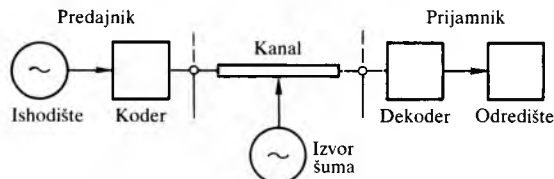


TEORIJA INFORMACIJE, znanstvena disciplina koja se bavi informacijama kao sredstvom komuniciranja. Komunikacijski je uređaj sustav od najmanje dva elementa: predajnika i prijamnika (sl. 1). Ishodište (predajnik) jest skup elemenata međusobno povezanih skupom relacija koji se naziva strukturom; to isto vrijedi i za prijamnik.



Sl. 1. Principna shema komunikacijskog sustava

Uz materiju i energiju, koje su u fizici, prirodnim znanostima i tehničari univerzalni i temeljni pojmovi, i informacija je postala temeljnim i sveobuhvatnim pojmom. Informacija se susreće na svakom koraku, i u tehničkim i u prirodnim sustavima. Ima je u obradbi podataka, u komunikacijskoj tehnici, regulaciji, prirodnim jezicima, biologiji i u obradbi informacija u živim stanicama. Tehnologija elektroničkih računala i suvremene komunikacije zajedno omogućuju neslućen razvoj informacijskih procesa.

Statistička struktura informacije. C. E. Shannon postavio je u radu *A mathematical theory of communication* (1948) matematičku definiciju pojma informacije. On u uvodu kaže da su temelje toj teoriji postavili H. Nyquist i R. V. L. Hartley, a da njegov rad obuhvaća i druge faktore koji se odnose na efekt šuma u kanalu za prijenos informacije i zaštitu izvorne vijesti, zbog statističke strukture informacije i svojstva njezina konačnog odredišta.

Shannonova mjera informacije, koja se naziva bit (*binary digit*), omogućila je kvantitativno razmatranje međusobnih odnosa koji se dotad nisu mogli egzaktno matematički opisati. Poslije su mnogi autori upotrebljavali pojmove komunikacija i informacija, zamjenjujući ih jedan drugim. Da bi se izbjeгла ta dvojakost, uvedena je ova definicija: komunikacijom se smatra prijenos mjerljive veličine koja se naziva informacijom, pa je komunikacija, dakle, čin kojega je rezultat informacija.

Zahvaljujući statističkoj strukturi izvorne vijesti, kako Shannon kaže u uvodu, njezina se mjera osniva na vjerojatnosti s obzirom na budućnost. Mjera je to energetskog sustava koji je sastavljen od »strojeva« za postavljanje hipoteze o vijestima što će se primati u budućnosti. To je proces u kojem se spomenuti strojevi opisuju izrazom koji daje podatak o broju bita po znaku:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

gdje je H entropija izvora informacije, n broj znakova, p_i vjerojatnost njihove pojave, dok je $\log_2 p_i = \log_2 p_i$. Vrijednost entropije raste s brojem znakova.

Mana je entropije da ne obuhvaća informaciju u njezinoj bitnosti jer je ograničena na sasvim specijalan aspekt koji je važan za tehnički prijenos informacije i za njezino uskladištenje. Da li je neka vijest (tekst) smisljena, razumljiva, ispravna, pogrešna ili čak bez ikakva značenja, to se uopće ne uzima u obzir. Također se ne postavlja važno pitanje odakle vijest potječe (predajnik) ni kome je namijenjena (prijamnik).

Za Shannonov pojam informacije potpuno je nevažno je li neki slijed slova tekst s kakvim značenjem ili je nastao npr. bacanjem kocke, dakle sasvim slučajno. Zvuči također paradoksalno da slučajni slijed slova ima, s gledišta teorije informacija, maksimum informacijskog sadržaja, dok mu je vrijednost informacijskog sadržaja, prema Shannonu, manja od jednako dugoga jezično smislenog teksta.

Izraz (1) ograničen je samo na onaj aspekt prema kojem se informacijom javlja nešto novo. Informacijski sadržaj jest sadržaj novoga. Novo pritom ne znači neku novu ideju, misao ili obavijest, jer bi to već bio aspekt sa značenjem, već jedino veći efekt iznenađenja izazvan rjeđim znakovima. Informacija

tako postaje mjera nevjerojatnosti nekog zbivanja. Nekom se vrlo nevjerojatnom znaku pripisuje, dakle, velik informacijski sadržaj.

Prije nego što izvor znakova (a to nije izvor informacije) generira neki znak, postoji nesigurnost o tome koji će znak biti odabran iz raspoložive zalihe znakova (npr. abecede). Tek se nakon primanja pristiglog znaka ta nesigurnost uklanja, pa prema tome vrijedi ova definicija: informacija je nesigurnost koja se uklanja s pojavom određenog znaka. Time je iskazana samo vjerojatnost pojave znakova, pa je tako obuhvaćen samo statistički aspekt informacije, a pojam je informacije oslobođen od značenja.

Tako definirani informacijski sadržaj ispunjava tri uvjeta: 1) informacijski sadržaji međusobno nezavisnih znakova ili slijedova znakova moraju biti zbrojivi; to je uvjet zbrojivosti koji informaciji pridaje svojstvo količine, 2) informacijski sadržaj pripisan određenom znaku ili slijedu znakova mora rasti s porastom iznenađenja; rjeđi znak ima veći efekt iznenađenja, npr. slovo f (manja vjerojatnost pojave), nego slovo a (velika vjerojatnost pojave); to je uvjet vjerojatnosti iz kojega slijedi da informacijski sadržaj raste sa smanjenjem vjerojatnosti pojave nekog znaka, 3) u najjednostavnijem slučaju, kad je zaliha znakova svedena samo na dva znaka koja se jednako često pojavljuju, jednome od njih treba pridružiti jedinicu, tj. jedan bit kao njegov sadržaj. Odatle, prema izrazu (1), slijedi jedinica informacije:

$$H'' = - 2 \cdot 0,5 \cdot \log_2 0,5 = 1 \quad (2)$$

jer je $p_1 = p_2 = 0,5$.

Iz tih uvjeta slijede iskustvena pravila.

Statistički je informacijski sadržaj slijeda znakova količinski pojam kojem je jedinica bit. Budući da vjerojatnost može poprimiti samo vrijednosti između 0 i 1, brojčana će vrijednost informacije uvijek biti pozitivna. Informacijski sadržaj višestrukih vijesti (npr. slijeda znakova) nastaje zbrajanjem vrijednosti pojedinih vijesti. Iz toga slijedi važna karakteristika Shannonove informacije da ometani signal (fizikalna interpretacija nekog znaka) općenito sadrži više informacija od neometanog, jer proizlazi iz veće količine mogućih varijanata. Ujedno, prema izrazu (1), informacijski sadržaj raste s brojem znakova n , a srednji informacijski sadržaj uzima u obzir različite razdiobe vjerojatnosti pojave pojedinih znakova, i to s faktorom entropije. Entropija je, prema tome, karakteristika upotrijebljenog jezika, ako se

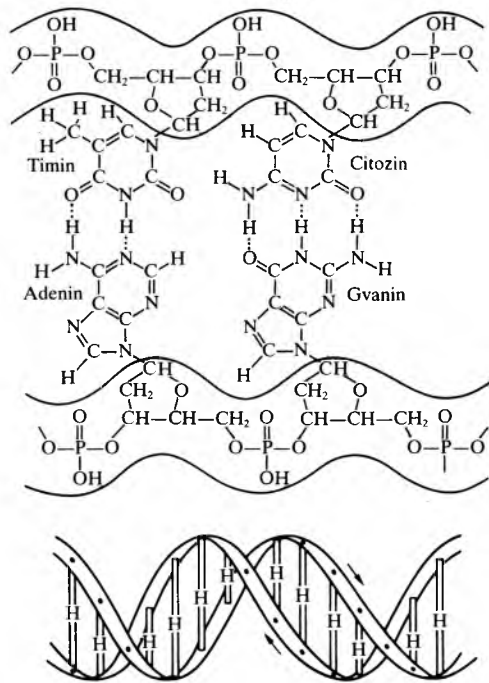
Tablica 1
INFORMACIJSKI SADRŽAJ PO ZNAKU U HRVATSKOME KNJIŽEVNOM JEZIKU

Znak	p_i	$\log_2 p_i$	H_i
razmak	0,1700	2,5564	0,435
A	0,0960	3,3808	0,324
E	0,0770	3,6989	0,285
O	0,0754	3,7293	0,282
I	0,0742	3,7514	0,278
N	0,0464	4,4297	0,202
J	0,0435	4,5229	0,196
S	0,0420	4,5735	0,192
R	0,0382	4,7103	0,179
T	0,0376	4,7331	0,178
U	0,0364	4,7799	0,175
D	0,0319	4,9703	0,158
M	0,0313	4,9977	0,156
V	0,0306	5,0303	0,153
L	0,0306	5,0303	0,153
K	0,0298	5,0685	0,151
P	0,0204	5,6153	0,115
G	0,0166	5,9127	0,098
B	0,0155	6,0116	0,093
Z	0,0144	6,1178	0,088
Š	0,0086	6,8615	0,059
Č	0,0084	6,8954	0,058
C	0,0067	7,2216	0,048
H	0,0065	7,2653	0,047
Ž	0,0052	7,5873	0,040
Ć	0,0049	7,6630	0,038
F	0,0011	9,8283	0,011
Ukupno	0,9993		4,192

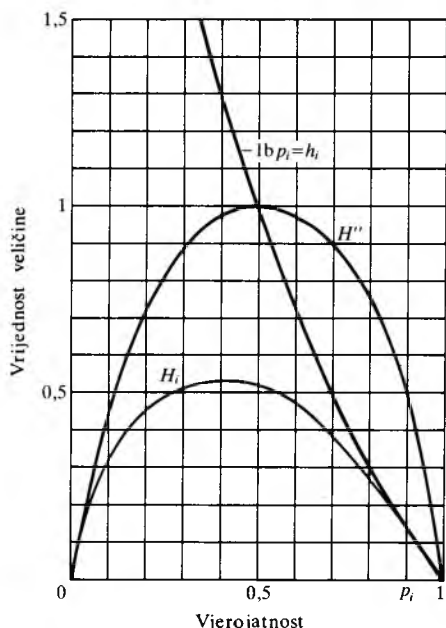
slova uzmu kao znakovi takva skupa. Uz jednaku zalihu znakova (npr. jezici s latiničnom abecedom), određeni će jezik, nasuprot nekom drugome, imati to veću entropiju što je razdioba vjerojatnosti pojave njegovih slova sličnija ravnomjernoj razdiobi. U graničnom slučaju, kad postoji ravnomjerna razdioba slova, entropija poprima najveću vrijednost. Ako pojedini znakovi u nekom dugom slijedu nisu jednako vjerojatni, onda je za reprezentativni statistički skup (npr. tekst) zanimljiv prosječni informacijski sadržaj po znaku ili srednja vrijednost cijelog skupa prikazana zbrojem pojedinačnih entropija prema izrazu (1), gdje se tada n odnosi na slova u tekstu (pritom se i razmak smatra jednim znakom).

Prosječni informacijski sadržaj:

u hrvatskom jeziku	4,192 bit/znak
u engleskom jeziku	4,046 bit/znak
u dualnom sustavu	1,0 bit/brojka
u decimalnom sustavu	3,32 bit/brojka
u molekuli DNA	2,0 bit/nukleotid



Sl. 2. Molekula dezoksiribonukleinske kiseline (DNA) sa četiri nukleotidne baze



Sl. 3. Ovisnost vrijednosti veličina h_i , H_i i H'' o vjerojatnosti p_i jedne obavijesti

U tabl. 1 vide se vjerojatnosti pojave razmaka i pojedinih slova, te njihove entropije u hrvatskome književnom jeziku (dj, dž, lj i nj smatrani su kao dva slova).

U molekuli DNA (dezoksiribonukleinska kiselina, sl. 2) sa četiri nukleotidne baze (adenin, timin, gvanin i citozin) razmještaj je baznih komponenata bitan za informaciju. Nasljeđivanje određenih svojstava molekule DNA razlikuje se prema redoslijedu parova baza.

Na sl. 3 prikazana je ovisnost sadržaja jedne obavijesti $h_i = -\text{lb} p_i$ o vjerojatnosti njezine pojave p_i , udio jedne obavijesti $H_i = -p_i \text{lb} p_i$ u ukupnoj entropiji izvora, te entropija obavijesti H'' za dvije mogućnosti s vjerojatnostima p_i i $1 - p_i$, koja je određena relacijom

$$H = -p_i \text{lb} p_i - (1 - p_i) \text{lb} (1 - p_i). \quad (3)$$

Statistička gustoća informacije. Osim prosječnog sadržaja po pojedinom znaku (slovu, broju, nukleotidu) zanimljiva je i najveća statistička gustoća informacije. Najveća je poznata gustoća u molekuli DNA živih stanica. Izmjere su toga kemijskog medija za skladištenje informacija: promjer 2 nm uz visinu hoda zavojnice od 3,4 nm. Obujam po hodu iznosi $10,68 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^3$. U svakom je hodu deset slova (nukleotida), pa je prostorna gustoća informacije $0,94 \cdot 10^{21} \text{ slova/cm}^3$. U genetskom se alfabetu molekule DNA nalaze četiri nukleotidne baze s informacijskim sadržajem svakog slova od 2 bita po nukleotidu, pa je statistička gustoća informacije $1,88 \cdot 10^{21} \text{ bit/cm}^3$.

Za utvrđivanje prikladnoga genetskoga koda potreban je nešto detaljniji opis zbivanja u živom tkivu, u kojem su proteini temeljne supstancije. Među njima su važni spojevi kao što su enzimi, antitijela, krvni pigmenti i hormoni. U ljudskom se tijelu nalazi najmanje 5000 proteina, nosilaca različitih funkcija. Njihove se strukture moraju kodirati kao što se moraju kodirati i pripadne kemijske reakcije u stanicama gdje se odvija sinteza s potrebnim doziranjem i po optimalnom tehnološkom procesu. Poznato je da su svi proteini u živom tijelu izgrađeni od samo 20 temeljnih kemijskih jedinica, aminokiselina. Točan redoslijed pojedinih elemenata vrlo je važan za život i mora biti precizno utvrđen. Sve se to odvija pomoću genetskih kodova. Teorija informacija omogućuje proračun potrebnog broja slova za slaganje riječi kojima se mogu jednoznačno obilježiti sve aminokiseline. Srednji je sadržaj informacije za 20 aminokiselina 4,32 bita po aminokiselini. Izvedu li se riječi od dva slova, dobiva se premalen informacijski sadržaj jer to daje samo 4 bita po riječi. Za riječi od četiri slova dobiva se 8 bita po riječi, što je previše. Za riječi od tri slova izlazi da su informacijsko-teorijski dovoljne i time najštedljiviji materijalni način kodiranja.

Informacija se smatra jedinim središnjim obilježjem svih živih bića. Ona je prisutna u svim zbivanjima pa tako i u svim životnim funkcijama, npr. genetska informacija pri razmnožavanju. Postupci prijenosa informacija temeljna su funkcija svih živih bića. Čovjek je najsloženiji sustav za informacijsku obradu. Zbroje li se svi informacijski tokovi koje čovjek svjesno vrši (jezik, svjesno upravljanje motoričkim kretnjama) s onima koji su nesvjesni (informacijsko upravljanje organskim funkcijama, hormonski sustav), dobiva se golemo vrijednost od $\sim 10^{24}$ bita dnevno.

Uz taj prikaz zbivanja u živom tkivu i funkcioniranju pri skladištenju informacija zanimljivo je za usporedbu opisati neke tehničke spremnike informacija da bi se vidjela velika prednost bioloških sustava.

Spremnici s magnetskim jezdicama mogu na površini od 6400 mm^2 uskladištiti 4096 bita. Ako je promjer jezgre 1,24 mm, obujam je skladištenja 7936 mm^3 , pa je prostorna gustoća skladištenja $0,52 \text{ bit/mm}^3$.

Prijelazom od spremnika s magnetskim jezdicama na čipove s poluvodičima načinjen je golem skok, pa se znatno povećala gustoća skladištenja. Suvremena memorija, npr. DRAE od 1 Mbit, dopušta skladištenje 1048576 bita na površini od 50 mm^2 , što odgovara površinskoj gustoći skladištenja od $\sim 21000 \text{ bit/mm}^2$. Uz debljinu čipa od $0,5 \text{ mm}$

prostorna je gustoća skladištenja $\sim 42000 \text{ bit/mm}^3$. Prema tome, megabitni čip nadmašuje spremnik s magnetskim jezgicama u površinskoj gustoći 32800 puta, a u prostornoj gustoći 81000 puta.

Konačno, radi usporedbe, pokušat će se za nosioca genetske informacije koji obavlja biološke funkcije tijekom cijelog života, za nukleinske kiseline, odrediti gustoća skladištenja. U svim staničnim organizmima i u mnogim virusima postoje dvostruke prepletene zavojnice molekula DNA, a u ostalim virusima to su jednostruki ogranci ribonukleinske kiseline. U tim se spremnicima ostvaruju gustoće skladištenja do fizikalnokemijske granice. U molekuli DNA postiže se, u usporedbi prema megabitnom čipu, $45 \cdot 10^{12}$ puta veća gustoća skladištenja. To se tumači činjenicom da se u molekuli DNA ostvaruje prava prostorna tehnologija skladištenja, dok je u tehničkim elementima skladištenje površinsko. Iako su strukture čipova načinjene u više slojeva, ipak im je skladištenje dvodimenzionalno. Za prikazivanje informacijske jedinice teorijski je dovoljna samo jedna molekula. Tehnička su sredstva za skladištenje informacija, dakle, još u makroskopskom području unatoč golemim ulaganjima u njihovu minijaturizaciju.

INFORMACIJSKE RAZINE

Sve što je rečeno u vezi sa skladištenjem i prijenosom informacija može se podvrgnuti pod Shannonov pojam informacije, ali se njime nikako ne može obuhvatiti bit informacije, jer Shannonova definicija sadrži samo statističku ovisnost slijeda znakova, a potpuno zanemaruje značenje. Ona je neprikladna za prosuđivanje slijeda znakova kojim se prenosi smisao, pa je za obradbu informacije u neživim i živim sustavima potrebno znatno proširiti njezin pojam. To se postiže promatranjem informacije u više međusobno ovisnih razina.

Prva razina – statistika. Shannonova je teorija informacija prikladna za shvaćanje statističkog vida informacije. Ona dopušta kvantitativno opisivanje svih svojstava jezika koja se u svojoj biti osnivaju na učestalosti slova ili općenito na učestalosti znakova u nekom skupu. Hoće li se slijedom znakova reproducirati i smisao, potpuno je nevažno. I gramatička se ispravnost potpuno zanemaruje na toj razini.

Druga razina – sintaksa. Slijed znakova koji služi za prijenos informacije podliježe, i što se tiče redoslijeda slova u riječima i što se tiče povezivanja riječi u rečenice, određenim zakonima koji su za svaki jezik utemeljeni i dogovoreni. Za prikaz informacije na sintaktičkoj razini potrebna je zaliha znakova, tj. kodni sustav. U većini pisanih jezika upotrebljavaju se slova, ali se za različite potrebe upotrebljavaju i drugi kodni sustavi, npr. Morseovi znakovi, hijeroglifi, kodovi za elektroničku obradbu podataka (EOP-kodovi), genetski kod, plesne figure pčela, mirisni znakovi u feromonskim jezicima kukaca, gestikulacija gluhoonijemih i dr.

Za sintaksu su važna sljedeća pitanja: a) kojim se kombinacijama simbola definiraju jezični znakovi, tj. kakav je kôd; b) kojim se kombinacijama znakova definiraju riječi nekog jezika, tj. kakav mu je rječnik i način pisanja; c) kako se riječi međusobno raspoređuju, tj. kako se stvara rečenica i kakav je raspored riječi (stilistika), te kako se riječi međusobno povezuju i mijenja struktura rečenice (gramatika).

Sintaksa obuhvaća sva pravila kombiniranja jezičnih elemenata. Sintaksa je prirodnih jezika mnogo složenije strukturirana nego u formatiziranim, odnosno umjetnim jezicima. Sintaktička pravila formatiziranih jezika moraju biti potpuna i jednoznačna jer tijekom kompiliranja nije moguć povratni utjecaj na semantičko razmišljanje programatora.

Na sintaktičkoj se razini mogu postaviti sljedeća iskustvena pravila: a) za prikaz informacija bezuvjetno je potreban kôd; b) pridruživanje znakova iz definirane zalihe temelji se na konvenciji i pretpostavlja misaoni proces; c) ako je kod jednom definiran na temelju dogovora, toga se valja u procesu strogo držati; d) upotrijebljeni kod mora biti poznat i predajniku i prijammniku ako se želi da informacija bude

razumljiva; e) samo strukture koje se temelje na dogovorenom kodu mogu reprezentirati informaciju. To je prijeko potreban, ali ne i dovoljan skup uvjeta za potpuni prikaz informacije. Ta pravila dopuštaju, već i na razini sintakse, dakle dogovorenog koda, temeljne izjave. Postoji li u bilo kojem sustavu utemeljeni kod, može se zaključiti da se taj sustav osniva na misaonoj koncepciji.

Treća razina – semantika. Slijed znakova i sintaktička pravila nuždan su uvjet za prikazivanje informacije. Za prenetu informaciju, međutim, nisu dovoljni samo izabrani kod, broj i oblik znakova te način prijenosa (pismo, optički, akustički, električni, taktilni ili olfaktorni signali), već i obavijest, smisao i značenje u toj informaciji, dakle semantika.

Za skladištenje i način prijenosa taj središnji aspekt informacije ne igra nikakvu ulogu. Cijena brzog prijema ne ovisi o njezinu sadržaju već o broju riječi. Za pošiljaoca i primaoca glavni je interes u značenju informacije, jer znakovni slijed tek značenjem postaje informacija. Bit je svake informacije da ju je netko poslao i da je nekome upućena, tj. da postoji ishodište i odredište informacije. Gdje god se informacija pojavljuje, uvijek postoje predajnik i prijammnik.

Budući da je semantika bit informacije, informacija je samo ono što sadrži semantičnost. To se potvrđuje i često citiranom izrekom utemeljitelja kibernetike i teorije informacija N. Wienera da informacija ne može biti fizikalne prirode, jer »informacija je informacija i nije ni materija ni energija; nikakav materijalizam koji to ne može shvatiti ne može preživjeti današnjicu«. Informatičar W. Strombach definira nematerijalnu bit informacije ovako: »Informacija je razvijeni red na stupnju reflektirajuće svijesti.« Semantička se informacija opire mehanicističkome načinu promatranja. Elektroničko je računalo, prema H. Zemaneku, samo »sintaktička naprava koja ne poznaje semantičku kategoriju«.

Moraju se, dakle, razlikovati: podaci od znanja, algoritamski uvjetovano grananje nekog programa od voljnog odlučivanja, usporedno probiranje od pridruživanja (asocijacija), pronalaženje vrijednosti od razumijevanja značenja, formalni tokovi nekog stabla odlučivanja od individualnog izbora, slijed operacija u računalu od slijeda misli, te akumulacija podataka od procesa učenja. Računalo može izvršiti prve zahvate i obradbe i to je njegova jaka strana i područje njegove primjene, ali, zasad, i granica njegove upotrebljivosti.

Značenje uvijek predstavlja misaonu koncepciju, pa se može zaključiti: svakoj je informaciji ako se ona povratno prati od početka prijenosnog lanca potreban misaoni izvor, tj. inteligentni izvor informacije. Da li će informacija biti razumljiva nekom primaocu, to ne utječe na njezinu egzistenciju. Udubljenja na egipatskim obeliscima i prije nego što su rastumačena bila su jednoznačno shvaćena kao informacija, jer očigledno nisu mogla nastati u nekom slučajnom procesu. Semantiku hijeroglifa nije mogao nitko od naših suvremenika razumjeti prije pronalaska kamena u Rosetti (1799), iako su ti znakovi i prije predstavljali informaciju.

Svi prikladni formantni aparati, tj. jezični iskazi koji bi mogli izraziti značenje (duhovni supstrati, misli, svjesni sadržaji) zovu se jezici. Tek pomoću jezika informacija postaje sposobna za predaju i skladištenje na materijalnim nosiocima. Sama je informacija, međutim, potpuno invarijantna i s obzirom na promjenu sustava prijenosa (akustički, optički, električni) i s obzirom na sustav skladištenja (mozak, knjiga, uređaj za EOP, magnetska vrpca, disk). Ta se invarijantnost temelji na njezinoj nematerijalnoj biti.

Razlikuju se sljedeće vrste jezika:

- a) *prirodni jezici*; danas na svijetu ima ~ 5000 živih jezika;
- b) *umjetni konverzijski*, odnosno *signalni jezici*: esperanto, jezik gluhoonijemih, kôd signalnih zastavica, prometni znaci;
- c) *umjetni formalni jezici*: logički i matematički izričaji, kemijski simboli, notno pismo, algoritamski jezici, programski jezici;
- d) *specijalni jezici žive prirode*: genetski jezici, ples pčelinjeg zatka, feromonski jezici, hormonski jezici, specijalni

sustav u paukovoj mreži, delfinski jezik, instinkti (ptičji let, seoba jesetre).

Svim je spomenutim jezicima zajedničko da upotrebljavaju definirane znakovne sustave izvedene pomoću formantnih aparata. Pritom su pojedini simboli ili jezični elementi utvrđeni krutim i dogovorenim pravilima i pridruženim značenjima. U svakom jeziku postoje jedinice kao što su morfemi, leksemi, sklanjanja, pa i cijele rečenice u prirodnim jezicima, koje služe kao elementi za prijenos značenja. Značenja se interno pridružuju formativima, koji čine čvrstu vezu između pošiljaoca i primaoca vijesti. Svaki se čin komuniciranja između pošiljaoca i primaoca sastoji od formuliranja i razumijevanja znakova u jednom te istom jeziku. Pri tome formuliranju pošiljaočeve misli proizvode pomoću formantnog aparata (jezik) informaciju koja se zatim odašilja. Pri razumijevanju znakovna se kombinacija analizira i preslikava kod primaoca u odgovarajuće misli.

Četvrta razina – pragmatika. U sve tri navedene niže razine ne pita se koji je pošiljaočev cilj pri namjeri da prenese informaciju. Svako se slanje informacije zbiva s pošiljaočevom namjerom da kod primaoca ostvari određeni rezultat. Pošiljalac unaprijed promišlja kojim će postupkom djelovati na primaoca da bi postigao željeni cilj. Taj se aspekt naziva pragmatikom.

S jezičnog gledišta ne nižu se jednostavne rečenice, već se formuliraju molbe, žalbe, pitanja, obavijesti, upute, prijetnje i zapovijedi koje treba da potaknu primaoca na određeno djelovanje. W. Strombach definira informaciju kao strukturu koja treba da u prijamnom sustavu nešto isohodi. Ako se to djelovanje usustavi i utvrde razlike, dobiva se:

a) djelovanje bez ijednog stupnja slobode. To su krute i jednoznačne programske naredbe kao što su tokovi programiranja za elektroničko računalo, strojni prijevodi prirodnih jezika, strojni proizvodni postupci, građa bioloških stanica i organske funkcije;

b) djelovanje s ograničenim stupnjevima slobode. To su prijevodi prirodnih jezika što ih prevode ljudi, instinktivna djelovanja u životinjskom carstvu;

c) ponašanje s najvećim brojem stupnjeva slobode. To je fleksibilno, kreativno i originalno čovjekovo ponašanje, kao što je pručeno djelovanje kao oblik ponašanja, npr. obrtnička djelatnost, zatim razumno, intuitivno i inteligentno djelovanje prema slobodnoj volji.

Sva se ta djelovanja primaoca uvijek temelje na informaciji koja je već na pošiljaočevoj strani tako koncipirana da postigne postavljeni cilj.

Peta razina – apobetika. Posljednja je i najviša razina informacije ona s ciljnim aspektom. Rezultat djelovanja na primaočevoj strani temelji se na cilju što ga je sebi postavio pošiljalac, koji je utvrdio plan i koncepciju za njegovo ostvarenje. Pritom se postavlja pitanje koji je pošiljaočev cilj, dakle što je pretpostavljeni cilj. Za svaku se informaciju može zapitati zašto je pošiljalac uopće predaje i koji bi emocijski učinak htio postići kod primaoca, dakle koja je svrha informacije.

Nekoliko primjera razjasnit će taj aspekt. Programi za elektroničko računalo koncipirani su s nekim ciljem, kao što su rješenja sustava jednadžbi, inverzije matrica, sustavna pomagala. Ptičji mužjak nastoji svojim pjevom privući pozornost ženke ili obraniti svoje područje. Reklamnim sloganom za neko peraće sredstvo proizvođač želi navesti kupca da se odluči za njegov proizvod. Prirodni čovjekov govor omogućuje komuniciranje i formuliranje postavljenog cilja uz određene emocije.

Na temelju iznijetog postavljaju se pravila kojima se potvrđuje važnost promatrane razine: a) najvažniji je apobetički aspekt informacije jer sadrži pretpostavljeni pošiljaočev cilj, a ukupni trud i trošak u četiri niže razine samo su sredstvo za postizanje cilja u apobetičkoj razini; b) svih pet informacijskih razina vrijede na predajnoj i na prijamoj strani sustava i sve se odigrava u predajno-prijamnom izmjeničnom djelovanju; c) pojedine su informacijske razine tako međusobno povezane da su sve niže razine nužne pretpostavke za

realizaciju na višoj razini; d) apobetička se razina može koji put preklopiti s pragmatičkom razinom.

Uvjeti za ostvarenje informacije. Nakon prikaza svih informacijskih razina mogu se formulirati uvjeti koji dopuštaju razlikovanje informacije od neinformacije. Postoje dva nužna i dva dovoljna uvjeta za to razlikovanje.

Nužni su uvjeti: a) mora postojati kodni sustav; b) znakovni slijed mora sadržavati semantiku.

Dovoljni su uvjeti: a) ako se želi nepobitno dokazati da se radi o informaciji, potrebno je raspoznati namjere u semantičkoj, pragmatičkoj i apobetičkoj razini; b) znakovni slijed ne predstavlja informaciju ako se temelji na slučajnosti; slučajnost je nemoguće utvrditi pa je zato potrebna obavijest o uzroku nastanka (uvjetna vjerojatnost).

Na temelju Shannonove teorije informacija, koja se danas smatra zaključenom, proširen je pojam informacije do pete razine. Iskustvena pravila izvedena za pojedine razine sažeto glase: a) nema informacije bez koda, b) nema koda bez slobodne i voljne pogodbe, c) nema informacije bez pošiljaoca, d) nema informacije bez misaonog začetnika na izvoru, e) nema informacije bez misaonog izvora, što znači da informacija nije materijalna veličina, f) nema informacije bez volje, g) nema informacije bez hijerarhijskih razina: statistike, sintakse, semantike, pragmatike i apobetike, h) informacija ne može nastati u statističkim procesima.

UTJECAJ ŠUMA

U uvodu Shannonovoj teoriji informacija izričito se govori o utjecaju šuma u kanalu za prijenos informacije (sl. 1).

Za komunikaciju između predajnika i prijavnika mora postojati kanal kao fizikalno sredstvo prijenosa informacije koja se u predajniku kodira i pretvara u signal, kao njezina fizikalna reprezentacija. Tome će se korisnom signalu neminovno pridružiti smetnje koje se općenito nazivaju šumom.

Prema tome, korisnom se signalu snage S pridružuje šum snage N , pa u prijammnik stiže zbroj tih snaga: $S + N$. Pri binarnom kodiranju kapacitet je kanala definiran brojem bita u sekundi:

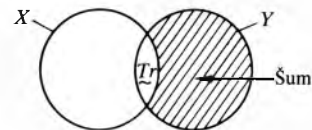
$$C = \left(\frac{H_{Tr}}{T} \right)_{\max} \text{ bit/s,} \quad (4)$$

gdje je H_{Tr} entropija transinformacije, tj. informacije koja je prenijeta do prijavnika zajedno sa šumom, a T vrijeme. Entropija H_{Tr} može se definirati shemom poznatom iz teorije skupova (sl. 4), gdje je X skup elemenata predajnika, Y skup elemenata prijavnika, a presjek je tih skupova Tr nazvan transinformacijom, kojoj je entropija

$$H_{Tr} = H_Y - H_{\text{šum}}. \quad (5)$$

Prema tome je entropija transinformacije jednaka entropiji prijavnika H_Y umanjenoj za entropiju šuma $H_{\text{šum}}$.

Sl. 4. Presjek skupova elemenata predajnika X i elemenata prijavnika Y ; Tr transinformacija



Da bi došao do općenitog izraza za kapacitet kanala, Shannon polazi od statističkih razdioba signala i šuma, a da bi se postigla matematička egzaktnost postupka, pretpostavlja se:

a) da su izvori homogeni, što znači da je predaja vijesti ili proizvodnja šuma neovisna o vremenu i da nema privilegiranog inicijalnog trenutka;

b) da su izvori stacionarni, što znači da primijenjeni zakoni vrijede unutar koliko god dugog vremena djelovanja;

c) da su izvori ergodični (pravilni), što znači da proizvode beskonačne slijedove vijesti ili šuma kojima se statističke razdiobe vjerojatnosti ne mijenjaju. Za prirodni jezik to znači da iza nekog znaka (slova) slijedi znak (slovo) ili slijed znakova (slova) s uvjetnom vjerojatnošću koja je za taj raspored ustaljena. To je već 1913. opisao A. A. Markov kao

lingvističku statistiku analizirajući sljedove samoglasnika i suglasnika u ruskom jeziku na primjeru Puškinova djela »Evgenij Onjegin«.

Kao prikladna razdioba za signal i šum pretpostavlja se Gaussova ili normalna razdioba elemenata skupa prema izrazu:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx, \quad (6)$$

gdje je σ standardna devijacija.

Uz pretpostavljenu je razdiobu entropija:

$$H_x = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \cdot \ln \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \right], \quad (7)$$

pa se nakon integracije dobiva

$$H_x = \ln\sqrt{2\pi e\sigma^2} \text{ bit/element.} \quad (8)$$

Konačno je entropija transinformacije

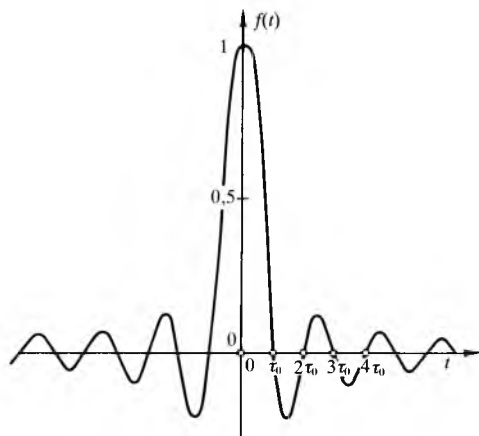
$$H_{Tr} = \ln\sqrt{1 + \frac{S}{N}} = \ln s \text{ bit/par,} \quad (9)$$

gdje se par odnosi na pripadne elemente predajne i prijамne strane sustava, a S/N je omjer snage signala i snage šuma.

Uzorci su karakteristične veličine fizikalnog zbivanja u nekom vremenskom intervalu T . Pomoću tih se uzoraka mogu jednoznačno opisati intenziteti trenutnih vrijednosti signala i njihov broj. Najveći je strukturni sadržaj (broj) signala frekvencijskog spektra B u vremenu T :

$$K = 2BT, \quad (10)$$

gdje je K , prema D. Gaboru, broj logona.



Sl. 5. Primjer toka funkcije $f(t) = \frac{\sin 2\pi Bt}{2\pi Bt}$

Uzorak se može prikazati funkcijom

$$f(t) = \frac{\sin 2\pi Bt}{2\pi Bt}, \quad (11)$$

koja je prikazana na sl. 5. Funkcija (11) ima vrijednost nula kada je $t = n\tau_0$ ($n = 1, 2, \dots$), gdje je

$$\tau_0 = \frac{1}{2B}. \quad (12)$$

Slijed uzoraka odnosno funkcije (11) mora biti pomaknut za interval τ_0 , pa je njihov zbroj

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2B} \cdot \frac{\sin \pi(2Bt - n)}{\pi(2Bt - n)}. \quad (13)$$

Primjer se takva zbroja vidi na sl. 6. Taj se postupak naziva i kvantiziranjem po vremenu, a $2B$ predstavlja *finoću signala*.

Kapacitet je kanala određen izrazom (4). Ako se za H_{Tr} uvrsti vrijednost iz (9) i postavi da je $T = \tau_0$ uzimajući u obzir

izraz (12), bit će kapacitet kanala

$$C = 2B \ln \sqrt{1 + \frac{S}{N}}. \quad (14)$$

To je temeljna relacija za određivanje kapaciteta kanala svih suvremenih sustava za prijenos informacija.

Za razumljiv prijenos ljudskog govora telefonskim kanalom potreban je frekvencijski spektar $B \approx 4000$ Hz, odnosno točnije 300...3400 Hz. Prema tome, za uzorkovanje takva signala potrebno je $2 \cdot 4000$ Hz = 8000 uzoraka (logona) u sekundi, pa je $\tau_0 = 125 \mu s$.

Uzorci su trenutne vrijednosti krivulje koja prikazuje struju ili napon električnog signala kao fizikalne reprezentacije govora (sl. 7). Postavlja se pitanje koliki mora biti omjer snage signala i snage šuma da bi primalac mogao raspoznati pošiljačev signal uzimajući u obzir finoću intenzivnosti za koju je ljudsko uho osjetljivo. Iskustvom je utvrđeno da broj stupnjeva intenzivnosti ne bi smio biti manji od $s = 256$. To znači da za razumljivu reprodukciju signala valja uzorke razlikovati u 256 stupnjeva. Za tako velik broj stupnjeva koje primalac treba razlikovati uz prisutnost šuma mora omjer između snage signala i snage šuma biti prema sljedećem izrazu:

$$s = \sqrt{1 + \frac{S}{N}} = 256, \quad (15)$$

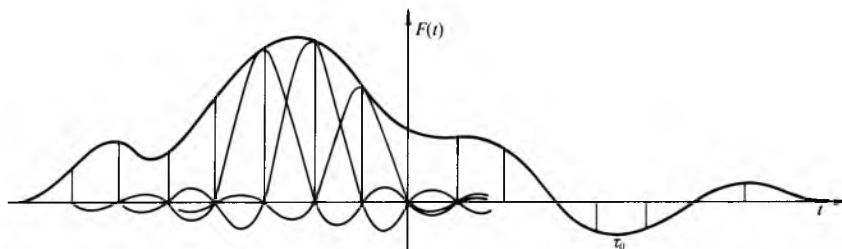
odnosno

$$\frac{S}{N} = 256^2 - 1 = 65635. \quad (16)$$

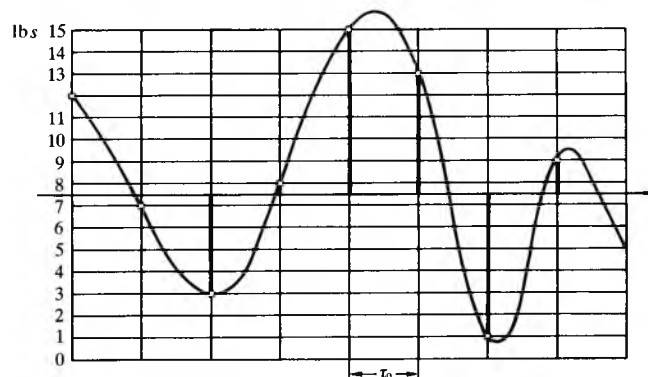
Taj se omjer snaga može iskazati decibelima, pa je

$$b = 10 \lg \frac{S}{N} = 10 \lg 65635 \approx 48 \text{ dB.} \quad (17)$$

Možda se čini da je taj omjer prevelik s obzirom na broj stupnjeva koje primalac mora razlikovati. Ljudsko je uho, međutim, veoma osjetljivo na te razlike intenzivnosti, pa intenzivnost šuma koji prati signal od izvora do odredišta mora biti u skladu s finoćom što je raspoznaje ljudsko uho.



Sl. 6. Primjer toka funkcije $F(t)$ prema izrazu (13)



Sl. 7. Primjer vrijednosti uzorka kao funkcije od lbs

Uvrsti li se broj stupnjeva intenzivnosti (15) u izraz za kapacitet prijenosnog kanala, dobiva se

$$C = 2 \cdot 4000 \text{ Hz} \cdot \ln 256 = 8000 \text{ Hz} \cdot 8 = 64000 \text{ bit/s,} \quad (18)$$

što znači da je za prijenos govornog signala potrebno 8000 uzoraka u sekundi sa po 8 bita.

Taj je kapacitet prijenosnog kanala prihvaćen kao osnova za normiranje suvremenih integriranih mreža za prijenos govora, teksta, podataka i slika. Te su mreže, sa skromnim udjelom pokretnih mehaničkih dijelova, nazvane ISDN (Integrated Service Digital Network). Za ilustraciju može se navesti da konvencionalni telegrafski kanal, gdje je $s = 2$, ima kapacitet prijenosnog kanala $C = 2 \cdot 4000 \text{ Hz} \cdot \text{lb} 2 = 8000 \text{ bit/s}$.

LIT.: C. E. Shannon and W. Weaver, The Mathematical Theory of Communication. The University of Illinois Press, Urbana 1949. – G. K. Zipf, Human Behavior and The Principle of Least Effort. Addison Wesley, Reading, Mass. 1949. – L. Brillouin, La science et la théorie de l'information. Masson, Paris 1959. – W. Meyer-Eppler, Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. Springer-Verlag, Berlin 1959. – J. R. Pierce, Symbols, Signs and Noise. Harper, New York 1961. – N. Chomsky, Deep Structure, Surface Structure and Semantic Interpretation. M.I.T. Press, Cambridge, Mass. 1968. – L. P. Hyvärinen, Information Theory for Systems Engineers. Springer-Verlag, Berlin 1970. – D. Stepien, Key Papers in The Development of Information Theory. IEEE Press, New York 1973. – R. W. Hamming, Coding and Information Theory. Prentice-Hall Inc., New Jersey 1980. – V. Matković i V. Sinković, Teorija informacije. Školska knjiga, Zagreb 1984.

V. Matković

TEORIJA PLASTIČNOSTI, grana mehanike kontinuuma unutar koje se matematički formuliraju odnosi između naprezanja i deformacije tijela u plastičnom stanju te istražuju uvjeti tečenja. U teoriji plastičnosti obrađuju se metode za određivanje pomaka, deformacija i naprezanja tijela u elastoplastičnom ili plastičnom stanju. Teorija viskoelastičnosti razmatra odnose naprezanja i deformacija u viskoelastičnim tijelima, tj. tijelima koja imaju svojstva elastičnih tijela i viskoznih kapljevin (v. *Mehanika kontinuuma*, TE 8, str. 186). Viskoelastična su tijela elastična, plastična i viskozna. Takva se tijela ponekad nazivaju i viskoelastoplastičnima.

Razvoj teorije plastičnosti počeo je u drugoj polovici XIX. st. Prve su važnije radove objavili H. Tresca (1864), B. de Saint-Venant i M. Lévy (1871) u Francuskoj. Tresca je proveo eksperimente o ekstruziji i probijanju duktilnih materijala te je na temelju tih eksperimenata formulirao kriterij tečenja materijala koji je poznat kao kriterij najvećega posmičnog naprezanja. Saint-Venant je za ravninsko tečenje idealno plastičnog materijala postavio sustav od pet jednadžbi između komponenata naprezanja i deformacije. Pritom je postulirao podudaranje pravaca glavnih naprezanja i glavnih deformacija. Razmatrao je savijanje i uvijanje cilindričnog štapa te raspodjelu naprezanja u debeloj cijevi potpuno plasticiranoj djelovanjem unutrašnjeg tlaka. Lévy je proširio Saint-Venantove jednadžbe na prostorne probleme povežavši priraste deformacija s devijatorskim komponentama naprezanja. Te se jednadžbe nazivaju Lévy-Misesovim jednadžbama jer ih je R. von Mises (1913) nezavisno formulirao.

Kriteriji tečenja razmatrani su i prije 1864. i to uglavnom za materijal tla. Tako je Ch. A. de Coulomb (1773) predložio kriterij koji nosi njegovo ime. Taj su kriterij primijenili J. V. Poncelet (1840) i W. J. M. Rankine (1853). J. J. Guest je koncem stoljeća ispitivao tečenje cijevi podvrgnute složenom opterećenju osnom silom i unutrašnjim tlakom. Rezultati su objavljeni 1900. i dobro se slažu s Trescinim kriterijem najvećega posmičnog naprezanja. M. T. Huber (1904) eksperimentirao je u valjaonici čelika i na temelju toga predložio kriterij opisan jednadžbom $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{const.}$ gdje su σ_1, σ_2 i σ_3 glavna naprezanja.

Von Mises je (1913), u namjeri da matematički pojednostavni Trescin kriterij, nezavisno od Hubera došao do iste jednadžbe. H. Hencky (1924) dao je Huberovu, odnosno von Misesovu kriteriju fizikalno značenje, tj. pokazao je da tečenje nastaje kad maksimalna energija promjene oblika dostigne kritičnu vrijednost. Prema toj trojici istraživača danas se taj kriterij često naziva *kriterij tečenja HMMH*.

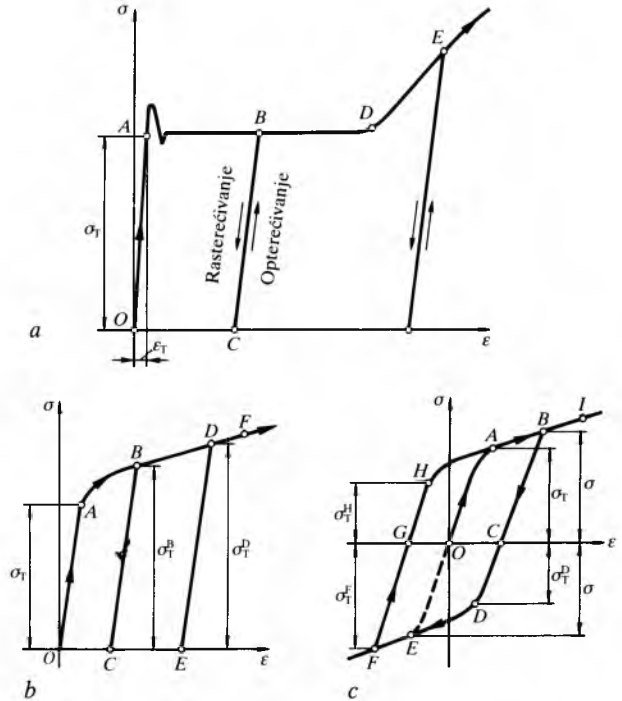
L. Prandtl je (1920) pokazao da se dvodimenzijski problem plasticiranog tijela može opisati hiperbolnim diferencijalnim jednadžbama, te je na temelju toga riješio problem utiskivanja. A. Nadai je te rezultate eksperimentalno potvrdio. Prandtlovo rješenje specijalnog problema poopćio je H. Hencky uvodeći pojam linija klizanja. Th. von Kármán je (1910) objavio radove o izvijanju štapa u plastičnom području. W. Lode je (1926) ispitivao željezne, bakrene i niklene cijevi istodobno podvrgnute unutrašnjem tlaku i rastezanju. Rezultati pokusa u prvoj aproksimaciji potvrđuju Lévy-Misesove jednadžbe. A. Reuss je (1930) poopćio Prandtlowe jednadžbe pretpostavivši da je prirast plastičnih deformacija u svakom trenutku razmjernan trenutnoj vrijednosti devijatorskih komponenata tenzora naprezanja. Te se jednadžbe nazivaju Prandtl-Reussovim jednadžbama i poopćenje su Lévy-Misesovih jednadžbi.

U toku drugoga svjetskog rata, za potrebe ratne industrije, naglo su se razvile sve grane teorije plastičnosti. Taj se razvoj nastavio i nakon rata. U naše se doba razvijaju numeričke metode analize nelinearnih problema mehanike, pa tako i teorije plastičnosti, viskoelastičnosti i viskoplastičnosti.

Razvoju teorije plastičnosti pridonijeli su još A. Haar, R. Hill, A. A. Iljušin, A. Ju. Išlinski, L. M. Kačanov, F. K. G. Odquist, H. Quinney, G. I. Taylor i mnogi drugi.

EKSPERIMENTALNI PODACI O PLASTIČNOM DEFORMIRANJU

Dijagrami deformiranja. Dijagrami ovisnosti naprezanja σ o deformaciji ϵ za različite materijale pri rastezanju, odnosno sabijanju, prikazani su na sl. 1. Slični dijagrami prikazuju ovisnost posmičnog naprezanja τ o kutnoj deformaciji γ . Prema načinu opterećenja takvi se dijagrami nazivaju dijagramima rastezanja, sabijanja, odnosno smicanja, ili općenito dijagramima deformiranja (v. *Otpornost građevnih materijala*, TE 10, str. 93).



Sl. 1. Dijagrami deformiranja: a za meki čelik, b za obojene metale, c za materijal s Bauschingerovim efektom

Ovisnost naprezanja o deformaciji $\sigma = \sigma(\epsilon)$, odnosno posmičnog naprezanja o kutnoj deformaciji $\tau = \tau(\gamma)$, vrlo je složena i ovisi o vrsti materijala. Točan matematički opis te ovisnosti uveo bi u teoriju plastičnosti znatne, a često i nepremostive teškoće. Zbog toga se takvi dijagrami idealiziraju (shematiziraju) tako da budu što jednostavniji, a da se pritom što manje razlikuju od stvarnih dijagrama. Kako će se dijagram idealizirati ovisi, između ostalog, i o njegovoj namjeni.

Kad se teorija plastičnosti primjenjuje za projektiranje konstrukcija, dovoljno je uzeti u obzir samo početni dio dijagrama, jer su maksimalne plastične deformacije koje nastaju u eksploataciji konstrukcije istog reda veličine kao maksimalna elastična deformacija ϵ_T (sl. 1a). Nasuprot tome, pri obradi metala deformiranjem deformacije su velike, pa treba uzeti u obzir čitavo područje dijagrama deformiranja. Tada su, međutim, elastične deformacije malene u usporedbi s plastičnima, pa se mogu zanemariti.

Dijagram na sl. 1a vrijedi za meki čelik. Kad naprezanje dostigne granicu tečenja σ_T , deformacija ϵ raste neko vrijeme bez porasta naprezanja (dio dijagrama ABD). Ta je deformacija mnogo veća od deformacije ϵ_T . Na kraju u točki D materijal očvršćuje deformiranjem, pa je dalja deformacija moguća samo uz porast naprezanja. Dijagrami se za takve materijale, kad se upotrebljavaju za dimenzioniranje konstrukcija, idealiziraju prema sl. 2a. Tako idealiziran materijal naziva se elastično-idealno plastični materijal. Kad se radi o obradi deformiranjem, materijal se idealizira kao kruto-idealno plastični prema sl. 2b ili 2c.

Dijagram na sl. 1b vrijedi za aluminij, bakar, magnezij ili njihove slitine i druge slične materijale. Takvi materijali nemaju izraženu granicu tečenja, pa se uvodi pojam *konven-*