

Selen(IV)-oksid, selen-dioksid, SeO_2 , na sobnoj je temperaturi bijela, kristalna tvar koja se lako otapa u vodi i alkoholu. Otapanjem u vodi stvara selenitnu (selenastu) kiselinu, H_2SeO_3 . Lako sublimira i može se taliti samo u hermetički zatvorenoj posudi. Nastaje oksidacijom elementarnog selena zrakom na visokoj temperaturi, sagorijevanjem selena u kisiku, dehidratacijom selenitne kiseline ili termičkom razgradnjom nekih spojeva selena. Selen(IV)-oksid jak je oksidans i lako se reducira do elementarnog selena slabim reducensima kao što je sumpor(IV)-oksid. U kemiji se upotrebljava kao jako oksidacijsko sredstvo.

Selen(VI)-oksid, selen-trioksid, SeO_3 , termički je nestabilna tvar, te se ne može dobiti analognim postupcima kao dioksid. Dobiva se dehidratacijom selenatne (selenove) kiseline, H_2SeO_4 , pomoću fosfor-anhidrida uz isparivanje selen(VI)-oksida u vakuumu. Otapanjem u vodi stvara selenatnu kiselinu. U kemiji služi kao jak oksidans.

Selenitna (selenasta) kiselina, H_2SeO_3 , dobiva se otapanjem selen(IV)-oksida u vodi ili oksidacijom praha elementarnog selena nitratom kiselinom. Ubraja se u slabe kiseline. S jakim oksidansima oksidira do selenatne kiseline, H_2SeO_4 . Gradi soli, selenite, od kojih je većina, s izuzetkom soli alkalijskih metala, topljiva u vodi. Osim normalnih soli tvori i kisele i bazne selenite.

Selenatna (selenova) kiselina, H_2SeO_4 , dobiva se oksidacijom selenitne kiseline jakim oksidansima. Bezvodna selenatna kiselina kristalizira u obliku bezbojnih heksagonalnih kristala koji se tale pri temperaturi $62,4^\circ\text{C}$. Reducira se slabim reducensima do selenitne kiseline, a jakim do elementarnog selena. Stupanj disocijacije selenatne kiseline blizak je onome sulfatne, ali je selenatna kiselina jači oksidans. Soli selenatne kiseline, selenati, po mnogim su svojstvima slične analognim sulfatima. Pri zagrijavanju selenati se razgrađuju uz stvaranje selenita.

Selenovodik, H_2Se , dobiva se reakcijom elementarnog selena s vodikom uz zagrijavanje na 350°C , ili pak djelovanjem razrijeđenih mineralnih kiselina na selenide metala. To je bezbojan plin, neugodna mirisa i vrlo visoke toksičnosti. Selenidi mnogih metala lako se dobivaju direktnim djelovanjem selenovodika na metale uz zagrijavanje.

Selenidi. Selenidi su spojevi selena s elektro pozitivnim elementima, pretežno metalima. Bliski su po svojstvima analognim sulfidima i teluridima. Dobivaju se reakcijama metala s elementarnim selenom na sobnoj temperaturi, uz zagrijavanje, pa čak i taljenje. Mogu se dobiti u reakcijama s plinovitim elementarnim selenom ili selenovodikom i djelovanjem selenovodika na taline metala. Neki od selenida prijelaznih metala imaju poluvodička svojstva, a selenidi metala podskupine cinka vrlo su osjetljivi na različite oblike zračenja. Mnogo se upotrebljavaju za proizvodnju poluvodiča, fotoelementa, fotooptornika, fotoosjetljivih slojeva itd.

Organoselenovi spojevi. U tim je spojevima atom selena direktno vezan za atom ugljika. Po svojstvima i metodama dobivanja slični su analognim organskim spojevima sumpora. Poznati su selenidi, R_2Se , diselenidi, RSeSeR , selenoli, RSeH , selenooksidi, R_2SeO , selenoni, R_2SeO_2 , i više drugih spojeva.

PROIZVODNJA I POTROŠNJA SELENA

Opseg svjetske proizvodnje selena (bez bivšeg SSSR i NR Kine) u posljednjih je 15 godina na razini 1200–1400 t, sa stalnom tendencijom blagog porasta. Glavni proizvođači selena u svijetu jesu Kanada, Japan i SAD, a njihov zajednički udjel u svjetskoj proizvodnji iznosi 78%. Zatim slijede Belgija, Švedska, Meksiko, Čile i Jugoslavija s udjelom od 20%, dok sve ostale zemlje sudjeluju samo sa 2%.

Struktura potrošnje selena u razvijenim zemljama Zapada u zadnjim je godinama (1975–1985) bila sljedeća: elektronika 35% (od toga ispravljači 5%, kserografija 25%, ekrani katodnih cijevi, fotoelementi i sunčane baterije 5%), zatim industrija stakla i keramike 25%, industrija boja 25%, industrija čelika 10% i ostale grane industrije 5%.

Udjel Jugoslavije u svjetskoj proizvodnji selena iznosi 4%. Jedini je proizvođač selena Rudarsko-topioničarski bazen Bor s godišnjom proizvodnjom tehničkog selena 50–60 t. U Boru se selen proizvodi iz mulja od elektrolitičke rafinacije bakra po sulfatnom postupku.

LIT.: C. A. Hampel, Rare Metals Handbook. Chapman and Hall, London 1962. – A. A. Кудрявцев, Химия и технология селена и теллура. Издательство «Металлургия», Москва 1968. – В. Đurković, D. Đurković, Metalurgija retkih metala. Građevinska knjiga, Beograd 1976.

Redakcija

SERVOMECHANIZMI, mehanizmi u kojima izlazna veličina vjerno slijedi ulaznu veličinu. Slični su u semantičkom smislu izrazi servouredaj, servosustav, slijedni mehanizam, slijedni sustav itd. Servomehanizam sadrži regulacijski krug s pojačalom snage, a regulirana je veličina mehaničko gibanje, kao što je pomak, brzina, ubrzanje, kutni zakret itd. Još je 1934. god. H. L. Hazen precizno definirao: »Servomehanizam je sustav zatvorene petlje s kinetičkim izlazom koji sadrži pojačalo snage u direktnoj stazi i koji se aktivira razlikom između ulaza i upravljanog izlaza«.

Iako čovjek kao operator može biti uključen u lancu povratne veze, servomehanizmi su redovno potpuno automatski sustavi bez prisutnosti čovjeka (v. *Regulacija, automatska*, TE 11, str. 505).

Prvi pokušaji da se ostvare automati, tj. mehanizmi koji sami obavljaju koristan rad, potiču još iz starog vijeka, odnosno helenističkog razdoblja (Ktezibije, Filon i Heron). Tek u novome vijeku slijedili su izumi pojedinačnih automatskih mehanizama, ali je istom centrifugalni regulator (konično njihalo), opisan u patentu Wattova parnog stroja iz 1784, označio preteču suvremenih servomehanizama. Taj je regulator imao proporcionalno djelovanje. W. Siemens je 1845. opisao tzv. *diferentni regulator*, a njegovo integralno djelovanje može potpuno ukloniti regulacijsku pogrešku.

Sljedeća bitna karika u razvoju servomehanizama jest Maxwellov teorijski rad *On governors* iz 1868, gdje je povezo praktičke regulatore s diferencijalnim jednadžbama i pokazao da stabilnost servomehanizma ovisi o negativnom realnom dijelu korijena diferencijalne jednadžbe.

Do prvog svjetskog rata nema bitnih događaja u teoriji i praksi servomehanizama, iako treba spomenuti radove o stabilnosti algebarski opisanih sustava (E. J. Routh, A. Hurwitz, J. A. Višnegradski, A. M. Ljapunov). N. Minorsky je 1922. opisao automatsko upravljanje brodom, a Hazen 1934. pozicioniranje vratila. Njegova je knjiga ujedno prvi pokušaj postavljanja opće teorije. Iz 1932. godine potječe znameniti traktat H. Nyquista o stabilnosti nepotpuno opisanih sustava.

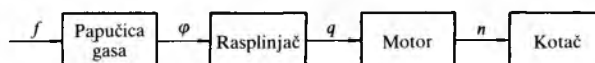
Drugi svjetski rat veoma je potaknuo razvoj servomehanizama, jer je niz novih oružja uvjetovalo automatski rad. U teoriji je također postignut velik napredak: klasičnu metodu rješavanja diferencijalnih jednadžbi zamijenila je analitička metoda Laplaceove transformacije, odnosno grafičke metode Fourierove transformacije temeljene na radovima H. Nyquista, H. W. Bodea i N. B. Nicholasa.

Nakon rata su u tehničku praksu ušla i računala, prvo analogna, a zatim digitalna. Na dalji razvoj servomehanizama i automatike općenito veoma su utjecali mikroprocesori, koji nadomještavaju druga rješenja automata.

Teorija automatske regulacije i dalje ostaje jedna od najprofulzivnijih znanstvenih grana nakon rata. Rješavali su se problemi sinteze, odnosno optimalizacije, zatim nelinearnosti, a zbog veće složenosti tehničkih rješenja i multivarijabilni sustavi. Odgovor na ta pitanja daje metoda prostora stanja što su je oko 1960. razvili sovjetski i američki znanstvenici.

SERVOMECHANIZMI I REGULACIJA PROCESA

Upravljanje. Prvi je korak u zamjeni čovjekova umnog rada strojem upravljanje što se odvija u otvorenom lancu, i to unaprijed, tako da signal putuje od ulaza k izlazu. Primjer je upravljanje brzinom vozila gdje vozač pritiskom f namješta na papučici gasa kut zakreta φ , što djeluje na protok q goriva u rasplinjaču, a dalje na snagu motora, odnosno broj okretaja n (sl. 1). Dakle, ulazni signal f djeluje posredno na izlaz n . Na tom primjeru se vidi i suština *sustavnog prilaza*, gdje se radi lakšeg uočavanja problema sustav razbija na podustave ili elementarne članove. Prema definiciji sustav je skup



Sl. 1. Blok-shema upravljanja brzinom vozila

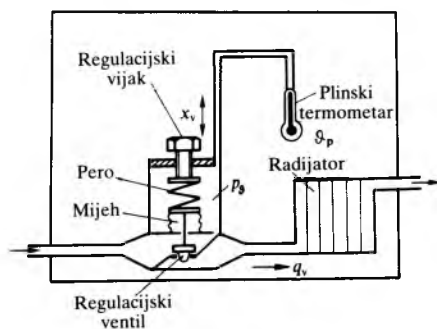
članova koji su povezani međudjelovanjem ili međuzavisnošću. Blok-shema sastoji se od blokova što predstavljaju funkcionalno djelovanje i linija što označuju usmjerene signale. U tako poopćenom prikazu važni su funkcionalni odnosi, a ne tehnička izvedba.

Osnovni nedostatak upravljanja je mogućnost poremećaja kao što su u navedenom primjeru začepljenje rasplinjača, promjena kvalitete goriva i sl., a što remeti jednoznačno namještenu povezanost uzroka i posljedice.

Upravljanje je odavno poznato i dobro istraženo, s opsežnom literaturom i bogatim iskustvom. Zato i projektiranje upravljačkih uređaja redovno nije teško.

Regulacija. Za razliku od upravljanja regulacija se odvija u regulacijskoj petlji i unatrag, što znači da izlaz procesa djeluje preko povratne veze na ulaz. Servomehanizmi ulaze u širi pojam regulacije (v. *Regulacija, automatska*, TE11, str. 505).

Primjer regulacije je regulacija temperature prostorije u pojednostavnjenom crtežu (sl. 2). Plinski termometar mjeri temperaturu prostorije ϑ_p , što mijenja tlak p_p i utječe na pomak mijeha. Na mijeh djeluje i pritisak regulacijskog vijka preko opruge. Razlika tih dviju veličina pokreće mijeh i preko njega čvrsto vezani regulacijski ventil, što dalje utječe na protok q_v ugrijane vode u radiator i na temperaturu prostorije. Ako se zbog nekog poremećaja, npr. otvaranja vrata, naruši namješteno stacionarno stanje, pad temperature ϑ_p smanji tlak p_p , regulacijski ventil se otvara, zbog čega se diže ponovno temperatura ϑ_p sve dok se opet ne ustali novo stacionarno stanje. Temperatura ϑ_p ustalila se ponovno na vrijednosti koja je dana namještenim vijkom.

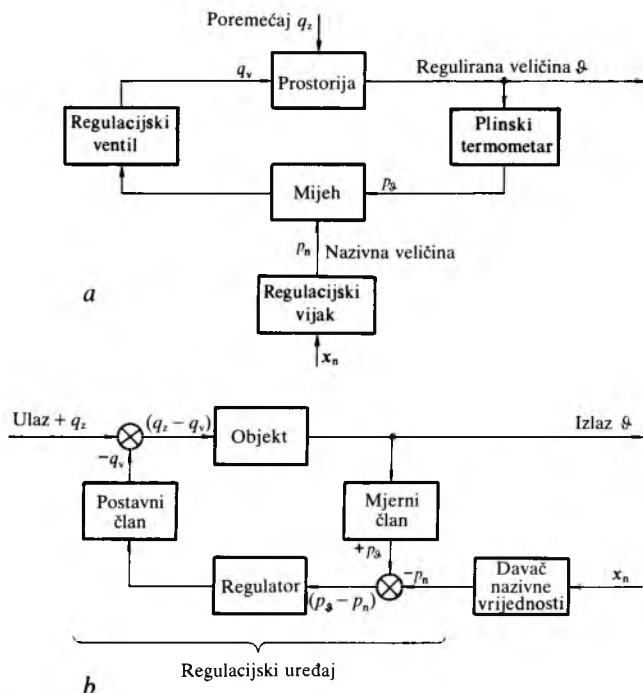


Sl. 2. Regulacija temperature prostorija

Blok-shema navedene regulacije procesa (sl. 3a) jasno prikazuje opisano djelovanje. Na poopćenoj blok-shemi (sl. 3b) primijenjeni su nazivi blokova koji odgovaraju ustaljenoj terminologiji. Osim toga, uvedena su dva funkcionalna bloka (kružići s križem) koji uspoređuju dva ulazna signala i njihovu razliku daju na izlazu. Ti tzv. komparatori mogu inače biti i posebne jedinice (mehanički diferencijal, električno diferencijalno pojačalo). Na jednom mjestu u regulacijskoj petlji mora se signal okrenuti za 180° (minus predznak), jer regulacijski signal mora djelovati suprotno tendenciji koju prouzrokuje poremećaj. To je na izlazu postavnog člana $-q_v$.

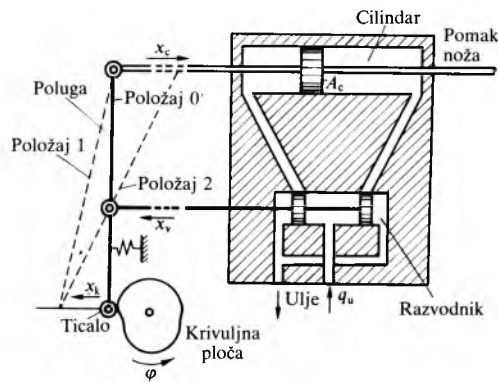
Bez automatske regulacije čovjek bi mjerio temperaturu, uspoređivao je sa željenom vrijednošću i donosio logičku odluku kako treba namjestiti ventil radijatora.

Regulacija procesa je poželjna svuda gdje se očekuju česti poremećaji koje treba suzbiti. To je osobito prisutno u tekućoj proizvodnji, tj. procesnim postrojenjima. Reguliraju se toplinske veličine kao što su temperatura, tlak, protok, odnosno općenito procesne veličine kao što su koncentracija otopine, kiselost i slično. Obično se te veličine moraju duže vrijeme održavati konstantnima, pa se tu primjenjuje tzv. *čvrsta regulacija*. Regulacijski uređaj izvodi se kao kompaktna jedinica koja se naziva *regulator* i priključuje na proces. Budući da se u tekućoj proizvodnji primjenjuju većinom toplinski, pneumatski i kemijski procesi koje je teško matematički opisati, proces se u pravilu modelira pokusom (identifikacija procesa), a u sintezi se primjenjuju empiričke metode (vremenski odziv).



Sl. 3. Blok-shema regulacije temperature u prostoriji: a posebna, b poopćena

Sljedeći je primjer regulacija hidrauličkog servomehanizma koji upravlja kopirnim glodanjem (sl. 4). U neutralnom položaju nema nikakva protoka ulja u cilindar i njegov klip je zaustavljen. Pomak klipova razvodnika x_v npr. ulijevo otvara put ulju pod tlakom u lijevu komoru cilindra, dok će iz desne komore ulje otjecati natrag u spremnik ulja. Razvodnik i cilindar djeluju kao pojačalo snage, jer se malim snagama potrebnima za pokretanje klipova razvodnika upravlja velikom snagom koju klip cilindra crpe iz izvora pomoćne energije. Klip cilindra pomiče nož koji obavlja dostavno gibanje na glodalici, pri čemu je potrebna određena snaga.

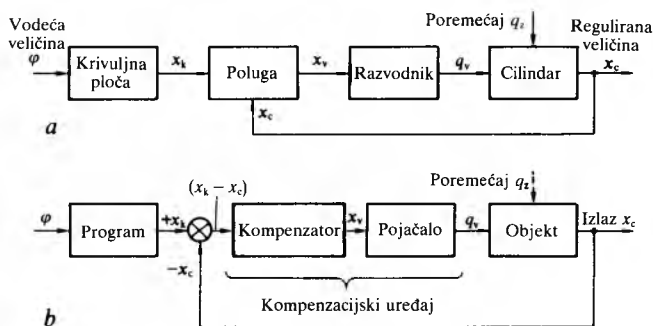


Sl. 4. Regulacija hidrauličkog servomehanizma

Ako je npr. u početku ticalo s polugom u neutralnom položaju 0, a okretanje krivuljne ploče potisne polugu u položaj 1 (osovina klipa cilindra je nepomična), klipovi razvodnika pomaknu se ulijevo i ulje protiče u cilindar pomičući klip cilindra udesno. Klip cilindra se zaustavi u položaju 2 kad klipovi razvodnika dođu u neutralni položaj. U novom položaju je pomak klipa cilindra x_c uvijek proporcionalan pomaku x_k ticala.

Blok-shema hidrauličkog servomehanizma (sl. 5a) zorno prikazuje funkcionalne odnose, a u poopćenu blok-shemu (sl. 5b), uz uobičajenu terminologiju (koja se razlikuje od one u regulaciji procesa), ucrtan je i komparator s minus predznakom u regulacijskoj petlji. I ovdje postoje poremećajne veličine q_z kao što je npr. sila rezanja, ali je bitno kako pomak noža točno slijedi vodeću veličinu (pomak ticala) uzduž ruba

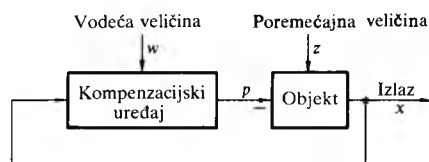
šablone. Inače poremećaj q_z je sveden na ekvivalentnu vrijednost protoka.



Sl. 5. Blok-shema regulacije hidrauličkog servomehanizma: a posebna, b poopćena

Servomehanizmima su potrebni velika točnost regulacije i brzi odziv. Oni se osobito upotrebljavaju u komadnoj proizvodnji, tj. kod obradnih strojeva, zatim kod vozila, letjelica, brodova, te u vojnoj tehnici. Reguliraju se mahom mehaničke veličine kao što su položaj, brzina, ubrzanje, kutni zakret i sl. Izlazne veličine slijede komande, pa je to *slijedna regulacija*. Regulacijski uređaj izvodi se kao integralni dio kompletnog servomehanizma i naziva se *kompenzatorom*. U komadnoj proizvodnji upotrebljavaju se uglavnom mehanički, hidraulički i električni procesi. Njih se može prikazati diferencijalnim jednadžbama (matematičko modeliranje), pa su u sintezi razvijene egzaktne metode (Laplaceova transformacija, frekvencijski odziv).

Stvarna razlika između čvrste i slijedne regulacije nije oštra: isti regulacijski sustav može se prikazati dvojako, već prema tome koja ulazna veličina je zanimljiva. Tako npr. regulacija temperature industrijske peći suzbija poremećaje i vodi temperaturu prema nekom programu. Obratno, kutni zakret radarske antene, uz to što slijedi komande, treba biti i neosjetljiv na poremećaje kao što je vjetar.



Sl. 6. Apstraktna blok-shema servomehanizma

Blok-sheme regulacije procesa (sl. 3) i servomehanizama (sl. 5) mogu se još više poopćiti, pa se dobije apstraktna blok-shema (sl. 6) koja pokazuje na usku povezanost čvrste i slijedne regulacije. One se razlikuju prema tome koja se ulazna veličina uzima kao prevladavajuća u svom djelovanju na izlaznu veličinu: poremećajna u čvrstoj regulaciji, ili vodeća veličina u slijednoj regulaciji.

Razvrstavanje servomehanizama. Prema pogonskim značajkama servomehanizmi mogu imati mehaničke, hidrauličke ili električne komponente, a najčešće su kombinirani. Elektronika, a osobito mikroprocesori prevladavaju u informatičkom dijelu, dok je hidraulika potisnuta na energetska dio. Hidraulički cilindar ima translatorski pomak i kao postavni član je veoma točan. Velik mu je omjer gustoće energije i mase, pa je nezamjenjiv u avionima. Kao postavni članovi sve se više primjenjuju i različiti tipovi elektromotora, iako oni moraju imati zupčaste prijenose za smanjenje kutne brzine, a eventualno pužne prijenose za postizanje translatorskih pomaka.

Servomehanizmi se mogu svrstati i prema upravljačkim karakteristikama (vrsta signala), pa postoji kontinuirani, impulsni i relejni tip servomehanizama. U kontinuiranom sustavu signali su kontinuirani uzduž cijele petlje (regulacija brzine motora s tahogeneratorom). Impulsni sustavi imaju u petlji djelomično impulsne ili digitalne signale (radarski sustav za praćenje aviona). Konačno, u relejnom sustavu se pojav-

ljuje na jednom mjestu i binarni (on-off) signal (relej upravlja kompresorom za punjenje spremnika zraka).

Servomehanizmi se mogu razvrstati i prema tome koju točnost mogu postići u radu. To ovisi o broju motora (integralni član) u regulacijskom krugu, pa su to servomehanizmi nultog, prvog ili drugog reda.

METODE MATEMATIČKOG MODELIRANJA SERVOMECHANIZAMA

U regulacijskom krugu općenito, pa i u servomehanizmima, djeluje regulacija tek kad se nešto mijenja: ili vodeća, ili poremećajna veličina. To znači da je bitno proučavanje *dinamike* servomehanizama. Dinamičke je pojave općenito teško ocijeniti jer postoji niz varijabli. Razvijene su egzaktne matematičke metode koje omogućuju potpuni uvid u dinamiku servomehanizama. Tako obične diferencijalne jednadžbe opisuju sustave s usredotočenim parametrima, gdje se raspodjeljuje energija a nezavisna varijabla je vrijeme. Među tim jednadžbama izuzetno su važne *linearne diferencijalne jednadžbe s konstantnim koeficijentima*, za koje su poznate metode rješavanja s egzaktim rješenjima. U istu grupu spadaju i linearne diferencijalne jednadžbe s promjenljivim koeficijentima te nelinearne diferencijalne jednadžbe, ali se one pojednostavnjenjem i linearizacijom mogu svesti na osnovni tip. Postoje još i sustavi s raspodijeljenim parametrima gdje se zbiva širenje energije, pa se promjene odigravaju i u vremenu i u prostoru. Njih opisuju parcijalne diferencijalne jednadžbe, koje su zbog više nezavisnih varijabli još teže rješive. Međutim, i ovdje se vrše zanemarenja ili prostorne diskretizacije da bi se parcijalne svele na obične diferencijalne jednadžbe (v. *Diferencijalne jednadžbe*, TE 3, str. 265).

Klasično rješenje. Linearna diferencijalna jednadžba s konstantnim koeficijentima glasi u općem obliku

$$a_n \frac{d^n x_i(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_i(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_i(t)}{dt} + a_0 x_i(t) = b_0 x_u(t), \quad (1)$$

gdje je ulazna varijabla x_u pobuda, izlazna varijabla x_i odziv, a_0 do a_n su konstantni parametri sustava, a b_0 konstantni parametar pridružen pobudi. Tu je riječ o neautonomnom sustavu. Bez vanjske pobude postoji autonomni sustav i tada je desna strana jednadžbe jednaka nuli

$$a_n \frac{d^n x_i(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_i(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_i(t)}{dt} + a_0 x_i(t) = 0. \quad (2)$$

I u tom sustavu može doći do dinamičkih pojava, pa i do tzv. vlastitih oscilacija ako u spremnicima energije unutar sustava (masa, opruga, kondenzator, itd.) ima pohranjene energije. Tako opisani sustavi su linearni (parametri a_i nezavisni o odzivu x_i) i vremenski invarijantni (a_i nezavisni o vremenu t).

Jednadžbe (1) i (2) su u implicitnom obliku $F(x_i, x_u, t) = 0$ gdje je t posredno sadržano u derivacijama: rješenje znači prevesti jednadžbu u eksplicitni oblik $x_i = f(x_u, t)$ kako bi se mogao zorno uočiti odziv prema vremenu. Opće rješenje sastoji se iz zbroja tzv. komplementarne funkcije i partikularnog integrala (princip superpozicije!)

$$x_i = x_{iKF} + x_{iPI}. \quad (3)$$

Komplementarna funkcija x_{iKF} dobije se iz homogenog dijela (zato ovisi samo o sustavu). Uz pretpostavku rješenja u obliku $x_{iKF} = K e^{\lambda t}$:

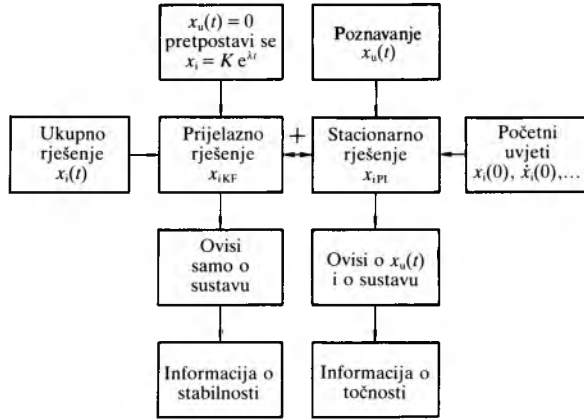
$$(a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0) K e^{\lambda t} = 0. \quad (4)$$

Izraz u zagradi je karakteristična jednadžba i ona mora biti identički jednaka nuli. Rješenje daje korijene λ_i i konstante integracije K_i

$$x_{iKF} = K_1 e^{\lambda_1 t} + K_2 e^{\lambda_2 t} + \dots \quad (5)$$

Komplementarna funkcija poistovjećuje se i s prijelaznim rješenjem, jer utječe, osobito u početku, uz $t = 0+$ (nepo-

sredno poslije ukapćanja). Partikularni integral x_{iPI} je bilo koje rješenje nehomogene jednadžbe (zato ovisi i o sustavu i o pobudi) koje ju identički zadovoljava, a nije sadržano u x_{iKF} . Naziv za partikularni integral je i stacionarno rješenje, jer opisuju stacionarno stanje, uz $t \rightarrow \infty$. Iz općeg rješenja dobije se posebno rješenje uvrštenjem početnih uvjeta, tj. vrijednosti $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i, \dots$ u trenutku $t = 0$. Prikaz (sl. 7) daje shematski opisani postupak, a naznačeno je da x_{iKF} daje informaciju o stabilnosti, a x_{iPI} informaciju o točnosti.



Sl. 7. Shematski prikaz klasičnog postupka rješavanja linearne diferencijalne jednadžbe

S klasičnim rješenjem još uvijek postoji dosta teškoća, osobito što se za svaki tip pobudne funkcije mora ponavljati cijeli postupak. Zato su pronađene jednostavnije metode rješenja, od kojih su se kod servomehanizama osobito afirmirale analitička metoda Laplaceove transformacije i grafička metoda frekvencijskog odziva, a postoje još i metoda lokusa korijena i metoda prostora stanja.

Laplaceova transformacija je operatorska metoda gdje se, slično logaritamskom postupku, operacije višeg reda (deriviranje i integriranje) zamjenjuju operacijama nižega (množenje i dijeljenje operatorom s). Tako se umjesto s diferencijalnim jednadžbama rješenje traži s mnogo jednostavnijim algebarskim oblikom.

Transformacija neke vremenske funkcije ili operacije dana je nepravim integralom:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt, \quad (6)$$

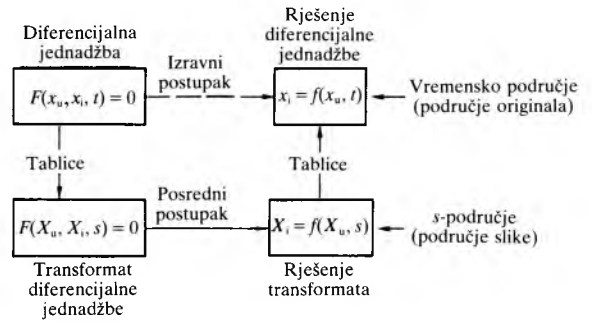
uz uvjet da je nepravi integral apsolutno konvergentan. Nakon integracije nestaje vrijeme t kao nezavisna varijabla, a transformat $F(s)$ je još samo funkcija operatora s . Kao što pokazuje teorija, operator $s = \sigma + j\omega$ je zapravo kompleksna frekvencija, a σ je prigušenje. Integracija je jednostrana s donjom granicom $t = 0$, što pokazuje da je metoda osobito prikladna za regulacijske probleme (problemi početnih uvjeta). Formalno se izravna transformacija iz područja originala u područje slike i obratna transformacija označuju na sljedeći način

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[f(t)] &= F(s), \\ \mathcal{L}^{-1}[F(s)] &= f(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Dok se vremenske funkcije $f(t)$ pišu malim slovima, uobičajeno je operatorski oblik $F(s)$ pisati velikim slovima.

Posredni postupak rješenja (sl. 8) mnogo je jednostavniji od izravnog: prvo, traži se rješenje algebarske jednadžbe i, drugo, izravna i povratna transformacija za niz funkcija i operacija nalaze se izračunate u tablicama. U tablici 1 se kao primjer navode parovi korespondentnih transformata nekih funkcija i operacija. Uobičajeno je da se rješenje transformirane diferencijalne jednadžbe (1)

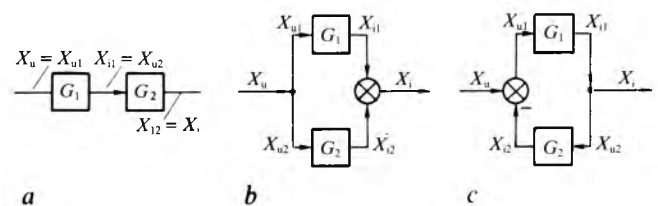
$$\begin{aligned} a_n s^n X_i(s) + a_{n-1} s^{n-1} X_i(s) + \dots + a_1 s X_i(s) + a_0 X_i(s) = \\ = b_0 X_u(s) \end{aligned} \quad (8a)$$



Sl. 8. Shematski prikaz operatorskog postupka rješavanja linearne diferencijalne jednadžbe

Tablica 1
TABLICA LAPLACEOVIH TRANSFORMACIJA
FUNKCIJA I OPERACIJA

Funkcije		Operacije	
$f(t)$	$F(s)$	$f(t)$	$F(s)$
jedinični impuls $\delta(t)$	1	derivacija $\frac{dx(t)}{dt}$	$sF(s) - f(0+)$
jedinični odskok $u(t)$	$\frac{1}{s}$	integral $\int x(t) dt$	$\frac{F(s)}{s} - \frac{f^{-1}(0+)}{s}$
jedinični nagib t	$\frac{1}{s^2}$	poučak linearnosti $a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)$	$a_1 F_1(s) + a_2 F_2(s)$
jedinična parabola t^2	$\frac{1}{s^3}$		
eksponencijalna funkcija e^{-at}	$\frac{1}{s + a}$	poučak prigušenja $e^{-at} f(t)$	$F(s + a)$
sinusna funkcija $\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	poučak početne vrijednosti $\lim_{t \rightarrow 0} f(t)$	$\lim_{s \rightarrow 0} s F(s)$
kosinusna funkcija $\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	poučak konačne vrijednosti $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$	$\lim_{s \rightarrow 0} s F(s)$



Sl. 9. Osnovna pravila algebre blokova

daje u obliku:

$$G(s) = \frac{X_i(s)}{X_u(s)} = \frac{b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (8b)$$

što se naziva *prijenosnom funkcijom*, i transformirani je omjer izlazne i ulazne funkcije uz početne uvjete jednake nuli. Taj oblik omogućuje analizu i sintezu složenih dinamičnih sustava jednostavnim postupkom *algebre blokova*. Tako se npr. dva serijski spojena bloka (sl. 9a) s prijenosnim funkcijama G_1 i G_2 mogu jednostavno sažeti (umnožak)

$$G(s) = \frac{X_i(s)}{X_u(s)} = \frac{X_{i2}}{X_{u2}} \cdot \frac{X_{i1}}{X_{u1}} = G_1 G_2. \quad (9)$$

Dva paralelno spojena bloka (sl. 9b) imaju na ulazu točku račvanja, što znači da je $X_u = X_{u1} = X_{u2}$ (zanemariva energija na ulazu, nema protoka energije), a na izlazu točku zbrljanja $X_i = X_{i1} + X_{i2}$ (pojačala, postoji protok energije). Sažeti je oblik (zbroj)

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{X_u(s)} = \frac{X_{11} + X_{12}}{X_{u1} + X_{u2}} = \frac{X_{11}}{X_{u1}} + \frac{X_{12}}{X_{u2}} = G_1 + G_2. \quad (10)$$

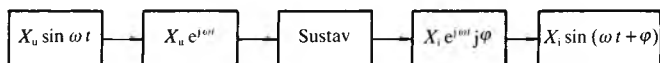
Treća osnovna operacija je povratni spoj (sl. 9c) kad se jedan blok nalazi u povratnoj vezi drugog bloka. Točke zbrajanja i račvanja su izmijenjene, jer energija teče prema ulazu

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{X_u(s)} = \frac{X_1}{X_{u1} + X_{12}} = \frac{\frac{X_1}{X_{u1}}}{1 + \frac{X_{12}}{X_{u1}}} = \frac{\frac{X_{11}}{X_{u1}}}{1 + \frac{X_{12} X_{11}}{X_{u2} X_{u1}}} = \frac{G_1}{1 + G_1 G_2}, \quad (11)$$

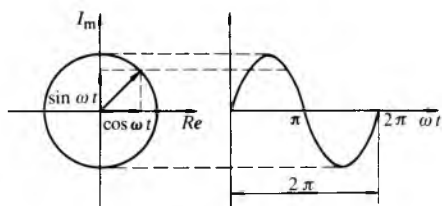
pri čemu je $X_{u1} = X_u - X_{12}$. Ovdje je ostvareno načelo negativne povratne veze. Ako je $G_2 = 1$, tj. $X_{u2} = X_{12}$, povratna veza je jedinična, pa je prema relaciji (10)

$$G(s) = \frac{G_1}{1 + G_1}. \quad (12)$$

Frekvencijski odziv. Metoda frekvencijskog odziva potječe iz elektroakustike, gdje se uz sinusnu pobudu promatra sinusni odziv. Nametne li se pobuda $x_u = X_u \sin \omega t$ na ulaz linearnog, vremenski invarijantnog sustava, na izlazu se, nestankom prijelaznih pojava, pojavljuje odziv $x_1 = X_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ iste frekvencije, ali različite amplitude i faznog pomaka. Upravo je ispitivanje promjena amplitude i faznog pomaka kod različitih frekvencija (od 0 do ∞) sadržaj frekvencijskog odziva.



Sl. 10. Shematski prikaz postupaka frekvencijskog odziva



Sl. 11. Povezanost trigonometrijskog i eksponencijalnog oblika harmoničkih funkcija

Frekvencijski odziv je, dakle, rješenje diferencijalne jednadžbe

$$a_n \frac{d^n}{dt^n} [X_1 \sin(\omega t + \varphi)] + \dots + a_1 \frac{d}{dt} [X_1 \sin(\omega t + \varphi)] + a_0 X_1 \sin(\omega t + \varphi) = b_0 x_u \sin \omega t, \quad (13)$$

gdje je pretpostavljeni odziv u stacionarnom stanju. Time se opet diferencijalna jednadžba svodi na algebarski oblik. Da se pojednostavni postupak, umjesto sinusne funkcije uvodi se eksponencijalni oblik prema shemi (sl. 10). To je opravdano ako se pri konstrukciji sinusoide (sl. 11) ima u vidu povezanost trigonometrijskog i eksponencijalnog oblika harmoničke funkcije preko Eulerove formule

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t. \quad (14)$$

Sinusna funkcija je projekcija rotirajućeg vektora (verzora) na imaginarnu os u Gaussovoj ravnini. Tako se jednadžba (13) piše

$$a_n \frac{d^n}{dt^n} [X_1 e^{i\omega t} e^{i\varphi}] + \dots + a_1 \frac{d}{dt} [X_1 e^{i\omega t} e^{i\varphi}] + a_0 X_1 e^{i\omega t} e^{i\varphi} = b_0 X_u e^{i\omega t}. \quad (15)$$

Kao analitičko rješenje uvodi se *sinusna prijenosna funkcija* kao omjer izlazne i ulazne funkcije u stacionarnom stanju

$$G(j\omega) = \frac{X_1(j\omega)}{X_u(j\omega)} = \frac{X_1}{X_u} \cdot \frac{b_0}{a_n(j\omega)^n + \dots + a_1 j\omega + a_0}, \quad (16)$$

što se može i kraće označiti

$$G(j\omega) = \frac{X_1(j\omega)}{X_u(j\omega)} = \frac{X_1 e^{i\omega t} e^{i\varphi}}{X_u e^{i\omega t}} = \left| \frac{X_1}{X_u} \right| e^{i\varphi}. \quad (17)$$

Ako se zamijeni $j\omega$ sa s , taj oblik ima formalnu sličnost s prijenosnom funkcijom iz jednadžbe (7). Zapravo, frekvencijski odziv je dvostrana Fourierova transformacija, gdje je prigušenje $\sigma \rightarrow 0$, granice integracije t su od $-\infty$ do $+\infty$, što pokazuje da se radi o tzv. *opuštenom sustavu*, jer su do sadašnjeg trenutka sve prijelazne pojave nestale.

Ta metoda ima pravu vrijednost ako se primjenjuje grafički prikaz. Na temelju snimljenih krivulja, a bez poznavanja diferencijalne jednadžbe, može se provesti grafička analiza i sinteza servomehanizma. U praksi se pojavljuju sljedeći grafički prikazi: a) polarni dijagram u Gaussovoj ravnini, gdje vrh verzora G opisuje krivulju s frekvencijom ω kao parametrom (Nyquistov dijagram); b) amplitudno-frekvencijski dijagram, gdje je amplituda $G(j\omega)$ funkcija frekvencije ω u logaritamsko-logaritamskom mjerilu, te fazno-frekvencijski dijagram, gdje je faza $\angle G(j\omega)$ funkcija frekvencije ω u linearno-logaritamskom mjerilu (Bodeovi dijagrami); c) amplitudno-fazni dijagram, gdje je amplituda $|G(j\omega)|$ prikazana kao funkcija faze $\angle G(j\omega)$ s frekvencijom ω kao parametrom u logaritamsko-linearnom mjerilu (Nicholsonov dijagram).

Izvest će se samo *Nyquistov prikaz*, koji prikazuje sinusnu prijenosnu funkciju $G(j\omega)$ nekog sustava ili elementa u kompleksnoj ravnini. Tako npr. za proporcionalni sustav 1. reda

$$\tau \frac{dx_1}{dt} + x_1 = K_p \quad (18)$$

proizlazi transformirani oblik

$$j\omega \tau X_1 e^{i\omega t} e^{i\varphi} + X_1 e^{i\omega t} e^{i\varphi} = K_p X_u e^{i\omega t}, \quad (19)$$

te sinusna prijenosna funkcija

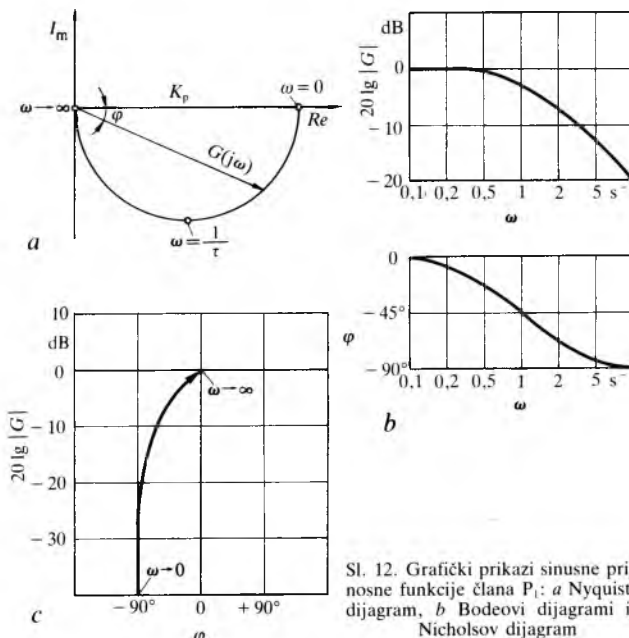
$$G(j\omega) = \frac{X_1(j\omega)}{X_u(j\omega)} = \frac{K_p}{1 + j\omega \tau}. \quad (20)$$

Amplituda je tog vektora

$$|G(j\omega)| = \frac{K_p}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}, \quad (21)$$

a fazni pomak

$$\varphi = -\arctan \tau. \quad (22)$$



Sl. 12. Grafički prikazi sinusne prijenosne funkcije člana P_1 : a) Nyquistov dijagram, b) Bodeovi dijagrami i c) Nicholsonov dijagram

Sada se može na temelju relacija (21) i (22) u Gaussovoj ravni ucrtati polarna krivulja koja spaja vrhove radijvektora $G(j\omega)$ za parametar ω (sl. 12a). Krivulja je kružnica s parametrom ω koji se mijenja od $0 \dots \infty$. Na sličan način crtaju se polarne krivulje za bilo koji $G(j\omega)$. Budući da su i amplituda $|G(j\omega)|$ i fazni pomak $\angle G(j\omega)$ funkcije od ω , mogu se one prikazati u logaritamsko-logaritamskom, odnosno linearno-logaritamskom mjerilu kao Bodeovi dijagrami (sl. 12b), ili sa ω kao parametrom u logaritamsko-linearnom mjerilu kao Nicholsov dijagram (sl. 12c).

U tablici 2 su polarne krivulje za osnovne članove iz kojih se sastoje svi dinamički sustavi. Uz diferencijalnu jednadžbu za svaki član dani su i prijenosna funkcija $G(s)$ i sinusna prijenosna funkcija $G(j\omega)$.

veza je jedinična, a izlaz je $Y(s) = X(s)$. Na ulazu se može ugraditi član G_w koji svodi ulazni signal na dimenziju od $X(s)$, i to pomoću faktora proporcionalnosti G_w . Članovi G_p i G_m imaju najčešće zanemarljivo kašnjenje s obzirom na objekt. To znači da se svi članovi višeg reda (dinamika) mogu zanemariti i diferencijalna jednadžba degenerira u oblik $x_i = K_p x_u$ sa K_p kao faktorom proporcionalnosti.

Objekti regulacije

Za primjer se uzimaju dva tipična reprezentativna objekta, istosmjerni elektromotor te hidraulički motor.

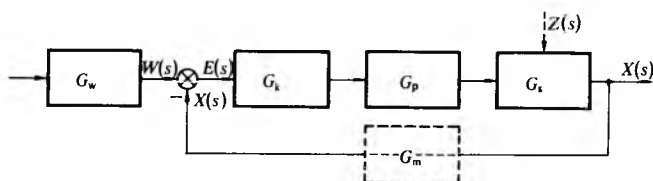
Istosmjerni elektromotor. Zbog linearnog odnosa između napona armature i broja okretaja istosmjerni se elektromotor najčešće primjenjuje u servomehanizmima. Na shematskom

Tablica 2
NYQUISTOV PRIKAZ OSNOVNIH DINAMIČKIH ČLANOVA

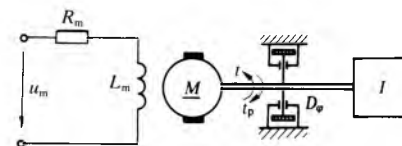
Sustav	Diferencijalne jednadžbe	$G(s)$	$G(j\omega)$	Nyquistov prikaz $G(j\omega)$
P_0	$x_i = K_p x_u$	K_p	K_p	
P_1	$\tau \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p x_u$	$\frac{K_p}{1 + \tau s}$	$\frac{K_p}{1 + j\omega\tau}$	
P_2	$\frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{d^2 x_i}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \cdot \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p x_u$	$\frac{K_p}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2}$	$\frac{K_p}{1 + j\omega \frac{2\zeta}{\omega_n} - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}$	
I_0	$x_i = K_i \int x_u dt$	$\frac{K_i}{s}$	$\frac{K_i}{j\omega}$	
I_1	$\tau \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_i \int x_u dt$	$\frac{K_i}{s(1 + \tau s)}$	$\frac{K_i}{j\omega(1 + j\omega\tau)}$	
D_0	$x_i = K_d \frac{dx_u}{dt}$	$K_d s$	$j\omega K_d$	
D_1	$\tau \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_d \frac{dx_u}{dt}$	$\frac{K_d s}{1 + \tau s}$	$\frac{j\omega K_d}{1 + j\omega\tau}$	
T_m	$x_i(t) = x_u(t - \tau_m)$	$e^{-s\tau_m}$	$e^{-j\omega\tau}$	

MODELIRANJE KOMPONENTATA SERVOMECHANIZAMA

U prvom se poglavlju govorilo o komponentama od kojih se sastoji servomehanizam. U ponovljenoj blok-shemi servomehanizma (sl. 13) vide se sve moguće komponente koje se mogu pojaviti. To su kompenzator G_k , pokretački član G_p (s pojačanjem), objekt G_s (motor) koji daje snagu izlazu. U povratnoj se vezi još eventualno nađe i mjerni član G_m , npr. tahogenerator ili giroskop. Ako tog člana nema, povratna



Sl. 13. Blok-shema komponentata servomehanizma



Sl. 14. Istosmjerni elektromotor upravljani strujom magnetiziranja

prikazu (sl. 14) kut zakreta vratila regulira se promjenljivom strujom magnetiziranja kroz statorske namote i_m , a struja armature I_a je konstantna.

U ulaznom krugu vrijedi na temelju prvog Kirchhoffova zakona:

$$u_m = L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m \tag{23}$$

Nadalje, zakretni moment t na vratilu razmjernan je magnetskom toku statora Φ_m i struji armature I_a

$$t = K_2 I_a \Phi_m = K_2 I_a K_1 i_m = K i_m, \quad (24)$$

jer je magnetski tok statora razmjernan struji magnetiziranja $\Phi_m = K_1 i_m$ (linearni dio krivulje magnetiziranja).

Taj zakretni moment mora svladati moment tromosti armature J , viskozno trenje predočeno torzijskim koeficijentom trenja D_φ i moment opterećenja t_p

$$K i_m = J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + D_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + t_p. \quad (25)$$

Elastičnost vratila je zanemarena.

Simultane diferencijalne jednadžbe (23) i (25) lako se rješavaju ako se prevedu u operatorski oblik

$$U_m = (L_m s + R_m) I_m, \quad (26)$$

$$K I_m = (J s + D_\varphi) s \Phi + T_p. \quad (27)$$

Uz zanemarenje T_p može se izlučenjem I_m odmah dobiti prijenosna funkcija elektromotora

$$G(s) = \frac{\Phi(s)}{U_m(s)} = \frac{K}{R_m D_\varphi} \cdot \frac{1}{s \left[1 + \frac{L_m s}{R_m} \right] \left[1 + \frac{J}{D_\varphi} s \right]}, \quad (28)$$

gdje je prijenosni omjer $K_i = K/(R_m D_\varphi)$, vremenska konstanta električnog dijela $\tau_e = L_m/R_m$, a vremenska konstanta mehaničkog dijela $\tau_m = J/D_\varphi$. Taj omjer između $\Phi(s)$ na izlazu i $U_m(s)$ na ulazu ima *integralno djelovanje* (u nazivniku s kao faktor!), a diferencijalna jednadžba je 2. reda.

Ako se kao odziv uzme kutna brzina $\omega = d\varphi/dt$ ili transformirano $\Omega(s) = s \Phi(s)$, dobiva se nova prijenosna funkcija

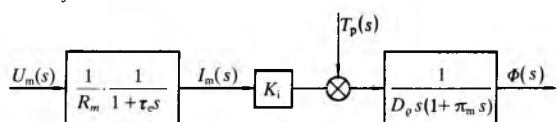
$$G_i(s) = \frac{\Omega(s)}{U_m(s)} = \frac{K}{R_m D_\varphi} \cdot \frac{1}{s \left[1 + \frac{L_m s}{R_m} \right] \left[1 + \frac{J}{D_\varphi} s \right]}, \quad (29)$$

Omjer između $\Omega(s)$ na izlazu i $U_m(s)$ na ulazu pokazuje *proporcionalno djelovanje*.

Ako se uzme u obzir mogući moment opterećenja T_p , iz jednadžbi (26) i (27), uz jednostavne preinake, dobiva se

$$\Phi(s) = \frac{1}{D_\varphi} \cdot \frac{1}{s \left[1 + \frac{J}{D_\varphi} s \right]} \cdot \left[\frac{K}{R_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_m s}{R_m}} U_m - T_p \right]. \quad (30)$$

Ta se relacija može postaviti u blok-shemi (sl. 15) sa T_p kao poremećajnom veličinom.



Sl. 15. Blok-shema elektromotora s opterećenjem

Hidraulički motor kao objekt regulacije samo je kombinacija razvodnika i cilindra s ulazom x_v i izlazom x_c (sl. 4) bez povratne veze preko poluge. Uz pomaknutu klipove razvodnika protječe ulje iz spremnika preko razvodnika u jednu komoru cilindra, pa se polazi od zakona o održanju materije (umjesto masenog protoka može se za tekuće fluide staviti volumni protok)

$$q_u = q_k + q_g + q_s, \quad (31)$$

gdje ulazni protok q_u mora pokriti korisni protok q_k u komoru što pokreće klip cilindra, gubitke q_g zbog istjecanja ulja kroz zazor, te dodatni protok q_s zbog stlačivosti ulja. Sve te veličine izrazit će se u funkciji ulazne i izlazne veličine, $x_v + x_c$, kako bi se dobila prijenosna funkcija.

Ulazni protok je razmjernan presjeku otvora razvodnika, odnosno u prvaj aproksimaciji pomaku x_v klipa

$$x_u \approx K_u x_v, \quad (32)$$

gdje je K_u faktor proporcionalnosti.

Protok q_k dobije se tako da se izjednači količina ulja $q_k \Delta t$ koja priteče u vremenu Δt , s ispunjenim volumenom $A_c x_c$,

gdje je A_c radna površina klipa cilindra. Vrijedi dakle

$$q_k = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{A_c \Delta x_c}{\Delta t} = A_c \frac{dx_c}{dt}. \quad (33)$$

Da bi se izrazio q_g , polazi se od činjenice da je strujanje ulja kroz uske otvore laminarno, pa je u prvaj aproksimaciji razmjerno tlaku ulja p . Može se pisati

$$q_g = K_g p = K_g \frac{M}{A_c} \cdot \frac{d^2 x_c}{dt^2}, \quad (34)$$

jer se tlak p može dobiti izjednačenjem sila koje djeluju na klip cilindra

$$A_c p = M \frac{d^2 x_c}{dt^2}, \quad (35)$$

sa M kao opteretnom masom na klipu cilindra (masa ulja se pri tome može zanemariti).

Konačno, q_s se dobije na temelju zakonitosti da je relativna promjena obujma polja $\Delta V/V$ razmjerna tlaku Δp

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{E_v} \Delta p, \quad (36)$$

s modulom volumne elastičnosti E_v kao faktorom proporcionalnosti. Uvrštenjem izraza (35) i sređivanjem dobiva se

$$q_s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{V}{E_v} \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{V}{E_v} \frac{dp}{dt} = \frac{V M}{E_v A_c} \cdot \frac{d^3 x_c}{dt^3}. \quad (37)$$

Uvrštenjem izraza (32), (33), (34) i (37) u (31) te sređivanjem dobiva se diferencijalna jednadžba

$$\frac{V M}{E_v A_c} \cdot \frac{d^3 x_c}{dt^3} + \frac{K_g M}{A_c} \cdot \frac{d^2 x_c}{dt^2} + A_c \frac{dx_c}{dt} = K_u x_v. \quad (38)$$

Ako se jednadžba (38) prevede u operatorski oblik i postavi omjer $X_c(s)/X_v(s)$, dobiva se prijenosna funkcija

$$G(s) = \frac{X_c(s)}{X_v(s)} = \frac{K_u}{A_c} \cdot \frac{1}{s \left[\frac{V M}{E_v A_c^2} s^2 + \frac{K_g M}{A_c^2} s + 1 \right]}, \quad (39)$$

što pokazuje na integralno djelovanje. Tu je prijenosni omjer $K_i = K_u/A_c$. Izraz u zagradi upućuje na mogućnost da može doći do eventualnih prigušenih oscilacija s neprigušenom vlastitom frekvencijom

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_v A_c^2}{V M}} \quad (40)$$

i stupnjem prigušenja

$$\zeta = \omega_n \frac{M K_g}{A_c^2} = \frac{K_g}{A_c} \sqrt{\frac{E_v M}{V}}. \quad (41)$$

Konačno s kao faktor u nazivniku pokazuje da između ulaza $X_v(s)$ i izlaza $X_c(s)$ postoji integralno djelovanje.

Kompensacijski članovi

Na shematskoj slici hidrauličkog servomehanizma (sl. 4) lijevo od crkanog dijela ucrtna je mehanička poluga kao najjednostavniji kompensacijski član. Ona spaja veličine x_c i x_v u čvrstom omjeru, pa ima *proporcionalno djelovanje*. Danas su, međutim, kompensacijski članovi elektronički i sastoje se od kompenzatora i pojačala. Kompenzator se sastoji od nekoliko pasivnih elemenata (otpornika i kondenzatora) i nalazi se redovno u povratnoj grani pojačala (sl. 16). Pojačalo je operacijsko, što će reći da ima vrlo veliko pojačanje, te da između ulaza i izlaza zakreće signal za 180°. Zbog visoka ulaznog otpora operacijskog pojačala ne teče praktički ulazna struja i_p , pa je u točki Q suma struja $i_u + i_i \approx 0$ (sl. 16a). Na osnovi toga se dobiva

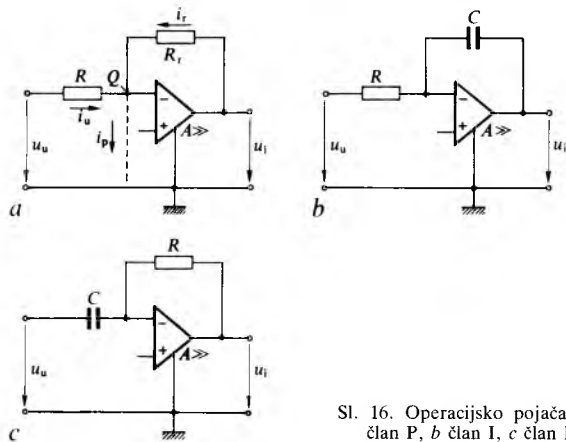
$$\frac{u_i}{R_i} + \frac{u_u}{R} \approx 0 \quad \text{ili} \quad u_i(t) - \frac{R_i}{R} u_u(t) = K_p u_u(t) \quad (42)$$

kao prijenosna funkcija $G_r(s) = K_p$ (proporcionalno djelovanje).

S kondenzatorom C umjesto R_r (sl. 16b)

$$C \frac{du_i}{dt} + \frac{u_u}{R} \approx 0 \quad \text{ili} \quad u_i(t) = -\frac{1}{RC} \int u_u dt, \quad (43)$$

odnosno prijenosna funkcija $G_r(s) = -\frac{1}{RCs}$ (integralno djelovanje).



Sl. 16. Operacijsko pojačalo. a član P, b član I, c član D

Zamjenom R i C u shemi (sl. 16c), dobiva se

$$R u_u + C \frac{du_u}{dt} \approx 0 \quad \text{ili} \quad u_i(t) = -RC \frac{du_u(t)}{dt}, \quad (44)$$

ili u obliku prijenosne funkcije $G_r(s) = -RCs$ (derivacijsko djelovanje).

Na sličan se način mogu složiti i kombinirana djelovanja, kao npr. članovi PI, PD ili PID.

ANALIZA SERVOMECHANIZAMA

Analizirati servomehanizam znači uz poznavanje pobude i sustava tražiti odziv, dakle ispituje se ponašanje gotovog servomehanizma. To se može lako pokazati na primjeru njegove blok-sheme (sl. 13). Na ulazu je vodeća veličina $W(s)$, u izravnoj vezi serijski vezani blokovi G_k , G_p i G_s . Odziv $X(s)$ djeluje preko jedinične povratne veze na ulaz, gdje je $E(s) = W - X$

$$X = G_k G_p G_s E, \quad (45)$$

$$E = W - X.$$

Izlučivanjem varijable E dobiva se

$$G(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = \frac{G_k G_p G_s}{1 + G_k G_p G_s}, \quad (46)$$

što je *prijenosna funkcija zatvorenog kruga*. Ako je nazivnik jednak nuli (što je zapravo karakteristična jednačnja), odziv $X(s)$ prekomjerno poraste, bez obzira na pobudu $W(s)$. To je slučaj nestabilnosti koji ovisi samo o sustavu $G_k G_p G_s$. Taj se umnožak naziva još *prijenosnom funkcijom otvorenog kruga* i označuje sa G_o . Na toj se funkciji zasniva tzv. Nyquistov kriterij stabilnosti.

Spomenuto je (sl. 7) da točnost ovisi i o sustavu i o pobudi. Iz izraza (46) može se zaključiti da je za točno pozicioniranje potrebno da je $X(s) = W(s)$, odnosno da $G_k G_p G_s \rightarrow \infty$. Kako su to nepravni razlomci od operatora s , znači da $s \rightarrow 0$.

Osnovni su zadaci analize, a kasnije i sinteze servomehanizma, ustanovljavanje stabilnosti, točnosti i brzine odziva.

Primjer hidrauličkog servomehanizma. Na servomehanizmu s ucrtanim gibanjem poluge (sl. 17), prijenosna funkcija hidrauličkog motora dana je relacijom (39). Da bi se dobila ukupna prijenosna funkcija servomehanizma $G(s) = X_v/X_k$, mora se još opisati djelovanje poluge. Pomak klipa razvodnika x_v sastoji se od početnog pomaka x_{v1} koji se dobiva na osnovi

sličnosti trokuta (uz zanemarenje kutnog zakreta poluge)

$$\frac{x_{v1}(t)}{b} = \frac{x_k(t)}{a+b} \quad (47)$$

i pomaka u suprotnom smjeru x_{v2} koji vraća polugu u neutralni položaj

$$\frac{x_{v2}(t)}{a} = \frac{x_c(t)}{a+b}. \quad (48)$$

Dobiva se (uz pretpostavku $a=b$, čime se ne gubi u općenitosti)

$$x_v(t) = x_{v1} - x_{v2} = \frac{x_k}{2} - \frac{x_c}{2}, \quad (49)$$

što se piše u operatorskom obliku

$$X_v(s) = \frac{X_k}{2} - \frac{X_c}{2}. \quad (50)$$

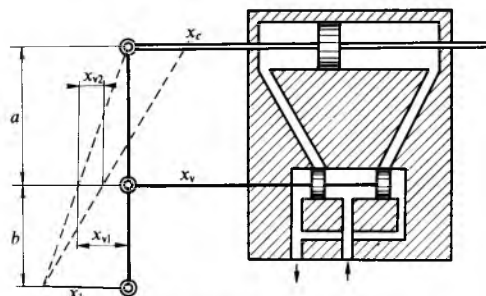
To je *proporcionalno djelovanje poluge*. Ako se izluči iz relacija (39) za servomehanizam i (50) za polugu unutrašnja varijabla X_v dobije se ukupna prijenosna funkcija servomehanizma

$$G(s) = \frac{X_c(s)}{X_k(s)} = \frac{1}{1 + \frac{A_c}{K}s + \frac{K_1 M}{A_c K} s^2 + \frac{VM}{E_v A_c K} s^3}. \quad (51)$$

Ona je proporcionalnog karaktera jer nema faktora s u nazivniku. Podsjeća se da prijenosna funkcija samog hidrauličkog motora ima integralni karakter. Prijenosna funkcija $G(s)$ može se pisati i u obliku diferencijalne jednačnje

$$\frac{VM}{E_v A_c K} \frac{d^3 x_c}{dt^3} + \frac{K_1 M}{A_c K} \frac{d^2 x_c}{dt^2} + \frac{A_c}{K} \frac{dx_c}{dt} + x_c = x_k. \quad (52)$$

Dalja analiza servomehanizma osniva se bilo na prijenosnoj funkciji (51), bilo na diferencijalnoj jednačnji (52).



Sl. 17. Kinematika poluge servomehanizma

Točnost

Servomehanizmi traže vrlo veliku točnost. Nije dovoljno da samo u stacionarnom stanju nema odstupanja, već ne smije doći do oscilacije u prijelaznom stanju, a brzina odziva mora biti visoka. Kako točnost ovisi o rješenju kompletne diferencijalne jednačnje, ona ovisi i o sustavu i o vrsti pobude. Da bi se pojmovi sistematizirali, uvodi se nekoliko standardnih tipova sustava i standardnih pobudnih funkcija.

Tipovi servomehanizama. Prijenosna funkcija otvorenog kruga za tipične sklopove snage kakvi se upotrebljavaju u servomehanizmima ima opći oblik

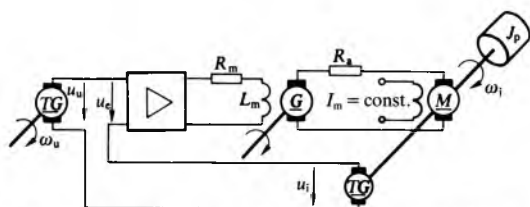
$$G_o(s) = \frac{K(1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots)}{s^k(1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots)}. \quad (53)$$

Tu je K ukupni prijenosni omjer u stacionarnom stanju, a k kao potencija od s u nazivniku označuje broj integracija u krugu. Drugi član u nazivniku predstavlja kašnjenje sustava.

Servomehanizam tipa 0 je onaj koji nema integracijskog člana, tj. $k=0$, tipa 1 ako ima jedan integracijski član, tj. $k=1$, tipa 2 sa dva integracijska člana, tj. $k=2$, itd. To znači da se tip 0 ponaša proporcionalno a tipovi 1, 2 i viši integralno.

Kad se govori o tipu servomehanizma, mora se paziti da se tip ne miješa s redom; red je jednak potenciji polinoma od s u nazivniku, a tip odgovara potenciji integracijskog člana s u nazivniku.

Servomehanizmi tipa 0 upotrebljavaju se za čvrstu regulaciju gdje se ne traži prevelika točnost. Sustav tipa 0 električni je servomehanizam za regulaciju brzine (sl. 18).



Sl. 18. Električni servomehanizam tipa 0 za regulaciju brzine

Ulazna osovina vrti se određenom kutnom brzinom $\omega_u = d\varphi_u/dt$, a ulazni tahogenerator daje na izlazu napon u_u razmjernan ω_u . Kutna brzina na izlazu $\omega_i = d\varphi_i/dt$ pretvara se pomoću izlaznog tahogeneratorsa u razmjernan napon u_i . Iz slike se vidi da izlazna kutna brzina ω_i ne može nikad točno slijediti ulaznu kutnu brzinu ω_u , jer je uz $u_i = u_u$ i ulazno odstupanje $u_e = 0$, pa se motor ne bi pokretao. Dakle, uvijek mora postojati neko regulacijsko odstupanje u_e . Prijenosna je funkcija otvorenog kruga gornjeg servomehanizma

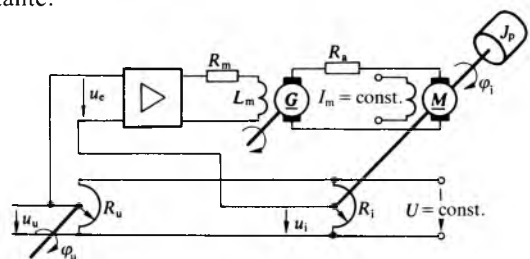
$$G_o(s) = \frac{\Omega_i(s)}{U_e(s)} = \frac{K}{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_m s)}, \quad (54)$$

gdje je K ukupni prijenosni omjer otvorenog kruga servomehanizma, τ_g je vremenska konstanta generatora koja ovisi o otporu R_m i induktivnosti L_m uzbuđenog kruga generatora, a τ_m je vremenska konstanta motora koja ovisi o otporu armature R_a i momentu tromosti motora J_p te eventualnog opterećenja J_p .

Servomehanizmi tipa 1 najčešće se primjenjuju. Primjer takva sustava je električni servomehanizam za pozicioniranje (sl. 19). Kutni zakret φ_u na ulazu pretvara se preko klizala potencijometra u razmjernan električni napon u_u koji se uspoređuje s naponom u_i razmjernom izlaznom kutu zakreta φ_i . Uz bilo kakvo odstupanje na ulazu u_e motor se okreće tako dugo dok se u_i ne izjednači sa u_u i dok trajno odstupanje u_e ne nestane; motor djeluje kao integracijski član. Prijenosna je funkcija otvorenog kruga tog servomehanizma

$$G_o(s) = \frac{\Phi_i(s)}{U_e(s)} = \frac{K}{s(1 + \tau_g s)(1 + \tau_m s)}, \quad (55)$$

gdje je K ukupni prijenosni omjer između brzine promjene izlazne veličine $\dot{\varphi}_i$ i ulazne veličine u_e , a τ_g i τ_m su vremenske konstante.



Sl. 19. Električni servomehanizam tipa 1 za pozicioniranje

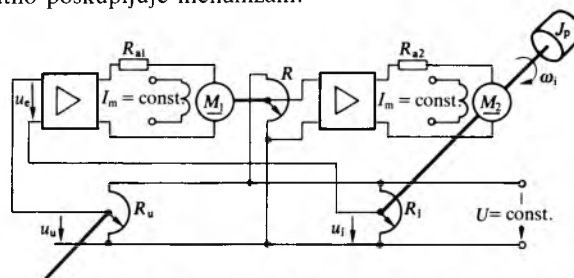
Servomehanizmi tipa 2 rijetko se primjenjuju, i to pretežno ondje gdje se traži visoka točnost, kao što je pri upravljanju raketama. Jedan je takav sustav serijski spoj dvaju motora za preciznu regulaciju brzine (sl. 20). Ulazna osovina okreće se konstantnom kutnom brzinom $\omega_u = d\varphi_u/dt$, a okretanje izlazne osovine $\dot{\varphi}_i = d\varphi_i/dt$ točno je slijedi, i to i po kutnoj brzini ω_i i po kutnom zakretu φ_i . Uz uvjete da je $\dot{\varphi}_i = \dot{\varphi}_u$ i $\omega_i = \omega_u$, nema regulacijskog odstupanja u_e , motor M_1 i klizalo potencijometra R miruju, struja se armature motora M_2 ne mijenja, a motor M_2 okreće se konstantnom kutnom

brzinom ω_i . Postoji li kutni pomak između φ_i i φ_u , pojavljuje se regulacijsko odstupanje u_e , a motor tako dugo zakreće klizalo potencijometra R , odnosno mijenja brzinu motora M_2 , dok se razlika u kutnom zakretu, odnosno u regulacijskom odstupanju ne odstrani. Oba motora djeluju kao integracijski članovi u seriji, pa je njihova prijenosna funkcija

$$G_o(s) = \frac{\Phi(s)}{U_e(s)} = \frac{K}{s^2(1 + \tau_{m1}s)(1 + \tau_{m2}s)}, \quad (56)$$

gdje je K ukupni prijenosni omjer između kutnog ubrzanja izlazne veličine $\ddot{\varphi}_i$ i ulazne veličine $\ddot{\varphi}_u$.

Iz izloženog zaključuje se da su sustavi višeg tipa još povoljniji za otklanjanje trajnih odstupanja. Oni se međutim ne upotrebljavaju, jer povećanje integracijskih članova uzrokuje velike probleme oko stabilnosti takvih servomehanizama. To otežava projektiranje, povećava broj sklopova i općenito znatno poskupljuje mehanizam.



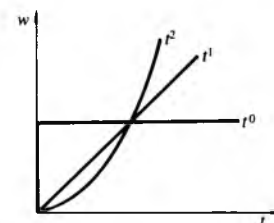
Sl. 20. Električni servomehanizam tipa 2 za preciznu kontrolu brzine

U praksi se najviše upotrebljavaju servomehanizmi tipa 1. Ako nije potrebna prevelika točnost, uzimaju se servomehanizmi tipa 0, a ako je potrebna velika točnost, primjenjuje se tip 2. Tako, npr., ako se želi točno prenijeti namještanje neke ulazne mjerne vrijednosti, dovoljno je da se uzme tip 1, jer će se pomak prenijeti bez pogreške. Naprotiv, kod kopirne glodalice treba osigurati da rezna glava slijedi promjene brzine kopirnog ticala bez odstupanja, pa se primjenjuje tip 2.

Tipovi pobudne funkcije. Izbor pobudnih funkcija sveden je na jediničnu parabol m -tog reda

$$w(t) = t^m \quad \text{za } m \geq 0, \quad t \geq 0 \quad (57)$$

pomoću kojih se može izvesti bilo koja funkcija kao red potencija. Odabrane su tri prve parabole (sl. 21) i dani njihovi analitički izrazi u realnom vremenu i u operatorskom obliku (tabl. 3).



Sl. 21. Parabole nultog, prvog i drugog reda

Tablica 3
TIPOVI POBUDNIH FUNKCIJA

$t^m (t \geq 0)$	Krivulja	$w(t)$	$W(s)$
$m = 0$	jedinični odskok	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
$m = 1$	jedinični nagib	$tu(t)$	$\frac{1}{s^2}$
$m = 2$	jedinična parabola	$t^2 u(t)$	$\frac{1}{s^3}$

Trajno regulacijsko odstupanje. Pomoću blok-sheme servomehanizma (sl. 13) s prijenosnom funkcijom otvorenog kruga $G_o = G_k G_p G_s$ dobiva se prijenosna funkcija zatvorenog kruga

$$G(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = \frac{G_o}{1 + G_o}. \quad (58)$$

Iz te jednadžbe može se lako izvesti izraz za regulacijsko odstupanje

$$E(s) = W - X = W - \frac{G_0}{1 + G_0} W = \frac{1}{1 + G_0} W. \quad (59)$$

Regulacijsko je odstupanje u ovoj jednadžbi prikazano kao funkcija operatora s . Kako se trajno regulacijsko odstupanje e_0 definira kao razlika između vodeće i regulirane veličine uz $t \rightarrow \infty$, tj. u vremenskom području, potrebno je izraz (59) prebaciti iz područja kompleksne varijable u vremensko područje. To se na jednostavan način postiže pomoću poučka konačne vrijednosti (tabl. 1)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s F(s). \quad (60)$$

Primijenjen na jednadžbu (59) daje

$$e_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{W}{1 + G_0}. \quad (61)$$

Taj zadnji izraz će poslužiti da se izračuna trajno regulacijsko odstupanje e_0 za tri tipa pobude prema tablici 3, te tri tipa servomehanizma prema jednadžbi (53). Kao primjer se navodi servomehanizam tipa 1

$$G_0(s) = \frac{X(s)}{E(s)} = \frac{K(1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots)}{s(1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots)}. \quad (62)$$

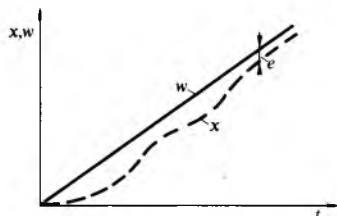
te nagibna funkcija

$$W(s) = \frac{1}{s^2}. \quad (63)$$

Ako se uvrste u izraz (61), daju

$$e_0 = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{W}{1 + G_0} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\frac{1}{s^2}}{1 + \frac{K(1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots)}{s(1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots)}} = \frac{1}{K}. \quad (64)$$

Tok regulacijskog odstupanja e može se i grafički prikazati (sl. 22). Na sličan se način može izračunati e_0 i za ostale kombinacije tipova servomehanizama i pobuda. Rezultati su



Sl. 22. Vremenski dijagram regulacijskog odstupanja

Tablica 4

TRAJNO REGULACIJSKO ODSUPANJE U OVISNOSTI O TIPU SERVOMECHANIZMA I POBUDE

Tip pobude	Tip servomehanizma		
	0	1	2
Odskočna			
e_0	$\frac{1}{1 + K}$	0	0
Nagibna			
e_0	∞	$\frac{1}{K}$	0
Parabolna			
e_0	∞	∞	$\frac{1}{K}$

u preglednom obliku dani u tabl. 4. Iz nje se vidi da je uz pobude u obliku parabola višeg reda (veći m u jednadžbi 57) teže suzbijati regulacijsku grešku. Tako je kod protuavionske vatre, kad se mijenja brzina ili ubrzanje aviona. Na sličan način servomehanizam s više regulacijskih članova (veći k u jednadžbi 53) lakše suzbija regulacijsku grešku. Mora se, međutim, upozoriti da više integracijskih članova unosi dodatna kašnjenja, pa je takav servomehanizam sve nestabilniji.

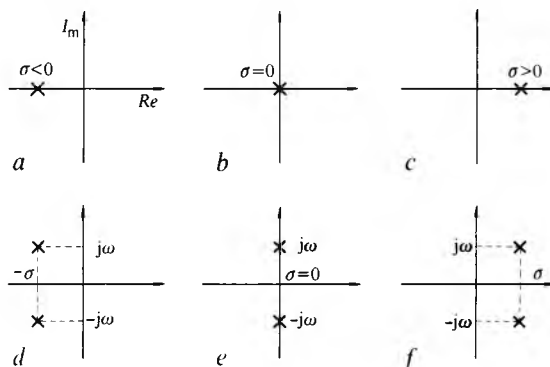
Stabilnost

Zbog naravi regulacijskog kruga da signal kroz njega kasni, svojstvena mu je nestabilnost. Izlazna veličina može rasti monotono ili oscilirajući preko svake mjere pa može doći i do uništenja sustava.

Sustav je stabilan ako uz ograničenu pobudu i odziv bude ograničen. Gledajući matematički, komplementarna funkcija

$$x_{iKF} = \sum_{i=1}^n K_i e^{\lambda_i t}$$

da bi $e^{\lambda_i t} \rightarrow 0$ uz $t = \infty$. Ako se korijeni promatraju u Gaussovoj ravnini (sl. 23), postoji više mogućnosti, već prema vrijednostima $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$. Ako je $\sigma_i > 0$ i $j\omega_i = 0$ (sl. 23c), to je *statička nestabilnost* i ona se mora otkloniti (u regulacijskom krugu se mora osigurati minus predznak signala, tj. signal se mora invertirati za 180°). *Dinamička nestabilnost* nastupa uz $\sigma > 0$ i $j\omega \neq 0$ (sl. 23f). Tu se radi o raspirenim oscilacijama. Sustav može biti i relativno stabilan (sl. 23d), pa su oscilacije prigušene.



Sl. 23. Ocjena stabilnosti sustava iz položaja korijena $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$

U ovom prikazu pretpostavilo se da je poznata diferencijalna jednadžba i izvedeno rješenje. Za to je potreban veliki trud, a često se do jednadžbe i rješenja ne može ni doći. No, pronađene su posredne metode da se pojednostavni ispitivanje stabilnosti. Sve te metode, bilo analitičke ili grafičke, svode se na to da *svi korijeni karakteristične jednadžbe moraju ležati na lijevoj polovici Gaussove ravnine*.

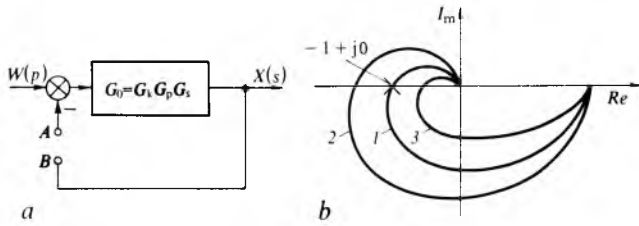
Hurwitzov kriterij stabilnosti. Ako je poznata diferencijalna jednadžba sustava, tj. i njezini koeficijenti a_i , može se primijeniti analitička metoda prema Hurwitzu. Napiše se raspored koeficijenata prema obrascu

$$\begin{matrix} H_1 & \left| \begin{array}{cccc} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & \dots \end{array} \right| \\ H_2 & \left| \begin{array}{cccc} a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} \end{array} \right| \\ H_3 & \left| \begin{array}{cccc} 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \end{array} \right| \\ H_4 & \left| \begin{array}{cccc} 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \end{array} \right| \end{matrix} \quad (65)$$

Potreban je i dovoljan uvjet za stabilnost sustava (da su svi $\sigma_i < 0$), ako su svi koeficijenti sustava a_i i sve dijagonalne subdeterminante H_i veće od nule. Sličan raspored ima i Routhov kriterij stabilnosti.

Nyquistov kriterij stabilnosti grafički je postupak gdje ne treba poznavati diferencijalnu jednadžbu i rješenje, već se polazi od eksperimentalno snimljenih sinusnih prijenosnih

funkcija $G(j\omega)$ pojedinih komponenata, odnosno od polarne krivulje otvorenog regulacijskog kruga $G_o(j\omega)$. Neka se zamisli otvoreni regulacijski krug (sl. 24a) u kojemu se u točki A pojavi neki poremećaj $A \sin \omega t$ i on se nakon prolaza kroz sve članove vrati u točku B . Postoji mogućnost da je amplituda signala u B prema signalu u A ista ili povećana (postoji pojačalo u krugu), a fazni pomak je -180° što odgovara točki $(-1 + j0)$ na Nyquistovu dijagramu (sl. 24b).



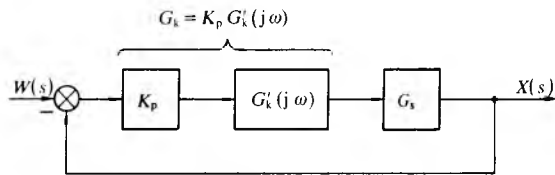
Sl. 24. Nyquistov dijagram prijenosne funkcije otvorenog kruga G_o .

Uz obvezno invertiranje signala u krugu od 180° , signal u B je identičan signalu u A , pa se u stvarno zatvorenom krugu (A spojeno sa B) može sinusni signal sam podržavati. Zbog uvijek prisutnih poremećaja u sustavu kod neke frekvencije u krugu nastupaju spomenuti uvjeti, pa nastaju oscilacije. To se vidi na polarnoj krivulji otvorenog kruga (sl. 24b) gdje je označena ta kritična točka $(-1 + j0)$. Krivulja 1 prolazi kroz tu točku, što znači da postoje neprigušene oscilacije; krivulja 2 obilazi točku $(-1 + j0)$ s lijeve strane, pa su oscilacije raspirene; konačna krivulja 3 prolazi desno od točke $(-1 + j0)$, pa su oscilacije prigušene. Dakle, na temelju položaja $G_o(j\omega)$ prema točki $(-1 + j0)$ zaključuje se o stabilnosti sustava. Slični prilaz ima i Mihajlovljev kriterij stabilnosti.

SINTEZA SERVOMECHANIZAMA

Sinteza znači da se na temelju poznatih pobuda i odziva nađe sustav koji treba odgovarati traženim kriterijima. Kod servomechanizama to znači da treba uz zadani objekt (motor) tako prilagoditi kompenzacijski član da bi servomechanizam optimalno djelovao, tj. da regulirana veličina što točnije, što brže i bez oscilacija slijedi ulaznu veličinu. Konvencionalni pristup sintezi je odabir nekog određenog kompenzacijskog člana i određivanje optimalnih parametara – *parametarska optimalizacija*. Mnogo širi i egzaktniji je suvremeni pristup, gdje se traži optimalna struktura regulacijskog kruga – *strukturna optimalizacija*, koja je vezana za multivarijabilne sustave i metodu prostora stanja i još je dobrim dijelom u domeni teorije. Bez obzira kojim se putem ide, općenit je slučaj da za sintezu nema općeprimjenljiva rješenja.

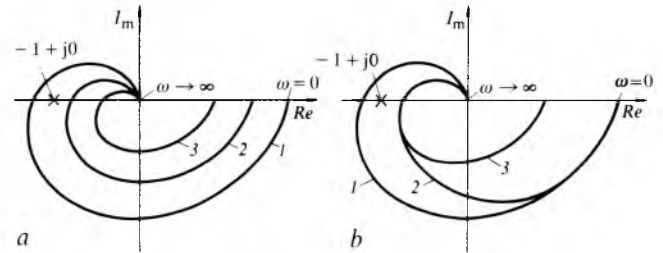
U parametarskoj optimalizaciji prihvaćena je metoda frekvencijskog odziva. Iako Nyquistov dijagram nije najbolji (loše se očitavaju pojedina frekvencijska područja, teška je grafička sinteza), on će ovdje poslužiti zbog zornosti. Polazna točka je prijenosna funkcija otvorenog kruga $G_o(j\omega) = G_k G_o$ (sl. 25). Mijenjanjem parametara kompenzatora G_k može se polarna krivulja od $G_o(j\omega)$ pomicati, i tako zadovoljiti uvjete za stabilnost i točnost.



Sl. 25. Blok-shema kompenzatora koji se sastoji od konstantnog i frekvencijski ovisnog člana

Najjednostavniji je način da kompenzator ima samo *proporcionalno djelovanje* $G_o = K_p$, tj. da se mijenja samo čisto pojačanje K_p ; polarna krivulja 1 (sl. 26a) koja odgovara servomechanizmu tipa 1. i 3. reda (završava u 3. kvadrantu) mora se namjestiti tako da zadovolji uvjet stabilnosti (krivulja 2). Još bolje rezultate u smislu stabilnosti dalo bi dalje

smanjenje pojačanja (krivulja 3), ali to smanjuje točnost. Dakle, samo promjena pojačanja K_p ne može do kraja riješiti kompromis između inkompatibilnih zahtjeva za točnošću i stabilnošću. Tim načinom se gotovo uvijek mogu kompenzirati servomechanizmi tipa 0 i 1, ali ne i oni tipa 2 i više.



Sl. 26. Sinteza na Nyquistovu dijagramu pomoću pojačanja (a) i kompenzacije (b)

Ako se pojačanjem ne može postići optimalan rad uz zadane uvjete, pribjegava se pravoj kompenzaciji, gdje kompenzator ima *integralno* ili *derivacijsko djelovanje*. Kompenzator tada ovisi i o frekvenciji i mijenja polarnu krivulju samo u određenom području frekvencija. Tako se za isti servomechanizam tipa 1. i 3. reda polarna krivulja (sl. 26b) može mijenjati u području niskih ili visokih frekvencija. Ako je prvobitni oblik od $G_o(j\omega)$ krivulja 1 (nestabilan slučaj), može se pomoću kompenzatora s derivacijskim djelovanjem saviti u području visokih frekvencija koje utječu na stabilnost (u blizini kritične točke $-1 + j0$). Obratan slučaj je krivulja 3 gdje je područje visokih frekvencija u redu, ali bi u području niskih frekvencija koje utječu na točnost trebalo krivulju 3 saviti ili integracijskim djelovanjem ili pojačanjem.

Tablica 5
IZBOR KOMPENZATORA

	Sinusna prijenosna funkcija	Električna shema
PD	$\alpha \frac{1 + j\omega\tau}{1 + j\omega\alpha\tau}$ $\tau = R_1 C$ $\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1$	
PI	$\frac{1 + j\omega\tau}{1 + j\omega\alpha\tau}$ $\tau = R_2 C$ $\alpha = \frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$	
PID	$\frac{1 + j\omega\tau_1}{1 + j\omega\alpha\tau_1} \cdot \frac{1 + j\omega\tau_2}{1 + j\omega\frac{\tau_2}{\alpha}}$ $\tau_1 = R_1 C_1$ $\tau_2 = R_2 C_2$ $\alpha > 1$	

Kompenzatori su obično načinjeni kao kombinacije djelovanja P, I i D, jer se tako povećavaju njihove mogućnosti. U tablici 5 dana su tri tipa kompenzatora sa sinusnom prijenosnom funkcijom i odgovarajućom električnom shemom povratne grane (usporedi sl. 16).

PRIMJENA SERVOMECHANIZAMA

Spomenute su prve primjene servomechanizama kod navigacije: zbog velikih masa brodova nije više bilo moguće ručno upravljanje. Za plovila (brodove, torpeda) kojima se upravlja u dvjema dimenzijama važne su i male brzine odziva i velike snage upravljanja. Osim za kormilarenje, servomechanizmi služe i za stabiliziranje valjanja broda.

Letjelice (avioni, rakete) su upravljane po zadanoj trajektoriji bilo od pilota, bilo automatski (giroskop, računalo), a poseban problem je i automatsko slijetanje. Upravljanje je još složenije nego u brodova zbog znatnog odstupanja parametara, nelinearnosti, međudjelovanja i upravljanja u trima dimenzijama. U raketama su u servomehanizam ugrađene i složene telekomunikacijske veze, a upravlja se i pozicijom sunčanih ćelija.

Slično kao kod raketa daljinsko upravljanje ugrađuje se i kod nuklearnih elektrana, radarskih postrojenja i drugdje.

U vojnoj tehnici servomehanizmi se upotrebljavaju za navođenje vatre topova, pa je, osim točnog pozicioniranja, potrebno osigurati i točno praćenje mete, tj. brzinske greške moraju biti što je moguće manje. Gibanje je topovske cijevi sinhronizirano s usmjeravanjem radarske antene.

Servomehanizmi se naveliko upotrebljavaju i u komadnoj proizvodnji kod obradnih strojeva. Jedna od prvih primjena je profilno glodanje, gdje glodalo točno slijedi ticalo na šablona. U numerički upravljanim alatnim strojevima ili u industrijskim robotima položaj i brzina alata, odnosno hvataljke, slijede program iz memorije. U tekućoj proizvodnji, npr. u valjaonicama lima, tankih folija i sl., senzori debljine lima ili folije preko servomehanizma reguliraju razmak valjaka.

Proгноза развоја. Automatska regulacija procesa pomoću samoispravljujućih strojeva i uređaja, te servomehanizma je jedan od najvažnijih zadataka u sadašnjoj etapi razvoja proizvodnje, nazivanom erom automatizacije, drugom industrijskom revolucijom, postindustrijsko doba i sl.

Snažan dalji razvoj automatizirane proizvodnje omogućen je uvođenjem programirane automatike na osnovi mikroprocesorske tehnike, jer se programiranjem jeftinih kompjutera opće namjene dobiju automati specijalne namjene. Moderna teorija temeljena na metodi prostora stanja omogućila je da se sinteza obavlja egzaktним znanstvenim metodama umjesto razrađenih empirijskih postupaka.

Sve to omogućuje različite smjerove modernog istraživanja kao što su adaptivni i optimalni sustavi, sustavi koji uče, umjetna inteligencija, te realizacija složenih proizvodnih postrojenja (fleksibilni tehnološki sustavi, FMS) sve do potpuno automatiziranih tvornica (kompjutorski integrirana proizvodnja, CIM).

LIT.: M. James, N. B. Nichols, R. S. Phillips, Theory of Servomechanisms. McGraw-Hill, New York 1947. – H. Chestnut, R. Mayer, Servomechanisms and Regulating System Design. J. Wiley, New York 1955. – J. C. Gille, M. Pelegrin, P. Decaulne, Théorie et Technique des Asservissements. Dunod, Paris 1958. – A. C. Morse, Electrohydraulic Servomechanisms. McGraw-Hill, New York 1963. – В. В. Солодовников, Теория автоматического регулирования. Машиностроение, Москва 1967. – М. Р. Sekulić, Osnovi teorije automatskog upravljanja. Naučna knjiga, Beograd, 1970. – М. Стојић, Kontinualni sistemi automatskog upravljanja. Građevinska knjiga, Beograd 1978. – Lj. Kuljača, Z. Vukić, Automatsko upravljanje sistemima. Školska knjiga, Zagreb 1985. – T. Šurina, Automatska regulacija. Školska knjiga, Zagreb 1987.

T. Šurina

SIGNALNO-SIGURNOSNA TEHNIKA, područje elektrotehnike koja se bavi signalizacijom, posebno sigurnošću signalizacije koja se odnosi na pojave što mogu biti pogibeljne za zdravlje i život ljudi ili oštetiti i uništiti materijalna dobra. Tehničke naprave za signalizaciju moraju zadovoljiti dvije funkcije: radnu i sigurnosnu. Radna se funkcija odnosi na obavljanje zadataka kojima su uređaji namijenjeni, a sigurnosna mora osigurati da ne nastanu opasne situacije zbog krive signalizacije kao posljedica kvara uređaja ili nepažnjom poslužioaca. Prema tome, uređaji moraju imati svojstvo samokontrole rada, kojom se sprečava njihovo opasno djelovanje. Kao primjer može poslužiti signalizacija na cestovnom raskršću, na kojem se ne smiju istodobno upaliti zelena signalna svjetla na dva smjera koji se međusobno ugrožavaju. Ukoliko bi se to trebalo dogoditi zbog nekog kvara u signalnom uređaju, dodatni sigurnosni sklopovi moraju ustanoviti da bi se takva signalizacija mogla

pojaviti i onemogućiti njezino izvršenje. Tada se redovno pojavljuje žuto isprekidano svjetlo na svim svjetlosnim signalima, ili se sva svjetla ugase.

Nepravilan rad signalnih uređaja može se ustanoviti analizom kombinacija izlaznih veličina (signalizacija) i/ili analizom odnosa ulaznih veličina.

Sigurnosna funkcija mora osigurati barem jedan od sljedećih zadataka: a) ne dopustiti da dođe do opasne situacije zbog pogrešne signalizacije, b) ne dopustiti mogućnost izvršenja krivih (opasnih) komandi uslijed pogrešnog rukovanja.

Ako se signalni uređaj s ugrađenom sigurnosnom funkcijom pokvari, tada on mora prekinuti, smanjiti ili zadržati punu radnu funkciju, ovisno o unaprijed postavljenim zahtjevima.

Ovi se zahtjevi postižu povećanjem složenosti signalnih uređaja, budući da moraju obaviti više zadataka od onih koji se traže za obavljanje samo radnih funkcija. Takvo svojstvo uređaja ili sustava naziva se *zalihošću* ili *redundancijom*.

Postoji *zalihost uređaja* (uređaji imaju više sklopova nego što je potrebno za obavljanje radnih funkcija) i *zalihost u podacima* koji se obrađuju. Zalihost je u podacima posebno potrebna kad se podaci prenose na veću udaljenost. U suvremenoj tehnici to se postiže primjenom tzv. sigurnosnih kodova za slanje podataka (to nisu zaštitni kodovi za prikrivanje sadržaja informacija). Takvi su, npr., Hagelberg-ovi i Hammingovi kodovi pomoću kojih je na prijemnoj strani moguće otkriti pogreške, odnosno, daljim povećanjem zalihosti koda, i automatski ispraviti neispravno primljenu informaciju.

Pored navedenih mogućnosti poželjno je da postoji mogućnost otkrivanja i dojave kvara kako bi se skratilo vrijeme popravka signalnog uređaja. To je posebno važno za signalne uređaje koji i nakon kvara zadržavaju punu radnu funkciju i koji nemaju vanjskih znakova da je nastao kvar. Takvi se uređaji redovno izvode kao dvostruki uređaji, pa radnu funkciju kad se pokvari jedan od uređaja preuzima drugi.

Tada nakon kvara na jednom od uređaja, nema više rezervnog ako se pokvari drugi uređaj. Ukoliko se radi o vrlo važnom zadatku koji uređaji moraju obaviti, tada se uređaji izvode kao trostruki s dodatnim sklopovima za kontrolu i automatsko prebacivanje na drugi i treći uređaj (npr. neki uređaji u avionima i sl.).

Budući da nema potpuno pouzdanog uređaja, pouzdanost se određuje na osnovi pretpostavki o očekivanom broju (intenzitetu) kvarova i zahtijevane pouzdanosti rada. Redovito se uređaji projektiraju u pogledu pouzdanosti za pojavu samo jednog kvara.

Tipična su područja primjene signalno-sigurnosnih uređaja: nadzor i praćenje željezničkog i cestovnog prometa, te nadzor stanja u eksplozijom ugroženim prostorima (npr. rudnici, kemijska industrija i sl.). Pored toga, sigurnosne se funkcije ugrađuju i u uređaje gdje mogu nastati veće materijalne štete (npr. daljinsko upravljanje u industrijskim pogonima i procesima, elektroenergetski sustavi i sl.).

I. Husar

CESTOVNA SIGNALNO-SIGURNOSNA TEHNIKA

Prometni su kapaciteti cestovne mreže u gradovima ograničeni, pa bi za njihovo povećanje, u skladu sa stalnim povećanjem cestovnog prometa, bila potrebna ogromna financijska sredstva (rušenje blokova zgrada, podizanje nadvoznjaka, gradnja podvoznjaka ili tunela i sl.). Takvi zahvati, bez obzira na potrebna financijska sredstva, nisu najčešće poželjni, a negdje su i nedopustivi, jer bi poremetili sklad grada. Rješenja se moraju tražiti u organizaciji cestovnog prometa, uz uvjet da se prostorne mogućnosti gradske cestovne mreže maksimalno iskoriste. To omogućuje upotreba elektroničkih uređaja pomoću kojih se može ostvariti svjetlosna signalizacija, a ona osigurava optimalno iskorištenje gradskih prometnica.