

**UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA**

MAGISTRSKO DELO

**Analiza učinka biča pri periodičnih sistemih uravnavanja
zalog z uporabo metodologije prenosne funkcije**

Ljubljana, junij 2003

Marko Jakšič

IZJAVA

Študent, Marko Jakšič, izjavljam, da sem avtor tega magistrskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom doc. dr. Boruta Rusjana in skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovolim objavo magistrskega dela na fakultetnih spletnih straneh.

V Ljubljani, dne 15.6.2003

Podpis:

KAZALO

1. Uvod	1
2. Opis problematike dobavne verige in opredelitev osnovnih pojmov.....	3
2.1. Management proizvodnje	3
2.2. Management dobavne verige.....	4
2.3. Povpraševanje po izdelkih.....	5
2.3.1. Povpraševanje kot časovna vrsta	7
2.3.2. Predvidevanje povpraševanja po izdelkih.....	7
2.4. Uravnavanje zalog v dobavni verigi.....	10
2.4.1. Uravnavanje zalog, povezanih z neodvisnim povpraševanjem	11
2.4.2. Spremljanje zalog.....	12
2.4.3. Osnovni sistemi uravnavanja zalog.....	13
2.5. Učinek biča v dobavni verigi.....	14
2.5.1. Sodelovanje v dobavni verigi in pojav učinka biča	14
2.5.2. Raziskave na področju učinka biča	16
2.5.3. Ovire pri sodelovanju v dobavni verigi in vzroki za nastanek učinka biča	17
2.5.4. Izboljšanje sodelovanja v dobavni verigi in zmanjšanje učinka biča.....	22
2.5.5. Kvantifikacija učinka biča.....	23
2.5.6. Raziskave učinka biča z metodologijo prenosne funkcije.....	24
3. Metodologija prenosne funkcije.....	25
3.1. Kontrolni sistemi	25
3.1.1. Bločni diagram kontrolnega sistema.....	27
3.1.2. Prenosna funkcija kontrolnega sistema	27
3.1.3. Linearni sistemi in prehod v s prostor	28
3.2. Kontrolni sistemi z diskretnim vhodnim signalom	29
3.2.1. Vzorčenje kontinuiranega signala.....	30
3.2.2. Z transformacija	32
3.2.3. Translacijski teorem.....	33
3.3. Glavne lastnosti kontrolnega sistema	34
3.3.1. Stabilnost in odzivnost kontrolnega sistema	34
3.3.2. Časovni odziv kontrolnega sistema na preproste signale	37
3.3.3. Frekvenčni odziv kontrolnega sistema	39
3.3.4. Sprememba variabilnosti vhodnega signala pri prehodu skozi kontrolni sistem	40
4. Sistemi uravnavanja zalog in njihove prenosne funkcije	42
4.1. Kriteriji za izbiro sistemov uravnavanja zalog	42
4.2. Osnovno pravilo naročanja $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog	43
4.3. Preprosto eksponentno glajenje.....	45
4.4. $(R, \hat{D})$ sistem uravnavanja zalog	46
4.5. $(R, \gamma O)$ sistem uravnavanja zalog	47
4.6. (R, S) sistem uravnavanja zalog.....	47
4.6.1. Spremembe osnovnega (R, S) sistema uravnavanja zalog	51
4.7. $(R, \beta IP)$ sistem uravnavanja zalog.....	52
4.8. Izračun prenosnih funkcij	53
4.8.1. Prenosna funkcija preprostega eksponentnega glajenja.....	53
4.8.2. Prenosne funkcije izbranih sistemov uravnavanja zalog	55

5. Analiza sistemov uravnavanja zalog s pomočjo njihovih prenosnih funkcij.....	59
5.1. Analiza stabilnosti in odzivnosti sistemov z analizo polov prenosnih funkcij	59
5.2. Časovni odziv sistemov na preproste signale.....	63
5.2.1. Časovni odziv sistemov na spremembo povpraševanja v obliki stopnice.....	64
5.2.2. Časovni odziv sistemov na spremembo povpraševanja v obliki klanca	69
5.2.3. Časovni odziv sistemov na povpraševanje v obliki sinusne funkcije.....	71
5.3. Frekvenčni odziv sistemov.....	73
5.4. Velikost učinka biča za izbrane vzorce povpraševanja.....	78
6. Komentar k analizi učinka biča pri izbranih sistemih uravnavanja zalog.....	82
6.1. Sistemi uravnavanja zalog, kot generatorji učinka biča v dobavni verigi.....	82
6.2. Vpliv učinka biča in stroškov zalog na izbiro sistema uravnavanja zalog.....	86
6.3. Vpliv dostopnosti informacije o končnem povpraševanju na učinek biča.....	88
7. Sklep	93
8. Literatura.....	95

KAZALO PRILOGE

A. Izračun prenosne funkcije ($R, \gamma O, \beta IP$) sistema uravnavanja zalog.....	1
B. Izračun časovnega odziva kontrolnega sistema na preprost vhodni signal	2
C. Izračun velikosti učinka biča s pomočjo amplitudnega frekvenčnega odziva	3
D. Izračun velikosti učinka biča s pomočjo simulacije v obliki preglednice	6
E. Izračun prenosnih funkcij sistemov z dostopno informacijo o končnem povpraševanju...	8

1. UVOD

Pojav povečanja variabilnosti naročil, ko se pomikamo navzgor po dobavni verigi, imenujemo učinek biča (angl. Bullwhip effect). Čim višje po dobavni verigi gremo, tem večja bo variabilnost naročil. Povečano nihanje naročil vodi do neučinkovitosti v delovanju celotne dobavne verige: nizka raven storitve, neenakomerna obremenitev proizvodnih zmogljivosti, neučinkovit transport, prekomerne zaloge in nezanesljiva dobava. Vse to se izrazi na zmanjšanem ekonomskem rezultatu podjetij, ki tvorijo dobavno verigo.

Proces naročanja izdelkov ali storitev pri posameznem členu dobavne verige poteka s pomočjo sistema uravnavanja zalog, ki vključuje več med seboj povezanih postopkov: predvidevanje povpraševanja, spremljanje stanja zalog in postopek podajanja novih naročil. Raziskave sistemov uravnavanja zalog so pokazale, da pri uporabi nekaterih sistemov uravnavanja zalog pride do izrazitega povečanja variabilnosti naročil nasproti variabilnosti povpraševanja. V dobavni verigi pride do pojava učinka biča. Prav tako se je pokazalo, da povečanje zalog, ki naj bi stabiliziralo motnje v dobavni verigi, dodatno poveča učinek biča. V člankih lahko zasledimo, da je pomemben vzrok za nastanek učinka biča popačenje informacije o končnem povpraševanju, ki se povečuje, tem višje po dobavni verigi se pomaknemo. Vzrok za to je v tem, da višji členi dobavne verige nimajo informacije o dejanskem povpraševanju, temveč so odvisni le od neposrednega povpraševanja spodnjega člena v verigi.

Namen raziskave je proučiti vpliv izbire periodičnega sistema uravnavanja zalog na pojav učinka biča v dobavni verigi. V skladu z namenom so bili zasnovani sledeči cilji raziskave:

- Ugotoviti vpliv različnih sistemov uravnavanja zalog na pojav učinka biča.
- Ugotoviti vpliv vrednosti parametrov sistemov uravnavanja zalog na nastanek učinka biča.
- Proučiti možnosti, da se z ustrezno izbiro parametrov izognemo velikosti učinka biča oziroma zmanjšamo velikost učinka biča.
- Proučiti vpliv narave povpraševanja na velikost učinka biča.
- Ugotoviti, kakšno je zmanjšanje velikosti učinka biča, če omogočimo prenos informacije o končnem povpraševanju do višjih členov verige.

Na podlagi zgornjih ugotovitev poskuša raziskava dati nekaj napotkov pri uporabi izbranega sistema uravnavanja zalog, s ciljem izogniti se pojavu učinka biča in njegovim posledicam.

Izhodišče raziskave je osnovno pravilo naročanja sistema uravnavanja zalog s periodičnim spremljanjem zalog. Osnovno pravilo naročanja je nekoliko spremenjeno pravilo določanja ravni proizvodnje (Bowman, 1963; Nahmias, 1993). Uporaba pravila omogoča glajenje naročil in glajenje stanja zalog. Osnovno pravilo je bilo izhodišče za izpeljavo več preprostejših pravil naročanja sistemov uravnavanja zalog, katerih delovanje je proučeno v raziskavi.

Analiza učinka biča v dobavni verigi temelji na uporabi metodologije prenosne funkcije, ki se uporablja za opis delovanja kontrolnih sistemov na področju elektronike. Vloga kontrolnega sistema je upravljanje delovanja določenega procesa. Analogija med kontrolnim sistemom in sistemom uravnavanja zalog je, da sistem uravnavanja zalog upravlja tok zalog oziroma izdelkov navzdol po dobavni verigi in tok informacij o naročilih v obratni smeri.

Metodologija prenosne funkcije je bila na področju managementa proizvodnje uporabljena v raziskovalnih delih avtorjev Dejonckheere et al. (2002a, 2002b). V magistrskem delu je analiza omenjenih avtorjev razširjena na več sistemov uravnavanja zalog s periodičnim spremljanjem zalog, ki omogočajo glajenje naročil in glajenje stanja zalog. Analiza frekvenčnih odzivov prenosnih funkcij sistemov je nadgrajena z analizo stabilnosti in časovnega odziva sistemov, kar omogoča podrobnejši vpogled v delovanje sistemov uravnavanja zalog. Rezultati analize so preverjeni s simulacijo delovanja sistemov uravnavanja zalog v obliki preglednice. S pomočjo simulacije je mogoče oceniti stroške zalog v dobavni verigi in nakazati njihovo povezavo s pojavom učinka biča.

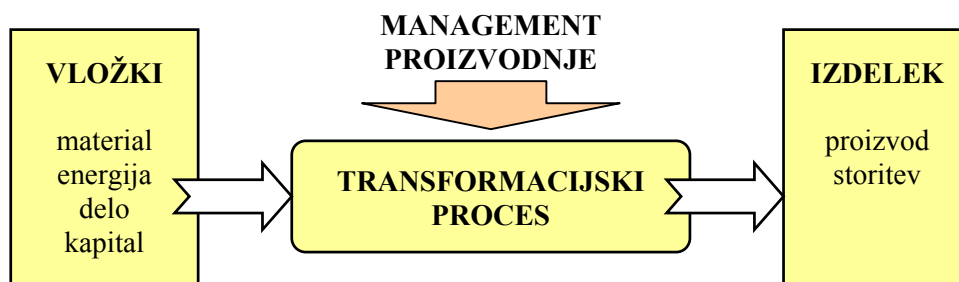
Uvodnemu delu, v katerem bodo predstavljeni osnovni pojmi dobavne verige in uravnavanja zalog v verigi ter opis učinka biča, sledi predstavitev metodologije prenosne funkcije. V tem delu so predstavljena matematična orodja, ki omogočajo eleganten zapis lastnosti sistemov uravnavanja zalog v analitični obliki, to je s prenosno funkcijo. Sledi podrobna razčlenitev osnovnega pravila naročanja in zapis izbranih pravil naročanja v obliki, ki nam omogoča izračun prenosnih funkcij sistemov uravnavanja zalog. Analiza prenosnih funkcij poteka v treh korakih. Povezavo med stabilnostjo in odzivnostjo sistemov uravnavanja zalog ugotavljamo z lociranjem polov prenosnih funkcij. Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na preproste vzorce povpraševanja postreže s prvimi ugotovitvami glede pojava učinka biča ob uporabi izbranega sistema uravnavanja zalog. Ugotovitve dokončno potrdimo, ko se preselimo iz prostora časa v frekvenčni prostor, kjer na podlagi frekvenčnega odziva sistemov uravnavanja zalog izračunamo velikost učinka biča. Vpliv narave povpraševanja na velikost učinka biča je ugotovljen s pomočjo generiranja različnih vzorcev povpraševanja in z izračunom velikosti učinka biča. V komentarju k analizi učinka biča pri izbranih sistemih uravnavanja zalog poskušamo dodatno razčleniti in utemeljiti rezultate. V tem delu je prikazan tudi vpliv dostopnosti do informacije o končnem povpraševanju na zmanjšanje učinka biča. Predstavljena je tudi povezava med velikostjo učinka biča in stroški zalog v dobavni verigi. Zahtevnejše računske izpeljave so predstavljene v prilogi.

2. OPIS PROBLEMATIKE DOBAVNE VERIGE IN OPREDELITEV OSNOVNIH POJMOV

2.1. Management proizvodnje

Management proizvodnje se ukvarja s pristopi, metodami in načeli učinkovitega planiranja, organizacije in kontrole razpoložljivih virov, potrebnih za doseg ekonomskih ciljev. Vloga managementa proizvodnje je učinkovita transformacija vhodnih vložkov v izdelke, ki jih podjetje ponuja na trgu. Pogoj za ekonomsko učinkovitost transformacije vložkov v izdelke je, da je ekonomska vrednost le-teh višja od vrednosti vložkov. V preteklosti je bilo področje managementa proizvodnje razumljeno v ožjem smislu in je vključevalo predvsem proizvodnjo materialnih proizvodov. V sedanjem času je pojem managementa proizvodnje postal splošnejši in vključuje tako proizvodnjo proizvodov kot tudi opravljanje storitev. V angleščini se je zaradi tega uveljavil nov izraz »Operations management« in zamenjal prejšnjega »Production management«. Pri nas uporabljamo izraz management proizvodnje, pri čemer upoštevamo širši pomen pojma proizvodnje (Rusjan, 1999, str. 1).

Slika 1: Transformacijska vloga managementa proizvodnje



Vir: prirejeno po Schroeder, 1993, str. 23

Med najpomembnejše naloge managementa proizvodnje prištevamo:

- izbiro lokacije,
- izbiro ustrezne strukture oziroma organizacije proizvodnje v podjetju,
- izbiro procesa proizvodnje,
- razvoj izdelka,
- kontrola kakovosti izdelka,
- predvidevanje povpraševanja po izdelku,
- usklajevanje procesov in optimalna izraba virov.

V okviru managementa proizvodnje se prepletajo tako aktivnosti, ki so povezane z notranjim poslovanjem podjetja, kot tudi aktivnosti v povezavi z zunanjimi dejavniki, v katerih podjetje posluje. Med aktivnostmi v notranjem okolju podjetja lahko prištevamo nadzor in izbiro

proizvodnih procesov, med aktivnosti v povezavi z zunanjim okoljem pa lahko prištevamo napovedi v gibanju povpraševanja in prodaje izdelkov ter analize lastnosti in potreb ciljnega trga (Waller, 1997, str. 14). Področje managementa proizvodnje je usklajeno in prepleteno z delovanjem v ostalih poslovnih funkcijah, ki v medsebojni povezanosti sestavljajo poslovni proces podjetja. Vsak posamezen del proizvodnega procesa sledi procesu planiranja, izvedbe ter kontrole in se tako podreja zakonitostim managementa proizvodnje.

V zadnjih letih je management proizvodnje doživel velik razvoj. K temu je največ prispevalo povečano zanimanje za poznavanje poslovnega okolja in predvsem hiter razvoj novih tehnologij. To se je odrazilo v povečanem razvoju novih proizvodov in storitev, razvoju novih oblik procesov in zmanjšanju potreb po fizičnem delu. Ključno vlogo v tehnološkem razvoju igra informacijska tehnologija, ki je močno posegla v management proizvodnje. Omogočila je prenos spoznanj, ki so bila posledica razvoja teoretičnih modelov in statističnih analiz poslovanja, v proizvodni proces podjetij. Z napredkom informacijske tehnologije so postale informacije, ki so potrebne za učinkovito poslovanje podjetja, lažje dostopne in bolj ažurne.

2.2. Management dobavne verige

Management dobavne verige je integriran proces, ki vključuje proizvodnjo, dobavo in prodajo izdelkov ter storitev uporabnikom. Dobavno verigo sestavlja širok spekter ekonomskih subjektov: dobavitelji, poddobavitelji, proizvajalci, distributerji, trgovci oziroma prodajalci in končni uporabniki. Management dobavne verige se ukvarja s pretokom materiala, informacij in denarnih sredstev po dobavni verigi. Cilj managementa dobavne verige je ne samo izboljšati učinkovitost posameznega člena verige, ampak predvsem izboljšati učinkovitost celotne dobavne verige.

Na ravni posameznega člena dobavne verige se vrši proces, sestavljen iz treh osnovnih delov: vložka, procesa transformacije in izdelka. To je preprost koncept, na osnovi katerega lahko opišemo vsak proces, ki je del pretoka izdelka h končnemu uporabniku. Koncept managementa dobavne verige je tako v osnovi podoben konceptu managementa proizvodnje, katerega cilj je učinkovit pretok vložkov v izdelke. Management dobavne verige ne obravnava le aktivnosti, povezane s transformacijo surovin v končne izdelke, temveč obravnava tudi procese, ki potekajo po celotni dobavni verigi. Ti vključujejo prenos surovin do mesta, kjer pride do transformacije le-teh, prenos materiala v okviru samega procesa transformacije in končno distribucijo izdelka do uporabnika. Z zasnovo dobavne verige lahko ožje ponazorimo pretok materiala in polizdelkov v posameznih delih podjetja, ki sodelujejo v proizvodnji izdelka. Širše, z vključitvijo drugih ekonomskih subjektov, pa lahko opišemo celoten proces pretvorbe, od vhodnega materiala do končnega izdelka in prodaje le tega potrošniku.

Navzdol po dobavni verigi poteka torej tok materiala, v nasprotni smeri pa poteka enako pomemben tok informacij, to je informacija o povpraševanju, lastnostih izdelka in zahtevah potrošnika ter informacija o višini naročil. To pomeni, da je potrebno pojma dobavne verige

in managementa proizvodnje obravnavati povezano, saj le s prepletanjem obeh lahko podjetje zagotavlja ustrezen proizvod ali storitev. Kljub temu da si koncept dobavne verige najlažje predstavljamo v proizvodnji, je le-ta v enaki meri prisoten tudi v storitveni dejavnosti, kjer je učinkovit tok storitev in informacij prav tako pogoj za ustrezno opravljeno storitev.

Slika 2: Koncept dobavne verige



Vir: lastno delo

Glavna vloga managementa dobavne verige je torej v zagotavljanju kakovosti, stroškovne in časovne učinkovitosti pri pretoku izdelkov do končnih porabnikov. Glavne aktivnosti managementa dobavne verige so:

- izbor lokacije, ki zagotavlja nemoten transformacijski proces;
- izbira lokacije, ki omogoča hiter odziv;
- predvidevanje povpraševanja, ki je osnova za planiranje pretoka materiala po dobavni verigi;
- določitev proizvodnih planov, ki bodo zadostili predvidenemu povpraševanju;
- uravnavanje zalog surovin, izdelkov v proizvodnji in končnih izdelkov, kar zagotavlja ustrezno raven storitve;
- nabava potrebnih materialov ustrezne kakovosti in pravočasna dostava le-teh;
- načrtovanje distribucijske mreže, ki končen izdelek pravočasno in stroškovno učinkovito dostavi do uporabnika.

2.3. Povpraševanje po izdelkih

Če obstaja povpraševanje po določenem proizvodu ali storitvi, je izpolnjen eden bistvenih pogojev, da bo ta proizvod ali storitev na trgu mogoče prodati. Končni potrošnik, kot najvišji člen dobavne verige, vzbudi povpraševanje pri prodajalcu, ki prenese povpraševanje na proizvajalca in ta naprej do dobavitelja. Povpraševanje je torej gonilna sila celotne dobavne verige. Tok povpraševanja je del informacijskega toka po verigi in je najlepši dokaz, da je vloga informacijskega toka v dobavni verigi enako pomembna vlogi toka materiala. Vsak člen

dobavne verige bo svoje delovanje gradil na osnovi tega, kakšno je povpraševanje po izdelku ali storitvi, ki jo ponuja. Analiza povpraševanja in s tem čim boljše poznavanje značilnosti povpraševanja je ena osnovnih nalog v podjetju in je bistveno zato, da se podjetje ustrezno odziva in prilagaja na spremembe.

Povpraševanje ločimo na neodvisno in odvisno povpraševanje:

- **Neodvisno povpraševanje** je povpraševanje s strani potrošnika izven podjetja. Ker to povpraševanje določa potrošnik oziroma trg, je le-to zunaj kontrole podjetja in zato ni natančno določljivo. Podjetje s svojim delovanjem poskuša vplivati na povečanje povpraševanja, vendar nanj lahko vpliva le posredno. Kljub temu da je neodvisno povpraševanje zunanji dejavnik, je poznavanje le-tega ključno za planiranje in izvedbo procesov v podjetju. Podjetja zaradi tega poskušajo neodvisno povpraševanje napovedovati z metodami predvidevanja povpraševanja.
- **Odvisno povpraševanje** je neposredno povezano s povpraševanjem po končnih proizvodih. Povedano drugače, ko poznamo povpraševanje po končnem izdelku, je povpraševanje po polizdelkih in surovinah, ki je odvisno od končnega povpraševanja, znano. Ko podjetje določi povpraševanje po končnih proizvodih, je odvisno povpraševanje torej znano in točno določeno.

Gibanje oziroma spremembe povpraševanja pomembno vplivajo na delovanje podjetja. Podjetje, ki je soočeno s počasi spreminjajočim se povpraševanjem, ima več časa, da svoj proizvodni proces prilagodi spremenjenim zahtevam. Po drugi strani je za podjetje v hitro spreminjajočem poslovnem okolju pomembnejše, da se je sposobno hitreje prilagoditi na spremembe v povpraševanju. Ključnega pomena je, da te spremembe zazna pravočasno. Povpraševanje na osnovi tega, kakšno je njegovo gibanje skozi čas, ločimo na podlagi dveh kriterijev: spremenljivosti in naključnosti.

- **Spremenljivost povpraševanja:** Ko se povpraševanje skozi čas ne spreminja, govorimo o enakomernem povpraševanju, sicer imamo opravka s spreminjajočim se povpraševanjem.
- **Naključnost povpraševanja:** Če je povpraševanje natančno določljivo za poljubno prihodnje časovno obdobje, govorimo o znanem povpraševanju. Naključno povpraševanje je po definiciji povezano z določeno mero negotovosti in ga zato ne moremo natančno določiti ali predvideti.

Povpraševanje je lahko spreminjajoče, vendar kljub temu znano in s tem so tudi parametri povpraševanja natančno določeni. Znano povpraševanje je lahko bodisi enakomerno ali spreminjajoče, medtem ko je pogoj za naključno povpraševanje, da je le to spreminjajoče. V literaturi na podlagi drugega kriterija povpraševanje večinoma delijo na deterministično in stohastično. Izraza deterministično in stohastično povpraševanje sta sinonima za zgoraj omenjeno znano in naključno (Silver, Peterson, 1985, str. 211).

2.3.1. Povpraševanje kot časovna vrsta

Povpraševanje sestavlja niz podatkov o povpraševanju v zaporednih časovnih obdobjih, zato lahko tak niz predstavimo kot časovno vrsto. V časovni vrsti iščemo značilnosti, s pomočjo katerih bomo izboljšali poznavanje povpraševanja samega. Predpostavka je, da lahko poljubno časovno vrsto sestavimo s kombiniranjem nekaj tipičnih časovnih vrst, ki ponazarjajo določen tip povpraševanja. S tipičnimi časovnimi vrstami opišemo naslednje tipe povpraševanja:

- **Konstanten nivo:** Če je podjetje soočeno s konstantnim povpraševanjem, pomeni, da se povpraševanje po njegovem izdelku skozi čas ne bo spreminjalo;
- **Trend** ponazarja enakomerno naraščanje ali padanje povpraševanja in je lahko na primer posledica povečevanja ali zmanjševanja tržnega deleža podjetja;
- **Sezonskost** predstavlja ponavljajoče se nihanje v povpraševanju, ki se pojavlja ob določenem času v letu. Sezonske spremembe so lahko posledica naravnih nihanj ali nihanj, ki so posledica človeških dejavnikov. Primer prvih je sezonska prodaja sadja in zelenjave, primer drugih pa povečano povpraševanje v času pred božičem;
- **Cikličnost:** ciklične značilnosti povpraševanja so posledica poslovnih ciklov, na primer izmeničnih obdobjih širjenja in krčenja dejavnosti;
- **Naključnost:** naključna nihanja so ostanek, ki ga prej opisani učinki ne zmorejo opisati. Ta so lahko posledica nepričakovanih dogodkov oziroma dogodkov, katerih vpliv ni zajet v analizi povpraševanja;

Z medsebojno kombinacijo učinkov posameznih tipov povpraševanja oziroma seštevkam ustreznih časovnih vrst lahko zgradimo poljubno časovno vrsto, ki ponazarja dejansko povpraševanje (Silver, Peterson, 1985, str. 95). V matematični obliki to zapišemo kot:

Povpraševanje v obdobju t = konstanten nivo + trend + sezonskost + cikličnost + naključnost

$$D_t = a + bt + F_t + C_t + \varepsilon_t \quad (1.1)$$

2.3.2. Predvidevanje povpraševanja po izdelkih

Za uspešno in učinkovito odločanje o delovanju podjetja je potrebno planiranje delovanja podjetja, ki je v prihodnosti odvisno predvsem od predvidevanja dogajanja, ki bo vplivalo na prihodnje poslovanje. Na področju planiranja proizvodnje in uravnavanja zalog je podjetje v prvi vrsti odvisno od predvidevanja povpraševanja po izdelku v prihodnjih obdobjih. Predvidevanje je posebej pomembno za podjetja, ki se soočajo s hitro spreminjajočim se naključnim povpraševanjem, ki je povezano z veliko mero negotovosti. V mnogih primerih podjetja z namenom zmanjšati to negotovost vlagajo velika sredstva v sisteme napovedovanja bodočega povpraševanja. Dobro poznavanje bodočega povpraševanja je osnova za postavljanje dovolj visokih standardov ravni storitve kupcu, načrtovanje investicij v zaloge, pravočasno in dovolj pogosto obnavljanje zalog, načrtovanje potreb po materialu,

prepoznavanje potreb po širitvi proizvodnje in izbiranje med različnimi poslovnimi strategijami. Predvidevanje povpraševanja je še posebej pomembno takrat, ko je čas, ki ga podjetje potrebuje, da proizvod dobavi kupcu, daljši od časa, ki ga je kupec pripravljen prestat v čakanju na dobavo proizvoda.

Predvidevanje se ukvarja z dogodki, ki se bodo dogodili v prihodnosti. Osnova za predvidevanje povpraševanja v bodočih obdobjih lahko sloni na analizi znanega povpraševanja v preteklih obdobjih ali na razpoložljivih informacijah o bodočih dogodkih in človeški presoji. Pri prvem govorimo o kvantitativnih metodah predvidevanja povpraševanja, kjer podjetje s pomočjo izbranega matematičnega modela na osnovi podatkov iz preteklosti poskuša napovedati bodoče povpraševanje. Informacije, kot so podatki o predhodnih naročilih, predstavitvah novih izdelkov, tržnih raziskavah, reakcijah konkurence in trga, splošnih gospodarskih pogoji, so del kvalitativnega predvidevanja povpraševanja in pomembno vplivajo na natančnost predvidevanj. Oba vidika, kvantitativnega in kvalitativnega, lahko umestimo v celoten sistem predvidevanja. Osnova sistema za predvidevanje je običajno matematični model, ki na podlagi zgodovinskih podatkov napove povpraševanje. Na delovanje modela in s tem na zanesljivost in natančnost predvidevanja lahko vplivamo na dva načina. Pri prvem na podlagi razlik med napovedanim in pozneje ugotovljenim dejanskim povpraševanjem prilagodimo parametre modela, tako da bodo napovedi v prihodnjih obdobjih bolj natančne. Parametri matematičnega modela opisujejo le nekaj najpomembnejših dejavnikov, ki ne morejo v zadostni meri opisati vseh možnih dogodkov, ki vplivajo na povpraševanje v prihodnosti. Zato so tu bistvenega pomena presoja, ocene in pričakovanja podjetja, s pomočjo katerih se rezultati matematičnega modela ustrezno prilagodijo in popravijo.

Napake v predvidevanju povpraševanja so neizogibne. Spremljanje le-teh je podjetju v veliko pomoč iz več razlogov. Velikost varnostnih zalog je neposredno odvisna od napak pri predvidevanju. Tem večje so napake, večje bodo varnostne zaloge, ki bodo zagotavljale zeleno raven storitve. Prevelike in pogoste napake v predvidevanju so lahko znak, da je v sistemu predvidevanja potrebno spremeniti določene parametre ali pa je ta v celoti neustrezen. In končno, napake v predvidevanju lahko kažejo na napačna pričakovanja in strategijo podjetja.

Glede na to, kakšne odločitve moramo sprejeti, ločimo različne vrste predvidevanja. V planiranju se praviloma uporablja delitev na dolgoročne, strateške odločitve in kratkoročne, taktične odločitve. Temu ustrezno se razlikujejo tudi časovna obdobja, preko katerih poskušamo oceniti povpraševanje. Dolgoročno predvidevanje povpraševanja lahko pokriva obdobje več let, medtem ko je časovni horizont kratkoročnega predvidevanja le nekaj tednov ali mesecev. Primera dolgoročnih, strateških odločitev sta odločitve o načrtovanju fiksnih zmogljivosti in odločitve o razvoju novih izdelkov. Dolgoročne odločitve so praviloma povezane s skupinami izdelkov. Kratkoročne odločitve so operativne odločitve o trenutni proizvodnji, distribuciji in trženju izdelka in se sprejemajo za posamezen izdelek. Od tega, ali

je predvidevanje povpraševanja osnova za kratkoročno ali dolgoročno odločitev podjetja, je močno odvisna izbira modela predvidevanja povpraševanja. Ustrezen sistem predvidevanja je kompromis med stroški postopka in stroški napak, ki so posledica napačnih napovedi. Stroški napak v predvidevanju so v primeru kratkoročnih odločitev običajno nižji, kot v primeru dolgoročnih. Prav tako je za kratkoročne odločitve potrebno narediti več predvidevanj povpraševanja za vsak posamezen izdelek. Posledica tega je, da so kratkoročni modeli predvidevanja povpraševanja manj kompleksni in cenejši. Večji stroški, povezani z izbiro zahtevnejših modelov predvidevanja, so upravičeni v primeru pomembnih dolgoročnih odločitev.

Idealni sistem predvidevanja povpraševanja mora opravljati naslednje funkcije:

- predvideti pričakovano povpraševanje,
- oceniti odstopanja od pričakovanega povpraševanja, to je oceniti velikost napake predvidevanja,
- biti dovolj pogost, kajti le tak lahko služi kot kontrola za sprejete odločitve,
- doseči kompromis med stroški predvidevanja in stroški napak v predvidenem povpraševanju,
- dopustiti, da človeška presoja lahko spremeni rezultate matematičnega modela,
- biti stabilen, kar pomeni, da ni preobčutljiv na spremembo posameznih dejavnikov oziroma spremenljivk,
- rezultati predvidevanja morajo biti dostopni pravočasno oziroma preden pride do procesa odločanja.

Kvantitativne metode predvidevanja povpraševanja

Kvantitativne metode so matematični modeli, ki so zasnovani na podatkih iz preteklosti. Temeljijo na predpostavki, da gibanja v prihodnosti lahko napovemo na podlagi gibanj v preteklosti. V splošnem lahko uporabo kvantitativnih metod ponazorimo s tremi ključnimi koraki:

- izbira ustrezne metode predvidevanja povpraševanja, ki je v veliki meri odvisna od tipa povpraševanja oziroma vzorca povpraševanja, s katerim se podjetje srečuje,
- izbira vrednosti parametrov, ki nastopajo v modelu predvidevanja povpraševanja,
- uporaba metode za predvidevanje povpraševanja.

Izbiri metode pogojujejo razpoložljiva sredstva, ki so predvidena za predvidevanje povpraševanja. Bolj kompleksni modeli so ponavadi primerni le za dolgoročne ali srednjeročne napovedi. Ko se odločimo za določeno metodo, je potrebno določiti parametre metode in tipa povpraševanja. Običajno se parametre določi s pomočjo preizkusa ujemanja metode s historičnimi podatki, kadar pa to ni mogoče, jih lahko določimo subjektivno. Sedaj lahko metodo uporabimo za predvidevanje bodočega povpraševanja. Običajna predpostavka je, da se parametri metode skozi določeno časovno obdobje ne bodo bistveno spremenili.

Ustreznost metode, to je napake pri predvidevanju povpraševanja, se ves čas preverja. Če metoda ne daje zadovoljivih rezultatov je potrebno prilagoditi njene parametre ali se odločiti za primernejšo metodo.

Kvantitativne metode delimo na dve večji skupini, to sta skupini vzorčnih metod in metode analize časovnih vrst:

- **Vzročne metode** temeljijo na ugotavljanju povezav med odvisno spremenljivko – predvidenim povpraševanjem in več neodvisnimi spremenljivkami. Predpostavka je, da izbrane neodvisne spremenljivke vplivajo na gibanje odvisne spremenljivke. To pomeni, da z napovedjo gibanja neodvisnih spremenljivk v prihodnosti lahko napovemo, kako se bo v prihodnosti gibal odvisna. Ta vrsta metod je uporabna v primeru, da z nekaj neodvisnimi spremenljivkami dovolj dobro opišemo gibanje odvisne spremenljivke in od tega, da z dovolj veliko zanesljivostjo napovemo gibanje neodvisnih spremenljivk. Povpraševanje za določeno prihodnje časovno obdobje lahko na primer napovemo na osnovi ocen o rasti panoge in ocen o stroških materiala v tem časovnem obdobju.
- S pomočjo **metod analize časovnih vrst** poskušamo napovedati gibanje določene spremenljivke na osnovi gibanja te spremenljivke v preteklosti. Pri predvidevanju povpraševanja časovna vrsta predstavlja povpraševanje v preteklih in prihodnjih časovnih obdobjih. Predpostavka je, da bo gibanje povpraševanja v prihodnosti sledilo določenim zakonitostim, ki so bile značilne za gibanje povpraševanja v preteklosti.

Na koncu omenimo še nekaj najbolj pogosto uporabljenih kvantitativnih metod za predvidevanje povpraševanja. Osnovna kvantitativna metoda, ki jo uporabljamo v okviru dolgoročnega predvidevanja, je regresija, ki jo glede na način uporabe uvrstimo bodisi med vzročne ali metode časovnih vrst. Pri kratkoročnem predvidevanju povpraševanja izstopata metodi drsečih sredin in eksponentnega glajenja, ki sta metodi analize časovnih vrst.

2.4. Uravnavanje zalog v dobavni verigi

Eno ključnih področij managementa dobavne verige je področje uravnavanja zalog izdelkov. Zaloge so ključne za nemoteno poslovanje, dobavo in prodajo. Z njimi lahko skrajšujemo dobavne roke, zmanjšujemo zastoje v proizvodnji, zmanjšujemo tveganja povezana z zamudami pri dobavi, tveganja povezana z netočnim predvidevanjem povpraševanja in podobno. Po drugi strani pa zaloge pomenijo zamudo v pretoku materiala od dobavitelja do končnega kupca, kar za podjetje predstavlja precejšen strošek. Uravnavanje zalog vključuje procese, kot so spremljanje stanja zalog, obnavljanje oziroma naročanje novih zalog, preprečevanje izčrpanja zalog. Cilj učinkovitega uravnavanja zalog je vzdrževati nemoteno poslovanje, kar je najlažje doseči z visokimi zalogami, po drugi strani pa poskrbeti za nizke stroške, ki so povezani z zalogami, kar je najlažje doseči z nižjim obsegom zalog.

Proces uravnavanja zalog je močno odvisen od tega, s kakšnim povpraševanjem se podjetje sooča. V primeru neodvisnega povpraševanja obnavljanje zalog poteka na podlagi načela nadomeščanja. Ko se zalog porablja, se v določenem trenutku izda novo naročilo, s katerim se raven zalog dvigne na želen nivo in tako prepreči možnost izčrpanja zalog. Obnavljanje zalog v primeru odvisnega povpraševanja sproži potreba po proizvodnji končnih izdelkov. Z uravnavanjem zalog, povezanih z odvisnim povpraševanjem, se ukvarja področje planiranja potreb po materialih.

2.4.1. Uravnavanje zalog, povezanih z neodvisnim povpraševanjem

V skladu s cilji učinkovitega uravnavanja zalog podjetja uporabljajo različne, bolj ali manj kompleksne sisteme uravnavanja zalog. Sistemi uravnavanja zalog vključujejo določene metode in postopke, ki na podlagi ustreznih parametrov in predpostavk pomagajo pri odločanju. Tri osnovna vprašanja, na katera poskušamo odgovoriti z ustreznim modelom uravnavanja zalog, so:

- Kako pogosto moramo ugotavljati stanje zalog?
- Kdaj naj podamo naročilo in s tem obnovimo zaloge?
- Kolikšno količino naj naročimo?

Izbira ustreznega modela uravnavanja zalog je v prvi vrsti odvisna od tega, s katero vrsto neodvisnega povpraševanja se podjetje srečuje. Predpostavke o vzorcu in značilnostih povpraševanja so ponavadi odločilne pri odločitvi, kakšen in kako kompleksen model uporabiti. Poskušajmo poiskati odgovore na zgornja tri vprašanja pod predpostavkami determinističnega in stohastičnega povpraševanja. Pod predpostavko determinističnega povpraševanja je odgovor na prvo vprašanje preprost. Ker je povpraševanje znano v vsakem trenutku, so v vsakem trenutku znane tudi zaloge oziroma jih lahko izračunamo. Novo naročilo podamo natanko takrat, da bo le-to dobavljeno, ko bodo zaloge pošle. Za določitev količine naročila lahko uporabimo eno od izpeljank modela ekonomsko optimalne količine naročila (EOQ).

Pod predpostavko stohastičnega povpraševanja so odgovori na zgornja vprašanja precej bolj zapleteni. V primeru naključnega povpraševanja obsega povpraševanja ne moremo natančno predvideti, zaradi česar tudi ni mogoče izračunati stanja zalog v prihodnjih obdobjih, kot v primeru znanega vzorca povpraševanja. Za določitev zalog je potreben proces spremljanja zalog, s čimer pa so povezani precejšnji stroški (delovne ure, računalniški sistemi in drugo). To posledično pomeni, da pogosto spremljanje zalog ustrezno zviša omenjene stroške. Po drugi strani pa se podjetje s pogostejšim spremljanjem zalog lažje zavaruje pred izčrpanjem zalog, do katerega lahko pride zaradi negotovosti glede povpraševanja. Negotovost je tem višja, čim daljši je časovni interval med zaporednim spremljanjem zalog. Podjetje mora poiskati kompromis med zagotavljanjem dovolj visoke ravni storitve in natančnim sistemom spremljanja zalog. Podobno je tudi v odgovoru na drugo vprašanje potrebno najti kompromis

med visoko ravniyo storitve in nizkimi stroški. Podjetje se lahko pred izčrpanjem zalog zavaruje tako, da prej poda naročilo oziroma naroči več. Posledica tega so višje povprečne zaloge in s tem tudi stroški vzdrževanja le-teh. Izbira velikosti naročila sledi enaki logiki, kot pri modelu ekonomske optimalne količine, vendar je v primeru stohastičnega povpraševanja izbira modela odvisna od tega, kakšen sistem spremljanja in uravnavanja zalog podjetje uporablja.

Pred podrobnejšim vpogledom v sisteme uravnavanja zalog se je potrebno seznaniti z nekaterimi pojmi in koncepti, povezanimi z zalogami in uravnavanjem zalog (Silver, Peterson, 1985, str. 252):

- **Zaloge pri roki:** To so zaloge, ki so v podjetju fizično dostopne. Višina zalog pri roki določa, ali lahko v določenem trenutku zadostimo povpraševanju kupca. V kolikor povpraševanje preseže višino zalog, pride do izčrpanja zalog.
- **Neto zaloge:** Definiramo jih kot zaloge pri roki, zmanjšane za višino neizpolnjenega povpraševanja iz preteklih obdobj. Neto zaloge so bolj realen pokazatelj trenutnega stanja zalog, saj poleg zalog pri roki upoštevajo tudi možnost, da povpraševanju v določenih časovnih obdobjih ne moremo zadostiti. Neto zaloge so torej lahko negativne, in sicer ko je preteklo povpraševanje preseglo višino zalog pri roki.
- **Zaloge v dobavi:** Zaloge, ki jih je podjetje že naročilo, vendar še niso dobavljene.
- **Stanje zalog (IP),** ki ga definiramo kot vsoto neto zalog in zalog v dobavi. V stanju zalog so vključene vse informacije o višini zgoraj omenjenih tipov zalog, zato stanje zalog podaja najbolj celostno sliko o višini zalog.
- **Varnostne zaloge:** Za primere, ko dejansko povpraševanje preseže pričakovano povpraševanje, podjetje hrani določeno višino zalog, kar imenujemo varnostne zaloge. V kolikor bo povpraševanje v preteklem obdobju v skladu s pričakovanji, bo stanje zalog ob prihodu naslednje pošiljke natanko enako višini varnostnih zalog. Kriterij za določanje višine varnostnih zalog je želena raven storitve (to je verjetnost, da bo povpraševanje, ki nastopi, pokrito). Raven storitve služi kot mera učinkovitosti pokrivanja potreb iz zalog.

V kolikor pride do izčrpanja zalog, ločimo dva skrajna primera:

- celotno neizpolnjeno povpraševanje je zabeleženo in izpolnjeno takoj, ko se zaloge obnovijo,
- celotno nezadovoljeno povpraševanje obravnavamo kot izgubo pri prodaji.

2.4.2. Spremljanje zalog

Proces spremljanja zalog je sestavni del uravnavanja zalog. Cilj spremljanja zalog je natančno in ažurno ter stroškovno učinkovito ugotavljanje stanja zalog. Proces ugotavljanja stanja zalog je lahko stalno aktiven in integriran v proces nabave in prodaje zalog ali pa je sprožen le občasno. Z vidika časa, ki preteče med dvema zaporednima trenutkoma (časovni interval R),

ko v podjetju spremljajo stanje zalog, ločimo dva pristopa: **kontinuirano in periodično spremljanje zalog**:

- V primeru kontinuiranega spremljanja zalog je stanje zalog znano v katerem koli trenutku. V tem primeru govorimo o transakcijskem poročanju, kjer vsaka sprememba zalog pomeni takojšnjo prilagoditev stanja zalog. Pod transakcijami razumemo dogodke kot na primer prihod pošiljke ali pa zadovoljeno povpraševanje (tudi za primer enega samega izdelka).
- Podjetje, ki uporablja periodično spremljanje zalog, preveri stanje zalog le vsakih nekaj časovnih obdobjih. V času pred novim preverjanjem zalog je podjetje soočeno z negotovostjo glede trenutnega stanja zalog.

2.4.3. Osnovni sistemi uravnavanja zalog

V vsakem podjetju se na podlagi odgovorov na zgoraj omenjena tri osnovna vprašanja odločijo za ustrezen sistem uravnavanja zalog. V osnovi ločimo štiri sisteme uravnavanja zalog (Silver, Peterson, 1985, str. 256):

Kontinuirano spremljanje zalog s fiksnim obsegom naročila

Poimenujemo ga tudi (s, Q) sistem uravnavanja zalog. Sistem vključuje kontinuirano spremljanje zalog ($R=0$). Ko zaloge padejo pod določeno raven s , ki jo imenujemo signalna zaloga, naročimo fiksno količino Q . Obseg naročila Q je vsakokrat enak, kolikšen čas pa bo potekel med dvema naročiloma, je odvisno od hitrosti porabe v tem obdobju. Pomembno je poudariti, da spremljamo stanje zalog IP , ker to vključuje tudi naročene zaloge, ki so še v procesu dobave. Če bi namesto stanja zalog uporabljali neto zaloge bi lahko prišlo do tega, da bi podali novo naročilo in pri tem ne bi upoštevali, da v kratkem dobimo staro naročilo. Obseg naročila določimo z enim od EOQ modelov.

Kontinuirano spremljanje zalog z naročanjem do ciljne zaloge

Poimenujemo ga tudi (s, S) sistem uravnavanja zalog. Podobno kot (s, Q) sistem tudi (s, S) sistem vključuje kontinuirano spremljanje zalog in naročanje, ko stanje zalog pade pod signalno raven. Razlika med sistemoma je v tem, da obseg naročila ni konstanten, temveč se spreminja. Obseg naročila se ob vsakem naročilu določi, tako da se stanje zalog po naročilu dvigne na raven ciljne zaloge S . Sistem (s, S) je pogosto poimenovan kot min-max sistem, saj se stanje zalog skoraj ves čas giblje med signalno zalogo, to je najnižjo ravni in ciljno zalogo, ki ustreza najvišji ravni.

Periodično spremljanje zalog z naročanjem do ciljne zaloge

Če združimo periodično spremljanje zalog in pravilo naročanja do ciljne zaloge, dobimo (R, S) sistem uravnavanja zalog. Predpostavimo, da je časovno obdobje R , to je čas, ki preteče med

zaporednim spremljanjem zalog, vnaprej določen in se ne spreminja. Ko se oceni trenutno stanje zalog, se poda novo naročilo, in sicer tako da stanje zalog doseže ciljno raven S . Od tod tudi angleško ime »order-up-to« sistem uravnavanja zalog. To pomeni, da do naročila pride vsakokrat, ko je opravljen pregled zalog, obseg naročila pa je odvisen od trenutnega stanja zalog.

Periodično spremljanje zalog z naročanjem do ciljne zaloge v primeru, da je stanje zalog pod signalno ravno

(R,s,S) sistem uravnavanja zalog je kombinacija zgornjih dveh (s,S) in (R,S) sistema. Od (R,S) sistema se razlikuje v tem, da pride do naročila le v primeru, ko trenutno stanje zalog pade pod signalno raven. Za razliko od (s,S) sistema stanje zalog spremljamo periodično. Ob predpostavki $R=0$ se (R,s,S) sistem »prelevi« v (s,S) sistem. Če pa predpostavimo nivo signalne zaloge $s=S-1$, kar pomeni, da je trenutno stanje zalog v vsakem trenutku spremljanja zalog nižje od signalne zaloge, dobimo sistem (R,S) .

2.5. Učinek biča v dobavni verigi

2.5.1. Sodelovanje v dobavni verigi in pojav učinka biča

Medsebojno sodelovanje členov dobavne verige zagotavlja nemoteno in učinkovito delovanje dobavne verige. Sodelovanje členov dobavne verige se izboljša, če so dejanja vsakega od členov usmerjena k zvišanju dobička v dobavni verigi kot celoti. Posamezen člen dobavne verige v svojih dejanjih ne teži le k izboljšanju lastnega dobička, ampak upošteva tudi svoj vpliv na preostale člene. Pomanjkljivo sodelovanje lahko pripelje do poslabšane ravni storitve in posledično do višjih stroškov in nižjih dobičkov v dobavni verigi. Dva razloga, da pride do pomanjkljivega sodelovanja v dobavni verigi, sta:

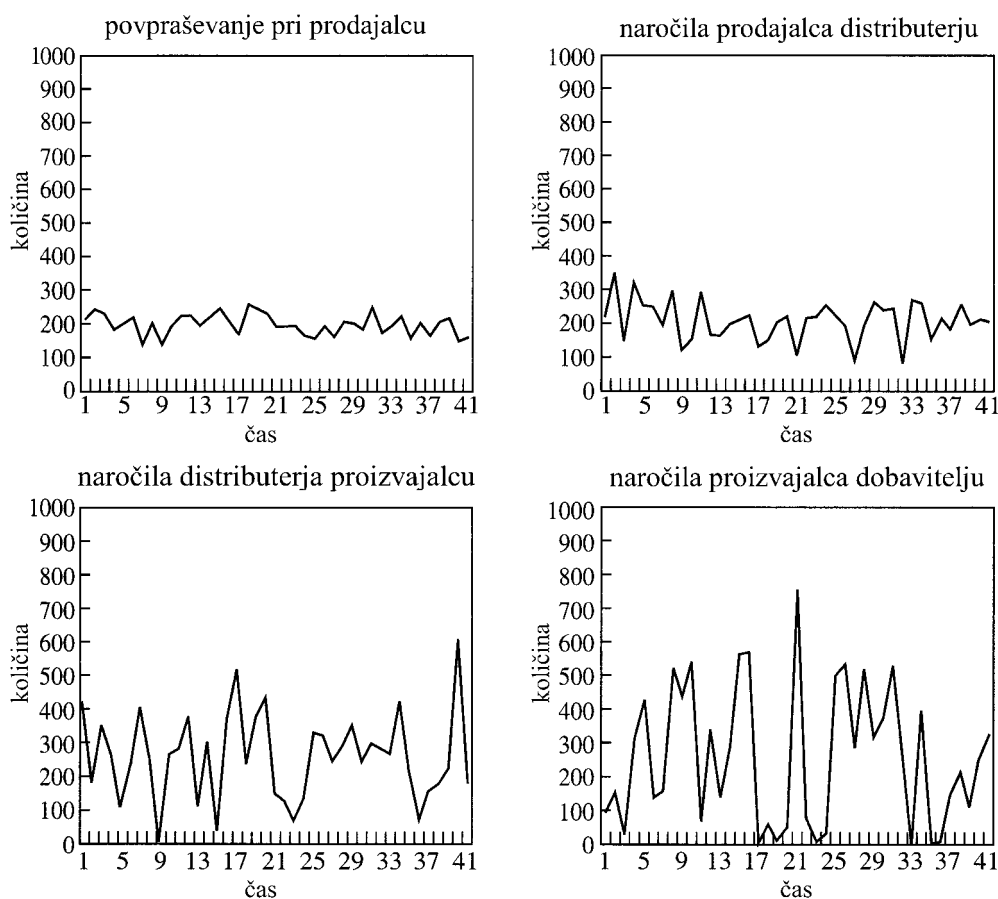
- **Neusklajeni cilji** členov dobavne verige. Posledica tega je, da vsak člen poskuša izboljšati lastne dobičke, ne glede na to, da s tem zniža dobiček celotne dobavne verige.
- **Popačenje informacije**: Ker med členi dobavne verige ni izmenjave popolne informacije, pride pri prenosu informacije po dobavni verigi do popačenja informacije. Popačenje je tem večje, čim dlje od vira je informacija uporabljena.

Pomanjkljivo sodelovanje v dobavni verigi lahko pripelje do pojava učinka biča (angl. Bullwhip effect), ko se variabilnost povpraševanja povečuje, ko se premikamo navzgor po dobavni verigi od končnega potrošnika do dobavitelja (Lee et al., 1997a, str. 546). Povedano drugače, ko se premaknemo od nižjega do višjega člena (recimo od prodajalca do distributerja) dobavne verige, se informacija o končnem povpraševanju popači. Naročila prodajalca se ne ujemajo z dejanskim povpraševanjem potrošnika, temveč imajo večjo variabilnost. Ta učinek se dodatno poveča na naslednji ravni, kjer je variabilnost naročil

distributerja proizvajalcu ponovno večja od naročil, ki jih distributer prejema od prodajalca (Slika 3).

Do popačenja informacije o povpraševanju lahko pride na podlagi obeh zgoraj omenjenih razlogov, ki slabita sodelovanje v verigi. Posamezen člen verige se v skladu z zasledovanjem lastnega cilja odloči, da poda naročilo, ki ne izraža dejanskega povpraševanja, s katerim se srečuje v določenem časovnem obdobju. Popačena informacija o dejanskem povpraševanju, ki jo višji členi verige dobijo v obliki takšnih naročil, lahko le-te zavede v mišljenje, da naročila predstavljajo dejansko povpraševanje. Drugi razlog pravi, da je popačenje informacije posledica prenosa nepopolne informacije po dobavni verigi. Posamezen člen dobavne verige višjemu členu posreduje le informacijo o naročilih, ne pa informacije o dejanskem povpraševanju. Nepopolna informacija zavede višji člen verige v pretirano reakcijo na spremembo v prejetem naročilu, ki se izrazi v dodatnem povečanju naročila naslednjemu členu v verigi.

Slika 3: Povečanje variabilnosti naročil v primerjavi z dejansko prodajo oziroma povpraševanjem, ko se pomikamo navzgor po dobavni verigi.



Vir: prirejeno po Chopra, Meindl, 2001, str.361

Učinek biča je bil opažen na mnogih različnih trgih. Najbolj znana sta primera podjetij Procter&Gamble in Hewlett-Packard. V P&G so ugotovili, da naročila za otroške plenice, ki so k njim prihajala od večjih distributerjev, nihajo veliko močnejše, kot je nihanje dejanske prodaje v trgovinah. Prav tako se je izkazalo, da imajo naročila dobaviteljem surovin za plenice še večjo variabilnost. Ob tem da je bilo jasno ugotovljeno logično dejstvo, da je poraba plenice skozi leto bolj ali manj konstantna, je bila močno povečana variabilnost naročil v gornjem delu verige presenetljiva in težko razumljiva. Podobna so bila opažanja v podjetju HP. Ko so opazovali prodajo njihovih tiskalnikov pri enem od njihovih glavnih prodajalcev, so v skladu s pričakovanji ugotovili, da prodaja niha. Na njihovo presenečenje so ugotovili, da se to nihanje v dobavni verigi povečuje. Največja nihanja so opazili na samem začetku verige, pri naročilih oddelka tiskalnikov oddelku za integrirana vezja (Kopczak, Lee, 1993; Lee et al., 1997b, str. 93).

Kakšne so lahko posledice tega, da je dobavna veriga »okužena« z učinkom biča? Podjetje, ki nima dostopa do informacij o dejanskem povpraševanju v nižjih členih dobavne verige, svoje analize predvidevanja povpraševanja, planiranja zmogljivosti, uravnavanja zalog in organizacije proizvodnje, gradi le na podlagi naročil, ki jih dobiva neposredno od nižjega člena v verigi. Posledice velikih nihanj v naročilih so lahko prekomerne zaloge, slabo predvidevanje povpraševanja, premajhna ali previsoka proizvodna kapaciteta in nizka raven storitve, povezana predvsem z zamudami v dobavi ali celo z neizpolnjevanjem naročil. K posledicam učinka biča se bomo ponovno vračali, ko bomo analizirali vzroke za njegov nastanek.

2.5.2. Raziskave na področju učinka biča

Pojav učinka biča ni nov, temveč se z njim raziskovalci na področju managementa proizvodnje ukvarjajo že dalj časa. Prvi, ki je učinek podrobneje opisal in poudaril njegove negativne posledice, je bil Forrester leta 1961. Eden nazornejših prikazov pojava učinka biča je igra distribucije piva (angl. "beer game", Sterman, 1989). Sodelujoči v igri igrajo vlogo štirih členov dobavne verige za distribucijo piva. Igralci med seboj ne smejo sodelovati in morajo sprejemati svoje odločitve glede naročil višjemu členu v verigi le na podlagi naročil, ki jih dobijo. Vzorci naročil členov verige jasno kažejo značilnosti izraženega učinka biča. Sterman je povečanje variabilnosti naročil pripisal neracionalnemu vedenju igralcev. Igralčeve napačne domneve o dejanskem povpraševanju in velikosti zalog naj bi bile ključne za nastanek učinka biča. Z razvojem matematičnih modelov, ki podrobneje opisujejo dogajanja v dobavni verigi in optimizirajo vedenje členov le-te, so Lee et al nakazali prav nasprotno, in sicer da je učinek biča posledica racionalnega vedenja sodelujočih v verigi (Lee et al., 1997a,b). Za razliko od Forrester-ja, ki je predvidel točno določen vzorec obnašanja sodelujočih v verigi in Stermana, pri katerem je za sodelujoče značilno neracionalno vedenje, se sodelujoči v Lee-jevem modelu vedejo racionalno in optimizirajo svoja dejanja. To je

pomenilo spremembo v pogledu na problem učinka biča in preusmerilo pozornost od načina odločanja sodelujočih v verigi k spremembam v zgradbi in delovanju dobavne verige same.

Ker je postalo jasno, da se s povečano variabilnostjo naročil ne srečuje le nekaj redkih podjetij, temveč je to globalen problem, se je v zadnjih letih zanimanje za proučevanje učinka biča močno povečalo. Raziskave na tem področju potekajo v več smereh. Veliko raziskav se ukvarja z kvantifikacijo učinka. Poleg običajnih analitičnih matematičnih metod (Lee et al., 1997a; Chen et al., 2000; Xu et al., 2001; Bai, 2001) in najrazličnejših metod simulacije (Metters, 1997) lahko v znanstvenih člankih zasledimo tudi uporabo dinamičnega programiranja (Yu et al., 2001), mehke logike ter nevronske mreže (Carlsson, Fuller, 2000, 2001) in uporabo metodologije prenosne funkcije (Dejonckheere et al., 2002a,b). Na podlagi poglobljenega znanja o pojavnih oblikah učinka biča in njegovih posledicah se razvijajo novi procesi in koncepti v delovanju dobavne verige. Izhodišče pri tem je: ker je učinek biča posledica racionalnih odločitev pri upravljanju z dobavno verigo, lahko poiščemo orodja in metode, s katerimi njegove učinke učinkovito omilimo ali jih popolnoma odpravimo.

2.5.3. Ovire pri sodelovanju v dobavni verigi in vzroki za nastanek učinka biča

Vsak dejavnik, ki prispeva k lokalni optimizaciji delovanja posameznega člena dobavne verige ali povzroči popačenje informacije in variabilnost v verigi, je ovira za sodelovanje v verigi. Ovire, ki onemogočajo sodelovanje v dobavni verigi, lahko povzročijo pojav učinka biča (Chopra, Meindl, 2001, str. 363). Ovire bomo delili v štiri večje skupine:

- ovire zaradi različne iniciative,
- ovire pri obdelavi informacij,
- operativne ovire,
- cenovne ovire.

Ovire zaradi različne iniciative

Do ovir zaradi različne iniciative pride takrat, ko ima posamezen člen dobavne verige iniciativo, da deluje tako, da izboljša le učinkovitost lastnega delovanja v verigi, s tem pa oslabi delovanje verige kot celote. Poveča se variabilnost v verigi in zmanjša celoten dobiček verige. Primer tega je zmanjšanje stroškov transporta na račun povečanja celotnih stroškov v dobavni verigi. Čakanje, da se naročila po izdelku nakopičijo do višine, ki jo prepeljemo s polnim tovornjakom, na eni strani zmanjša stroške transporta, vendar na drugi strani zmanjša odzivnost in posledično zniža raven storitve. Aktivnosti v smeri učinkovitejšega delovanja posamezne funkcije ali procesa v sklopu dobavne verige lahko privedejo do manj učinkovitega delovanja dobavne verige v celoti.

Drug primer takega delovanja je iniciativa prodajnega osebja, da izboljša prodajne rezultate v določenem obdobju. V Barilli so prodajnemu osebju ponudili nagrade za povišano prodajo v enomesečnem promocijskem obdobju. Ti so distributerjem ponudili ugodnejše pogoje in s

tem povečali povpraševanje. Prodaja distributerjem se je povečala, kljub temu da je končno povpraševanje ostajalo na običajni ravni. Posledica zalog, ki so se v tem obdobju nakopičile pri distributerjih, so bila nižja naročila distributerjev v prihodnjih obdobjih. Temu ustrezno je prodaja v Barilli padla pod običajno raven. Kljub temu da se je končno povpraševanje v tem času le malo spreminjalo, so naročila močno zanihala. Prišlo je do povečane variabilnosti naročil in pojava učinka biča (Hammond, 1994; Simchi-Levi et al., 2000, str. 67).

Ovire pri obdelavi informacij

Ovire pri obdelavi informacij v dobavni verigi privedejo do popačenja informacij, te pa povzročijo neučinkovito delovanje dobavne verige. Glavna razloga, da pride do popačenja informacije, sta: predvidevanje povpraševanja, ki temelji na naročilih nižjega člena in ne na dejanskem povpraševanju, in onemogočen dostop do popolne informacije. Za dobavno verigo, v kateri pride do nastanka učinka biča, je značilno, da je komunikacija med členi verige omejena le na naročila, ki jih nižji člen verige poda neposrednemu višjemu členu verige. Vloga vsakega od členov verige je, da izpolni naročila, ki jih je prejel. V primeru da predvideno povpraševanje temelji na prejetih naročilih, se variabilnost povpraševanja lahko poveča, ko se pomikamo navzgor po dobavni verigi. Majhna sprememba v končnem povpraševanju se tako poveča v obliki večje spremembe v naročilih, ki jih podajajo členi verige.

Prodajalec lahko v majhni spremembi končnega povpraševanja zasluti trend naraščanja povpraševanja in poda naročilo v višini, ki ustreza trendu naraščanja, ki ga je predvidel. Povečanje tako ne odraža le dejanskega povečanja v povpraševanju, temveč tudi pričakovano povečano povpraševanje v prihodnosti. Z večjim naročilom se prodajalec zavaruje pred možnim izčrpanjem zalog, do katerega bi prišlo, če do povečanega povpraševanja dejansko pride. Podobno distributer v naročilu, ki ga je prejel od prodajalca prepozna skok v povpraševanju, ki je višji, kot je bil prvotni skok v končnem povpraševanju. Ker distributer nima podatka o končnem povpraševanju, so njegova pričakovanja o trendu naraščanja povpraševanja še višja kot prodajalčeva. Posledica tega je, da distributer poda proizvajalcu višje naročilo, ki odraža povečana pričakovanja.

Če predpostavimo, da skoku v končnem povpraševanju sledi padec povpraševanja, se zgodba zrcalno ponovi. Prodajalec bo na padec v povpraševanju reagiral z znižanim naročilom. Znižanje se bo, podobno kot prej povišanje naročila, preneslo preko celotne verige in se ob tem ojačilo. Majhni skoki v končnem povpraševanju bodo torej povzročili velika nihanja v naročilih, ki bodo tem večja, čim višje v dobavni verigi bomo. Variabilnost naročil oziroma povpraševanja v višjih ravneh dobavne verige bo višja od variabilnosti končnega povpraševanja. Prišlo bo do pojava učinka biča.

Dodatno se učinek biča poveča, če v dobavni verigi ni omogočen dostop do popolne informacije. Primer tega je prodajalec, ki se odloči, da poviša naročilo, ker je v prihodnjem

obdobju predvidel promocijo izdelka. Distributer, ki ni seznanjen z namero prodajalca, v povišanem naročilu zmotno prepozna porast dejanskega povpraševanja in se nanj odzove s prekomerno povišanim naročilom. Pogosto se zgodi, da prodajalec v naslednjem obdobju poda običajno ali celo naročilo, ki je nižje od običajnega. V tem in naslednjih obdobjih se k distributerju stekajo velike količine izdelka, ki so posledica visokega naročila, le-ta pa je sedaj soočen z znižanim povpraševanjem. Posledica tega so prekomerne zaloge, ki se kopičijo pri distributerju in močno znižana naročila distributerja. Ponovno pride do povečane variabilnosti naročil v primerjavi z variabilnostjo končnega povpraševanja.

Operativne ovire

Operativne ovire se pojavljajo v procesu uravnavanja zalog, to je procesu podajanja in prejemanja naročil. Posledica optimizacije procesa uravnavanja zalog sta pogosto povečana variabilnost in pojav učinka biča. Štiri glavna dejanja, ki privedejo do operativnih ovir in pojava učinka biča, so: naročanje v svežnjih, sočasno naročanje, dolgi dobavni roki in špekuliranje, kot posledica nezadostne dobave.

Podjetje poda naročilo višjemu členu dobavne verige v skladu s sistemom uravnavanja zalog, ki ga uporablja. Povpraševanje, ki ga podjetje beleži, zmanjša stanje zalog, vendar to ne sproži takojšnjega naročila novih zalog, temveč podjetje poda naročilo, šele ko se povpraševanje akumulira. Namesto da bi podjetje naročilo nov izdelek vsakokrat, ko prodaja kos izdelka, se odloči, da bo naročalo v obliki svežnjev. V takšno strategijo naročanja jih silijo fiksni stroški, ki so povezani z naročanjem. Podjetje se lahko za občasno naročanje odloči na podlagi drugih aktivnosti, ki potekajo v podjetju. Tak primer je podjetje, v katerem se kontrola potreb po materialu vrši enkrat mesečno. Ob tem se ugotovi stanje zalog in določi višina novega naročila. Podjetje posledično poda naročilo enkrat mesečno.

Naročanje v svežnjih se pojavlja kot posledica želje po optimizaciji stroškov transporta, stroškov spremljanja zalog ter stroškov naročanja. Eden običajnih vzrokov za naročanje v svežnjih so fiksni stroški transporta zalog. Poln tovarnjak ali le delno poln tovarnjak pomenita enako visoke stroške transporta. Podjetja torej težijo k temu, da naročajo v takšni količini, ki bo zapolnila cel tovarnjak. Posledica tega je podaljšanje cikla naročanja in podajanje večjih naročil. Pogosto distributer ali proizvajalec ponujata prodajalcu ugodnosti pri naročilu polnega tovarnjaka in s tem sama povzročita, da naročila spodnjih členov dobavne verige prihajajo manj pogosto. Vzorec povpraševanja za distributerja in proizvajalca je sestavljen iz redkih visokih vrhov povpraševanja, ki ustrezajo naročilom, podanim s strani prodajalca in daljših obdobjih brez povpraševanja. Variabilnost naročil prodajalca je temu primerno večja, kot je variabilnost končnega povpraševanja.

O sočasnem naročanju govorimo v primeru, ko več podjetij poda svoja naročila v istem obdobju. Če bi bil cikel naročanja prodajalcev enakomerno razpršen skozi celoten mesec, bi distributer beležil enakomerno povpraševanje in do učinka biča ne bi prišlo. Skoki v povpraševanju, ki so posledica naročanja posameznega prodajalca v obliki svežnjev, bi se

tako izravnali v enakomeren vzorec povpraševanja pri distributerju. Namesto enakomerno razpršenih naročil bodo naročila prodajalcev prihajala v naključnih obdobjih in se celo prekrivala. Pri številnih prodajalcih se cikel naročanja lahko ujema, zaradi česar vsi naročajo v istem obdobju, kar pomeni velike skoke v velikost skupnih naročil. Prevelik pritisk trga v določenih obdobjih lahko distributer in pozneje proizvajalec interpretirata kot povišano povpraševanje in na podlagi le-tega ustrezno povišata svoja pričakovanja. Posledica napačne interpretacije je, da se nihanja povpraševanja, ko se premikamo navzgor po dobavni verigi povečajo.

Učinek biča je povečan, če so dobavni roki daljši. Za primer vzemimo situacijo, ko prodajalec napačno interpretira skok v končnem povpraševanju in v njem vidi naraščajoč trend. Prodajalec bo svoja pričakovanja vključil v naročilo, ki bo pokrivalo potrebe v dolžini dobavnega roka. Če je dobavni rok dolg, se bo skok v končnem povpraševanju odrazil v močno povečanem naročilu. V kolikor je dobavni rok kratek, prodajalec v skladu s pričakovanji poda višje naročilo, ki pa tokrat odraža pričakovanja le za krajši čas. Če skoku v povpraševanju sledi padec, prodajalec z dolgimi dobavnimi roki ne more pravočasno reagirati na spremembo v povpraševanju, ki ni v skladu z njegovimi pričakovanji. Po preteku dobavnega roka bo dobil visoko naročilo, rezultat pa bo prekomerno stanje zalog. Na novo situacijo se bo prodajalec odzval z znižanjem naročil. Dolgi dobavni roki povzročijo povečano variabilnost naročil nasproti končnemu povpraševanju. Z vplivom dobavnih rokov na pojav učinka biča se je ukvarjal že Forrester. Navedel je dva glavna vzroka za nastanek učinka biča: časovni zamik pri prenosu informacije navzgor po dobavni verigi in časovni zamik toka materiala v obratni smeri, ki je posledica neničelnega dobavnega roka (Forrester, 1961).

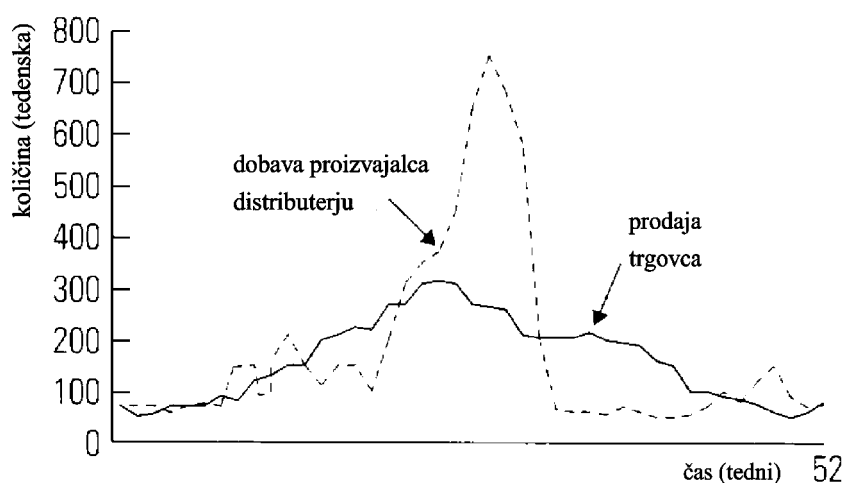
Ko povpraševanje po določenem izdelku preseže ponudbo, pride pogosto do tega, da mora proizvajalec omejiti dobavo izdelka kupcem. Lahko se na primer odloči, da vsakemu od kupcem dobavi le manjši del naročila v relativnem deležu glede na podano naročilo. Če predpostavimo, da je proizvajalec zmožen zadostiti le polovici naročil, bo vsakemu od kupcev izpolnil polovico naročila. Ker kupci vedo, da bo prišlo do takšne omejitve, naročijo pretirano količino izdelkov in si s tem zagotovijo, da bodo dobili večji delež. Posledica špekuliranja kupcev je, da proizvajalec naenkrat zabeleži močno povečano povpraševanje, ki pa ne odraža dejanskega povpraševanja na trgu. Pozneje, ko pride do umiritve povpraševanja, se »prenapeta« situacija konča z močno zmanjšanimi naročili in odpovedmi starih naročil. Ko je Hewlett-Packard na trgu nastopil z laserskim tiskalnikom LaserJet III, je bilo povpraševanje tako visoko, da je moralo podjetje omejiti dobavo. Povečano povpraševanje je vzpodbudilo dodatna vlaganja v povečanje proizvodnih zmogljivosti, ki bi zagotovile zadostno ponudbo. Čez nekaj časa je bila omejitev umaknjena in to se je odrazilo v zmanjšanem povpraševanju, močno povečanim zalogah, ki jih podjetje ni moglo prodati ter prevelikih proizvodnih zmogljivostih (Lee et al, 1997b, str. 98).

Cenovne ovire

Do cenovnih ovir pri sodelovanju v verigi pride v primerih, ko cenovna politika posameznega podjetja povzroči povečano variabilnost naročil in nastanek učinka biča. Ugotovljeno je bilo, da večina transakcij med distributerji in proizvajalci poteka v obliki vnaprejšnjih naročil in plačil, ki so v veliki meri posledica ugodnosti, ki jih proizvajalci ponujajo ob takem načinu poslovanja. Do sprememb v cenah lahko pride neposredno v obliki cenovnih popustov ali posredno v obliki količinskih popustov ter ugodnejših plačilnih pogojev. V primeru da je strošek skladiščenja dodatnih količin zalog manjši od prihrankov iz naslova vnaprejšnjega kupovanja po ugodnejših cenah, je kupovanje vnaprej racionalna odločitev. Posledica le-te pa je, da kupci naročajo in kupujejo v količinah, ki ne odražajo njihovih trenutnih potreb, zaloge pri kupcih se nakopičijo in temu ustrezno se podaljša cikel naročanja. Vzorec naročanja tako ne odraža dejanskega povpraševanja po izdelku in variabilnost naročil je večja od variabilnosti povpraševanja – učinek biča.

V literaturi se predvsem pojavlja primer proizvajalca juh Cambell, ki se sooča s sezonskim povpraševanjem po svojih izdelkih (Lee et al, 1997b, str. 96). Z namenom povečati prodajo je proizvajalec ponudil cenovne popuste. Distributerji so to ugodnost izkoristili, kar je povzročilo velik skok v vzorcu povpraševanja proizvajalca. Ko je proizvajalec soočen s takšnimi nihanji, mora v določenih obdobjih delati s polnimi kapacitetami, v ostalih obdobjih pa lahko pride celo do začasnih zaustavitev proizvodnje. Podobne kratkotrajne preobremenitve se pojavljajo v spremljajočih procesih dobavne verige, kot so transport in obdelava naročil. Prav tako se povečajo stroški skladiščenja prekomernih zalog pri distributerjih in trgovcih. Povečani stroški zalog se pojavljajo tudi pri proizvajalcu v primeru, ko le-ta v pričakovanju skoka v povpraševanju z vnaprejšnjo proizvodnjo dvigne zaloge. Ironično je, da je nastala neučinkovitost dobavne verige posledica strategije proizvajalca po povečanju prodaje.

Slika 4: Učinek biča v dobavni verigi s sezonskim povpraševanjem.



Vir: prirejeno po Lee et al., 1997b, str. 96

2.5.4. Izboljšanje sodelovanja v dobavni verigi in zmanjšanje učinka biča

Po prepoznavanju ovir pri sodelovanju v dobavni verigi se posvetimo prepoznavanju aktivnosti, s katerimi lahko te ovire preprečimo oziroma omilimo njihov vpliv.

Prvi skupini ovir, to je oviram zaradi različne iniciative členov dobavne verige ali funkcij v okviru posameznega člena verige, se podjetja lahko izognejo s tem, da med podjetji in v podjetju samem, uskladijo cilje in iniciative. Ključ za učinkovito sodelovanje v verigi je celovito delovanje verige, kjer posamezne funkcije podjetja oziroma podjetje v celoti ne delujejo neodvisno, ampak zasledujejo skupne cilje.

Povečanje točnosti in dosegljivosti informacije lahko v več pogledih izboljša delovanje dobavne verige. Za zmanjšanje učinka biča je posebej pomemben dostop višjih členov verige do informacije o končnem povpraševanju. Eden izmed načinov za to je vzpostavitev sistemov za evidentiranje povpraševanja oziroma prodaje ob trenutku prodaje (angl. point-of-sale ali POS) v povezavi z uvedbo elektronske izmenjave podatkov (angl. electronic data interchange ali EDI). Tako so izpolnjeni osnovni pogoji, da med člani verige pride do sodelovanja v procesu predvidevanja povpraševanja, uravnavanja zalog ter planiranja proizvodnje. Takšno sodelovanje v veliki meri odpravi posledice popačenja informacije v verigi, ki podjetja zavede v neučinkovito delovanje. Končni korak v sodelovanju je integracija vseh funkcij procesa uravnavanja zalog v enoten sistem obvladovanja zalog v dobavni verigi (angl. vendor-managed inventory ali VMI).

Skrajšanje dobavnih tokov in zmanjšanje svežnjev naročil sta aktivnosti v smeri odpravljanja operativnih ovir v dobavni verigi. Zgoraj omenjeni sistemi izboljšajo sodelovanje v verigi in učinkovitost njenega delovanja. Posledica tega je skrajšanje dobavnih rokov. Zmanjša se negotovost povpraševanja, povečajo se natančnost predvidevanja povpraševanja ter stabilnost in učinkovitost procesa uravnavanja zalog v celoti. Z računalniško podprtim naročanjem (angl. computer assisted ordering ali CAO) podjetje prepreči naključno akumulacijo naročil v posameznih obdobjih, prepozna prekomerno naročanje v svežnjih, temu ustrezno pa poveča učinkovitost uravnavanja zalog ter zmanjša stroške naročanja in transporta. V kombinaciji z dostopom do popolne informacije lahko podjetje v povpraševanju predčasno prepozna spremembe, ki ne odražajo sprememb v končnem povpraševanju. S tem se lahko izogne prekomernemu naročanju v majhnem številu svežnjev in špekuliranju, ki se pojavi v pričakovanju nezadostne dobave.

Cenovna strategija podjetja, katere rezultat bo naročanje v manjših svežnjih in preprečitev prekomernega vnaprejšnjega naročanja, bo zmanjšala učinek biča in s tem izboljšala učinkovitost dobavne verige. Takšne strategije so na primer, omogočanje cenovnih popustov, ki niso vezani na velikost enkratnega naročila, ampak na velikost naročil v določenem obdobju. Strategija stabilizacije cen bo prav tako v veliki meri odpravila močno spremenljiv vzorec naročanja. Namesto občasnih promocij in ugodnosti podjetje raje ponudi stalne popuste. S tem se prepreči predčasno naročanje, naročila pa tako bolje odražajo dejansko povpraševanje.

2.5.5. Kvantifikacija učinka biča

Učinek biča je povečanje variabilnosti naročil v primerjavi z variabilnostjo končnega povpraševanja. Poskušajmo povečanje variabilnosti zapisati v matematični obliki za prvi člen dobavne verige, to je za prodajalca. Mera za variabilnost je koeficient variabilnosti, ki ga definiramo kot razmerje med standardno deviacijo σ in povprečjem μ ter ga za končno povpraševanje D_p , ki ga beleži prodajalec, zapišemo kot:

$$CV(D_p) = \frac{\sigma(D_p)}{\mu(D_p)} \quad (1.2)$$

Povpraševanje D_p je niz podatkov o povpraševanju v posameznih časovnih obdobjih. Ker nas zanima povečanje variabilnosti, bomo variabilnost naročil prodajalca delili z variabilnostjo končnega povpraševanja:

$$U' = \frac{CV(O_p)}{CV(D_p)} \quad (1.3)$$

U' je merilo za velikost učinka biča (Fransoo, Wouters, 2000, str. 81). V kolikor velja $U' > 1$, je prišlo do pojava učinka biča, saj je variabilnost naročil večja od variabilnosti končnega povpraševanja. Zgornjo enačbo lahko ob upoštevanju predpostavke, da je povprečno naročilo enako povprečnemu povpraševanju, zapišemo v obliki razmerja med standardnima deviacijama naročil in končnega povpraševanja:

$$U = \frac{\sigma(O_p)}{\sigma(D_p)} \quad (1.4)$$

kjer bo U merilo za velikost učinka biča, ki ga bomo uporabljali v nadaljevanju. Enako kot prej velja, da do pojava učinka biča pride, v kolikor je $U > 1$. Omenjena predpostavka je običajna pri obravnavi učinka biča, saj v nekaterih delih velikost učinka biča definirajo kot razmerje variance naročil in povpraševanja, kjer je varianca kvadrat standardne variacije (Lee et al, 1997a; Chen et al., 2000).

Podobno lahko povečanje variabilnosti zapišemo tudi za višje člene. Povečanje variabilnosti naročil distributerja nasproti variabilnosti končnega povpraševanja zapišemo kot:

$$U = \frac{\sigma(O_d)}{\sigma(D_p)} = \frac{\sigma(O_d)}{\sigma(D_d)} \cdot \frac{\sigma(O_p)}{\sigma(D_p)} \quad (1.5)$$

Vidimo, da povečanje variabilnosti pri distributerju lahko zapišemo tudi kot zmnožek povečanja variabilnosti pri prodajalcu in povečanja variabilnosti, pri prehodu od prodajalca do distributerja (ob upoštevanju, da naročila prodajalca O_p predstavljajo dejansko povpraševanje

distributerja D_d). Vidimo, da je učinek biča multiplikativen, kar pomeni, da se njegova višina hitro povečuje, ko se pomikamo navzgor po dobavni verigi.

2.5.6. Raziskave učinka biča z metodologijo prenosne funkcije

Metodologija prenosne funkcije izvira iz področja elektronike, kjer se uporablja za analizo delovanja kontrolnih sistemov. Pripravnost matematičnih orodij metodologije prenosne funkcije pri analizi sistemov kontrole proizvodnje in zalog, je bila prepoznana že leta 1952, ko je Simon v svojih analizah uporabil Laplacovo transformacijo. Opisu kontinuiranih zveznih sistemov je kmalu sledil opis diskretnih nezveznih sistemov z novim matematičnim orodjem – diskretno Z transformacijo.

Periodični sistemi uravnavanja zalog so po svoji naravi diskretni. Proces spremljanja zalog in podajanja naročil se sproži le vsake toliko časa. Opis delovanja sistemov in analiza njihovih lastnosti tako ni mogoča s enostavnejšimi matematičnimi orodji, ki so na voljo pri kontinuiranih zveznih sistemih. Temu lahko pripišemo dejstvo, da je bila večina raziskav na področju managementa dobavne verige narejena za zvezne sisteme. Metode, kot so analiza bločnih diagramov sistemov, izračun prenosne funkcije s pomočjo Z transformacije in analiza frekvenčnih odzivov diskretnih sistemov so v svojih delih uporabili Towill (1970, 1999), Bonney et al. (1994), Grubbstrom (1998) in Dejonckheere et al. (2002a,b).

Posebej lahko izpostavimo delo avtorjev Dejonckheere et al., ki so v prvem od omenjenih člankov analizirali vpliv predvidevanja povpraševanja z metodo eksponentnega glajenja na velikost učinka biča. Analiza je sicer opravljena za zvezne sisteme vendar ponuja dober vpogled v omejitve, ki so povezane z uporabo preprostih metod predvidevanja povpraševanja pri prepoznavanju sprememb v vzorcu povpraševanja. V svojem drugem delu so avtorji posegli na področje diskretnih sistemov in analizirali periodičen sistem uravnavanja zalog z naročanjem do ciljne zaloge, kjer so za predvidevanje povpraševanja uporabili metodi preprostega eksponentnega glajenja in metodo drsečih sredin. Kljub temu da so se omejili le na analizo frekvenčnih odzivov sistemov, je pomemben prispevek dela prikaz izračuna velikosti učinka biča s pomočjo frekvenčnega odziva sistema uravnavanja zalog in periodograma vzorca povpraševanja, dobljenega s Fourierovo transformacijo.

3. METODOLOGIJA PRENOSNE FUNKCIJE

3.1. Kontrolni sistemi

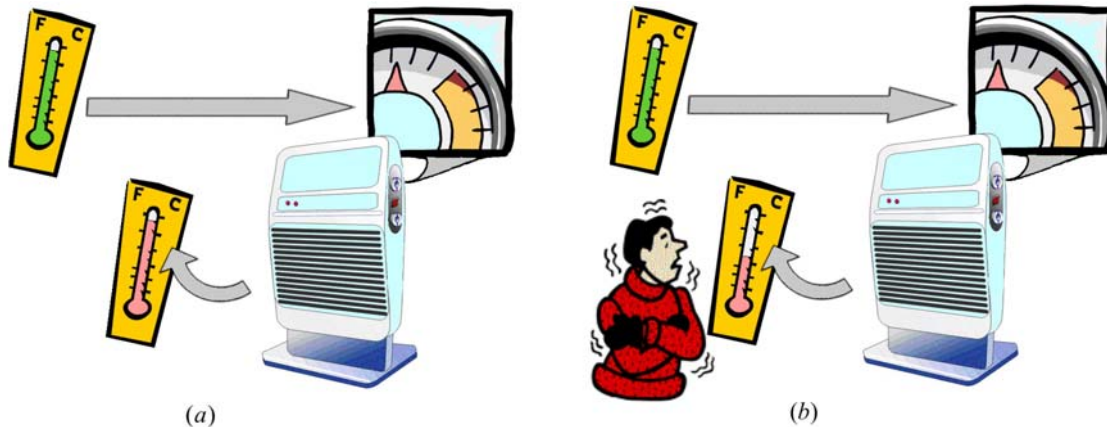
Pod besedo »kontrolni sistem« razumemo kombinacijo elementov – komponent sistema, s katerimi nadzorujemo delovanje izbranega procesa. Proces bo po naših pričakovanjih potekal le pod pogojem, da bo kontrolni sistem ustrezno opravljal svoje delo, zato je potreben vhodni signal, ki opisuje določeno lastnost procesa, ki jo nadzorujemo. Vhodni signal zaradi tega poimenujemo tudi referenčni signal. Vhodni signal pošljemo v kontrolni sistem, ki ga prevede in na izhodu dobimo izhodni signal, ki poskrbi, da se proces odvija po naših pričakovanjih. Izhodnemu signalu zato pravimo kontrolni signal. Kontrolni sistem se na različne vhodne signale odziva na različne načine. Način odziva sistema je poleg same zgradbe sistema v pretežni meri odvisen od samega vhodnega signala, ki mu je izpostavljen. Če hočemo oblikovati sistem, ki se bo vedel v skladu z našimi pričakovanji, je potrebno vedeti, kako naj se sistem odziva na določene značilne vhodne signale. V praksi je pričakovan značilen vhodni signal težko določiti, zato je pri konstrukciji kontrolnega sistema primerno predpostaviti določene vedenjske značilnosti sistema, ki jih lahko matematično formuliramo. Zaželeno obnašanje sistema je tako rezultat matematično določljivega odziva na predpostavljeno obliko vhodnega signala. Konstrukcija kontrolnega sistema je povezana predvsem z izbiro primernih komponent sistema, ki zagotavljajo pričakovan odziv sistema.

V osnovi ločimo med dvema osnovnima zasnovama kontrolnih sistemov in s tem tudi dva načina kontrole delovanja sistema:

- **sistem odprte zanke**, kjer izhodni signal ne vpliva na delovanje sistema;
- **sistem povratne zanke** ali »feedback« sistem, kjer izhodni signal vodimo nazaj in ga porabimo na vhodu v sistem in tako vpliva na delovanje sistema.

Delovanje obeh sistemov opišimo na primeru nadzora delovanja sobnega električnega grelca. Temperaturo zraka, ki ga v prostor oddaja grelec, spreminjamo s tem, da nastavljamo moč gretja na grelcu. Temperatura prostora predstavlja vhodni ali referenčni signal. Vloga kontrolnega sistema je, da na izhodu odda izhodni ali kontrolni signal, s katerim se nastavi moč gretja. Če moč gretja nastavljamo po principu odprte zanke, to pomeni da za želeno temperaturo v prostoru izberemo ustrezno moč gretja (Slika 5a, kjer zgornja puščica predstavlja relacijo oziroma vpliv temperature prostora na nastavitve moči gretja. Spodnji termometer meri dejansko temperaturo v prostoru.). Relacijo med temperaturo in močjo gretja smo dobili na podlagi preteklih izkušenj in velja v točno določenih okoliščinah. Če se te okoliščine spremenijo, relacija ne bo več ustrezna. Primer take spremembe je padec zunanje temperature. Enaka moč gretja sedaj ne bo ogrevala prostora na želeno temperaturo (Slika 5b). Nezmožnost prilagajanja kontrolnega sistema spremembam v pogojih delovanja je glavna pomanjkljivost sistemov, ki delujejo na principu odprte zanke.

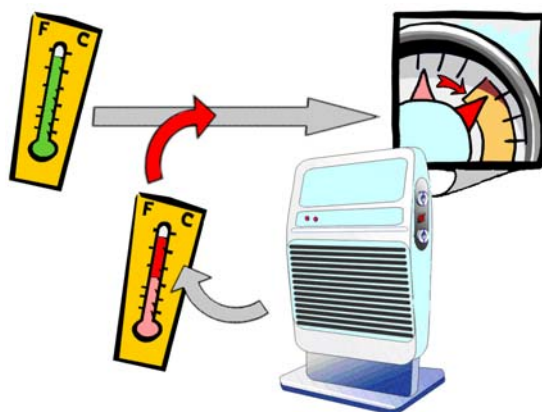
Slika 5: Ponazoritev delovanja kontrolnega sistema odprte zanke na primeru ogrevanja prostora z električnim grelcem. Ob ustreznih okoliščinah temperatura prostora doseže želeno temperaturo (a). Ko zunanja temperatura pade, je temperatura v prostoru nižja (b).



Vir: lastno delo

Povratni efekt, ki je glavna značilnost povratne zanke, omogoča, da v kolikor je prišlo do odstopanja dejanske temperature od želene, ustrezno prilagodimo moč gretja. Če je temperatura v prostoru prenizka, bo kontrolni sistem zaznal to odstopanje in povečal moč. S ponavljanjem opisanega procesa lahko ohranimo temperaturo na želeni ravni. Sistem odprte zanke (Slika 5) spremenimo, tako da v sistem pošljemo informacijo o dejanski temperaturi (Slika 6, rdeča puščica). Na podlagi neujemanja med želeno in dejansko temperaturo kontrolni sistem ustrezno spremeni moč gretja.

Slika 6: Ponazoritev delovanja kontrolnega sistema povratne zanke na primeru ogrevanja prostora z električnim grelcem.

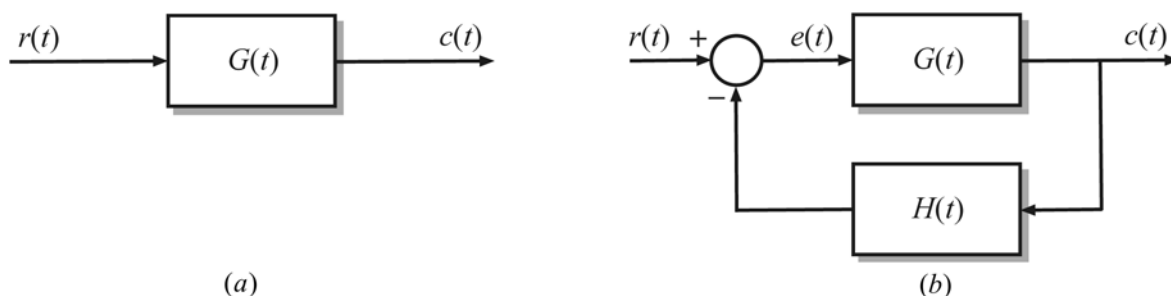


Vir: lastno delo

3.1.1. Bločni diagram kontrolnega sistema

Kontrolne sisteme v splošnem lahko sestavlja mnogo komponent. Grafična ponazoritev kompleksnega sistema bi hitro postala nepregledna, zato si pri ponazoritvi kontrolnih sistemov pomagamo z bločnim diagramom. Vsako komponento sistema v bločnem diagramu predstavimo s pravokotnikom ali blokom. Posamezen blok poimenujemo skladno s funkcijo, ki jo v sistemu opravlja. Bloke med seboj povežemo s puščicami, ki ponazarjajo pot signala med komponentami sistema. Na mestih, kjer se več signalov sreča, pride do seštevanja signalov. Takšno mesto označimo s krožcem, pri čemer označimo s kakšnim predznakom se posamezen signal prišteje (torej prišteje ali odšteje). Iz krožca vodi nov signal, ki je seštevek vhodnih signalov. Bločni diagram predstavlja tok informacij skozi sistem in funkcije, ki jih opravlja posamezna komponenta sistema. S takšnim prikazom se poveča preglednost sistema in nazorneje prikaže njegovo delovanje.

Narišimo bločna diagrama za sistem odprte in povratne zanke (Slika 7). Pot vhodnega signala $r(t)$ je v sistemu odprte zanke ravna in vodi skozi blok $G(t)$, kjer se v skladu s funkcijo $G(t)$ spremeni v izhodni signal $c(t)$. V sistemu povratne zanke izhodni signal vodimo nazaj skozi blok $H(t)$, kjer se združi z vhodnim signalom in tako dobimo nov signal $e(t)$, ki potuje skozi sistem.



Vir: prirejeno po Towill, 1970, str. 10

3.1.2. Prenosna funkcija kontrolnega sistema

Funkcijo, ki je zapisana v posameznem bloku in označuje njegovo delovanje, imenujemo prenosna funkcija. Vhodni signal, ki prihaja v blok, smo označili z $r(t)$, izhodnega, ki vodi iz bloka, s $c(t)$. Prenosno funkcijo $G(t)$ zapišemo kot razmerje izhodnega in vhodnega signala:

$$\frac{c(t)}{r(t)} = G(t) \quad (2.1)$$

Prenosna funkcija torej določa, kako se spremeni vhodni signal v posamezni komponenti sistema. Prenosno funkcijo lahko zapišemo za posamezno komponento sistema ali pa za

kontrolni sistem v celoti. Ker prenosna funkcija povezuje izhodni signal z vhodnim, je zato, da opišemo delovanje kontrolnega sistema dovolj, da poznamo njegovo prenosno funkcijo.

Zapišimo sedaj prenosni funkciji za že poznana sistema odprte in povratne zanke (Slika 7) (Towill, 1970, str. 22). Prenosno funkcijo sistema odprte zanke zapišemo kar v obliki enačbe (2.1). Če signal potuje skozi dva ali več zaporednih blokov $G_1(t)$, $G_2(t)$..., potem prenosno funkcijo zapišemo kot zmnožek funkcij posameznih blokov:

$$\frac{c(t)}{r(t)} = G_1(t)G_2(t)K \quad (2.2)$$

V sistemu povratne zanke vodimo izhodni signal $c(t)$ nazaj skozi blok $H(t)$ in dobimo signal $H(t)c(t)$, ki ga odštejemo od vhodnega signala $r(t)$. Razliko pošljemo skozi blok $G(t)$. Če zopet izrazimo razmerje med izhodnim in vhodnim signalom dobimo prenosno funkcijo sistema povratne zanke:

$$\frac{c(t)}{r(t)} = \frac{G(t)}{1 + G(t)H(t)} \quad (2.3)$$

3.1.3. Linearni sistemi in prehod v s prostor

Določen kontrolni sistem lahko označimo kot linearen, če zanj drži načelo superpozicije. Načelo superpozicije pravi, da je »odziv linearnega sistema na več hkratnih vhodnih signalov enak vsoti odzivov na posamezne vhodne signale«. Ponazorimo to na preprostem sistemu z vhodnim signalom $r(t) = r_1(t)$, ki se pod vplivom prenosne funkcije sistema $G(t)$ spremeni v izhodni signal $c(t) = c_1(t)$. Podobno je odziv sistema na signal $r_2(t)$ signal $c_2(t)$. Če v sistem vodimo vsoto oziroma linearno kombinacijo obeh signalov $r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$, na izhodu linearnega sistema dobimo izhodni signal oblike

$$c(t) = a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t) \quad (2.4)$$

kjer sta a_1 in a_2 konstantni realni števili in izhodni signal c_i ustreza vhodnemu r_i (Houpis, Lamont, 1985, str. 73).

Če ima določen kontrolni sistem lastnosti linearnega kontrolnega sistema, je analiza sistema dosti manj zahtevna, kot če imamo opravka z nelinearnim sistemom. Običajen korak pri analizi linearnih sistemov je, da se preselimo iz prostora čas v s prostor. To pomeni, da signale in funkcije sistema ne pišemo več v odvisnosti od časa t , temveč v odvisnosti od nove

spremenljivke s . Prenosno funkcijo sistema v novem s prostoru zapišemo ponovno kot razmerje izhodnega in vhodnega signala, vendar oba izražena z novo spremenljivko s .

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) \quad (2.5)$$

Alternativna definicija linearnosti je: sistem je linearen, če vedenje sistema v vsakem trenutku lahko opišemo z linearno diferencialno enačbo s konstantnimi koeficienti ¹.

$$a_n s^n E_2(s) + a_{n-1} s^{n-1} E_2(s) + \dots + a_0 E_2(s) = b_q s^q E_1(s) + b_{q-1} s^{q-1} E_1(s) + \dots + b_0 E_1(s) \quad (2.6)$$

V tem primeru smo zaradi večje jasnosti uvedli nov način označevanja signalov kontrolnega sistema. Z $E_1(s)$ smo označili vhodni signal in z $E_2(s)$ izhodni signal, oba izražena z novo spremenljivko s . Spremenljivka s je torej operator odvajanja po času $s = d/dt$.

Prenosno funkcijo sedaj lahko zapišemo kot ulomek dveh polinomov stopnje n in q , izraženih s spremenljivko s (Towill, 1970, str. 36).

$$\frac{E_2(s)}{E_1(s)} = G(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_q s^q}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n} \quad (2.7)$$

3.2. Kontrolni sistemi z diskretnim vhodnim signalom

Do sedaj nismo nič povedali o tem, kakšne vrste so signali v kontrolnem sistemu. Vhodni signal v kontrolnem sistemu je lahko bodisi kontinuiran ali diskreten. Kontrolni sistem, pri katerem imamo opravka z neprekinjenimi kontinuiranimi signali, imenujemo analogni kontrolni sistem. Sistem z diskretnimi signali pa bomo poimenovali kontrolni sistemi z diskretnim vhodnim signalom. Pri prvem govorimo o signalu kot o gladki neprekinjeni krivulji, pri drugem pa je signal zaporedje ločenih pulzov. Analiza analognih sistemov poteka v prej opisanem s prostoru. Pri analizi kontrolnih sistemov z diskretnimi vhodnimi signali se bo potrebno preseliti v nov – z prostor. Obravnava kontrolnih sistemov z diskretnim vhodnim signalom v z prostoru je konceptualno podobna obravnavi analognih kontrolnih sistemov v s prostoru in se od nje razlikuje le v nekaterih podrobnostih. V določenih primerih je analiza

¹ Reševanje navadnih diferencialnih enačb s konstantnimi koeficienti (enačba (2.6)) nam močno olajša matematično orodje – Laplacova transformacija (D'Azzo, Houpis, 1966, str. 87). Laplacovo transformacijo $F(s)$, funkcije $f(t)$, definiramo z enačbo:

$$L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = F(s)$$

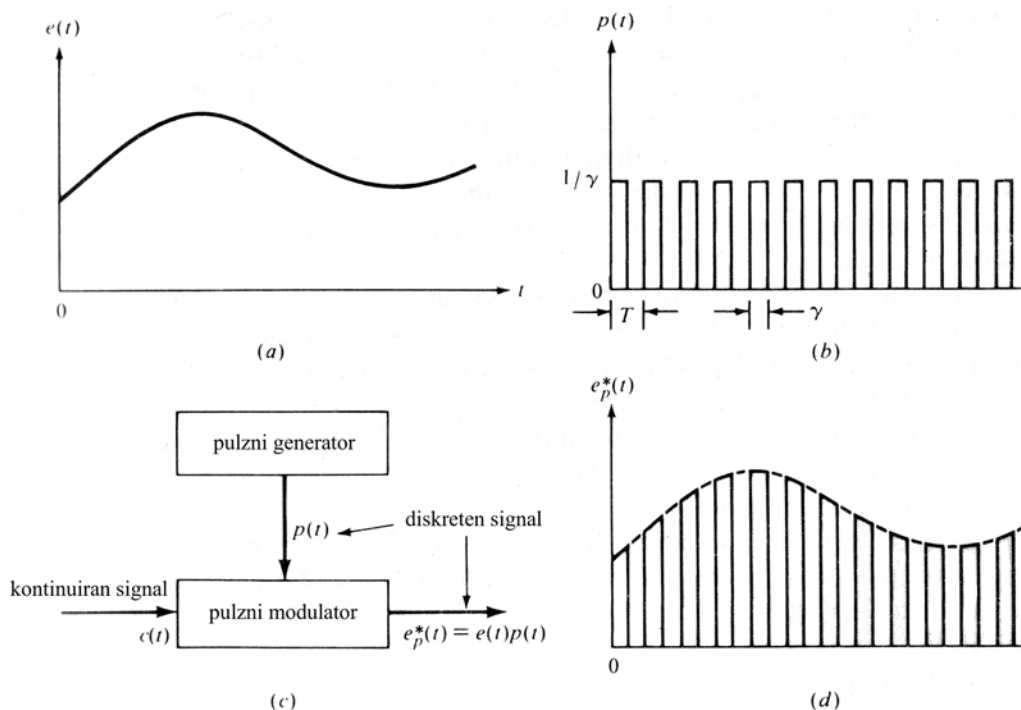
kjer je s kompleksna spremenljivka oblike $s = \sigma + i\omega$. σ predstavlja njen realni in ω imaginarni del. Laplacovo transformacijo bomo s pridom uporabili predvsem pri določanju odzivov kontrolnega sistema na standardizirane vhodne signale.

sistemov z diskretnimi signali lažje razumljiva, če se za trenutek preselimo v s prostor, zato je potrebno dovolj dobro poznati relacije med obema prostoroma.

3.2.1. Vzorčenje kontinuiranega signala

Vhodni signali v analognih kontrolnih sistemih so neprekinjeni. Posledično je tudi izhodni signal analognega sistema kontinuiran. Če določen proces nadzorujemo z digitalnim vezjem je potrebno na vhod vezja pripeljati diskreten signal. Narava digitalnih sistemov je taka, da lahko operirajo le s posameznimi vrednostmi in ne s kontinuiranimi signali. Da lahko poljuben vhodni signal uporabimo kot vhod v digitalni kontrolni sistem, ga je torej potrebno pretvoriti v diskretnega. To opravimo s procesom vzorčenja signala (Slika 8). Podrobnejši pogled v vzorčenje signala nam bo v pomoč pri analizi kontrolnih sistemov, pri katerih imamo na voljo le diskreten vhodni signal.

Slika 8: Vzorčenje kontinuiranega signala s pulznim modulatorjem, v katerega vodimo vhodni kontinuiran signal (a); pulzno zaporedje (b); sistem vzorčenja (c); diskreten signal (d).



Vir: prirejeno po Houpis, Lamont, 1985, str. 3

Vzorčenje signala poteka v pulznem modulatorju, v katerega vodimo vhodni signal $e(t)$ (Slika 8a). Tu se le-ta pomnoži s signalom iz pulznega generatorja $p(t)$, to je s signalom s katerim vzorčimo neprekinjen vhodni signal. Pulzni generator oddaja enakomerno razmaknjene pulze enake jakosti (Slika 8b). Časovni razmik med dvema zaporednima pulzoma oziroma čas vzorčenja označimo s T , dolžino posameznega pulza pa z γ . Ko se signala zmnožita, dobimo na izhodu pulznega modulatorja enakomerno razmaknjene pulze

(Slika 8d). Njihova jakost oziroma višina pulza je enaka pripadajočem odseku kontinuiranega vhodnega signala. Nov diskreten vhodni signal $e^*(t)$ lahko zapišemo kot:

$$e^*(t) = p(t)e(t) \quad (2.8)$$

Idealno vzorčenje

Na tem mestu je primerno vpeljati koncept idealnega vzorčenja (Houpis, Lamont, 1985, str. 81). Rezultat idealnega vzorčenja bo diskreten signal, ki ga sestavljajo zelo kratki pulzi, katerih višina bo natančno ustrezala osnovni funkciji, ki jo vzorčimo. Predpostavka je, da je širina pulza γ mnogo manjša od časa T . Če ta predpostavka drži, lahko govorimo, da je izhod pulznega modulatorja idealno pulzno zaporedje. Ob $\gamma = T$ je nivo posameznega pulza funkcije $e^*(t)$ konstanten. Vsak pulz lahko tako predstavimo kot razliko med dvema stopnicama (Heavisideovima funkcijama u), zamaknjenima za čas γ . Prva funkcija $u(t - kT)$ poskrbi za začetek pulza. Od prve odštejemo drugo funkcijo $u(t - kT - \gamma)$, ki je glede na prvo zamaknjena za čas γ in tako poskrbi za zaključek pulza. Da dobimo primerno jakost pulza, razliko pomnožimo še z vrednostjo kontinuirane funkcije $e(kT)$ v ustrezni točki. Diskreten signal zapišemo kot neskončno časovno vrsto pulzov:

$$e^*(t) \approx \frac{1}{\gamma} \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) [u(t - kT) - u(t - kT - \gamma)] \quad (2.9)$$

Ker je dobljen signal diskreten, je večji od nič le v določenih časovnih območjih:

$$e^*(t) = \begin{cases} \frac{e(kT)}{\gamma}; & kT \leq t < kT + \gamma \\ 0 & ; \quad kT + \gamma \leq t < (k+1)T \end{cases} \quad (2.10)$$

Preostane nam samo še, da pogledamo kaj se zgodi, če širino pulza γ zmanjšujemo proti nič, s čimer bomo izpolnili pogoj za idealno vzorčenje. Pomagali si bomo z Laplacovo transformacijo enačbe (2.9):

$$E^*(s) = \mathcal{L} [e^*(t)] \approx \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) \frac{1 - e^{-\gamma s}}{\gamma s} e^{-kTs} \quad (2.11)$$

Števec ulomka v enačbi se ob upoštevanju predpostavke $\gamma \rightarrow 0$ bliža vrednosti γs , kar pomeni, da ga lahko okrajšamo z imenovalcem in dobimo:

$$E^*(s) \approx \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) e^{-kTs} \quad (2.12)$$

Enačba predstavlja transformacijo idealno vzorčenega signala v s prostoru (Houpis, Lamont, 1985, str. 82).

Na transformirani funkciji izvedimo še inverzno Laplacovo transformacijo. Funkcijo slikamo nazaj v t prostor in dobimo diskreten vhodni signal, zapisan malo drugače:

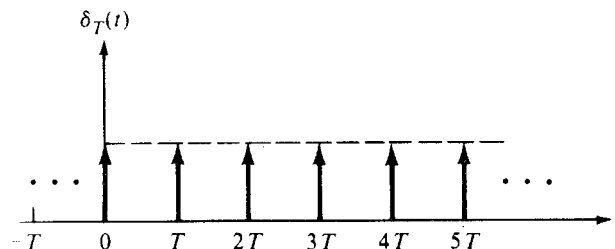
$$e^*(t) \approx \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) \delta(t - kT) \equiv e(t) \delta_T(t) \quad (2.13)$$

kjer $\delta_T(t)$ definiramo kot

$$\delta_T(t) \equiv \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) \quad (2.14)$$

Diskreten vhodni signal je predstavljen kot zmnožek osnovnega kontinuiranega signala $e(t)$ in pulzirajočega signala, kjer so posamezni pulzi med seboj razmaknjeni za T in so enake višine. Tak signal je predstavljen kot vsota Diracovih delta funkcij. Če primerjamo enačbi (2.13) in (2.8), vidimo, da sta v osnovi enaki. V primeru idealnega vzorčenja je vlogo funkcije vzorčenja $p(t)$ prevzela nova funkcija $\delta_T(t)$.

Slika 9: Zaporedje pulzov pulznega generatorja v primeru idealnega vzorčenja predstavimo kot zaporedje delta funkcij v časovnem razmiku T .



Vir: prirejeno po Houpis, Lamont, 1985, str. 83

3.2.2. Z transformacija

Za nadaljnjo analizo kontrolnih sistemov z diskretnim vhodnim signalom se moramo seznaniti še z enim matematičnim orodjem - Z transformacijo (beri: z-transformacijo). Metoda je primerljiva z Laplacovo transformacijo, ki smo jo uporabljali pri sistemih z kontinuiranimi vhodnimi signali. Z transformacija nas bo popeljala v že omenjeni z prostor. Analiza nas bo pripeljala do pomembnega zaključka – translacijskega teorema, ki ga bomo uporabili pozneje.

Za izhodišče nam bo služila Laplacova transformacija vzorčenega signala iz enačbe (2.12), pri čemer bomo faktor ϵ^{-Ts} nadomestili z novo spremenljivko z :

$$z \equiv \epsilon^{Ts} \quad (2.15)$$

Tako lahko zapišemo novo funkcijo $E(z)$ v odvisnosti od pravkar vpeljane spremenljivke z :

$$E(z) = E^*(s) \Big|_{z=\epsilon^{-Ts}} \equiv \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) z^{-k} \quad (2.16)$$

Funkcija $E(z)$ je enostranska z transformacija osnovne diskretne funkcije $e^*(t)$, to je potenčne vrste v z^{-1} , kjer je z v splošnem kompleksno število. z transformacija torej preslika funkcijo iz s prostora v z prostor (Houpis, Lamont, 1985, str. 109).

$$E(z) \equiv Z[e^*(t)] = E^*(s) \Big|_{z=\epsilon^{-Ts}} \quad (2.17)$$

3.2.3. Translacijski teorem

Vzemimo diskreten vhodni signal, ki smo ga opisali z enačbo (2.13). Napišimo nekaj členov vsote, kjer posamezen člen predstavlja ustrezen pulz v signalu:

$$\begin{aligned} e^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) \delta(t - kT) &= e(0) \delta(t) + e(T) \delta(t - T) \\ &+ e(2T) \delta(t - 2T) + K + e(iT) \delta(t - iT) + K \end{aligned} \quad (2.18)$$

Izvedemo Laplacovo transformacijo na vsakem od členov zgornje enačbe (upoštevamo dejstvo, da za Laplacovo transformacijo velja načelo superpozicije) in zapišemo:

$$E^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) \epsilon^{-kTs} = e(0) + e(T) \epsilon^{-Ts} + e(2T) \epsilon^{-2Ts} + K + e(iT) \epsilon^{-iT_s} + K \quad (2.19)$$

Sedaj izvedemo še z transformacijo in se tako dokončno preselimo v z prostor:

$$E(z) = \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) z^{-k} = e(0) + e(T) z^{-1} + e(2T) z^{-2} + K + e(iT) z^{-i} + K \quad (2.20)$$

Če analiziramo zgornje tri enačbe, ugotovimo, da faktor $z^{-1} = \epsilon^{-Ts}$ predstavlja časovni zamik ene časovne periode vzorčenja, to je časovni interval T . Podobno $z^{-i} = \epsilon^{-iT_s}$ predstavlja časovni zamik i časovnih period. Z drugimi besedami količini z^{-1} in ϵ^{-Ts} predstavljata operatorja časovnega zamika v ustreznem prostoru z in s , kar ustreza zamiku diskretnega signala $e(t)$ za čas T v prostoru časa.

Če pomnožimo enačbo (2.20) z operatorjem časovnega zamika z^{-1} , dobimo:

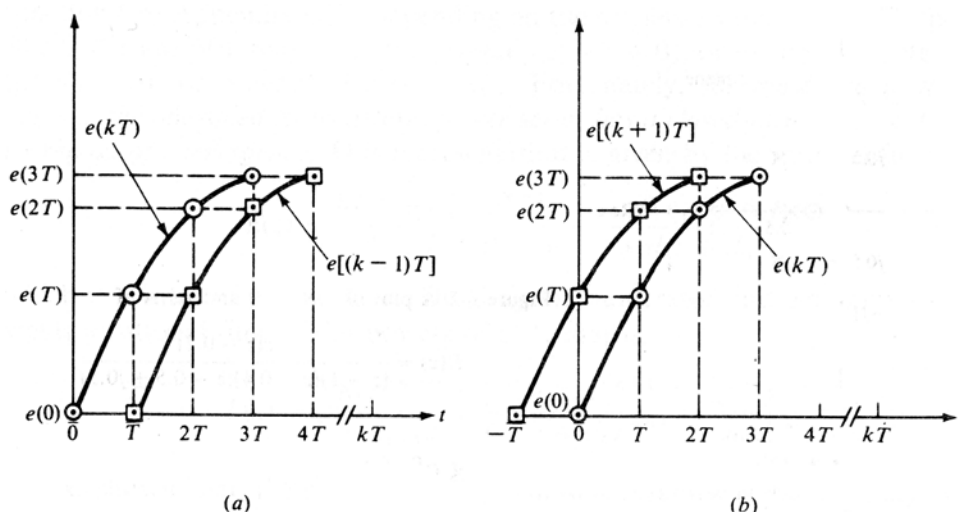
$$E_a(z) = z^{-1}E(z) = e(0)z^{-1} + e(T)z^{-2} + K \quad (2.21)$$

S tem premaknemo signal v desno, kar pomeni, da bo signal zamujal za eno periodo vzorčenja. Do prehitevanja signala za eno periodo bo prišlo, če enačbo (2.20) pomnožimo z z (Slika 10). V splošni obliki lahko translacijski teorem zapišemo kot:

$$Z[e^*(t - pT)] = z^{-p}E(z) \quad (2.22)$$

Izhodiščni signal $e^*(t)$ premaknemo v desno za p period, s tem da Z transformacijo prvotnega signala pomnožimo z z^{-p} (Houpis, Lamont, 1985, str. 112).

Slika 10: Grafična predstavitev zamika diskretnega signala za eno časovno periodo T v desno (a) in v levo (b). Signal v prvem primeru zamuja, v drugem primeru pa prehiteva za eno časovno periodo



Vir: prirejeno po Houpis, Lamont, 1985, str. 112

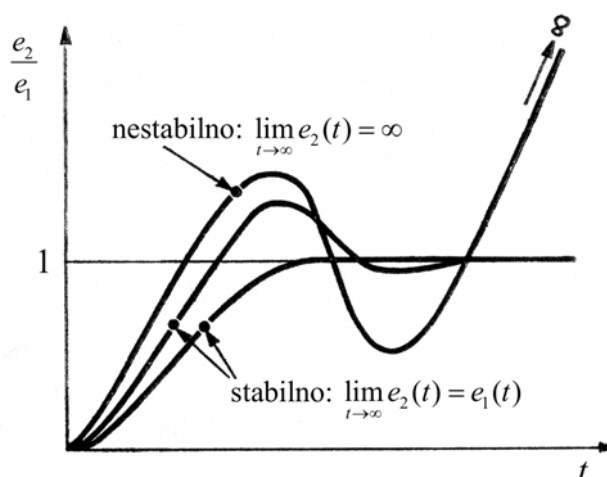
3.3. Glavne lastnosti kontrolnega sistema

3.3.1. Stabilnost in odzivnost kontrolnega sistema

Pomembna lastnost vsakega kontrolnega sistema je njegova stabilnost. Kontrolni sistem, katerega odziv na vhodni signal bo naraščal prek vseh mej ali pa bo močno nihalo, je v praksi neuporaben, saj ne bo sposoben voditi ustreznega procesa. Če bo izhod po daljšem času rasel proti neskončnosti, imamo opravka z nestabilnim sistemom. Kriterij za nestabilnost zapišemo z naslednjo zvezo:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = \infty \quad (2.23)$$

Slika 11: Primer stabilnega in nestabilnega odziva linearnega kontrolnega sistema.



Vir: prirejeno po Towill, 1970, str. 20

Ali je določen kontrolni sistem stabilen ali ne, nam lahko pove analiza njegove prenosne funkcije (2.7). Stabilnost sistema določimo z lociranjem polov prenosne funkcije v s prostoru. Poli prenosne funkcije so v točkah, kjer prenosna funkcija naraste v neskončnost. To pa se zgodi takrat, ko ima imenovalac prenosne funkcije vrednost nič. Stabilnost sistema je odvisna predvsem od funkcije v imenovalcu prenosne funkcije. Pole prenosne funkcije bomo torej locirali, tako da bomo poiskali ničle imenovalca prenosne funkcije. Rešiti moramo tako imenovano karakteristično enačbo.

$$(a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + K a_n s^n) E_2(s) = 0 \quad (2.24)$$

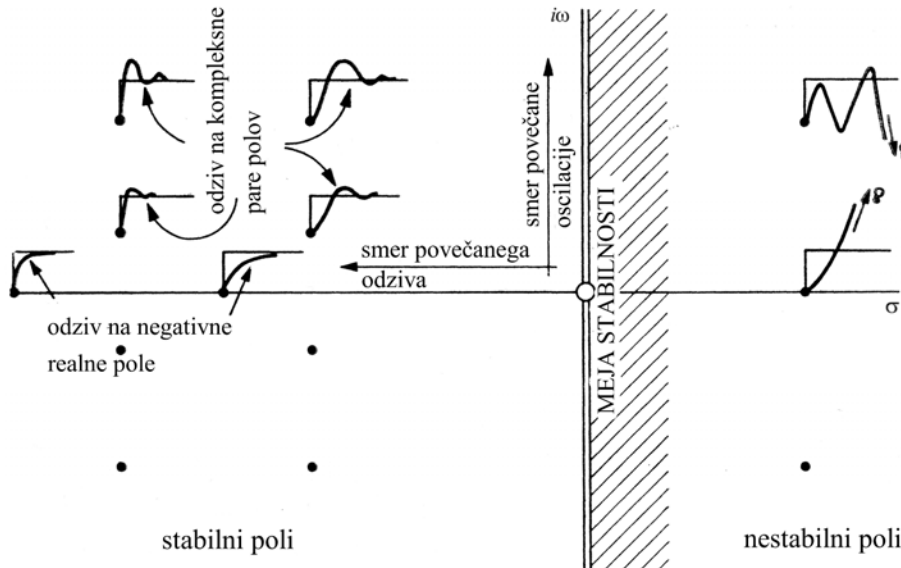
Enačba je linearna homogena diferencialna enačba in ima n linearno neodvisnih rešitev. Reševanju diferencialne enačbe se lahko izognemo, če imamo karakteristično enačbo že faktorizirano, to je zapisano v obliki v kateri lahko hitro preberemo pole p_i prenosne funkcije:

$$a_n (s - p_1)(s - p_2)(s - p_3) \dots (s - p_n) E_2(s) = 0 \quad (2.25)$$

Poli prenosne funkcije so lahko bodisi realni ali pa nastopajo v kompleksnih parih. Temu ustrezno jih predstavimo v kompleksni ravnini – s prostoru (Slika 12). Poli, ki se nahajajo desno od izhodišča oziroma imaginarne osi, pomenijo, da bo sistem oddajal signal tudi v primeru, ko nanj priključimo ničelni signal. Signal pa bo sčasoma naraščal prek vseh meja. To pomeni, da imamo opravka z nestabilnim sistemom. Območju desno od imaginarne osi pravimo zato območje nestabilnosti. Kljub temu da ima prenosna funkcija lahko več polov, je dovolj, da se le eden od teh nahaja v območju nestabilnosti in sistem bo nestabilen. Če se pol nahaja točno na imaginarni osi, njegov odziv ne bo naraščal, temveč bo stalno nihal. Izhod takšnega sistema kaže, kot da bo vsak čas pobegnil iz kontrole in postal nestabilen, vendar do

tega ne pride. Pravimo, da je sistem na meji stabilnosti. Sedaj je že jasno, da je pogoj, da je kontrolni sistem stabilen, če vsi njegovi poli ležijo levo od imaginarne osi, to je v območju stabilnosti.

Slika 12: Odziv kontrolnega sistema na Heavisideovo funkcijo v odvisnosti od pozicije polov prenosne funkcije v s prostoru.



Vir: prirejeno po Towill, 1970, str. 26

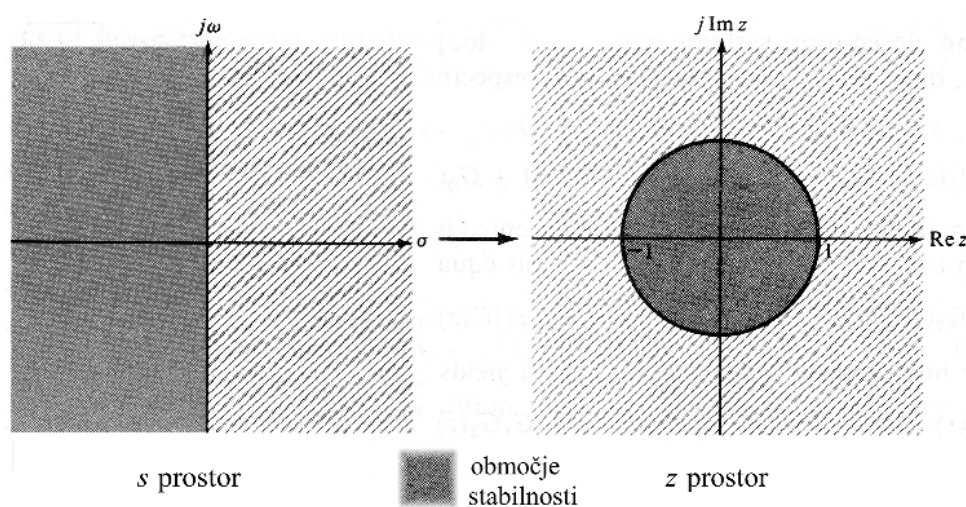
S stabilnostjo kontrolnega sistema je močno povezana tudi druga pomembna lastnost – odzivnost kontrolnega sistema. Odzivnost sistema nam pove, kako hitro se je sistem sposoben prilagoditi spremembam v vhodnem signalu. Povedano drugače, čim hitreje sistem sledi spremembam vhodnega signala, tem bolj je odziven. Za hitro odzivne sisteme je značilna zmanjšana stabilnost sistema. Če je kontrolni sistem sposoben hitro prilagoditi svoje delovanje, je tudi bolj dovzeten za nezaželeno nestabilnost. Pri konstrukciji kontrolnega sistema moramo torej iskati kompromis med zahtevano stabilnostjo sistema in dovolj hitrim odzivnim časom.

Poli prenosne funkcije nam povedo veliko tudi o odzivnosti sistema. Sistem, katerega poli bodo daleč od imaginarne osi, bo bolj odziven. Za stabilen sistem velja, da tem bolj levo bo pol v kompleksni ravnini, hitreje se bo sistem odzival. Če primerjamo odziv dveh sistemov, katerih pola sta na realni osi, vidimo, da na levem grafu izhodni signal hitreje lovi vhodni stopničast signal (Slika 12, kjer so pozicije polov prikazane s točkami, tanjša črta predstavlja vhodni signal v obliki stopnice in debelejša ustrezen izhodni signal).

Do tu smo se ukvarjali s stabilnostjo v okviru s prostora, kjer območje stabilnosti obsega polravnino desno od imaginarna osi. Razlog za to je predvsem v tem, da je razumevanje pojma stabilnosti v s prostoru dokaj intuitivno. Naša analiza kontrolnih sistemov bo v večji meri potekala v z prostoru, zato je pripravno vedeti, kako preslikamo z prostor v s prostor, v

katerem sistem lažje analiziramo. Relacijo med obema prostoroma opisuje enačba (2.15), s katero tudi slikamo med prostoroma. Leva polravnina v s prostoru se preslika v enotski krog, to je krog z polmerom 1, v z prostoru. Stabilnost sistema bomo določili z analizo polov prenosne funkcije v z prostoru, kjer pa veljajo enake ugotovitve, kot smo jih zgoraj zapisali za s prostor. V prvem primeru je meja stabilnosti imaginarna os, v drugem pa krožnica s polmerom 1. V kolikor vsi poli prenosne funkcije v z prostoru ležijo v enotskem krogu, je sistem stabilen. Grafično bomo pole prenosne funkcije predstavili najprej v z prostoru, ki ga bomo pozneje preslikali v s prostor. S pomočjo zgoraj opisane analize odzivov kontrolnega sistema v odvisnosti od lege polov (Slika 12) bomo lahko hitro ocenili, kako je z stabilnostjo in odzivnostjo naših kontrolnih sistemov.

Slika 13: Preslikava območja stabilnosti iz s prostora v z prostor.



Vir: prirejeno po Houpis, Lamont, 1985, str.195

3.3.2. Časovni odziv kontrolnega sistema na preproste signale

Vhodni signali, ki vzbuja delovanje kontrolnega sistema, so lahko zelo različni. Nekateri sistemi na vhod dobivajo gladke, počasi spreminjajoče se signale, ki jih v nekaterih primerih lahko opišemo z analitično zvezo ali pa jih prikažemo kot krivuljo v odvisnosti od časa. Takim signalom pravimo deterministični signali, saj lahko za vsak časovni trenutek določimo velikost signala. V kontrolnem sistemu imamo lahko opravka tudi s povsem naključnimi signali, ki jih ne moremo natančno opisati. Lastnosti vhodnih signalov v veliki meri pogojujejo zgradbo kontrolnega sistema. Če je kontrolni sistem napačno zasnovan se lahko zgodi, da referenčnemu signalu ne bo ustrezno sledil. Na izhodu bomo dobili neustrezen kontrolni signal in proces ne bo potekal v skladu s pričakovanji.

Če je vhodni signal $r(t)$ kolikor toliko gladek, ga lahko ponazorimo na dva načina (Towill, 1970, str. 56). Prvi je, da ga zapišemo v obliki polinoma v spremenljivki časa t :

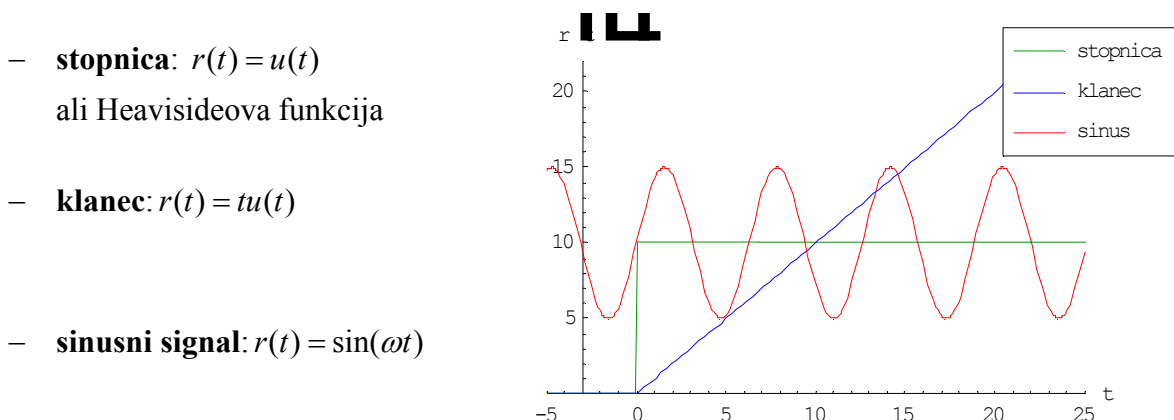
$$r(t) = r_0 + r_1 t + r_2 t^2 + K \quad (2.26)$$

Na drugi način ga opišemo s pomočjo Fourierove vrste v spremenljivki ω , ki predstavlja frekvenco sinusnega signala. Vhodni signal tako opišemo kot vsoto sinusnih signalov različnih frekvenc in amplitud:

$$r(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (F_n \sin n\omega t + Q_n \cos n\omega t) \quad (2.27)$$

Delovanje različnih kontrolnih sistemov, ki imajo v splošnem tudi različne vhodne signale, primerjamo s pomočjo preprostih vhodnih signalov. Najbolj pogosto uporabljeni signali so stopnica, klanec in sinusni signal. Prva dva dobimo, če vzamemo prvi in drugi člen polinoma v enačbi (2.26), sinusni signal pa je člen Fourierove vrste:

Slika 14: Preprosti vhodni signali.



Vir: lastno delo

kjer je $u(t)$ že prej omenjena Heavisideova funkcija, ki za negativne vrednosti spremenljivke t zavzame vrednost 0, za pozitivne pa vrednost 1.

Iz odziva kontrolnega sistema na standardiziran signal razberemo, kakšna je odzivnost sistema. Le-to bomo ocenili, tako da bomo sistem vzbudili s spremembo vhodnega signala in pogledali, kako hitro se bo izhodni signal po začetnem dražljaju zopet ujel z vhodnim signalom. Glede na to, ali se bo izhodni signal vhodnemu signalu približeval v obliki gladke krivulje ali pa bo nihal, bomo ocenili, ali se v signalu pojavljajo oscilacije ali je signal ravnovesen. Ob tem opazujemo tudi, ali se vhodni signal pri prehodu skozi sistem ojači ali oslabi.

Postopek izračuna časovnih odzivov je opisan v prilogi B.

3.3.3. Frekvenčni odziv kontrolnega sistema

Frekvenčni odziv sistema je stacionaren odziv sistema na vzbujanje s harmoničnim signalom vseh možnih frekvenc (to je s signali sinusne oblike). Sistem vzbujaemo z vhodnim signalom $e_1(t)$, z amplitudo E_1 in frekvenco ω ter ga zapišemo v naslednji obliki:

$$e_1(t) = E_1 \sin \omega t \quad (2.28)$$

Ker imamo opravka z linearnim sistemom bo stacionaren odziv na sinusni signal prav tako sinusni signal $e_2(t) = E_2 \sin(\omega t - \varphi)$ z enako frekvenco ω , vendar s spremenjeno amplitudo E_2 in fazo φ .

Poglejmo, kako se pri prehodu skozi sistem spremenita amplituda in faza harmoničnega signala. Če z $E_1(s)$ označimo signal $e_1(t)$ v s prostoru, lahko odziv sistema $E_2(s)$ z uporabo že znane enačbe (2.7) zapišemo kot:

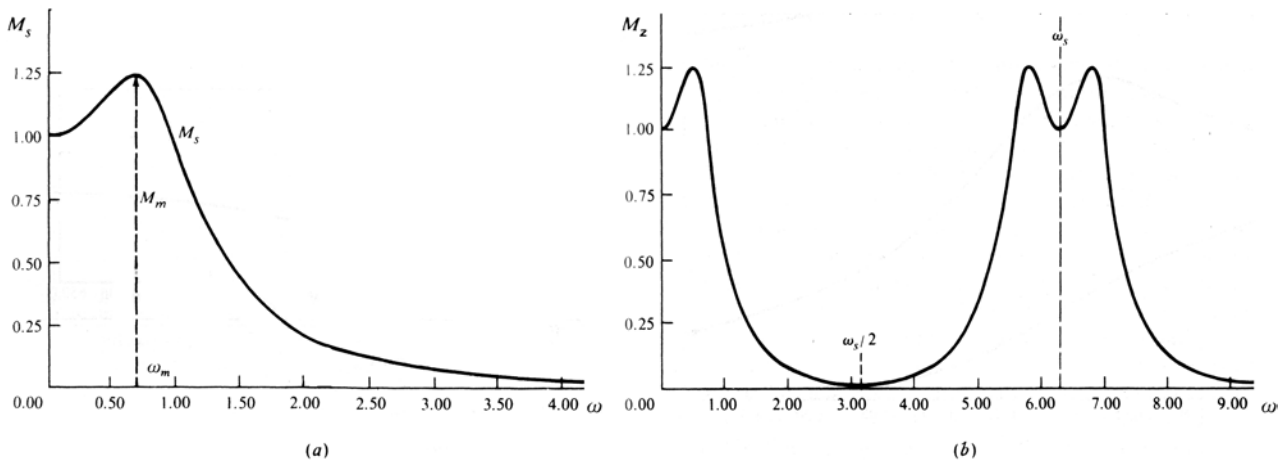
$$E_2(s) = G(s)E_1(s) \quad (2.29)$$

Ker nas zanima sprememba amplitude oziroma sprememba v razmerju med amplitudo vhodnega in izhodnega signala, bomo zopet zapisali razmerje med izhodnim in vhodnim signalom, to je prenosno funkcijo sistema $G(s)$. Vendar amplitudno spremembo M_s v odvisnosti od ω zapišemo kot absolutno vrednost razmerja vhodnega in izhodnega signala. Ker iščemo odvisnost spremembe amplitude od frekvence, moramo oba signala oziroma prenosno funkcijo zapisati v ustrezni obliki, torej v odvisnosti od ω . To naredimo, tako da upoštevamo zvezo med s in ω ($s = \sigma + i\omega$). V kolikor je signal, s katerim vzbujaemo kontrolni sistem sinusne oblike, v prenosni funkciji operator s preprosto zamenjamo z $i\omega$. Spremembo amplitude sinusnega signala s frekvenco ω (Houpis, Lamont, 1985, str. 227) pri prehodu skozi kontrolni sistem zapišemo kot:

$$M_s(\omega) = \left| \frac{E_2(i\omega)}{E_1(i\omega)} \right| = |G(i\omega)| \quad (2.30)$$

Frekvenčni odziv sistema običajno predstavimo grafično (Slika 15). Na navpično os nanesemo amplitudni frekvenčni odziv M_s in na vodoravno frekvenco ω sinusnega signala, s katerim vzbujaemo sistem. Če je vrednost $M_s > 1$ pri določeni frekvenci ω , pomeni, da bo amplituda sinusnega signala na izhodu višja kot na vhodu. Za $M_s < 1$ velja obratno.

Slika 15: Amplitudni frekvenčni odziv kontrolnega sistema s prenosno funkcijo $G(s) = 4.2/s(s+1)(s+5)$ v s prostoru (a) in z prostoru (b).



Vir: prirejeno po Houpis, Lamont, 1985, str.227

V kolikor nas zanima amplitudni frekvenčni odziv kontrolnega sistema, katerega prenosno funkcijo imamo izraženo z operatorjem z , bomo v prenosni funkciji izvedli zamenjavo operatorja z v s v skladu z (2.15) in s v $i\omega$:

$$z = e^{Ts} = e^{i\omega T} \quad (2.31)$$

Amplitudni frekvenčni odziv v z prostoru sedaj lahko zapišemo kot:

$$M_z(\omega T) = \left| \frac{E_2(i\omega T)}{E_1(i\omega T)} \right| = |G(i\omega T)| \quad (2.32)$$

V z prostoru ima amplitudni frekvenčni odziv M_z posebno lastnost. Če frekvenco ω povečujemo, M_z sledi amplitudnemu frekvenčnemu odzivu M_s v s prostoru. Ko se približujemo vrednosti π/T , se M_z začne obnašati po svoje. Na grafu amplitudnega frekvenčnega odziva dobimo ponavljajočo se funkcijo s periodo π/T . To je posledica diskretne narave z prostora, zato narišemo graf frekvenčnega odziva le za frekvence med 0 in π/T , za višje frekvence pa predpostavljamo, da se frekvenčni odziv giba z enakim trendom, s katerim se približuje π/T («warping effect», Houpis, Lamont, 1985, str. 229).

3.3.4. Sprememba variabilnosti vhodnega signala pri prehodu skozi kontrolni sistem

Vhodni signal se pri prehodu kontrolnega sistema spremeni v skladu s prenosno funkcijo, ki določa delovanje sistema. Signal se lahko ojači ali oslabi, hkrati se spremeni njegova variabilnost, se poveča ali zmanjša. S pomočjo metodologije prenosne funkcije oziroma natančneje frekvenčnega odziva kontrolnega sistema lahko izračunamo spremembo

variabilnosti za poljuben vhodni signal. Izračun bo osnova za merjenje velikosti učinka biča pri sistemih uravnavanja zalog.

Velikost učinka biča pri uporabi izbranega sistema uravnavanja zalog na vzorcu povpraševanja (realen signal) bomo izračunali s pomočjo amplitudnega frekvenčnega odziva kontrolnega sistema. Pokazali bomo, da je amplitudni frekvenčni odziv merilo za velikost učinka biča pri predpostavki sinusne oblike vhodnega signala (Dejonckheere et al., 2002). Tehnika spektralne analize signalov nam bo omogočila, da bomo poljuben realen signal zapisali kot vsoto več sinusnih signalov (Cochrane, 1967), kar nam bo končno omogočilo izračun velikosti učinka biča za poljuben realen signal.

Izpeljava enačbe za izračun velikosti učinka biča za poljuben vzorec povpraševanja je prikazana v prilogi C.

4. SISTEMI URAVNAVANJA ZALOG IN NJIHOVE PRENOSNE FUNKCIJE

4.1. Kriteriji za izbiro sistemov uravnavanja zalog

V prejšnjem poglavju smo se seznanili s kontrolnimi sistemi ter analizirali njihovo strukturo in delovanje. Povedali smo, da s pomočjo kontrolnega sistema vodimo določen proces v skladu z vnaprej postavljenimi zahtevami. Za primer smo navedli kontrolni sistem, ki regulira delovanje električnega grelnika in s tem uravnava proces ogrevanja zraka v prostoru. Zahteva v delovanju procesa je, da se prostor ogreje na želeno temperaturo. Na vhod v kontrolni sistem pripeljemo vhodni signal, ki opisuje določeno spremenljivko procesa. V primeru električnega grelnika je ta referenčna spremenljivka temperatura. Kontrolni sistem je na podlagi informacije o temperaturi določil moč gretja grelnika in na izhodu oddal izhodni kontrolni signal, ki je ustrezno nastavil jakost električnega toka skozi grelec.

Proces uravnavanja zalog nadziramo s kontrolnim sistemom, to je sistemom uravnavanja zalog, ki skrbi za to, da ohranjamo zaloge na želenem nivoju. S tem se poskušamo izogniti izčrpanju ali prekomernemu skladiščenju zalog. Zaloge obnavljamo s podajanjem naročil, kjer se soočimo s problemom določanja količine, ki jo bomo naročili. Izhodni signal kontrolnega sistema uravnavanja zalog bo na podlagi vhodnega signala (informacije o povpraševanju) podajal informacijo o višini naročila. Preostane le še, da določimo katere spremenljivke določajo trenutno stanje zalog. Informacijo o vrednostih le-teh pošljemo v kontrolni sistem. V uvodnem delu smo stanje zalog IP določili kot vsoto neto zalog in zalog v dobavi, torej potrebujemo informacijo o višini le-teh. Zaloge v dobavi so zopet odvisne od tega, koliko naročil še ni bilo dobavljenih in od velikosti teh naročil. Ugotovimo, da se količina vhodnih spremenljivk hitro povečuje. Kljub temu je dovolj, da za vhodno spremenljivko vzamemo le dejansko povpraševanje, saj, kot bomo pokazali kasneje, to določa vrednost vseh ostalih spremenljivk sistema. V sistemu uravnavanja zalog je dejansko povpraševanje edina neodvisna spremenljivka, ostale pa so od nje odvisne. Kontrolni sistem, ki bo opisoval delovanje sistema uravnavanja zalog, bo na podlagi signala o dejanskem povpraševanju na izhodu oddajal kontrolni signal, ki bo določal velikost naročil (Slika 16).

Slika 16: Ponazoritev kontrolnega sistema, ki opisuje delovanje sistema uravnavanja zalog, z bločnim diagramom.



Vir: lastno delo

Metodologija prenosne funkcije je dokaj enostavna za linearne kontrolne sisteme. Linearnost kontrolnega sistema oziroma zmožnost le-tega, da zadosti načelu superpozicije (2.1), je glavna zahteva pri izbiri sistema uravnavanja zalog, ki ga bomo opisali z jezikom kontrolnih

sistemov. V kolikor je izbran sistem uravnavanja zalog linearen, lahko njegovo delovanje analiziramo z orodji, opisanimi v prejšnjem poglavju.

Izmed v uvodu omenjenih štirih osnovnih sistemov uravnavanja zalog to zahtevo izpolnjuje le (R,S) sistem uravnavanja zalog in še ta v nekoliko prilagojeni obliki. Preprosto povedano, lahko za sisteme, pri katerem se v času naročanja odločamo med tem ali bomo dejansko podali naročilo ali ne, rečemo, da ne izpolnjujejo zahtev linearnosti. Odziv sistema v takem primeru lahko označimo kot »prelomljen«, kajti v kolikor pride do naročila, se obnaša po drugačnih zakonitostih kot takrat, ko do naročila ne pride. To je lastnost, ki sistem spravi v nelinearnost. Za (R,S) sistem je značilno, da pride do naročila v vsakem obdobju. Višina naročila se določa s pravilom naročanja, kjer je višina naročila zvezna funkcija spremenljivk, ki nastopajo v pravilu. Pogoja linearnosti ne izpolnjujejo preostali trije sistemi uravnavanja zalog, kajti pri vseh pride do naročila le takrat, ko stanje zalog pade pod signalno raven. Delovanje sistema v tem primeru opišemo s pravilom, ki je sestavljen iz dveh funkcij. Ena funkcija določa odziv sistema, če je stanje zalog nad signalno ravniyo, druga pa pod signalno ravniyo.

Obstaja še en tehten argument v prid izbiri (R,S) sistema. Pripravno je, da je diskreten vhodni signal v kontrolni sistem periodičen s pulzi v enakih presledkih, kar je značilnost sistemov uravnavanja zalog, ki vključujejo periodično spremljanje zalog. Pri periodičnem spremljanju zalog je čas (časovno obdobje R), ki preteče med zaporednim preverjanjem zalog, konstanten in vnaprej določen. Vsakokrat ko preverimo stanje zalog, podamo novo naročilo. Proces spremljanja zalog in naročanja se sproži ob koncu časovne periode R , s katero smo označili čas med dvema zaporednima spremljanjema zalog. Čas R se pri sistemih s periodičnim spremljanjem zalog ne spreminja. Za vsako preteklo obdobje $t, t-R, t-2R, \dots$ imamo podatke o povpraševanju, stanju zalog in velikosti naročil. Ti podatki so v obliki nizov, sestavljenih iz vrednosti posamezne spremenljivke v določenem časovnem obdobju. Kontrolni sistem, ki bo opisoval delovanje sistema s periodičnim spremljanjem zalog, bo na vhodu dobival informacijo o povpraševanju v obliki diskretnega signala (Slika 8d). Signal bodo sestavljali za čas R razmaknjeni pulzi, višina posameznega pulza pa bo ustrezala višini povpraševanja v določenem časovnem obdobju. Signal podobne oblike bomo dobili na izhodu kontrolnega sistema, le da bodo višine pulzov tokrat ustrezale velikostim naročil.

4.2. Osnovno pravilo naročanja (R, α, β, P) sistema uravnavanja zalog

Pokazali smo, da (R,S) sistem izpolnjuje kriterije, ki smo jih postavili in je zato že prvi kandidat za analizo z uporabo metodologije prenosne funkcije. Za izhodišče bomo vzeli sistem uravnavanja zalog, katerega delovanje določa bolj splošna oblika pravila naročanja. To pravilo bomo poimenovali osnovno pravilo naročanja.

V šestdesetih letih se je v želji po izboljšanju uveljavljenih praks v podjetjih veliko raziskovalcev začelo ukvarjati z analizo matematičnih modelov. Ti naj bi odpravili

neučinkovitosti, ki so bile posledica neustreznih odločitev vodstva podjetij. Enega takšnih modelov je razvil Bowman (1963), in sicer za uporabo v planiranju proizvodnje (Nahmias, 1993, str. 137). Model je linearno pravilo, ki določa nivo proizvodnje v prihodnjem obdobju. Kljub temu da je pravilo v osnovi namenjeno za določanje višine proizvodnje, ga lahko uporabimo tudi za določanje velikosti naročil. Kot smo že nekajkrat omenili, se vsak člen dobavne verige srečuje s problemom določanja višine naročila, ki bo ustrezno pokrilo pričakovano povpraševanje. Odločitev je torej v osnovi enaka odločitvi proizvajalca, ki se odloča, koliko bo moral proizvesti, da bo izpolnil povpraševanje po izdelku.

V nekoliko spremenjeni obliki splošno pravilo naročanja, s katerim določamo višino naročila O_t , zapišemo kot:

$$O_t = \hat{D}_t + (1-\gamma)(O_{t-1} - \hat{D}_t) + \beta(IP_t^T - IP_t) \quad (3.1)$$

V pravilu nastopajo naslednje spremenljivke in parametri:

O_t = velikost naročila podanega ob času t . Temu ustrezno je O_{t-1} prvo preteklo naročilo, torej naročilo, ki je bilo podano v preteklem obdobju;

$\hat{D}_t$ = predvideno povpraševanje v prihodnjem obdobju od t do $t+1$, določeno ob času t ;

IP_t = stanje zalog, ugotovljeno ob času t ;

IP_t^T = ciljno stanje zalog ob času t . Ciljno stanje zalog je želeno stanje zalog ob podajanju naročila, ki odraža pričakovano povpraševanje v naslednjem časovnem obdobju (podrobna definicija in formulacija sta podani ob enačbi (3.19));

γ = konstanta glajenja naročil, ki lahko zavzame vrednosti: $0 \leq \gamma \leq 1$;

β = konstanta glajenja stanja zalog, ki lahko zavzame vrednosti: $0 \leq \beta \leq 1$.

Osnovno pravilo naročanja je sestavljeno iz treh členov. Prvi člen predstavlja napoved povpraševanja za prihodnje obdobje, drugi člen predstavlja delež razlike med preteklim naročilom in napovedanim povpraševanjem ter tretji delež razlike med ciljnimi in trenutnim stanjem zalog. Velikost naročila je torej seštevek predvidenega povpraševanja in deležev neujemanja preteklega naročila s predvidenim povpraševanjem ter deležem neujemanja trenutnega stanja zalog s ciljnimi stanjem zalog. Sistem, katerega delovanje opisuje osnovno pravilo naročanja, bomo poimenovali periodičen sistem uravnavanja zalog z glajenjem naročil in glajenjem stanja zalog. Zaradi večje preglednosti bomo za sistem uporabljali oznako $(R, \gamma O, \beta IP)$. Simbol R označuje, da gre za sistem s periodičnim spremljanjem zalog. Glajenje naročil smo označili z γO in glajenje stanja zalog z βIP .

Ob tem še omenimo, da osnovno pravilo naročanja ob določenih spremembah, ki jih bomo opisali kasneje, izpolnjuje pogoj linearnosti. Prav tako je izpolnjen tudi drugi pogoj, saj je $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem, sistem s periodičnim spremljanjem zalog.

O delovanju $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog bomo veliko izvedeli skozi pregled preostalih izbranih sistemov uravnavanja zalog. $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem smo poimenovali kot osnovnega, ker bodo vsi ostali izbrani sistemi uravnavanja zalog izpeljanke osnovnega. Najprej bomo podrobneje proučili metodo preprostega eksponentnega glajenja za predvidevanje povpraševanja in potem poiskali nekaj preprostejših pravil naročanja, ki bodo osnova za preprostejše sisteme uravnavanja zalog.

4.3. Preprosto eksponentno glajenje

Ko smo zastavili koncept kontrolnega sistema, to je sistema uravnavanja zalog, smo na vходу v sistem predvideli signal dejanskega povpraševanja, ki je naša edina neodvisna spremenljivka. V sistemih uravnavanja zalog se ukvarjamo s prihodnostjo. Naročiti poskušamo toliko, da bomo lahko zadostili povpraševanju v prihodnjih obdobjih, zato namesto z dejanskim povpraševanjem, ki za prihodnja obdobja ni znano, operiramo s predvidenim povpraševanjem. V osnovnem pravilu naročanja (3.1) je zaradi tega višina naročila funkcija predvidenega povpraševanja in ne dejanskega. Dejansko povpraševanje je podatek iz preteklosti, ki nam je v pomoč pri napovedih povpraševanja v prihodnjih obdobjih. Predvideno povpraševanje poskušamo napovedati z uporabo metod za predvidevanje povpraševanja.

Za predvidevanja povpraševanja bomo uporabili kvantitativno metodo preprostega eksponentnega glajenja. Ta metoda je najverjetneje najbolj pogosto uporabljena metoda za kratkoročno predvidevanje povpraševanja. Glavna argumenta za njeno popularnost sta razumljivost – intuitivnost metode in temu ustrezna dokaj preprosta uporaba. Enačbo za preprosto eksponentno glajenje zapišemo kot:

$$\hat{D}_t = \hat{D}_{t-1} + \alpha(D_t - \hat{D}_{t-1}) \quad (3.2)$$

kjer je α konstanta glajenja in velja $0 \leq \alpha \leq 1$ (Silver, Peterson, 1985, str. 105).

Napoved povpraševanja za časovno obdobje t , $\hat{D}_t$ dobimo, tako da napoved za predhodno obdobje $\hat{D}_{t-1}$ popravimo za delež napake v napovedi za to obdobje. Tu je potrebno poudariti, da z D_t označujemo dejansko povpraševanje, ki smo ga napovedali z $\hat{D}_{t-1}$. Čas t v prvem primeru pomeni, kdaj je bilo povpraševanje zabeleženo in v drugem, kdaj je bila podana ocena. Torej v obdobju $t-1$ podamo oceno za dejansko povpraševanje v obdobju t . V praksi ne moremo vedeti, ali je napaka v predvidevanju posledica naključne spremembe v povpraševanju ali je prišlo do dejanske spremembe v povpraševanju, ki se bo ohranjala tudi v naslednjih obdobjih. Ker upoštevamo le delež napake v predvidevanju, se v bistvu odločamo, v kakšni meri bomo upoštevali napako. Če napake ne upoštevamo, verjamemo, da je bila sprememba v povpraševanju le posledica naključnega skoka v povpraševanju. Če napako v

veliki meri upoštevamo, verjamemo, da napaka odraža dejansko spremembo v povpraševanju za več časovnih obdobj. Delež napake določamo s konstanto glajenja povpraševanja α , ki je v prvem primeru majhna, v drugem primeru pa visoka. Z manjšo konstanto glajenja predpostavimo, da bo povpraševanje v naslednjem obdobju podobno napovedi za prejšnje obdobje $\alpha \rightarrow 0: \hat{D}_t \approx \hat{D}_{t-1}$. To je v skladu z našimi predvidevanji, da je šlo le za trenutno spremembo v povpraševanju. Visoka konstanta glajenja na drugi strani pomeni, da bo povpraševanje sledilo spremembi in je za napoved primerno vzeti dejansko povpraševanje minulega obdobja $\alpha \rightarrow 1: \hat{D}_t \approx D_t$.

Praviloma so konstante glajenja nizke, med 0,2 in 0,6. To pomeni, da napoved povpraševanja sledi napovedi iz prejšnjega obdobja in je manj odvisna od dejanskega povpraševanja v preteklem obdobju. Z izbiro nizke konstante glajenja poslabšamo odzivnost na spremembo v povpraševanju. Po drugi strani pa s tem, ko damo večjo težo napovedim povpraševanja v preteklih obdobjih, zgladimo povpraševanje. Izbira parametra α je torej izbira med odzivnostjo in glajenjem povpraševanja.

Preprosto eksponentno glajenje je primerno za uporabo, v kolikor imamo opravka z enakomernim stohastičnim povpraševanjem (Silver, Peterson, 1985, str. 105). Za takšno povpraševanje je značilen konstanten nivo a , okoli katerega povpraševanje naključno niha. Naključno komponento bomo označili z ε_t . V enačbi (1.1) tako upoštevamo le ustrezni komponenti in zapišemo povpraševanje v časovnem obdobju t kot:

$$D_t = a + \varepsilon_t \quad (3.3)$$

Povpraševanju, ki vključuje tudi trend, sezonskost ali cikličnost, s preprostim eksponentnim glajenjem ne moremo slediti, kar bomo za primer trenda v povpraševanju pokazali kasneje. Za predvidevanje takšne oblike povpraševanja potrebujemo zahtevnejše eksponentno glajenje višjih redov.

4.4. $(R, \hat{D})$ sistem uravnavanja zalog

Če v osnovnem pravilu naročanja (3.1) postavimo vrednost parametrov γ in β na $\gamma=1$ in $\beta=0$, dobimo zelo enostavno pravilo naročanja, ki ga bomo označevali z oznako $(R, \hat{D})$:

$$O_t = \hat{D}_t \quad \text{pri } \gamma = 1, \beta = 0 \quad (3.4)$$

Pravilo pravi, da naročimo v višini predvidenega povpraševanja v prihodnjem obdobju. Povpraševanje predvidevamo s preprostim eksponentnim glajenjem in ob upoštevanju enačbe (3.2) ugotovimo, da je pravilo naročanja v $(R, \hat{D})$ sistemu uravnavanja zalog enako enačbi preprostega eksponentnega glajenja.

4.5. $(R, \gamma O)$ sistem uravnavanja zalog

V osnovnem pravilu naročanja (3.1) postavimo vrednost parametra β na $\beta=0$ in dobimo pravilo naročanja, ki povezuje novo naročilo z naročilom, podanim v preteklem obdobju:

$$O_t = \hat{D}_t + (1-\gamma)(O_{t-1} - \hat{D}_t) \quad \text{pri } \beta = 0 \quad (3.5)$$

Če zgornjo enačbo nekoliko preuredimo, jo lahko zapišemo v spremenjeni obliki:

$$O_t = O_{t-1} + \gamma(\hat{D}_t - O_{t-1}) \quad (3.6)$$

Enačbo take oblike pa smo že spoznali pri preprostem eksponentnem glajenju (3.2), le da tokrat namesto napovedi povpraševanja predvidevamo naročilo v naslednjem časovnem obdobju. Novo naročilo bo za delež neujemanja med predvidenim povpraševanjem in preteklim naročilom povečano preteklo naročilo. Če postavimo konstanto glajenja naročil $\gamma=1$, je novo naročilo enako predvidenemu povpraševanju, preidemo torej v $(R, \hat{D})$ sistem uravnavanja zalog. Če velja $\gamma=0$, bo novo naročilo enako prejšnjemu. Vloga konstante glajenja naročil γ je identična vlogi konstante glajenja povpraševanja α pri eksponentnem glajenju.

4.6. (R, S) sistem uravnavanja zalog

Prva dva člena osnovnega pravila naročanja (3.1) smo si že ogledali, sedaj se osredotočimo na tretjega. Vrednosti obeh konstant glajenja postavimo na $\gamma, \beta=1$ in dobimo novo pravilo naročanja:

$$O_t = \hat{D}_t + (IP_t^T - IP_t) \quad \text{pri } \gamma, \beta = 1 \quad (3.7)$$

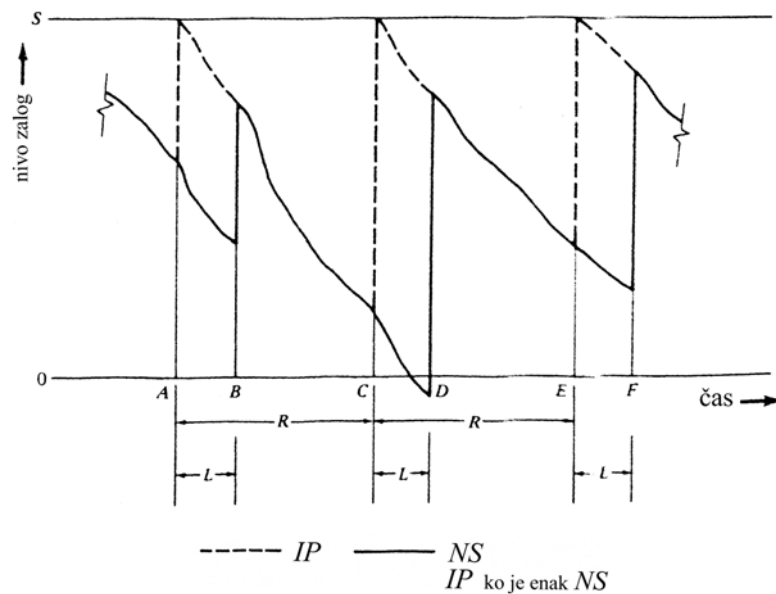
V kolikor se trenutno stanje zalog ob podajanju naročila ne ujema s ciljnim stanjem zalog, bomo višino novega naročila dobili, tako da napovedi povpraševanja prištejemo razliko trenutnega in ciljnega stanja zalog.

Zapišimo pravilo naročanja malo drugače, tako da vsoto $\hat{D}_t + IP_t^T$ označimo z novo spremenljivko S_t , ki jo bomo poimenovali ciljna zaloga:

$$O_t = S_t - IP_t \quad (3.8)$$

V zgornji enačbi prepoznamo pravilo naročanja sistema uravnavanja zalog z naročanjem do ciljne zaloge ali krajše (R, S) sistema (Silver, Peterson, 1985, str. 295). Obseg naročila O_t ob času t ustreza razliki med ciljno zalogo S_t in stanjem zalog IP_t .

Slika 17: Prikaz gibanja stanja zalog IP in neto zalog NS pri uporabi (R,S) sistema uravnavanja zalog.



Vir: prirejeno po Silver, Peterson, 1985, str.258

Do sedaj smo imeli opravka s preprostimi sistemi uravnavanja zalog. Delovanje (R,S) sistema uravnavanja zalog je zapletenejše, ker v njem nastopajo novi koncepti, kot so stanje zalog, čas naročanja, dobavni čas in varnostne zaloge. Natančneje bomo delovanje sistema opisali s pomočjo grafične predstavitve gibanja zalog v času (

Slika 17). Predvsem nas zanima gibanje stanja zalog IP , ki v pravilu naročanja določa višino novega naročila. Stanje zalog smo definirali kot vsoto neto zalog in zalog v naročilu. V točki A ugotovimo trenutno stanje zalog. Ob istem času podamo novo naročilo. Obseg naročila bo tolikšen, da bo dvignil stanje zalog do ravni ciljne zaloge S . Na sliki je dvig stanja zalog do ravni S (v točki A) ponazorjen s prekinjeno črto. Stanje zalog se je dvignilo na želeno raven na račun povečanja zalog v dobavi. Neto zaloge ostanejo na istem nivoju in ob novem povpraševanju nadaljujejo s padanjem (prikazane s polno črto). Da se neto zaloge dvignejo, je potrebno počakati na trenutek, ko prispe naročilo. Naročilo prispe po preteku časa L (to je čas dobavnega roka). V točki B se neto zaloge dvignejo za obseg naročila in izenačijo s stanjem zalog. Gibanje stanja zalog in neto zalog je od točke B do C usklajeno (prikazano s polno črto). Po preteku časa R se celoten postopek ponovi.

(R,S) sistem uravnavanja zalog smo spoznali dovolj dobro, da lahko zapišemo njegove lastnosti v matematični obliki. Poleg že znanih bomo definirali nekaj novih parametrov oziroma spremenljivk, ki opisujejo (R,S) sistem uravnavanja zalog:

R = čas, ki preteče med zaporednim spremljanjem zalog oziroma med dvema naročiloma, je vnaprej določen in je konstanten;

L = dobavni rok, to je čas, ki preteče med naročilom in dobavo istega naročila, je vnaprej določen in je konstanten;

$\hat{D}_t^{R+L}$ = pričakovano povpraševanje v naslednjem obdobju $R+L$, določeno ob času t ;

VZ_t = višina varnostnih zalog, določena ob času t ;

S_t = ciljna zaloga, določena ob času t .

Določanje ciljne zaloge S

Vsakokrat, ko podamo novo naročilo se moramo vprašati, kakšna raven zalog nam zagotavlja, da ne bo prišlo do izčrpanja zalog. To raven imenujemo ciljna zaloga S in jo postavimo tako, da pokrije povpraševanje v določenem časovnem obdobju ob upoštevanju želene ravni storitve. Če smo v točki A podali novo naročilo, moramo upoštevati, da bomo prvo naslednje naročilo dobili šele po preteku časa $R+L$, to je v točki D. To pomeni, da mora ciljna zaloga v točki A zadostiti povpraševanju v časovnem obdobju $R+L$. Če povpraševanje v tem obdobju preseže ciljno zalogo, bo proti koncu obdobja prišlo do izčrpanja zalog. Do izčrpanja zalog pride lahko tudi v začetku obdobja (pred pretekom časa L od oddaje naročila v točki A), vendar je to posledica določitve premajhne ciljne zaloge ob preteklem naročilu.

Ciljna zaloga S je lahko bodisi konstantna in se ne spreminja (

Slika 17) ali pa jo spreminjamo. V kolikor je podjetje soočeno z konstantno ravno povpraševanja, kar pomeni, da se povprečno povpraševanje le malo spreminja, bo ohranjalo enako ciljno zalogo. Če se v povpraševanju na primer pojavi trend naraščanja povpraševanja preko več časovnih obdobj je primerno dvigniti raven ciljne zaloge in se s tem izogniti povečani verjetnosti, da pride do izčrpanja zalog.

Raven ciljne zaloge je odvisen tudi od izbrane višine varnostnih zalog. Ciljna zaloga mora pokriti tudi primere, ko povpraševanje v obdobju $R+L$ preseže pričakovano povpraševanje. Glede na izbrano raven storitve, ki jo podjetje zagotavlja, je torej potrebno ustrezne varnostne zaloge vključiti v ciljno zalogo.

Ciljno zalogo S_t ob času t tako zapišemo kot seštevek predvidenega povpraševanja v časovnem obdobju $R+L$ in varnostnih zalog (Silver, Peterson, 1985, str. 295):

$$S_t = \hat{D}_t^{R+L} + VZ \quad (3.9)$$

Določanje varnostnih zalog VZ

Višine varnostne zaloge običajno določamo z izrazom:

$$VZ = z \cdot \sigma_{R+L} = z \cdot \sigma \cdot \sqrt{R+L} \quad (3.10)$$

Parameter z predstavlja standardizirani odklon za želeno raven storitve in σ_{R+L} standardni odklon povpraševanja v času, ko povpraševanje pokrivamo s posameznim naročilom (Silver,

Peterson, 1985, str. 272). Če je podjetje soočeno s povečanjem variabilnosti povpraševanja (višja σ) ali pa se poveča časovno obdobje $R+L$, mora, če želi ohraniti želeno raven storitve (enak z), ustrezno dvigniti varnostne zaloge.

Pogoj linearnosti je že diktiral izbiro sistemov uravnavanja zalog. Izkaže pa se, da moramo, v kolikor hočemo izpolniti pogoj za (R,S) sistem naročanja, nekoliko spremeniti enačbo za varnostne zaloge. Ohranili bomo korensko časovno odvisnost, medtem ko bomo standardni odklon povpraševanja σ zapisali kot konstanten delež predvidenega povpraševanja. Ta delež in parameter z bomo zapisali skupaj z novim parametrov k . Ob danem standardnem odklonu povpraševanja igra parameter k enako vlogo kot parameter z , torej določa raven storitve. Varnostne zaloge zapišemo v novi obliki:

$$VZ_t = k\hat{D}_t\sqrt{R+L} \quad (3.11)$$

Vzroka za izbiro takšnega modela za določanje varnostnih zalog sta naslednja:

- v celoten model uravnavanja zalog smo tako vnesli le en nov parameter k ,
- poskrbeli smo, da je (R,S) sistem linearen, s tem da v enačbi (3.11) nastopa $\hat{D}_t$.

Določanje stanja zalog IP

Stanje zalog IP , ki smo ga definirali kot vsoto neto zalog in zalog v dobavi (kjer v neto zalogah upoštevamo tudi neizpolnjeno povpraševanje iz preteklih obdobj v celoti), se lahko oceni z neposrednim štetjem posameznih zalog. Ker se stanje zalog skozi čas spreminja le na podlagi zadovoljevanja povpraševanja in podajanja naročil, lahko stanje zalog določimo tudi drugače. Stanje zalog iz preteklega obdobja se je po poteku časovne periode R zmanjšalo za povpraševanje v preteklem obdobju in povečalo za naročilo, ki je bilo podano v tem obdobju (3.12). Če vemo, kakšno je bilo začetno stanje zalog, lahko določimo stanje zalog na koncu vsakega prihodnjega časovnega obdobja. Ustrezno kontinuitetno enačbo za gibanje stanja zalog zapišemo kot:

$$IP_t = IP_{t-R} + O_{t-R} - D_t \quad (3.12)$$

(R,S) sistem uravnavanja zalog torej združuje več procesov, kot so spremljanje in ugotavljanje stanja zalog, predvidevanje povpraševanja ter podajanje novega naročila. Na delovanje sistema odločilno vpliva vrstni red, po katerem se ti procesi odvijajo. Potek dogodkov v (R,S) sistemu naročanja sledi naslednjim petim korakom:

- v obdobju po zadnjem naročilu prispe pošiljka, ki ustreza enemu od preteklih naročil (odvisno od dobavnega roka).

Naslednji koraki potekajo po preteku časa R po zadnjem naročilu, ob točki ponovnega naročanja:

- ugotovi se dejansko povpraševanje v preteklem obdobju D_t (v kolikor povpraševanju ni bilo mogoče zadovoljiti, ker je prišlo do izčrpanja zalog, se neizpolnjeno povpraševanje prenese v naslednje obdobje);
- oceni se novo stanje zalog IP_t ;
- predvidi se povpraševanje v prihodnjem obdobju $\hat{D}_t$;
- določi in poda se novo naročilo O_t , v kolikor se izkaže, da je stanje zalog dovolj visoko ali celo previsoko, se poda »negativno« naročilo, kar pomeni, da se ustrezen del zalog vrne dobavitelju.

Pri obeh preprostejših sistemih uravnavanja zalog, $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O \beta)$ sistem, podrobno spremljanje stanja zalog ni potrebno. Zadosti je, da se ugotovi, kakšno je bilo dejansko povpraševanje v posameznem obdobju. Preostala sistema uravnavanja zalog, $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem, vsebujeta koncept glajenja stanja zalog, zato je za razumevanje delovanja obeh sistemov potrebno najprej poznati delovanje (R, S) sistema.

4.6.1. Spremembe osnovnega (R, S) sistema uravnavanja zalog

V osnovnem pravilu naročanja in obeh prvih preprostejših sistemih uravnavanja zalog smo uporabljali zelo eleganten zapis, ki je označeval spremenljivko časa t . Ko smo govorili o naročilih, smo preteklo naročilo označili z O_{t-1} , novo naročilo pa z O_t . Ker imamo opravka s sistemi s periodičnim spremljanjem zalog, vemo, da je med časoma $t-1$ in t poteklo časovno obdobje R . V pravilu naročanja smo torej privzeli, da je čas med dvema zaporednima dogodkoma spremljanja zalog, enak 1:

$$R = 1 \quad (3.13)$$

Na tak način zapišimo enačbe (R, S) sistema. Vemo, da je odločilno obdobje, ki določa velikost ciljne zaloge S_t in varnostnih zalog VZ_t , časovno obdobje $R+L$. Če smo v osnovnem pravilu naročanja predvideno povpraševanje v prihodnjem obdobju do trenutka novega naročila označili z $\hat{D}_t$, temu zapisu v (R, S) sistemu ustreza zapis $\hat{D}_t^R$. Naredili bomo transformacijo (Dejonckheere et al., 2002a, str. 8) obeh časovnih konstant $R \rightarrow 1$ in temu ustrezno $L \rightarrow L/R$, kjer bomo razmerje L/R označevali s T_L . Čas $R=1$ ustreza času med zaporednim spremljanjem zalog, čas T_L ustreza dobavnemu roku. Tu je potrebno poudariti, da s tem nismo zmanjšali splošnosti našega modela. Čas T_L lahko zavzame vrednosti med 0 in ∞ , kjer vrednosti $T_L < 1$ pomenijo, da je $R > L$ in $T_L > 1$, da je $R < L$. V prvem primeru je naročilo dobavljeno preden je podano novo naročilo. V drugem primeru je dobavni rok daljši, kar pomeni, da je v dobavi lahko več naročil hkrati.

Pričakovano povpraševanje $\hat{D}_t^{R+L}$ v obdobju $R+L$, ob uporabi opisane transformacije, zapišemo kot:

$$\hat{D}_t^{R+L} = \hat{D}_t^{1+T_L} = \hat{D}_t(1+T_L) \quad (3.14)$$

Ob upoštevanju zgornje enačbe lahko ponovno zapišemo enačbe za ciljno zalogo S_t (3.9), varnostne zaloge VZ_t (3.11) in stanje zalog (3.12):

$$S_t = \hat{D}_t(1+T_L) + VZ \quad (3.15)$$

$$VZ_t = k\hat{D}_t\sqrt{1+T_L} \quad (3.16)$$

$$IP_t = IP_{t-1} + O_{t-1} - D_t \quad (3.17)$$

4.7. $(R, \beta IP)$ sistem uravnavanja zalog

$(R, \beta IP)$ sistem uravnavanja zalog uravnavanja zalog je v osnovi enak (R, S) sistem, ki pa ob tem, da sprostimo pogoj $\beta=1$, omogoča glajenje stanja zalog. V (R, S) sistemu smo razliko med neujemanje trenutnega stanja zalog s ciljnim stanjem zalog upoštevali v celoti. Sedaj bomo upoštevali le del neujemanja in s tem poskrbeli, da bodo naročila manj nihala. Pravilo naročanja za sistem uravnavanja zalog z glajenjem stanja zalog zapišemo z enačbo:

$$O_t = \hat{D}_t + \beta(IP_t^T - IP_t) \quad \text{pri } \gamma = 1 \quad (3.18)$$

Pri opisu (R, S) sistema smo se s prehodom na spremenjeno obliko zapisa pravila naročanja izognili natančnejši formulaciji ciljnega stanja zalog, zato to naredimo sedaj. Ob upoštevanju (3.15) ciljno stanje zalog zapišemo kot:

$$IP_t^T = \hat{D}_t T_L + VZ \quad (3.19)$$

Ciljno stanje zalog so dejansko ciljne zaloge S_t , zmanjšane za višino predvidenega povpraševanja v prihodnjem časovnem obdobju. Pri (R, S) sistemu smo z novim naročilom stanje zalog dvignili na želeno raven, to je na raven ciljnih zalog. Povejmo to nekoliko drugače. V kolikor bo v trenutku podajanja novega naročila trenutno stanje zalog enako ciljnemu stanju zalog, bomo z naročilom v višini predvidenega povpraševanja trenutno stanje zalog dvignili ravno na višino ciljne zaloge. Ciljne zaloge odražajo pričakovano povpraševanje v prihodnjem časovnem obdobju dolžine $R+L$ oziroma $1+T_L$. Če upoštevamo neujemanje trenutnih zalog s ciljnim stanjem zalog v celoti, dejansko naročimo do višine ciljne zaloge. S tem pričakovanja projiciramo na celotno obdobje $R+L$. V kolikor v naročilu neujemanja ne upoštevamo, naročimo le naročilo v višini predvidenega povpraševanja. Pričakovanja o povpraševanju v tem primeru projiciramo le na obdobje do naslednjega naročila (dolžine R). Ciljno stanje zalog je torej projekcija predvidenega povpraševanja na prihodnje časovno obdobje dolžine dobavnega roka. Višina varnostnih zalog se enako, kot pri ciljnih zalogi, prišteje ciljnemu stanju zalog.

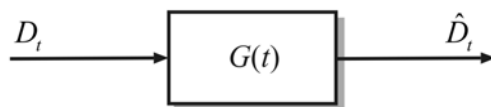
4.8. Izračun prenosnih funkcij

Če se v tem trenutku omejimo le na tehnični vidik izračuna, je pot do prenosne funkcije sistemov uravnavanja zalog dokaj preprosta. Izhodišče za izračun bo pravilo naročanja posameznega sistema uravnavanja zalog. Pomagali si bomo s konstrukcijo bločnega diagrama, ki nam bo bolj jasno predstavil dogajanje v sistemu. Na koncu bomo s pomočjo translacijskega teorema prešli v domeno z prostora, v katerem delovanje sistema opišemo s prenosno funkcijo.

4.8.1. Prenosna funkcija preprostega eksponentnega glajenja

Poglejmo sedaj, kako bi izbrano metodo predvidevanja povpraševanja ponazorili s kontrolnim sistemom, to je sistemom s funkcijo predvidevanja povpraševanja. Predvidevanje povpraševanja lahko opišemo kot postopek, pri katerem z matematičnim modelom (ki mu postrežemo s podatki o povpraševanju v preteklih obdobjih), dobimo napoved povpraševanja v naslednjem obdobju. V izbranem primeru preprostega eksponentnega glajenja je potrebno matematičnemu modelu ob poprej določeni konstanti glajenja povpraševanja α dovesti podatek o dejanskem povpraševanju D_t . Kot rezultat matematičnega modela dobimo napoved za povpraševanje v naslednjem obdobju $\hat{D}_t$.

Slika 18: Bločni diagram kontrolnega sistema s funkcijo preprostega eksponentnega glajenja v skrčeni obliki.



Vir: lastno delo

Ponazorimo delovanje preprostega eksponentnega glajenja s kontrolnim sistemom, ki bo opravljal enako nalogo. V kontrolni sistem pripeljemo vhodni signal, ki predstavlja dejansko povpraševanje D_t . Na izhodu kontrolnega sistema pričakujemo, da bomo dobili izhodni signal, ki bo predstavljal napoved $\hat{D}_t$. To lahko ponazorimo z bločnim diagramom, kjer z $G(t)$ označimo prenosno funkcijo, ki preoblikuje vhodni signal v izhodnega (Slika 18).

V skladu z našim načrtom mora sedaj prenosna funkcija opravljati vlogo matematičnega modela, zato zapišimo še enkrat enačbo preprostega eksponentnega glajenja, tokrat v nekoliko spremenjeni obliki:

$$\hat{D}_t = \alpha D_t + (1 - \alpha) \hat{D}_{t-1} \quad (3.20)$$

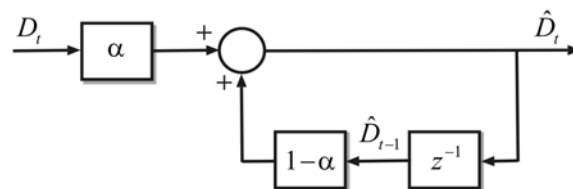
Napoved povpraševanja $\hat{D}_t$ bomo dobili, ko bomo dejanskemu povpraševanju D_t , pomnoženemu z α , prišteli preteklo napoved povpraševanja $\hat{D}_{t-1}$, pomnoženo z $1-\alpha$. Ker povpraševanje D_t predstavlja vhodni signal, potrebujemo le še $\hat{D}_{t-1}$.

Ker imamo opravka z diskretnimi signali, se je primerno preseliti v z prostor, v katerem so na voljo matematična orodja, ki nam bodo olajšala delo. Ena od zakonitosti, ki veljajo v z prostoru, je translacijski teorem, zapisan z enačbo (2.22). Da dobimo $\hat{D}_{t-1}$, je dovolj, da $\hat{D}_t$ pomnožimo s faktorjem z^{-1} :

$$\hat{D}_{t-1} = z^{-1} \hat{D}_t \quad (3.21)$$

Za določitev vrednosti $\hat{D}_{t-1}$ potrebujemo torej vrednost $\hat{D}_t$, ki je ravno izhodna funkcija (glej zgornji bločni diagram, Slika 18). Kontrolne sisteme, kjer izhodno funkcijo vodimo nazaj v sistem in jo v njem uporabimo, smo imenovali sistemi povratne zanke. Če si prikličemo v spomin še bločni diagram takega sistema (Slika 7b), lahko z bločnim diagramom ponazorimo kontrolni sistem, ki bo imel funkcijo preprostega eksponentnega glajenja.

Slika 19: Bločni diagram kontrolnega sistema s funkcijo preprostega eksponentnega glajenja v razčlenjeni obliki, kjer so predstavljene vse funkcije, ki določajo delovanje sistema.



Vir: lastno delo

Če v enačbi preprostega eksponentnega glajenja (3.20) namesto $\hat{D}_{t-1}$ uporabimo zvezo (3.21), lahko izrazimo razmerje med vhodnim signalom dejanskega povpraševanja in izhodnim signalom napovedi povpraševanja kot:

$$\frac{\hat{D}}{D} = \frac{\alpha z}{z - (1 - \alpha)} \quad (3.22)$$

Po definiciji je to tudi prenosna funkcija kontrolnega sistema $G(z)$. Glede na to da smo se preselili v z prostor, je prenosna funkcija izražena kot razmerje dveh polinomov spremenljivke z .

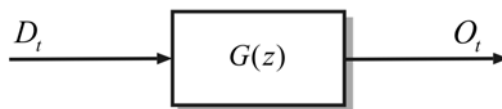
Bločni diagram preprostega eksponentnega glajenja je povratna zanka, kjer posamezna bloka $G(t)$ in $H(t)$ definiramo kot $G(t)=1$ in $H(t)=-(1-\alpha)z^{-1}$. Pred povratno zanko v zaporedni vezavi pripnemo še blok α . Z zapisom prenosnih funkcij povratne zanke (2.3) in zaporedne vezave blokov (2.2) lahko hitro izrazimo prenosno funkcijo preprostega eksponentnega povpraševanja, ki smo jo zapisali zgoraj.

4.8.2. Prenosne funkcije izbranih sistemov uravnavanja zalog

Izgradnjo kontrolnih sistemov izbranih sistemov zalog bomo začeli pri preprostem $(R, \hat{D})$ sistemu uravnavanja zalog in končali s kontrolnim sistemom, ki bo ponazarjal delovanje osnovnega pravila naročanja oziroma $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog. Postopek bo v osnovi enak kot v izgradnji kontrolnega sistema eksponentnega glajenja. Izhodišče bo torej pravilo naročanja posameznega sistema, ob tem pa si bomo pomagali s translacijskim teoremom pri iskanju preteklih vrednosti posameznih spremenljivk.

Vlogo vhodnega signala v sistemih uravnavanja zalog igra dejansko povpraševanje D_t , s pomočjo katerega se predvideva povpraševanje in uravnava stanje zalog. Na izhodu kontrolnega sistema pričakujemo, da bomo dobili izhodni signal, ki bo predstavljal rezultat sistema, to je novo naročilo O_t (Slika 20).

Slika 20: Bločni diagram sistema uravnavanja zalog v skrženi obliki.



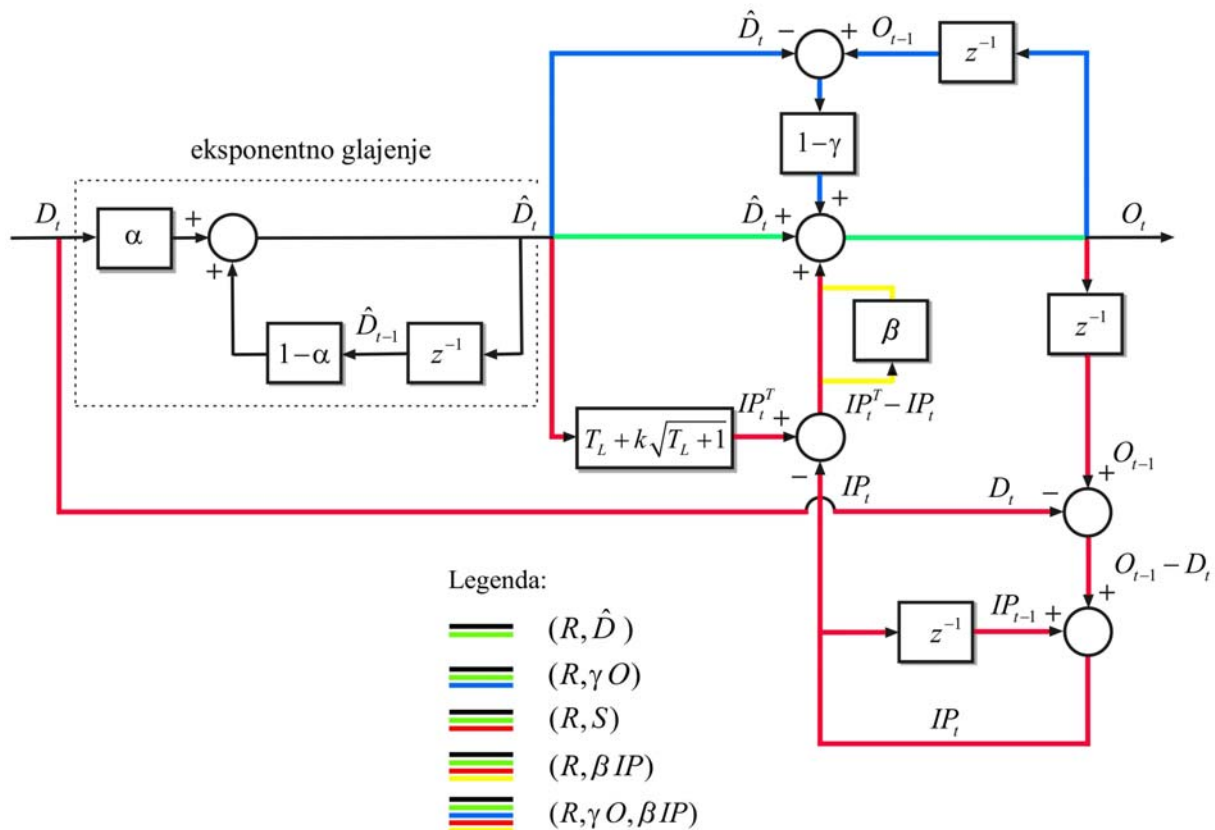
Vir: lastno delo

Pravilo naročanja $(R, \hat{D})$ sistema uravnavanja zalog določa, da je višina prihodnjega naročila enaka napovedi povpraševanja v prihodnjem obdobju. Kontrolni sistem, v katerega smo na vhod pripeljali dejansko povpraševanje in na izhodu dobili predvideno povpraševanje, smo že analizirali – to je kontrolni sistem preprostega eksponentnega glajenja (Slika 21, kjer je na levi strani diagrama s črtkanim pravokotnikom predstavljen bločni diagram predvidevanja povpraševanja s preprostim eksponentnim glajenjem). V bločnem diagramu tako le podaljšamo pot signalu od bločnega diagrama eksponentnega glajenja na desno stran, kjer na izhodu dobimo velikost naročila O_t (Slika 21, kjer je pot signala skozi $(R, \hat{D})$ kontrolni sistem označena s črnimi in zelenimi puščicami).

Pravilo naročanja $(R, \gamma O)$ je bolj zapleteno, saj je potrebno predvidenemu povpraševanju prišteti delež razlike med prejšnjim naročilom O_t in predvidenim povpraševanjem. Kontrolni sistem bo vseboval novo povratno zanko, v kateri bomo nazaj v sistem peljali informacijo o

naročilih. Preteklo naročilo O_{t-1} bomo izračunali z uporabo translacijskega teorema (2.22) na O_t , podobno kot smo to naredili pri preprostem eksponentnem glajenju (3.21). Kontrolni sistem $(R, \gamma O)$ sistema je sestavljen iz dveh zaporednih povratnih zank, kjer ima prva funkcijo glajenja povpraševanja, druga pa funkcijo glajenja naročil (Slika 21, kjer je pot signala skozi $(R, \gamma O)$ kontrolni sistem označena s črnimi, zelenimi in modrimi puščicami).

Slika 21: Bločni diagram izbranih sistemov uravnavanja zalog v razčlenjeni obliki, kjer so predstavljene vse funkcije, ki določajo delovanje sistema.



Vir: lastno delo

Naslednji na vrsti je (R, S) sistem uravnavanja zalog. Da ne bomo spreminjali zasnove, ki smo jo postavili z zgoraj analiziranimi kontrolnima sistemoma, bomo uporabili že obstoječ signal napovedi povpraševanja. Če temu prištejemo razliko med ciljnim stanjem zalog IP_t^T in trenutnim stanje zalog IP_t , dobimo velikost naročila O_t (3.7). Informacijo o trenutnem stanju zalog IP_t dobimo z uporabo enačbe (3.17). V enačbi nastopata dve spremenljivki, katerih preteklo vrednost potrebujemo, prejšnje naročilo O_{t-1} in stanje zalog IP_{t-1} , iz časa, ko smo podali prejšnje naročilo. Spoznali smo že, kako dobimo vrednost prejšnjega naročila. Stanje zalog IP_{t-1} , bomo dobili s tem, da vodimo nazaj informacijo o trenutnem stanju zalog IP_t in zopet uporabimo translacijski teorem. Torej naredimo nekakšen krog, kjer najprej predpostavimo, da poznamo stanje zalog IP_{t-1} in izračunamo IP_t , ki ga uporabimo za izračun IP_{t-1} . Kontrolni sistem (R, S) sistema je torej prav tako sestavljen iz dveh zaporednih povratnih

zank, kjer ima prva funkcijo glajenja povpraševanja, druga pa tokrat nima funkcije glajenja, ker upoštevamo napako v stanju zalog v celoti. (R,S) sistem ima še eno zanimivo lastnost. V drugo povratno zanko vodimo signal o dejanskem povpraševanju. Pri prvih dveh kontrolnih sistemih smo signal dejanskega povpraševanja peljali le v sistem predvidevanja povpraševanja, tokrat pa ga uporabimo tudi pri določanju stanja zalog (Slika 21, kjer je pot signala skozi (R,S) kontrolni sistem označena s črnimi, zelenimi in rdečimi puščicami).

$(R,\beta IP)$ sistem se od (R,S) sistema razlikuje le v tem, da vsebuje parameter β , ki omogoča glajenje zalog. V drugi povratni zanki vodimo razliko med ciljnim stanjem zalog in trenutnim stanjem zalog prek dodatnega bloka, katerega naloga je, da prepusti le del signala, glede na vrednost konstante glajenja stanja zalog β (Slika 21, kjer je pot signala skozi $(R,\beta IP)$ kontrolni sistem označena s črnimi, zelenimi, rdečimi in rumenimi puščicami).

Z izgradnjo kontrolnega sistema za $(R,\gamma O,\beta IP)$ ne bomo imeli težav, saj je le-ta kombinacija vseh že opisanih sistemov. (Slika 21, kjer je pot signala skozi $(R,\gamma O,\beta IP)$ kontrolni sistem označena s črnimi, zelenimi, modrimi, rdečimi in rumenimi puščicami).

Prenosna funkcija kontrolnega sistema natančno določa delovanje sistema. V primeru sistemov uravnavanja zalog je njena funkcija preobraziti informacijo o preteklem povpraševanju v informacijo o višini novih naročil (Slika 20). V skladu z definicijo prenosne funkcije kontrolnih sistemov (2.1) bomo prenosno funkcijo sistema uravnavanja zalog zapisali kot razmerje med naročilom O_t in dejanskim povpraševanjem D_t .

Izračun prenosnih funkcij začnemo s pravilom naročanja, pri čemer pretekle vrednosti spremenljivk izračunamo s pomočjo translacijskega teorema. Po nekaj računskih korakov dobimo prenosno funkcijo sistema. Tu je potrebno poudariti, da je prenosna funkcija izražena v spremenljivki z , ki smo jo definirali z enačbo (2.15). Prehod v z prostor nam je omogočil eleganten opis delovanja periodičnih sistemov uravnavanja zalog. Prenosne funkcije izbranih sistemov uravnavanja zalog, izražene kot razmerje med naročilom in dejanskim povpraševanjem, so:

$(R, \hat{D})$ sistem uravnavanja zalog

$$\frac{O}{D} = \frac{\alpha z}{z - (1 - \alpha)} \quad (3.23)$$

$(R,\gamma O)$ sistem uravnavanja zalog

$$\frac{O}{D} = \frac{\alpha \gamma z^2}{[z - (1 - \alpha)][z - (1 - \gamma)]} \quad (3.24)$$

(R,S) sistem uravnavanja zalog

$$\frac{O}{D} = \frac{\left((T_L + 1) + k\sqrt{T_L + 1}\right)\alpha(z-1)}{z - (1-\alpha)} + 1 \quad (3.25)$$

(R, β IP) sistem uravnavanja zalog

$$\frac{O}{D} = \frac{\left(1 + \beta\left(T_L + k\sqrt{T_L + 1}\right)\right)\alpha z(z-1) + \beta z[z - (1-\alpha)]}{[z - (1-\alpha)][z - (1-\beta)]} \quad (3.26)$$

(R, γ O, β IP) sistem uravnavanja zalog

$$\frac{O}{D} = \frac{\left(\gamma + \beta\left(T_L + k\sqrt{T_L + 1}\right)\right)\alpha z^2(z-1) + \beta z^2[z - (1-\alpha)]}{[z - (1-\alpha)][z(z-1) - (1-\gamma)(z-1) + \beta z]} \quad (3.27)$$

Primer izpeljave prenosne funkcije sistema uravnavanja zalog je prikazan v prilogi A.

5. ANALIZA SISTEMOV URAVNAVANJA ZALOG S POMOČJO NJIHOVIH PRENOSNIH FUNKCIJ

V prejšnjem poglavju smo si izbrali sisteme uravnavanja zalog in spoznali njihova pravila naročanja. Pravilo naročanja je matematičen zapis dogajanja v sistemu uravnavanja zalog. Spremenljivke, ki nastopajo v pravilu naročanja, spreminjajo svojo vrednost skozi čas. Če hočemo torej proučiti delovanje sistema, moramo najprej določiti parametre sistema in začetne vrednosti spremenljivk ob času $t=0$. Določimo na primer vrednost neto zalog in si pripravimo podatke o preteklem povpraševanju in naročilih. Potem sprostimo čas in počakamo, da pride čas novega naročila ob času $t+1$. Zabeležimo dejansko povpraševanje, ki je edina neodvisna spremenljivka, izračunamo vrednost ostalih spremenljivk in končno tudi višino novega naročila. Zatem zopet sprostimo čas, da poteče naslednja časovna perioda. Če delamo to dovolj dolgo, lahko v obnašanju sistema prepoznamo določene zakonitosti.

Opis sistema uravnavanja zalog s pomočjo prenosne funkcije nam bo omogočil elegantnejšo analizo njegovega delovanja od zgoraj opisane metode simulacije. Prenosno funkcijo zapišemo kot razmerje med naročilom in povpraševanjem. Desna stran funkcije je tokrat odvisna le od nove spremenljivke z in parametrov sistema. Če bi poskusili na enak način zapisati pravilo naročanja, bi naleteli na problem. Vrednost določene spremenljivke v določenem trenutku je odvisna od preteklih vrednosti spremenljivk, le-te pa zopet od vrednosti v obdobju pred tem. Translacijski teorem Z transformacije nam je omogočil, da smo preteklo vrednost spremenljivke izrazili s trenutno vrednostjo spremenljivke in s tem dobili algebrائيčno zvezo, to je prenosno funkcijo, ki povezuje naročilo in povpraševanje.

Prenosna funkcija sistema nam omogoča, da lastnosti sistema, v odvisnosti od parametrov sistema, analiziramo s pomočjo grafov. Z analizo prenosne funkcije oziroma njenih polov, lahko veliko povemo o stabilnosti in odzivnosti sistema, ki ga prenosna funkcija opisuje. Z uporabo inverzne Z transformacije se preselimo nazaj v prostor časa in analiziramo časovni odziv sistema. Če prenosno funkcijo izrazimo s frekvenco ω , lahko analiziramo frekvenčni odziv sistema. Na koncu bomo pokazali, da je s pomočjo frekvenčnega odziva mogoče izračunati velikost učinka biča za poljubne vzorce povpraševanja.

5.1. Analiza stabilnosti in odzivnosti sistemov z analizo polov prenosnih funkcij

Lastnost stabilnega sistema je, da se po odzivu na kratkotrajno motnjo v vhodnem signalu vrne v ravnovesno stanje. Od sistemov uravnavanja zalog pričakujemo, da bodo imeli lastnosti stabilnega sistema (Slika 11). Poglejmo si primer. Podjetje beleži konstanten nivo povpraševanja, nato pride do nenadnega dviga povpraševanja, ki se potem zopet vrne na izhodiščni nivo. Sistem uravnavanja zalog bi na skok v povpraševanju reagiral s povečanim naročilom. Ko bi se izkazalo, da se povpraševanje vrača na pretekli nivo, bi sistem sporočal, da je potrebno ustrezno zmanjšati velikost naročila. V kolikor podjetje uporablja nestabilen

sistem uravnavanja zalog, pa bi se zgodilo, da bi višina naročil še naprej naraščala. Lahko si predstavljamo, da bi podjetje prej ali slej spregledalo neustrezno delovanje sistema in ga nadomestilo s stabilnim.

Zapis lastnosti sistema uravnavanja zalog s prenosno funkcijo nam omogoča, da hitro ocenimo njegovo stabilnost. Spomnimo se pogoja za stabilnost: če se vsi poli p_i prenosne funkcije v z prostoru nahajajo v območju enotskega kroga, je sistem stabilen (Slika 13). Ker so poli v splošnem kompleksna števila, mora zato, da bo pol ležal v enotskem krogu, veljati pogoj, da je njegova absolutna vrednost manjša od 1 ($0 \leq |p_i| \leq 1$). Pole prenosne funkcije bomo dobili, tako da bomo poiskali rešitve karakteristične enačbe, ki so poli prenosne funkcije.

Prenosne funkcije preprostega eksponentnega glajenja, $(R, \hat{D})$ in (R, S) sistema uravnavanja zalog imajo enako karakteristično enačbo, ki jo zapišemo kot:

$$z - (1 - \alpha) = 0 \quad (4.1)$$

V tem primeru imamo opravka z linearno karakteristično enačbo, ki je že v faktorizirani obliki, z enim realnim polom p_1 :

$$p_1 = 1 - \alpha \quad (4.2)$$

Ob upoštevanju, da konstanta glajenja zavzame vrednosti $0 \leq \alpha \leq 1$, se pol prenosne funkcije giblje na območju od izhodišča kroga do meje stabilnosti, ki je na njegovem robu, torej v območju stabilnosti. Sistema $(R, \hat{D})$ in (R, S) sta stabilna ne glede na izbiro vrednosti konstante glajenja povpraševanja.

Karakteristična enačba prenosnih funkcij $(R, \gamma O)$ in $(R, \beta IP)$ sistemov je kvadratna, torej bo imela funkcija dva pola:

$$(z - (1 - \alpha))(z - (1 - (\gamma, \beta))) = 0 \quad (4.3)$$

Enega od teh že poznamo, saj je enak, kot pri prej omenjenih treh sistemih. Drugi faktor v karakteristični enačbi je po obliki enak enačbi (4.1), le da v primeru $(R, \gamma O)$ sistema nastopa konstanta glajenja naročil γ in pri $(R, \beta IP)$ sistemu konstanta glajenja stanja zalog β . Temu ustrezno lahko zapišemo drugi pol kot:

$$p_2 = 1 - (\gamma, \beta) \quad (4.4)$$

Glede na zgornjo ugotovitev in ker vemo, da velja ($0 \leq \gamma, \beta \leq 1$), se tudi pol p_2 nahaja v območju stabilnosti in je prav tako realen. Sistema $(R, \gamma O)$ in $(R, \beta IP)$ sta stabilna ne glede na izbiro parametrov α , γ in β .

Preostane nam le še $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem, kjer imamo opravka s karakteristično enačbo s tremi koreni:

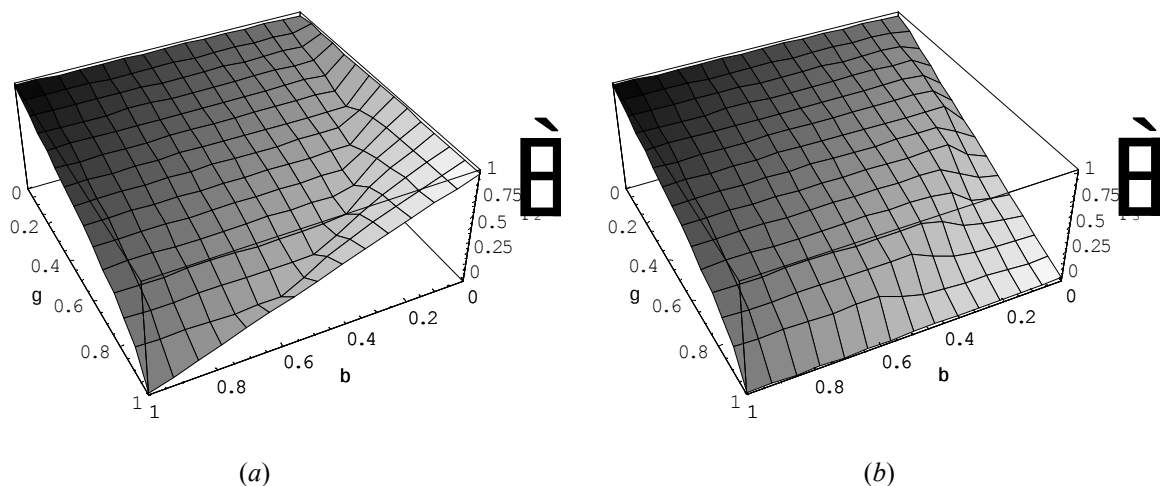
$$(z - (1 - \alpha))(z(z - 1) - (1 - \gamma)(z - 1) + \beta)z = 0 \quad (4.5)$$

Prvi pol je enak polu p_1 , ki se nahaja v območju stabilnosti. Preostala pola zapišemo z enačbo:

$$p_{2,3} = \frac{1}{2} \left(2 - \beta - \gamma \pm \sqrt{-4\beta + \beta^2 + 2\beta\gamma + \gamma^2} \right) \quad (4.6)$$

Poglejmo, ali je lahko absolutna vrednost vsaj enega od obeh polov večja od 1, kar bi pomenilo, da je sistem nestabilen. Pomagali si bomo z grafom absolutne vrednosti polov p_2 in p_3 , v odvisnosti od vrednosti parametrov γ in β (Slika 22). Vidimo, da je absolutna vrednost obeh polov vedno manjša od 1, torej se nahajata v območju stabilnosti. $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem lahko proglasimo za vedno stabilnega za poljubno vrednost parametrov α , γ in β .

Slika 22: Absolutna vrednost polov p_2^+ (a) in p_3^- (b), v odvisnosti od vrednosti konstante glajenja naročil γ in konstante glajenja stanja zaloga β .



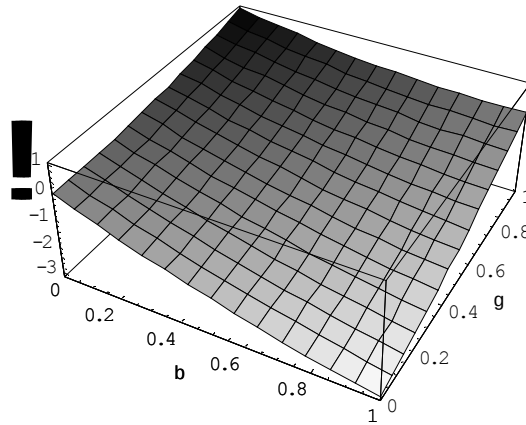
Vir: lastno delo

Poglejmo še ali obstaja možnost, da prvič dobimo kompleksen par polov. Pogoji za to je, da je izraz pod korenem v enačbi (4.6) negativen. Zopet si bomo pomagali z grafom, kjer bomo ponazorili vrednosti izraza v odvisnosti od vrednosti parametrov γ in β (Slika 23). Vidimo, da je izraz pozitiven le v manjšem temnejšem območju. Za vrednosti parametrov $\gamma \rightarrow 1$ in $\beta \rightarrow 0$ bo prenosna funkcija imela tri realne pole. Za ostale vrednosti parametrov bo funkcija imela en realen pol p_1 in kompleksen par polov p_2 in p_3 .

S pomočjo umestitve polov prenosne funkcije v s prostoru lahko podamo hitro oceno odzivnosti sistema v odvisnosti od parametrov sistema. Pole prenosnih funkcij, ki so funkcije

spremenljivke z , bomo predstavili v s prostoru (Slika 12). Pravilo pravi, da čim bolj so poli prenosne funkcije negativni, tem hitrejši je odziv ustreznega kontrolnega sistema.

Slika 23: Vrednost izraza $-4\beta + \beta^2 + 2\beta\gamma + \gamma^2$, v odvisnosti od vrednosti konstante glajenja naročil γ in konstante glajenja stanja zalog β .



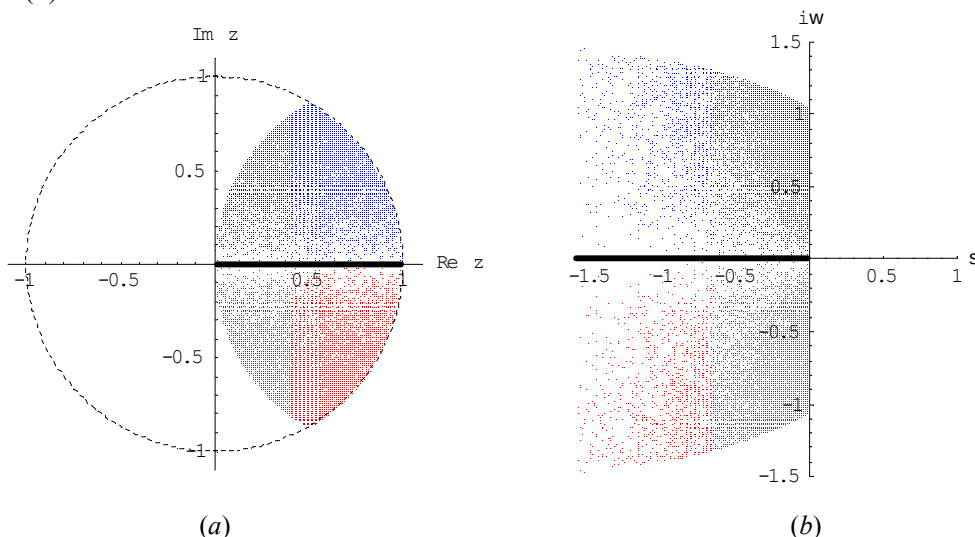
Vir: lastno delo

Zgoraj smo pokazali, da so poli prvih štirih sistemov uravnavanja zalog realni. Za vrednosti parametrov $\alpha, \gamma, \beta=0$ se poli nahajajo na robu stabilnega območja pri $z=1$. Za $\alpha, \gamma, \beta=1$ se poli nahajajo v izhodišču z prostora pri $z=0$. Za preostale vrednosti parametrov se poli nahajajo na odseku realne osi med vrednostmi $0 < z < 1$. Ta odsek se pri prehodu v s prostor preslika v negativni del realne osi s prostora, v interval $(-\infty, 0)$ (Slika 24, kjer je položaj realnih polov označen z debelejšo črno črto). Poli pri $z=1$ se preslikajo v izhodišče s prostora, medtem ko se poli pri $z=0$ preslikajo v skrajni negativni del realne osi. V splošnem lahko ugotovimo, da je za sisteme z višjimi vrednostmi parametrov α, γ in β značilen hitrejši odziv od sistemov z nizkimi vrednostmi parametrov.

Posebej si pogledjmo še $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem uravnavanja zalog, ki ima edini od izbranih sistemov lahko tudi kompleksen par polov prenosne funkcije. Poli se nahajajo v desni polovici enotskega kroga. Realni poli enako kot pri ostalih štirih sistemih ležijo na intervalu $0 \leq z \leq 1$. Kompleksna para polov ležita simetrično nad in pod realno osjo (Slika 24, kjer je položaj kompleksnih polov prikazan z modrim območjem za pol p_2 in rdečim za pol p_3). Kompleksni pari polov so prikazani s pomočjo naključnega izbiranja parametrov γ in β , tako da je lepo vidno območje višje gostote polov. Za pole z absolutno vrednostjo blizu 1 ($|z| \approx 1$, to je, ko gre vrednost parametra $\gamma \rightarrow 0$, Slika 22), v splošnem velja, da se preslikajo na in v bližino imaginarne osi s prostora. Za sisteme s takšnimi poli je značilna nizka odzivnost. Pri vrednostih parametrov $\gamma, \beta \rightarrow 1$ bo podobno kot pri prej analiziranih sistemih, $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem bolj odziven. Za kontrolne sisteme s kompleksnimi pari polov je značilno oscilirajoče nihanje izhodnega signala okoli stacionarne gladke oblike signala. Oscilacije so izrazitejše za

kompleksne pole s čim večjo absolutno vrednostjo imaginarnega dela. V našem primeru bo to veljalo predvsem takrat, ko bo šla vrednost parametra $\gamma \rightarrow 0$.

Slika 24: Prikaz polov prenosnih funkcij izbranih sistemov uravnavanja zalog v z prostoru (a) in s prostoru (b).



Vir: lastno delo

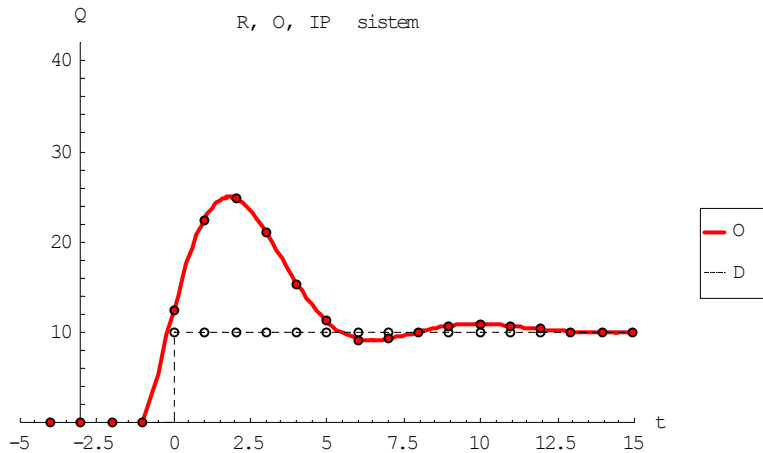
5.2. Časovni odziv sistemov na preproste signale

S pomočjo analize polov prenosnih funkcij sistemov smo že naredili nekaj predpostavk o odzivnosti sistemov na spremembe v povpraševanju. Te predpostavke bomo poskušali potrditi z analizo časovnih odzivov sistemov na preproste signale, to je preproste vzorce povpraševanja. Predvsem nas bo zanimalo, ali določen sistem uravnavanja zalog lahko sledi spremembi v povpraševanju in kako hitro je to sledenje oziroma kakšna je odzivnost sistema. Čim hitreje se bodo naročila skozi čas prilagajala spremembam v povpraševanju, s tem bolj odzivnim sistemom imamo opravka. Prav tako bomo ugotovili, ali se signal pri prehodu skozi sistem ojači ali oslabi. Torej, ali so naročila skozi čas višja ali nižja od povpraševanja. V kolikor pride do povečanja višine naročil nasproti povpraševanju, bo to znak, da imamo najverjetneje opraviti s pojavom učinka biča.

Časovne odzive sistemov uravnavanja zalog bomo proučili s pomočjo grafov, na katerih skupaj predstavimo vzorca povpraševanja in naročil v odvisnosti od časa. Na grafih sta vzorca predstavljena kot kontinuirani funkciji, vendar ne smemo pozabiti na diskretno naravo vzorcev (Slika 25, kjer sta velikost povpraševanja D in naročil O v posameznem časovnem obdobju t označena s krožci). Povedano drugače, višino povpraševanja in naročila skozi čas t preberemo vsakokrat, ko preteče časovna perioda T (kjer smo že prej postavili $T=1$):

$$t = n \cdot T \xrightarrow{T=1} n, \quad -\infty < n < \infty \quad (4.7)$$

Slika 25: Časovni odziv ($R, \gamma O, \beta IP$) sistema uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki stopnice ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

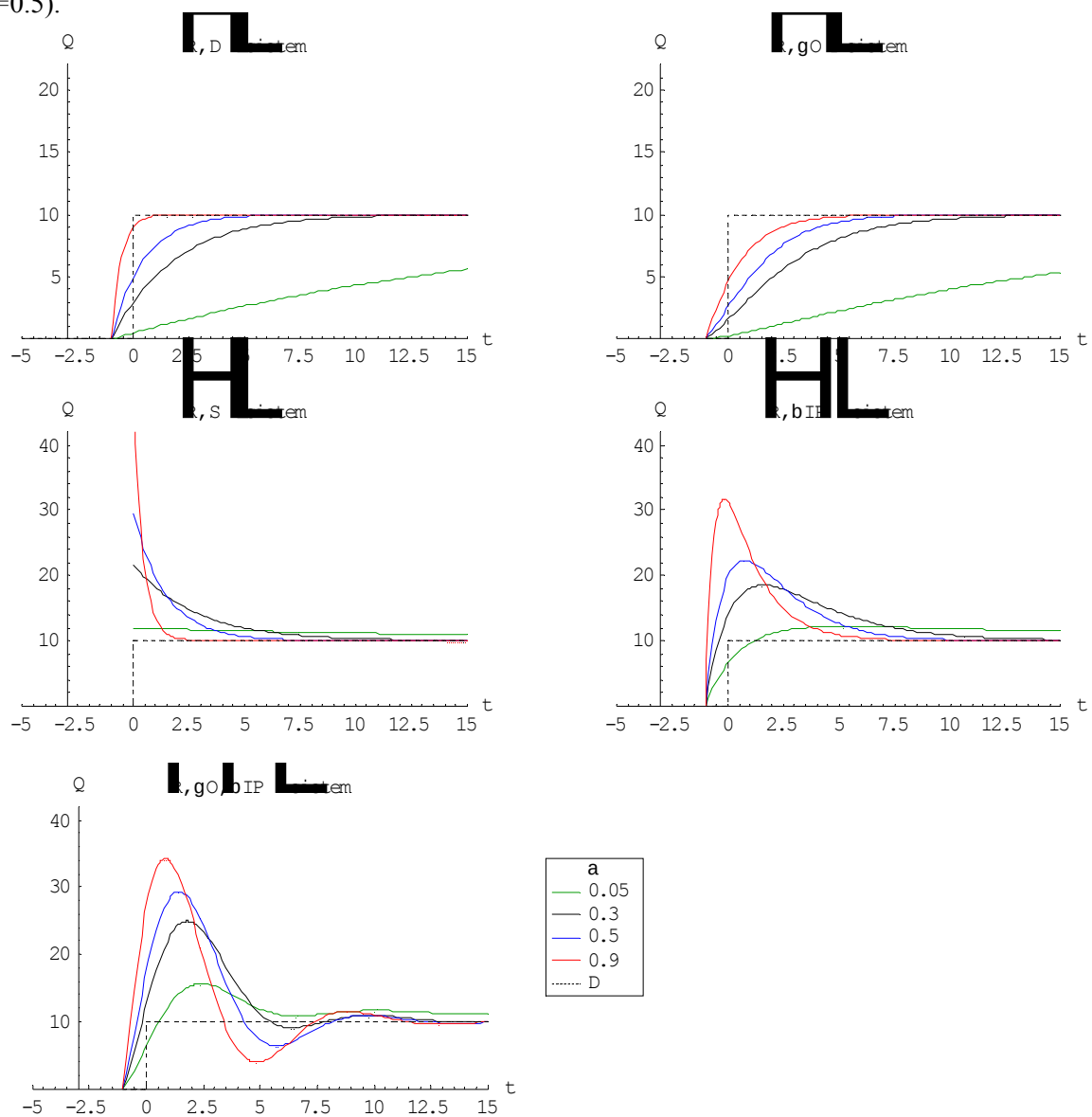
5.2.1. Časovni odziv sistemov na spremembo povpraševanja v obliki stopnice

Poglejmo najprej časovni odziv izbranih sistemov uravnavanja zalog na vzorec povpraševanja v obliki stopnice (Slika 26). Pri prvih dveh sistemih uravnavanja zalog, $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu, vidimo, da začnejo naročila po skoku povpraševanja počasi naraščati. Po preteku več časovnih obdobij se dokončno približajo in ujamejo nov nivo povpraševanja. Odziv (R, S) sistema je nasproten. Skoku v povpraševanju sledi najvišje naročilo. Pozneje se naročila nižajo in čez čas spustijo na nivo stopnice. V skladu z večjo kompleksnostjo $(R, \beta IP)$ sistema je tudi njegov časovni odziv bolj zapleten. Prvo naročilo, podano ob skoku v povpraševanju, je lahko manjše ali večje od porasta v povpraševanju. Ne glede na to v naslednjih obdobjih naročila presežejo stopnico in šele v naslednjih obdobjih začnejo padati proti novemu nivoju povpraševanja. Podoben je v prvih obdobjih po skoku odziv $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema, vendar kot smo predvideli že z analizo polov, pride pozneje do oscilacij v funkciji naročil. Ob padanju naročil proti stopnici naročila zanihajo pod stopnico in nato nad njo ter tako naprej odvisno od narave oscilacij, ki jo določata parametra γ in β .

Pri časovnem odzivu nekaterih sistemov pride do oslabitve signala, pri drugih do ojačitve signala. Povedano drugače, višina naročil pri prvih dveh sistemih uravnavanja zalog je vedno nižja od povpraševanja, medtem ko pri (R, S) sistemu višina naročil preseže povpraševanje. Pri sistemih pri katerih pride do ojačitve signala, lahko pričakujemo pojav učinka biča. Do pojava učinka biča pride takrat, ko je variabilnost naročil večja od variabilnosti povpraševanja. V našem primeru smo na vhod vseh petih sistemov privedli enak signal stopnice, kar pomeni, da je variabilnost povpraševanja v vseh primerih enaka. Za oceno o pojavu učinka biča in primerjavo med izbranimi sistemi je torej dovolj, da pogledamo variabilnost naročil. Za prva dva sistema naročanja je značilna počasi naraščajoča krivulja povpraševanja, pri kateri je sprememba naročil iz obdobja v obdobje majhna. Variabilnost naročil je temu primerno

majhna. Visok skok naročil pri (R,S) sistemu, ki zelo preseže nivo povpraševanja, močno poveča variabilnost naročil. Variabilnost naročil je večja od variabilnosti povpraševanja, kar pomeni, da imamo opravka z učinkom biča. Podobno lahko rečemo za $(R,\beta IP)$ sistem, s tem da začetni skok naročil ni tako izrazit. Ocenimo lahko, da sta variabilnost naročil in učinek biča ustrezno manjša. $(R,\gamma O, \beta IP)$ sistem je svojevrsten v tem, da se v funkciji naročil pojavljajo oscilacije, ki so same po sebi generator variabilnosti. V grobem je oblika funkcije naročil podobna funkciji $(R,\beta IP)$ sistema, vendar oscilacije poskrbijo za dodatno spreminjanje višine naročil. Variabilnost naročil in s tem učinek biča sta pri $(R,\gamma O, \beta IP)$ sistemu uravnavanja zalog večja.

Slika 26: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki stopnice, v odvisnosti od konstante glajenja povpraševanja α ($\alpha = \{0.05, 0.3, 0.5, 0.9\}$, $\gamma = 0.5$, $\beta = 0.5$, $T_L = 2$, $k = 0.5$).



Vir: lastno delo

Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog je v veliki meri odvisen od izbire parametrov, ki nastopajo v ustreznih pravilih naročanja. Poglejmo si najprej vpliv konstante glajenja povpraševanja α (Slika 26). Vemo, da izbira nizke konstante glajenja povpraševanja ($\alpha \rightarrow 0$) pomeni, da bomo v napovedi povpraševanja večji pomen dali preteklim napovedim v povpraševanju kot na podatek o dejanskem povpraševanju. S tem bo niz napovedi povpraševanja gladek, vendar se bomo s tem odpovedali hitremu odzivu na spremembe v dejanskem povpraševanju.

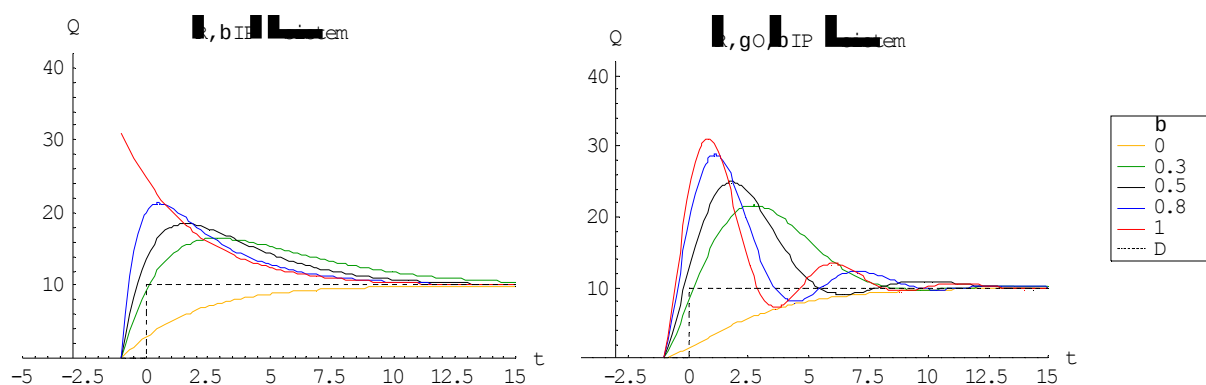
Prenosna funkcija $(R, \hat{D})$ sistema uravnavanja zalog, kjer v vsakem obdobju podamo naročilo v višini predvidenega povpraševanja, je enaka prenosni funkciji preprostega eksponentnega glajenja. Pri nizkih vrednostih parametra α funkcija naročil narašča počasneje in pozneje ujame spremenjen nivo povpraševanja. Odzivnost sistema je temu primerno manjša. Podobno lahko ugotovimo tudi pri preostalih sistemih. Pri nizkih vrednostih α je potrebno več časa, da se naročila približajo povpraševanju. Opazimo lahko tudi, da je reakcija slabše odzivnih sistemov manj burna. Pri prvih dveh sistemih vidimo, da se naročila pri višjih vrednostih parametra α hitro približajo nivoju stopnice. Pri (R, S) sistemu pride do močnega povečanja prvega naročila. Podobno je s porastom naročil v prvih obdobjih pri preostalih dveh sistemih. Vpliv konstante glajenja povpraševanja na obnašanje sistemov uravnavanja zalog je pričakovan, saj vsak od izbranih sistemov temelji na predvidevanju povpraševanja, ki pa se pri vseh sistemih določa s preprostim eksponentnim glajenjem. Izbira konstante glajenja povpraševanja je tako kompromis med odzivnostjo in stabilnostjo metode predvidevanja povpraševanja, kot tudi sistema uravnavanja zalog v celoti.

V skladu s predhodnimi ugotovitvami nizka vrednost parametra α pomeni manjšo ojačitev signala ter počasnejše spreminjanje signala skozi čas. Funkcije naročil pri nizkih α so pri vseh sistemih uravnavanja zalog bolj gladke in temu ustrezno je manjša njihova variabilnost, zato je pričakovati, da bo pri nizkih α manjši tudi učinek biča.

Konstanta glajenja zalog β nastopa v $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu uravnavanja zalog in določa, v kolikšni meri bomo pri izračunu naročila upoštevali neujemanje med trenutnim in ciljnim stanjem zalog. Če razmišljamo podobno kot prej, lahko pričakujemo, da bomo z visokim β povečali odzivnost sistema, ker bomo neujemanje v stanju zalog upoštevali v večji meri. Pričakovanja se izkažejo za utemeljena, ob tem pa vidimo, da je vpliv parametra β manjši, kot je vpliv parametra α (Slika 27). Medtem ko so naročila pri izbiri nizke vrednosti parametra α ujela povpraševanje bistveno počasneje kot pri visokih, izbira parametra β le malo vpliva na to, kdaj se naročila ujamejo s povpraševanjem. Kljub manjšemu vplivu, opazimo, da se s spreminjanjem β spreminja tudi oblika funkcije naročil: od počasi naraščajoče funkcije, ki smo jo srečali pri prvem sistemu uravnavanja zalog; preko oblik funkcij, ki smo jih pri $(R, \beta IP)$ sistemu že spoznali, ko smo spreminjali vrednost parametra α ; do oblike funkcije, ki je značilna za (R, S) sistem. To seveda ne preseneča, saj vemo, da $(R, \beta IP)$ sistem pri vrednosti parametra $\beta=0$ preide v $(R, \hat{D})$ sistem in pri $\beta=1$ v (R, S) sistem.

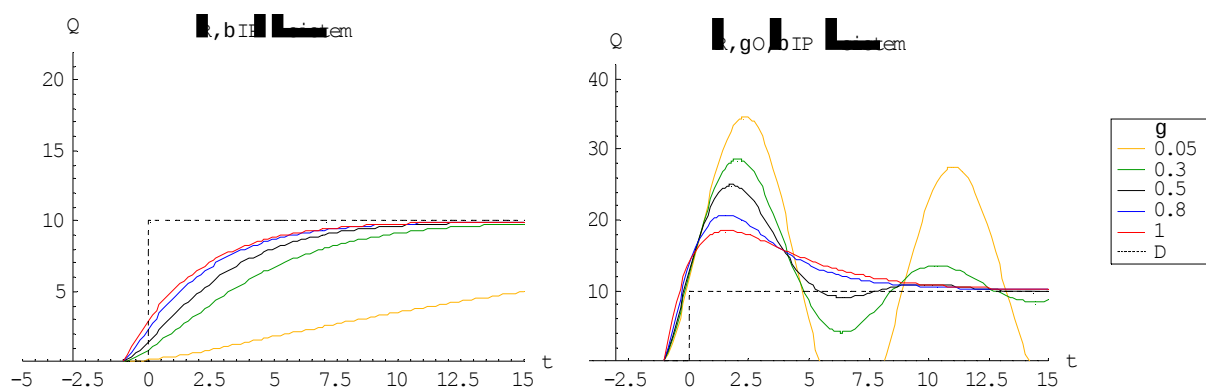
Ojačitev signala oziroma povečanje naročil je večje ob izbiri višjih vrednosti parametra β , zato pričakujemo, da bo večja tudi variabilnost naročil in učinek biča.

Slika 27: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki stopnice, v odvisnosti od konstante glajenja stanja zalog β ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=\{0, 0.3, 0.5, 0.8, 1$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

Slika 28: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki stopnice, v odvisnosti od konstante glajenja naročil γ ($\alpha=0.3$, $\gamma=\{0, 0.3, 0.5, 0.8, 1\}$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).

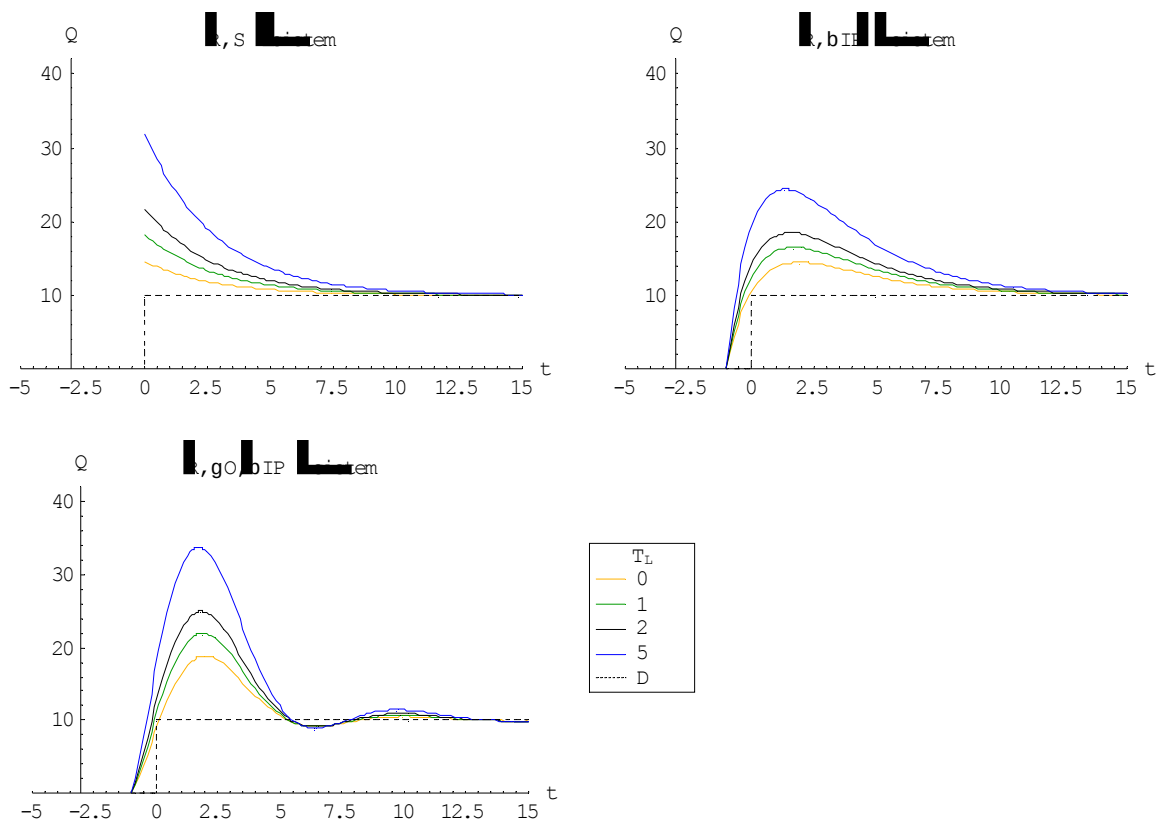


Vir: lastno delo

Konstanta glajenja naročil γ je glede na svoj vpliv na delovanje sistemov prav tako sorodna s konstanto glajenja povpraševanja. Nastopa v $(R, \gamma O)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu uravnavanja zalog in določa, v kolikšni meri bomo v podanem naročilu upoštevali razliko med preteklim naročilom in predvidenim povpraševanjem. Nizka konstanta glajenja naročil pomeni ob danem parametru α dodatno zmanjšanje odzivnosti sistema (Slika 28). Pri $(R, \gamma O)$ sistemu vidimo, da se funkcije naročanja za različne vrednosti parametra γ gibljejo v območju, ki ga določa parameter α . Hkratna izbira nizkih parametrov α in γ omogoča večje glajenje naročil, vendar ob tem dodatno poslabša odzivnost sistema. Zelo zanimiv je vpliv parametra γ na obnašanje $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema. Pri nizkem parametru γ naročila še niso ujela novega nivoja povpraševanja, kar pomeni, da je odzivnost sistema majhna, vendar je kljub majhni odzivnosti

odziv sistema zelo buren. Opazne so velike oscilacije v funkciji naročanja, ki so izrazitejše pri izbiri nizke vrednosti parametra γ . Višina oscilacij lahko preseže višino stopnice in se skozi čas le počasi zmanjšuje. Ta ugotovitev je povsem v skladu z ugotovitvijo, da oscilacije naraščajo, ko gre $\gamma \rightarrow 0$, do katere smo prišli pri analizi polov prenosne funkcije. Kljub temu da nizka vrednost parametra γ zmanjša odzivnost naročil, pa je njen vpliv na povečanje oscilacij pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu močnejši. V skladu s tem je variabilnost naročil ob izbiri nizke vrednosti parametra γ pri $(R, \gamma O)$ sistemu manjša, pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu pa večja. Temu ustrezno pričakujemo, da pri $(R, \gamma O)$ sistemu do pojava učinka biča ne bo prišlo, medtem ko bo pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu učinek biča z izbiro nizke konstante glajenja naročil večji.

Slika 29: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki stopnice, v odvisnosti od dolžine dobavnega roka T_L ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=0, 1, 2, 5$, $k=0.5$).

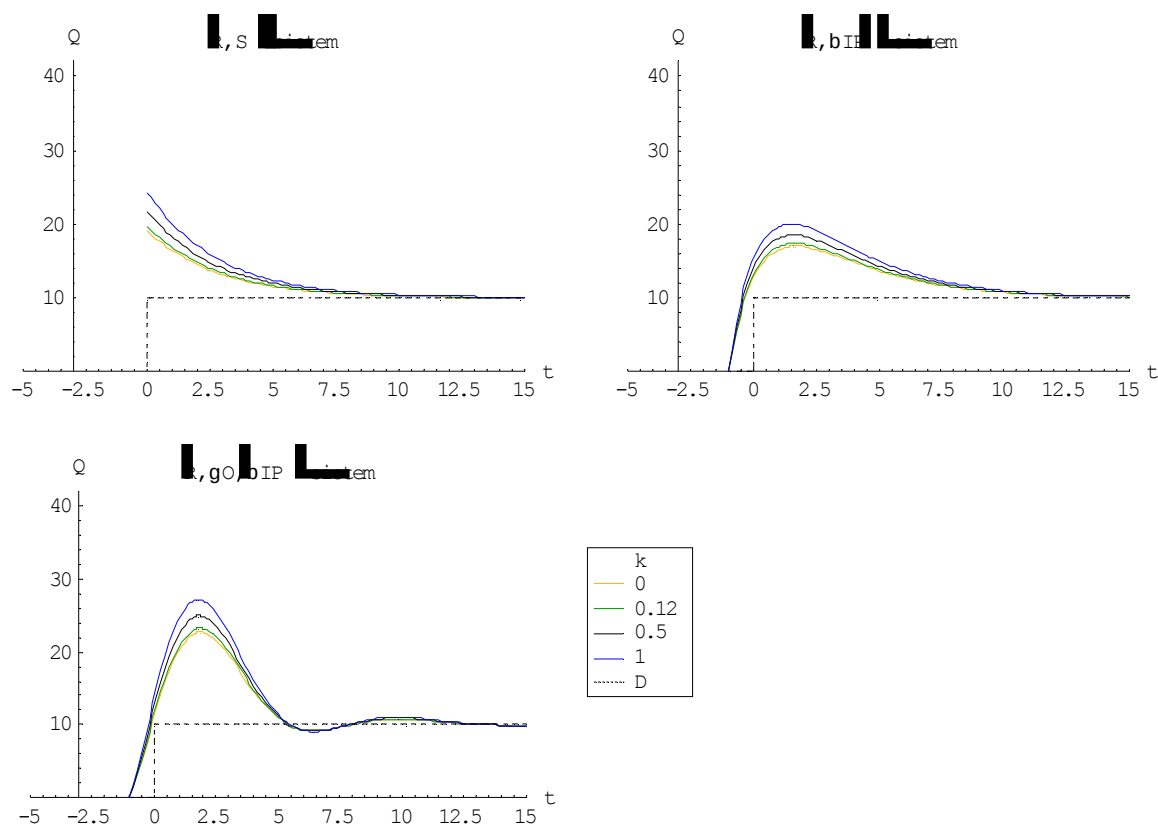


Vir: lastno delo

Na koncu si pogledjmo še vpliv preostalih dveh parametrov, to sta dolžina dobavnega roka T_L in parameter k , ki določa višino varnostnih zalog (Slika 29 in Slika 30). Oba nastopata v sistemih, kjer se višina naročila oblikuje s pomočjo spremljanja stanja zalog, in sicer v (R, S) , $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu uravnavanja zalog. Vidimo, da je vpliv obeh parametrov manjši na obnašanje sistemov, kot je bilo to prej, ko smo opazovali vpliv parametrov α , β in γ . V obeh primerih ne pride do sprememb v obliki funkcij naročanja, ki v osnovnih značilnostih ostajajo enake. Tudi na odzivnost sistemov, če jo ocenjujemo z vidika kdaj se naročila ujamejo z novim nivojem povpraševanja, parametra nimata velikega vpliva, vendar pa je

vpliv dobavnega roka na ojačitev signala večji. Naročila v primeru daljšega dobavnega roka so v prvih časovnih obdobjih močno povečana, kar lahko pojasnimo s tem, da se višje povpraševanje v naročilu odrazi v naročilu za daljše časovno obdobje. Variabilnost naročil je večja in tako pride do učinka biča.

Slika 30: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki stopnice, v odvisnosti od dolžine dobavnega roka T_L ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=0, 1, 2, 5$, $k=0.5$).



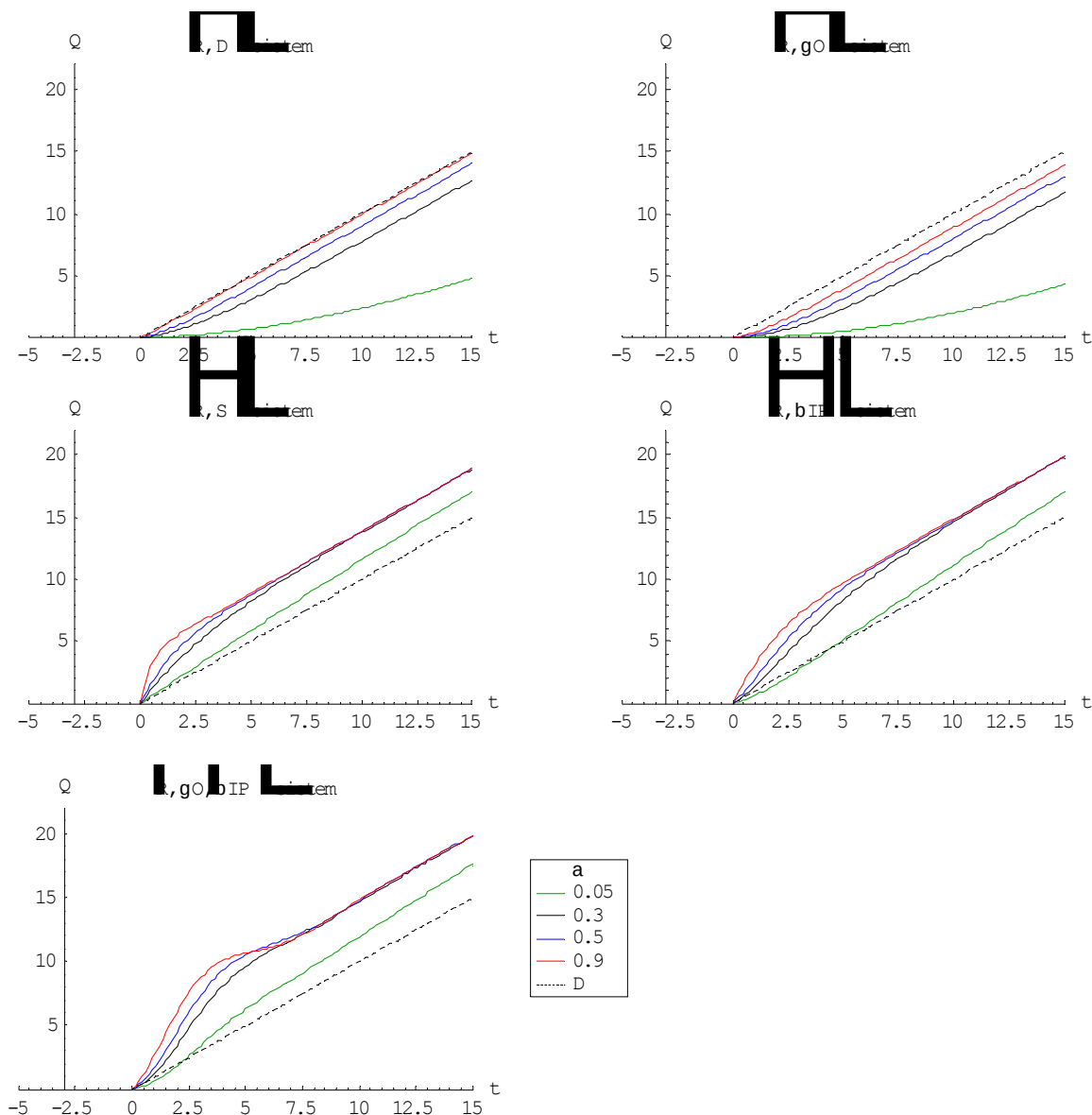
Vir: lastno delo

5.2.2. Časovni odziv sistemov na spremembo povpraševanja v obliki klanca

Vzorec povpraševanja v obliki klanca je dejansko enakomerno naraščajoče povpraševanja. Za razliko od vzorca povpraševanja v obliki stopnice, kjer smo imeli enkratno spremembo v povpraševanju, se pri klanecu povpraševanje spremeni v vsakem časovnem obdobju. Višina naročila se mora tako neprenehoma prilagajati spremembam v povpraševanju. Pri analizi časovnega odziva sistemov uravnavanja zalog na klanec nas bo zanimalo predvsem, kako dobro bo prilagajanje oziroma sledenje naročil povpraševanju. V primeru stopnice se je funkcija naročil pri vseh sistemih po preteku več časovnih obdobjij ujela ali pa se je vsaj vidno približala spremenjenemu nivoju povpraševanja. Pri vzorcu povpraševanja v obliki klanca pa bomo videli, da temu ni tako.

Pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu naročila po začetni spremembi povpraševanja začnejo naraščati, vendar počasneje od naraščanja povpraševanja (Slika 31). Dejansko se višina naročila v vsakem nadaljnjem časovnem obdobju vedno bolj razlikuje od povpraševanja. Pozneje se ustali nižje od povpraševanja in narašča z enakim naklonom kot povpraševanje. Pri preostalih treh sistemih je situacija ravno obratna. Naročila v začetnih obdobjih naraščajo hitreje od povpraševanja, kasneje pa se ustalijo nad povpraševanjem.

Slika 31: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na spremembo v povpraševanju v obliki klanca, v odvisnosti od konstante glajenja povpraševanja α ($\alpha = \{0.05, 0.3, 0.5, 0.9\}$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

Naročila torej pri vseh sistemih sledijo spremembam povpraševanja, vendar ne pride do ujemanja naročil in povpraševanja. Razlog za to moramo iskati v tem, da pri vseh sistemih uporabljamo pri predvidevanju povpraševanja metodo preprostega eksponentnega glajenja. Že

pri opisu metode smo povedali, da je metoda uporabna za enakomerno stohastično povpraševanje (poglavje 4.3). S preprostim eksponentnim glajenjem torej ne moremo natančno slediti trendu v povpraševanju. Pri predvidevanju povpraševanja, v katerem se pojavlja trend, se uporabljajo kompleksnejše metode eksponentnega glajenja.

Analizo časovnih odzivov sistemov na povpraševanje v obliki klanca bomo skrajšali in si ogledali le vpliv konstante glajenja povpraševanja α na obliko funkcije naročil. Posledica nizke izbire vrednosti parametra α je, da sistemi počasneje reagirajo na spremembe v povpraševanju in s tem je odzivnost sistemov nižja. V skladu z ugotovitvami pri časovnih odzivih sistemov na povpraševanje v obliki stopnice velja, da pride do oslabitve signala pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu ne glede na izbiro parametra α , medtem ko pri (R, S) sistemu vedno pride do ojačitve signala. Pri $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu sicer vidimo, da je funkcija naročil za večino vrednosti parametra α nad funkcijo povpraševanja, vendar pri nizkih vrednosti α v prvih časovnih obdobjih pride do oslabitve signala. Naročila šele kasneje presežejo povpraševanje in se veliko počasneje dvigajo nad povpraševanje. Pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ lahko zopet opazimo oscilacije, vendar te občutno vplivajo le na nekaj začetnih naročil. Oscilacija se torej pojavi kot reakcija na spremembo v obliki funkcije povpraševanja. Kasneje, ko funkcija povpraševanja narašča s konstantnim trendom, se oscilacije umirijo.

5.2.3. Časovni odziv sistemov na povpraševanje v obliki sinusne funkcije

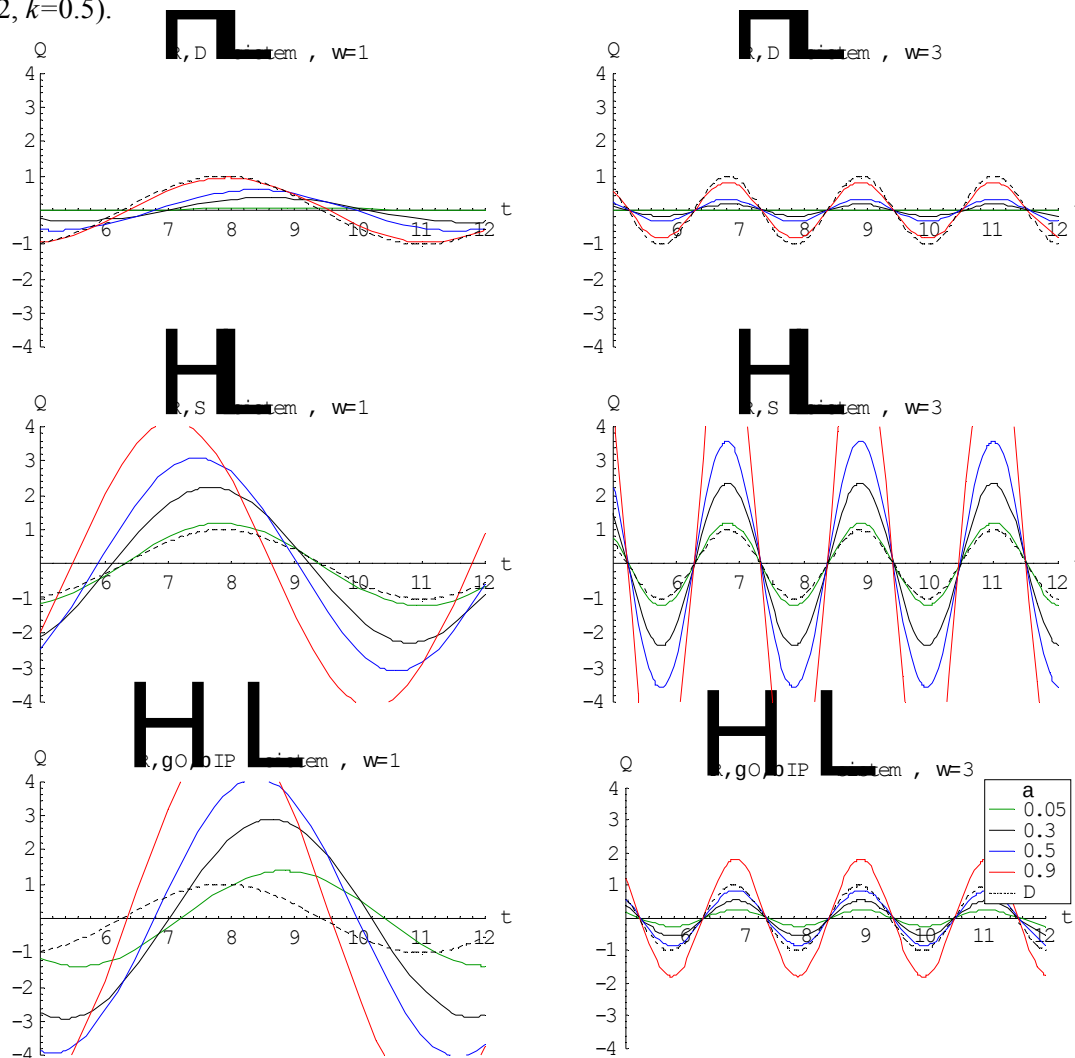
Vloga sinusnega signala je pri analizi kontrolnih sistemov zelo pomembna. Odziv sistema na sinusne signale različnih frekvenc je osnova za izračun frekvenčnih odzivov sistemov, ki jih bomo bolj podrobno analizirali kasneje. Le-ti bodo izhodišče za izračun velikosti učinka biča za poljubne vzorce povpraševanja. Pogledali si bomo odziv treh sistemov, in sicer $(R, \hat{D})$, (R, S) in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema, pri dveh različnih frekvencah sinusne funkcije povpraševanja v odvisnosti od konstante glajenja povpraševanja α (Slika 32).

Najprej opazimo, da imajo naročila prav tako obliko sinusnega signala s frekvenco enako frekvenci sinusne funkcije povpraševanja. Sinusni funkcija naročil ima v primerjavi s funkcijo povpraševanja spremenjeno amplitudo in je nekoliko zamaknjena glede na funkcijo povpraševanja. To je v skladu s teorijo, ki pravi, da sinusni signal pri prehodu skozi linearen kontrolni sistem ohrani frekvenco, spremenita pa se njegova amplituda in faza. Amplituda sinusnega signala je tudi merilo za variabilnost signala (C.1). Če bo funkcija naročil imela amplitudo višjo od povpraševanja, bo temu ustrezno večja njena variabilnost. Povečana variabilnost pa je znak pojava učinka biča.

Pri $(R, \hat{D})$ je amplituda naročil manjša od amplitude povpraševanja ($\omega=1$) ne glede na izbiro parametra α . To je v skladu s prejšnjimi predpostavkami, da do učinka biča pri $(R, \hat{D})$ sistemu ne bo prišlo. Zmanjšanje amplitude je še večje, če ima sinusna funkcija povpraševanja višjo

frekvenco ω ($\omega=3$). Pri višji frekvenci funkcije povpraševanja pride do dodatnega zmanjšanja variabilnosti funkcije naročil.

Slika 32: Časovni odziv sistemov uravnavanja zalog na vzorec povpraševanja v obliki sinusne funkcije, v odvisnosti od konstante glajenja povpraševanja α ($\alpha=\{0.05, 0.3, 0.5, 0.9\}$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

(R,S) sistem smo že proglasili za tistega, za katerega obstaja velika verjetnost, da bo prišlo do učinka biča ne glede na izbiro parametrov sistema. Pri vseh predpostavljenih vrednostih parametra α dobimo povečanje amplitude in s tem povečanje variabilnosti. Pri višji frekvenci je povečanje nekoliko višje kot pri nižji frekvenci. V obeh primerih ob izbiri visoke vrednosti α dobimo povečanje variabilnosti za več kot štirikrat. Variabilnost naročil bo v tem primeru torej štirikrat večja od variabilnosti povpraševanja. Za razliko od ($R,\hat{D}$) sistema, kjer je funkcija naročil praviloma zaostajala za funkcijo povpraševanja, pri (R,S) sistemu prehiteva povpraševanja. To je posledica tega, da pri (R,S) sistemu spremembi povpraševanja vedno sledi sorazmerno večja sprememba naročila, medtem ko je pri ($R,\hat{D}$) sistemu sprememba

naročila vedno manjša od spremembe povpraševanja. To lahko dodatno utemeljimo s tem, da je »prehitevanje« pri (R, S) sistemu večje pri izbiri visoke vrednosti parametra α , za katero vemo, da poveča odzivnost sistema. Pri $(R, \hat{D})$ sistemu pa pride do večjega »zaostajanja« ob izbiri nizke vrednosti α .

Zopet je najzanimivejši časovni odziv $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema. Pri nižji frekvenci sinusne funkcije povpraševanja pride vedno do povečanja variabilnosti, ki je celo višje od tiste pri (R, S) sistemu. Pri višji frekvenci pa pride razen za visoke vrednosti parametra α do zmanjšanja variabilnosti. V prvem primeru bo torej prišlo do pojava učinka biča, v drugem pa ne. Zanimivo je, da kljub temu da pride pri nižji frekvenci do povečanja variabilnosti, pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu ne pride do prehitevanja funkcije naročil, kot je to opaziti pri (R, S) sistemu. To je posledica tega, ker povečanje variabilnosti ne gre na račun prekomernega odziva sistema na povpraševanje, kot je bil to primer pri (R, S) sistemu. K povečanju variabilnosti prispeva predvsem pojav oscilacij, ki je, kot bomo to videli kasneje pri analizi frekvenčnih odzivov, izrazitejši pri nižjih frekvencah sinusne funkcije.

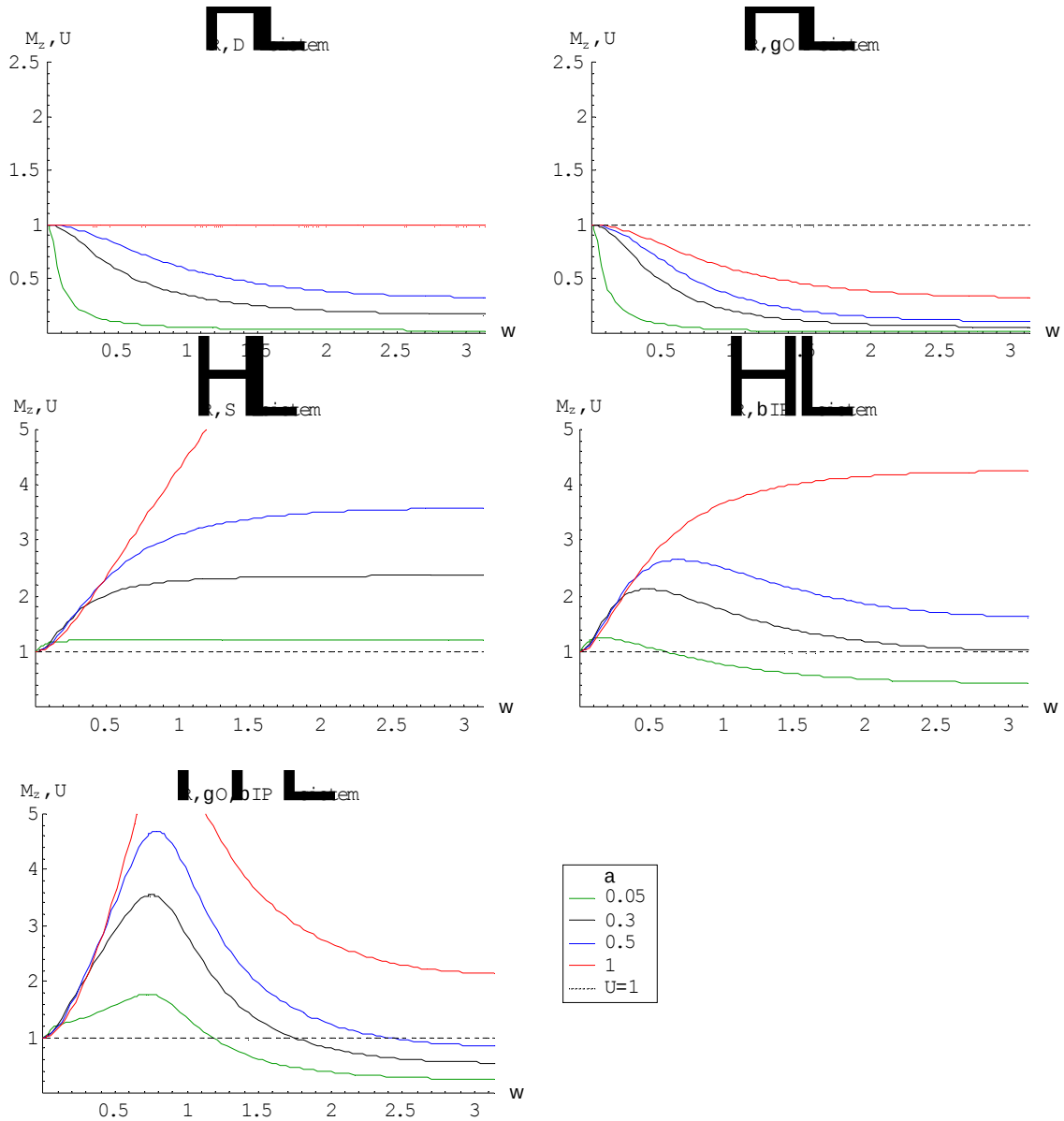
5.3. Frekvenčni odziv sistemov

Pri analizi časovnih odzivov smo na podlagi opažanj o ojačitvi oziroma oslabitvi signalov že podali določena predvidevanja glede možnosti pojava učinka biča. Analiza frekvenčnih odzivov nam omogoča podrobnejši vpogled v pojav učinka biča pri uporabi izbranih sistemov uravnavanja zalog. Frekvenčni odziv sistema na enem grafu prikaže, ali se sinusni signal pri prehodu skozi sistem ojači ali oslabi, za frekvence signalov v območju $(0, \pi)$. Kljub temu da je sinusna oblika signala matematična formulacija, moramo imeti ves čas v mislih, da lahko poljuben signal zapišemo kot vsoto sinusnih signalov različnih frekvenc iz območja $(0, \pi)$ (poglavje 3.3.4). Frekvenčni odziv nam torej podaja oceno o povečanju variabilnosti naročil nasproti variabilnosti povpraševanja za vse frekvence sinusne oblike funkcije povpraševanja. Ker pa so na grafu zajete vse frekvence, lahko podamo tudi oceno o velikosti učinka biča v celoti. Ojačitev signala M_z nam bo služilo kot merilo za velikost učinka biča U (C.3).

Že s hitrim pogledom na frekvenčne odzive (Slika 33) lahko potrdimo predvidevanjem, ki smo jih oblikovali pri analizi časovnih odzivov. Signal se je pri prehodu $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistema uravnavanja zalog oslabil. Velikost naročil je bila nižja od povpraševanja, kar je dajalo slutiti, da do pojava učinka biča ne bo prišlo. To lahko sedaj potrdimo, kajti frekvenčni odziv se v celotnem območju nahaja pod vrednostjo 1, kar pomeni, da do učinka biča ne bo prišlo ne glede na to, kakšno je povpraševanje. Frekvenčni odziv s povečevanjem frekvence vseskozi pada. Pri visokih frekvencah je variabilnost naročil že za pol ali več manjša od variabilnosti povpraševanja. Pri vrednosti $\omega=0$ imamo opravka s konstantnim povpraševanjem. Velikost naročil v tem primeru bo enaka povpraševanju. Temu ustrezno

bosta enaki variabilnosti naročil in povpraševanja. Velikost učinka biča bo $U=1$. Ta ugotovitev velja tudi pri vseh preostalih sistemih uravnavanja zalog.

Slika 33: Frekvenčni odziv sistemov uravnavanja zalog v odvisnosti od konstante glajenja povpraševanja α ($\alpha=\{0.05, 0.3, 0.5, 1\}$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

Pri (R,S) sistemu lahko ugotovimo nasprotno: frekvenčni odziv se vseskozi giblje nad vrednostjo 1, kar pomeni, da bo do učinka biča prišlo ne glede na značilnosti funkcije povpraševanja. Učinek biča bo večji pri večjih frekvencah. Variabilnost naročil tako lahko tudi nekajkrat preseže variabilnost povpraševanja.

Frekvenčna odziva $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistema sta bolj raznovrstna. Frekvenčni odziv se pri nizkih frekvencah nahaja nad mejo pojava učinka biča, vendar se pri višjih frekvencah ob

ustrezni izbiri parametrov sistema spusti pod mejo. Pri nizkih frekvencah bo torej prišlo do ojačitve signala in do učinka biča, medtem ko se pri višjih frekvencah signal oslabi in je variabilnost naročil manjša od variabilnosti povpraševanja. Ojačitev pri nižjih frekvencah je še posebej izrazita pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu, kjer je na levi polovici grafa visok vrh. Na desni mu sledi močan padec frekvenčnega odziva, ki je prav tako izrazitejši, kot pri $(R, \beta IP)$ sistemu.

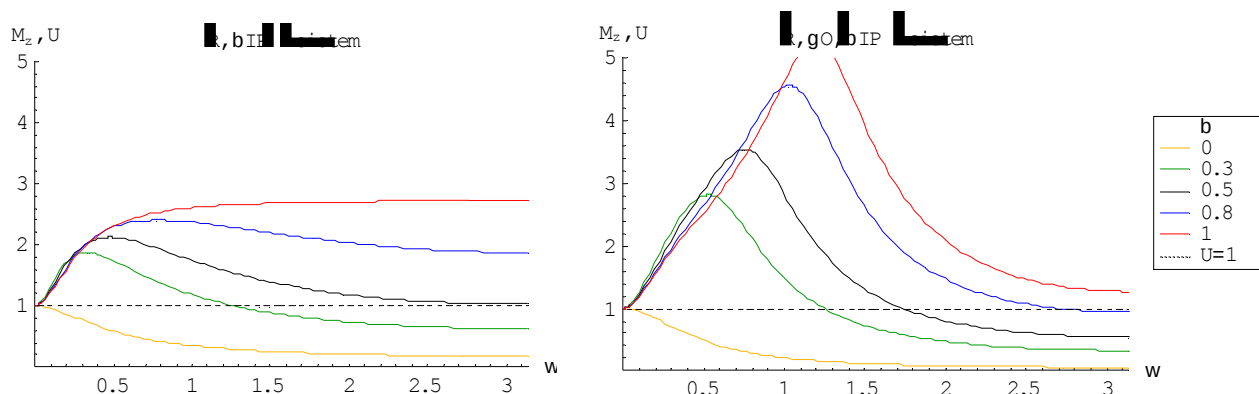
Analiza časovnih odzivov sistemov je pokazala velik vpliv izbire konstante glajenja povpraševanja na obnašanje sistemov. Podobno lahko velik vpliv parametra α opazimo tudi pri frekvenčnih odzivih (Slika 33). Kot smo že nekajkrat povedali, izbira nizke vrednosti parametra α zagotavlja bolj gladko funkcijo naročil in temu ustrezno manjšo variabilnost naročil. Pričakovati je, da bo učinek biča pri nizkih α manjši. Pričakovanjem lahko pritrdimo, saj je frekvenčni odziv pri izbiri nizke vrednosti parametra α nižji pri vseh analiziranih sistemih. Pri obeh prvih sistemih pride do dodatne oslabitve signala in ustreznega zmanjšanja variabilnosti povpraševanja. Pri (R, S) sistemu izbira nizke α ne more izničiti učinka biča. Ne glede na to kako močno zgladimo funkcijo povpraševanja bo variabilnost naročil vedno večja od variabilnosti povpraševanja. Učinek biča lahko v primeru, da povečamo odzivnost sistema in izberemo višjo vrednost parametra α , doseže velikost 5 in več. Izbira parametra α pri $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu lahko pomeni izbiro med sistemom uravnavanja zalog, pri katerem bo prišlo do učinka biča in takim, pri katerem do učinka biča ne bo prišlo. Pri visoki vrednosti α leži frekvenčni odziv v celoti nad mejo pojava učinka biča. V tem primeru bo do učinka biča prišlo ne glede na to, kakšno bo povpraševanje. Pri nizkih vrednostih α do ojačitve signala pride le pri majhnih frekvencah.

Za razliko od (R, S) sistema, kjer zmanjšamo variabilnost naročil z izbiro nizke vrednosti parametra α , si lahko pri $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu pomagamo z dodatnim glajenjem s pomočjo ustrezne izbire konstante glajenja stanja zalog β . Opazimo lahko, da je vpliv parametra β manjši (Slika 34). To lahko pojasnimo s tem, da se β pojavlja le v enem od členov pravila naročanja. Konstanta glajenja povpraševanja α vpliva na vrednost vseh členov in temu primerno v večji meri zgladi naročila. Pri $(R, \beta IP)$ sistemu izbira parametra β pomeni, ali bo frekvenčni odziv v celoti ali delno nad mejo pojava učinka biča ali pa v celoti pod mejo. Podobno velja za $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem, kjer je opazen tudi premik vrha frekvenčnega odziva proti višjim frekvencam z višanjem vrednosti parametra β .

Konstanta glajenja naročil γ ima v skladu s predhodnimi opažanji povsem različne učinke na obnašanje $(R, \gamma O)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema (Slika 35). Pri $(R, \gamma O)$ sistemu z izbiro nizke vrednosti parametra γ pride do dodatnega glajenja naročil, ki zniža njihovo variabilnost. Oblika frekvenčnega odziva v osnovi ostaja enaka, oziroma takšna, kot jo določa vrednost parametra α . Pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu opravlja parameter γ vlogo glajenja naročil le pri visokih frekvencah, kjer pride do zmanjšanja variabilnosti naročil, vendar je zmanjšanje po velikosti

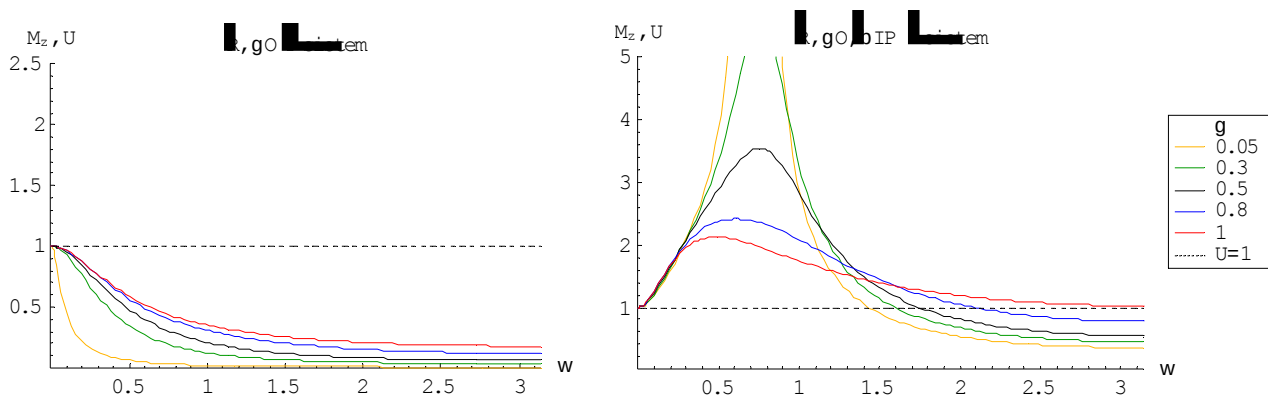
precej manjše, kot smo ga lahko opazili, ko smo spreminjali vrednost parametra β in predvsem vrednost parametra α . Vpliv parametra γ na pojav oscilacij v funkciji naročil se kaže v močno spremenjenem frekvenčnem odzivu pri manjših frekvencah. Oscilacije močno povečajo variabilnost naročil, kar je razvidno iz izrazitega vrha frekvenčnega odziva pri nizkih frekvencah. Nizka vrednost parametra γ poveča intenzivnost oscilacij in s tem variabilnost naročil okoli vrha.

Slika 34: Frekvenčni odziv sistemov uravnavanja zalog v odvisnosti od konstante glajenja stanja zalog β ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=\{0, 0.3, 0.5, 0.8, 1$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

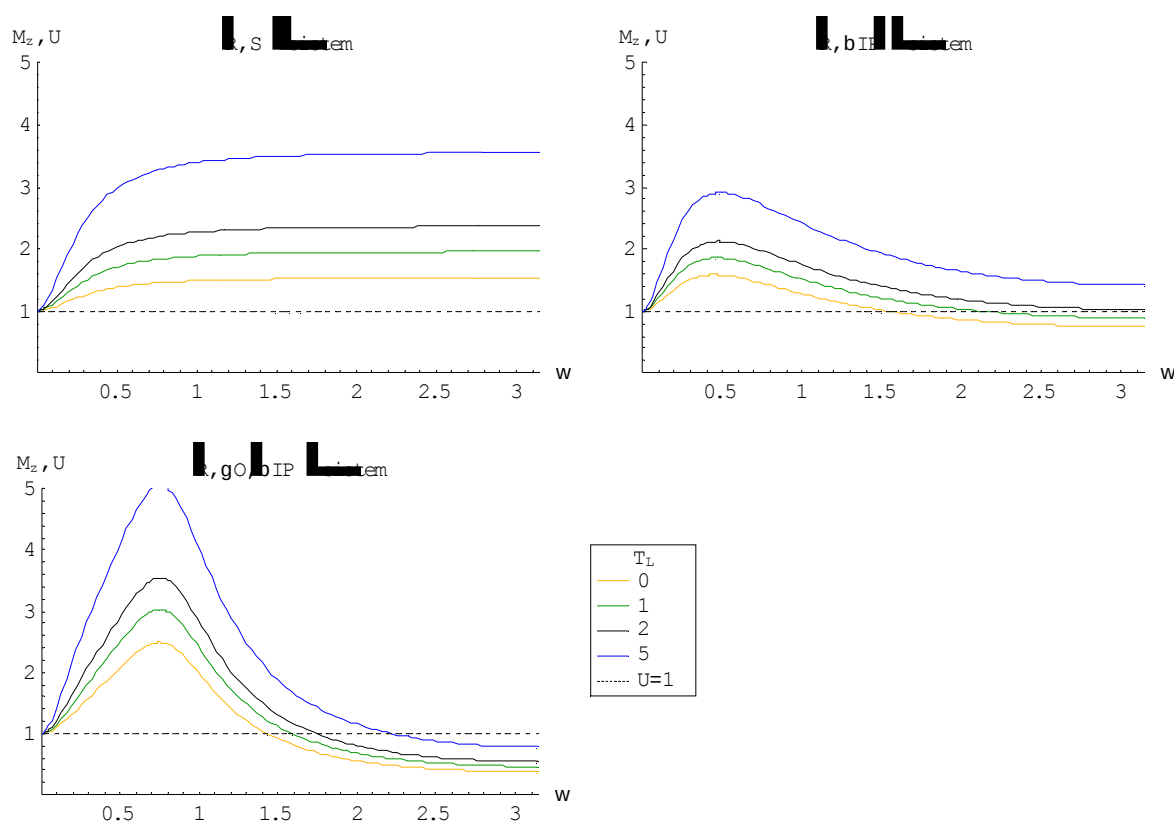
Slika 35: Frekvenčni odziv sistemov uravnavanja zalog v odvisnosti od konstante glajenja naročil γ ($\alpha=0.3$, $\gamma=\{0, 0.3, 0.5, 0.8, 1\}$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

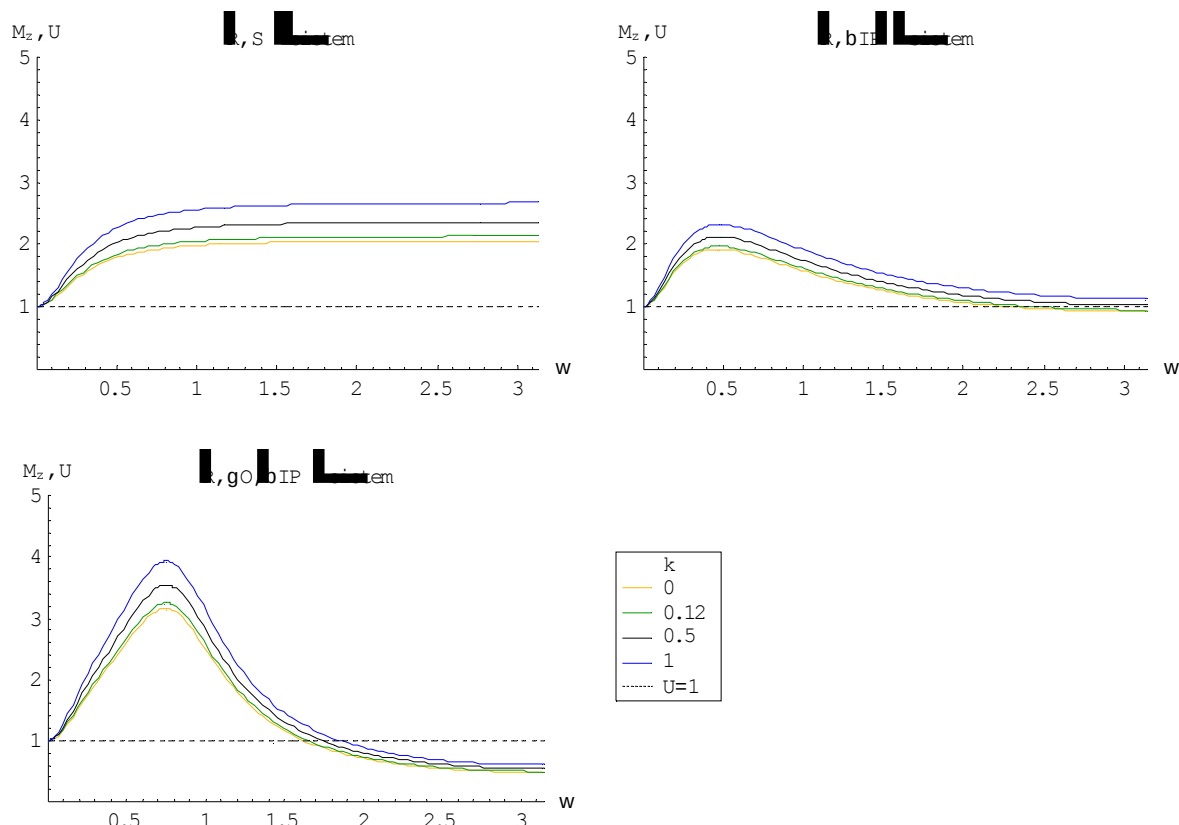
Na koncu si pogledjmo še vpliv dolžine dobavnega roka in višine varnostnih zalog na pojav učinka biča pri (R,S) , $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistemu (Slika 36 in Slika 37). Opazimo, da tako podaljšanje dobavnega roka, kot tudi povečanje varnostnih zalog, povzroči povečanje variabilnosti in dvig frekvenčnega odziva na celotnem frekvenčnem območju. Oblika frekvenčnega odziva v glavnih značilnostih ostaja enaka. Ne glede na to, s kakšnim povpraševanjem imamo opravka, bo podaljšanje dobavnega roka T_L in zvišanje parametra varnostnih zalog k pomenilo povečanje učinka biča. Ob dokaj realnih predpostavkah, ki smo jih naredili ob izbiri vrednosti parametrov T_L in k , vidimo, da je vpliv dobavnega roka na povečanje učinka biča večji. Če pogledamo natančneje, lahko opazimo, da je povečanje učinka biča sorazmerno s podaljševanjem dobavnega roka. Sklepamo lahko, da je velikost učinka biča naraščajoča linearna funkcija dolžine dobavnega roka. Podobno velja za višino varnostnih zalog.

Slika 36: Frekvenčni odziv sistemov uravnavanja zalog v odvisnosti od dolžine dobavnega roka T_L ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=0, 1, 2, 5$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

Slika 37: Frekvenčni odziv sistemov uravnavanja zalog v odvisnosti od vrednosti parametra k , ki določa višino varnostnih zalog ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=\{0, 0.12, 0.5, 1\}$).



Vir: lastno delo

5.4. Velikost učinka biča za izbrane vzorce povpraševanja

Pri analizi časovnih in frekvenčnih odzivov sistemov smo si delo olajšali s tem, da smo za vzorec povpraševanja vzeli idealistične primere povpraševanj v obliki stopnice, klanca in sinusne funkcije. Kljub temu da ti primeri na prvi pogled nimajo veliko skupnega z realnostjo, temu ni tako. V poglavju 2.3.1 smo realen vzorec povpraševanja predstavili kot časovno vrsto, ki jo sestavlja več tipičnih časovnih vrst. Analogijo med povpraševanjem v obliki klanca in trendom v povpraševanju smo že nakazali. Podobno velja za sinusni signal, ki je pogosto zelo dober približek sezonskosti ali cikličnosti v povpraševanju. Sedaj bomo poskusili analizirati odziv sistemov uravnavanja zalog na zapletenejše vzorce povpraševanja. V splošnem bo povpraševanje sestavljeno iz konstantnega nivoja, pozitivnega ali negativnega trenda, sezonske komponente in naključnega nihanja. Povpraševanje bomo v skladu z (1.1) zapisali kot:

$$D_t = a + bt + F_t + \varepsilon_t = a + bt + E \sin(2\pi\nu \cdot t) + N(0, \sigma) \quad (5.1)$$

Parameter a označuje nivo konstantnega povpraševanja, parameter b pa trend. Sezonsko komponento smo zapisali kot sinusno funkcijo s frekvenco $\omega = 2\pi\nu$ in amplitudo E .

Naključnost povpraševanja podaja normalna porazdelitev s povprečno vrednostjo 0 in odstopanjem v velikosti standardne deviacije σ . Na ta način bomo poskusili sestaviti nekaj vzorcev povpraševanja, ki bodo bolj realni.

Zanima nas, kako velika bo sprememba variabilnosti naročil nasproti variabilnosti povpraševanja. V kolikor so bo variabilnost povečala, je pri uporabi izbranega sistema uravnavanja zalog ob predpostavki izbranega vzorca povpraševanja, prišlo do učinka biča.

Izračun velikosti učinka biča, s pomočjo frekvenčnega odziva sistema uravnavanja zalog, ne zahteva, da vzorec povpraševanja zapišemo v obliki, ki jo podaja enačba (5.1). Procedura omogoča izračun za poljuben vzorec povpraševanja. Prednost omenjene enačbe je, da omogoča hitro generiranje vzorcev povpraševanja, ki so dovolj dobra ponazoritev »realnih« signalov. Opis izračuna velikosti učinka biča pri izbranih sistemih uravnavanja zalog za poljuben vzorec povpraševanja je podan v prilogi C.

V uvodu petega poglavja smo omenili možnost analize sistemov uravnavanja zalog s simulacijo. V potrditev izračunov velikosti učinka biča, dobljenih z uporabo metodologije prenosne funkcije, je bila narejena simulacija v obliki preglednice. V preglednici so bili tudi generirani izbrani vzorci povpraševanja, ki so bili pozneje preneseni v algoritem za izračun velikosti učinka biča s pomočjo frekvenčnega odziva. Opis simulacije in delni izpis simulacije sta podana v prilogi D.

Rezultati izračuna velikosti učinka biča za deset izbranih vzorcev povpraševanja so prikazani v Tabeli 1. Rezultati izračuna velikosti učinka biča z metodologijo prenosne funkcije so označeni z U_G , rezultati simulacije pa z U_{sim} . Parametri sistemov uravnavanja zalog so ves čas enaki: $\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$ in $k=0.5$. Zaradi večje preglednosti in v pomoč pri analizi časovnih in frekvenčnih odzivov ter izračuna velikosti učinka biča, so funkcije odzivov sistemov z izbranimi parametri vedno označene s črno črto. V pomoč pri analizi so v tabeli podani tudi časovni diagrami povpraševanja in ustrezni frekvenčni ekvivalent – periodogram povpraševanja (Slika 43).

Prvi vzorec povpraševanja je konstantni nivo povpraševanja z dokaj veliko naključno komponento. Temu ustrezno je značilno precej veliko nihanje signala iz obdobja v obdobje. Periodogram povpraševanja pokaže, da so v vzorcu povpraševanja dokaj enakomerno zajete frekvence iz celotnega spektra $(0, \pi)$. K izračunu velikosti učinka biča bo torej »prispeval« celoten frekvenčni odziv sistemov. Rezultati nas zdaj ne bi smeli več presenetiti. V skladu s pričakovanji v primeru prvih dveh sistemov, $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$, dobimo velikost učinka biča, ki je nižja od 1. Do pojava učinka biča torej ni prišlo. Pri preostalih sistemih je učinek biča prisoten. Najvišji je pri (R, S) sistemu, kjer je variabilnost naročil več kot dvakrat višja od variabilnosti povpraševanja.

Drugi vzorec povpraševanja je v osnovi enak prvemu, razlika je le v zmanjšani variabilnosti naključne komponente. Časovni diagram je zato manj buren, medtem ko ima periodogram enake značilnosti. V elektroniki je znano, da so v periodogramu šuma zastopane vse frekvence z enakimi amplitudami (D'Azzo, Houpis, 1966). Šum je v bistvu naključen signal. Oblika periodograma obeh do sedaj omenjenih vzorcev povpraševanja nas torej ne bi smela presenetiti. Velikost učinka biča je precej podobna, kot pri prvem vzorcu povpraševanja. Velikost učinka biča je neodvisna od variabilnosti povpraševanja samega. Učinek biča predstavlja spremembo variabilnosti, ta pa je enako velika za naključno povpraševanje, bodisi z veliko ali majhno variabilnostjo.

Tretji in četrti vzorec povpraševanja predstavljata pozitiven in negativen trend povpraševanja. Periodogram povpraševanja je v obeh primerih enak in ustrezno je enaka tudi velikost učinka biča pri posameznem sistemu uravnavanja zalog. V periodogramu so zastopane izključno nizke frekvence. Za izračun velikosti učinka biča bo torej bistven skrajni levi del frekvenčnih odzivov sistemov. Frekvenčni odzivi vseh sistemov pa imajo pri frekvenci nič vrednosti 1. Za $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistem vemo, da bo frekvenčni odziv z višanjem frekvence začel padati, medtem ko bo pri preostalih sistemih začel rasti. Pričakujemo torej, da bo velikost učinka biča manjša od 1 za prva dva sistema, in večja od 1 za preostale tri. Ker so frekvenčni odzivi sistemov pri nizkih frekvencah še vedno blizu vrednosti 1 pričakujemo, da bo tudi velikost učinka biča blizu 1. Rezultati v celoti potrjujejo pričakovanja.

Peti vzorec je kombinacija pozitivnega trenda in naključnosti. Periodogram se zaradi dodane naključnosti popolni tudi na desni strani, s čimer se pojavi tudi vpliv višjih frekvenc. Velikost učinka biča se pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu zmanjša, ker je njun frekvenčni odziv pri višjih frekvencah dodatno znižan. Pri (R, S) sistemu vemo, da frekvenčni odziv narašča na celotnem območju. Dodatek naključnosti bo tako še dodatno povečal variabilnost. Pri $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu prav tako pride do manjšega povečanja variabilnosti. Prispevek levega del periodograma, ki se ujema z vrhom frekvenčnega odziva, je torej večji od desnega dela, pri čemer vemo, da sta omenjena sistema sposobna zmanjšati variabilnost.

V šestem in sedmem vzorcu povpraševanja se konstantnemu nivoju priključuje le komponenta sezonskosti. Časovni diagram obeh vzorcev je temu ustrezno sinusna funkcija. Periodogram dobi izrazit vrh pri frekvenci sinusne funkcije. V skladu z ugotovitvami, ki smo jih podali pri obravnavi trenda v povpraševanju, nizke frekvence v periodogramu pomenijo velikost učinka biča okoli 1. Z visoko frekvenco sedmega vzorca povpraševanja smo se pomaknili v desno na frekvenčnem odzivu toliko, da pri $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu pride do zmanjšanja učinka biča.

Preostali trije vzorci povpraševanja so kombinacija že omenjenih, zato posebna interpretacija rezultatov ni potrebna.

Tabela 1: Rezultati izračuna velikosti učinka biča pri izbranih sistemih uravnavanja zalog z metodologijo prenosne funkcije in simulacije, za deset vzorcev povpraševanja (vir: lastno delo).

PARAMETRI POVPRAŠEVANJA			VELIKOST UČINKA BIČA PRI SISTEMIH URAVNAVANJA ZALOG $\alpha=0.3, \gamma=0.5, \beta=0.5, T_L=2, k=0.5$						ČASOVNI DIAGRAM POVPRAŠEVANJA	PERIODOGRAM POVPRAŠEVANJA
N			(R,D)	(R, γO)	(R,S)	(R, βIP)	(R, $\gamma O, \beta IP$)			
1	a	100	UG	0,349	0,259	2,270	1,289	1,477		
	b		U_{Sim}	0,354	0,265	2,268	1,466	1,740		
	σ	30	$napaka$	1,4%	2,3%	0,1%	12,1%	15,1%		
	E v									
2	a	100	UG	0,390	0,313	2,236	1,284	1,529		
	b		U_{Sim}	0,389	0,308	2,240	1,491	1,890		
	σ	30	$napaka$	0,3%	1,6%	0,2%	13,9%	19,1%		
	E v									
3	a	100	UG	0,929	0,909	1,212	1,265	1,365		
	b	1	U_{Sim}	0,919	0,904	1,317	1,354	1,472		
	σ		$napaka$	1,1%	0,6%	8,0%	6,6%	7,3%		
	E v									
4	a	100	UG	0,929	0,909	1,212	1,265	1,365		
	b	-1	U_{Sim}	0,919	0,904	1,317	1,354	1,472		
	σ		$napaka$	1,1%	0,6%	8,0%	6,6%	7,3%		
	E v									
5	a	100	UG	0,682	0,640	1,845	1,330	1,578		
	b	1	U_{Sim}	0,659	0,623	1,918	1,462	1,742		
	σ	30	$napaka$	3,5%	2,7%	3,8%	9,0%	9,4%		
	E v									
6	a	100	UG	0,945	0,932	1,251	1,300	1,260		
	b		U_{Sim}	0,943	0,929	1,233	1,376	1,334		
	σ		$napaka$	0,2%	0,3%	1,5%	5,5%	5,5%		
	E v	50 2								
7	a	100	UG	0,254	0,117	2,331	1,228	1,129		
	b		U_{Sim}	0,253	0,116	2,331	1,387	1,294		
	σ		$napaka$	0,4%	0,9%	0,0%	11,5%	12,8%		
	E v	50 24								
8	a	100	UG	0,779	0,755	1,713	1,312	1,376		
	b		U_{Sim}	0,779	0,753	1,692	1,434	1,515		
	σ	30	$napaka$	0,0%	0,3%	1,2%	8,5%	9,2%		
	E v	50 2								
9	a	100	UG	0,838	0,820	1,547	1,309	1,411		
	b	1	U_{Sim}	0,839	0,819	1,551	1,391	1,515		
	σ	30	$napaka$	0,1%	0,1%	0,3%	5,9%	6,9%		
	E v	50 2								
10	a	100	UG	0,582	0,538	2,020	1,284	1,352		
	b	1	U_{Sim}	0,580	0,539	2,035	1,422	1,513		
	σ	30	$napaka$	0,3%	0,2%	0,7%	9,7%	10,6%		
	E v	50 2								
POVPREČJE			UG	0,668	0,619	1,764	1,287	1,384		
			U_{Sim}	0,663	0,616	1,790	1,414	1,549		
			$napaka$	0,8%	0,9%	2,4%	8,9%	10,3%		

6. KOMENTAR K ANALIZI UČINKA BIČA PRI IZBRANIH SISTEMIH URAVNAVANJA ZALOG

Namen magistrskega dela je bil raziskati vpliv uporabe izbranih sistemov uravnavanja zalog na pojav učinka biča v dobavni verigi. Odločitev podjetja o uporabi določenega sistema uravnavanja zalog je racionalna odločitev, ki jo podjetje sprejme s ciljem povečanja učinkovitosti procesa obnavljanja zalog v podjetju in zagotavljanja ustrezne ravni storitve. Pokazali bomo, da se »optimalna« izbira sistema uravnavanja zalog lahko izkaže za neučinkovito in neprimerno. V poglavju 2.5.3 smo razčlenili ovire pri sodelovanju v verigi oziroma vzroke za nastanek učinka biča v verigi na štiri skupine. Podrobneje se bomo posvetili dvema skupinama ovir, in sicer oviram pri obdelavi informacij in operativnim oviram. Pokazali bomo, da se omenjene ovire lahko pojavljajo pri uporabi izbranih sistemov uravnavanja zalog in posledično povzročijo nastanek učinka biča.

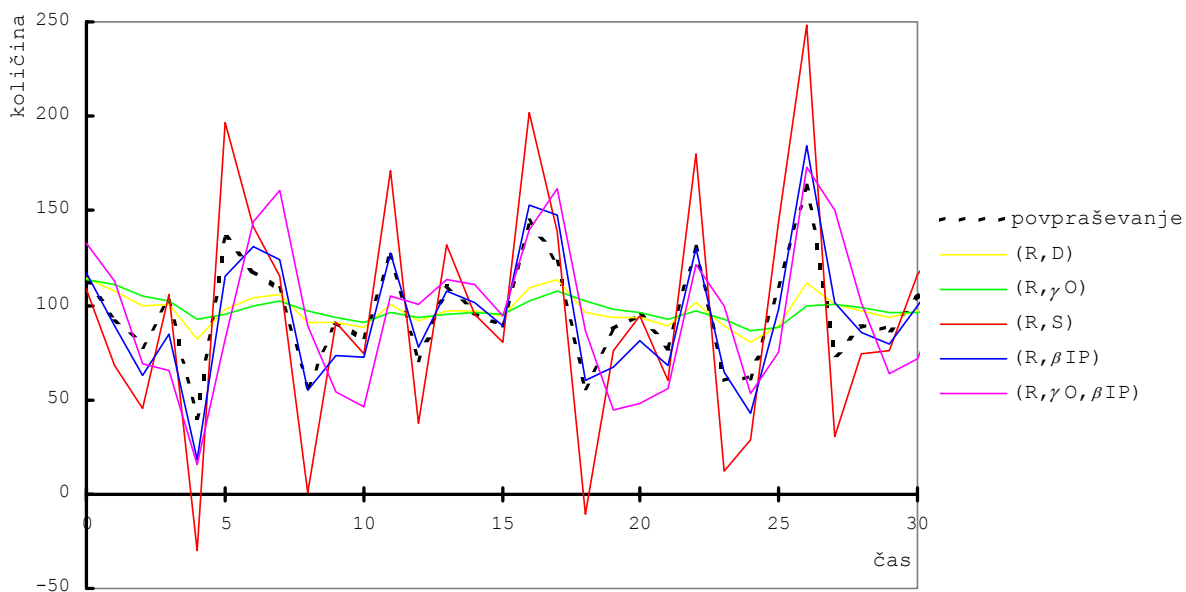
6.1. Sistemi uravnavanja zalog, kot generatorji učinka biča v dobavni verigi

Pri obeh prvih sistemih, $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu, se je izkazalo, da do pojava učinka biča ne pride. Prav nasprotno, pri obeh je variabilnost naročil nižja od variabilnosti povpraševanja. Pri $(R, \hat{D})$ sistemu je velikost naročila enaka predvidenemu povpraševanju v prihodnjem obdobju. Uporaba metode eksponentnega glajenja pri predvidevanju povpraševanja zagotavlja, da bo variabilnost naročil nižja ali kvečjemu enaka variabilnosti povpraševanja. Na skok v dejanskem povpraševanju $(R, \hat{D})$ sistem vedno reagira z zmanjšanim skokom v predvidenem povpraševanju, to pa je že dovolj, da do povečanja variabilnosti ne more priti. $(R, \gamma O)$ sistem ima dodatno funkcijo glajenja naročil. V naročilo predvidenemu povpraševanju prištejemo še delež neujemanja preteklega naročila in predvidenega povpraševanja. V kolikor torej pride do porasta povpraševanja, se dvigne predvideno povpraševanje, enako kot pri $(R, \hat{D})$ sistemu. Po drugi strani je neujemanje preteklega naročila in predvidenega povpraševanja, zaradi dviga predvidenega povpraševanja, v splošnem negativno, kar v celoti zmanjša višino naročila. Posledično se še dodatno zmanjša variabilnost naročil. Glede pojava učinka biča omenjena sistema torej nista ogrožena.

Pri uporabi (R, S) , $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog v procesu obnavljanja zalog smo pokazali, da lahko pričakujemo, da bo prišlo do učinka biča. Posebej med temi tremi izstopa (R, S) sistem, pri katerem bo do učinka biča prišlo, ne glede na izbiro parametrov sistema in ne glede na to, s kakšnim povpraševanjem imamo opravka (glej graf frekvenčnega odziva (R, S) sistema, Slika 33). Če hočemo poiskati vzroke za povečanje variabilnosti, je potrebno ponovno pogledati v logiko delovanja vseh treh sistemov. Osnovno pravilo naročanja sestavljajo trije členi (3.1). Prva dva člena, to sta predvideno povpraševanje in glajenje naročil, očitno nista generatorja povečanja variabilnosti. To smo potrdili, s tem ko smo za $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistem uravnavanja zalog pokazali, da zmanjšujeta variabilnost.

Podrobneje se torej posvetimo tretjemu členu, to je členu glajenja stanja zalog. Ob podajanju novega naročila podjetje na osnovi predvidenega povpraševanja oceni ciljno stanje zalog (3.19). V višini naročila predvidenemu povpraševanju prišteje delež neujemanja trenutnega stanja zalog s ciljnim stanjem zalog. Povedali smo že, da je ciljno stanje zalog projekcija pričakovanj o povpraševanju za prihodnje obdobje dolžine dobavnega roka. Daljši bo dobavni rok, dlje v prihodnost bo podjetje projiciralo svoja pričakovanja.

Slika 38: Prikaz povpraševanja ($\alpha=100$, $\sigma=30$) in naročil, določenih z izbranimi sistemi uravnavanja zalog ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$), v odvisnosti od časa.



Vir: lastno delo

Poglejmo si primer, ko podjetje zazna rast povpraševanja v preteklem obdobju. V podjetju najprej izračunajo predvideno povpraševanje za prihodnje obdobje z metodo preprostega eksponentnega glajenja. Ker ima metoda lastnost, da gladi spremembe v povpraševanju, bo sprememba predvidenega povpraševanja manjša od spremembe dejanskega povpraševanja. Ne glede na izbiro konstante glajenja povpraševanja α se bo predvideno povpraševanje, nasproti napovedi v preteklem obdobju, nekoliko povečalo. Podjetje rasti v predvidenem povpraševanju ne bo upoštevalo le v naslednji periodi naročanja (preko prvega člena v osnovnem pravilu naročanja), temveč bo pričakovanja preko ciljnega stanja zalog projiciralo na dolžino dobavnega roka. Podjetje bo tako dejansko trend rasti povpraševanja pretekle periode naročanja upoštevalo na sorazmerno daljšem prihodnjem obdobju skupne dolžine periode naročanja in dobavnega roka. V primeru sorazmerno dolgega dobavnega roka bo že majhna sprememba v povpraševanju povzročila nekajkrat višjo spremembo v višini ciljnega stanja zalog. Temu ustrezno bo visoko neujemanje med ciljnim in trenutnim stanjem zalog in posledično bo v splošnem relativna sprememba naročila večja od spremembe dejanskega povpraševanja. V kolikor bo v naslednji periodi naročanja prišlo do padca v povpraševanju, bo podjetje na padec zopet reagiralo s prekomernim znižanjem naročila, ki bo posledica

spremenjenih pričakovanj glede povpraševanja. S tem se poveča variabilnost naročil nasproti variabilnosti povpraševanja in pride do pojava učinka biča (Slika 38, kjer vidimo značilno močno nazobčano obliko funkcije naročil, ki je posebej izrazita pri (R,S) sistemu).

Na vpliv dolžine projekcije pričakovanj na višino naročila pa vpliva tudi to, v kakšni meri bomo v izračunu naročila upoštevali neujemanje med trenutnim in ciljnim stanjem zalog. Čim večji delež neujemanja bomo upoštevali, tem večja bo relativna sprememba naročila glede na povpraševanje. Delež neujemanja trenutnega stanja zalog s ciljnim stanjem določa vrednost konstante glajenja zalog β . Z izbiro nizke vrednosti parametra β preko tega, da neujemanje upoštevamo v manjši meri, dejansko skrajšamo časovno obdobje, preko katerega podjetje projicira svoja pričakovanja. Spremembe v pričakovanjih se bodo tako odražale preko krajših časovnih obdobj, kar bo zmanjšalo spremenljivost višine naročil in zmanjšalo učinek biča. Zgornje ugotovitve lahko potrdimo s pogledom na frekvenčne odzive $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema (Slika 35), kjer lahko vidimo, da izbira nizke vrednosti parametra β zmanjša oziroma celo izniči učinek biča. V skrajnem primeru, ob izbiri vrednosti parametra $\beta=0$, se projekcija pričakovanj skrajša na dolžino ene periode naročanja. To pomeni, da bo podjetje spremembo v predvidenem povpraševanju upoštevalo le v obdobju do naslednjega naročila. Upoštevalo jo bo torej le v višini dejanske spremembe v predvidenem povpraševanju. Ta sprememba pa je, kot posledica uporabe preprostega eksponentnega glajenja pri predvidevanju povpraševanja, manjša od spremembe dejanskega povpraševanja. Variabilnost naročil je posledično nižja od variabilnosti povpraševanja.

Sedaj se vrnimo nekoliko nazaj in si pogledjmo natančneje, kakšen je vpliv dolžine dobavnega roka na pojav učinka biča. Vpliv parametra β na delovanje sistema uravnavanja zalog bomo izničili, s tem da bomo postavili $\beta=1$. S tem bomo analizo treh sistemov omejili na analizo (R,S) sistema. Ugotovili smo že, da podaljšanje dobavnega roka efektivno podaljša projekcijo pričakovanj podjetja in s tem poveča variabilnost naročil. Velikost učinka biča se z daljšanjem dobavnega roka povečuje (Slika 37). Zanimivo je pogledati, kaj se zgodi, če dolžino dobavnega roka skrajšamo na nič. Podjetje ob preteku vsake periode naročanja poda naročilo. Izpolnjeno naročilo od višjega člena dobavne verige prispe nemudoma. Dolžino projekcije prihodnjega povpraševanja smo torej efektivno zmanjšali na nič, s čimer je na nič padla tudi višina ciljnega stanja zalog (ob predpostavki, da podjetje nima varnostnih zalog). Pravilo naročanja (R,S) sistema lahko v tem primeru zapišemo kot:

$$O_t = \hat{D}_t - IP_t, \quad \text{pri } T_L=0 \quad (5.2)$$

Višina naročila bo torej za stanje zalog zmanjšano predvideno povpraševanje. V skladu s frekvenčnim odzivom (R,S) sistema za vrednost parametra $T_L=0$ (Slika 37) bi morale zgornje pravilo naročanja povzročiti nastanek učinka biča pri poljubnem vzorcu povpraševanja. Če bi v pravilu naročanja upoštevali le prvi člen (v skladu z ugotovitvami pri analizi $(R, \hat{D})$ sistema), do učinka biča ne bi prišlo. Podrobneje si pogledjmo vpliv drugega člena, to je stanja

zalog. Povprečno stanje zalog je nič, saj so zaloge v dobavi vedno enake nič (posledica ničelnega dobavnega roka), povprečne neto zaloge pa so prav tako enake nič. O »povprečnem« stanju sistema lahko govorimo v primeru, ko je sistem soočen z nespremenljivim konstantnim povpraševanjem. Poglejmo, kaj se zgodi v primeru, če sistem vzpodbudimo iz »povprečnosti« s skokom v povpraševanju. Variabilnosti povpraševanja in naročil sta v tem primeru enaki nič, velikost učinka biča pa je natančno $U=1$. Stanje zalog bo v trenutku podajanja novega naročila negativno, kot posledica nepričakovanega povečanja povpraševanja. Negativno stanje zalog prištejemo predvidenemu povpraševanju. Sprememba stanja zalog je sorazmerna s spremembo dejanskega povpraševanja (iz kontinuitetne enačbe za stanje zalog (3.12)). Če k temu prištejemo še spremembo v predvidenem povpraševanju, je to dovolj, da se variabilnost naročil poveča nad variabilnost povpraševanja. Tudi v primeru ničelnega dobavnega roka bo pri (R,S) sistemu prišlo do učinka biča.

Frekvenčni odzivi (R,S) , $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistema uravnavanja kažejo na to, da povečanje višine varnostnih zalog vodi k povečanju učinka biča (Slika 42). To je posledica tega, da se višina varnostnih zalog ob vsakem naročanju oblikuje v skladu s predvidenim povpraševanjem in dolžino dobavnega roka (3.16). Formulacijo varnostnih zalog lahko primerjamo z definicijo ciljnega stanja zalog. Če predvideno povpraševanje ene periode naročanja pomnožimo z dolžino dobavnega roka, dobimo ciljno stanje zalog. Varnostne zaloge dobimo, s tem da predvideno povpraševanje pomnožimo z parametrom varnostnih zalog k in korenom dolžine dobavnega roka, podaljšanega za eno periodo naročanja. Obstaja torej analogija med vplivom višine varnostnih zalog in dolžine dobavnega časa na pojav učinka biča. Učinek podaljšanja dobavnega roka preko varnostnih zalog je torej v osnovi enak učinku podaljšanja dobavnega roka na ciljno stanje zalog. Lahko bi celo dejali, da varnostne zaloge dodatno podaljšajo dobavni rok. Posledica tega je, da se projekcija pričakovanih podjetja podaljša za prispevek, ki ga prinesejo varnostne zaloge, pri čemer se dodatno povečata variabilnost naročil in učinek biča.

Uporaba sistemov uravnavanja zalog lahko torej povzroči povečanje variabilnosti naročil nasproti variabilnosti povpraševanja. Posledica tega je nastanek učinka biča. V primeru (R,S) sistema uravnavanja zalog je že konstrukcija sistema takšna, da je povečanje variabilnosti neizogibno. Sistem uravnavanja zalog je torej lahko sam generator učinka biča, ne glede na to s kakšnim povpraševanjem imamo opravka. To potrjuje dejstvo, da smo v končni analizi, katere temelj so frekvenčni odzivi sistemov, sprostili vse omejitve glede parametrov povpraševanja. Z analizo smo zajeli vse možne vzorce povpraševanja. Določen sistem uravnavanja zalog je torej generator povečanja variabilnosti izključno zaradi konstrukcije sistema samega. Pokazali smo, da na povečanje variabilnosti vplivata tudi dolžina dobavnega roka ter višina varnostnih zalog. Z izboljšanjem sodelovanja v dobavni verigi podjetje lahko vpliva na skrajšanje dobavnega roka, kar bi zmanjšalo učinek biča. Ob tem bi se zmanjšala stopnja negotovosti v verigi, posledica tega pa bi bilo znižanje varnostnih zalog ob predpostavki enake ravni storitve.

Posebej zanimivo je obnašanje $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog. Pričakovali bi, da bo s tem, ko $(R, \beta IP)$ sistemu dodamo možnost glajenja naročil, učinek biča manjši. V nasprotju s pričakovanji se učinek biča poveča, kar je posledica oscilacij, ki se pojavijo v vzorcu naročil. Bolj zapleteno pravilo naročanja oziroma kombinacija dveh metod glajenja ne zagotavlja zmanjšanja učinka biča, ravno nasprotno, variabilnost naročil je ob uporabi $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema večja kot pri uporabi $(R, \beta IP)$ sistema.

Potrebno je poudariti, da povpraševanja nikoli nismo označili kot končno povpraševanje. Analiza učinka biča je v tem pogledu zelo splošna, saj njeni rezultati veljajo za poljuben člen dobavne verige. V primeru proizvajalca povpraševanje predstavlja končno povpraševanje, medtem ko pri distributerju povpraševanje predstavljajo naročila prodajalca. Naročila so v prvem primeru naročila prodajalca distributerju, v drugem pa naročila distributerja proizvajalcu.

6.2. Vpliv učinka biča in stroškov zalog na izbiro sistema uravnavanja zalog

Znano je, da je uporaba periodičnega sistema uravnavanja zalog z naročanjem do ciljne zaloge (krajše smo ga poimenovali (R, S) sistem) povezana z najnižjimi stroški zalog, pod predpostavko, da v procesu obnavljanja zalog ni fiksnih stroškov naročanja (Chen et al., 2000). Po drugi strani pa smo pokazali, da pri (R, S) sistemu vedno pride do pojava učinka biča in da je ta največji med vsemi izbranimi sistemi uravnavanja zalog. Na prvi pogled sta obe trditvi nasprotujoči, saj vemo, da povečana variabilnost v verigi pripelje do povečane neučinkovitosti in povišanja stroškov. Kako torej na stroške zalog in posledično na izbiro sistema uravnavanja zalog vpliva učinek biča?

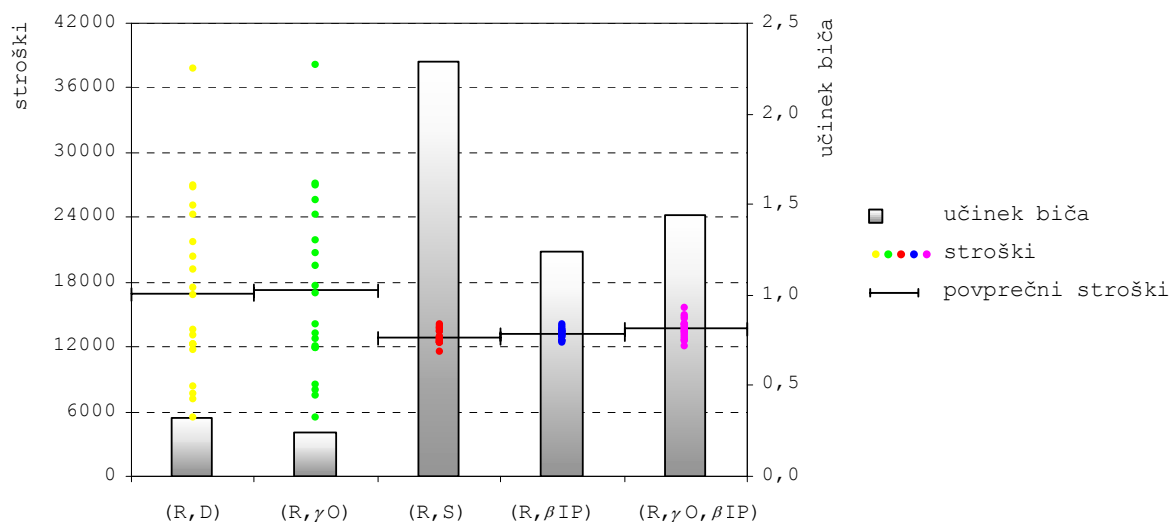
Opis delovanja sistemov uravnavanja zalog s pomočjo simulacije nam omogoča, da ocenimo stroške zalog v procesu obnavljanja zalog. V analizi se bomo omejili na tri skupine stroškov zalog:

- stroške skladiščenja zalog: variabilni stroški, ki so odvisni od višine zalog pri roki in časa skladiščenja;
- stroške izčrpanja zalog: variabilni stroški, ki ustrezajo zmanjšanemu prihodku na račun tega, da ne moremo zadostiti povpraševanju;
- stroški transporta ali spreminjanja velikosti proizvodnega svežnja: fiksni stroški povezani s prevozom ali proizvodnjo določene količine izdelkov.

Ločili bomo dva primera, kjer bomo v prvem predpostavili, da so stroški zalog le variabilni, v drugem primeru pa bomo variabilnim stroškom dodali fiksne stroške zalog. V obeh primerih smo izračun stroškov opravili na dvajsetih vzorcih naključnega povpraševanja, kjer nismo spreminjali povprečne vrednosti in standardnega odklona povpraševanja.

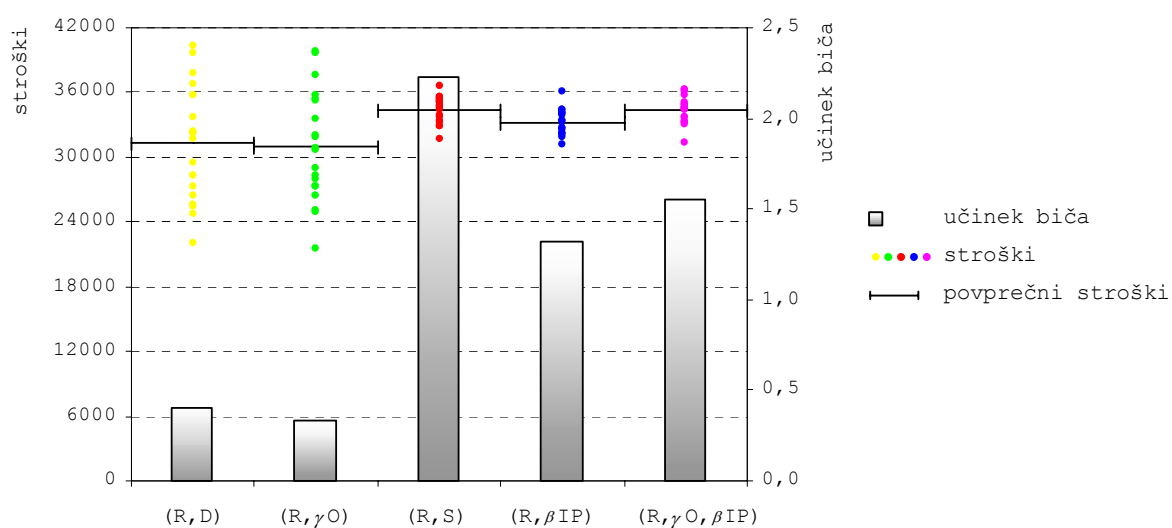
Če upoštevamo le variabilne stroške se izkaže, da so povprečni stroški najnižji pri (R, S) sistemu. Nekoliko višji so pri $(R, \beta IP)$ in $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu in najvišji pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu (Slika 39). Obratno velja za učinek biča, ki je večji pri sistemih z nizkimi stroški zalog. V kolikor v strukturi stroškov zalog ni fiksnih stroškov lahko pritrdimo dejstvu, da je izbira (R, S) sistema optimalna.

Slika 39: Velikost učinka biča in višina variabilnih stroškov zalog pri izbranih sistemih uravnavanja zalog.



Vir: lastno delo

Slika 40: Velikost učinka biča in višina variabilnih in fiksnih stroškov zalog pri izbranih sistemih uravnavanja zalog.



Vir: lastno delo

Če v stroške zalog vključimo tudi fiksne stroške, pride do relativnega padca povprečnih stroškov pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu nasproti ostalim. (R, S) sistem preide od optimalnega sistema v prvem primeru do sistema z najvišjimi stroški v drugem primeru (Slika 40). Povprečni stroški pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu so v obeh primerih višji od stroškov pri $(R, \beta IP)$ sistemu.

Dodatek fiksnih stroškov prinese prednost podjetjem, ki uporabljajo sisteme uravnavanja zalog, pri katerih ne pride do pojava učinka biča. Primer takšnega podjetja je proizvajalec, katerega proizvodnja je najučinkovitejša ob določeni velikosti proizvodnega svežnja. Če proizvajalec dobiva močno spreminjajoča naročila nižjega člena veriga, mora neprestano spreminjati velikost proizvodnega svežnja. Stroški zmanjšane ali povečane proizvodnje na enoto izdelka pa so lahko bistveno višji od optimalnih.

Izbira sistema uravnavanja zalog je kompromis med zmanjšanjem velikosti učinka biča in zmanjšanjem stroškov zalog. Če učinek biča v podjetju povzroči precejšnje povečanje stroškov predvsem na račun fiksnih stroškov, se bo podjetje odločilo za sistem uravnavanja zalog, ki zmanjšuje velikost učinka biča, torej za $(R, \hat{D})$ ali $(R, \gamma O)$ sistem. Podjetje, ki stavi na visoko odzivnost in v katerem povečanje variabilnosti nima velikega vpliva na stroške, bo raje izbralo (R, S) sistem. Izbira $(R, \beta IP)$ sistema je srednja pot med zgornjima skrajnostima in se ob določenem vzorcu povpraševanja lahko izkaže za optimalno. Izkaže se, da uporaba osnovnega pravila naročanja, to je pravila naročanja v $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu, ne prinese zmanjšanja velikosti učinka biča niti zmanjšanja stroškov zalog v primerjavi z $(R, \beta IP)$ sistemom. Izbira $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog tako v nobenem primeru ne more biti optimalna.

Na koncu omenimo opazno nihanje izmerjenih stroškov zalog v opravljenih meritvah $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistema. Za razliko od treh kompleksnejših sistemov pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu ni potrebno spremljati stanja zalog. Posledica tega je, da velika sprememba povpraševanja močno poveča ali zmanjša stanje zalog. Ker stanja zalog ne spremljamo, ne moremo neposredno vplivati na višino stanja zalog. V kolikor je gibanje povpraševanja ugodno bo to pomenilo zmanjšanje stroškov zalog. Če je neugodno, se lahko zgodi, da se v podjetju dalj časa ohranja neustrezna višina stanja zalog, kar bo posledično dvignilo stroške.

6.3. Vpliv dostopnosti informacije o končnem povpraševanju na učinek biča

Onemogočen dostop do informacije o končnem povpraševanju v dobavni verigi je v literaturi naveden kot eden glavnih vzrokov za pojav učinka biča. Preverimo, ali lahko učinek biča zmanjšamo s tem, da višjim členom verige omogočimo dostop do informacije o končnem povpraševanju. Da pokažemo možnosti zmanjšanja učinka biča v dobavni verigi, moramo analizo razširiti na vsaj dva člena verige. V kolikor se skozi verigo informacija o končnem povpraševanju ne prenaša, ima dostop do končnega povpraševanja le najnižji člen dobavne

verige – prodajalec. Pri prodajalcu koristi (iz naslova dostopa do informacije o končnem povpraševanju) ne bo, saj je končno povpraševanje hkrati tudi dejansko povpraševanje, s katerim se sooča. Pri višjih členih verige povpraševanje predstavljajo naročila neposrednega nižjega člena verige. Predpostavka je, da bi se učinek biča v verigi zmanjšal, če bi člen verige pri predvidevanju povpraševanja uporabljal informacijo o končnem povpraševanju in ne naročila nižjega člena. Variabilnost naročil proizvajalca nasproti variabilnosti končnega povpraševanja bi torej morala biti nižja, v kolikor ima proizvajalec dostop do informacije o končnem povpraševanju.

Slika 41: Shema dvonivojske dobavne verige, v kateri je omogočen dostop do informacije o končnem povpraševanju.



Vir: lastno delo

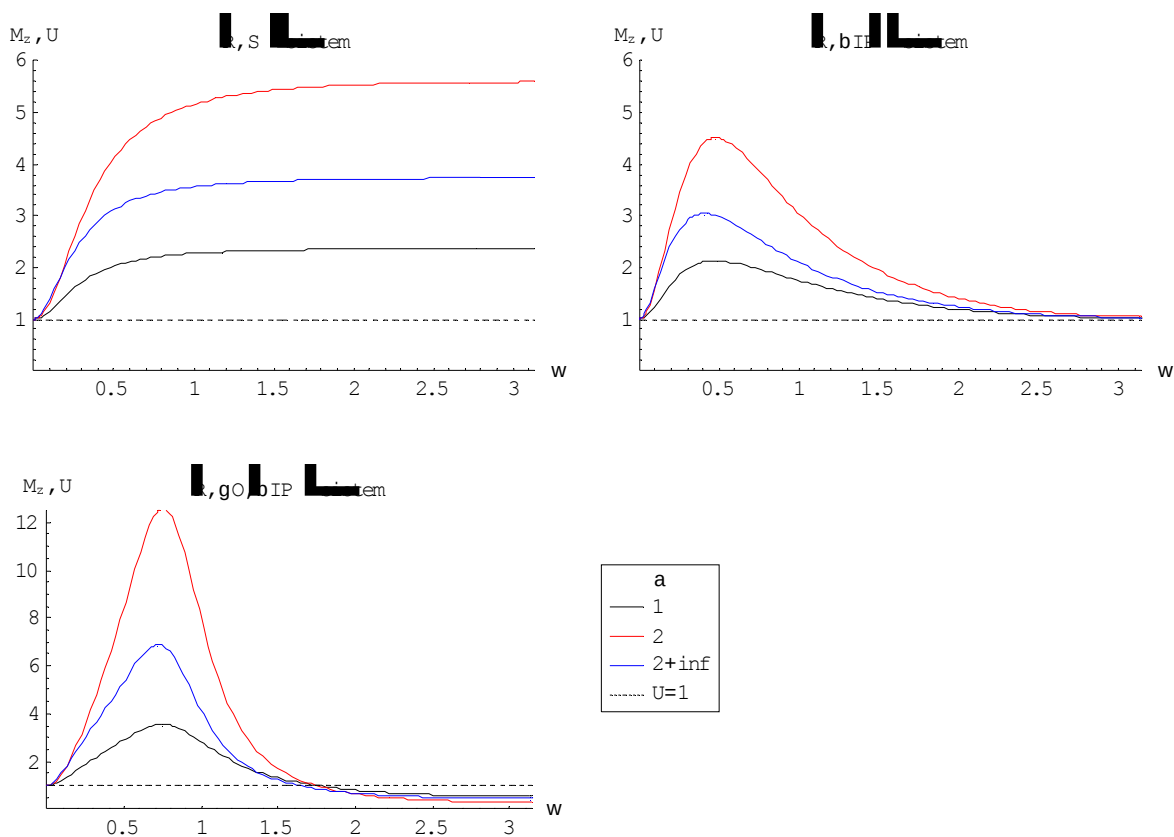
Analizo bo torej potrebno razširiti na dva člena dobavne verige. Predpostavili bomo, da oba člena verige uporabljata enak sistem uravnavanja zalog. Očitni kandidati za analizo so (R,S) , $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistem, pri katerih smo že pokazali, da pride do učinka biča. Izračunali bomo prenosno funkcijo, ki bo povedala, kako se signal o končnem povpraševanju (pri prehodu preko obeh členov) spremeni v signal naročil proizvajalca. Tu bomo upoštevali dva scenarija. V prvem bo edini tok informacij do proizvajalca v obliki naročil prodajalca, v drugem pa bomo s tokom naročil do prodajalca poslali tudi informacijo o končnem povpraševanju. Izračun prenosnih funkcij kombinacije sistemov uravnavanja zalog, za prodajalca in proizvajalca, je za oba scenarija podan v prilogi E.

Poglejmo si najprej, kakšen je frekvenčni odziv dvonivojske dobavne verige, ko gornjemu členu ni omogočen dostop do informacije o končnem povpraševanju. Na frekvenčnem odzivu je dobro viden izrazit dvig funkcije frekvenčnega odziva, nasproti frekvenčnemu odzivu prodajalca samega, na celotnem območju (Slika 42). Pride do dodatnega povečanja variabilnosti naročil proizvajalca, glede na variabilnost naročil prodajalca. Celotno povečanje variabilnosti v dvonivojski verigi je približno 6-kratno v primeru (R,S) sistema, v vrhu frekvenčnega odziva $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistema pa celo več kot 12-kratno. V skladu s predpostavko, da oba člena uporabljata enak sistem uravnavanja zalog, ne preseneča, da se osnovna oblika

frekvenčnega odziva ne spremeni. V primeru, da ima proizvajalec dostop do informacije o končnem povpraševanju, pride pri vseh treh sistemih do znižanja frekvenčnega odziva na celotnem območju. S tem smo jasno potrdili, da pride do zmanjšanja velikosti učinka biča v verigi.

Nekoliko nas zmoti le desno območje frekvenčnega odziva ($R, \gamma O, \beta IP$) sistema, kjer pride do obrnjene situacije. Frekvenčni odziv za primer, ko v verigi informacija o končnem povpraševanju ni dostopna, je nižji. Znižanje frekvenčnega odziva v tem območju je manjše v primerjavi z izrazitim povišanjem v levem delu grafa. Prav tako iz periodogramov povpraševanj (Tabela 1) vemo, da so nagnjeni v levo, kar pomeni, da delno zmanjšanje frekvenčnega odziva nima velikega vpliva na velikost učinka biča, zato lahko z dokaj veliko zanesljivostjo ostanemo pri zgornji trditvi, da pride tudi pri ($R, \gamma O, \beta IP$) sistemu do skupnega zmanjšanja velikosti učinka biča.

Slika 42: Frekvenčni odziv sistemov uravnavanja zalog v primeru, ko ima gornji člen verige dostop do informacije o končnem povpraševanju ($\alpha=0.3$, $\gamma=0.5$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$).



Vir: lastno delo

V kolikor v dobavni verigi ne pride do sodelovanja med členoma verige, je njuno delovanje neodvisno. Povedali smo že, da je glavni vzrok za povečanje variabilnosti naročil nasproti variabilnosti povpraševanja prekomerna reakcija člena verige na spremembo v povpraševanju. Ta pa je v pretežni meri posledica narave sistemov uravnavanja zalog, ki sami spodbujajo

nastanek učinka biča, in dolgih dobavnih rokov. Reakcija višjega člena verige, ki je soočen z močno spreminjajočimi se naročili, bo v osnovi enaka, torej zopet pretirana. Relativno povečanje variabilnosti pri obeh členih bo enako, kar pomeni, da je absolutno povečanje variabilnosti na ravni višjega člena večje. To pomeni, da bo s širjenjem verige skupna variabilnost hitro naraščala. Obseg povečanja variabilnosti hitro postane presenetljivo velik. Te ugotovitve so v skladu z opažanji nekaterih podjetij, ki smo jih omenili v uvodnem delu (poglavje 2.5.1).

Pokazali smo, da v primeru, ko se višji člen verige pri napovedi povpraševanja ravna po končnem povpraševanju in ne po naročilih nižjega člena, pride do manjšega povečanja variabilnosti. Začetno povečanje variabilnosti pri prvem členu verige, prodajalcu, je v obeh primerih enako. Do zmanjšanja variabilnosti celotne verige pripelje samo zmanjšano povečanje variabilnosti na ravni proizvajalca. Variabilnost dvonivojske verige se torej v nobenem primeru ne more spustiti nižje od variabilnosti, ki jo je v verigo zanesel prodajalec. Dostopnost informacije o končnem povpraševanju ne more izničiti učinka biča, ampak ga lahko le omili. Nastanek učinka biča v verigi je torej posledica uporabe sistemov uravnavanja zalog, ki generirajo povečanje variabilnosti, v kombinaciji z neničelnimi dobavnimi roki.

V prilogi E smo pokazali, da v verigi, v kateri ni sodelovanja, z dodajanjem novih členov v verigo pride do multiplikativnega povečevanja variabilnosti. Relativno povečanje velikosti učinka biča je enako, ko se pomikamo navzgor po dobavni verigi. Dostopnost informacije o končnem povpraševanju povzroči, da se variabilnost v verigi povečuje aditivno. Relativno povečanje učinka biča bo v smeri navzgor čedalje manjše. S povečevanjem števila členov v verigi variabilnost v celotni verigi v prvem primeru narašča bistveno hitreje kot v drugem. Že pri verigi s tremi členi je velikost učinka biča v verigi, v kateri je sodelovanje omogočeno, več kot dvakrat večja.

V našem idealiziranem primeru pride do popačenja informacije o končnem povpraševanju le v obliki povečanja variabilnosti končnega povpraševanja v obliki naročil. Naročila sicer nihajo močneje, vendar še vedno dovolj dobro sledijo spremembam v končnem povpraševanju. V verigi ne prihaja do popačenja informacije v smislu vnaprejšnjega naročanja prodajalca ali povečanega naročila, kot posledice špekulacije o nezadostni dobavi. Proizvajalec v povečanem ali zmanjšanem naročilu dejansko lahko prepozna povečanje ali zmanjšanje končnega povpraševanja, vendar ne ve, kako veliko je to. Samo gibanje naročil v določeni meri odraža gibanje končnega povpraševanja. V našem primeru bi proizvajalec zmanjšanje učinka biča, ki ga doseže s sodelovanjem s prodajalcem, lahko dosegel tudi s tem, da bi v predvidevanju povpraševanja izbral nižjo konstanto glajenja povpraševanja. Proizvajalec ve, da spreminjanje naročil odraža spreminjanje končnega povpraševanja, le da je variabilnost naročil večja. Z nižjo vrednostjo parametra α bi to variabilnost zmanjšal in s tem zmanjšal variabilnost svojega predvidenega povpraševanja in naročil. Posledično bi se tako zmanjšal učinek biča.

Dolžni smo še kratek komentar pojava znižanja frekvenčnega odziva $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema pri visokih frekvencah. Opazili smo, da je v območju pod mejo učinka biča odziv najnižji v primeru, ko v verigi ni sodelovanja. V tem območju je variabilnost naročil prodajalca proizvajalcu nižja od variabilnosti končnega povpraševanja. Proizvajalčevo predvidevanje povpraševanja na podlagi končnega povpraševanja bo torej v verigo prineslo dodatno variabilnost in rezultat bo povečana variabilnost v celotni verigi. Pri $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistemu povečanje variabilnosti pri visokih frekvencah ne bo bistveno zmanjšalo ugodnega vpliva sodelovanja na velikost učinka biča, kar smo zgoraj že utemeljili. Zgornja opažanja lahko uporabimo pri $(R, \hat{D})$ in $(R, \gamma O)$ sistemu, za katera je značilno, da se njun frekvenčni odziv ves čas giblje pod mejo nastanka učinka biča. Dostopnost informacije o končnem povpraševanju bo pri obeh sistemih pomenilo povečanje variabilnosti v verigi, vendar do učinka biča ne more priti.

7. SKLEP

Izbira sistema uravnavanja zalog je racionalna odločitev podjetja s ciljem povečanja učinkovitosti procesa obnavljanja zalog in zagotavljanja ustrezne ravni storitve. Namen magistrskega dela je bil pokazati, da »optimalna« izbira sistema uravnavanja zalog lahko privede do nastanka učinka biča.

Pokazali smo, da predvidevanje povpraševanja z metodo preprostega eksponentnega glajenja, ki je bilo del vseh analiziranih sistemov uravnavanja zalog, zmanjša variabilnost naročil. Kljub temu pri uporabi (R,S) , $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistema lahko pride do pojava učinka biča. Pri $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistemu je nastanek učinka biča odvisen od narave povpraševanja, medtem ko smo za (R,S) sistem pokazali, da do pojava učinka biča pride pri poljubnem vzorcu povpraševanja. Glavni generator povečane variabilnosti naročil v omenjenih treh sistemih uravnavanja zalog je projekcija pričakovanj o povpraševanju za prihodnje obdobje dolžine dobavnega roka. Značilnost (R,S) sistema uravnavanja zalog je, da se sprememba v povpraševanju preko projekcije pričakovanj izrazi daleč v prihodnost, s čimer pride do prekomernega odziva na spremembo v povpraševanju in do povečanja variabilnosti naročil nasproti povpraševanju. S tem da v pravilu naročanja ne upoštevamo neujemanja med ciljnim in trenutnim stanjem zalog v celoti (kot je to primer pri (R,S) sistemu), lahko z uporabo $(R,\beta IP)$ in $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistema zmanjšamo velikost učinka biča. V podjetjih, v katerih je visoka variabilnost naročil povezana s precejšnjimi stroški, zmanjšanje velikosti učinka biča lahko privede do visokih prihrankov. V takih primerih se podjetje lahko odloči, da uporabi sistem uravnavanja zalog, katerega lastnost je, da zmanjša variabilnost naročil nasproti variabilnosti povpraševanja. Primera takšnega sistema uravnavanja zalog sta $(R, \hat{D})$ in $(R,\gamma O)$ sistem, ki temeljita na konceptu, ki smo ga spoznali ob analizi predvidevanja povpraševanja s preprostim eksponentnim glajenjem, zaradi česar je za oba značilno, da zmanjšujeta variabilnost. Do pojava učinka biča ob njuni uporabi ne pride, ne glede na to, s kakšnim vzorcem povpraševanja imamo opravka.

Analiza povezave med velikostjo učinka biča in stroški zalog je jasno pokazala, da je izbira sistema uravnavanja zalog kompromis med zmanjšanjem velikosti učinka biča in zmanjšanjem stroškov zalog. Če učinek biča v podjetju povzroči precejšnje povečanje stroškov, se bo podjetje odločilo za sistem uravnavanja zalog, ki zmanjšuje velikost učinka biča, torej za $(R, \hat{D})$ ali $(R,\gamma O)$ sistem. Podjetje, ki stavi na visoko odzivnost in v katerem povečanje variabilnosti nima velikega vpliva na stroške, bo raje izbralo (R,S) sistem. Izbira $(R,\beta IP)$ sistema je srednja pot med zgornjima skrajnostima in se ob določenem vzorcu povpraševanja lahko izkaže za optimalno. Izkazalo se je, da uporaba osnovnega pravila naročanja, to je pravila naročanja v $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistemu, ne prinese zmanjšanja velikosti učinka biča niti zmanjšanja stroškov zalog v primerjavi z $(R,\beta IP)$ sistemom. Izbira $(R,\gamma O,\beta IP)$ sistema uravnavanja zalog tako v nobenem primeru ne more biti optimalna.

Podjetje, ki uporablja sistem uravnavanja zalog, pri katerem pride do pojava učinka biča, lahko (v kolikor ima pri predvidevanju povpraševanja dostop do informacije o končnem povpraševanju) ublaži povečanje učinka biča, ki je posledica uporabe izbranega sistema.

Prehod iz prostora časa v prostor z nam je omogočil zapis pravila naročanja izbranega sistema uravnavanja zalog s prenosno funkcijo. Metodologija prenosne funkcije je zbirka orodij, s pomočjo katerih lahko dokaj preprosto analiziramo delovanje sistema, ki ga opisuje prenosna funkcija. Analizo sistemov uravnavanja zalog s pomočjo njihovih prenosnih funkcij smo gradili postopoma: od analize stabilnosti in odzivnosti sistemov, preko časovnih odzivov sistemov na preproste vzorce povpraševanja, do frekvenčnih odzivov sistemov, ki so bili tudi temelj za izračun velikosti učinka biča. Ob tem je potrebno poudariti, da smo skozi analizo ohranili splošnost analize, s čimer nismo naredili nobenih omejujočih predpostavk pri uporabi določenega pravila naročanja in smo izračunali velikost učinka biča za poljuben vzorec povpraševanja. Primerjava rezultatov izračuna velikosti učinka biča s pomočjo metodologije prenosne funkcije in s pomočjo simulacije pokaže sicer določena odstopanja, vendar so le-ta dovolj majhna, da lahko potrdimo pravilnost in zanesljivost uporabljene metodologije.

Glavna omejitev pri uporabi metodologije prenosne funkcije je v tem, da moramo pravilo naročanja zapisati v obliki prenosne funkcije. V primeru, da pravilo naročanja zadosti pogoju linearnosti, je to dokaj preprosto, vendar omejitev močno okrne izbiro sistemov uravnavanja zalog, saj kriterijem linearnosti in periodičnosti zadostijo le sistemi s periodičnim spremljanjem in naročanjem zalog. Pojavlja se ideja o logični nadgradnji pričujoče analize, ki bi se razširila na sisteme uravnavanja zalog s kontinuiranim spremljanjem zalog in naročanjem, ko stanje zalog pade pod signalno raven. Prehod iz periodičnega spremljanja zalog v kontinuirano ne bi smel povzročati problemov, saj lahko interval med dvema zaporednima spremljanjema zalog že v okviru narejene analize poljubno zmanjšamo. Več problemov povzroča spremenjena politika naročanja, saj je potrebno opustiti predpostavko, ki pravi, da pride do naročila vsakokrat, ko pregledamo zaloge. Do naročila pride le v obdobjih, v katerih stanje zalog pade pod signalno raven, kar sistem uravnavanja spravi v nelinearnost in onemogoči eleganten zapis pravila naročanja s prenosno funkcijo. V takem primeru je potrebno poseči bo bolj zapletenih matematičnih orodjih oziroma narediti določene predpostavke, ki omogočajo linearizacijo problema.

Prednosti uporabe metodologije prenosne funkcije, ki omogoča globlji vpogled v delovanje sistemov uravnavanja zalog in prikaže vzroke za pojav učinka biča pred uporabo statističnih metod in simulacije, gotovo opravičujejo dodatno delo v tej smeri.

8. LITERATURA

1. Aseltine A. John: Transform method in linear system analysis, New York, McGraw-Hill, cop., 1958, 300 str.
2. Baganha P. Manuel, Cohen A. Morris: Stabilizing effect of inventory in supply chains. *Operations Research*, 46/3 (1998), str. S72-S83.
3. Bai Liu Tsui Ye: Modified order-up-to level of AR(1) demand, *Transportation Research Part E*, 37 (2001), str. 35-54.
4. Carlsson Christer, Fuller Robert: A fuzzy approach to the Bullwhip effect, *Cybernetics and Systems* (2000), 6 str.
5. Carlsson Christer, Fuller Robert: Reducing the bullwhip effect by means of intelligent, soft computing methods, *Proceedings of 34th Hawaii International Conference on System Sciences* (2001), 10 str.
6. Chen et al.: Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information. *Management Science*, 46/3 (2000), str. 436-443.
7. Chopra Sunil, Meindl Peter: *Supply Chain Management*, New Jersey, Prentice-Hall, 2001, 457 str.
8. Cochrane W.T. et al.: What is the fast Fourier transform? *IEEE Transactions on Audio Electro-acoustics* 15/2 (1967), str. 45-55.
9. D'Azzo J. John, Houpis H. Constantine: *Feedback control systems analysis & synthesis*. Second edition, International Student Edition, New York, McGraw-Hill Book Company, 1966, 824 str.
10. Dejonckheere J. et al.: Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, xxx (2002a) neizdano, 24.
11. Dejonckheere J. et al.: Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 78 (2002b), str. 133-144.
12. Forrester J.: *Industrial Dynamics*, New York, MIT Press and John Wiley and Sons Inc., 1961.
13. Fransoo C. Jan, Wouters J.F. Marc: Measuring the bullwhip effect in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5/2 (2000), str. 78-89.
14. Hammond J.H.: Case study: "Barilla SpA (A)", *Harvard Business School Case Study* 9-694-046, 1994.
15. Houpis H. Constantine, Lamont B. Gary: *Digital control systems*. International Student Edition, New York, McGraw-Hill Book Company, 1985. 667 str.
16. Kimbrough O. Steven, Wu D.J., Zhong Fang: Computers play the beer game: can artificial agents manage supply chains?, *Decision Support Systems*, 33 (2002), str. 323-333.
17. Kopczak Laura, Lee Hau: Case study: "Hewlett-Packard: Deskjet Printer Supply Chain (A)", *Stanford University*, 1993.
18. Kreyszig Erwin: *Advanced Engineering Mathematics*. Seventh edition, New York, John Wiley & Sons, 1993, 1236 str.

19. Kuščer Ivan, Kodre Alojz: Matematika v fiziki in tehniki. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, 1994, 394 str.
20. Lee L. Hau, Padmanabhan V., Whang Seungjin: Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science*, 43/4 (1997a), str. 546-558.
21. Lee L. Hau, Padmanabhan V., Whang Seungjin: The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review*, Spring (1997b), str. 93-102.
22. Mason-Jones Rachel, Towill R. Dennis: Coping with Uncertainty: Reducing "Bullwhip Behaviour in Global Supply Chains, *Supply Chain Forum, An International Journal*, <http://www.supplychain-forum.com/>, 1 (2000), str. 40-45.
23. McCullen Peter, Towill Denis: Diagnosis and reduction of bullwhip in supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7/3 (2002), str. 164-179.
24. Metters Richard: Quantifying the bullwhip effect in supply chains. *Journal of Operations Management*, 15 (1997), str. 89-100.
25. Nahmias Steven: *Production and Operations Analysis*. Second edition, Irwin, 1993, 793 str.
26. Phillips L. Charles: *Signals, systems, and transforms*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995, 708 str.
27. Rusjan Borut: *Management proizvodnje*. 1. izdaja, Ljubljana, Ekonomska fakulteta v Ljubljani, 1999, 296 str.
28. Schroeder G. Roger: *Operations Management*, New York, McGraw-Hill International Editions, 1993, 848 str.
29. Silver A. Edward, Peterson Rein: *Decision systems for inventory management and production planning*. Second edition, New York, John Wiley & Sons, 1985. 716 str.
30. Simchi-Levi David, Kaminsky Philip, Simchi-Levi Edith: *Designing and Managing the Supply Chain*, McGraw-Hill Higher Education, 2000, 321 str.
31. Sterman J. D.: Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment, *Management Science*, 35/3 (1989), str. 321-339.
32. Taylor David, Brunt David: *Manufacturing, Operations and Supply Chain Management*. First edition, London, Thomson Learning, 2001, 388 str.
33. Thonemann U.W.: Improving supply-chain performance by sharing advance demand information, *European Journal of Operational Research*, 142 (2002), str. 81-107.
34. Towill D.R.: *Transfer function techniques for control engineers*. London, Iliffe Books Ltd, 1970, 513 str.
35. Towill R. Dennis: Time compression and supply chain management – a guided tour, *Logistics Information Management*, 9/6 (1996), str. 41-53.
36. Waller L. Derek: *Operations Management – A Supply Chain Approach*, International Thomson Publishing, 1999, 841 str.
37. Xu Kefeng, Dong Yan, Evers T. Philip: Towards better coordination of the supply chain. *Transportation Research Part E*, 37 (2001), str. 35-54.
38. Yu Zhenxin, Yan Hong, Edwin Cheng T.C.: Benefits of information sharing with supply chain partnerships. *Industrial Management & Data*, 101/3 (2001), str. 114-119.

PRILOGA

A. Izračun prenosne funkcije $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog

Poglejmo si izračun prenosne funkcije kontrolnega sistema s funkcijo $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog (3.27). Za izhodišče bomo vzeli ustrezno pravilo naročanja, ki smo ga zapisali z enačbo (3.1). Naš cilj je izraziti razmerje med naročili O in povpraševanjem D člena dobavne verige, s pomočjo parametrov, ki nastopajo v pravilu naročanja in spremenljivko z . Če upoštevamo definicijo ciljnega stanja zalog $IP_t^T = S_t - \hat{D}_t$ in definicijo ciljne zaloge S_t , ki smo jo podali v (3.15), lahko pravilo naročanja zapišemo kot:

$$O_t = \hat{D}_t + (1 - \gamma)(O_{t-1} - \hat{D}_t) + \left(\beta \left(T_L \hat{D}_t + k \hat{D}_t \sqrt{1 + T_L} \right) - IP_t \right) \quad (\text{A.1})$$

Vrednosti spremenljivk v obdobju $t-1$ bomo s pomočjo translacijskega teorema (2.22) izrazili z vrednostjo ustrezne spremenljivke v obdobju t . Uporabimo translacijski teorem na stanju zalog IP_{t-1} in zapišimo kontinuitetno enačbo za stanje zalog (3.17) nekoliko drugače:

$$IP_t - IP_{t-1} = IP_t (1 - z^{-1}) = O_{t-1} - D_t \quad (\text{A.2})$$

Enačbo vstavimo v pravilo naročanja namesto IP_t . Člene, v katerih nastopa spremenljivka naročil O_t , nesimo na levo stran, medtem ko člene, v katerih nastopa povpraševanje D_t , pustimo na desni strani:

$$O_t \left(1 - \frac{1 - \gamma}{z} + \frac{\beta}{z - 1} \right) = \hat{D}_t \left(\gamma + \beta \left(T_L + k \sqrt{1 + T_L} \right) \right) + D_t \frac{\beta z}{z - 1} \quad (\text{A.3})$$

Tu bomo nekoliko skrajšali postopek in upoštevali že izračunano prenosno funkcijo kontrolnega sistema s funkcijo preprostega eksponentnega glajenja, podano z enačbo (3.22):

$$O_t \left(1 - \frac{1 - \gamma}{z} + \frac{\beta}{z - 1} \right) = D_t \frac{\alpha z}{z - (1 - \alpha)} \left(\gamma + \beta \left(T_L + k \sqrt{1 + T_L} \right) \right) + D_t \frac{\beta z}{z - 1} \quad (\text{A.4})$$

Preostali sta le še iskani spremenljivki O_t in D_t , kar pomeni, da lahko po nekaj korakih zapišemo njuno razmerje in tako dobimo končno obliko prenosne funkcije $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistema uravnavanja zalog:

$$\frac{O}{D} = \frac{\left(\gamma + \beta \left(T_L + k \sqrt{1 + T_L} \right) \right) \alpha z^2 (z - 1) + \beta z^2 [z - (1 - \alpha)]}{[z - (1 - \alpha)] [z(z - 1) - (1 - \gamma)(z - 1) + \beta z]} \quad (\text{A.5})$$

B. Izračun časovnega odziva kontrolnega sistema na preprost vhodni signal

Izhodišče za izračun časovnega odziva kontrolnega sistema na preprost vhodni signal bo definicija prenosne funkcije $G(z)$ v z prostoru podana z enačbo:

$$\frac{E_2(z)}{E_1(z)} = G(z) \quad (\text{B.1})$$

Da dobimo izhodni signal $E_2(z)$, moramo prenosno funkcijo pomnožiti z vhodnim signalom $E_1(z)$. Ko znamo zapisati vhodni signal v odvisnosti od spremenljivke z , lahko izračunamo izhodni signal, prav tako v odvisnosti od spremenljivke z . Za izračun časovnega odziva je potrebno iz z prostora preiti nazaj v osnovni prostor časa t . Ta prehod nam omogoča inverzna Z transformacija. Izhodni signal v odvisnosti od časa zapišemo kot transformacijo zmnožka prenosne funkcije in vhodnega signala:

$$e_2(t) = Z^{-1} [G(z)E_1(Z)] \quad (\text{B.2})$$

V splošnem bi na opisani način izračunali časovni odziv kontrolnega sistema na poljuben vhodni signal, vendar se pojavi problem, kako izraziti vhodni signal v z prostoru. V poglavju 3.3.2 smo se omejili na tri preproste vhodne signale, ki smo jih poimenovali: stopnica, klanec in sinusni signal. Prednost uporabe teh signalov je v tem, da jih lahko izrazimo s pomočjo spremenljivke z (Houpis, Lamont, 1985), z uporabo Z transformacije:

– **stopnica:** $e_1(t) = u(t)$

$$e_1(t) = Z [u(t)] = \frac{z}{z-1} \quad (\text{B.3})$$

– **klanec:** $e_1(t) = tu(t)$

$$e_1(t) = Z [tu(t)] = \frac{z}{(z-1)^2} \quad (\text{B.4})$$

– **sinusni signal:** $e_1(t) = \sin(\omega t)$

$$e_1(t) = Z [\sin(\omega t)] = \frac{z \cdot \sin \omega T}{z^2 - 2z(\cos \omega T) + 1} \quad (\text{B.5})$$

V našem primeru smo postavili $T=1$, tako da se enačba še nekoliko poenostavi.

Prenosno funkcijo izbranega kontrolnega sistema (3.23)-(3.27) pomnožimo z izbranim preprostim vhodnim signalom (B.3)- (B.5), na zmnožku izvedemo inverzno Z transformacijo in dobimo ustrezen izhodni signal. Časovni odziv predstavimo kot graf vhodnega in izhodnega signala v odvisnosti od časa.

Algoritem za primer prikaza grafa časovnega odziva (R, S) kontrolnega sistema ($\alpha=0.05$, $T_L=2$, $k=0.5$) na preprost vhodni signal v obliki stopnice v programu Mathematica 4 zapišemo kot:

```
Plot[{10*InverseZTransform[{{(z-1)(2+1+0.5*Sqrt[2+1])0.05}+1}*z/(z-1), z, n], 10*UnitStep[n-.5]},
{n, -1.01, 15}, PlotRange -> {{-5, 15}, {0, 42}}, PlotPoints -> 100, Axes -> True, AxesOrigin -> {-3, 0},
AxesLabel -> {"t", "Q"}, PlotStyle -> {{AbsoluteThickness[1.8], RGBColor[0, 0.6, 0]},
{AbsoluteThickness[1], Dashing[{0.01, 0.01}], RGBColor[0, 0, 0]}}, PlotLabel -> "(R,S) sistem"]
```

C. Izračun velikosti učinka biča s pomočjo amplitudnega frekvenčnega odziva

Velikost učinka biča pri uporabi izbranega sistema uravnavanja zalog na vzorcu povpraševanja (realen signal) bomo izračunali s pomočjo amplitudnega frekvenčnega odziva kontrolnega sistema. Pokazali bomo, da je amplitudni frekvenčni odziv merilo za velikost učinka biča pri predpostavki sinusne oblike vhodnega signala (Dejonckheere et al., 2002). Tehnika spektralne analize signalov nam bo omogočila, da bomo poljuben realen signal zapisali kot vsoto več sinusnih signalov (Kreyszig 1993; Kuščer, Kodre, 1994) in to nam bo končno omogočilo izračun velikosti učinka biča za poljuben realen signal.

Iz grafa amplitudnega frekvenčnega odziva (poglavje 3.3.3 in Slika 15) vemo, kako se spremeni amplituda poljubnemu sinusnemu signalu s frekvenco ω pri prehodu skozi kontrolni sistem. Poglejmo, kako se spremeni variabilnost signala. Za sinusni signal $s(t)$ velja naslednja zveza med amplitudo signala E in varianco signala $\text{var } s(t)$:

$$\text{var } s(t) = \frac{E^2}{2} \quad (\text{C.1})$$

Če zapišemo spremembo amplitude sinusnega signala pri prehodu skozi kontrolni sistem z razmerjem med amplitudo na izhodu E_2 in vhodu E (Dejonckheere et al., 2002a, str. 9), ugotovimo, da je to enako razmerju med standardno deviacijo izhodnega $\sigma(s_1)$ in standardno deviacijo vhodnega signala $\sigma(s_2)$:

$$\frac{E_2}{E} = \frac{\sqrt{2 \text{var } s_2}}{\sqrt{2 \text{var } s_1}} = \frac{\sigma(s_2)}{\sigma(s_1)} \quad (\text{C.2})$$

Če levo stran zgornje enačbo primerjamo z enačbo amplitudnega frekvenčnega odziva kontrolnega sistema (2.32) in desno stran z enačbo za velikost učinka biča (1.4), spoznamo, da nam amplitudni frekvenčni odziv kontrolnega sistema pove, kakšna je velikost učinka biča za vhodni signal sinusne oblike s frekvenco ω (kjer vhodni signal v primeru sistemov uravnavanja zalog predstavlja povpraševanja in izhodni signal naročila):

$$M_z(\omega) = \frac{E_0}{E} = \frac{\sigma(s_2)}{\sigma(s_1)} = U(\omega) \quad (C.3)$$

Spektralna analiza signalov s pomočjo diskretne Fourierove transformacije² razgradi poljuben signal v seštevek sinusnih signalov z različnimi frekvencami, kjer ima signal z določeno frekvenco svojo amplitudo in fazo (Cochran et al., 1967; Houpis, 1985). Realen vhodni signal sestavljen iz n podatkovnih točk povpraševanja v zaporednih časovnih obdobjih, bomo zapisali kot seštevek konstantnega člena in $n/2-1$ sinusnih signalov s_i , s frekvencami v razmiku π/n v frekvenčnem intervalu $(0, \pi)$:

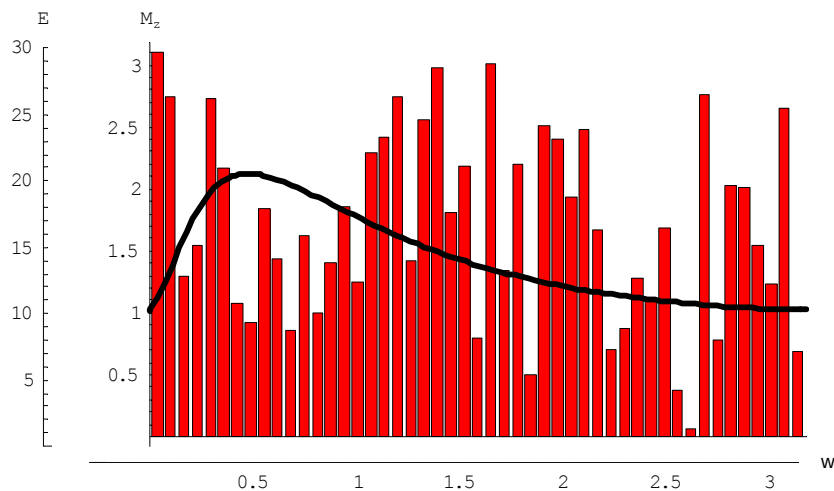
$$e_1(t) = C + s_1 + s_2 + \dots + s_{(n/2-1)} \quad (C.4)$$

kjer je sinusni signal s_i oblike:

$$s_i(t) = E_i \sin \omega_i t \quad (C.5)$$

Amplitude sinusnih signalov E v odvisnosti od frekvence prikažemo v grafu, ki ga imenujemo periodogram (Slika 43, stolpčni diagram).

Slika 43: Periodogram vhodnega signala za vzorec povpraševanja ($N=100$), ponazorjen s stolpčnim diagramom, in amplitudni frekvenčni odziv ($R, \beta IP$) sistema uravnavanja zalog ($\alpha=0.3$, $\beta=0.5$, $T_L=2$, $k=0.5$), ki je ponazorjen s črno krivuljo.



Vir: lastno delo

² Diskretno Fourierovo transformacijo (DFT) vzorca podatkov z N podatki (št. vzorčenj) definiramo kot:

$$DFT(e)[in\omega] = \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} e(kT) e^{-i\omega kT}, \quad n = 0 \text{ to } N-1$$

$e(kT)$ predstavlja nam že znani diskretni vhodni signal in T perioda vzorčenja (Houpis, 1985, str. 607). Diskretna Fourierova transformacija je posebna oblika z transformacije, kjer postavimo vrednost $z=e^{i\omega T}$. Tako dobimo frekvenčno reprezentacijo prenosne funkcije spremenljivke z .

Zapišimo sedaj varianco vhodnega signala, kjer upoštevamo, da je kovarianca med dvema sinusnima signaloma z različnima frekvencama enaka nič (Dejonckheere et al., 2002a, str. 10). Dobimo vsoto neodvisnih prispevkov posameznih sinusnih signalov v skladu z enačbo (C.1), ki sestavljajo vhodni signal:

$$\text{var } e_1 = \frac{1}{2} E_1^2 + \frac{1}{2} E_2^2 + K + \frac{1}{2} E_{(n/2-1)}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n/2-1} E_i^2 \quad (\text{C.6})$$

Na enak način poskusimo zapisati še varianco izhodnega signala, ki ga bomo prav tako predstavili kot vsoto sinusnih signalov:

$$e_2(t) = C + \mathcal{E}_1(t) + \mathcal{E}_2(t) + K + \mathcal{E}_{(n/2-1)}(t) \quad (\text{C.7})$$

kjer je sinusni signal $\mathcal{E}_i(t)$ oblike:

$$\mathcal{E}_i(t) = \hat{E}_i \sin(\omega_i t - \varphi_i) \quad (\text{C.8})$$

Vemo, da se sinusnemu signalu pri prehodu linearnega kontrolnega sistema spremenita amplituda in faza, frekvenca pa ostane enaka. Izhodni realni signal je torej seštevek sinusnih signalov, ki sestavljajo vhodni realen signal, le da se je spremenila njihova amplituda in faza. Varianco izhodnega signala zapišemo kot:

$$\text{var } e_2 = \frac{1}{2} \hat{E}_1^2 + \frac{1}{2} \hat{E}_2^2 + K + \frac{1}{2} \hat{E}_{(n/2-1)}^2 \quad (\text{C.9})$$

Spremembo amplitude sinusnega signala pri prehodu skozi kontrolni sistem nam pove amplitudni frekvenčni odziv, zaradi česar lahko ob upoštevanju enačbe (C.3) zapišemo:

$$\hat{E}_i = M_z(\omega_i) E_i \quad (\text{C.10})$$

Upoštevajmo zgornjo enačbo in še enkrat zapišimo varianco izhodnega realnega signala:

$$\text{var } e_2 = \frac{1}{2} E_1^2 M_z^2(\omega_1) + \frac{1}{2} E_2^2 M_z^2(\omega_2) + K + \frac{1}{2} E_{(n/2-1)}^2 M_z^2(\omega_{(n/2-1)}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n/2-1} E_i^2 M_z^2(\omega_i) \quad (\text{C.11})$$

Na koncu zapišemo enačbo za izračun velikosti učinka biča za realen vhodni signal (Dejonckheere et al., 2002a, str. 10):

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n/2-1} E_i^2 M_z^2(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{n/2-1} E_i^2}} \quad (\text{C.12})$$

Amplitude sinusnih signalov, ki sestavljajo vhodni realen signal, poznamo in smo jih prikazali v periodogramu (Slika 43). Posamezen stolpec periodograma predstavlja amplitudo sinusnega signala z določeno frekvenco. Da dobimo amplitude sinusnih signalov, ki sestavljajo izhodni realni signal, moramo posamezen stolpec periodograma pomnožiti z vrednostjo amplitudnega frekvenčnega odziva pri ustrezni frekvenci. Velikost učinka biča je torej uteženo povprečje kvadrata amplitudnega frekvenčnega odziva, kjer so uteži določene s kvadratom amplitud, predstavljenih v periodogramu.

Algoritem za primer izračuna višine učinka biča ($R, \beta IP$) kontrolnega sistema ($\alpha=0.3, \beta=0.5, T_L=2, k=0.5$) za poljuben vzorec povpraševanja (*data*) v programu Mathematica 4 zapišemo kot:

```
S4 = Abs[ $\frac{e^{i\omega} ((e^{i\omega} - 1) (1 + 0.5 (2 + 1 + 0.5 * \sqrt{2 + 1})) 0.3 + 0.5 (e^{i\omega} - (1 - 0.3)))}{(e^{i\omega} - (1 - 0.3)) (e^{i\omega} - (1 - 0.5))}$ ]]; prenosna funkcija sistema
F = Delete[Drop[Chop[Fourier[data]], -(Length[data] / 2)], 1]; DFT vzorca povpraševanja data
a = Abs[F]; amplitude in frekvence sinusnih signalov
w = Abs[F];
var1 = 0.5 * Apply[Plus, a^2]; varianca in standardna deviacija povpraševanja
st1 = Sqrt[var1];
Sqrt[0.5 * Apply[Plus, a^2 * S4^2] / var1] velikost učinka biča
```

D. Izračun velikosti učinka biča s pomočjo simulacije v obliki preglednice

Velikost učinka biča za izbran vzorec povpraševanja lahko izračunamo tudi s pomočjo simulacije v obliki preglednice (Tabela 2). Dobavno verigo predstavljata dva člena, ki ju bomo poimenovali prodajalec in proizvajalec. Vhodni podatek pri simulaciji je poljuben vzorec končnega povpraševanja, sestavljen iz N podatkov o povpraševanju iz zaporednih časovnih obdobj. Simulacija oziroma izračun za vsako posamezno časovno obdobje poteka v naslednjih korakih:

- prodajalec izračuna predvideno povpraševanje v skladu z enačbo preprostega eksponentnega glajenja. Ob tem se v skladu z ustreznim pravilom naročanja izračunajo tudi višina neto zalog, višina stanja zalog in višina novega naročila;
- proizvajalec v naslednjem obdobju prejme naročilo od prodajalca in po enakem postopku kot prodajalec izračuna predvideno povpraševanje, višino neto zalog, stanja zalog in višino naročila;
- po preteku dobavnega čas proizvajalca le-ta dobi naročilo. Naročilo poveča neto zaloge proizvajalca, s katerimi poskuša izpolniti povpraševanje prodajalca. V primeru, da je višina neto zalog dovolj visoka, je naročilo prodajalca dobavljeno v celoti v skladu z dobavnim rokom. Če so neto zaloge prenizke, se neizpolnjeno povpraševanje preko negativnega stanja neto zalog prenese v naslednje obdobje;
- prodajalec dobi ustrezno veliko pošiljko in poskuša zadovoljiti končno povpraševanje.

Tabela 2: Izpis primera simulacije delovanja $(R, \beta | P)$ sistema uravnavanja zalog v obliki preglednice v programu Excel.

PARAMETRI				PARAMETRI				$(R, \beta P)$ sistem uravnavanja zalog							
POVPRAŠEVANJA				SISTEMA				VELIKOST UČINKA BIČA							
D	povp.povpr	prodajalec	proizvajalec	a	gl. povpr.	prodajalec	proizvajalec	prodajalec	proizvajalec	skupaj					
σ	var.povpr			k	koef VZ										
T_L	dobav.rok	2	2	b	gl. zalog	0,50	0,50	O/D-stdev	1,28	1,43	1,84				
NS_0	zač.zaloge	87	87												
N	povpraš.	D	predv.pov	dobava	neto zaloge stanje zalog			naročilo	dobava	neto zaloge stanje zalog			naročilo		
					NS	IP	O			NS	IP	O			
konst															
povprečje stdev	98,11	98,47	98,69	98,69	83,30	284,38	97,39		97,44	98,66	97,44	97,49	84,93	286,32	96,88
	29,83	10,84	39,78	39,78	63,70	46,43	38,33		38,25	15,96	39,57	55,14	65,61	66,21	54,83
	0	79	102,87	87,47	61,38	336,82	81,88		134,55	115,45	134,55	137,17	50,22	250,22	155,78
	1	57	89,11	140,88	145,27	361,70	35,96		81,88	105,38	81,88	155,78	124,11	324,11	94,33
	2	87	88,48	134,55	192,82	310,66	59,94		35,96	84,55	35,96	94,33	182,48	382,48	14,48
	3	120	97,93	81,88	154,70	250,59	112,98		59,94	77,17	59,94	14,48	137,02	337,02	19,24
	4	96	97,35	35,96	94,66	267,57	103,08		112,98	87,91	112,98	19,24	43,28	243,28	92,25
	5	63	87,05	59,94	91,59	307,65	57,96		103,08	92,46	103,08	92,25	32,45	232,45	108,73
	6	19	66,63	112,98	185,57	346,61	-11,19		57,96	82,11	57,96	108,73	83,22	283,22	58,17
	7	122	83,24	103,08	166,65	213,43	95,82		-11,19	54,12	-11,19	58,17	152,58	352,58	-44,61
	8	67	78,37	57,96	157,61	242,25	69,55		95,82	66,63	95,82	-44,61	12,15	212,15	56,04
	9	92	82,46	-11,19	54,43	219,80	90,72		69,55	67,51	68,19	56,04	-1,36	198,64	64,93
	10	82	82,32	95,82	68,25	228,52	86,03		90,72	74,47	64,93	64,93	-27,16	172,84	94,77
	11	124	94,83	68,19	12,43	190,55	135,43		86,03	77,94	94,77	94,77	-18,41	181,59	98,83
	12	112	99,98	64,93	-34,64	213,99	136,25		135,43	95,19	98,83	98,83	-55,01	144,99	159,10
	13	122	106,58	94,77	-61,86	228,24	145,20		136,25	107,51	159,10	159,10	-32,17	167,83	177,65
14	136	115,41	98,83	-99,03	237,44	162,07		145,20	118,82	177,37	177,65	0,28	200,28	188,94	
15	39	92,49	159,10	21,07	360,51	44,76		162,07	131,79	162,07	188,94	27,15	227,15	207,08	

Vir: lastno delo

Da zmanjšamo vpliv začetnih pogojev na rezultate, simulacijo najprej izračunamo na 100 uvodnih časovnih obdobjih pod enakimi predpostavkami, ki veljajo za naslednjih $N=100$ časovnih obdobjih. Ta obdobja sestavljajo drugi del simulacije, ki je osnova za izračun velikosti učinka biča. Izračunamo variabilnost končnega povpraševanja ter variabilnost naročil prodajalca in proizvajalca na ustreznih vzorcih podatkov in določimo višino učinka biča na ravni prodajalca in proizvajalca v skladu z definicijo, podano v (1.4).

S pomočjo rezultatov simulacije so bili potrjeni rezultati izračuna velikosti učinka biča z metodologijo prenosne funkcije (Tabela 1) in izmerjeni stroški zalog.

E. Izračun prenosnih funkcij sistemov z dostopno informacijo o končnem povpraševanju

Do sedaj smo se dejansko ukvarjali s poljubnim členom verige, kjer nismo o povpraševanju govorili kot o končnem povpraševanju. Predpostavimo, da dobavno verigo sestavljata prodajalec in proizvajalec. Prvi ima neposreden dostop do informacije o končnem povpraševanju. Pri drugem pa bomo ločili med dvema možnostima: proizvajalec nima oziroma ima dostop do informacije o končnem povpraševanju.

Predpostavili bomo, da proizvajalec uporablja enak sistem uravnavanja zalog kot prodajalec. Prenosno funkcijo sistema uravnavanja zalog smo zapisali kot razmerje med naročili člena dobavne verige in povpraševanjem, s katerim se sooča. V krajši obliki zapišemo prenosno funkcijo poljubnega sistema uravnavanja zalog kot:

$$\frac{O_{R,M}}{D_{R,M}} = G_{R,M} \quad (\text{E.1})$$

Indeksa R označuje proizvajalca in indeks M prodajalca. Če proizvajalec nima dostopa do informacije o končnem povpraševanju, bo predvidevanje povpraševanja temeljil na podlagi naročil prodajalca oziroma direktnega povpraševanja nižjega člena verige. V tem primeru bo prenosna funkcija sistema uravnavanja zalog za prodajalca in proizvajalca enaka. Ker nas zanima kakšna bo sprememba variabilnosti v razširjeni dobavni verigi, ki jo sedaj sestavljata dva člena, bomo združili prodajalčevo in proizvajalčevo prenosno funkcijo. Prodajalec in proizvajalec predstavljata zaporedna člena v dobavni verigi, zato lahko uporabimo enačbo (2.2) in zapišemo prenosno funkcijo dvonivojske dobavne verige kot razmerje med naročili proizvajalca in končnim povpraševanjem, ki ga beleži prodajalec:

$$\frac{O_M}{D_R} = \frac{O_R}{D_R} \cdot \frac{O_M}{D_M} \xrightarrow{D_M=O_R} \frac{O_M}{D_R} = G_R G_M \quad (\text{E.2})$$

Skupna prenosna funkcija je zmnožek prenosnih funkcij prodajalca in proizvajalca. Ob predpostavki, da oba uporabljata enak sistem uravnavanja zalog z enakimi parametri (pomeni, da imata identični prenosni funkciji; $G_R = G_M$), lahko zgornjo enačbo zapišemo kot:

$$\frac{O_M}{D_R} = G^2 \quad (\text{E.3})$$

Z dodajanjem novih členov v dobavno verigo v skupni prenosni funkciji narašča število faktorjev, kjer vsak faktor predstavlja prenosno funkcijo posameznega člena verige. Ustrezno spremembi prenosne funkcije se bo spreminjala višina učinka biča v skladu z (C.12). Pravimo, da pride do multiplikativne spremembe variabilnosti v verigi.

V drugem primeru bo proizvajalec predvideval povpraševanje na podlagi informacije o končnem povpraševanju. V enačbi preprostega eksponentnega glajenja (3.2) se pretekla napoved povpraševanja ne usklajuje z neujemanjem med dejanskim povpraševanjem in preteklo napovedjo, temveč z neujemanjem med končnim povpraševanjem in preteklo napovedjo:

$$\hat{D}_{M,t} = \hat{D}_{M,t-1} + \alpha(D_{R,t} - \hat{D}_{M,t-1}) \quad (\text{E.4})$$

Ob upoštevanju $D_M = O_R = G_R D_R$ lahko po podobni poti, kot smo jo naredili v Prilogi A, izračunamo skupno prenosno funkcijo dvonivojske verige, v kateri prodajalec in proizvajalec uporabljata osnovni $(R, \gamma O, \beta IP)$ sistem uravnavanja zalog:

$$\frac{O}{D} = \frac{\left(\gamma + \beta \left(T_L + k \sqrt{T_L + 1} \right) \right) \alpha z (z - 1) + \beta z [z - (1 - \alpha)] \cdot G_R}{[z - (1 - \alpha)] [z(z - 1) - (1 - \gamma)(z - 1) + \beta z]} \quad (\text{E.5})$$

Vidimo, da prenosna funkcija prodajalca G_R nastopa le v drugem členu števca skupne prenosne funkcije, kar pomeni, da skupna prenosna funkcija tokrat ni neposreden zmnožek obeh posameznih prenosnih funkcij. Če oba uporabljata (R, S) sistem z enakimi parametri je zapis skupne prenosne funkcije enostavnejši:

$$\frac{O}{D} = \frac{\left((T_L + 1) + k \sqrt{T_L + 1} \right) \alpha (z - 1)}{z - (1 - \alpha)} + G = G - 1 + G = 2G - 1 \quad (\text{E.6})$$

Če ima proizvajalec dostop do informacije o končnem povpraševanju je skupna sprememba variabilnosti aditivna in je za primere, ko v verigi pride do pojava učinka biča ($|G| > 1$) vedno manjša kot v verigi v kateri informacija o končnem povpraševanju ni dostopna:

$$|G| > 1 \Rightarrow 2G - 1 < G^2 \quad (\text{E.7})$$