



## MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA

Uređuje: Nenad Bolf

### Unaprijedno vođenje

|| N. Bolf\*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije,  
Sveučilišta u Zagrebu  
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa  
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

Kako preduhitriti posljedice poremećaja koji se javljaju u procesu? Unaprijedno vođenje (engl. *feedforward control*) može značajno poboljšati djelovanje regulacijskog kruga na poremećaje jer reagira u trenutku pojave poremećaja, a regulator ne čeka na pojavu odstupanja od radne točke. Iz tih razloga unaprijedni regulator djeluje brzo i u smjeru potiskivanja poremećaja.

#### Poremećaji i vođenje povratnom vezom

Često na regulacijski krug djeluju poremećaji (engl. *disturbances*). Poremećaje mogu uzrokovati promjene radnih uvjeta u procesu koji utječe na vođenu veličinu (PV). Npr. poremećaj može biti promjena protoka ili promjena temperature procesnog toka, promjene u sastavu sirovina, promjena kapaciteta postrojenja, promjena temperature okoline i sl.

Zbog mrtvog vremena i zadržke u odzivu djelovanje poremećaja nije odmah vidljivo na vođenoj veličini. Dakle, javlja se promjena u procesu, a njezine posljedice bit će vidljive naknadno. Tijekom toga vremena standardni regulator koji djeluje na načelu povratne veze (engl. *feedback control*) nema informaciju o pojavi poremećaja i njegovoj veličini.

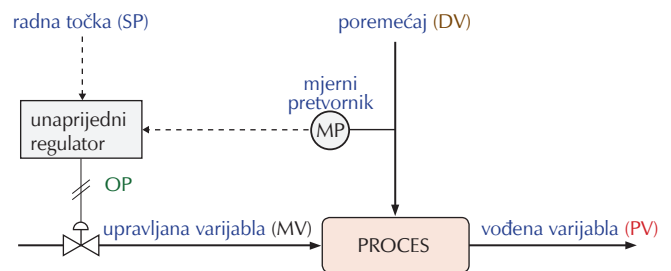
Kod regulacije s povratnom vezom posljedica poremećaja bit će odstupanje vođene veličine od radne točke (SP) bez obzira kako je dobro ugođen regulator. Ugađanje regulatora ima utjecaja na veličinu odstupanja i vrijeme povratka do SP-a, ali ne može eliminirati početno odstupanje od SP-a.

Ako protok procesne kapljevine kroz izmjenjivač topline naglo poraste, izlazna temperatura procesne kapljevine će pasti. Povratni regulator će djelovati kad se javi odstupanje od SP-a i povećati protok pare da bi se PV vratio na SP. To se zbiva tek nakon što se pojavi odstupanje izlazne temperature i traje određeno vrijeme. Posljedica je dulje odstupanje procesa od željenog stanja.

#### Vođenje unaprijednom vezom

Ovaj način vođenja treba primijeniti u dva slučaja. Jedan je kad se javljaju vrlo veliki poremećaji, a drugi kad u procesu postoji velika zadržka. U oba slučaja, najveći je problem pojava odstupanja koji se sporo otklanja i može imati negativne posljedice na rad procesa. Vođenje unaprijednom vezom (engl. *feedforward control*) pomaže da se ti problemi uklone.

Pogledajmo na slici 1 strukturni prikaz djelovanja jednostavnog unaprijednog regulatora.



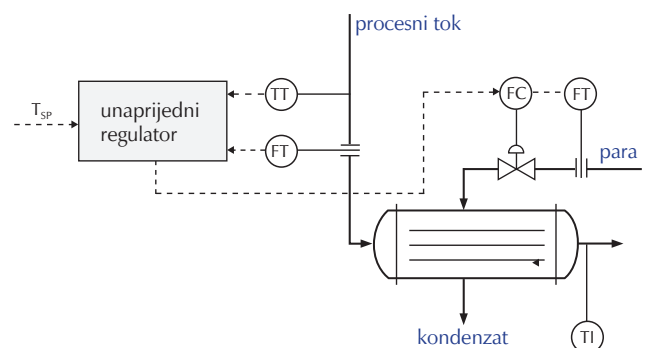
Slika 1 – Načelo vođenje unaprijednom vezom

Kao što vidimo osjetilo i mjerni pretvornik mjere poremećaj. Signal dolazi u unaprijedni regulator. Regulator određuje iznos upravljane veličine potreban da potisne poremećaj tako da ne dođe do odstupanja vođene veličine od zadane radne točke.

Za razliku od standardnog vođenja povratnom vezom (PID regulatorom) unaprijedni regulator je zapravo inverzni model procesa. Potrebno je proračunati upravljaju varijablu na temelju izmjerenog poremećaja i željene vrijednosti procesne varijable (radne točke). Da bismo mogli provesti taj proračun, potrebno je poznavati proces. To znači da trebamo izvesti model poremećaja.

Takvu kompenzaciju teško je u potpunosti ostvariti zbog brzine pojave poremećaja, ali i zbog poremećaja koji se ne mjere. U praktičnim industrijskim primjerima potreba za unaprijednim vođenjem relativno je rijetka, ali donosi značajna poboljšanja.

**Primjer:** Na slici 2 pojednostavljeno je prikazan proces izmjene topline. Kapljevina koja prolazi kroz izmjenjivač zagrijava se parom. Vođena veličina je temperatura procesne kapljevine na izlazu iz izmjenjivača. Upravlja se protokom pare primjenom kaskadnog regulatora. U osnovi, unaprijednim regulatorom računa se protok pare potreban za održavanje zadane temperature. Poremećaji koji se javljaju su promjena ulazne temperature i protoka procesne kapljevine.



Slika 2 – Vođenje izmjenjivača topline unaprijednom vezom

Iz bilanca energije izmjenjivača topline za ustaljeno stanje proizlazi sljedeća jednačnja:

$$W C_p (T_o - T_i) = F \rho \Delta H \quad (1)$$

\* Izv. prof. dr. sc. Nenad Bolf  
e-pošta: bolf@fkit.hr

pri čemu su:

$W$  – maseni protok kapljevine, [kg/h],  $C_p$  – toplinski kapacitet kapljevine [kJ/kg °C],  $T_i$  – temperatura kapljevine na ulazu [°C],  $T_o$  – temperatura kapljevine na izlazu [°C],  $F$  – protok pare [m<sup>3</sup>/h]  $\rho$  – gustoća [kg/m<sup>3</sup>],  $\Delta H$  – parom oslobođena toplina [kJ/kg]

Kad se  $T_o$  zamijeni s radnom točkom, odnosno željenom vrijednošću,  $T_{sp}$ , dobiva se jednačba koja daje protok pare potreban za željenu izlaznu temperaturu procesne kapljevine:

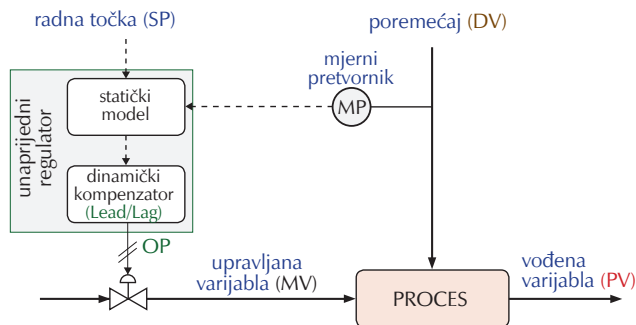
$$F = \frac{W C_p (T_{sp} - T_i)}{\rho \Delta H} \quad (2)$$

Ova jednačba je osnova za regulaciju unaprijednom vezom. U jednačbi se mjere protok  $W$  i temperatura na ulazu  $T_i$  koje predstavljaju ulaz u unaprijedni regulator. Vrijednosti  $C_p$  i  $\Delta H$  su poznate. Algoritam regulatora računa potreban protok pare  $F$ .

### Stacionarno ili dinamičko unaprijedno vođenje?

Primjer na slici 2 prikazuje unaprijedno vođenje uz primjenu modela procesa za stacionarno stanje, tj. kad je izmjenjivač topline u toplinskoj ravnoteži. Radi se o bilanci topline za ustaljeno stanje. Kad se u krugu unaprijednog vođenja promijeni bilo koji ulaz, trenutno se računa novi protok pare. U stvarnim procesima, kad se mijenjaju ulazi, izlazne veličine se ne mijenjaju trenutno.

Kako bi se poboljšalo unaprijedno vođenje, poželjno je, a često i nužno, uključiti dinamiku procesa. To se može ostvariti na dva načina. U jednom slučaju moguće je primijeniti stacionarno unaprijedno vođenje i provesti izlazni signal kroz dinamičku kompenzaciju, slika 3.



Slika 3 – Dinamička kompenzacija

Na taj način dodaje se dinamička korekcija na unaprijedno djelovanje. Najčešće se radi o jednostavnom tzv. *lead-lag* elementu ili modelu procesa drugog reda (engl. *second-order lag*). Potrebno je ugoditi omjer vremenskih konstanti *lead-lag*-a ili omjer vremenskih konstanti procesa drugog reda.

Drugi način, koji je teorijski sofisticiraniji, je izvesti dinamički model unaprijednog regulatora koji ovdje nećemo prikazati. Detalji o proračunu i konfiguriranju dinamičke kompenzacije dani su u literaturi.<sup>1,2</sup>

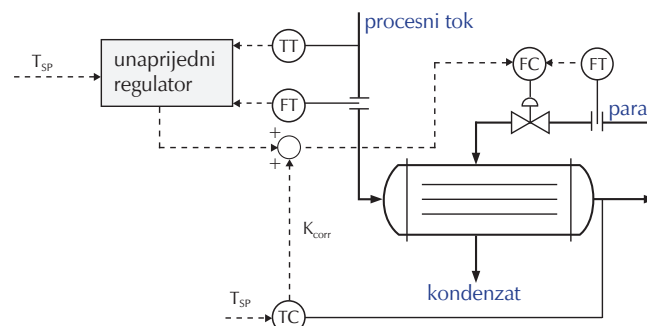
### Vođenje unaprijednom i povratnom vezom

Unaprijedno vođenje ima određene nedostatke – proračun može biti složen, a model obuhvatiti više veličina. Ako model nije dovoljno dobar, korekcijsko djelovanje može biti neadekvatno. Nadalje, ako se neki od poremećaja ne mjere, regulator neće imati informaciju o tim poremećajima i neće djelovati.

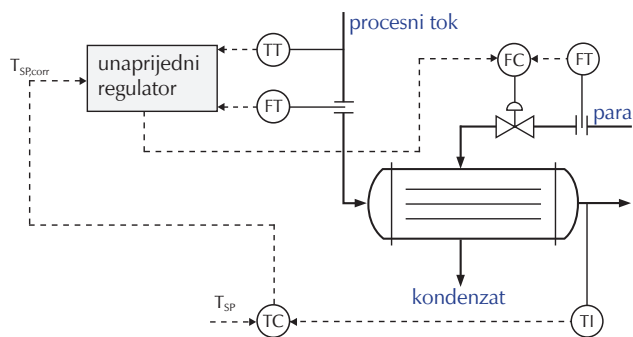
Uz tih razloga u praksi praktički nikad ne susrećemo samo unaprijedni regulator. Slika 4 prikazuje dva načina povezivanja povratnog i unaprijednog regulatora u primjeru izmjenjivača topline. Na slici 4a regulator s povratnom vezom mijenja vrijednost  $K_{corr}$  za korekciju izlaza unaprijednog regulatora može se dodati na izračunati protok pare. Slijedi:

$$F = \frac{W C_p (T_{sp} - T_i)}{(\rho \Delta H)} + K_{corr} \quad (3)$$

Na slici 4b izlaz iz regulatora povratnom vezom primjenjuje se za podešavanja radne točke unaprijednog regulatora.



a) dodavanje konstante (engl. adding a constant)

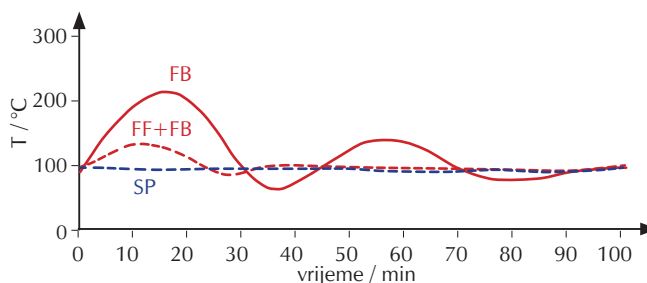


b) podešavanje radne točke (engl. adjusting the set point)

Slika 4 – Unaprijedno-povratno vođenje izmjenjivača topline

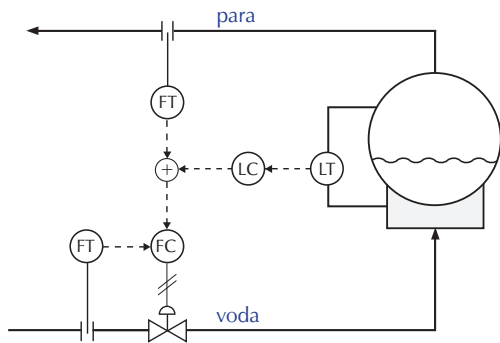
Primjeri na slici 4 prikazuju vođenje u kojem se primjenjuju regulatori s unaprijednim i povratnim djelovanjem, ali i kaskadni regulator. Kaskadna regulacija često se primjenjuje kod unaprijednog vođenja. Razlog tomu je činjenica da postoje poremećaji i u toku pare koji se moraju kompenzirati, što smo prikazali u prethodnom broju časopisa.

Na slici 5 vidimo usporedbu odziva vođene varijable u slučaju regulacije s povratnom vezom (FB) i kad se primjenjuje unaprijedna regulacija u kombinaciji s povratnom (FF+FB). Jasno se vidi manje odstupanje te brži povratak i stabilizacija na radnoj točki pri pojavi poremećaja.



Slika 5 – Usporedba vođenja s povratnim i unaprijednim regulatorom

Razmotrimo još primjer regulacije razine vode na slici 6. U ovom primjeru mjeri se protok pare iz parnog kotla, a promjena tereta kompenzira se unaprijednom regulacijom. Regulacija razine vode u kotlu povratnom vezom provodi se na standardni način, a protok vode u parni kotao (engl. *make-up water*) regulira se kaskadno. Prema tome, riječ je ponovno o kombinaciji unaprijednog, povratnog i kaskadnog vođenja koja je nužna za dobro vođenje parnog kotla. Unaprijedno vođenje upotrebljava se za kompenziranje većih varijacija u zahtjevima za vodenom parom. Strukturu regulacije prikazanu na slici 6 praktičari obično nazivaju *kompenzacija tereta* (engl. *load compensation*). Naravno, regulator treba pažljivo ugoditi da bi ta regulacija funkcionirala dobro.



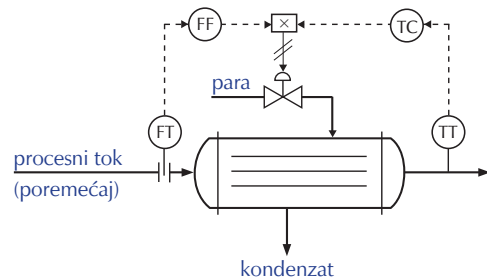
Slika 6 – Regulacija razine u parnom kotlu

### Multiplikativna ili aditivna unaprijedna regulacija

Ako poremećaj, osim na PV, utječe i na statičku osjetljivost (pojačanje) procesa, primjenjuje se multiplikativno unaprijedno vođenje.

Tako se npr. statička osjetljivost kod regulacije temperature izmjenjivača topline mijenja s protokom procesne kapljevine. Kod malih protoka nekoliko % promjene protoka pare znatno mijenja izlaznu temperaturu, dočim kod velikih protoka, ista promjena protoka pare ima znatno manji utjecaj na temperaturu.

Multiplikativna unaprijedna regulacija djeluje kao i standardna (aditivna), osim što se njezin izlaz (OP) množi se izlazom regulatora povratnom vezom. Time se protok pare mijenja razmjerno protoku procesnog toka. Regulator temperature podešavat će omjer da bi održao izlaznu temperaturu na radnoj točki.



Slika 7 – Multiplikativna regulacija kod izmjenjivača topline

Prema tome, multiplikativno unaprijedno vođenje prikladno je kad je statička karakteristika promjenjiva. Pri malim se protocima OP regulatora temperature množi s malim brojem, čime se kompenzira velika statička osjetljivost procesa. Isto tako, pri velikim protocima OP regulatora temperature množi se s velikim brojem da se kompenzira mala statička osjetljivost procesa.

Primjena multiplikativnog unaprijednog vođenja ograničena je na slučajeve kada se statička osjetljivost procesa linearno mijenja s poremećajem. Npr., multiplikativno unaprijedno vođenje nije prikladno za regulaciju razine u *drum*-spremnici jer se statička osjetljivost ne mijenja linearno s protokom pare. U tom primjeru primjenjuje se aditivna unaprijedna regulacija.

### Literatura

1. N. Bolf, I. Mohler, AVP-2 Napredno vođenje procesa, Seminar za inženjere i specijaliste iz industrije, FKIT, 2016.
2. D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley and Sons, Inc., USA, 2004.

## Velika kupoprodaja umjetne inteligencije

Korporativni divovi u utrci su za stjecanje *startupova* koji razvijaju sustave umjetne inteligencije. Prošle godine su preuzeli 40 takvih pametnih tvrtki.

Gotovo 140 manjih ili većih *startupova* koji predano rade na unapređenju tehnologija umjetne inteligencije kupili su veliki korporativni divovi kao što su Google, Microsoft, GE Digital, Yahoo, Intel, Apple, Uber i Salesforce. Svi su oni u utrci za tvrtkama koje razvijaju napredne sustave umjetne inteligencije. Jedna od najvećih akvizicija je iz listopada prošle godine, kad je Samsung kupio *Viv Labs*, *startup* koji razvija virtualnog asistenta.

U utrci najviše prednjači Google s čak 11 akvizicija 2013. preuzevši tvrtku *DNN-research* koja razvija algoritme za duboko učenje neuronskih mreža. Tim alatom svi Googleovi serveri na temelju našeg upita lakše i brže pretražuju slike i fotografije. Nadalje, 2014. Google je za 600 milijuna dolara kupio britansku tvrtku *DeepMind*. *DeepMind* je nedavno pobijedio svjetskog prvaka u igri *Go*. Prošle je godine kupio i *Moodstock*, *startup* za vizualno pretraživanje, te bot-platfomu *Api.ai*. U kojem smjeru će nas odvesti i kamo dovesti ne možemo ni pojmiti, no trebamo se zapitati koliko će uskoro tehnologija preuzeti kontrolu nad našim životima.

U igru je ušao i Twitter s četiri velike akvizicije, od kojih je najveća *startup* za obradu fotografija *Magic Pony*. Još pretprošle godine u utrku se uključio i Salesforce, tvrtka koja razvija CRM-ove u oblacima. Kupio je *Tempo AI*, a samo prošle godine postao je vlasnik *MetaMinda* za automatiziranje i precizno prognožiranje potrošačkih upita te *PredictionIO*-a za strojno učenje. I General Electric, odnosno GE Digital je u studenome prošle godine preuzeo dva *startupa* za umjetnu inteligenciju: *Bit Stew Systems*, platfomu za integraciju podataka, te *Wise.io* koji pomaže tvrtkama pronaći uzorke i trendove u svojim golemim bazama podataka. Prethodno je kupio *startup* *Predix* kojim se može nadzirati procesnu opremu te predvidjeti moguće probleme.

Popis raste ubrzanim tempom i ove godine. Microsoft je prije nekoliko tjedana kupio *Maluubu*, koji razvija umjetnu inteligenciju, a koja bi mogla biti jača od Facebookovih i Googleovih. Početkom godine iskoračio je i Amazon kupivši *Harvest.ai*, tvrtku specijaliziranu za kibernetičku sigurnost. Čak je i Uber prešao na umjetnu inteligenciju kupivši *Geometric Intelligence* koji razvija strojno učenje kognitivnih vještina.

I dok se u Hrvatskoj bavimo temama iz prošlosti, svijet ide naprijed. Šanse imaju djeca i mladi koji sudjeluju u projektima robotike i sličnim u hrvatskim školama, no većina ostalih naći će se u velikim problemima kad za koju godinu u naš vrli mali svijet uđe napredna umjetna inteligencija. U takvoj okolini naši klinici imat će malo šanse.

Izvor: <https://lider.media/>