

1. UVOD U RAČUNARSKO VOĐENJE PROCESA

Digitalno upravljanje sistemima je vezano za vrlo rane faze razvoja teorije automatskog upravljanja i njene primjene. Realizacije prvih regulatora brzine obrtanja parnih mašina i termičkih procesa su bile relejnog tipa.

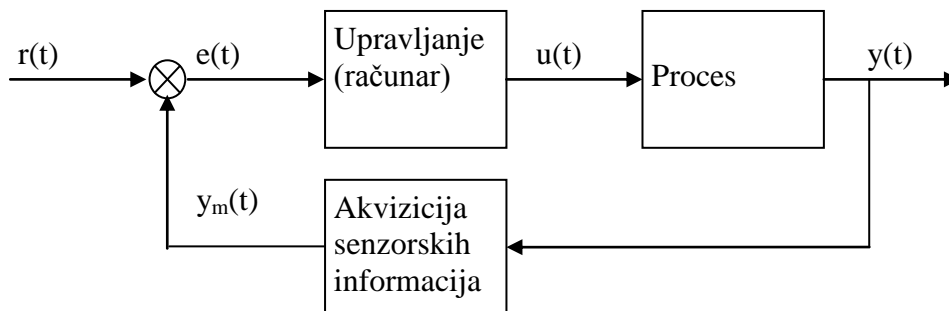
Razvoju računarskog vođenja procesa posebno snažan doprinos dalo je usavršavanje i sve masovnija primjena računarske tehnike koja se zasniva na obradi i prenosu informacija u digitalnom obliku. Zahvaljujući napretku u ovoj oblasti računarsko vođenje se primjenjuje na veoma različite sisteme i procese kao što su [2], [27], [39]:

1. Servomehanizmi (pozicioni, brzinski, i dr.)
2. Regulacija napona, temperature, pritiska, nivoa tečnosti, protoka tečnosti i gasova, i dr.
3. Električni uređaji i objekti (motori, generatori, električni izvori energije, i dr.)
4. Upravljanje u industriji (papira, cementa, šećera, tekstila, hrane, i dr.)
5. Sistemi transporta (vozila, vozovi, avioni, i dr.)
6. Roboti (fleksibilna proizvodnja, zavarivanje, i dr.)
7. Digitalni računari (drajveri diskova, printeri, i dr.)
8. Biotehnologija, medicina, biologija i dr.
9. Mnoge druge primjene, kao što su kontrola saobraćaja, računarski integrisana proizvodnja, upravljanje energijom u zgradama, itd.

Mada je akvizicija podataka vrlo značajna za mnoge oblasti ljudskog djelovanja, ona je od izuzetnog značaja za računarsko vođenje procesa. Teorija automatskog upravljanja i njene uspješne implementacije na različitim procesima korišteni su mnogo prije pojave digitalnih računara.

Ona je pokazala mnoge prednosti upravljanja u povratnoj sprezi, a prije svega manju osjetljivost na smetnje koje djeluju na proces i nepreciznost u modelovanju procesa. Ključno je kod upravljanja u povratnoj sprezi da postoje podesna mjerenja na procesu koja se koriste za generisanje upravljačkog signala prema primjenjenom zakonu upravljanja. Ako se neka promjenljiva može mjeriti tada postoji dobra šansa za upravljačku strategiju (sintezu regulatora) koja će omogućiti da se ta promjenljiva mjenja na zadati/željeni (tačno ili približno) način. Zato je akvizicija podataka o vrijednostima različitih fizičkih veličina od veoma velikog značaja za upravljanje bilo kakvim objektom upravljanja. Posebno je to značajno u slučaju automatskog upravljanja, kada se na osnovu sakupljenih podataka generišu upravljački signali, automatski na izlazu regulatora. Iz tog razloga će za ilustraciju biti korišćena standardna struktura sistema sa povratnom vezom. Neka se u kolu povratne sprege nalazi mjerni elemenat (sistem za akviziciju mjernih podataka) preko koga regulator dobija podatke o stvarnoj vrijednosti regulisane veličine. Normalizovani signal iz mjernog elementa se u regulatoru upoređuje sa signalom zadate vrijednosti, čime se dobija podatak o trenutnoj grešci upravljane veličine.

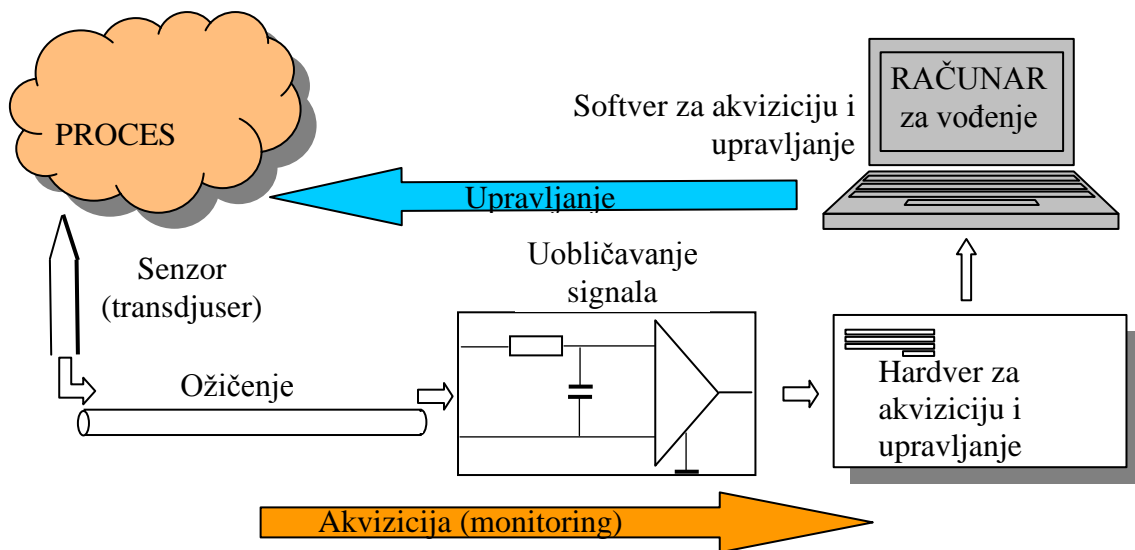
Tačnost sistema automatskog upravljanja u potpunosti zavisi od statičkog i dinamičkog ponašanja mjernog elementa. Sa Sl. 1.1 se vidi da mi ustvari možemo upravljati onim što mjerimo, a ne stvarnim izlazom. Samo ako se usvoji da je sistem za akviziciju (mjernih) podataka idealan (bez



Sl.1.1

statičke ili dinamičke greške) i ako se u potpunosti zanemare šumovi mjerenja tada se uticaj sistem za akviziciju (mjernih) podataka može zanemariti. Jedino u tom slučaju se može govoriti o jediničnoj povratnoj sprezi.

Po pravilu se pri upravljanju u realnom vremenu tačnost dobijenih podataka ne može povećati korištenjem više ponovljenih mjerenja, a zatim odgovarajućom obradom svih dobijenih mjernih podataka eliminisati netačnost. Iz tog razloga je tačnost mjernih podataka dobijenih sa objekta upravljanja od posebnog značaja za kvalitet automatskog upravljanja dinamičkim objektima.



Sl.1.2

Bez obzire na veoma veliku raznolikost sistema sa računarskim vođenjem procesa, svi po pravilu sadrže sljedeće tipične funkcionalne komponente (za ilustraciju prikazane na Sl.1.2):

- Senzori i/ili transdjuseri
- Ožičenje
- Uobličavanje signala
- Hardver za akviziciju i upravljanje
- Glavni računar
- Softver za akviziciju i upravljanje

Senzori i/ili transdjuseri obezbeđuju stvarnu vezu između realnog svijeta i sistema za akviziciju podataka, time što konvertuju fizičke fenomene u električni signal koji može da prihvati element za uobličavanje. Danas postojeći senzori i/ili transdjuseri mogu ostvariti mjerenje gotovo bilo koje fizičke veličine i konvertovati je u električni signal.

Ožičenje predstavlja fizičku vezu od senzora/transdjusera do hardvera za uobličavanje signala ili za akviziciju podataka. Ako je senzor na velikoj udaljenosti od hardvera za uobličavanje signala ili akviziciju podataka tada ožičenje obezbeđuje prenos signala na većim rastojanjima. Iz tog razloga ožičenje po pravilu predstavlja, po gabaritima, najveću komponentu ukupnog sistema pa je zbog toga najviše podložno djelovanju vanjskih uticaja. Zbog toga, sistem koji je izrađen od pouzdanih komponenata, u slučaju lošeg ožičenja po pravilu nema visoku (ili bar zadovoljavajuću) tačnost i pouzdanost. Pošto senzori obično generišu signale veoma niskog nivoa, izobličenja takvih signala se veoma mnogo odražavaju na tačnost mjerenja a time i vođenja procesa. Sa druge strane kroz ožičenje od računara prema procesu se prenose signali višeg nivoa, a aktuatori nisu posebno osjetljivi na manja odstupanja upravljačkih signala, iz tog razloga je ožičenje od računara prema procesu mnogo manje kritično.

Uobličavanje signala označava transformacije inicijalnog električnog signala iz senzora, kao što su filtriranje, pojačanje i druge, u oblik prihvatljiv (ili pogodan) za hardver za akviziciju.

Hardver za akviziciju i upravljanje podataka predstavlja komponentu sistema koja omogućava da fizički električni signali kroz formu njihovih digitalnih ekvivalenata budu upisani u memoriju računara opšte namjene. Računari opšte namjene su standardno namjenjeni za unošenje podataka (informacija) pomoću tastature, sa eksternih memorijskih medija, čitača bušenih kartica/traka i slično. Svi ti podaci su u digitalnom obliku, sa nivoima signala koji odgovaraju naponskom TTL nivou i time prilagođeni direktnom unošenju u digitalni uređaj. Električni mjerni signali nisu obavezno u digitalnom obliku standardnog naponskog TTL nivoa. Nadalje, ovi signali su promjenljivi u vremenu, a broj signala može da varira za različite procese, pa je neophodna prethodna transformacija takvih signala da bi mogli biti uneseni u memoriju digitalnog računara.

Nadalje, izračunate vrijednosti potrebne za upravljanje aktuatorima su takođe u binarnoj formi standardnog naponskog TTL nivoa. Kao takvi

nisu fizički signali u formi kojom se može upravljati aktuatorima. Dakle, za realizaciju upravljanja potrebno je digitalni podatak pretvoriti u električni signal odgovarajućeg nivoa za pokretanje aktuatora.

Prethodno navedene transformacije signala iz fizičkog u brojnu vrijednost i obrnutu obavlja hardver za akviziciju i upravljanje.

Digitalni računar integriše sistem za akviziciju i upravljanje u skladnu cjelinu. On u tom sistemu za vođenje procesa može značajno da utiče na brzine kojima se podaci neprestano i automatski prikupljaju, procesiraju, memorišu, predstavljaju i šalju upravljački signali za vođenje procesa.

U većini sistema za računarsko vođenje procesa različite realizacije digitalnih regulatora predstavlja ključnu komponentu. Nažalost, digitalni računar nije idealna platforma za akviziciju podataka i upravljanje. Postoje mnogobrojni problemi vezani uz upotrebu računara u situacijama kada se traži garantovano vrijeme odziva. Ipak, oni se veoma široko koriste za automatizaciju u laboratorijama, industrijski nadzor i upravljanje, kao i za niz drugih vremenski kritičnih primjena.

S druge strane postoje mnogobrojne pogodnosti upotrebe digitalnih računara u sistemima za vođenje procesa. Osnovna prednost je veoma široko korišćenje digitalnih računara za: obradu teksta, knjigovodstvo, grafiku, kao terminal za komunikaciju i mnogi drugi zbog čega su oni postali veoma pouzdani i jeftini. Tehnologija za njihovu proizvodnju je veoma razvijena i višestruko stabilna. Iz istih razloga za njih postoji izuzetna (skoro nevjerovatna) softverska osnova. Ona uključuje skoro sve vrste istraživačkih, statističkih, matematičkih analiza i inženjerskih paketa koji se mogu koristiti za analizu prikupljenih podataka. Širok spektar softverskih razvojnih alata, biblioteka, hardvera za akviziciju podataka i tehničke dokumentacije su takođe dostupni. Takođe, veoma važan razlog za korišćenje digitalnih računara za akviziciju podataka i upravljanje je veliki broj, sa trendom konstantnog rasta broja programera, inženjera i istraživača koji dobro poznaju i svakodnevno koriste digitalne računare.

Fleksibilnost transformacije signala iz njegove fizičke u informacionu formu i obrnuto, u hardveru za akviziciju i upravljanje postiže se odgovarajućim **softverom za akviziciju i upravljanje**. Softver za akviziciju i upravljanje se izvršava na glavnom računaru i obezbeđuje skladan rad glavnog računara i hardvera za akviziciju i upravljanje.

Aplikacioni softver se izvodi na računaru pod njegovim operativnim sistemom. Ovaj softver omogućava prilagođavanje jedinstvenog hardvera za vrlo različite zadatke akvizicije za potrebe monitoringa i/ili upravljanja.

Jedno od osnovnih svojstava sistema za akviziciju je njegova fleksibilnost, u smislu da se može efikasno prilagoditi različitim konkretnim potrebama. Iz tog razloga strukturu sa Sl.1.2 ne treba shvatiti suviše kruto. Zavisno od konkretnih uslova primjene redosljed pojedinih funkcionalnih transformacija može da bude drugačiji. Takođe, u nekim primjenama se dio funkcionalnih aktivnosti može obavljati u dva ili više fizičkih elemenata.

2. STRUKTURA SISTEMA ZA RAČUNARSKO VOĐENJE PROCESA

U mnogim primjenama, a posebno za prikupljanje podataka i upravljanje, performanse i fleksibilnost *PC* omogućavaju da se prethodno opisane osnovne funkcije izvršavaju na različite načine. Dakle, sistem za akviziciju podataka i upravljanje može se konfigurisati na više načina pri čemu svaka struktura ima određene specifičnosti (prednosti i nedostatke). Izbor konfiguracije sistema (hardverske i softverske) uglavnom zavise od uslova okruženja u kojem se sistem koristi (npr. laboratorija, proizvodni pogon ili udaljena lokacija). Broj senzora i aktuatora i njihove lokacije u odnosu na glavni računar, tip potrebne obrade signala, i agresivnost (nepovoljnost) okruženja su ključni faktori.

Navedene činjenice su dovele do toga da je obilježje savremenog računarskog vođenja procesa integracija različitih procesa u vrlo složene distribuirane sisteme. Ukoliko se pomoću digitalnih računara integrišu mnoge napredne proizvodne tehnologije kao što su robotika, računarsko upravljanje (engl. *Computer Numerical Control – CNC*), računarski podržano projektovanje (engl. *Computer Aided Design – CAD*), računarski vođena proizvodnja (engl. *Computer Aided Manufacturing – CAM*) u jedinstven sistem tada se radi o računarski integrisanoj proizvodnji (engl. *Computer Integrated Manufacturing – CIM*) [31]. Računarsko vođenje omogućava da se realizuju kompleksni poslovni sistemi koji integrišu poslovne i proizvodne funkcije. Kod takvih sistema postoji hijerarhijska struktura upravljanja. Na svakom nivou se vrši obrada prikupljenih podataka i šalju upravljački signali. U tim slučajevima su regulatori i jedinice za

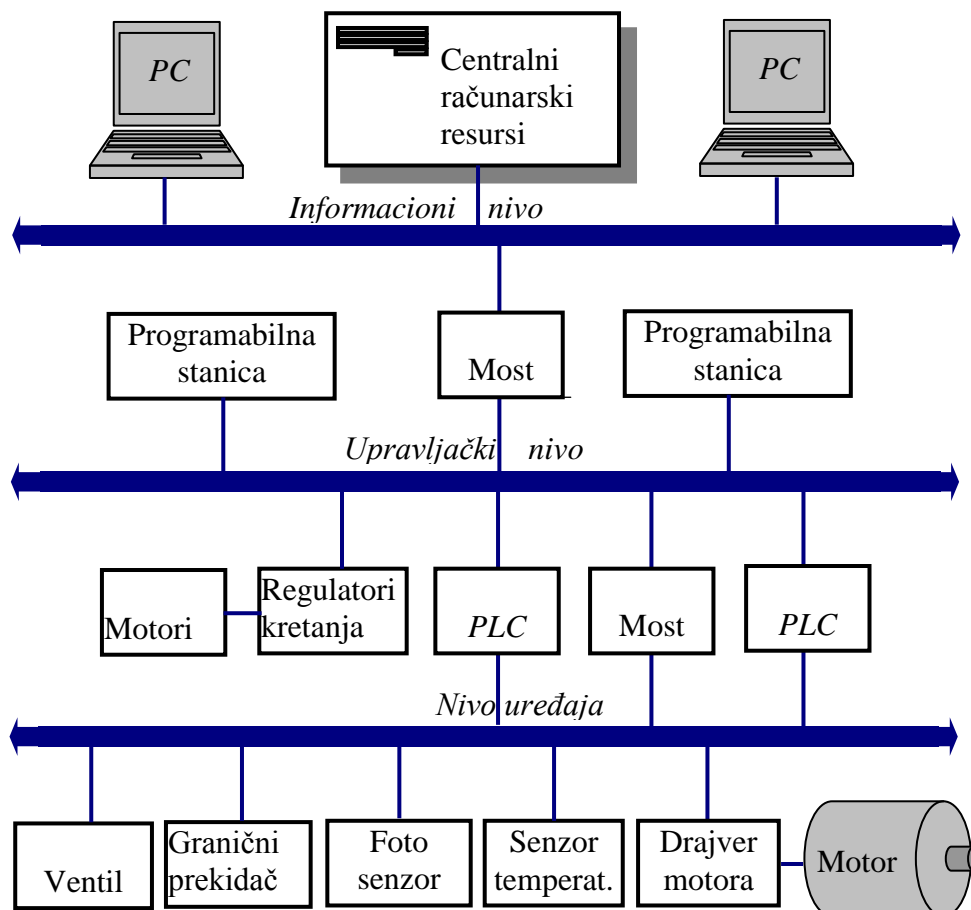
akviziciju podataka postavljeni na različitim lokacijama, neki na vrlo udaljenim, a drugi neposredno uz objekte upravljanja i druge procese. U cilju obezbjeđenja jedinstvenog funkcionisanja sistema sve komponente trebaju da međusobno, i sa centralnom akviziciono-upravljačkom jedinicom, razmjenjuju informacije.

Da bi gornji zahtjevi bili zadovoljeni kod računarskog vođenja procesa u današnje vrijeme sve više se koriste računarske mreže za povezivanje komponentat sistema upravljanja i ostalih dijelova fabrike [8, 29, 32]. Fizički, mreža predstavlja žičano (ili bežično) povezivanje putem koga čvorovi mreže (personalni računari - *PC*, programabilni logički kontroleri (engl. *Programmable Logic Controller* - *PLC*) ili drugi elektronski uređaji razmjenjuju poruke. Svaki čvor mreže ima jedinstvenu adresu, i svaka poruka- koja se naziva i paketom podataka- uključuje u sebi adresu čvora koji prima i/ili adresu čvora koji šalje ovu poruku. Svi podaci poruke se šalju serijski na mrežu, to jest jedan bit u jednom trenutku po jednom provodniku. Najčešće korišćena topologija mreže je tipa magistrale, što posmatrano pojednostavljeno znači da su svi čvorovi povezani na jedan kabl. Ovo je ilustrovano na Sl. 1.3.

Postoje tri nivoa mreže koji se mogu koristiti u nekoj industrijskoj organizaciji (Sl. 1.3), a koji mogu biti povezani na takav način da neki čvor može komunicirati sa drugim čvorom mreže u jednoj zgradi [33].

Najviši nivo je takozvani *informacioni nivo* koji se najčešće realizuje putem eterneta (engl. *Ethernet*). Ethernet je tradicionalna mreža koja se koristi za povezivanje *PC* računara sa glavnim računarom i putem koga se razmjenjuju podaci i datoteke podataka. Ethernet je podesan za razmjenu finansijskih, inventarskih i drugih podataka povezanih sa proizvodnjom, ali postoje poteškoće za slanje podataka povezanih sa realnim vremenom (naprimjer, kao što su oni pomoću kojih *PLC* reaguje na promjenu brzine neke osovine). Ethernet nije deterministička mreža koja funkcioniše na način da mora da se dodijeli prioritet porukama i kod koje se garantuje da će podaci pristići na vrijeme na adresirani uređaj (čvor).

Sljedeći nivo je takozvani *upravljajući nivo* (engl. *Control level*). Mreža na ovom nivou obezbeđuje determinističku komunikaciju, koja se



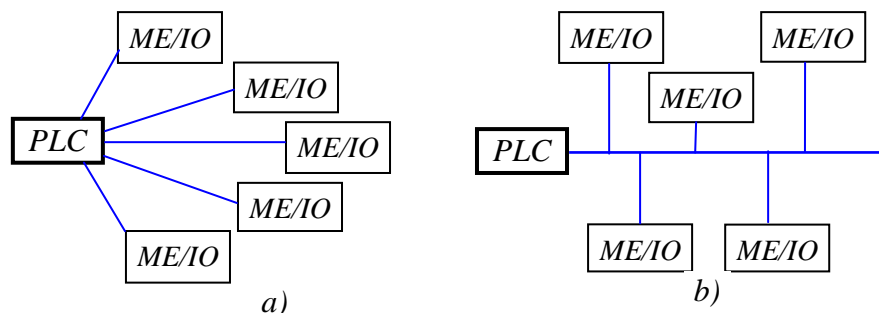
Sl. 1.3 Hijerarhijska struktura mreže za upravljanje u industriji

može koristiti za povezivanje *PLC*-ova sa njihovim supervizijskim računarima ili radnim stanicama za programiranje (tipično su to neki *PC* računari). Mreža na upravljačkom nivou može da koristi sistem obilježja/žetona („*token*“ sistem) da bi se osiguralo da svaki čvor koji treba da pošalje podatke ima mogućnost da to učini.

Treći nivo je takozvana mreža tipa *nivoa uređaja* (engl. *Device level*) i služi da poveže uređaje najnižeg nivoa, kao što su senzori i aktuatori sa odgovarajućim digitalnim procesorom. Tradicionalno se senzori povezuju direktno na *PLC* pa se na prvi pogled može zaključiti da je ovaj nivo

suvišan. Međutim, postoje opravdani razlozi za uvođenje ovog nivoa kao što su nadalje navedeni.

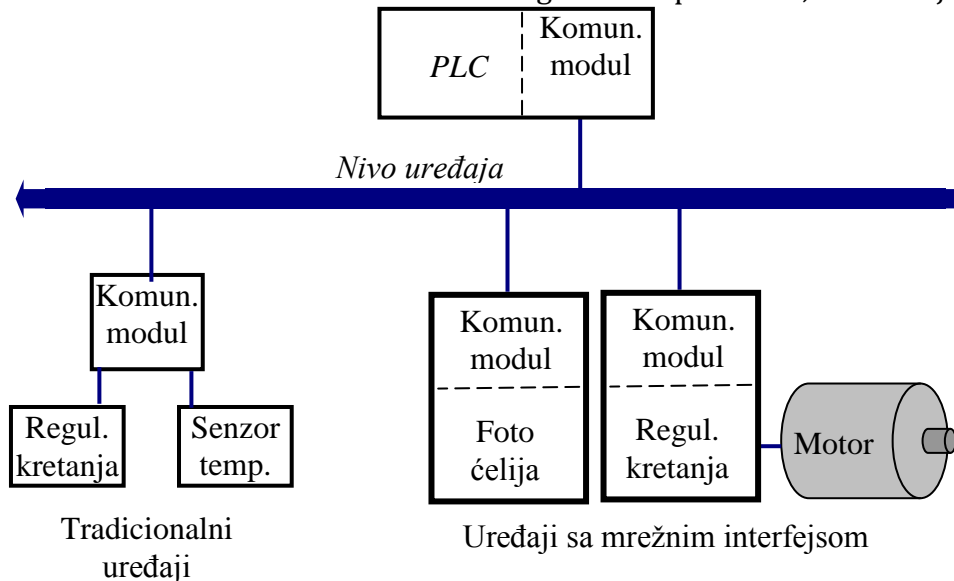
1. Jednostavnije ožičenje, kao što je ilustrovano na Sl. 1.4. Ustvari, mnoge nove verzije automobila koriste ovaj tip mreže kako bi se smanjila dužina kablova. Na Sl. 1.4 sa ME je označen mjerni element, a sa IO izvršni organ.
2. Sa ovom mrežom podaci sa senzora se prenose u digitalnoj formi i na taj način povećava imunitet na smetnje i izbjegava upotreba posebnih linearnih kola.
3. U sensorima se može ugrađivati dodatna obrada signala pa na taj način oni postaju «inteligentni». Naprimjer, neka foto ćelija može poslati poruku da je intenzitet osvjettljenja smanjen ukazujući na zamazanost leća (sočiva) ili da ih je neko izmjestio iz pravilnog položaja.



Sl. 1.4 Načini povezivanja urđaja: a) Tradicionalno povezivanje senzora i aktuatora na PLC, b) Povezivanje pomoću mreže tipa nivoa uređaja

U mreži tipa nivoa uređaja komunikacija može da se realizuje na različite načine što zavisi od određene primjene. U komunikaciji tipa ulazno/izlaznog «*polinga*», PLC proziva senzor da bi prikupio podatke samo u trenucima kada ih treba. U sistemu tipa «*promjena-stanja*» (engl. *change-of-state*) senzor inicira komunikaciju u trenutku u kome dođe do promjene stanja (naprimjer, prekidač na vratima peći će poslati signal jedino kada se vrata stvarno otvore). U «*cikličnom*» sistemu senzor šalje podatke nakon unaprijed određenog vremenskog intervala. U «*stroboskopskom*» sistemu, jedna poruka se šalje na više uređaja istovremeno.

Na Sl. 1.5 je prikazano kako se povezuju tradicionalni uređaji i uređaji koji imaju ugrađene komunikacione interfejsse [33]. Kod korišćenja povezivanja pomoću mreže nivoa uređaja, svaki uređaj mora da ima poseban interfejs za povezivanje na mrežu [8], [28]. Tipični tradicionalni senzori kao što su granični prekidači, fotočelije i



Sl. 1.5 Kombinovanje tradicionalnog povezivanja uređaja i pomoću mreže tipa nivoa uređaja.

temperaturni senzori se najprije povezuju na komunikacioni modul. Ovaj modul omogućava da operator dodijeli adresu za svaki uređaj. Sofisticiraniji uređaji, kao što su kontroleri za motore, imaju ugrađena kola za mrežno povezivanje. Takođe, da bi sve ovo bilo funkcionalno, program *PLC* mora da ima instrukcije za inicijalizaciju startanja za sve uređaje kojima je to potrebno i da komunicira sa svim uređajima povezanim na mrežu. Primjeri mreža tipa nivoa uređaja su *DeviceNET* (*Allen –Bradley*) i *PROFIBUS*.

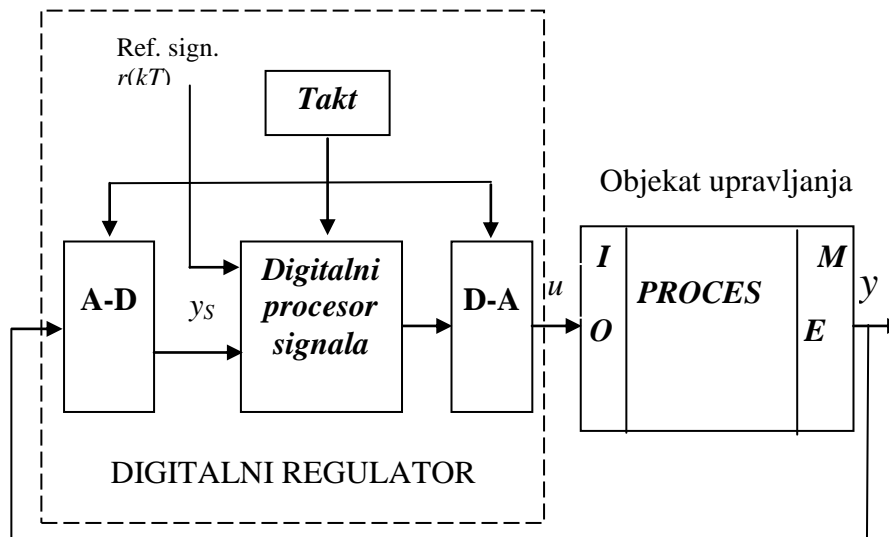
2.1 Osnovni efekat kod digitalne realizacije regulatora

Imajući u vidu prethodno, nameće se zaključak da računarsko vođenje, zavisno od složenosti hijerarhijske strukture, uključuje pored direktnog upravljanja i nadzor i vođenje. Upravljanje u realnom vremenu ili

direktno računarsko vođenje se realizuju na upravljačkom nivou ili nivou uređaja. U ispunjavanju ovih funkcija vrlo je značajno vrijeme za koje računar (regulator) djeluje na proces.

Sa druge strane, vođenje na višem hijerarhijskom nivou po pravilu ima karakter monitoringa, gdje se upravljački signali ne šalju direktno na proces nego samo povremeno signali vođenja na računare (regulatore) na nižim nivoima. U tom smislu je problem potrebnog vremena da računar reaguje na promjene stanja procesa mnogo značajniji na nižim hijerarhijskim nivoima. U tom smislu se za računarsko vođenje na nižim nivoima koristi termin regulacija, a na višim nivoima vođenje.

Tipična struktura ovakvog sistema u zatvorenoj sprezi u kojoj digitalni računar obavlja funkciju regulatora je prikazana na Sl. 1.6



Sl. 1.6 Struktura sistema sa digitalnim upravljanjem

Pomoću časovnika realnog vremena (*Takt*) se sinhronizuju operacije analogno-digitalne (A-D) konverzije, izračunavanja zadatog zakona upravljanja i digitalno-analogne (D-A) konverzije. Sve ove operacije se ponavljaju nakon svake periode odabiranja T . Postoje dva osnovna načina analize ovih sistema u kojima se pojavljuju vremenski diskretni signali ($y(kT)$, $u(kT)$) i drugi. Jedan način se primjenjuje kada je frekvencija odabiranja $f_s = 1/T$ mnogo veća od propusnog opsega sistema u zatvorenoj

sprezi i kada se može iskoristiti teorija kontinualnih sistema i zatim jednostavno primijeniti diskretizaciju po vremenu zakona upravljanja dobijenog tim postupkom. Drugi pristup je da se koriste metodi koji su specijalno razvijeni za vremenski diskretne sisteme. Kao jednostavno pravilo kod primjene prvog pristupa, usvaja se da frekvencija odabiranja bude za red veličine veća od propusnog opsega sistema u zatvorenoj sprezi. Ali u ovom smislu ne treba biti dogmatičan. Naime, nekada se ovaj pristup može primijeniti i kada je frekvencija odabiranja manja od ovako preporučene vrijednosti, a nekada se poteškoće javljaju i u slučaju mnogo većih odnosa od onih koji su dati navedenim pravilom.

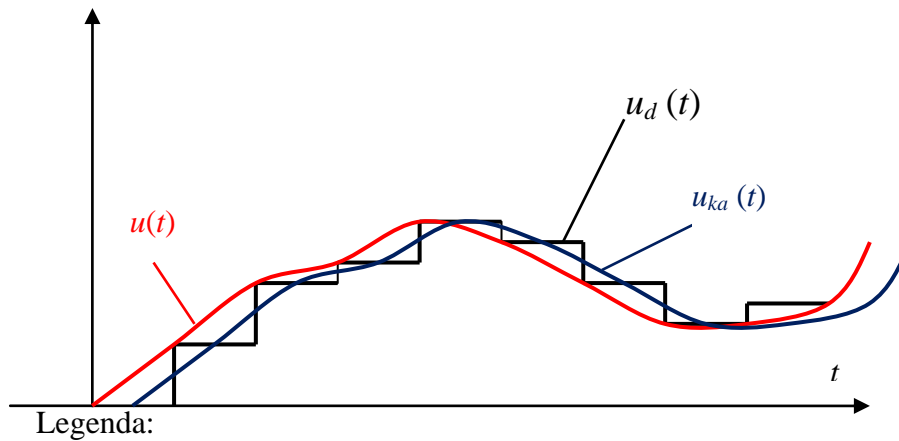
Kontroler se može projektovati na takav način da zadovoljava jednostavnije ili mnogo složenije specifikacije u pogledu performansi i načina rada. Iz ovih razloga to može biti jednostavan logički uređaj kao što je naprimjer *PLC* ili računar sa odgovarajućim interfejsom za fizičko povezivanje sa okolinom i operatorom na sistemu, koji izvršava složeni algoritam upravljanja (naprimjer, adaptivno upravljanje) i supervizijsku kontrolu načina rada.

Kod sinteze regulatora za kontinualne objekte upravljanja je logična primjena postupaka koji se odnose na vremensko i/ili frekvencijsko područje kontinualnih sistema. Imajući u vidu prednosti računarskog vođenja (regulacije) potrebno je napomenuti da postoje i neki suštinski negativni efekti u odnosu na kontinualno vođenje procesa. Jedan od najznačajnijih efekata kod primjene računarskog vođenja je prisustvo transportnog kašnjenja koje se pojavljuje u sistemu na Sl. 1.6.

Najčešće D-A konvertor obavlja funkciju kola zadržke nultog reda, to jest izračunata vrijednost upravljačkog signala $u(kT)$, $k=0,1,2,\dots$ se zadržava do sljedećeg trenutka odabiranja pa imamo $u(t)=u(kT)$, $kT \leq t < kT+T$ (Sl. 1.7). Zbog jednostavnosti objašnjenja možemo pretpostaviti da računar (digitalni regulator) na Sl. 1.6 samo obavlja funkciju odabiranja i zadržke za jednu periodu T , i da Digitalni processor signal računa upravljački signal prema:

$$u(kT)=r(kT)-y(kT).$$

Ove operacije u tom slučaju izazivaju efekat koji je ilustrovan na Sl. 1.7. Naime, uzimanje odbiraka mjernog signala i njihovo zadržavanje za jednu periodu odabiranja daje kao rezultat signal $u_s(t)$. Imajući u vidu realne sklopove koji obavljaju pomenute operacije možemo očekivati da ćemo kao rezultat dobiti neku aproksimaciju signala $u_s(t)$, koja je na slici predstavljena signalom $u_{ka}(t)$. Ovo je sve skupa ilustrovano na Sl. 1.7, a



Legenda:

$u(t)$ "originalan" kontinualni upravljački signal,

$u_d(t)$ digitalni ekvivalent signala (odmjerena pa zadržana vrijednost),

$u_{ka}(t)$ kontinualna aproksimacija originalnog kontinualnog signala

Sl. 1.7 Ilustracija kašnjenja koje je posljedica diskretizacije

pomenuta aproksimacija je prikazana crtkanom linijom na Sl. 1.7. Može se primijetiti da je oblik ove aproksimacije približno isti kao i oblik originalnog upravljačkog signala $u(t)$ samo sa kašnjenjem od $T/2$. Dakle, glavni efekat diskretizacije u vremenu i zadržke za jednu periodu T je transportno kašnjenje jednako polovini ove periode odabiranja. Prisustvo ovog vremenskog kašnjenja prouzrokuje destabilišući efekat na sistem u zatvorenoj sprezi. Ovo znači da će, u odnosu na kontinualni sistem, kod računarskog vođenja kojim se realizuje odgovarajući kontinualni zakon upravljanja, biti lošije performanse sistema (manja rezerva stabilnosti, a time i lošiji pokazatelji kvaliteta u prelaznom režimu).

Prethodno je ilustrovan jedan negativan efekat kod primjena računarskog vođenja procesa. Ipak su, kao što praksa pokazuje, mnogo veće prednosti digitalne implementacije upravljanja [2], [10], [25], [33], [34].