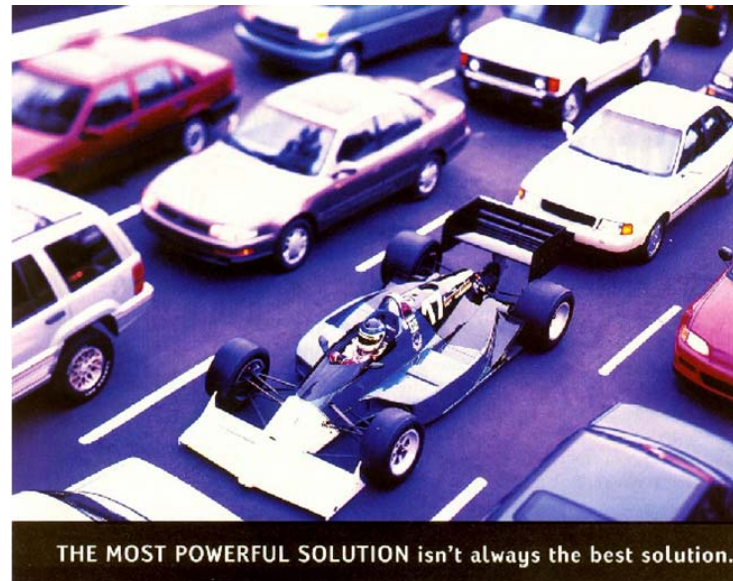




Faculty of Electrical Engineering
Department of Automatic Control
and Electronics, Sarajevo

Data Acquisition and Transmission Akvizicija i prijenos podataka



9. Real-Time Communications Komunikacije u stvarnom vremenu

Doc.dr. sc. Jasmin Velagić, Ph.D.

2007/2008

Sadržaj poglavlja:

- ✚ Komunikacije u stvarnom vremenu
 - Sistem za upravljanje u stvarnom vremenu
 - Komponente kašnjenja komunikacijske mreže
 - Osnove RT komunikacijskih mreža
 - Distribuiranost podataka u RT mrežama
 - Načini prijenosa podataka u RT mrežama
 - Ciklički način rada
 - Događajni način rada
 - Komunikacijski model u stvarnom vremenu

9. Komunikacije u stvarnom vremenu

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Izraz "real-time" znači sve što je dovoljno "brzo", "stvarno" ili "on-line".

Definicija: real-time sistem upravljanja je sistem od koga se zahtijeva da generira izlazni signal unutar definiranog ograničenog vremenskog intervala.

Razine real-time zahtjeva:

- odgovoriti na sva real-time ograničenja ispravno (hard real-time),
- odgovoriti na vremenska ograničenja u većini vremena (soft real-time)
- odgovoriti na neka vremenska ograničenja ispravno, a na ostala u većini vremena.

Ovi zahtjevi moraju biti zadovoljeni također i unutar izvjesnih vremenskih ograničenja.

Efekti kašnjenja

- U zadacima regulacije, kašnjenja računara se iskazuju kao mrtva vremena, koja mogu biti dodatno povećana uslijed odstupanja (kašnjenje) varijabli.
- U sekvencijalnim zadacima, kašnjenja usporavaju operacije procesa, koje mogu ići ispod granice koju proces može tolerirati.

9.1. Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Vremena reagiranja

- 10 μ s: pozicioniranje cilindra u offset štampanju (0,1 mm sa 20 m/s).
- 46 μ s: sinhronizacija senzora u “bus-bar” zaštiti za podstanice (1° @ 60Hz).
- 100 μ s: rezolucija sata za brza vozila (1m na 360 km/h).
- 100 μ s: rezolucija događaja u električnim mrežama.
- 1,6 ms: vrijeme uzorkovanja za algoritme zaštite u podstanici.
- 10 ms: rezolucija događaja u procesnoj industriji.
- 20 ms: vrijeme potrebno za zatvaranje ili otvaranje visoko-strujnog prekidača.
- 200 ms: prihvatljiva reakcija na komande operatera (hard-wire feel).
 - 1 s: prihvatljivo vrijeme osvježavanja podataka na operatorskom monitoru.
 - 3 s: prihvatljivo vrijeme postavljanja nove slike na operatorskom monitoru.
 - 10 s: prihvatljivo vrijeme oporavka u slučaju pada nadzornog računara.
- 1 min: upit za osvježavanje baze procesnih podataka u slučaju velikog kraha.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Vremena obrade

- 1 μ s: dodavanje dvije varijable u PLC-u.
- 10 μ s: izvršavanja koraka iteracije za PID upravljački algoritam.
- 30 μ s: vrijeme kašnjenja u 3000 metara dugoj komunikacijskoj liniji.
- 40 μ s: tretiranje prekida unutar procesa.
- 160 μ s: slanje zahtjeva i primanja direktnog odgovora u sabirnici procesa (field bus).
- 100 μ s: zadatak prekida u real-time kernel-u.
- 200 μ s: pristup objektu u brzom procesnoj bazi (u RAM-u).
- 1 ms: izvršavanje osnovne komunikacijske funkcije između zadataka.
- 2 ms: slanje datagrama (skupa podataka) kroz lokalnu mrežu (bez arbitraže).
- 16 ms: vrijeme ciklusa sabirnice polja (vrijeme osvježavanja za periodičke podatke).
- 60 ms: vrijeme ciklusa komunikacijskog zadatka u PLC-u.
- 120 ms: izvršavanje procedura udaljenih poziva (DCOM, CORBA).

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Primjer vremena obrade i vremena kašnjenja

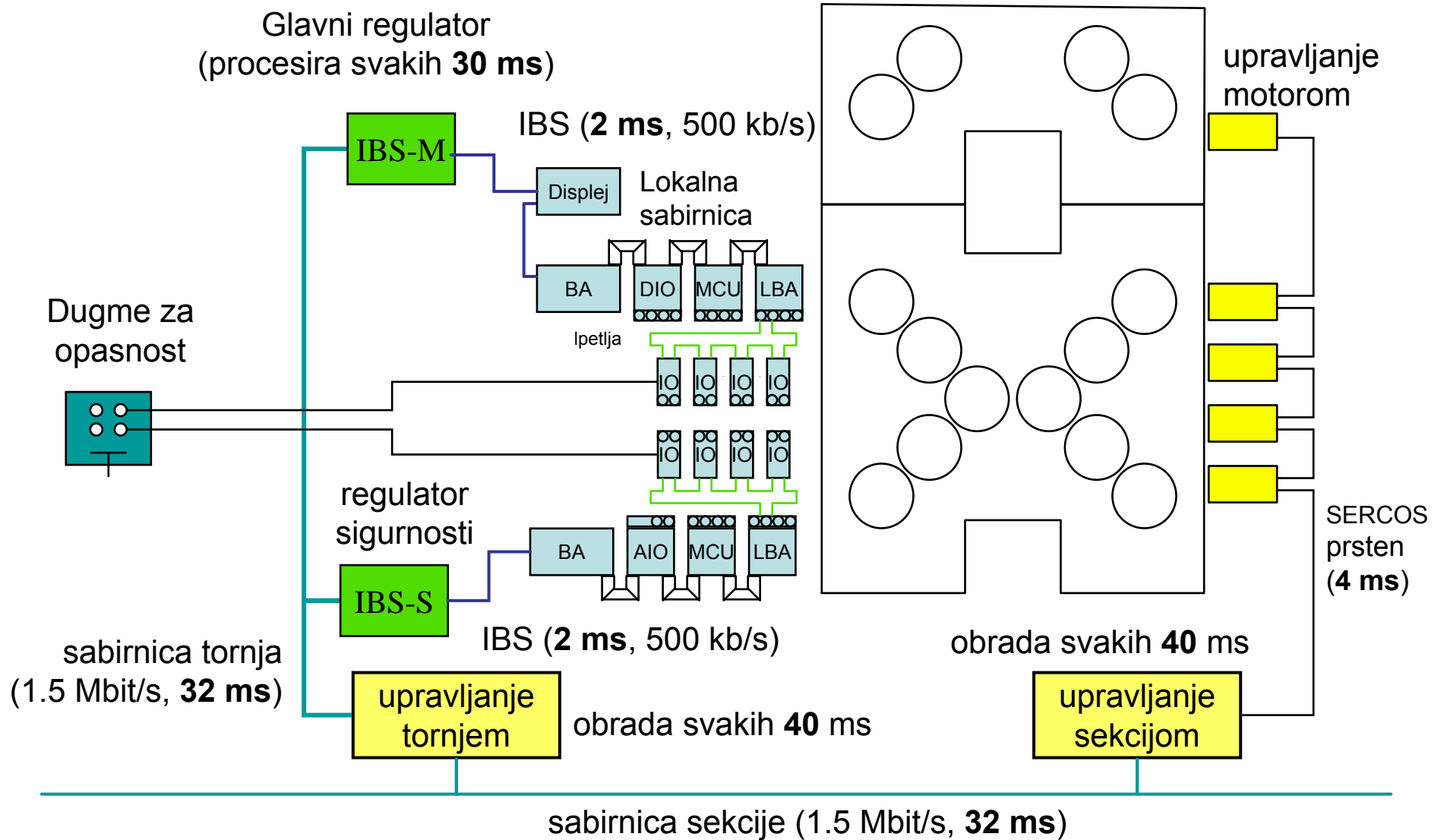
Zaustavljanje
u slučaju
opasnosti



Operater drži jednu ruku na dugmetu za rotiraje valjka dok drugom rukom vrši njegovo pranje. Ako krpom za pranje pritisne valjak i otpusti dugme, tada očekuje da se cilindar zaustavi za pola sekunde.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Staza signala od pritiska na dugme za opasnost do motora



Ukupno kašnjenje staze: $2 + 30 + 32 + 40 + 32 + 40 + 4 = 180 \text{ ms}$!

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

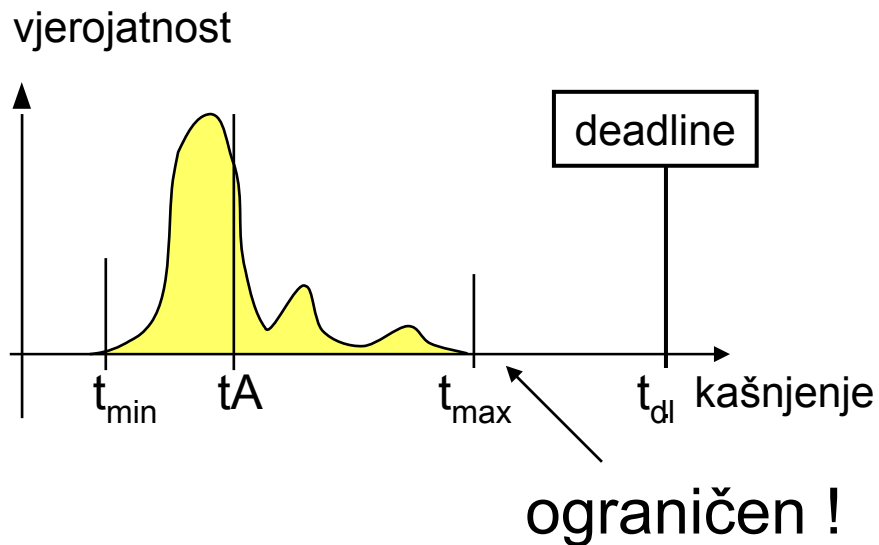
Kašnjenje staze i vrijeme reagiranja

- Najsigurniji sistemi reagiraju negativno:
 - > gubitak “ok” signala (promjena životnog stanja) prekida se dugmetom za slučaj opasnosti.
- Upravljanje motorom očekuje da informacija “dugme za slučaj opasnosti nije pritisnuto” se osvježava svakih $3 \times 180 = 540$ ms za savlađivanje dvije uzastopne greške prijenosa, u suprotnom se prekidaju motori i dovode u stanje zastoja.
- Signal prekomjernog kašnjenja uzrokuje lažni alarm -> utječe na raspoloživost procesa (klijent ne želi prihvatiti više od 1-2 prekida u slučaju opasnosti zbog lažnog alarma po godini).
- Dakle, upravljanje kašnjenjem signala je važno za:
 - sigurnost,
 - raspoloživost.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

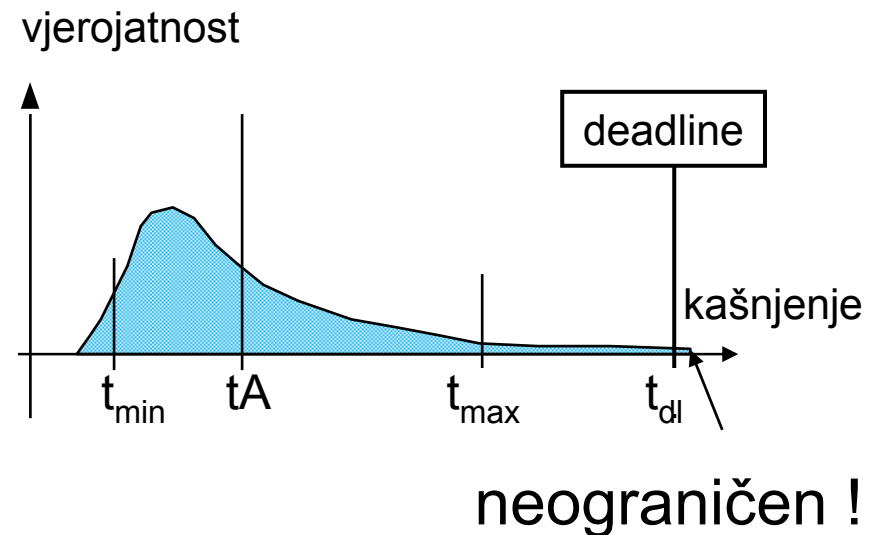
Tvrdo (hard) i meko (soft) stvarno vrijeme

tvrdi real-time
(determinističko)



Vjerojatnost da kašnjenje prelazi proizvoljnu vrijednost jednaka je nuli unutar normalnih radnih stanja, uključujući oporavak od stanja greške.

meko real-time
(nedeterminističko)

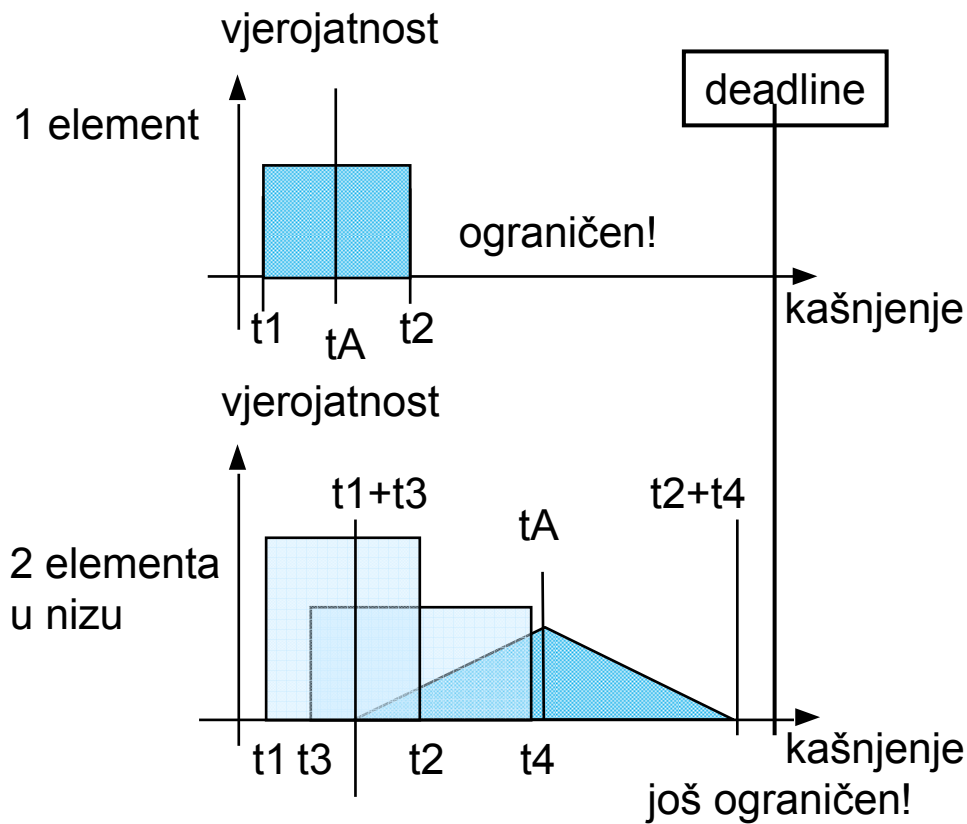


Vjerojatnost da kašnjenje prelazi proizvoljnu vrijednost je mala, ali je različita od nule unutar normalnih radnih stanja, uključujući oporavak od stanja greške.

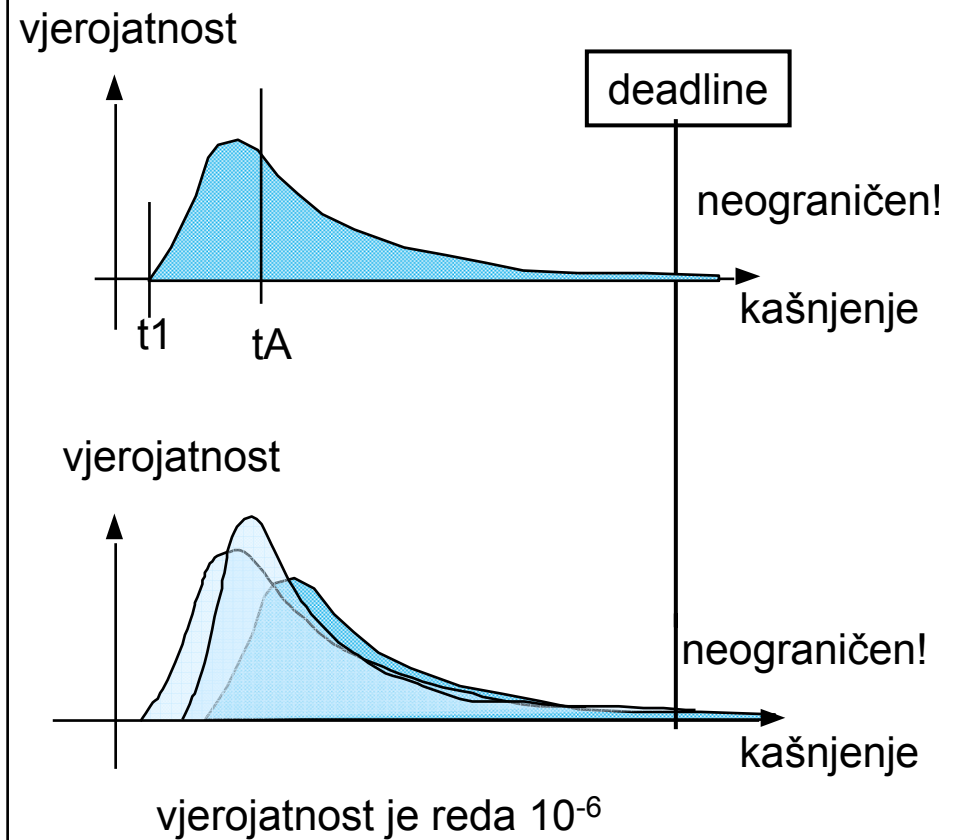
Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Tvrdo (hard) i meko (soft) stvarno vrijeme: niz veza

tvrdi real-time
(cikličko)



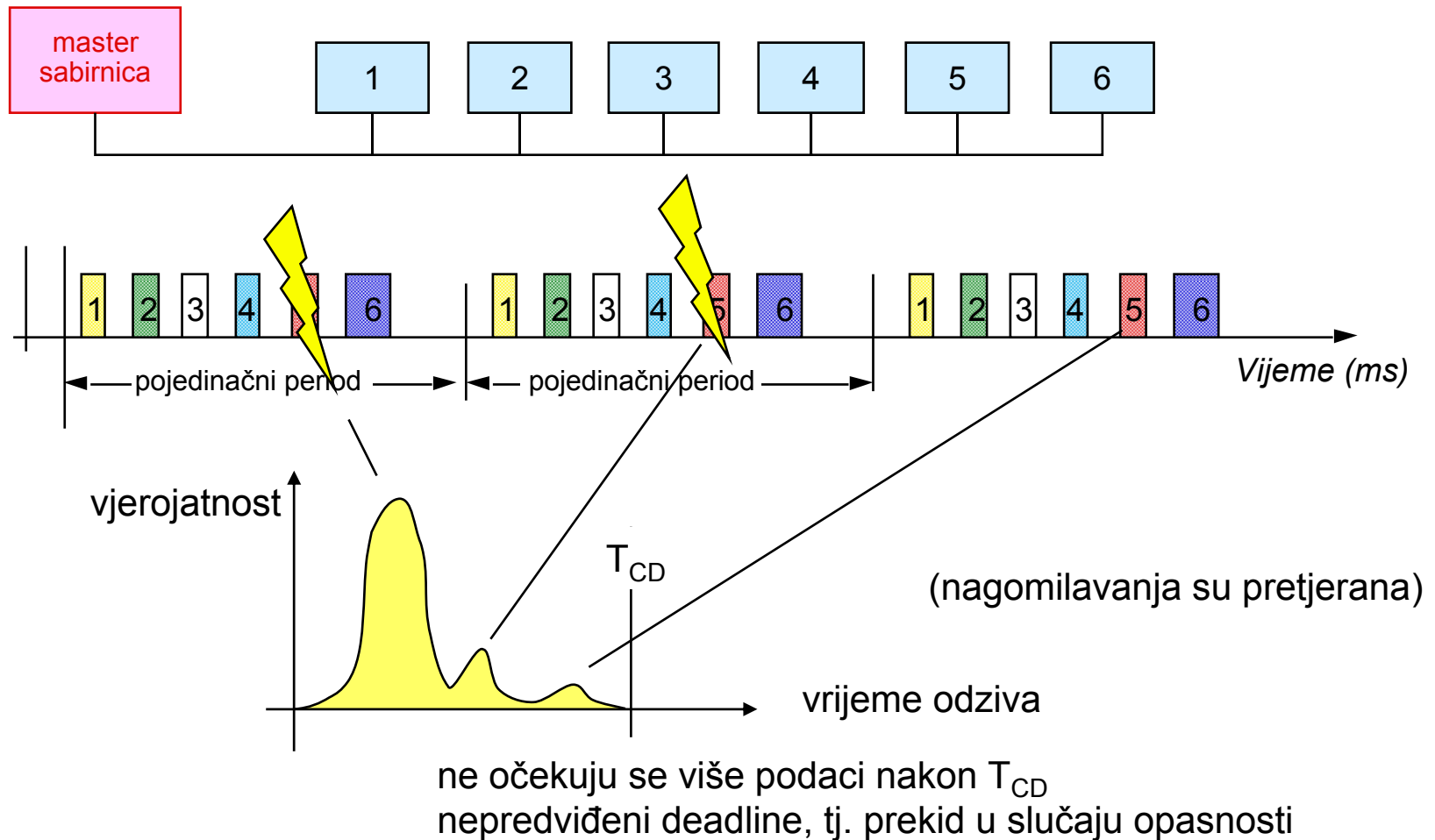
meko real-time
(uzročno, CSMA)



vjerojatnost dva elementa u nizu = konvolucijski integral.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Determinizam i pogrešni prijenosi



Primjer: vjerojatnost gubitka podataka po periodu = 0.001,
vjerojatnost da se ne prekorači T_{CD} nakon 3 pokušaja = 10^{-9} ,
isti red veličine kao kod hardverskih greški -> akcija opasnosti opravdana.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Deterministički sistem

- ❑ Deterministički sistem će reagirati sa ograničenim kašnjenjem unutar svih stanja.
- ❑ Deterministički sistem može pretrpjeti udar vanjskih uzročnika (kvar uređaja, severing komunikacijske linije), ali se to promatra kao prihvatljiva izvanredna situacija čija je reakcija predviđena.
- ❑ Determinizam implicira prethodno rezerviranje svih resursa (sabirnica, memorijski prostor,...) potrebnih za vremensko kompletiranje zadatka.
- ❑ Svi elementi lanca od senzora do aktuatora moraju biti deterministički da bi ukupno ponašanje bilo determinističko.
- ❑ Nedeterminističke komponente mogu biti korištene, osiguravajući da se one propisno “upakiraju”, tako da se njihov nedeterminizam ne pojavljuje kod njihovog korisnika.

Primjeri:

- Redovi čekanja mogu biti korišteni da omoguće: algoritam visoke razine koji će osigurati da čekanja nikad ne sadrže više od N elemenata.
- Prekidi mogu biti korišteni da omoguće: rukovanje koje je tako kratko da ne može uzrokovati da zadatak prekida izgubi svoj deadline, frekvencija prekida postaje ograničena drugim pravilima (npr. zadatak mora pozvati prekide).

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Nedeterministički sistem

Nedeterministički sistem može da ne dosegne svoj deadline zbog unutarnjih uzročnika (pretrpanost, čekanje resursa) bez djelovanja vanjskih utjecaja.

Računari i komunikacije mogu unijeti nedeterministička kašnjenja, uslijed unutarnjih i vanjskih utjecaja:

- odziv na vremenski neusklađene (asinhronne) događaje iz vanjskog svijeta (prekidi),
- pristup zajedničkim resursima: računarska moć, memorija, mrežni uređaji,...
- korištenje uređaja sa nedeterminističkim ponašanjem (pozicija sektora hard-diska).

Nedeterminizam je posebno uzrokovan sa:

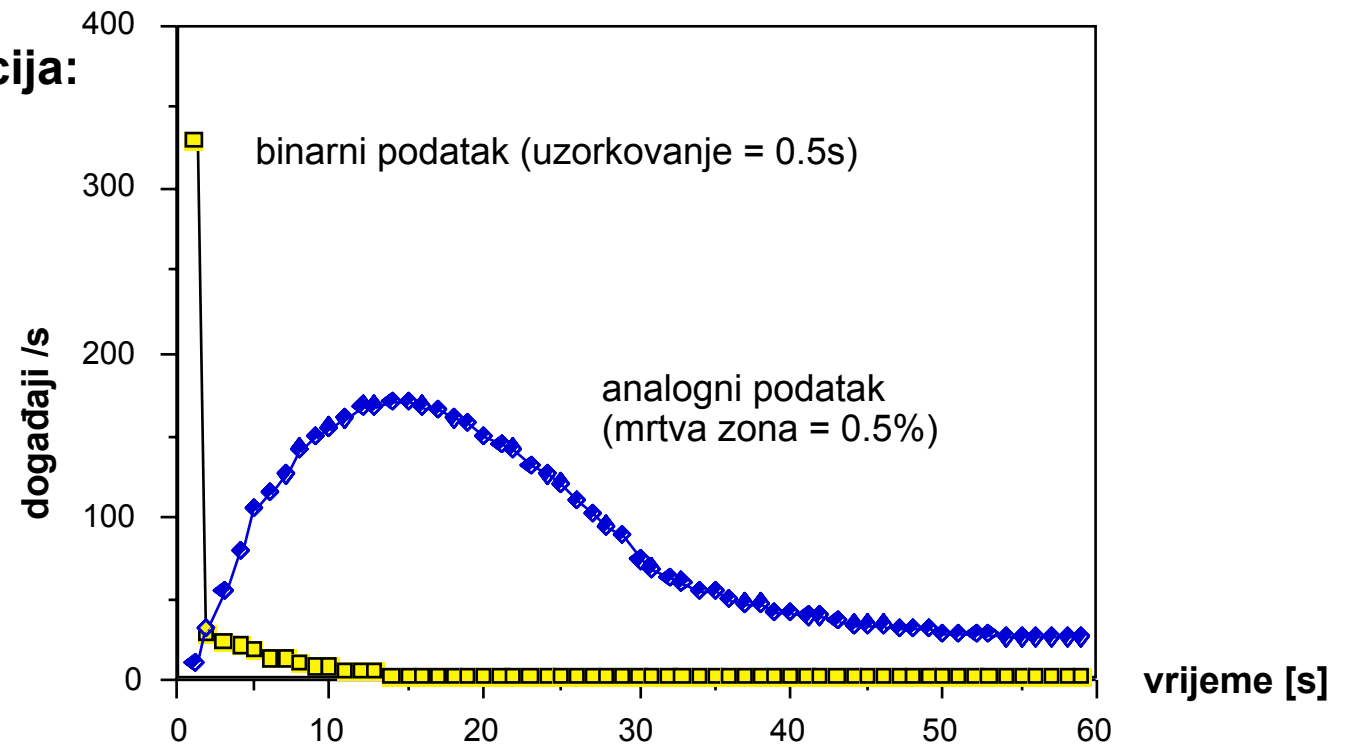
- Operacijskim sistemima sa preventivnim planiranjem (UNIX, Windows,..) ili virtualnom memorijom (njihov algoritam planiranja ne može se parametrizirati)
- Programskim jezicima sa kolekcijom "otpadaka" (Java, C#, ...),
- Komunikacijskim sistemima korištenjem dijeljenja medija sa sukobom (Ethernet).
- Redovima čekanja za pristup mreži (portovi, slogovi).

Nedeterminizam je usko povezan sa operacijom trenutnog odziva (događajno upravljanje).

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Analiza odziva događajno-upravljanog sistema

Tipična stresna situacija:
gubitak napajanja
(energije)

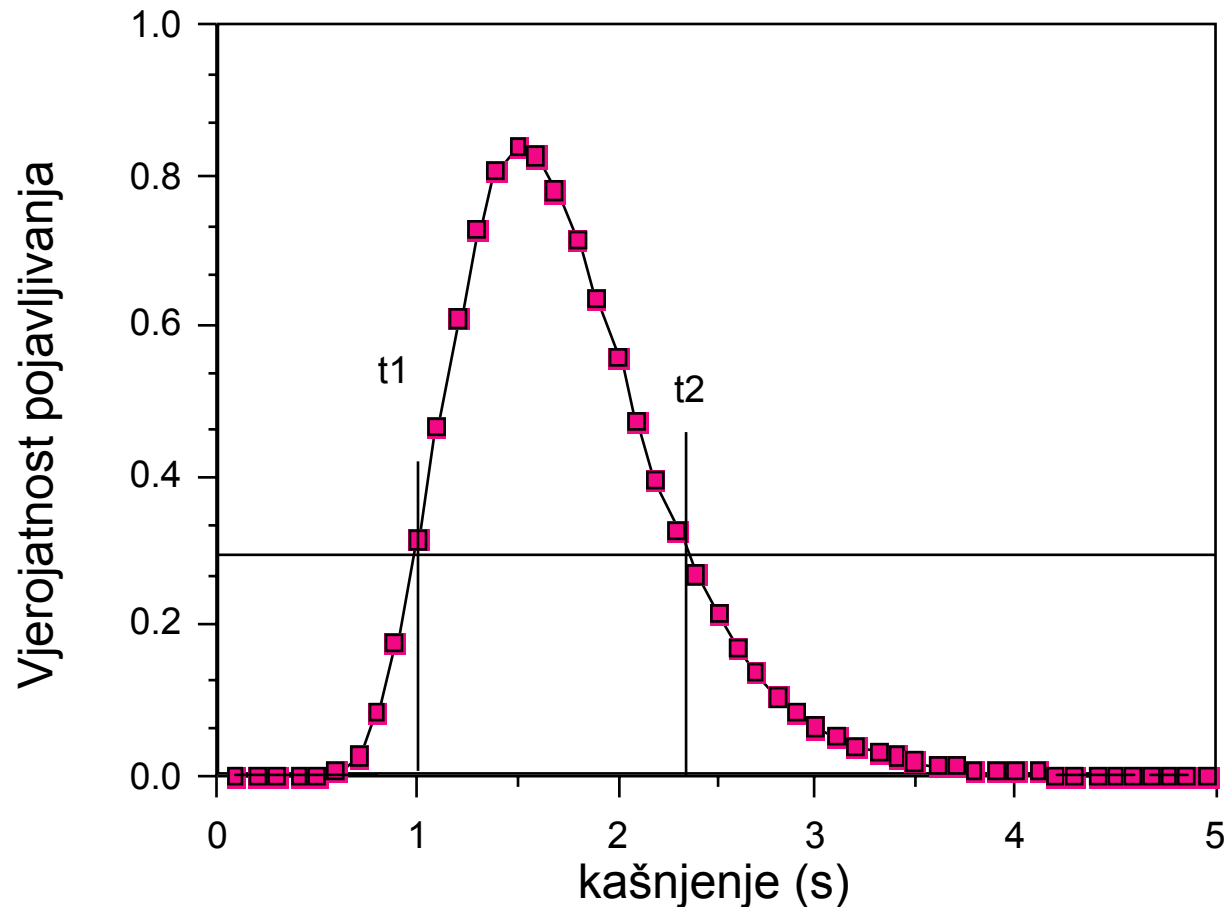


Binarne varijable: događaj je promjena stanja.

Analogne varijable: događaj je promjena vrijednosti više od 0.5 %.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

Obrada događaja: kašnjenje unutar prikazane promjene varijable



Analiza distribucije kašnjenja u svim mogućim slučajevima traži kompletno znanje o postrojenju (procesu) i događajima koji djeluju na proces. Ne uzima samo prijenos događaja vrijeme, već i buduća obrada.

Sistem upravljanja u stvarnom vremenu

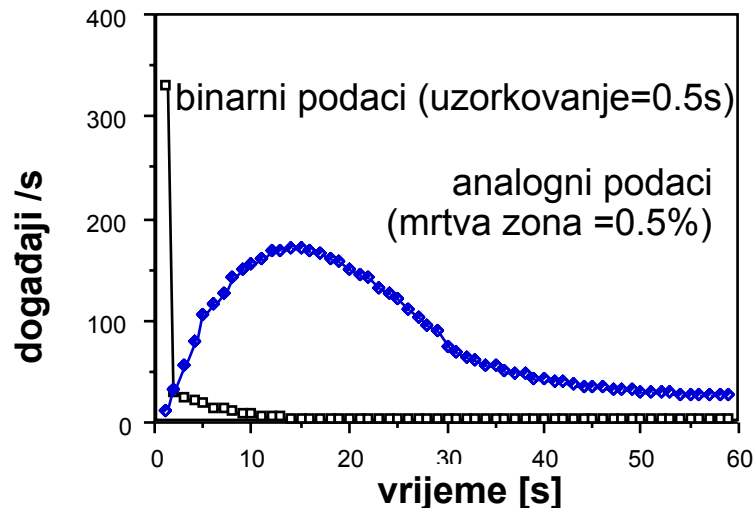
Koje stanje je najlošiji slučaj?

- Svake sekunde, 15.900 varijabli se uzorkuje, ali većina njih ne mijenjaju niti izazivaju događaj.
- Budući da se događaji raspršuju podjednako preko DDS-a, redovi se ne formiraju dok brzina prijenosa ne pređe 288 događaja po sekundi.

Najlošija situacija: gubitak energije (snage) sekundara.

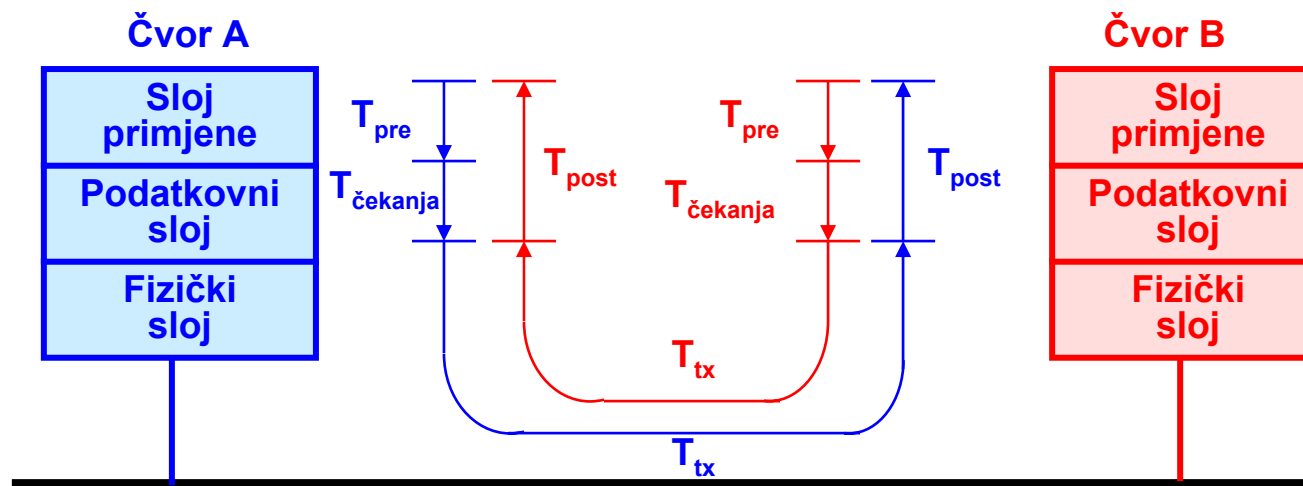
- 2500 binarnih događaja pojavljuje se u prvoj sekundi, ali se u narednim sekundama pojavljuje još nekoliko događaja.
- Sa automatskom re-konekcijom, drugi vrh (peak) može se pojaviti.
- Analogna lavina uzrokuje oko 100 promjena u 2 sekunde i 40 u slijedećih 40 sekundi.

Binarna ili analogna
lavina



9.2. Kašnjenja u komunikacijskoj mreži

Komponente vremenskog kašnjenja kod kom. mreže



- **Ukupno vrijeme kašnjenja od kraja-na-kraj je suma:**

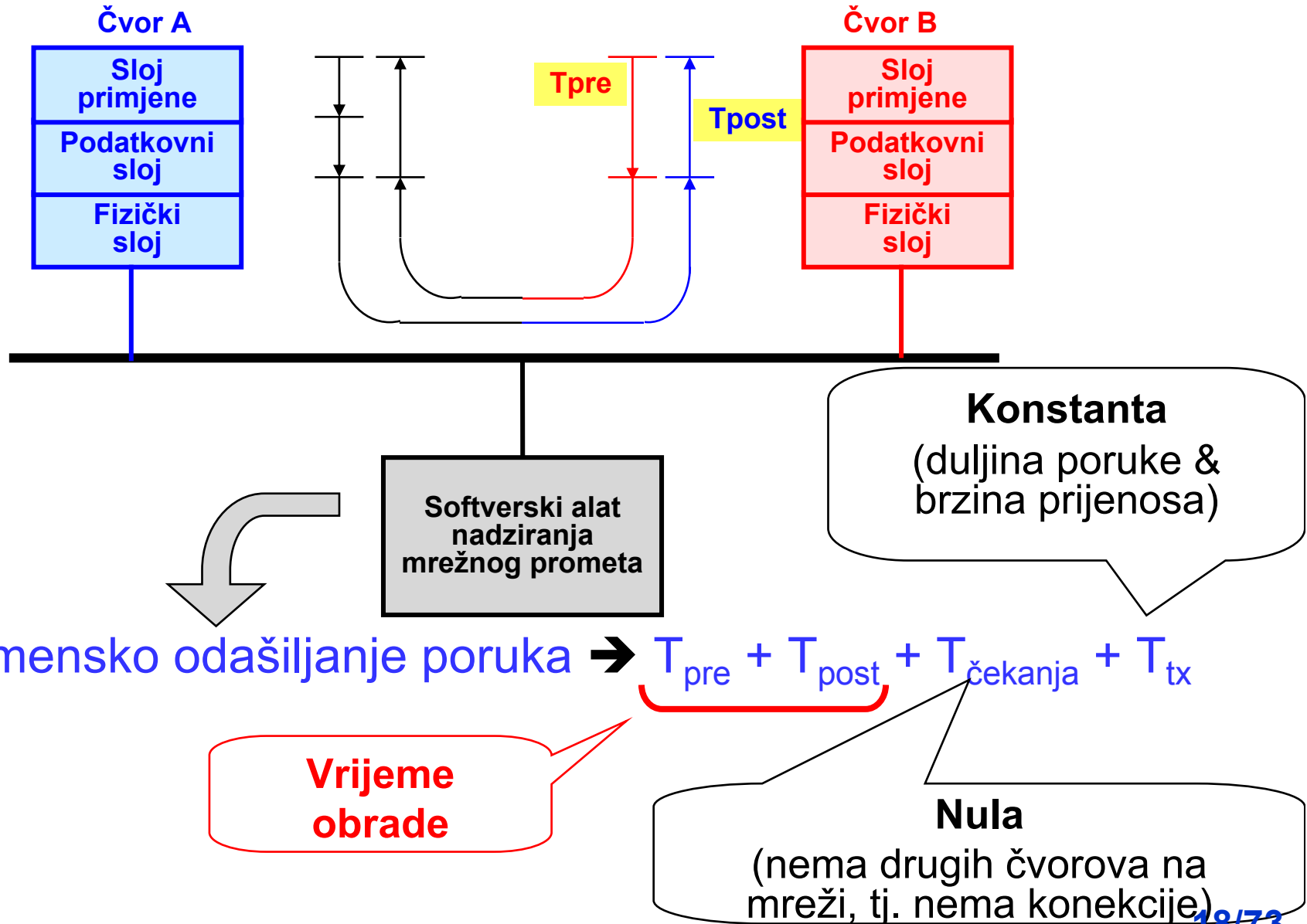
Kašnjenje uređaja

- Vremena prethodne obrade: mikroprocesor
- Vremena čekanja: mrežni protokol - MAC
- Vremena prijenosa: brzina prijenosa & duljina
- Vremena naknadne obrade: mikroprocesor

Kašnjenja mreže

Kašnjenja u komunikacijskoj mreži

Određivanje kašnjenja uređaja: vrijeme obrade



Kašnjenja u komunikacijskoj mreži

Profili kašnjenja

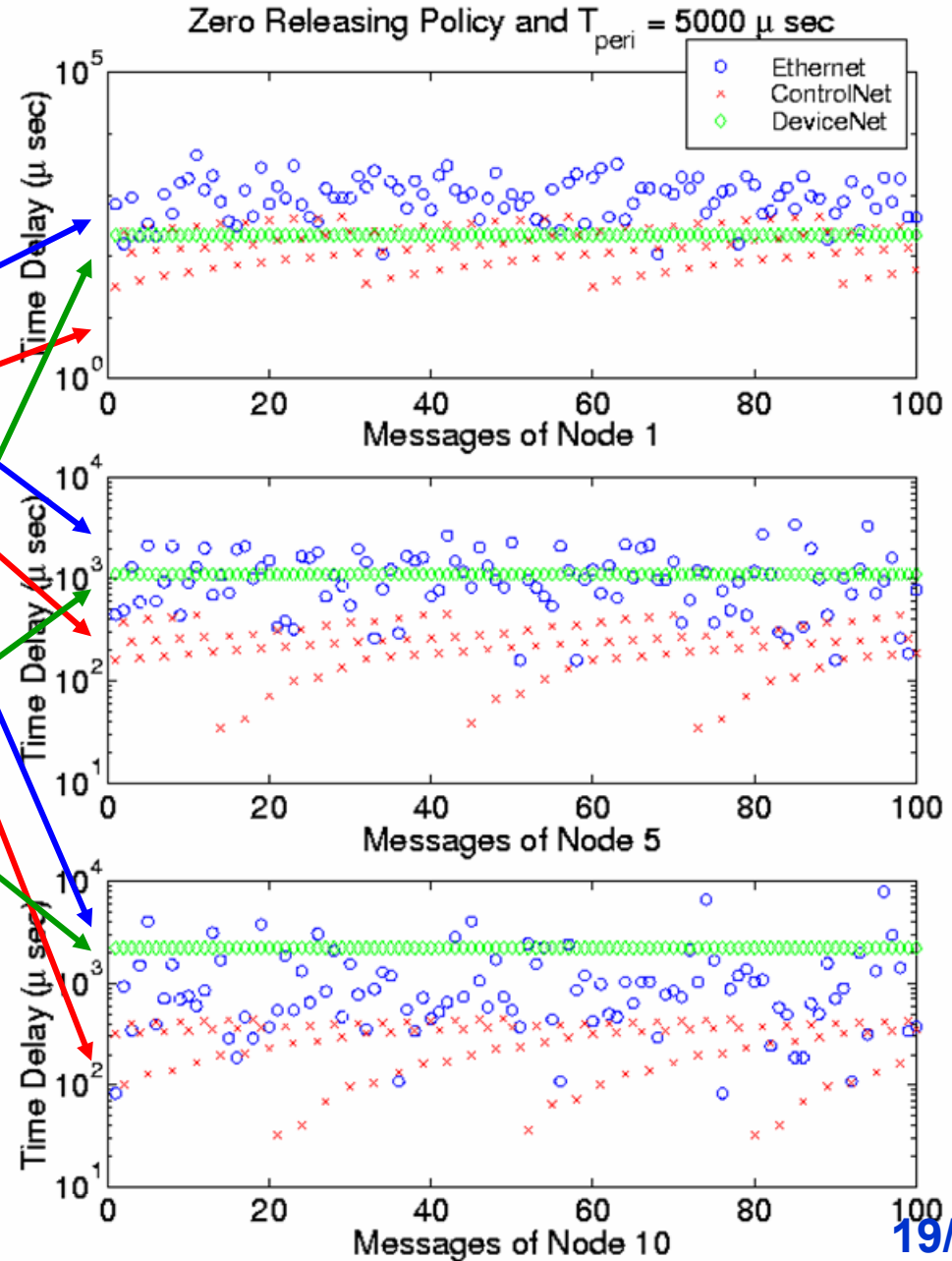
- Ethernet,
ControlNet
– slično

- DeviceNet:
– različito

čvor 1

čvor 5

čvor 10



9.3. Osnove RT komunikacijskih mreža

Osnovni pojmovi i prednosti

- ❑ RT komunikacijska mreža povezuje moderne, inteligentne mjerne i izvršne članove (senzore i aktuatora) sa upravljačkim uređajima.
- ❑ Umjesto tačka-tačka povezivanja svakog mjernog/izvršnog člana na odgovarajući upravljački uređaj, primjenjuje se serijska komunikacijska mreža koja povezuje sve mjerne i izvršne članove i uređaje za lokalno upravljanje.
- ❑ Prednosti primjene RT mreže su:
 - smanjenje (troškova) ožičenja,
 - jednostavnija sučelja mjernih i izvršnih članova sa upravljačkim uređajem (npr. nema potrebe za A/D i D/A pretvornicima),
 - razmjena većeg broja informacija (npr. dijagnostički i kalibrirajući podaci)
 - jednostavnije otkrivanje i ispravljanje grešaka,
 - jednostavnije puštanje u rad,
 - povećana modularnost sistema upravljanja
 - pojednostavljeno proširivanje sistema,
 - veliki broj uređaja raznih proizvođača koji zadovoljavaju isti komunikacijski standard.

Osnove RT komunikacijskih mreža

Nedostaci primjene RT komunikacijskih mreža

- ❑ **Nedostaci primjene RT mreža u odnosu na klasično ožičenje:**
 - niža pouzdanost prijenosa podataka, ako se ne koriste udvostručeni vodovi;
 - dulje vrijeme prijenosa podataka zbog zajedničkog korištenja istog prijenosnog medija – serijski prijenos podataka umjesto paralelnog;
 - složeniji elektronički sklopovi mjernih i izvršnih članova te poteškoće njihova napajanja.

Osnove RT komunikacijskih mreža

Radni zahtjevi na RT mreže

- ❑ RT komunikacijske mreže moraju zadovoljavati slijedeće radne zahtjeve:
 - ✓ Prijenos velikog broja kratkih poruka (procesnih varijabli) uz ograničena kašnjenja (1 ms...1s – ovisno o dinamici upravljanog procesa).
 - ✓ Čvorovi na mreži moraju biti međusobno potpuno neovisni, jer kvar na nekom čvoru ne smije imati posljedice na normalan rad drugih čvorova (čvorovi moraju biti galvanski odvojeni od prijenosnog medija).
 - ✓ Otpornost na “zagađenja” okruženja (temperatura, vibracije, EM-smetnje, voda, sol, itd.).
 - ✓ Mora postojati standardizirano sučelje za povezivanje uređaja od različitih proizvođača.
 - ✓ Robusnost i jednostavna montaža i puštanje u rad.
 - ✓ Visoki integritet podataka.
 - ✓ Redudantnost.
 - ✓ Sinhronizacija lokalnih satova stvarnog vremena – globalno vrijeme u mreži.
 - ✓ Kontinuirani nadzor i dijagnostika komunikacije.
 - ✓ Niska cijena (tipično 5 Eura/čvoru).
 - ✓ Srednja brzina prijenosa podataka (50 kbs ... 5 Mbps).
 - ✓ Prijenos RT i sporadičnih (NRT – Non Real Time) poruka.
 - ✓ U nekim primjenama visoki stupanj sigurnosti (npr. opasnost od eksplozije – plinska postrojenja, rudnici, hemijska postrojenja,...).

Osnove RT komunikacijskih mreža

Zahtjevi na komunikacije u stvarnom vremenu

- ❑ **Komunikacijsko kašnjenje treba biti:**
 - ✓ malo, predvidljivo i sa malom promjenjivošću,
 - ✓ istodobna dostupnost poruka većem broju stanica (difuzija), jer neke procesne veličine koristi više stanica.
- ❑ **Kompozabilnost:**
 - ✓ neovisnost rada glavnih procesora stanica i komunikacijskog sistema,
 - ✓ poslužitelj u stanici može garantirati ograničeno i predvidivo kašnjenje jedino ako ga korisnik (klijent) ne preopteretiti sa previše zahtjeva,
 - ✓ komunikacijski sistem treba osigurati upravljanje protokolom zahtjeva klijenta prema poslužitelju.
- ❑ **Fleksibilnost:**
 - ✓ podrška promjenama konfiguracije sistema tokom vremena.
- ❑ **Otkrivanje i ispravljanje grešaka:**
 - ✓ komunikacijske greške – ispravljanje ne smije djelovati na komunikacijsko kašnjenje,
 - ✓ pogreške čvorova – otkriva ih komunikacijski protokol i obavještava sve ostale čvorove u mreži.
- ❑ **Topologije:**
 - ✓ sabirnička i prstenasta,
 - ✓ ako se koriste upletene parice bolja je sabirnička, zbog jednostavnijih sučelja, veće otpornosti na kvarove i istovremenog dolaska poruka od više čvorova,
 - ✓ ako se koriste optički kabeli bolja je prstenasta zbog jednostavnijih sučelja.

Osnove RT komunikacijskih mreža

Glavni konflikti pri odabiru RT protokola

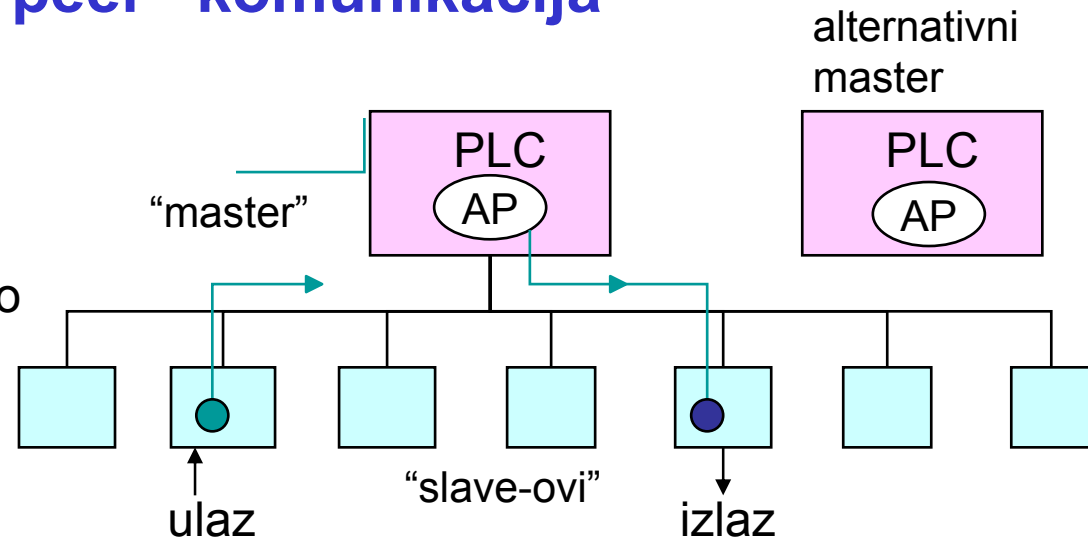
- ❑ **ET upravljanje nasuprot vremenske kompozabilnosti**
 - ✓ Trenutak slanja poruke je nepoznat komunikacijskom sistemu, pa nije moguće postići vremensku kompozabilnost.
- ❑ **Fleksibilnost nasuprot otkrivanja grešaka:**
 - ✓ fleksibilnost podrazumijeva da ponašanje čvora nije unaprijed ograničeno,
 - ✓ otkrivanje grešaka je moguće samo ako je očekivano ponašanje čvora poznato.
- ❑ **Sporadični podaci nasuprot periodičkih podataka:**
 - ✓ periodički podaci se prenose u regularnim intervalima,
 - ✓ sporadični podaci se mogu pojaviti u bilo kojem trenutku ⇒ narušavanje regularnosti prenošenja periodičkih podataka.
- ❑ **Centralno upravljanja komunikacijom nasuprot otpornosti na kvarove:**
 - ✓ kvar centralnog računara izaziva prekid komunikacije,
 - ✓ ako upravljanje preuzima drugi računar, opet može nastupiti preveliko kašnjenje.
- ❑ **Stohastički pristup mediju nasuprot determinističke redudancije:**
 - ✓ prelazak na rezervni komunikacijski kanal može dovesti do drukčijeg stanja, zbog stohastičnosti pristupa mediju – inkonzistentnost sistema.

9.4. Distribuiranost podataka u RT mrežama

Master-slave i “peer-to peer” komunikacija

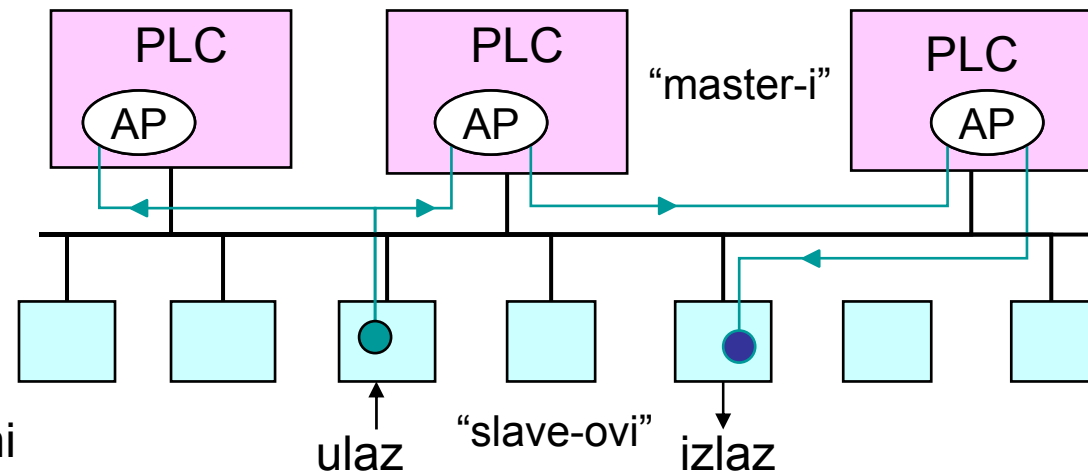
centralni master: hijerarhijsko

- Sva komunikacija se odvija preko mastera (aktivni čvor, PLC).
- Dodavanje novog mastera je teško (on bi morao biti i master i slave).



peer-to-peer: distribuirano

- Aktivni čvorovi (PLC-ovi) mogu izmjenjivati podatke, dijeliti ulaze i izlaze.
- Omogućuje postizanje redundancije i “distribuirane inteligencije”.
- Uređaji komuniciraju direktno jedni sa drugim.

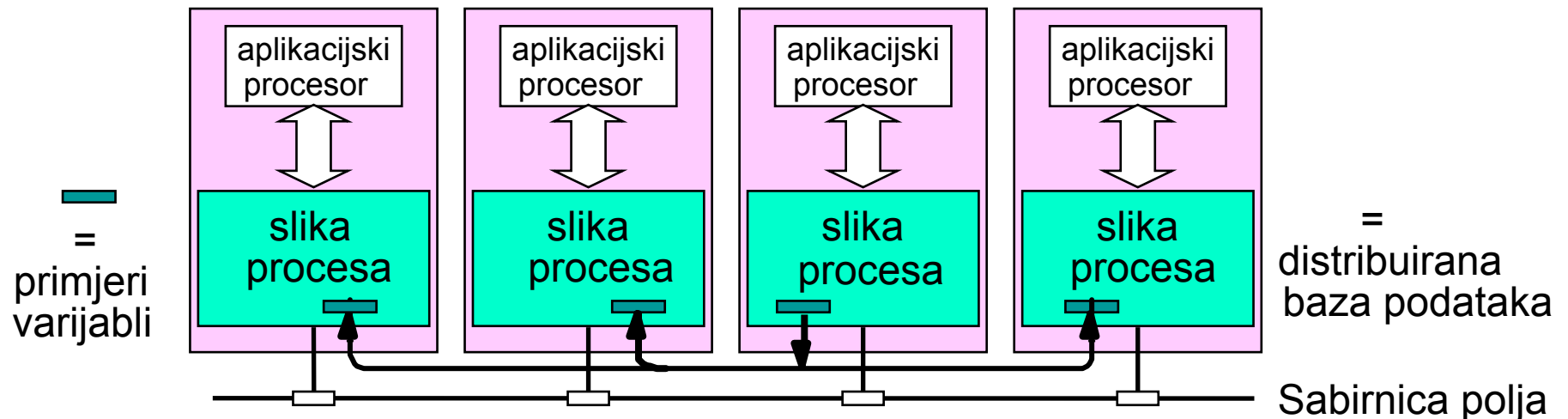


Odvojen bus master od aplikacijskog mastera!

Distribuiranost podataka u RT mrežama

Difuzijski prijenos

- Varijabla se čita u prosjeku na 1-3 različita mjesta.
- Difuzijsko slanje poruka, identificirano njihovim pošiljateljem (ili sadržajem) povećavaju efikasnost komunikacije.



- Svaka stanica je označena kao izvor ili odredište za veći broj procesnih varijabli.
- Samo jedna stanica može biti izvor određenog procesnog podatka (u suprotnom, sukob).
- Sabirnica osvježava sliku procesa u pozadini, ona postaje real-time baza podataka.
- Replicirane memorije prometa mogu se promatrati kao "skrivena" stanja procesa (slično skrivenim (cache) memorijama u višeprocorskim sistemima), predstavljajući dio slike procesa.
- Svaka stanica osluškuje sabirnicu i čita varijable koje su joj od interesa.

Distribuiranost podataka u RT mrežama

Format podataka

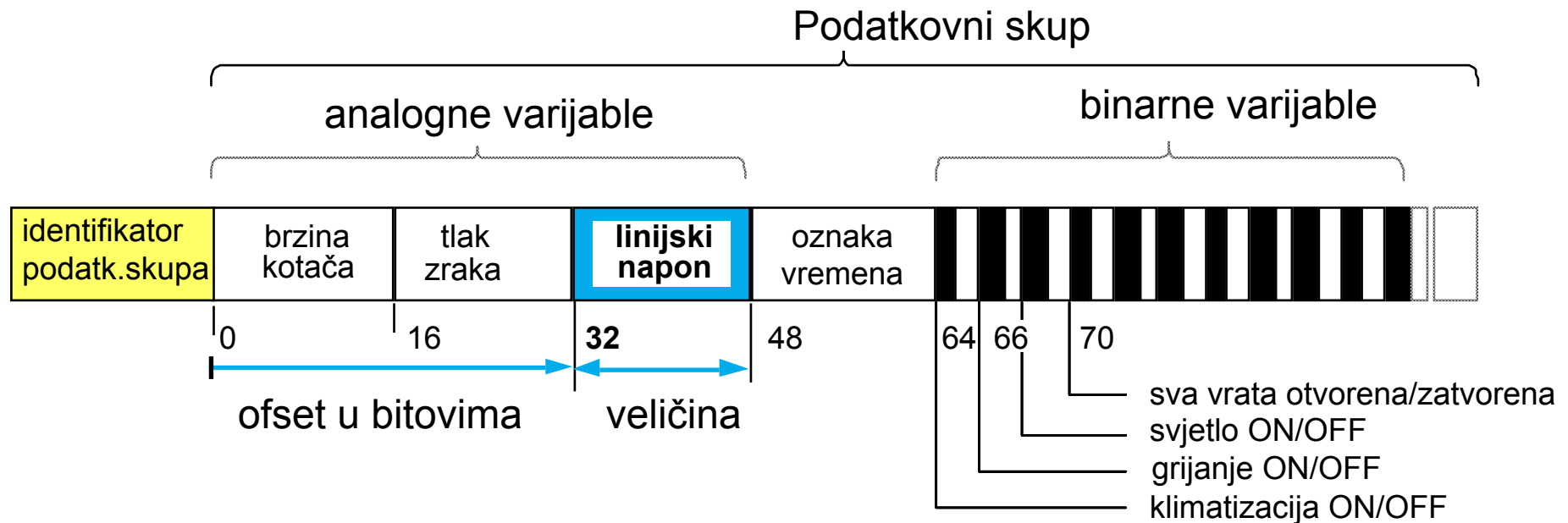
izvor	vrijednost	kvalitet	vrijeme
-------	------------	----------	---------

- U principu, sabirnica polja može prenositi procesne varijable u čisto tekstualnom formatu, npr. korištenjem XML.
- Međutim, ovo je prilično ekspanzivno i razmatra se samo u slučaju nekih komunikacijskih mreža brzina 100 Mbit/s, pri čemu je moćni procesor na raspolaganju za raščlanjivanje poruka.
- Kompaktniji načini, kao što je ASN.1, mogu biti korišteni sa 10 Mbit/s Ethernetom.
- Sabirnice polja (Field busses) su još uvijek spore (1Mbit/s - 12 Mbit/s) i stoga se koriste kompaktniji načini kodiranja.

Distribuiranost podataka u RT mrežama

Skupovi podataka

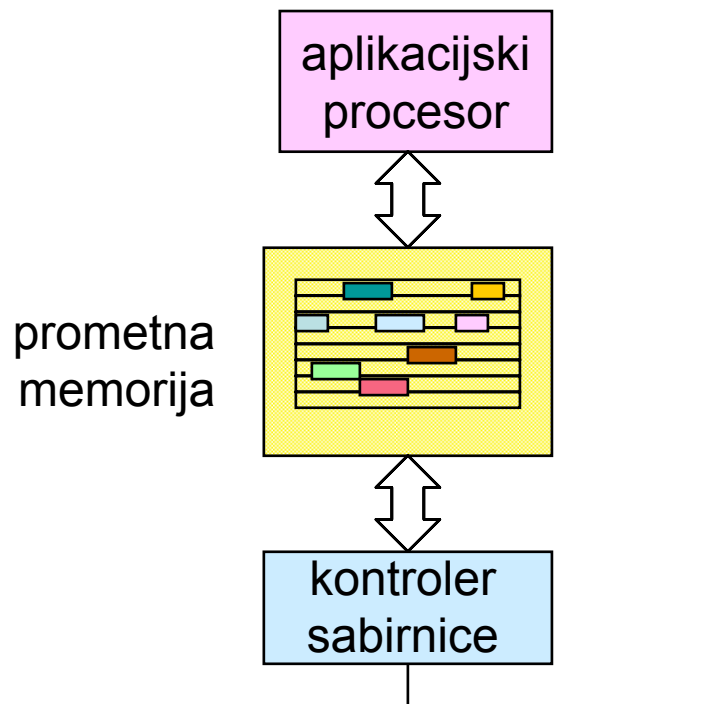
- Stanice u RT distribuiranim sistemima rade malim brzinama i neprestano šalju vrijednosti istih varijabli.
- Ekonomično je grupirati varijable jednog uređaja u okviru u podatkovni skup.
- Podatkovni skup se tretira kao cjelina u komunikaciji i pristupu mediju.
- Varijabla se unutar podatkovnog skupa definira ofsetom i veličinom.
- Varijable mogu biti različitih tipova, tipovi mogu biti izmiješani.



Distribuiranost podataka u RT mrežama

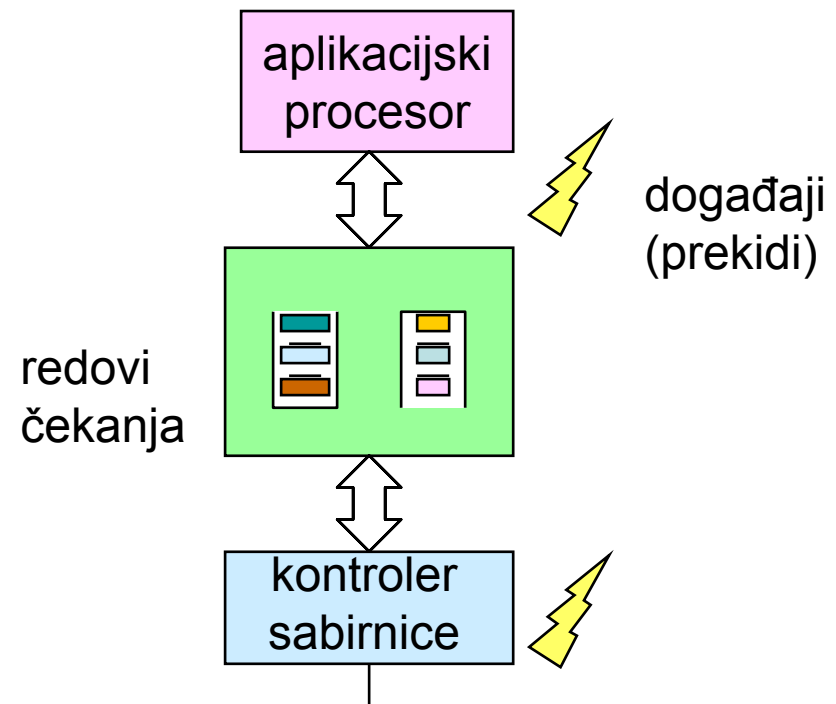
Razdvajanje aplikacije i komunikacije

razdvojeno (asinhrono):



- **Slanje:** aplikacija upisuje podatke u memoriju.
- **Primanje:** aplikacija čita podatke iz memorije.
- Kontroler sabirnice odlučuje kada slati.
- Sabirnica i aplikacija nisu sinhronizirane.

udruženo (događajno):

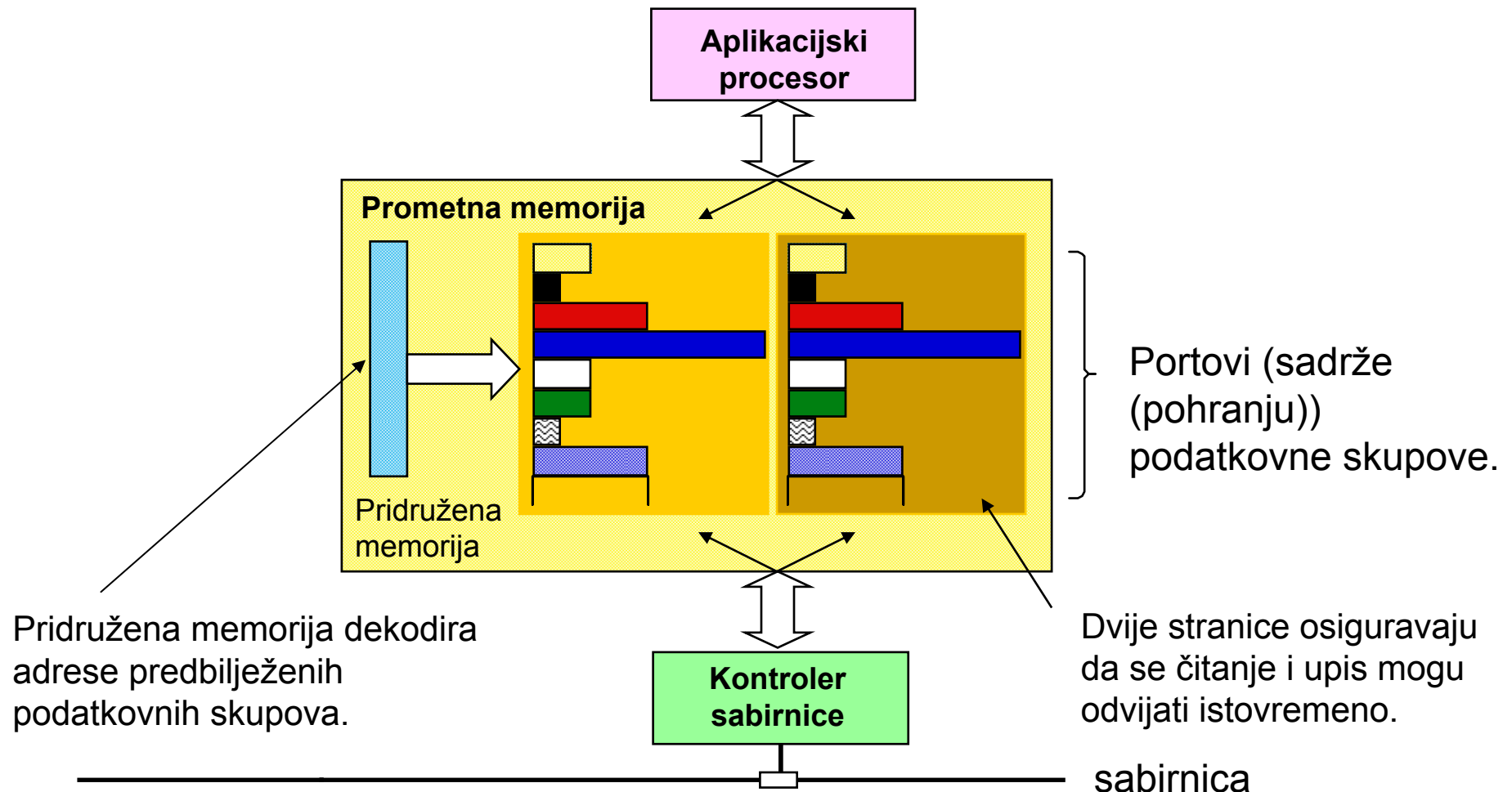


- **Slanje:** aplikacija ubacuje podatke u red i pokreće prijenos, kontroler sabirnice dohvaća podatke iz reda.
- **Primanje:** kontroler sabirnice ubacuje podatke u redove i prekida aplikaciju da ih prihvati, aplikacija prima podatke.

Distribuiranost podataka u RT mrežama

Prometna memorija

Sabirnica i aplikacija komuniciraju preko zajedničke memorije, tzv. *prometne memorije*, gdje su procesne varijable direktno dostupne aplikaciji.



Distribuiranost podataka u RT mrežama

Nadzor aktuelnosti podataka

- Nužno je provjeriti da li su podaci u prometnoj memoriji aktuelni, neovisno o oznakama vremena (jednostavni uređaji ne šalju oznake vremena).
- Aplikacije toleriraju povremene gubitke podataka, ali ne zastarjele podatke.
- Da bi se zaštitilo aplikaciju od zastarjelih podataka, svaki port u prometnoj memoriji ima brojilo osvježavanja.
- Ovo brojilo se testira upisom u taj port, a zatim se regularno inkrementira, bilo sa aplikacijskim procesorom ili sa kontrolerom sabirnice.
- Aplikacija treba uvijek čitati vrijednost brojila prije korištenja podataka iz porta i usporediti ga sa postavljenom razinom tolerancije.
- Nadzor aktualnosti provodi svaka aplikacija zasebno, jer neke mogu imati viši prag tolerancije.
- Prekidi zbog kvara na sabirnici u slučaju velikih poremećaja ne prosljeđuju se aplikaciji već operacijskom sistemu stanice.

Distribuiranost podataka u RT mrežama

Sučelje procesne varijable

Pristup aplikacije varijabli u prometnoj memoriji je veoma jednostavan:

```
ap_put (ime_varijable, vrijednost varijable)
```

```
ap_get (ime_varijable, vrijednost varijable, status_varijable, aktualnost_varijable)
```

Pristup se obavlja sa cluster-ima (prethodno definirana skupina varijabli), radije nego da dohvaća i pohranjuje pojedinačne varijable

```
ap_put_cluster (cluster_name)
```

```
ap_get (cluster_name)
```

Cluster je tabela koja sadrži imena i vrijednosti nekoliko varijabli.

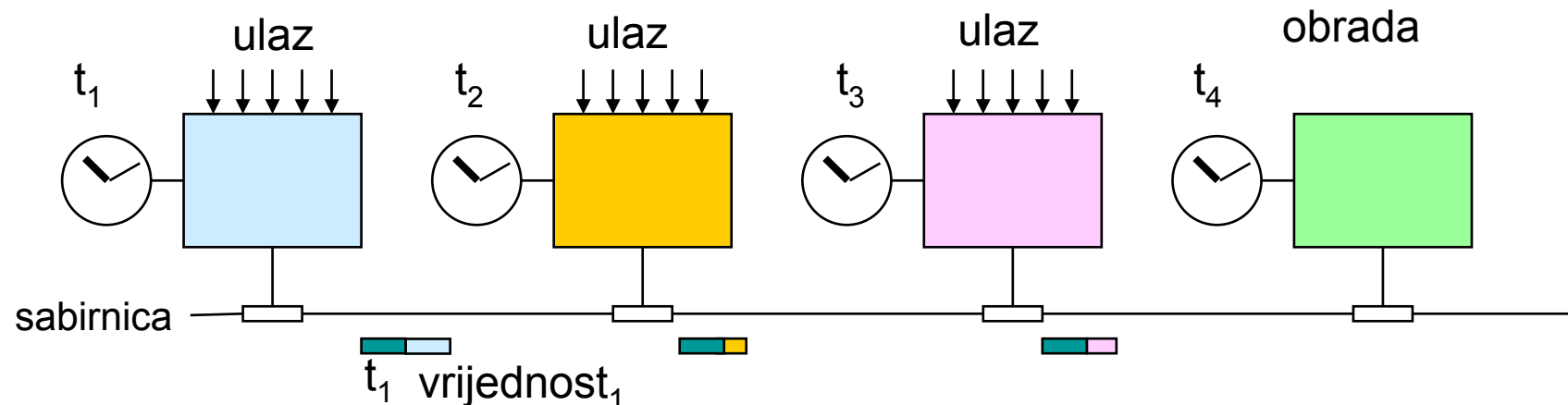
Cluster-i odgovaraju "segmentima" u funkcionalnom blokovskom programiranju.

Napomena: obično je samo jednoj varijabli dozvoljeno da pozove prekid kada prima jedan prijenos u datom trenutku (slati sa zajedničkim satom).

Distribuiranost podataka u RT mrežama

Globalno vrijeme i sinhronizacija lokalnih satova

- ❑ U mnogim primjenama, kao što su prikupljanje poremećaja i nizova događaja, precizno vrijeme uzorkovanja varijable mora se prenositi zajedno sa njenom vrijednošću.
- ❑ Za ovu svrhu su stanice opremljene satovima koji bilježe trenutke nastanka vrijednosti (ne vrijeme prijensa).
- ❑ Za rekonstrukciju događaja koji dolaze od više stanica, njihovi satovi moraju biti sinhronizirani. Razmatrati kašnjenja prijensa preko sabirnica polja (field bus) i u obnavljačima.
- ❑ Sabirnica polja omogućuje postizanje sinhronizacije satova uprkos propagacijskom kašnjenju i kvarovima (pogreškama) pojedinačnih čvorova. Mogu se koristiti protokoli, kao npr. IEEE 1588.



9.5. Globalno vrijeme

Sinhronizacija kloкова

- ❑ Svaki čvor ima svoj lokalni oscilator za mjerenje stvarnog vremena.
- ❑ Zbog različitih karakteristika oscilatora (frekvencija, drift) lokalna vremena čvorova na mreži mogu se dosta razlikovati.
- ❑ Na temelju obrazloženja u prethodnim razmatranjima, proizilazi da je uspostavljanje **jedinstvenog, globalnog vremena** u komunikacijskom sistemu od velike važnosti za rad distribuiranog računarskog sistema u stvarnom vremenu (RT DRS).
- ❑ Uspostavljanje globalnog vremena postiže se sinhronizacijom lokalnih satova (kloкова).
- ❑ Sinhronizacija se može realizirati **sklopovski**, na primjer posebno organiziranim ožičenjem preko kojeg se globalni klok prenosi do svih čvorova, ili **programski**.

Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije klokova

- ❑ Zasniva se na estimaciji razlike između klokova dva čvora slanjem poruke “clock-request with reply”.
- ❑ Neki čvor S želi estimirati razliku između svoga klocka i klocka čvora R.
- ❑ Neka je t_i – stvarno vrijeme, te neka klock S u tom trenutku pokazuje vrijeme t_i^S , a klock R t_i^R iznosi:

$$t_i^S = t_i + \delta^S \quad (1)$$

$$t_i^R = t_i + \delta^R \quad (2)$$

gdje su δ^S i δ^R odstupanja klokova od stvarnog vremena.

- ❑ Razlika klokova čvorova S i R iznosi

$$\delta = \delta^R - \delta^S \quad (3)$$

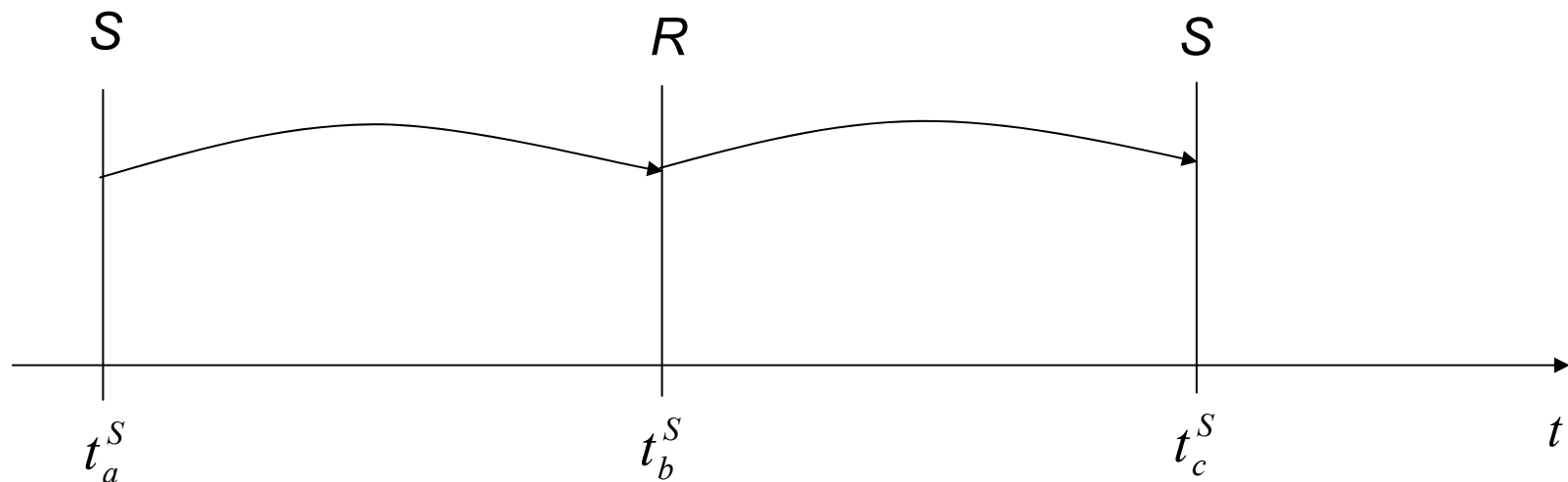
odakle je

$$t_i^S = t_i^R - \delta \quad (4)$$

Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije kloka

- Sinhronizacijski postupak odvija se na slijedeći način:
 - U trenutku t_a^S čvor S pošalje poruku “clock read request” čvoru R.
 - U trenutku t_b^R čvor R prima poruku i odmah vraća poruku koja sadrži vrijednost njegovog kloka t_b^R .
 - Povratna poruka stiže u S u trenutku t_c^S .



Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije klokov

- Označimo sa T_{SR} i T_{RS} prijenosna vremena od čvora S do čvora R, i obratno. Tada možemo pisati:

$$T_{SR} = t_b^S - t_a^S = (t_b^R - \delta) - t_a^S \quad (5)$$

$$T_{RS} = t_c^S - t_b^S = t_c^S - (t_b^R - \delta) \quad (6)$$

- Uz pretpostavku da je:

$$E\{(T_{SR} - T_{RS})\} = 0$$

iz (5) i (6) može se pisati:

$$\delta = E\left\{\frac{2t_b^R - t_a^S - t_c^S}{2}\right\} \quad (7)$$

- Višestrukim ponavljanjem sinhronizacijskog eksperimenta dobije se asimptotski tačna estimacija offseta δ .

Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije klokova

- Ako se razlika klokova δ vremenski mijenja zbog netačnosti lokalni klokova (različitih frekvencija klokova), starenja kristala i promjene temperature kristala, potrebno je te promjene uzeti u obzir pri estimaciji razlike klokova.
- Pretpostavimo da čvorovi R i S imaju linearno “driftanje”, pa možemo pisati:

$$t_i^S = t_i + \delta^S + \rho^S t_i \quad (8)$$

$$t_i^R = t_i + \delta^R + \rho^R t_i \quad (9)$$

- Za vrijeme mjerenja razlike klokova može se pretpostaviti da su δ^S i δ^R konstantni, pa se iz (8) i (9) dobije:

$$t_i^R = \beta t_i^S + \alpha \quad (10)$$

gdje je:

$$\beta = \frac{1 + \rho^R}{1 + \rho^S} \quad (11)$$

Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije kloкова

$$\alpha = \delta^R - \frac{1 + \rho^R}{1 + \rho^S} \delta^S \quad (12)$$

Digresija: za $\rho^S = \rho^R \Rightarrow \beta = 1, \alpha = \delta^R - \delta^S \Rightarrow$
 $\Rightarrow t_i^R = t_i^S + \delta^R - \delta^S$

Sinhronizacijski eksperiment

□ Provede se N sinhronizacijskih postupaka (naprijed opisanih)

- snimi se N uzoraka: $\{t_a^S(k)\}_{k=1}^N; \{t_b^R(k)\}_{k=1}^N; \{t_c^S(k)\}_{k=1}^N$

Pretpostavka:

$$E\{T_k^{SR}\} = E\{T_l^{RS}\} = \sigma, \quad \text{za } l, k \in [1, \dots, N] \quad (13)$$

Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije klokov

□ Iz pretpostavke (13) može se iz izraza (10) pisati:

$$t_b^R(k) = \beta \left[t_a^S(k) + T_k^{SR} \right] + \alpha, \quad (14)$$

te:

$$t_c^S(k) = t_a^S(k) + T_k^{SR} + T_k^{RS} \quad (15)$$

□ Iz izraza (15) i (13) može se pisati:

$$\sigma(k) = \frac{1}{2} \left[t_c^S(k) - t_a^S(k) \right], \quad k = 1, \dots, N \quad (16)$$

odakle se dobija estimirana vrijednost srednjeg kašnjenja:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N \left[t_c^S(k) - t_a^S(k) \right] \quad (17)$$

Globalno vrijeme

Algoritam sinhronizacije kloka

- Zatim se primjenom $\hat{\alpha}$ metode najmanjih kvadrata iz izraza (4), uz $T_k^{SR} = \hat{\sigma}$, dobiju estimirane vrijednosti:

$$\hat{\alpha} = \alpha \quad \text{i} \quad \hat{\beta} = \beta. \quad (18)$$

- Uvrštenjem estimiranih vrijednosti $\hat{\beta}$ u izraz (10) dobije se:

$$t_i^R = \hat{\beta} \cdot t_i^S + \hat{\alpha} \quad (19)$$

tj. klok čvora R(S) transformira se u klok čvora S(R).

- Opisani sinhronizacijski postupak može se provoditi off-line i on-line.

Globalno vrijeme

On-line postupak sinhronizacije RT satova čvorova

□ Radi jednostavnijeg zapisa uvodimo oznake:

- $\tau_S = t_i^S$ - vrijeme na satu čvora S,
- $\tau_R = t_i^R$ - vrijeme na satu čvora R.

□ Trenuci slanja poruka:

- $\tau_1 = t_a^S$ - trenutak slanja poruke sa čvora S.
- $\tau_2 = t_b^R$ - trenutak primanja poruke na čvoru R i slanje povratne poruke
- $\tau_3 = t_c^S$ - vrijeme primanja povratne poruke na čvoru S.

Prema (6.10) je: $\tau_R = \beta\tau_S + \alpha$, (20)

Prema (6.16) je: $\sigma = \hat{\sigma} + \varepsilon = \frac{1}{2}(\tau_3 - \tau_1)$, (21)

Prema (6.14) je: $\tau_2 = \beta(\tau_1 + \sigma) + \alpha$. (22)

Postupak:

- Parametre α i β estimirati iz izraza (21) i (22).
- Nakon toga iz (20) izračunati odnos lokalnih vremena.

Globalno vrijeme

On-line postupak sinhronizacije RT satova čvorova

- ❑ Najprije se odredi model po varijablama stanja. Pri tome se odabiru slijedeće varijable stanja, koje trebamo estimirati:

$$x_1 = \sigma, \quad x_2 = \alpha, \quad x_3 = \beta \Rightarrow \underline{x} = [\sigma \ \alpha \ \beta]$$

- ❑ Ulazi i izlazi odabiru se na slijedeći način:

$$u_1 = \tau_1, \quad y_1 = \tau_2, \quad y_2 = \tau_3$$

- ❑ Proces se može opisati slijedećim diskretnim modelom u prostoru stanja:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{x}(k) + \underline{w}(k) \quad (23)$$

$$\underline{y}(k) = f_y(\underline{x}(k), u(k)) + \underline{v}(k) \quad (24)$$

- ❑ Što se može pisati u slijedećem obliku:

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} (k+1) = \begin{bmatrix} \sigma \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} (k) + \underline{w}(k) \quad (25)$$

Globalno vrijeme

On-line postupak sinhronizacije RT satova čvorova

$$\begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}(k) = f_y(\underline{x}(k), \tau_1(k)) + \underline{v}(k) \quad (26)$$

- Iz (21) i (22) može se pisati:

$$\tau_2 = \alpha + \tau_1\beta + \sigma\beta \quad (27)$$

$$\tau_3 = 2\sigma + \tau_1 \quad (28)$$

- Odakle slijedi:

$$y_1 = x_2 + ux_3 + x_1x_3 \quad (29)$$

$$y_2 = 2x_1 + u \quad (30)$$

- Za estimaciju vektora \underline{x} može se primijeniti prošireni Kalmanov filter (Extended Kalman Filter, EKF).
- Uz proces opisan izrazima (23) i (24), gdje je funkcija f_y dana izrazima (29) i (30) dobiju se slijedeće jednačbe EKF:

Globalno vrijeme

On-line postupak sinhronizacije RT satova čvorova

- ❑ Predikcijske jednačbe:

$$\hat{x}^-(k) = \hat{x}(k-1),$$

$$P^-(k) = P(k-1) + Q(k).$$

- ❑ Korekcijske jednačbe:

$$K(k) = P^-(k)C^T(k)\left(C(k)P^-(k)C^T(k) + R(k)\right)^{-1},$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + K(k)\left[\underline{y} - f_y\left(\hat{x}^-(k), u(k)\right)\right],$$

$$P(k) = (I - K(k)C(k))P^-(k).$$

gdje je:

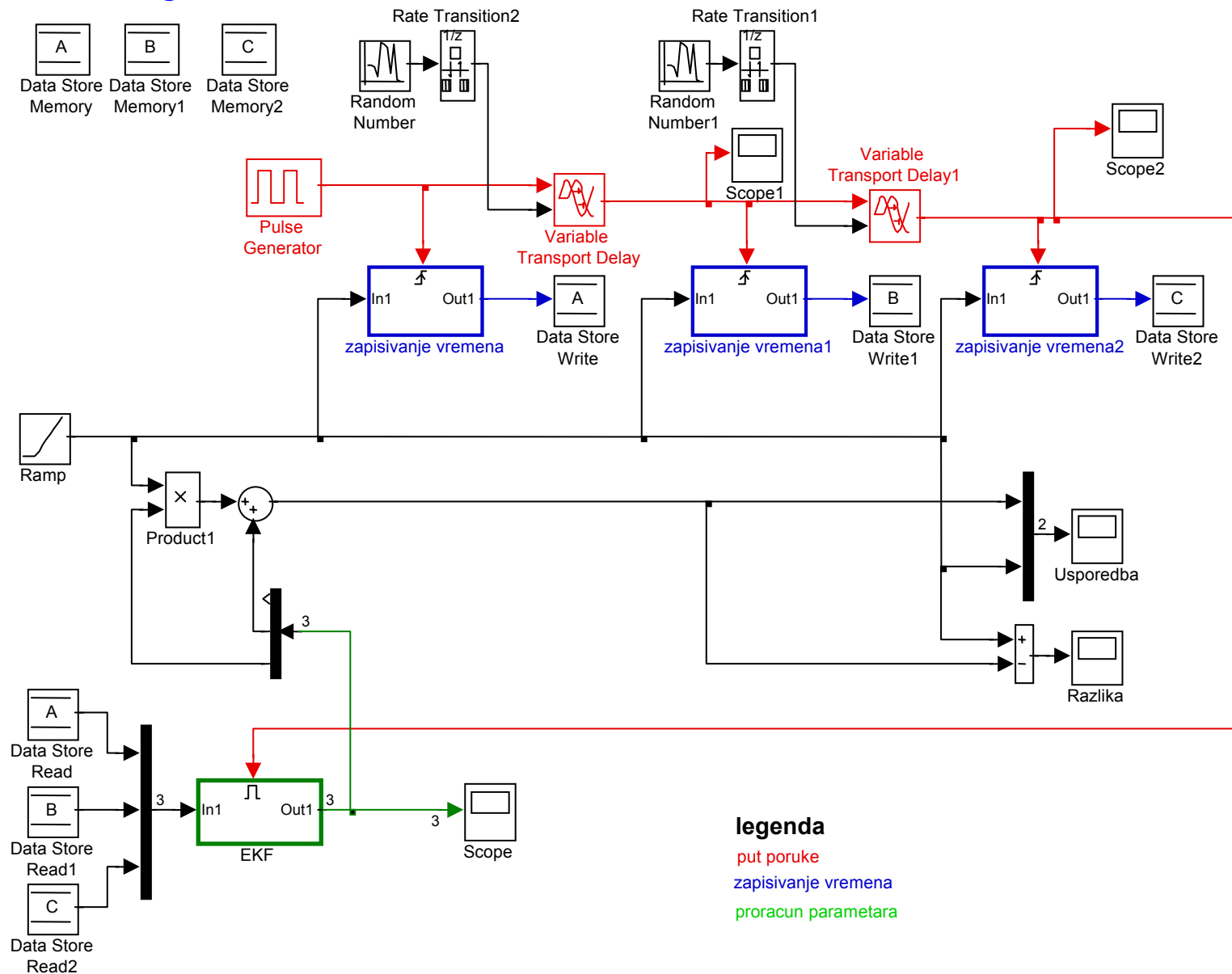
$$\underline{C}(k) = \frac{\partial f_y}{\partial x} = \begin{bmatrix} x_3(k) & 1 & u(k) + x_1(k) \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$Q(k)$ – kovarijancna matrica procesnog šuma w ,

$R(k)$ – kovarijancna matrica mjernog šuma v ;

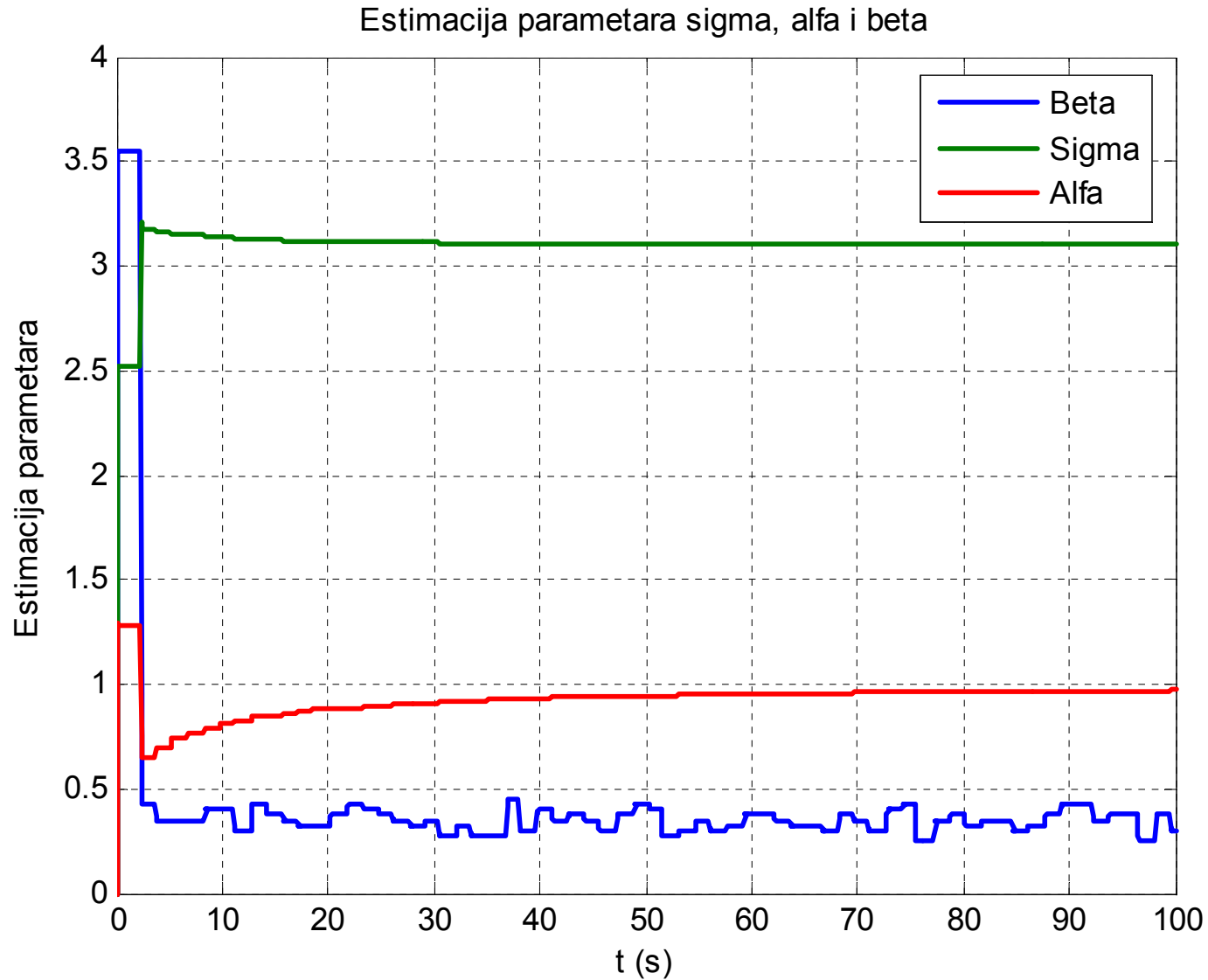
Globalno vrijeme

Simulacijska shema u Simulinku



Globalno vrijeme

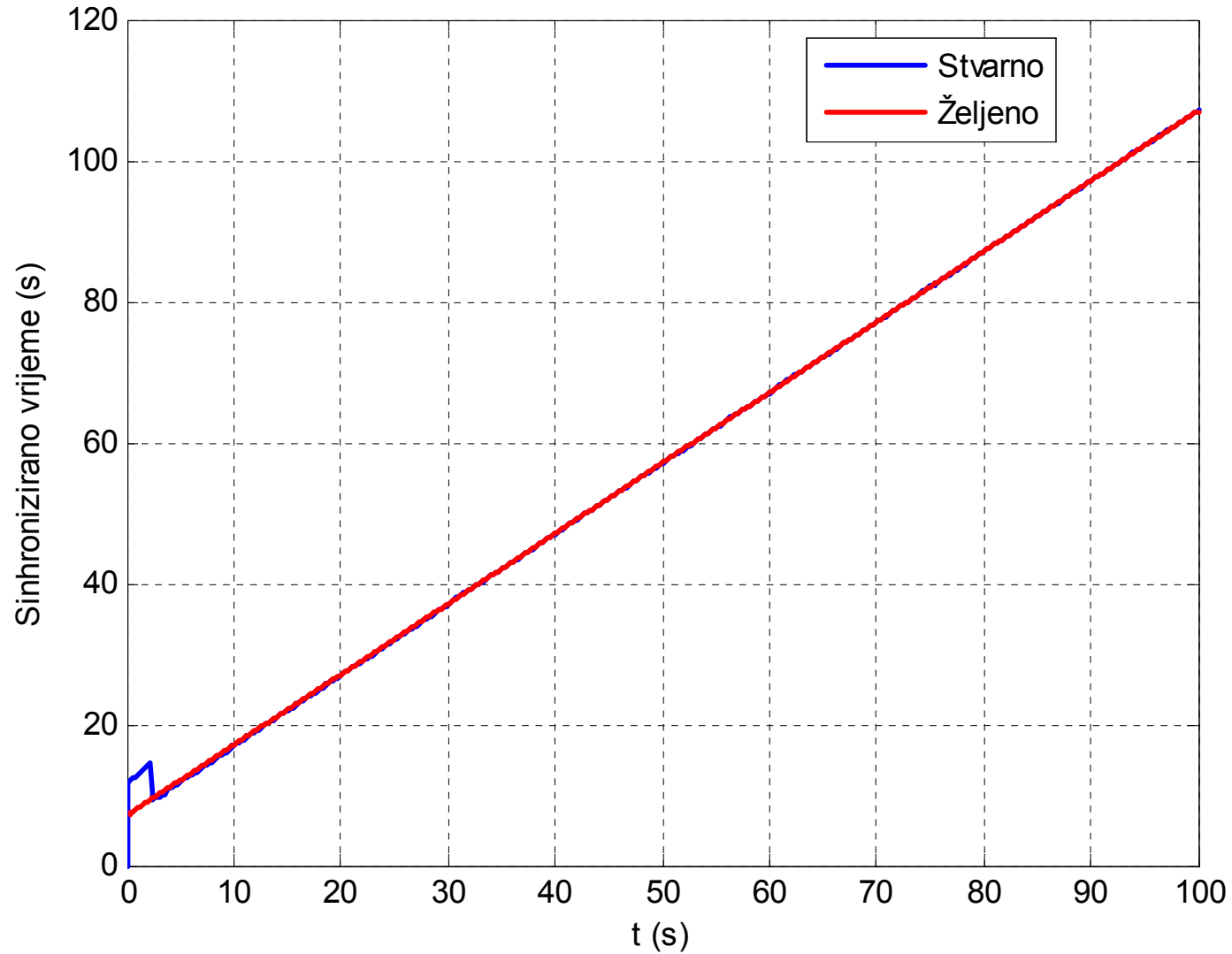
Rezultati simulacija



Globalno vrijeme

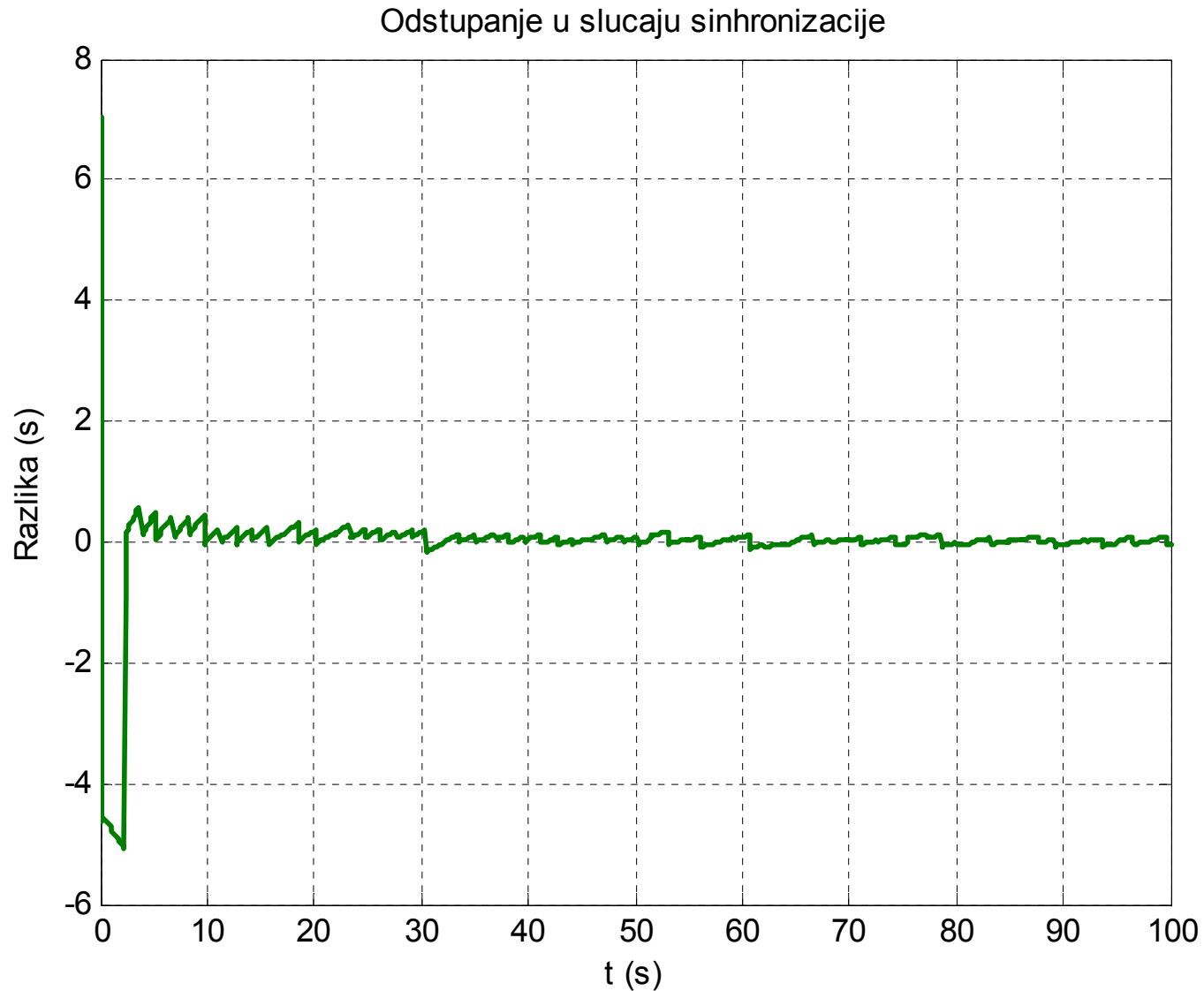
Rezultati simulacija

Sinhronizacija globalnog vremena - klokova



Globalno vrijeme

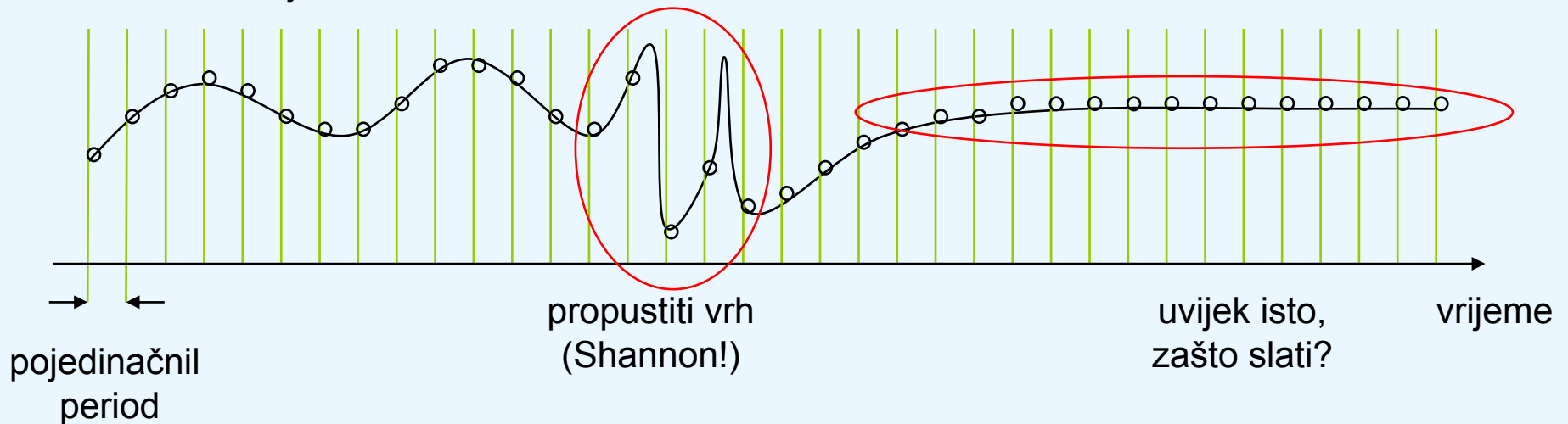
Rezultati simulacija



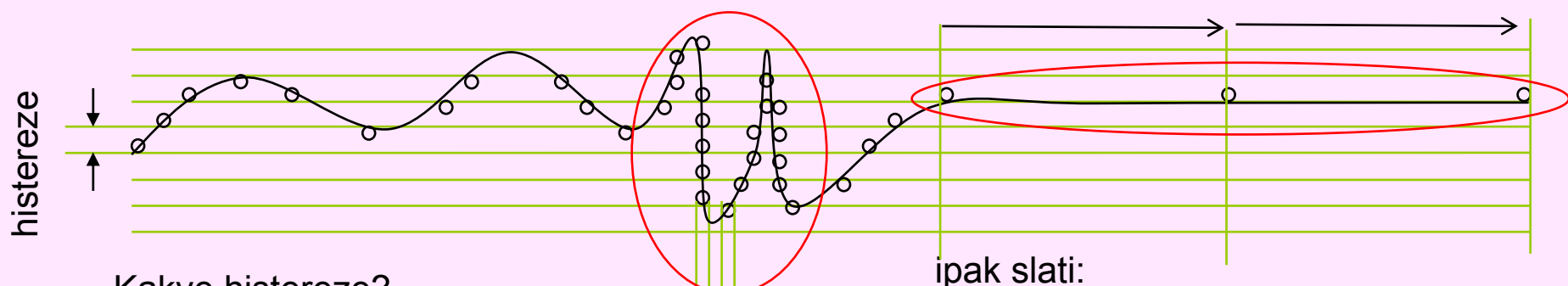
9.6. Prijenos podataka u RT mrežama

Načini prijenosa (ciklički, događajni, kombinirani)

ciklički: slati vrijednosti svakih xx milisekundi



događajni: slati kada se vrijednost mijenja u više od x% područja



Kakve histereze?

- grube (loša tačnost)
- fine (visoka tačnost)

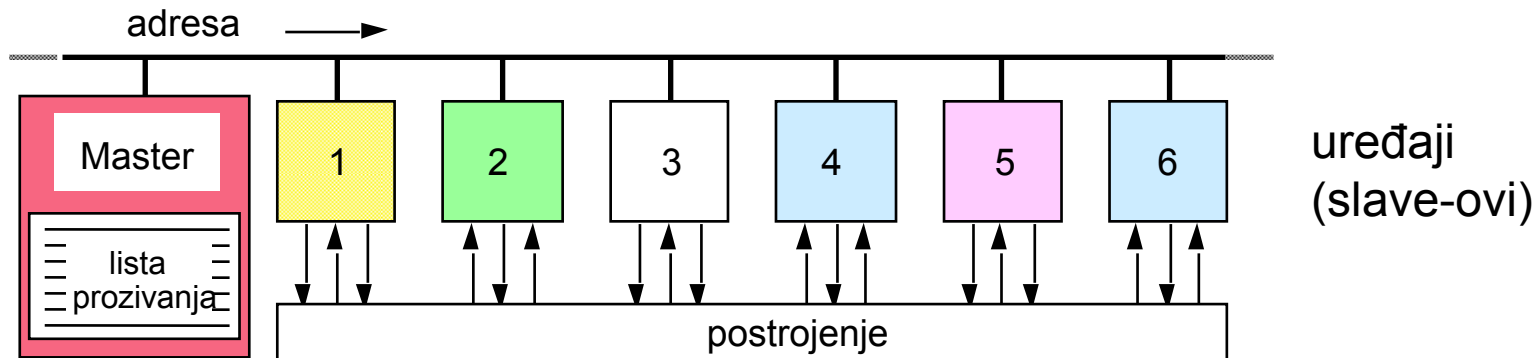
Ograničiti
prepodešavanje
frekvencije!,
ograničiti histereze.

ipak slati:

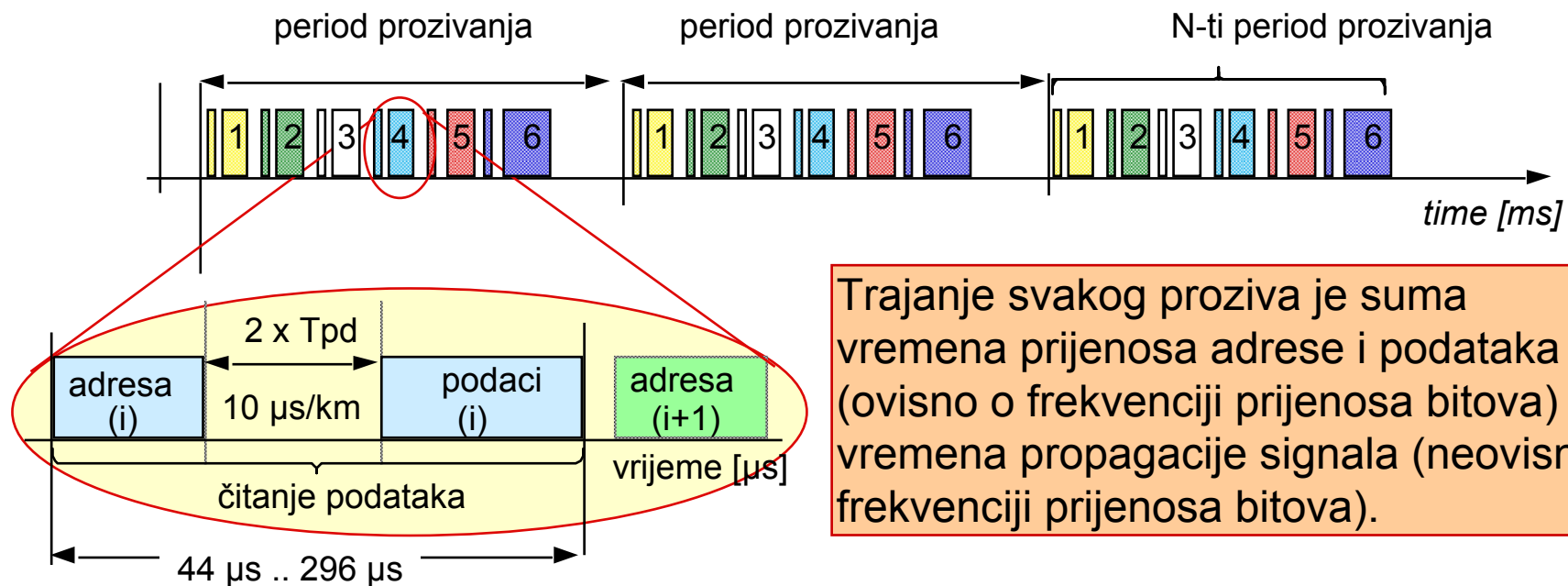
- svakih xx kao znak "Ja sam živ",
- kada se podaci interno ponovno postavljaju,
- naglo mijenjanje kvalitete (kvar).

9.6.1. Ciklički način prijenosa

Ciklički prijenos podataka



Master proziva adrese prema unaprijed utvrđenom redu, prema listi pozivanja.



Trajanje svakog proziva je suma vremena prijenosa adrese i podataka (ovisno o frekvenciji prijenosa bitova) i vremena propagacije signala (neovisno o frekvenciji prijenosa bitova).

Ciklički način prijenosa

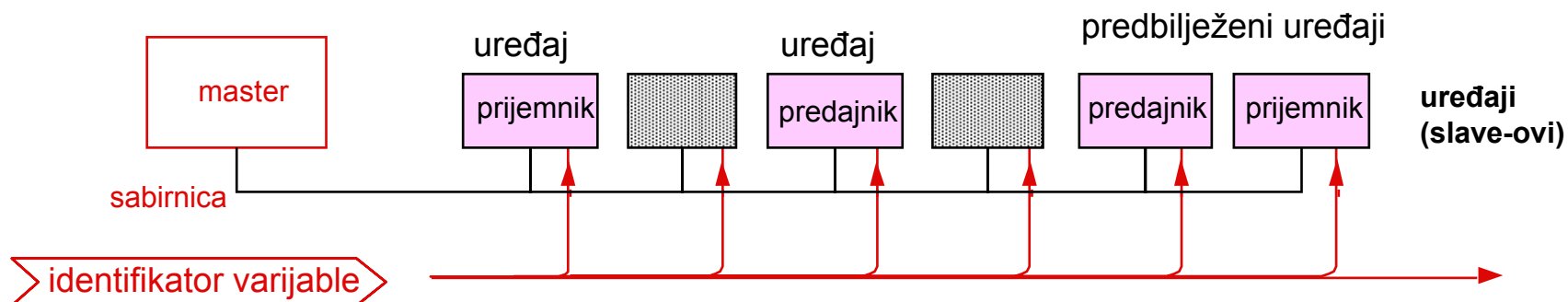
Principi cikličkog prijenosa

- Podaci se prenose u fiksnim intervalima, bez obzira na njihove promjene.
- Vrijeme prijenosa (period osvježavanja) je determinističko i konstantno.
- Prometom upravlja master ili distribuirani algoritam vremenskog pokretanja prijenosa.
- Nije potrebno provoditi oporavak od grešaka prijenosa, jer se nova vrijednost prenosi u slijedećem ciklusu.
- Mogu se prenositi samo stanja varijabli, a ne njihove promjene.
- Trajanje ciklusa ograničeno je umnoškom broja podataka koji se prenose i trajanjem svakog poziva (npr. $100 \mu\text{s} / \text{bitu} \times 100 \text{ bitova} \Rightarrow 10 \text{ ms}$).
- Da bi se postigli kratki periodi prozivanja, omogućuje se slanje samo kratkih poruka ($< 256 \text{ bita}$).
- Kapacitet mreže mora se odrediti unaprijed.
- Determinizam bi se izgubio ako bi se ciklus mijenjao za vrijeme rada.
- Ciklički prijenos se koristi za prenošenje varijabli stanja procesa. Ovi se podaci nazivaju *procesnim podacima* ili *periodičkim podacima*.

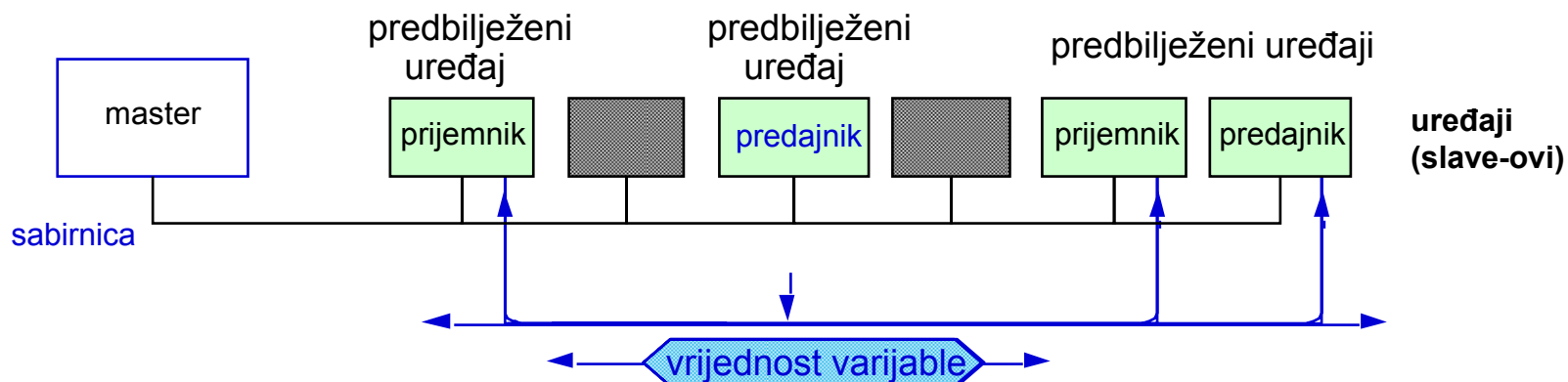
Ciklički način prijenosa

Difuzijski prijenos temeljen na adresi pošiljatelja

Faza 1: Master šalje identifikator varijable koja je na redu za prijenos:



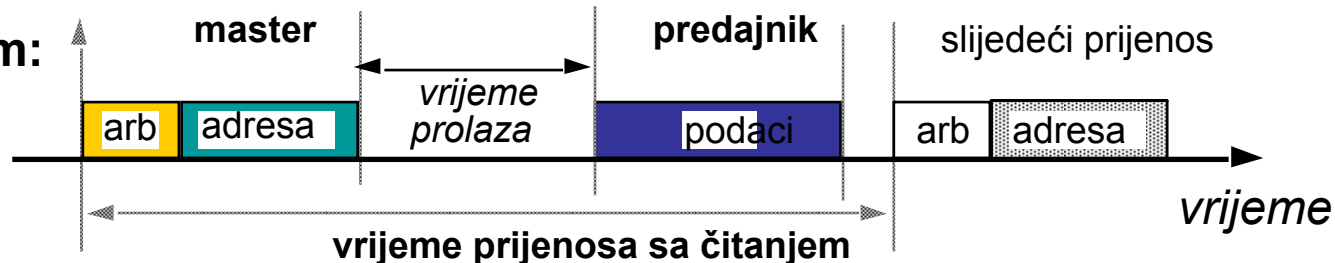
Faza 2: Uređaj koji šalje tu varijablu odgovara sa "slave" okvirom, koji sadrži vrijednost varijable, a svi predbilježeni prijemnici primaju taj okvir.



Ciklički način prijenosa

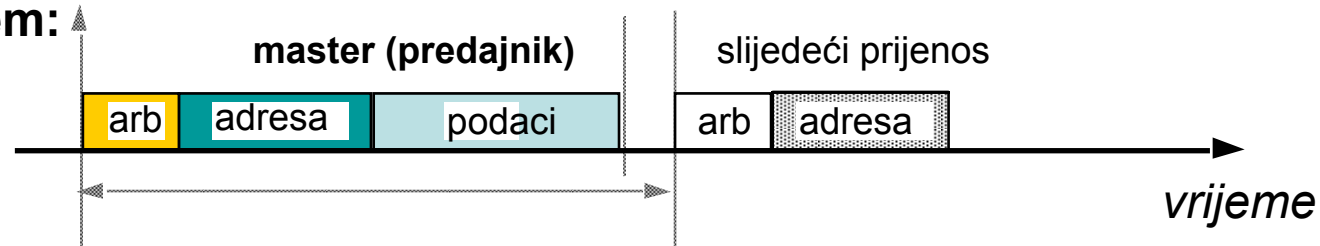
Prijenosi sa čitanjem i sa pisanjem

prijenos sa čitanjem:



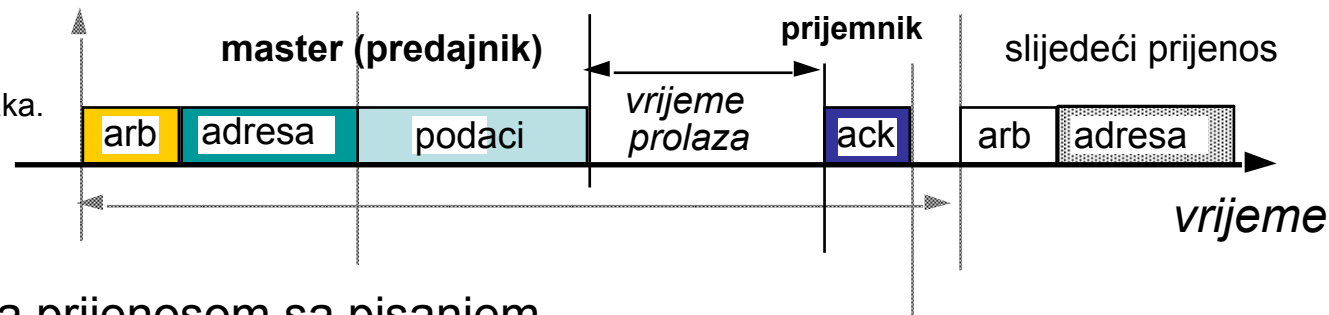
prijenos sa pisanjem:

Bez potvrde



vrijeme prolaza može biti veliko u usporedbi sa vremenom prijenosa podataka.

Sa potvrdom

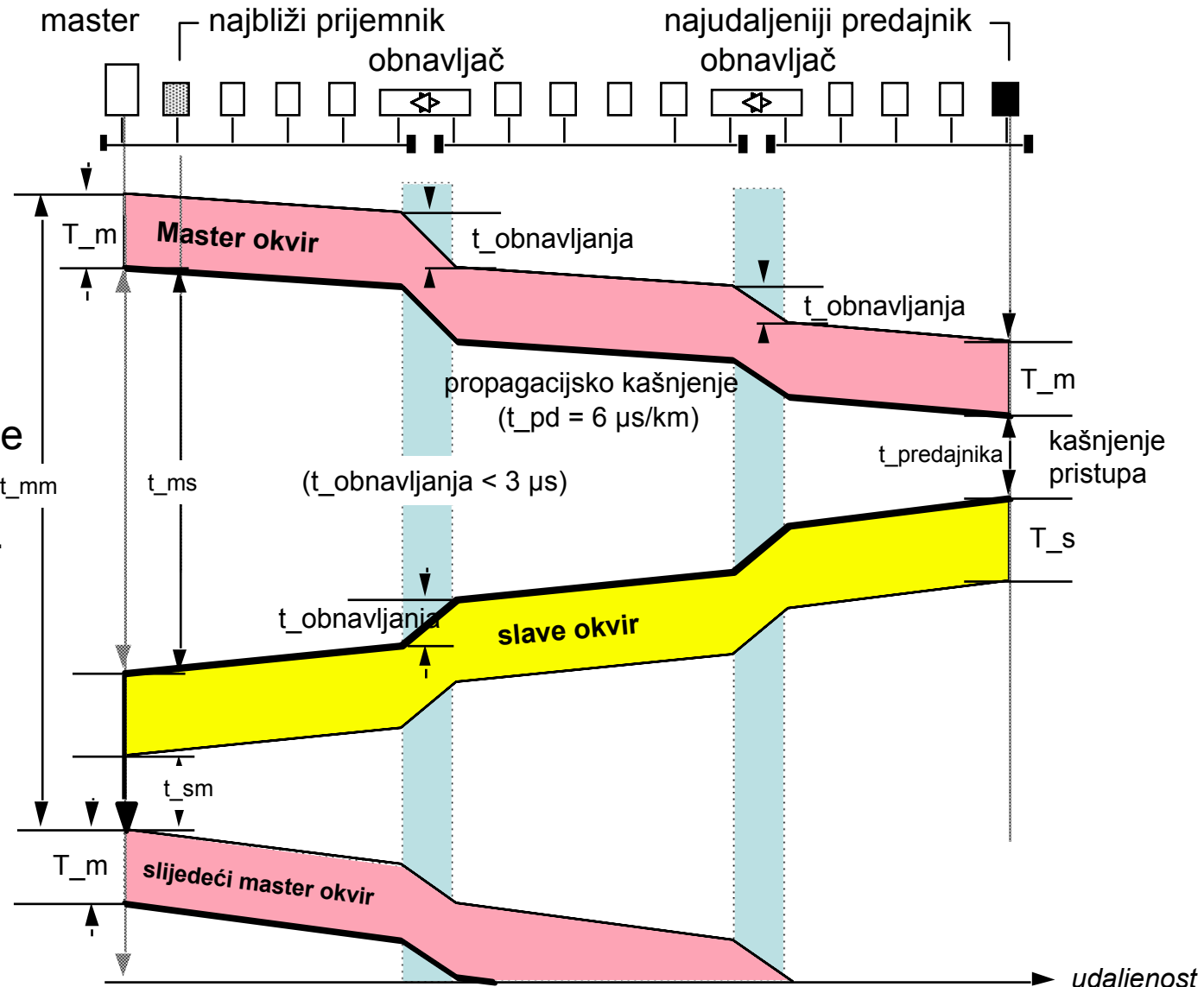


- LAN radi samo sa prijenosom sa pisanjem. Njihov podatkovni sloj ili prijenosni sloj osiguravaju potvrde sa drugog prijenosa sa pisanjem.
- Paralelne sabirnice koriste prijenose i sa čitanjem i sa pisanjem.
- Većina sabirnica polja (field busses) radi samo sa ciklusima čitanja.

Ciklički način prijenosa

Kružno vrijeme propagacije

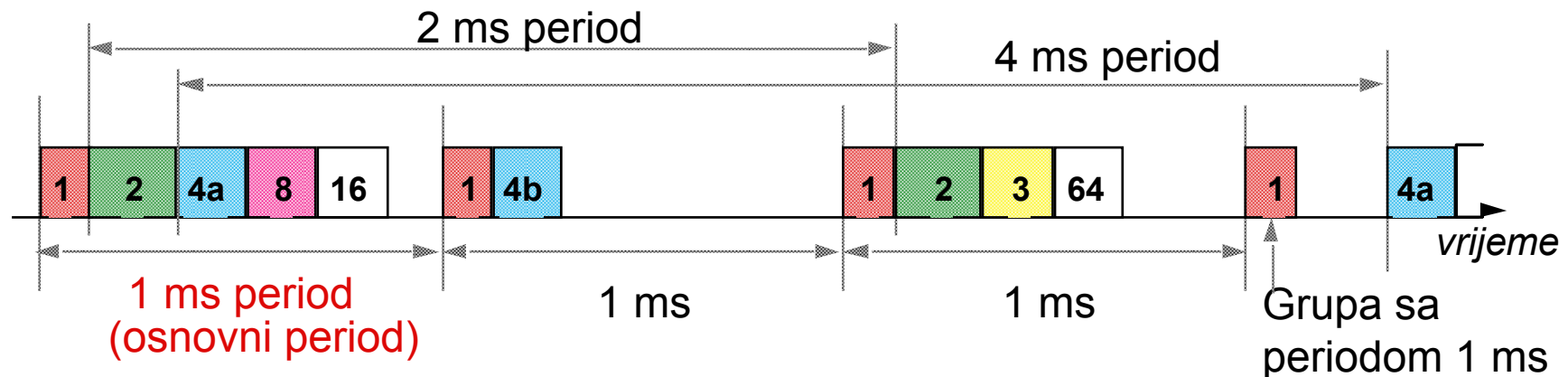
Kružno vrijeme ograničava proširenje sabirnice koja ima prienos sa čitanjem.



Ciklički način prijenosa

Optimiranje cikličkog načina rada

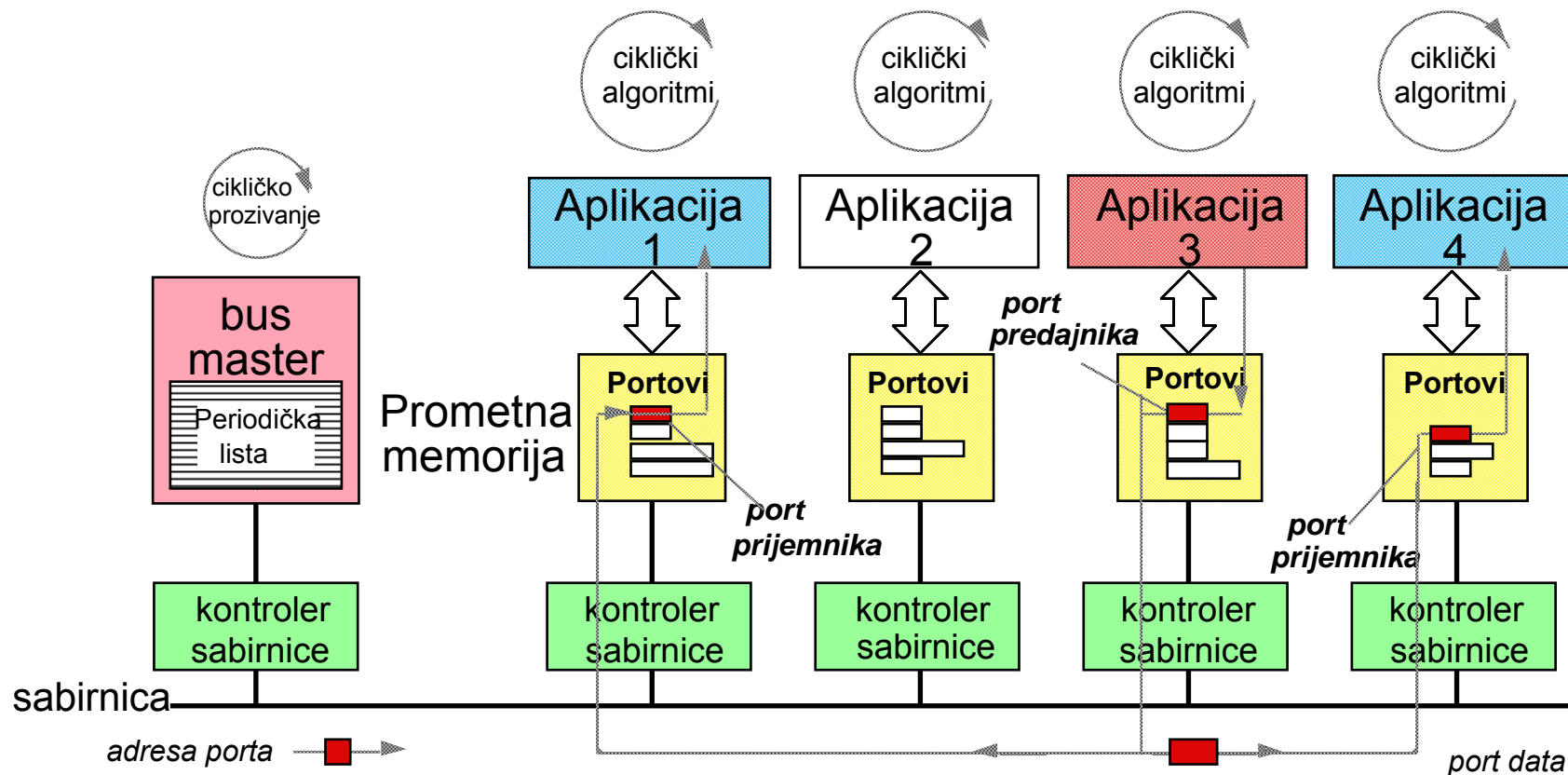
- Ciklički način rada koristi fiksne odsječke sabirničkih vremena.
- Period prozivanja povećava se sa brojem prozivanih poruka.
- U skladu s tim se smanjuje brzina odziva.
- Rješenje: **uvođenje podciklusa za manje žurne periodičke varijable:**



- Cikličko prozivanje treba alat za konfiguriranje ciklusa prozivanja. Ciklus prozivanja ne smije se mijenjati u radu (nedeterminizam).
- **Jedna stanica može slati više procesnih podataka (varijabli stanja) sa različitim prioritetima.**
- Ako postoji samo jedan tip prozivanja po stanici, onda se prozivanje mora provoditi sa frekvencijom najprioritetnije varijable te stanice.
- **Da bi se smanjilo opterećenje sabirnice, master proziva procesne podatke, a ne stanice.**

Ciklički način prijenosa

Ciklički prijenos i aplikacija



Promet na sabirnici i izvođenje aplikacijskog programa izvode se asinhrono.

Master šalje identifikatore po svom nađenju.

Sabirnica i aplikacija su razdvojeni / povezani zajedničkom memorijom (prometna memorija), koja djeluje kao distribuirana baza podataka.

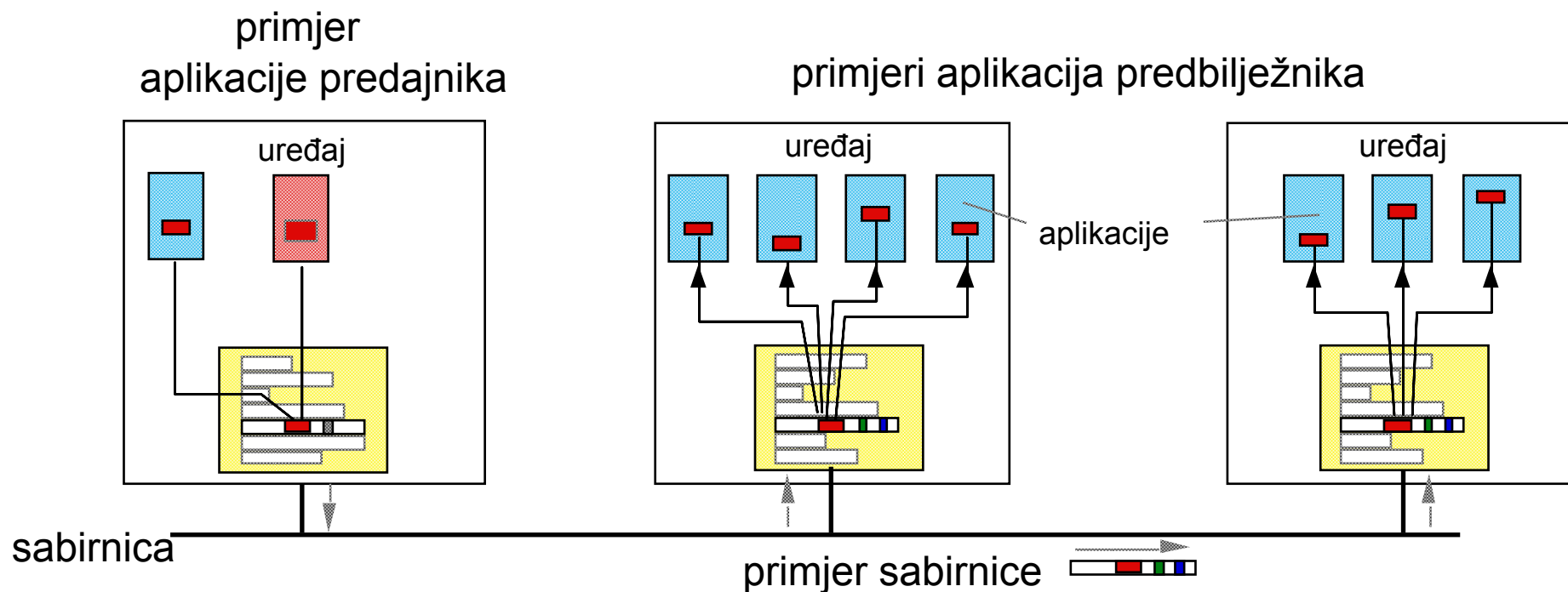
Ciklički način prijenosa

Primjena cikličkog načina prijenosa

- Princip cikličkog načina rada, kombinirano sa difuzijom temeljenom na adresi predajnika, primjenjuje se u velikom broju komercijalnih RT komunikacijskih mreža.
- Koristi se za upravljanje energetske postojenja, željezničkim vozilima, avionima, itd.
- Ova metoda daje mreži determinističko ponašanje, uz cijenu smanjenja propusne moći i duljine sabirnice.
- Lista prozivanja smještena u masteru (koji se može duplicirati radi redundancije) određuje ponašanje ovih RT mreža.
- Lista se konfigurira za specifičnu primjenu.
- Ovim se garantira da nijedna aplikacija neće zauzeti prijenosni medij više od unaprijed joj dodijeljenog vremena, čime se daje puna kontrola projektantu sistema.

Ciklički način prijenosa

Primjer: zahtjev na kašnjenja



Najgori slučaj kašnjenja za prenošenje svih vremenski kritičkih varijabli je suma:

vrijeme ciklusa aplikacije predajnika 8 ms

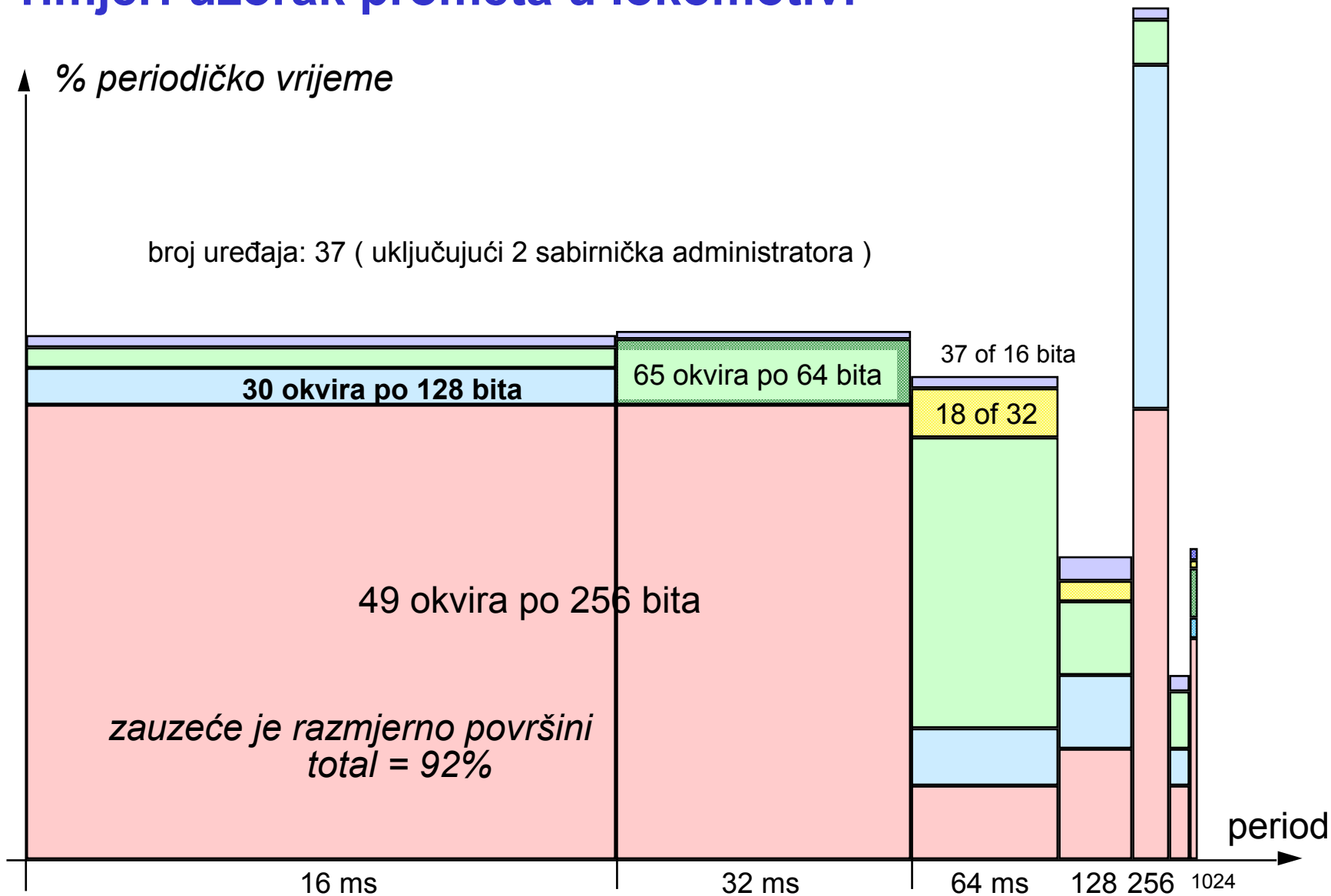
period pojedinačne varijable 16 ms

vrijeme ciklusa aplikacije prijemnika 8 ms

= 32 ms

Ciklički način prijenosa

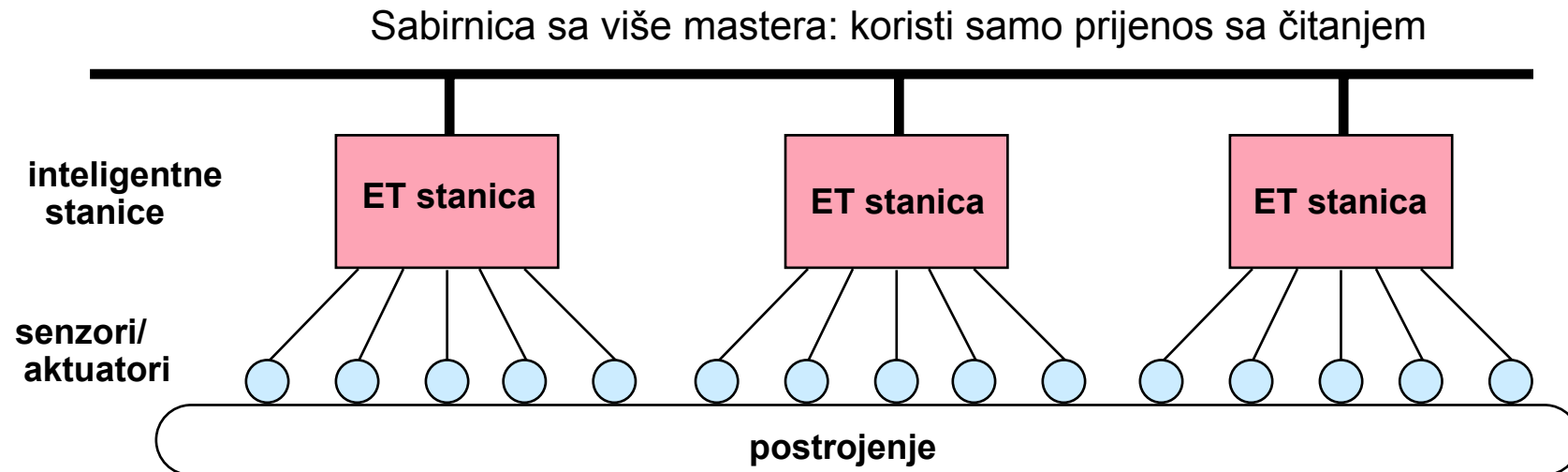
Primjer: uzorak prometa u lokomotivi



9.6.2. Događajni način prijenosa (Event-Driven, ED)

Princip događajnog načina rada

- Događaji uzrokuju prijenos samo kada dođe do promjene stanja neke varijable.
- Prosječno opterećenje sabirnice je vrlo malo, ali se u iznimnim situacijama može dogoditi preopterećenje.

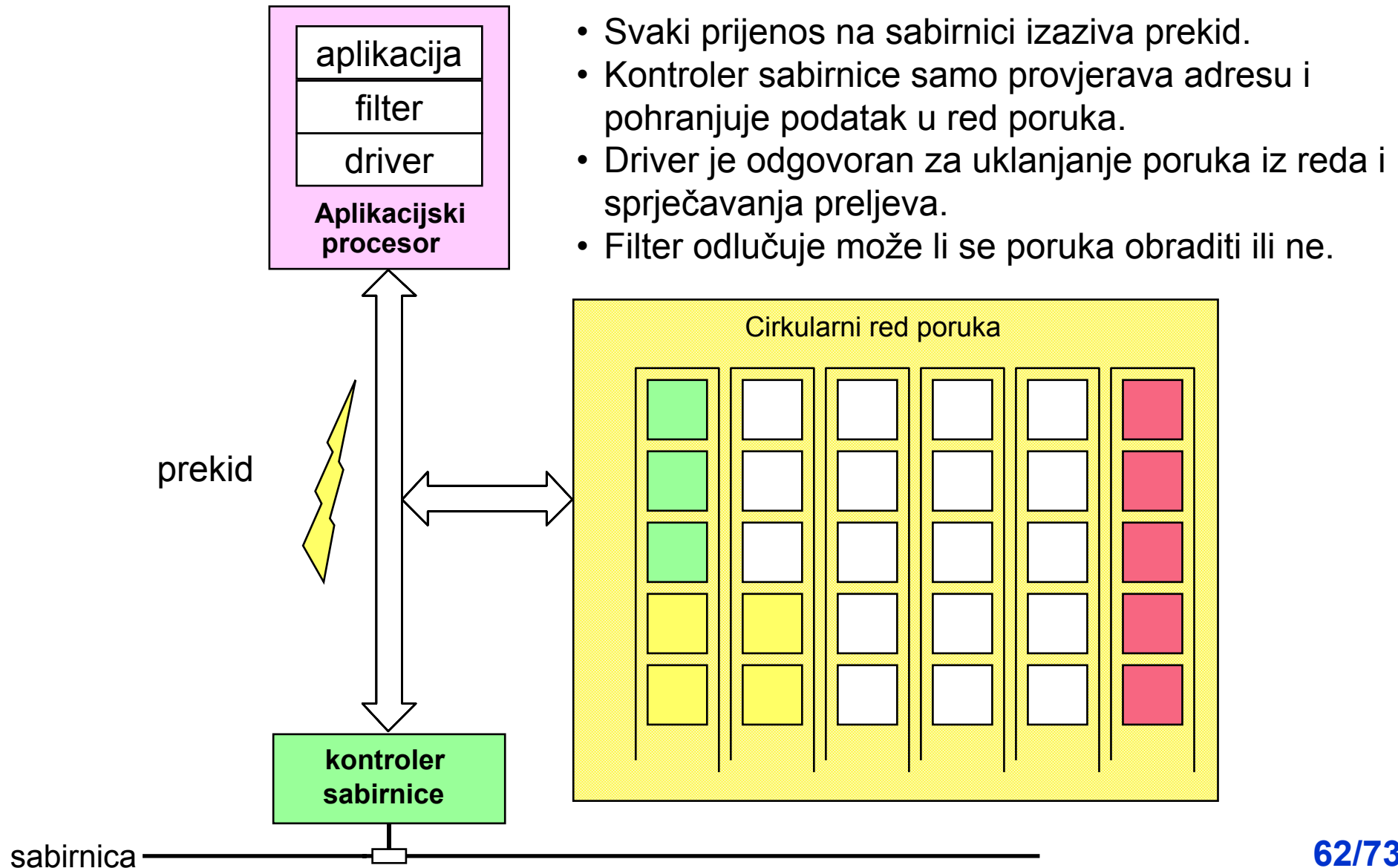


Detekcija događaja je “inteligentan” proces:

- Nije svaka promjena događaj, čak i za binarne varijable.
- Najčešće, kombinacija promjena formira događaj.
- Samo aplikacija može odlučiti šta je događaj, budući da samo programer aplikacije poznaje značenje varijabli.

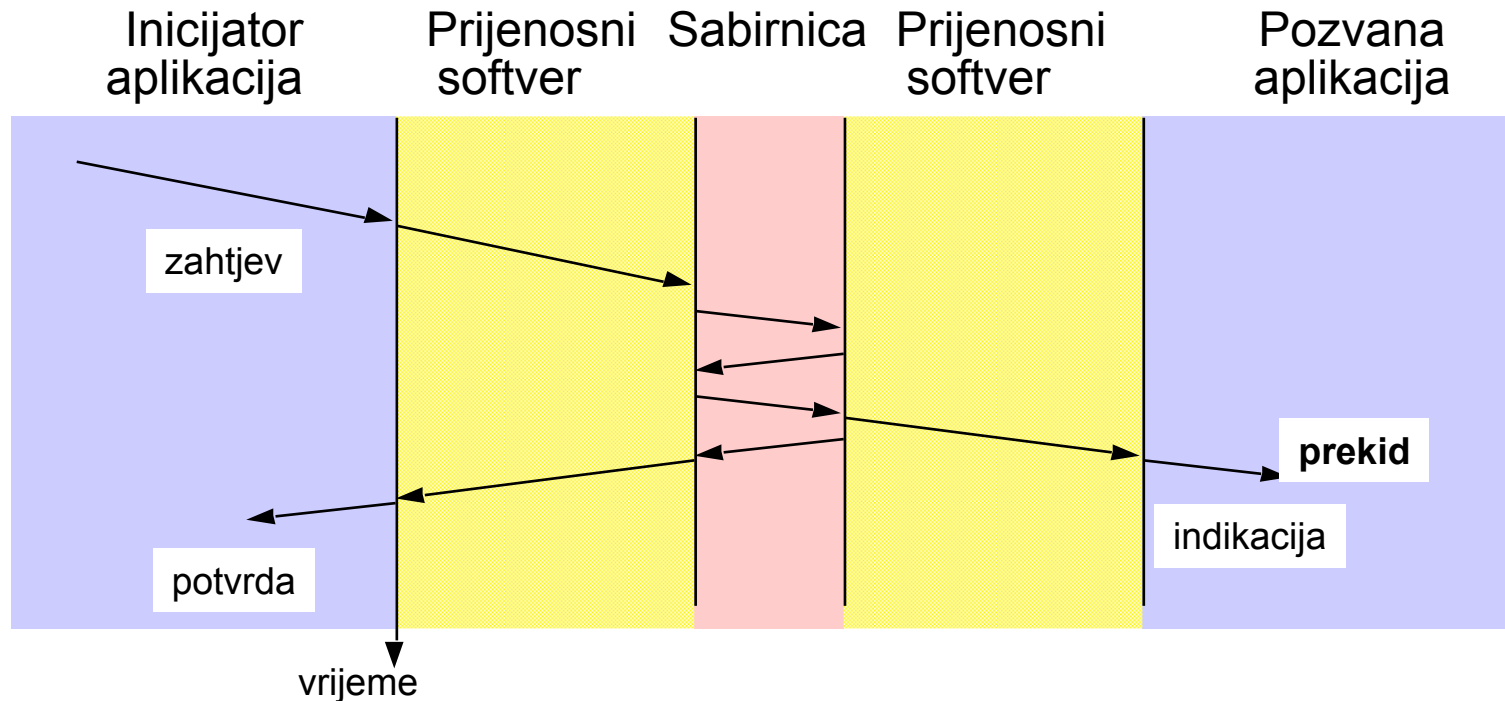
Događajni način prijenosa

Sabirničko sučelje ET komunikacije



Događajni način prijenosa

Odziv jedne ET aplikacije



- Budući da se događaji mogu dogoditi bilo kada i na bilo kojoj stanici, stanice komuniciraju spontanom prijenosom poruka, što dovodi do mogućih kolizija.
- Ovo može poremetiti izvršavanje vremenski kritičnih zadataka.
- Stavljanje događaja u red čekanja može dovesti do neograničenog kašnjenja.
- Gateway uvodi dodatne neizvjesnosti.

Događajni način prijenosa

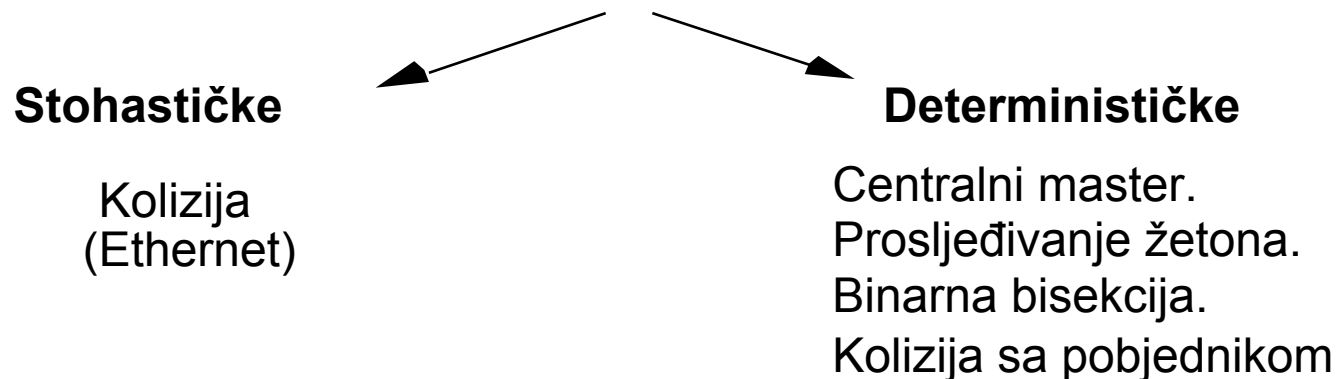
Determinizam i pristup mediju u RT komunikacijama

Iako trenutak pojave događaja nije predvidiv, RT mreža bi trebala prenijeti događaj u kritičnom vremenu.

Događaji se nužno najavljaju spontano: ovo zahtijeva medij sa više mastera (kao npr. LAN).

Vrijeme potrebno za prijenos događaja ovisi o algoritmima pristupnog medija (arbitraža) na sabirnici.

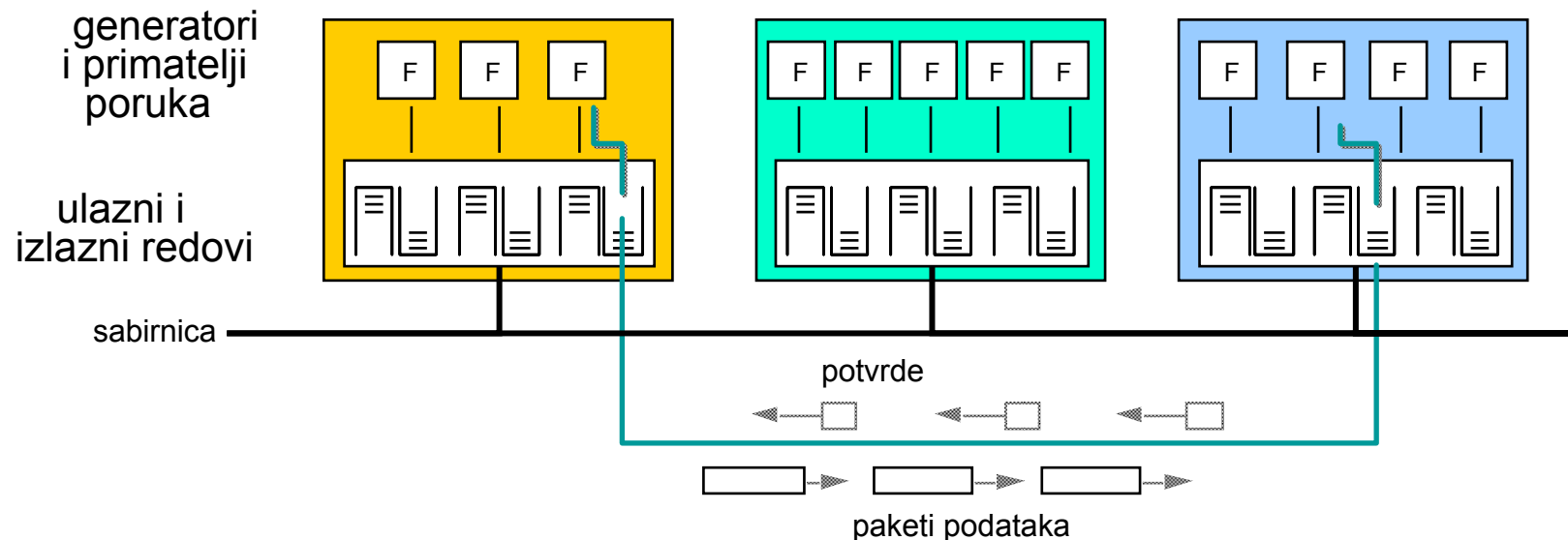
Metode pristupa mediju mogu biti determinističke ili stohastičke



Događajni način prijenosa

Događaj i determinizam

- Iako je deterministički pristup mediju uvjet zagarantiranog vremena isporuke, on nije dovoljan jer ET poruke čekaju u redu u stanicama.



- Prosječno vrijeme isporuke ovisi o duljini redova, o gustoći prometa na mediju i o vremenu obrade na odredištu.
- Često, računari veći izvori kašnjenja prijenosa nego sama mreža.

Real-time upravljanje = mjerenje + prijenos + obrada + djelovanje

Događajni način prijenosa

ET-prednosti i nedostaci

U događajno upravljanim sistemima, postoji samo prijenos ili operacija kada se događaj dogodi.

Prednosti:

- Može obrađivati veliki broj događaja – ako nisu svi u isto vrijeme.
- Podržava veliki broj stanica.
- Sistem je miran u normalnom stanju procesa.
- Bolje iskorištenje resursa.
- Koristi samo prijenos sa pisanjem, prikladno za LAN-ove sa velikim vremenom propagacije.

Nedostaci:

- Zahtijeva inteligentne senzore (formiranje događaja).
- Zahtijeva raspodijeljeni pristup resursima (arbitracija).
- Nema gornje granice vremena pristupu mediju, ako je neka komponenta nedeterministička.
- Teško procijeniti vrijeme odziva.
- Ograničenja uslijed efekta zagušenja.
- Potreban pozadinski ciklički rad da se provjerava budnost sistema.

Događajni način prijenosa

Ilustracija preopterećenja ET komunikacije

- Ako se u procesu dogodi veći broj ET događaja nego što je projektant predvidio može doći do zagušenja komunikacijskog kanala:
- **Primjeri:**
 - ✓ Nadzorno upravljački sistem elektroenergetskog sistema može imati više od 100.000 RT veličina koje se kontinuirano nadziru.
 - ✓ Dogodi se veliko nevrijeme sa velikim brojem udara groma u kratkom vremenskom intervalu
 - veliki broj koreliranih alarma
 - uz ET komunikaciju doći će do preopterećenja
 - prepunit će se redovi čekanja
- **TT komunikacija:**
 - ✓ Nema zagušenja, alarmi stižu po tačno utvrđenom redu, jer je sistem projektiran za najgori slučaj.

Događajni način prijenosa

Ciklički ili ET prijenos za RT sisteme

Ciklički prijenos

- Podaci se prenose u fiksnim vremenskim intervalima, bez obzira dolazi li do njihove promjene ili ne.
- Deterministički: ograničeno vrijeme isporuke.
- Najgori slučaj je normalan slučaj.
- Svi su resursi unaprijed alocirani.
- Periodički ili prosljeđivanje žetona.

Objektno-orijentirana komunikacija

Fieldbus Foundation, MVB, FIP, ..

ET prijenos

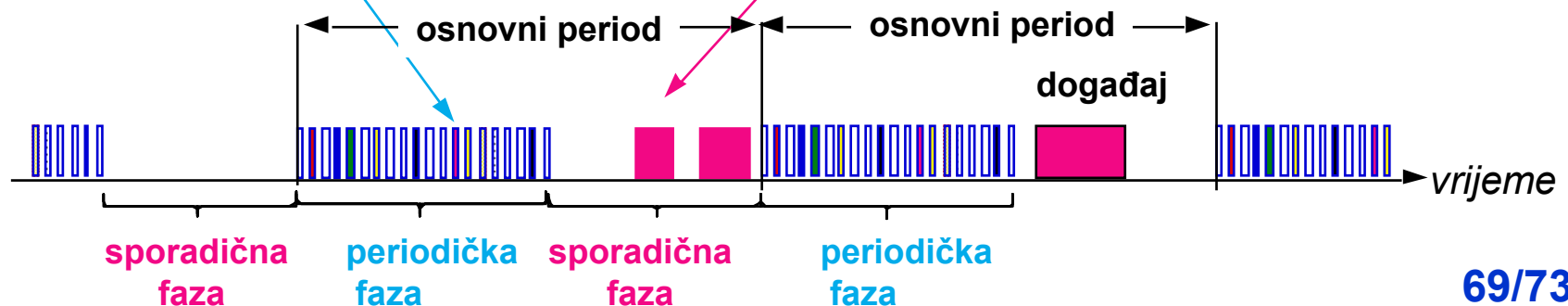
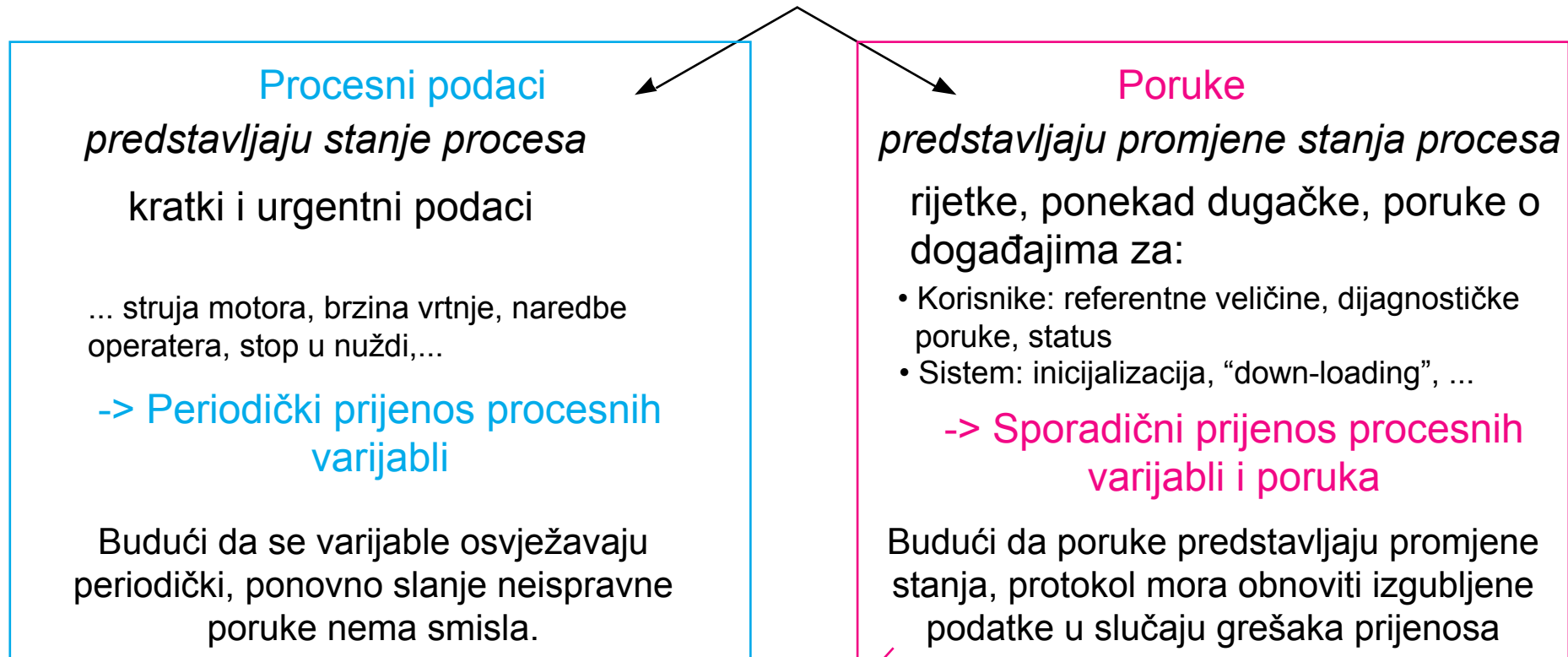
- Podaci se prenose samo kada dođe do njihove promjene ili nakon zahtjeva.
- Ne-deterministički: vrijeme isporuke jako promjenljivo.
- Najbolje iskorištenje resursa.
- Aperiodički, na zahtjev, sporadične poruke.

Porukama-orijentirana komunikacija

Profibus, CAN, LON, ARCnet

9.7. Komunikacijski model u stvarnom vremenu

Prijenos mješovitih podataka



Komunikacijski model u stvarnom vremenu

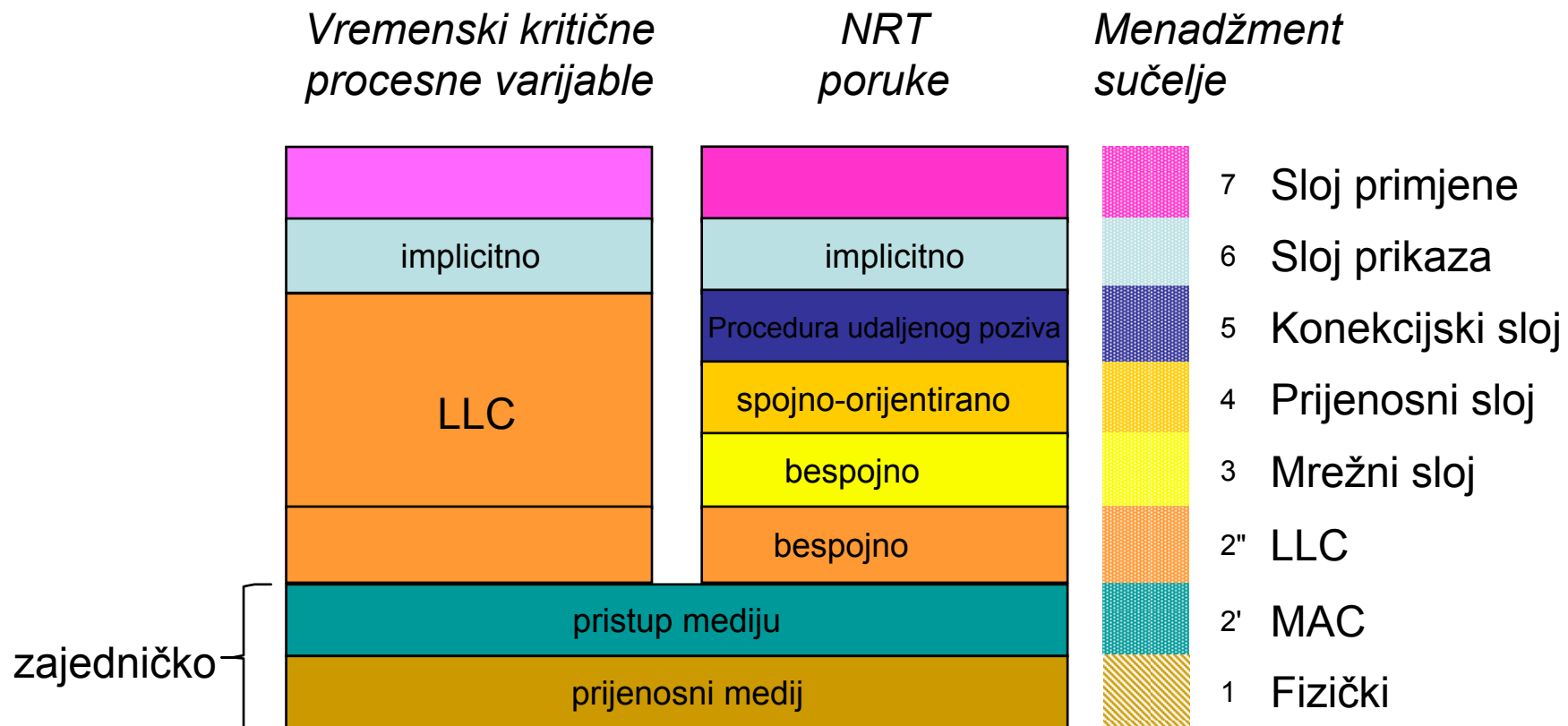
Mješoviti prijenos je konfiguracijski problem

- Ciklički prijenos zauzima veliki dio komunikacijskog kapaciteta mreže i treba ga koristiti samo za prijenos varijabli koje su stvarno kritične.
- Ovaj prijenos je standardno rješenje u sabirnicama polja (field busses) za procesno upravljanje.
- Odluka o pridruživanju neke varijable cikličkom ili ET načinu slanja, ne može se mijenjati tokom rada sistema, već se mora donijeti u fazi njegova projektiranja.
- Uz RT podatke mora se osigurati i prijenos NRT poruka, kao što su dijagnostičke poruke i upravljanja mrežom.
- RT mreža omogućuje oba načina slanja poruka.

Komunikacijski model u stvarnom vremenu

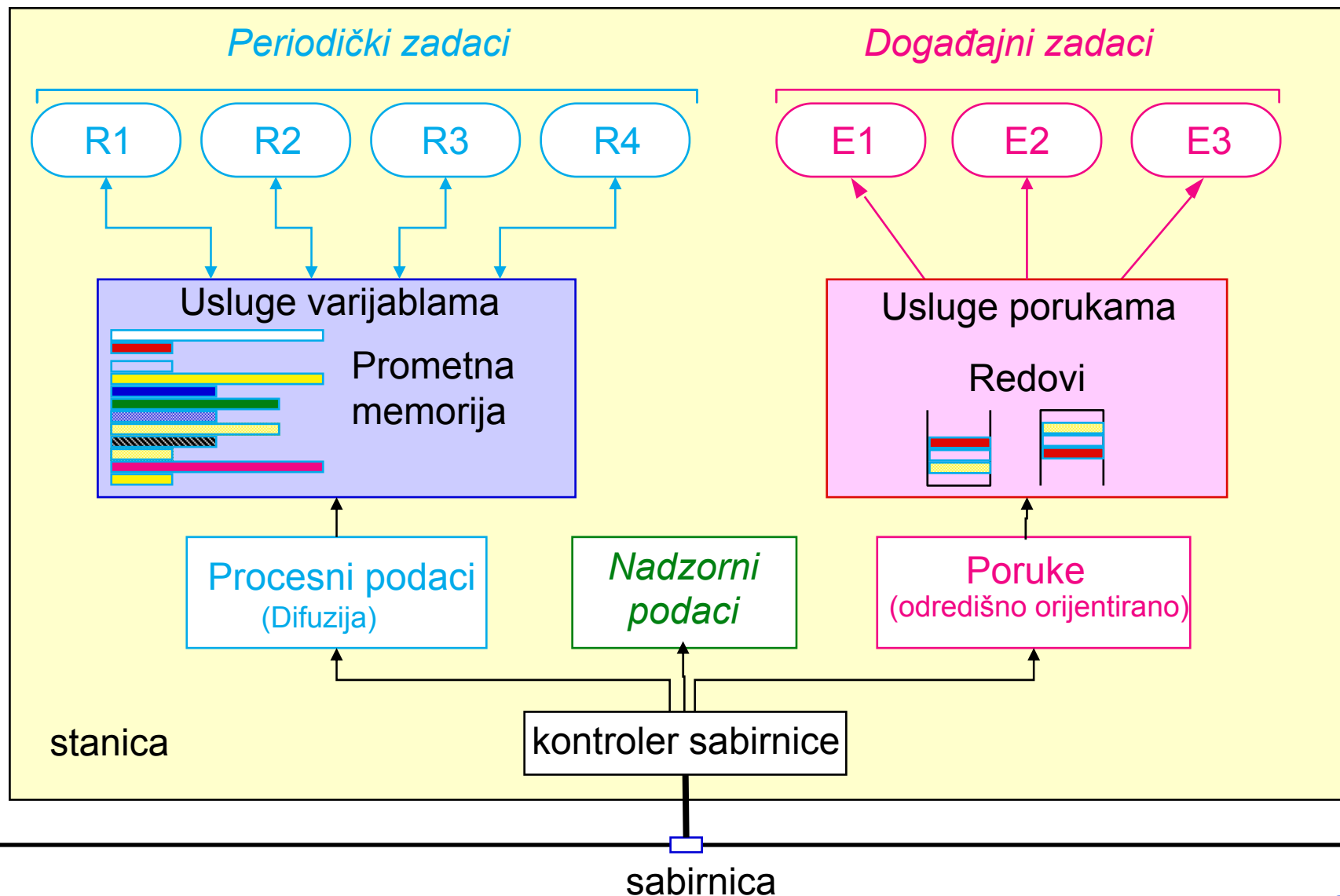
RT komunikacijski model

RT komunikacijski model koristi dva sloga, jedan za vremenski kritične varijable i jedan za poruke.



Komunikacijski model u stvarnom vremenu

RT komunikacijski model



Komunikacijski model u stvarnom vremenu

Sabirnica polja (Fieldbus) i sabirnica procesa (Process Bus)

Sabirnica polja	Sabirnica procesa
striktno deterministička	ne-deterministička
upravljana sa centralnim masterom (redundantna za raspoloživost)	više-masterska sabirnica (arbitriranje) deterministička arbitraža -> zalog (žeton)
cikličko prozivanje	dogadjajno upravljanje
broj učesnika ograničen sa maksimalnim periodom	veliki broj učesnika
poziv/odgovor u jednom sabirničkom prijenosu (ciklus čitanja) ("princip hvatanja")	poziv/odgovor koristi dvije različite poruke, oba dijela moraju postati master sabirnice. ("bring - princip")
jeftina konekcija ("glupa")	troškovna konekcija (inteligentna)
moguća samo preko ograničenih geografskih područja	također prikladna za otvorene sisteme