Multimedijalno inženjerstvo – master strukovne studije

Digitalni komunikacioni sistemi:

Lekcija 5: Rutiranje I

zima 2019/2020

Branimir M. Trenkić

Rutiranje

- adresiranje, prosleđivanje, rutiranje -

- rutiranje na osnovu vektora udaljenosti -

- rutiranje na osnovu stanja veze -

[Danas: bez otkaza u mreži]

Rutiranje i komutator

- Lekcija 2, slajd #19:

Komutator – osnovna funkcija

- ***Osnovna funkcija komutatora***

a) ***Multipleksiranje*** *i* ***demultipleksiranje*** okvira koji pripadaju različitim host-host prenosnim sesijama (konekcijana)

b) ***Određivanje linka*** ili linkova po kojima dati okvir treba ***proslediti***

- Ova funkcija je od esencijalne važnosti jer će često fizički link biti raspodeljen između više istovremenih konekcija

Rutiranje i komutator

- Lekcija 2, slajd #20:

Komutator - tri problema

- Što se tiče te funkcije - mogu se uočiti ***tri problema***:

1. ***Prosleđivanje***: Kada okvir dođe u komutator, komutator ga obrađuje u smislu (I) ***određivanja korektnog odlaznog linka*** i odlučuje (II) ***kada treba slati*** taj okvir na taj link
2. ***Rutiranje***
3. ***Dodeljivanje resursa***

Rutiranje i komutator

- Lekcija 2, slajd #21:

Komutator - tri problema

- ***Rutiranje***: svaki komutator na neki način ***mora da*** odredi (***spozna***) ***topologiju mreže***, kako bi bio u stanju ***da formira korektnu strukturu podataka*** na bazi koje će ***vršiti prosleđivanje***
- ***Proces*** u kojem ***komutatori sarađujući spoznaju topologiju mreže***, adaptirajući je u slučaju bilo kakvog otkaza u mreži – ***naziva se rutiranje***
- Ovaj proces se ne odvija prilikom prenosa okvira već „u pozadini“

Rutiranje i komutator

- Problem koji danas analiziramo je:

„Šta komutatori (i krajnje stanice) u paketskim mrežama treba da urade kako bi se obezbedilo da paket poslat sa neke izvorišne stanice S, u mreži, dođe do njegovog krajnjeg odredišta D?“

- Reč „obezbedi“ implicira ***neku vrstu garancija***

Rutiranje i komutator

- Ovaj ***problem je dosta složen*** (više pod-problema) ***i nosi sa sobom mnoge izazove***

- Problem nalaženja putanje kroz mrežu je ***izazov iz sledećih razloga***:
  - Problem distribucije informacija
  - Efikasnost
  - Otkazi u mreži

Rutiranje i komutator

Distribucija informacija

- Svaka stanica ***poseduje saznanja samo o svojim lokalnim povezanostima***, t.j. ***neposrednim susedima*** u topologiji mreže
  - Pouzdano utvrđivanje i tog saznanja ***zahteva određene aktivnosti***
- Na nivou mreže mora se obezbediti način koji će omogućiti da se na osnovu ovih saznanja obezbedi ***globalna povezanost***

Rutiranje i komutator

Efikasnost

- ***Pronađene putanje*** moraju biti ***„dobre“***
- Ne smeju biti neobično dugačke, što bi povećalo ukupno kašnjenje u prenosu
- Konkretno, predpostavićemo da ***svaki link ima određenu cenu*** (kojom se može modelovati npr. kašnjenje)
- ***Problem*** nalaženja putanje između izvorišta i krajnjeg odredišta paketa treba ***svesti*** na nalaženje putanje koja ***minimizira ukupnu cenu***

Rutiranje i komutator

Otkazi u mreži

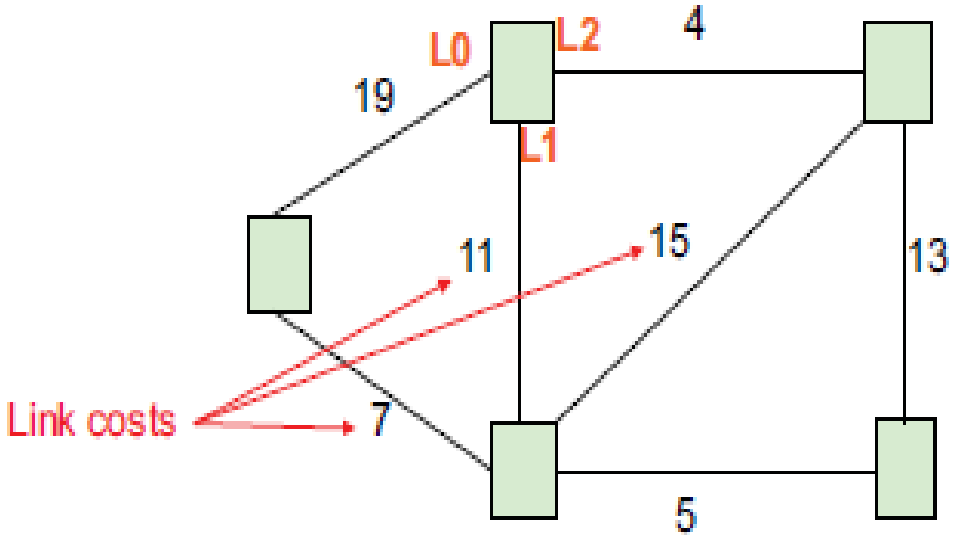
- U mrežama može doći do otkaza rada linkova i stanica
- Sa ovim događajima povezan je i ***vremenski period oporavka*** ovih elemenata

Rutiranje i komutator

- ***U rešavanju ovog problema*** učestvuje „cela mreža“, t.j. sve stanice u mreži (krajnje + komutatori)
- ***Ključnu ulogu igraju komutatori*** i mi ćemo se fokusirati na taj deo rešavanja problema
- S obzirom da se informacije potrebne za rešavanje problema nalaze širom mreže (na različitim komutatorima), rešenje zahteva ***sadejstvo svih komutatora u mreži***
- ***Problem***: ***Distribuirane metode*** za nalaženje putanje u mreži

Rutiranje osnovni pojmovi

Problem: ***Distribuirane metode*** za nalaženje putanje u mreži

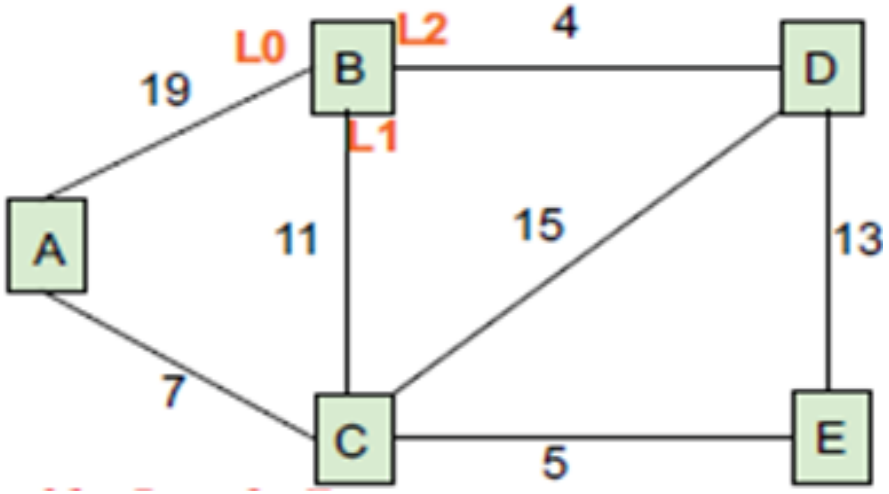


- Rešenje iz tri dela:
  - ***Adresiranje***
  - ***Prosleđivanje***
  - ***Rutiranje***

Rutiranje osnovni pojmovi

Problem: Distribuirane metode za nalaženje putanje u mreži

- ***Adresiranje*** (imenovanje tačaka u mreži)
  a) Jedinstveni identifikator za ***globalno adresiranje*** (A, B, C,...)
  b) Identifikator linka ***do suseda*** (L0, L1, L2,...)



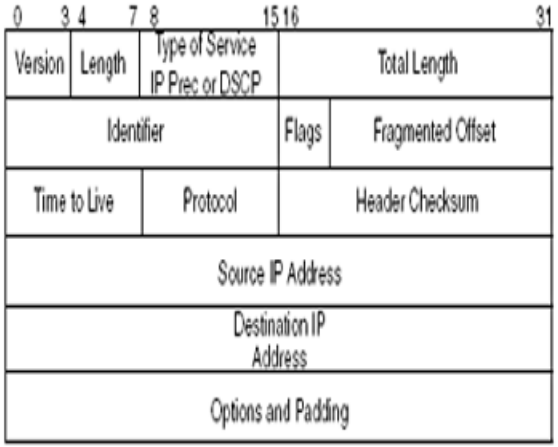
Rutiranje osnovni pojmovi

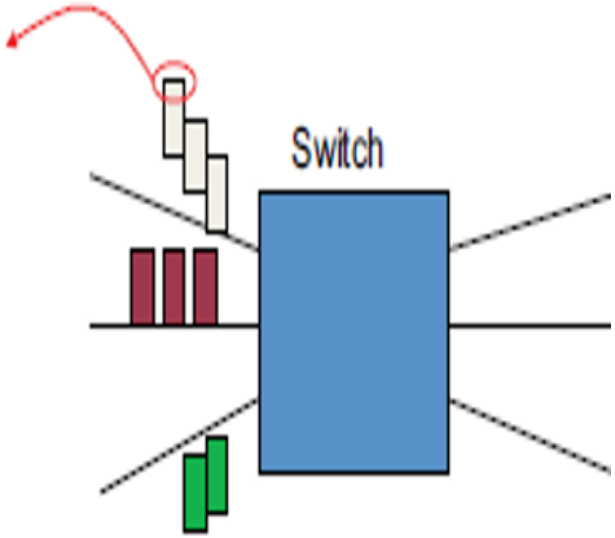
Problem: Distribuirane metode za nalaženje putanje u mreži

- ***Prosleđivanje*** (obrada paketa u procesu komutacije)
- ***Rutiranje*** (formiranje i ažuriranje struktura podataka koje omogućuju realizaciju prosleđivanja)
  - To su sve ***funkcije sloja mreže***

Prosleđivanje

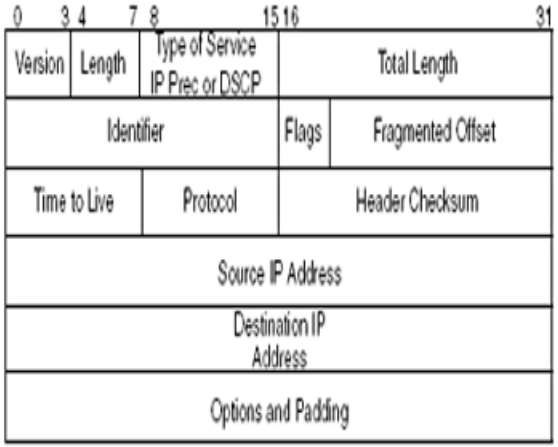
- ***Tri*** koncepcijski vrlo ***jednostavne funkcije***
- ***lookup(dst_addr)*** u ruting tabeli
  vraća ***rutu*** (engl. *route*) (t.j. ***odlazni link***) za paket
- ***enqueue(packet, link_queue)***
- ***send(packet)*** po odlaznom linku

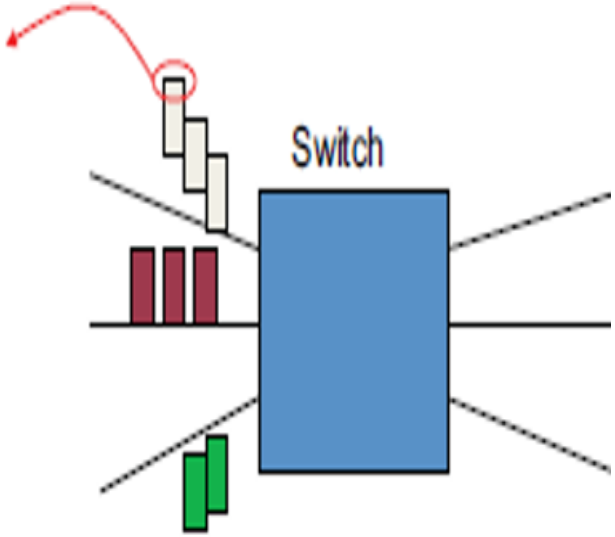




Prosleđivanje

- Neke dodatne provere ***pre*** funkcije ***enqueue***
  - ***Dekrementiranje brojača skokova*** (TTL polje); ako je = 0, odbaciti paket
  - ***Rekalkulacija kontrolne sume*** (u IP, kontrolne sume zaglavlja)





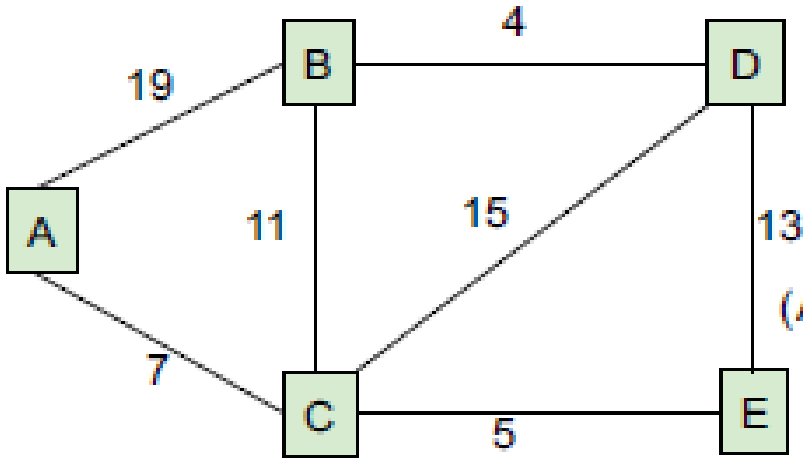
Rutiranje na osnovu najkraće putanje

- Svaki komutator (ruter) želi na nađe ***putanju (rutu) sa <u>minimalnom ukupnom cenom</u>*** do drugih čvorova
- Koristimo izraz

  „najkraća putanja“ iako

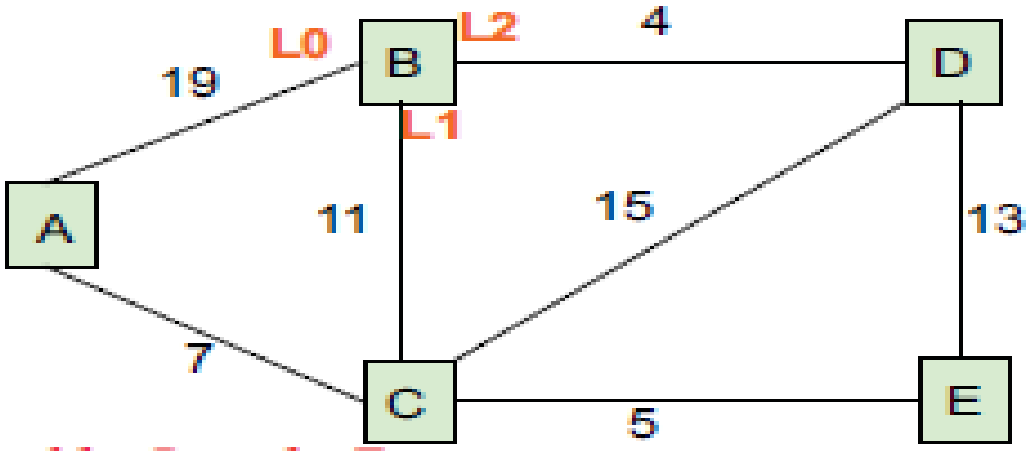
  <u>nas zanima</u> minimalna cena

  (a ne minimalni # skokova)



- Nekoliko mogućih ***distribuiranih pristupa***:
  a) ***Vektorski protokoli***, protokol ***na bazi vektora udaljenosti*** (*distance vector*, ***DV***)
  b) ***Protokoli na bazi stanja linka*** (*link-state*, ***LS***)

Struktura tabele rutiranja



Routing table @ node B

Destination	Link (next-hop)	Cost
A	L1	18
B	'Self'	0
C	L1	11
D	L2	4
E	L1	16

ROUTE

ROUTE

Distribuirano rutiranje: Zajednički pristup

- ***Određivanje „živih“ suseda***
  - ***Zajedničko za obe kategorije*** protokola (DV + LS)
  - ***HELLO protokol*** (periodično)
    - Slanje HELLO paketa ***ka svim susedima*** kako bi saznao ***ko je na drugom kraju odlaznog linka***
    - Koristi primljene HELLO pakete za ***formiranje liste suseda*** koja se sastoji od ***uređene trojke***

lista suseda = (***vremenska oznaka***, ***adresa suseda***, ***link***)

- Ponavlja se ***periodično***: ako se ne čuju neko vreme – desio se otkaz linka, tako da se taj sused uklanja sa liste suseda

Distribuirano rutiranje: Zajednički pristup

- ***Korak oglašavanja*** (periodično)
  - ***Slanje*** informacija ***do svih suseda***
  - Koriste se ***za identifikaciju povezanosti*** & ***cene dostupnosti*** neke tačke u mreži
- ***Integracioni korak***
  - ***Formiranje ruting tabele*** na osnovu informacija iz oglašavanja
  - Problem suočavanja sa starim podacima

Rutiranje na bazi vektora udaljenosti

- ***DV oglašavanje***
  - Slanje informacija iz stavki ruting tabele: ***(dest, cost)***
  - ***Inicijalno*** samo ***(self, 0)***

(dest, cost)

Destination	Link (next-hop)	Cost
A	L1	18
B	'Self'	0
C	L1	11
D	L2	4
E	L1	16

ROUTE

ROUTE

Rutiranje na bazi vektora udaljenosti

- ***DV integracioni korak*** (***Bellman-Ford***)
  - Za svaku stavku ***(dest, cost)*** iz oglašavanja suseda
    - ***Sused*** koji se oglašava: ***(link_id, link_cost)***
    - ***Proračun cene dostupnosti*** tačke (***dest***) preko ***suseda koji je oglasio stavku***:
    - Rezultat:- ***(dest, my_cost)***

my_cost = cost_in_advertisement + link_cost

cena linka do suseda koji je oglasio stavku

Rutiranje na bazi vektora udaljenosti

- DV ***integracioni korak*** (***Bellman-Ford***)
  - Trenutno stanje u ruting tabeli:

    (dest(R), link_id(R), cost(R))
  - Pitanje: „Da li ruter ***već šalje pakete*** ka ***dest preko tog suseda***?“
    - Videti ***da li se link slaže*** sa onim što se već nalazi u ruting tabeli ***(link_id == link_id(R))***
    - Ako se linkovi poklapaju, ***ažurirati*** ***cenu u ruting tabeli*** sa ***my_cost (cost(R) = my_cost)***

Rutiranje na bazi vektora udaljenosti

- DV ***integracioni korak*** (***Bellman-Ford***)
  - ***Inače***, ***ako je my_cost manji*** od cene u ruting tabeli (***my_cost < cost(R)***)
    - ***Sused nudi bolju putanju***! Koristi je...
    - ***Ažuriraj*** ***ruting tabelu*** tako da se paketi ***do dest*** sada šalju ***preko ovog suseda***

      link_id(R) = link_id

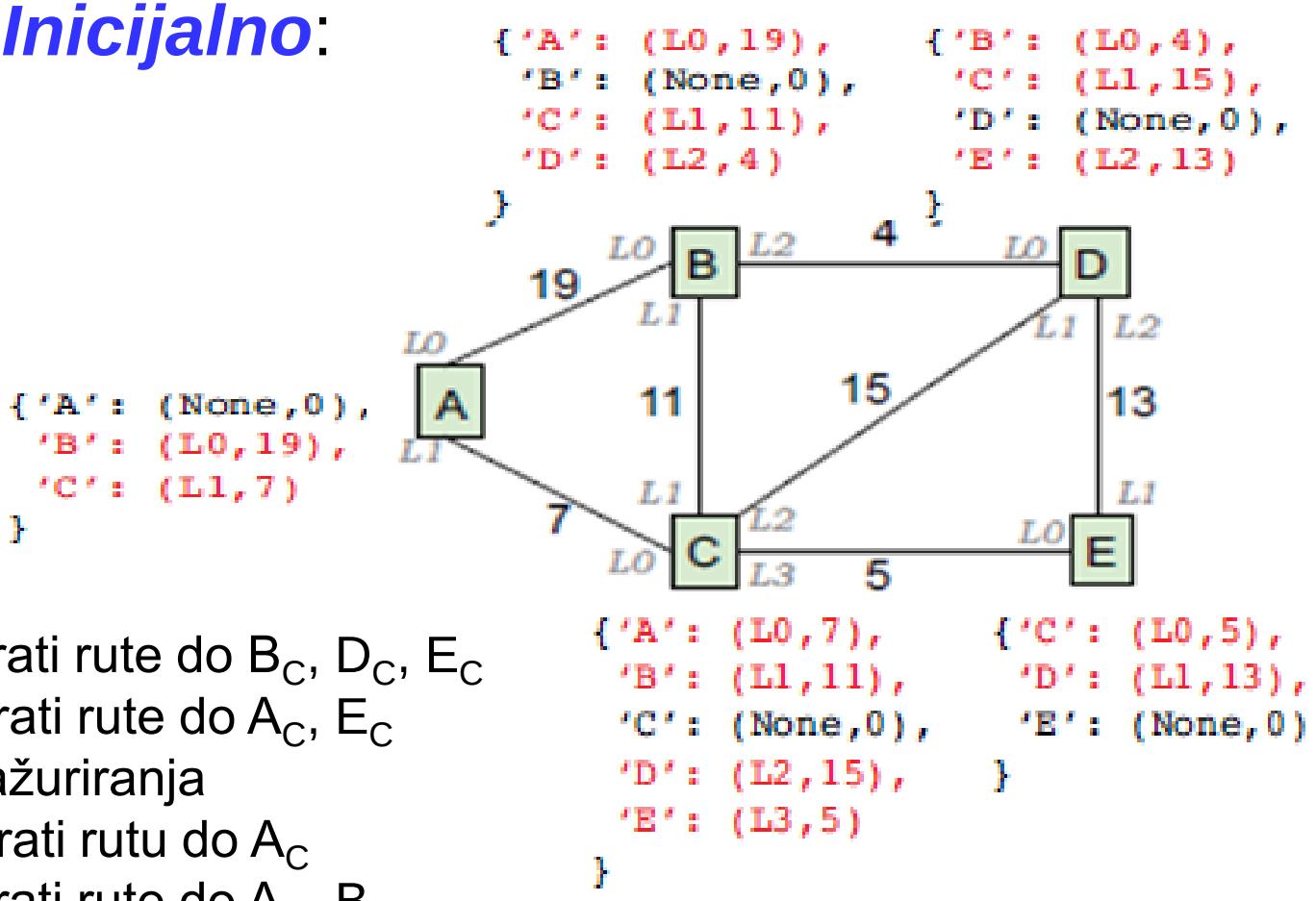
      cost(R) = my_cost

Rutiranje na bazi vektora udaljenosti

- DV ***integracioni korak*** (Bellman-Ford)
  - ***Ako odredište dest još uvek nije u tabeli***, ***ažurira*** se tabela tako što je ruter ***dodaje tabeli*** i sortira tabelu saglasno odredišnoj adresi

DV Primer

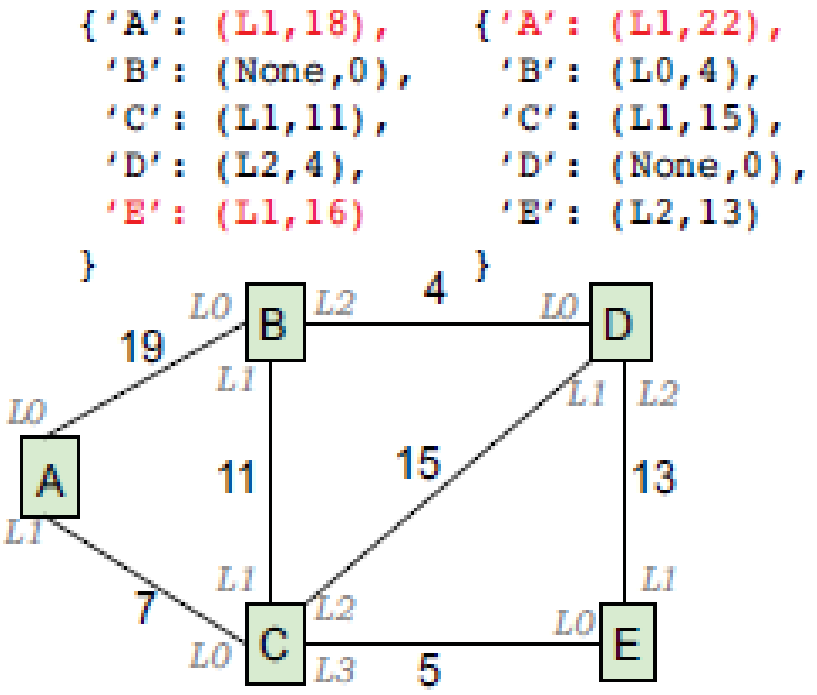
Inicijalno:



Ruter A: ažurirati rute do B_C, D_C, E_C
Ruter B: ažurirati rute do A_C, E_C
Ruter C: bez ažuriranja
Ruter D: ažurirati rutu do A_C
Ruter E: ažurirati rute do A_C, B_C

DV Primer

Konačno stanje:



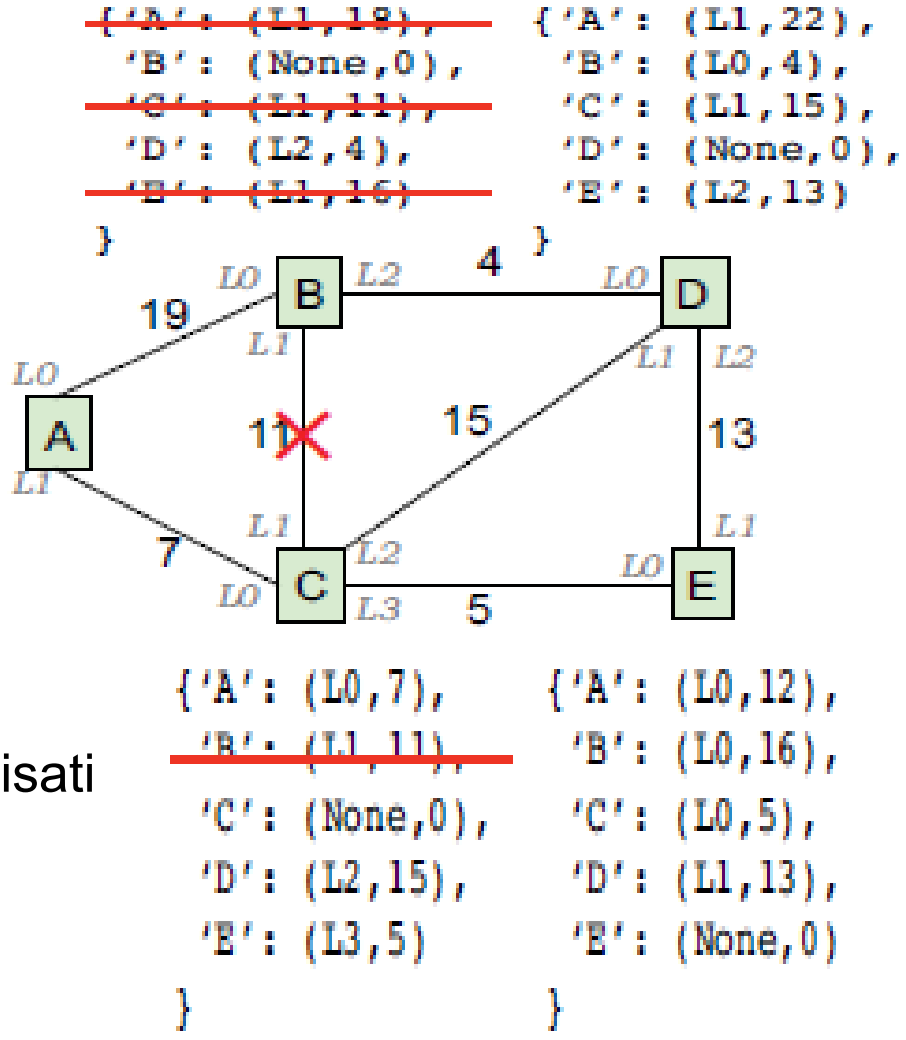
{'A': (None,0),
'B': (L1,18),
'C': (L1,7),
'D': (L1,22),
'E': (L1,12)

Ruter A: bez ažuriranja
Ruter B: bez ažuriranja
Ruter C: bez ažuriranja
Ruter D: bez ažuriranja
Ruter E: bez ažuriranja

{'A': (L0,7),
'B': (L1,11),
'C': (None,0),
'D': (L2,15),
'E': (L3,5)
}

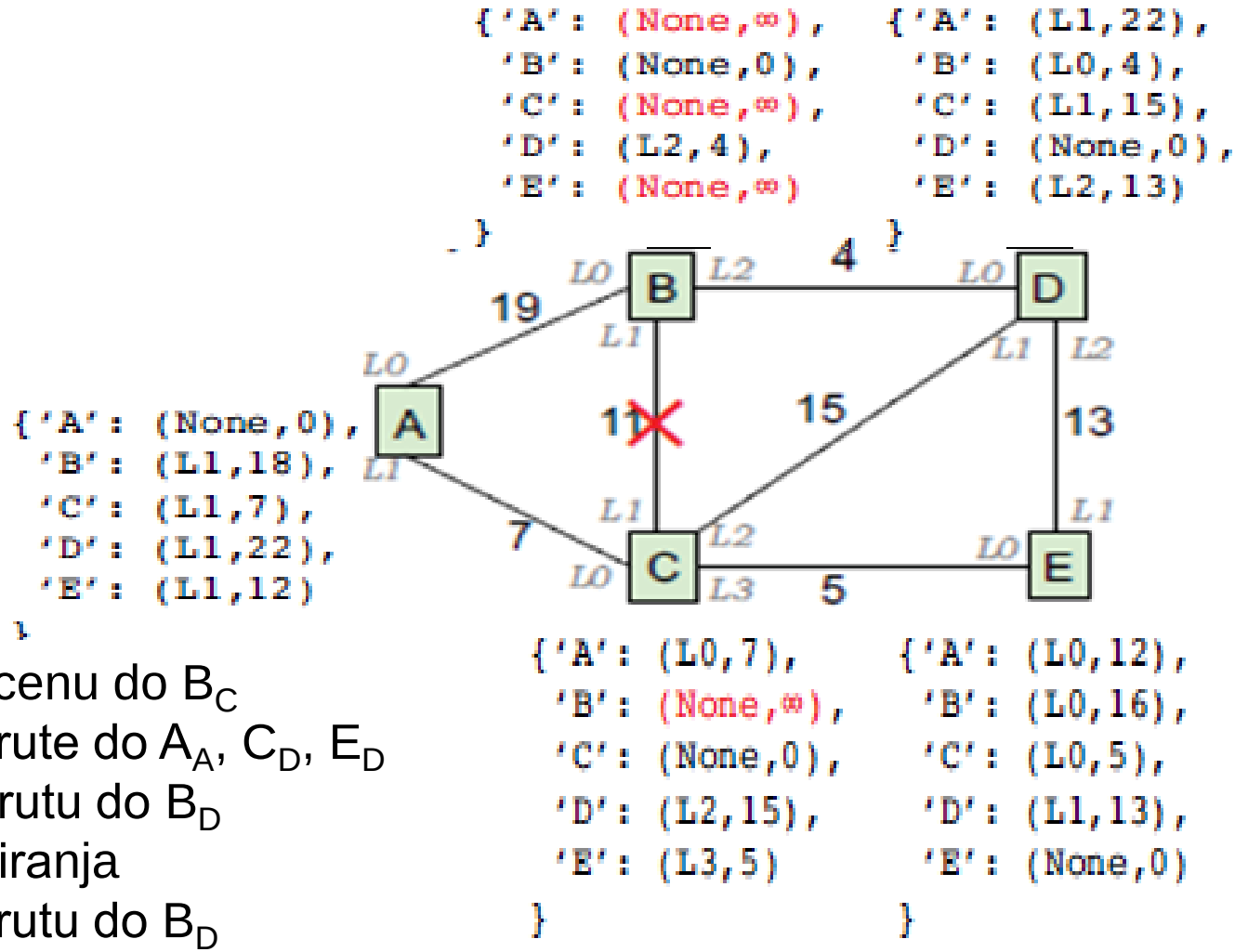
{'A': (L0,12),
'B': (L0,16),
'C': (L0,5),
'D': (L1,13),
'E': (None,0)
}

DV Primer: Otkaz linka



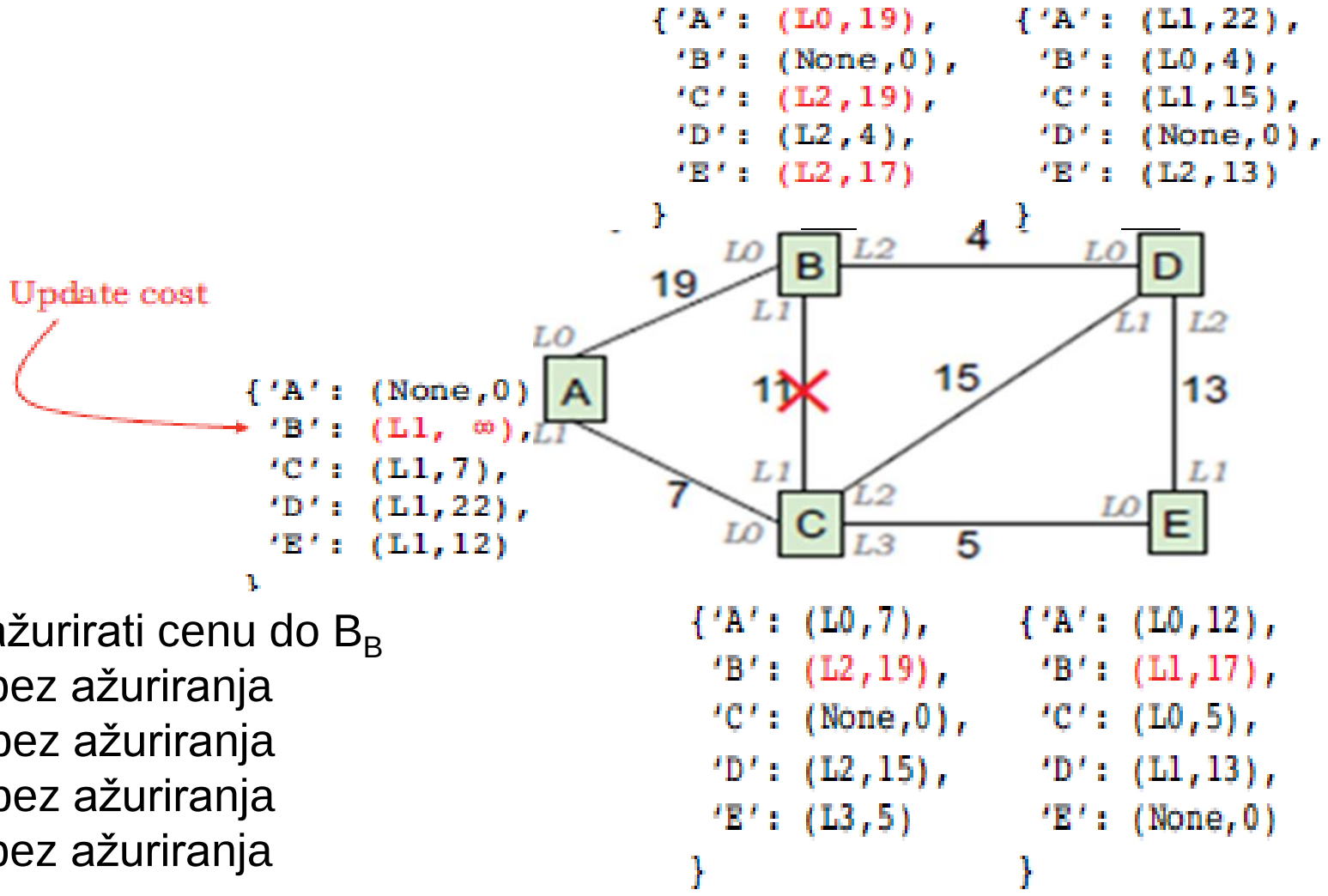
U slučaju otkaza nekog linka: eliminisati rute koje koriste taj link

DV Primer: Otkaz linka



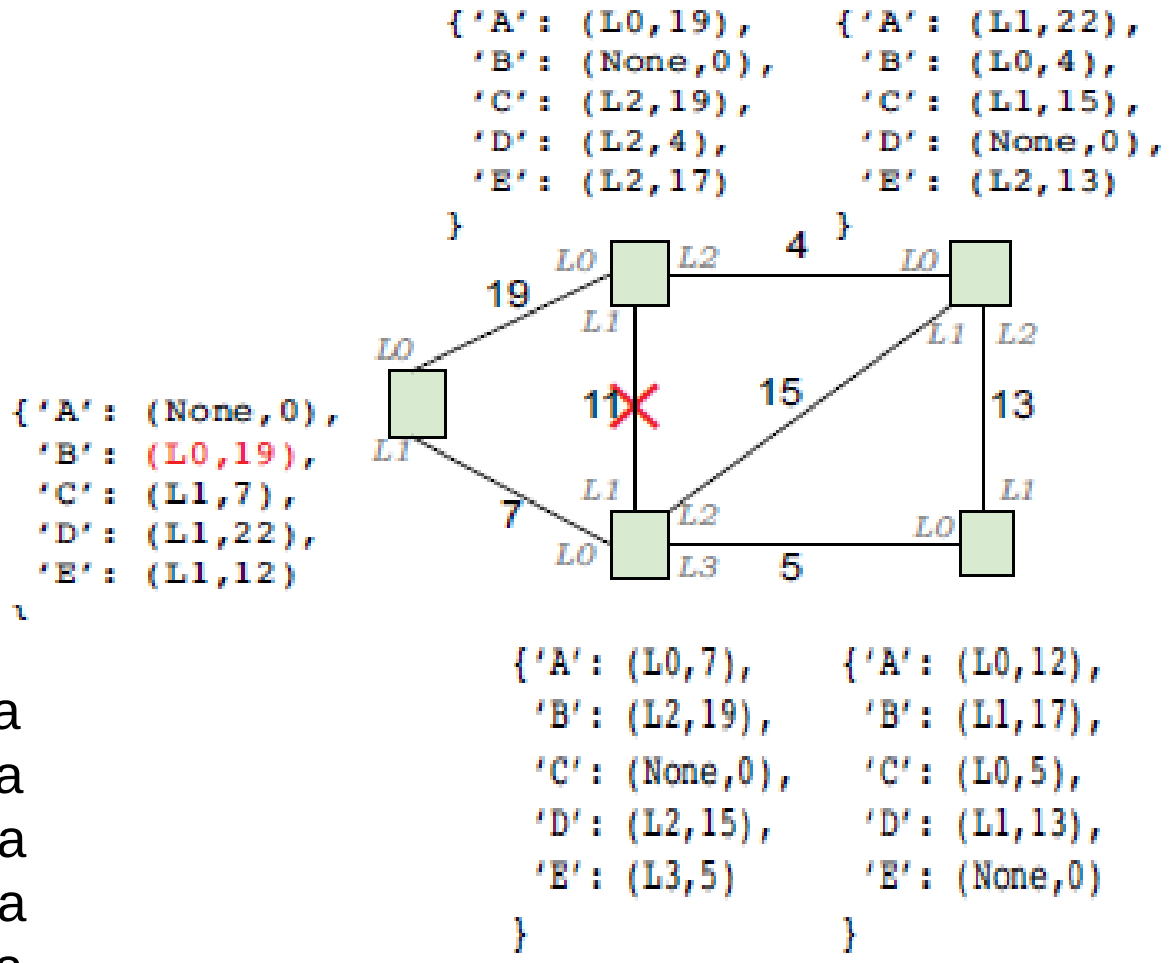
Ruter A: ažurirati cenu do B_C
Ruter B: ažurirati rute do A_A, C_D, E_D
Ruter C: ažurirati rutu do B_D
Ruter D: bez ažuriranja
Ruter E: ažurirati rutu do B_D

DV Primer: Otkaz linka



Ruter A: ažurirati cenu do B_B
Ruter B: bez ažuriranja
Ruter C: bez ažuriranja
Ruter D: bez ažuriranja
Ruter E: bez ažuriranja

DV Primer: konačno stanje



Ruter A: bez ažuriranja
Ruter B: bez ažuriranja
Ruter C: bez ažuriranja
Ruter D: bez ažuriranja
Ruter E: bez ažuriranja

Korektnost i performanse

- Načelo ***optimalnosti sub-struktura*** osnova za korektnost algoritama rutiranja

  "Predpostavimo da najkraći put od X do Y prolazi kroz Z. U tom slučaju, deonica od X do Z mora biti najkraći put"

- Dokaz Bellman-Ford-ovog algoritma ***preko indukcije broja koraka na najkraćem putu*** (putu minimalne cene)
  - Jednostavno za ne-negativne cene i sinhroni model
  - Komplikovano u slučaju distribuiranog asinhronog modela

Korektnost i performanse

- Koliko je ***vreme konvergencije protokola*** za rutiranje na bazi vektora udaljenosti?
- ***Vreme je proporcionalno najvećem broju koraka*** (skokova) u odnosu na sve putanje najmanjih cena

Rutiranje na bazi stanja veze

- Bazira se na ***drugačijoj ideji***
- Protokol na bazi vektora udaljenosti:
  - Oglašava se jedino ***najbolja cena do svakog*** odredišta u mreži
- Protokol rutiranja na bazi stanja veze:
  - U fazi oglašavanja, svaki ruter oglašava jedino ***informacije o njegovim susedima*** (t.j. cenama linkova do njih)
  - Prijemom ovakvog oglašavanja, ruter difuzijom prosleđuje ovo oglašavanje do svojih suseda. Ovaj proces se naziva ***plavljenje (flooding)***

Rutiranje na bazi stanja veze

- ***Rezultat plavljenja***:- ***mapa celokupne mreže*** u svakom ruteru
- Mapa se sastoji od ***(I)*** čvorova (rutera) u mreži i ***(II)*** trenutno operativnih linkova (koji su evidentirani pomoću HELLO protokola)
- Opremljen kompletnom mapom mreže, svaki ruter u mreži može izvršiti ***centralizovan proračun nalaženja najkraće rute*** (putanje) do svakog odredišta u mreži.

Rutiranje na bazi stanja veze

- Suprotno od ovoga, u protokolu na bazi vektora udaljenosti:
  a) Sam ***proračun ruta je distribuiran***,
  b) ***Bez*** nekog ***značajnijeg poznavanja topologije*** čitave mreže u bilo kom od rutera
- Protokol rutiranja na bazi stanja veze ***distribuira informaciju o stanju svojih linkova*** (odatle potiče i ime) i svojih suseda ka svim ruterima u mreži
- Sve dok ruteri imaju konzistentnu sliku topologije, prosleđivanje će raditi na željeni način

Rutiranje na bazi stanja veze

- ***Korak oglašavanja***
  - Šalju se ***informacije o njegovim vezama*** do suseda (***link-state advertisement***, ***LSA paket***):

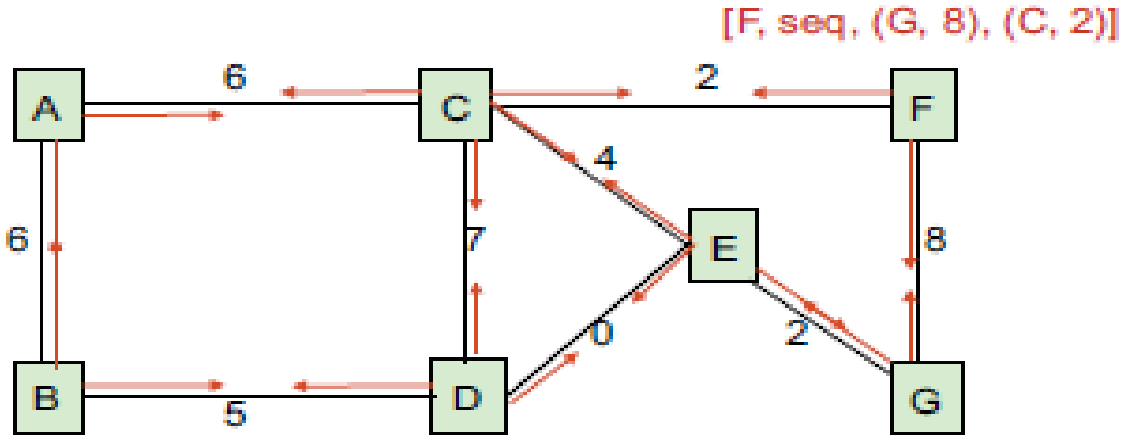
    [origin_addr, seq#, [(nbhr1, linkcost1), (nbhr2, linkcost2),....]]

    - ***origin_addr*** – adresa rutera koji je ***formirao LSA***
    - ***seq#*** - redni broj formiranog LSA (od 0, +1)
    - ***nbhr*** – trenutno aktivni sused
    - ***linkcost*** – cena odgovarajućeg linka
  - Raditi to ***periodično*** (održavanje u životu, oporavak od izgubljenog LSA)

Rutiranje na bazi stanja veze

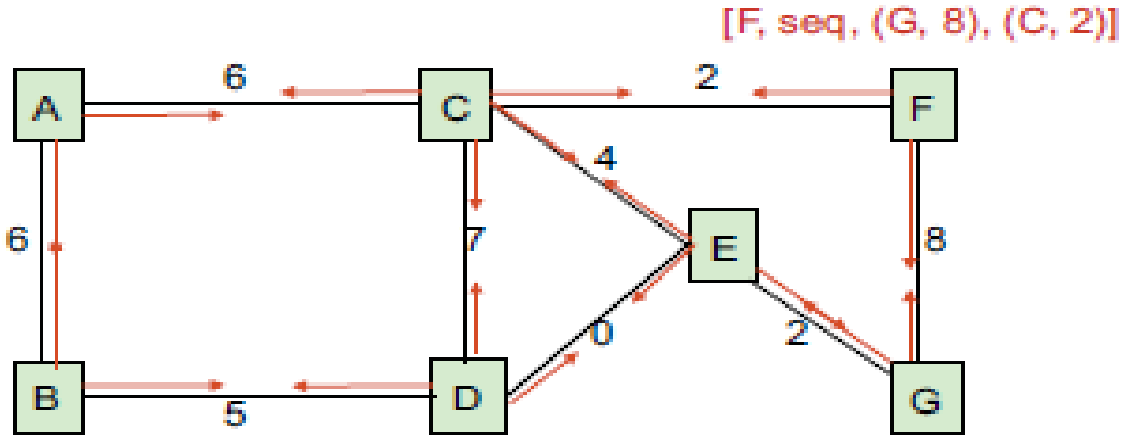
- ***Korak oglašavanja***
  - Svaki susedni ruter koji primi ovakvo oglašavanje ***difuzijom ga prosleđuje*** sada do svojih neposrednih suseda itd.....
  - Ovaj proces se naziva plavljenje (***LSA flooding***)
  - ***Rezultat plavljenja***:- ***mapa celokupne mreže (link-state baze podataka)*** u svakom ruteru

LSA plavljenje



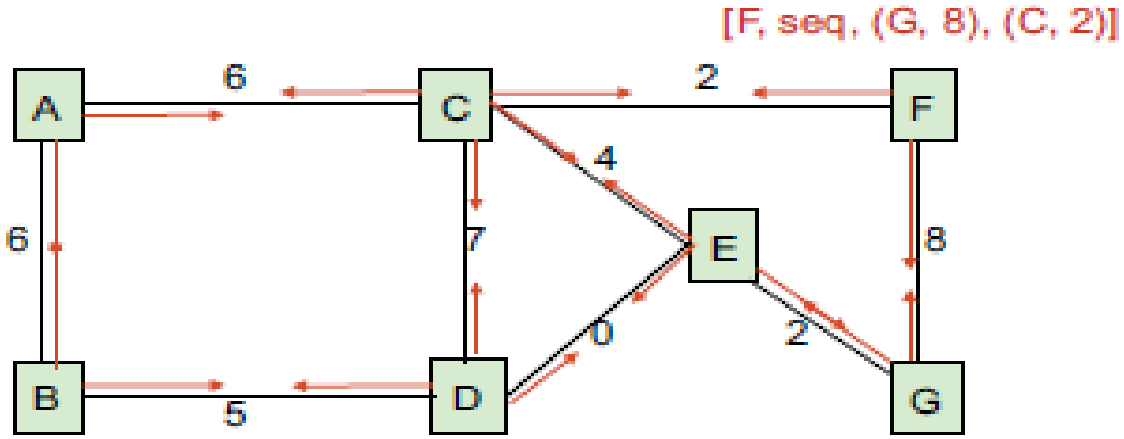
- ***Periodično*** formiranje LSA
- LSA se prenosi ***po svakom linku*** u oba smera
  - Ne trudite se da otkrijete odakle (sa kog linka) dolaze LSA paketi

LSA plavljenje



- Svaka stanica ***vršu difuziju primljenog LSA paketa* *samo jednom***
  - Koristiti seq# u proveri da li je nov LSA paket; sačuvati poslednji seq

LSA plavljenje



- ***Višestruke mogućnosti*** za svaki ruter ***da primi*** bilo koji ***LSA paket***
  - ***Potrebno vreme***: ***broj linkova*** potrebnih za prolaz kroz mrežu

Rutiranje na bazi stanja veze

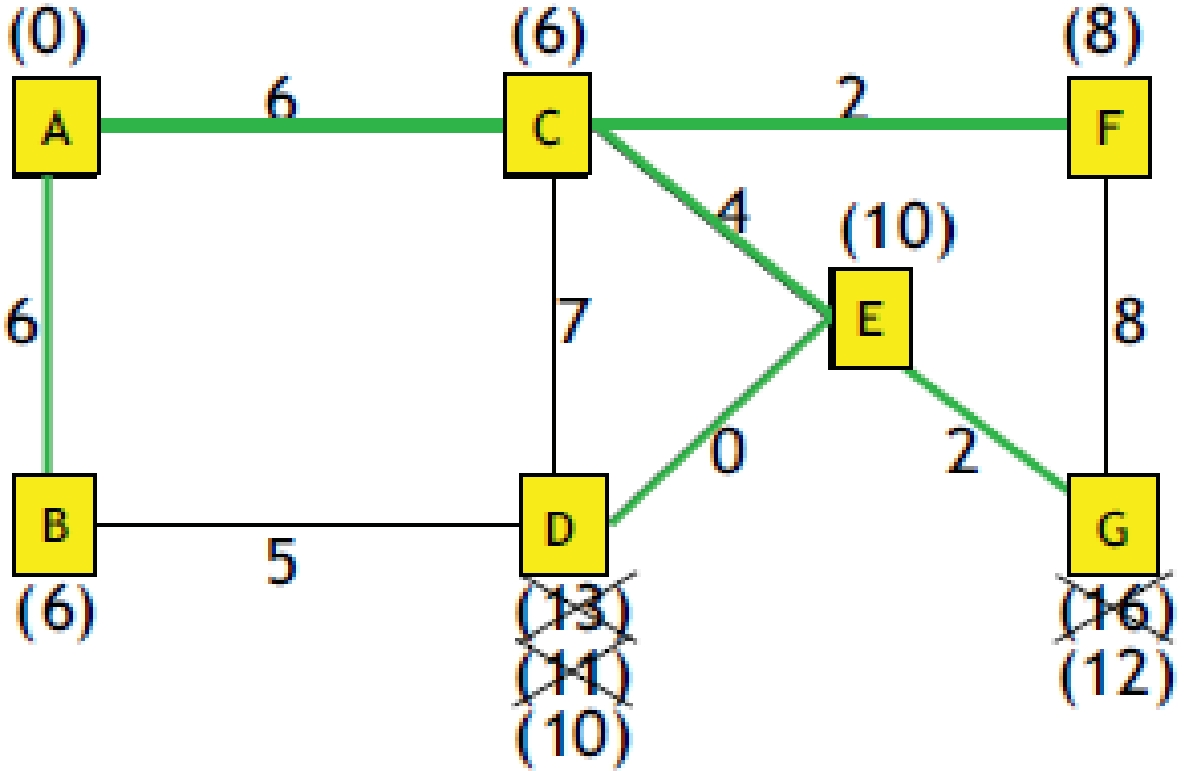
- ***Integracija***
  - Ako je ***seq#*** u primljenom LSA ***> seq#*** sačuvanog LSA za određenu izvorišnu tačku:
  - ***Ažurirati LSA*** sa novim seq#, ***listu suseda***
  - ***Ukloniti sačuvan LSA paket*** ako je seq# previše zastareo
  - ***Rezultat***: Svaki ruter ***formira trenutnu mapu mreže – link-state baza podataka***

Rutiranje na bazi stanja veze

- ***Formiranje ruting tabele***
  - ***Periodično*** svaki ruter izvršava isti ***algoritam najkraćeg puta*** na bazi njegove trenutne ***mape – link-state baze podataka*** (npr. ***Dijkstra algoritam***)
  - ***Uslovi korektnosti*** ruting tabele:
    - ***Proračun korektno implementiran*** u svakoj tački i
    - Svaka tačka ima ***identičnu mapu mreže***

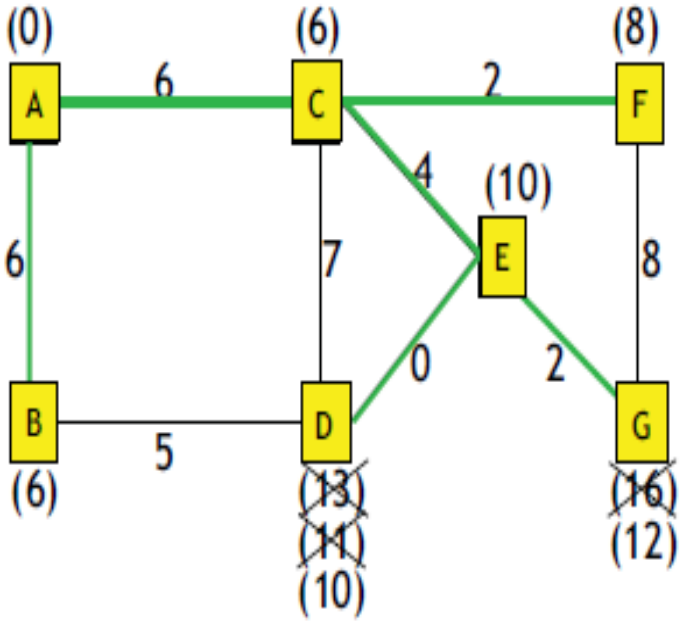
Integracioni korak: Dijkstra algoritam (Primer)

- Predpostavimo da se žele ***naći putanje od A do ostalih odredišta***



Dijkstra algoritam najkraćeg puta

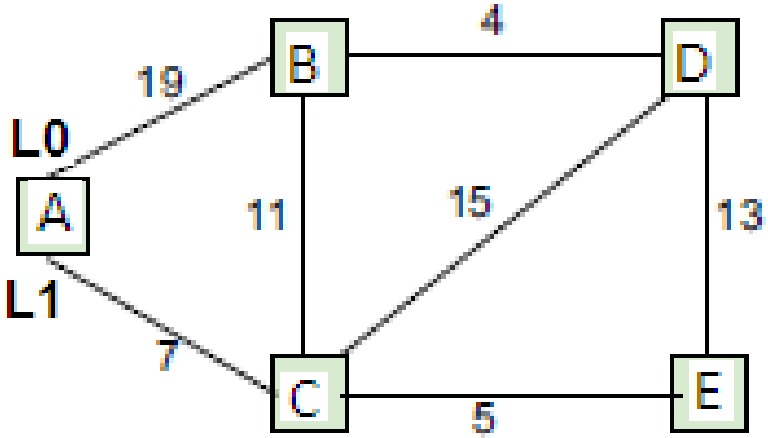
- Inicijalizacija:
  - nodeset = [all nodes] = set of nodes we haven't processed
  - spcost = {me:0, all other nodes: ∞} # shortest path cost
  - routes = {me:--, all other nodes: ?} # routing table
- Osnovna petlja - dok je skup *nodeset* ne-prazan



- find u, the node in nodeset with smallest spcost
- remove u from nodeset
- for v in [u's neighbors]:
  - d = spcost(u) + cost(u,v) # distance to v via u
  - if d < spcost(v): # we found a shorter path!
    - spcost[v] = d
    - routes[v] = routes[u] (or if u == me, enter link from me to v)

Drugi primer

Naći najkraći put od A:



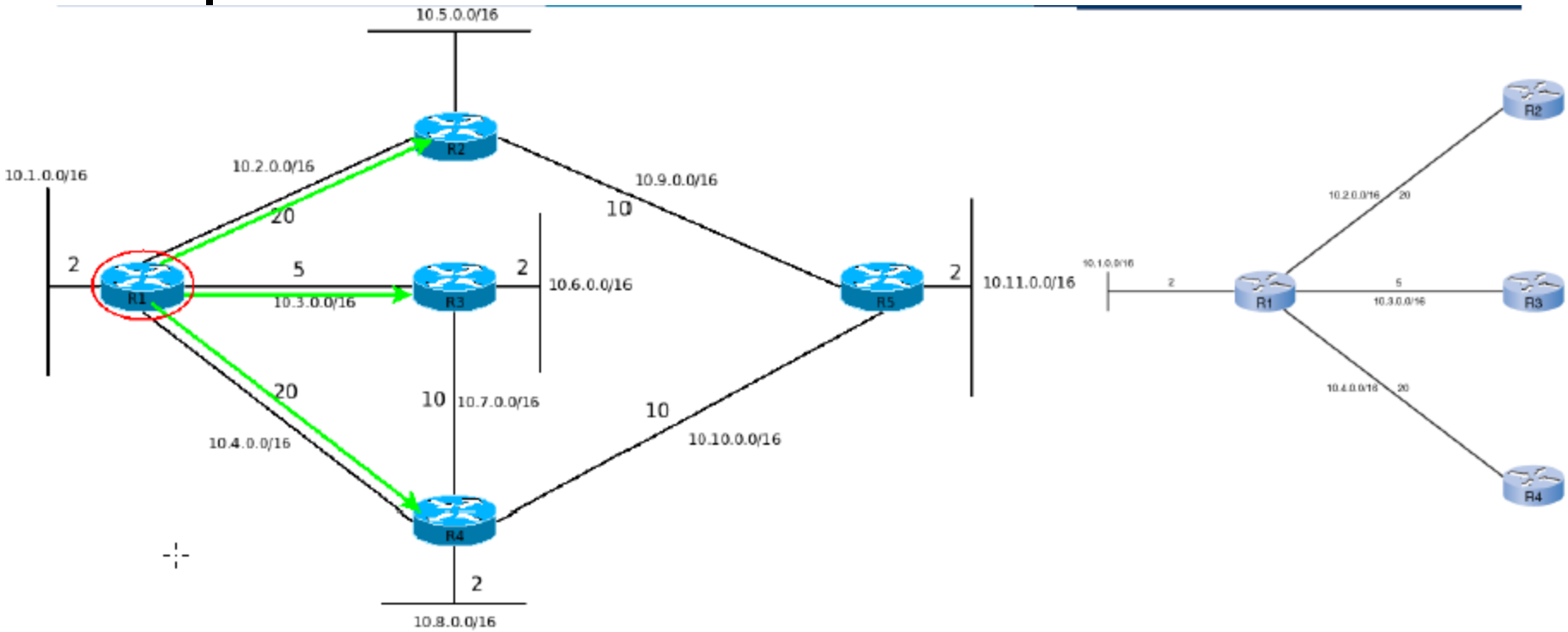
LSAs:

```
A: [(B,19), (C, 7)]
B: [(A,19), (C,11), (D, 4)]
C: [(A, 7), (B,11), (D,15), (E, 5)]
D: [(B, 4), (C,15), (E,13)]
E: [(C, 5), (D,13)]
```

Step	u	Nodeset	spcost					route				
			A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
0		[A,B,C,D,E]	0	∞	∞	∞	∞	--	?	?	?	?
1	A	[B,C,D,E]	0	19	7	∞	∞	--	L0	L1	?	?
2	C	[B,D,E]	0	18	7	22	12	--	L1	L1	L1	L1
3	E	[B,D]	0	18	7	22	12	--	L1	L1	L1	L1
4	B	[D]	0	18	7	22	12	--	L1	L1	L1	L1
5	D	[]	0	18	7	22	12	--	L1	L1	L1	L1

- find u, the node in nodeset with smallest spcost
- remove u from nodeset
- for v in [u's neighbors]:
  - d = spcost[u] + cost[u,v] # distance to v via u
  - if d < spcost[v]: # we found a shorter path!
    - spcost[v] = d
    - routes[v] = routes[u] (or if u == me, enter link from me to v)

Još jedan primer, Početak R1

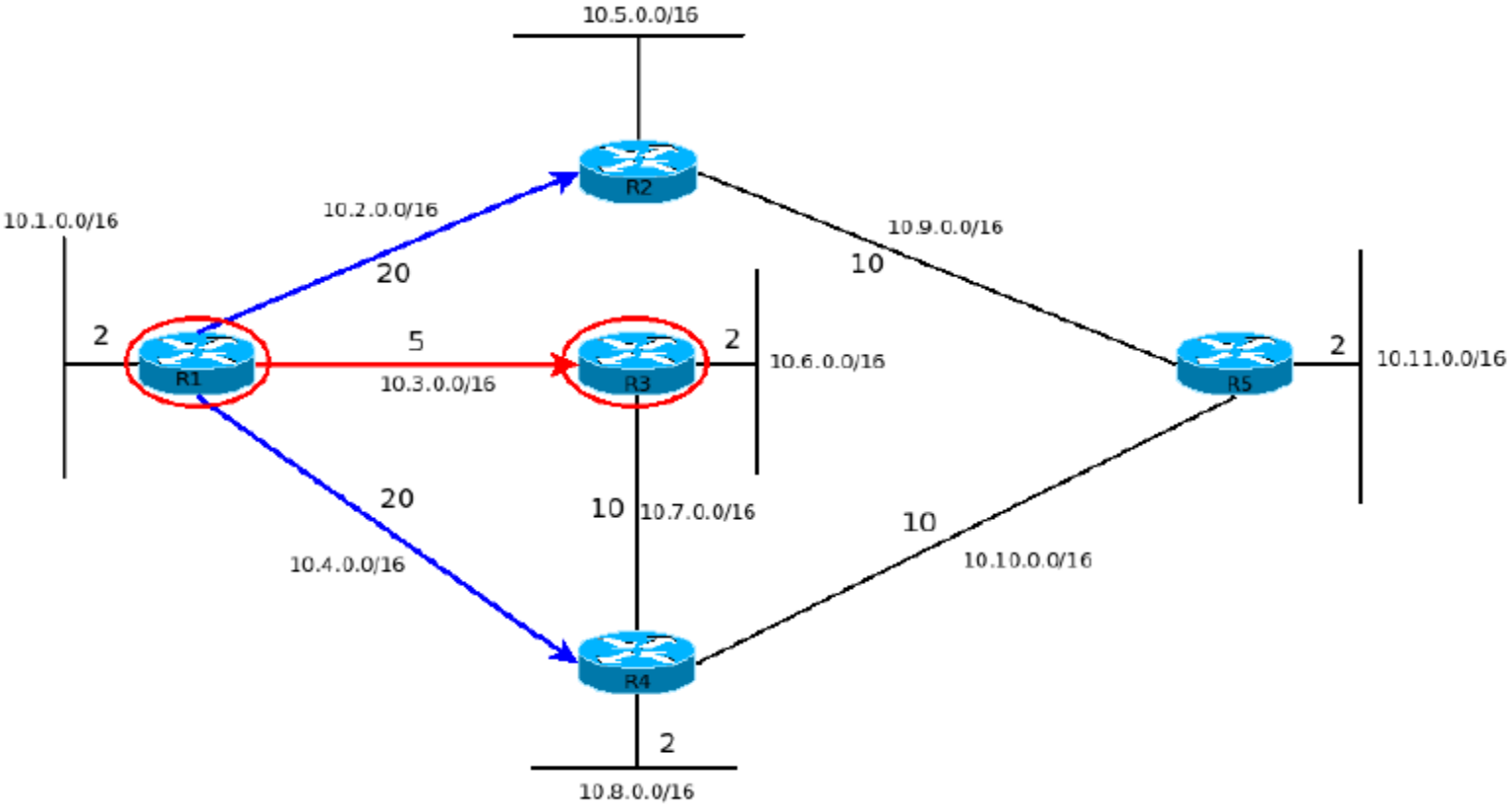


SPF стабло
R1, 0

кандидати

Суседи управо додатог чвора
R1->R2, 20 (додајемо, +0)
R1->R3, 5 (додајемо, +0)
R1->R4, 20 (додајемо, +0)

Kandidati od R1

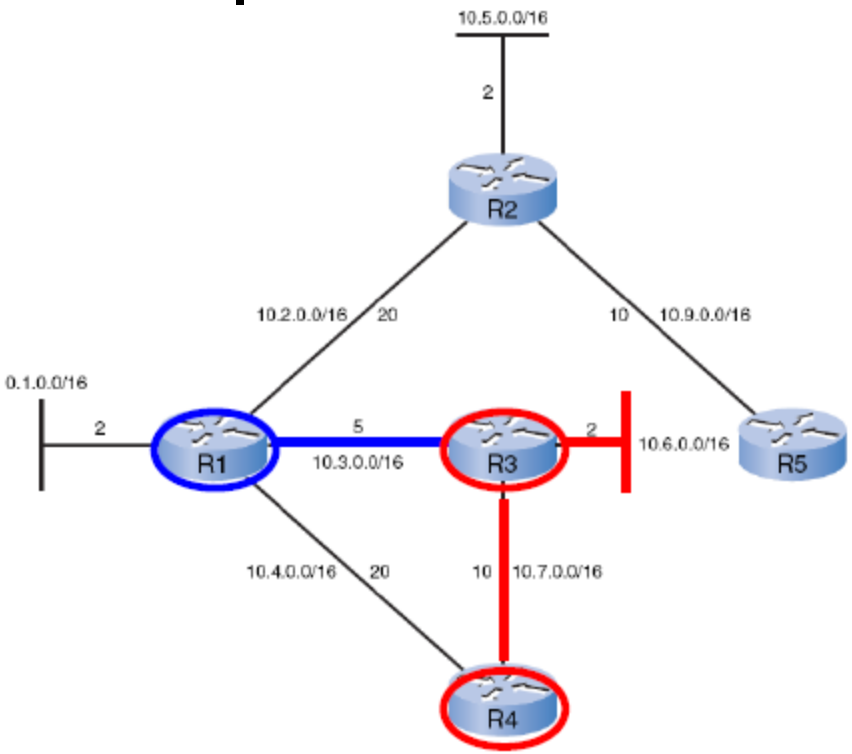


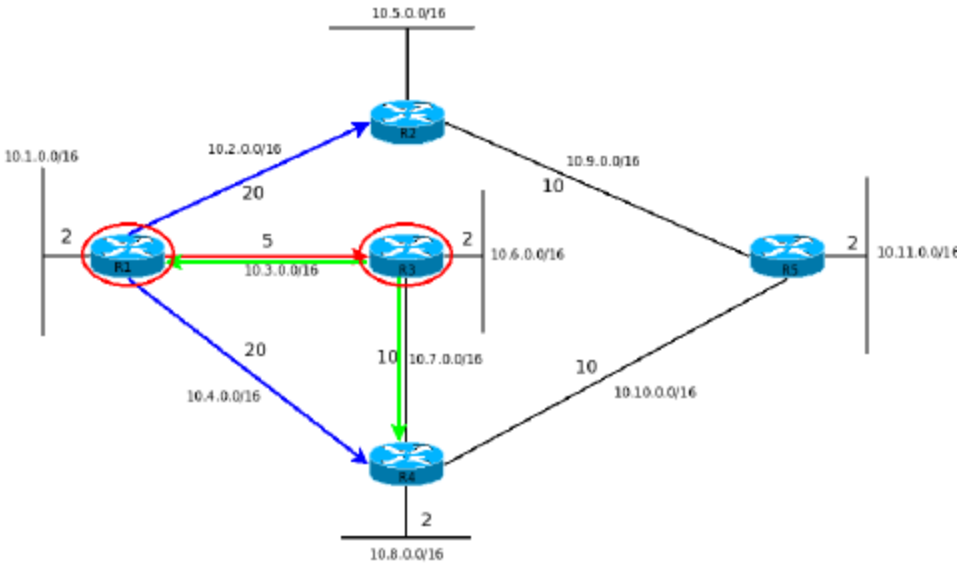
SPF стабло
R1

кандидати
R1->R2, 20
R1->R3, 5 (SPF)
R1->R4, 20

Суседи управо додатог чвора

R1, R3, susedi R3



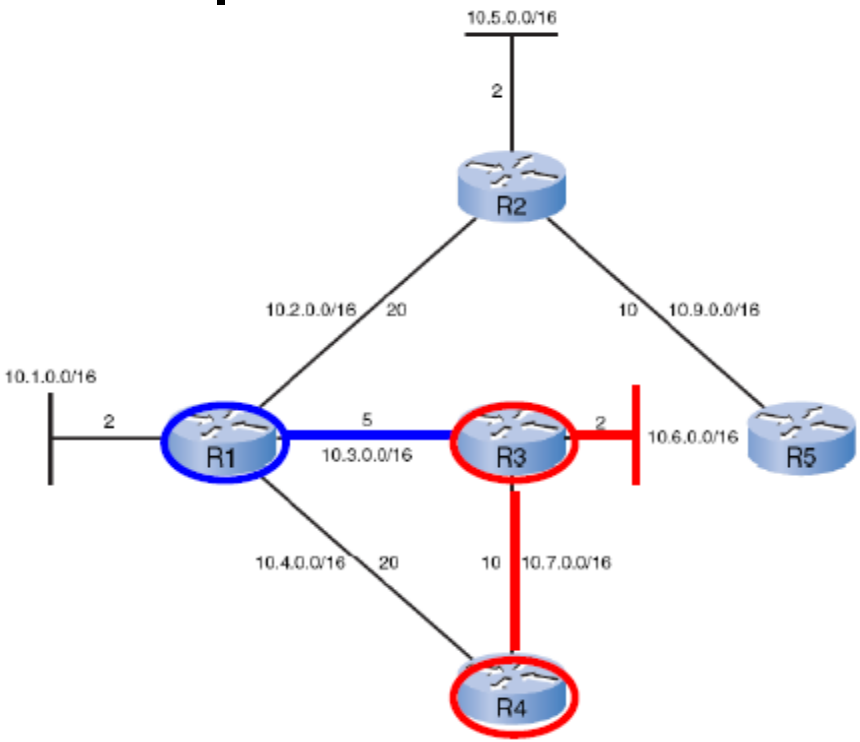


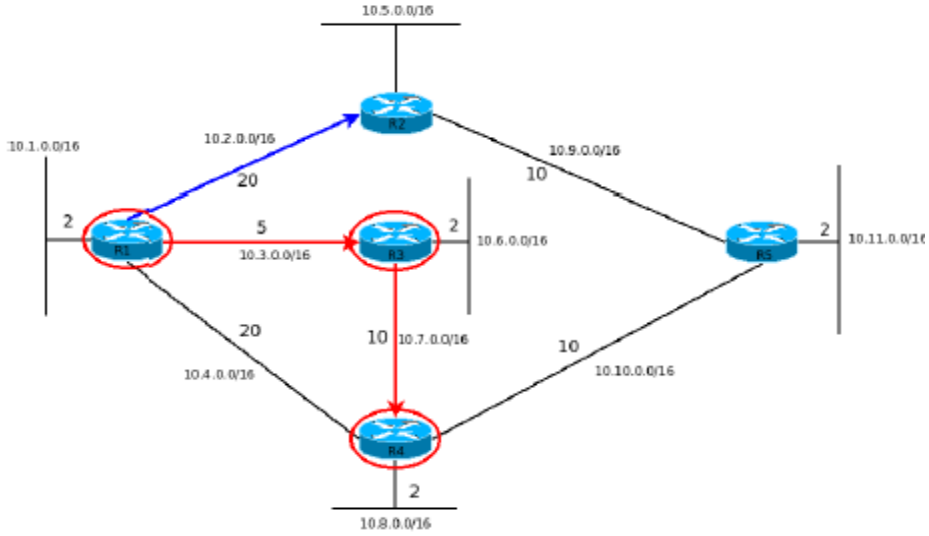
SPF стабло
R1, 0-> R3, 5

кандидати
R1->R2, 20
~~R1->R3, 5~~
R1->R4, 20

Суседи управо додатог чвора
R3->R1, 5 (не додајемо, чвор постоји)
R3->R4, 10 (додајемо, 10+ 5=15<20, уместо досадашњег кандидата за R4)

R1, R3, kandidati od R3



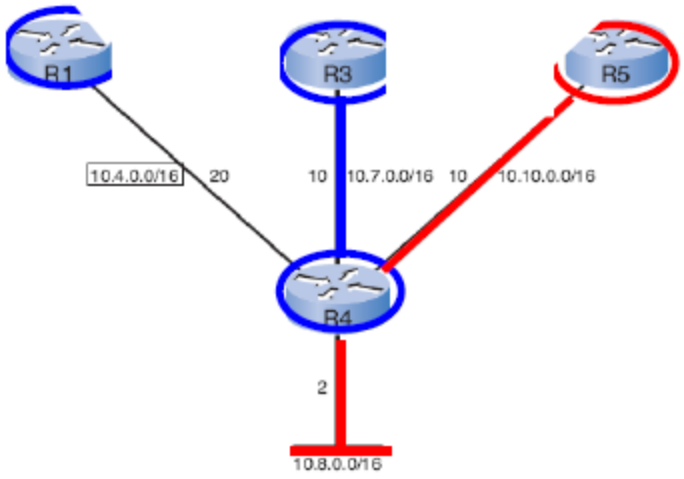


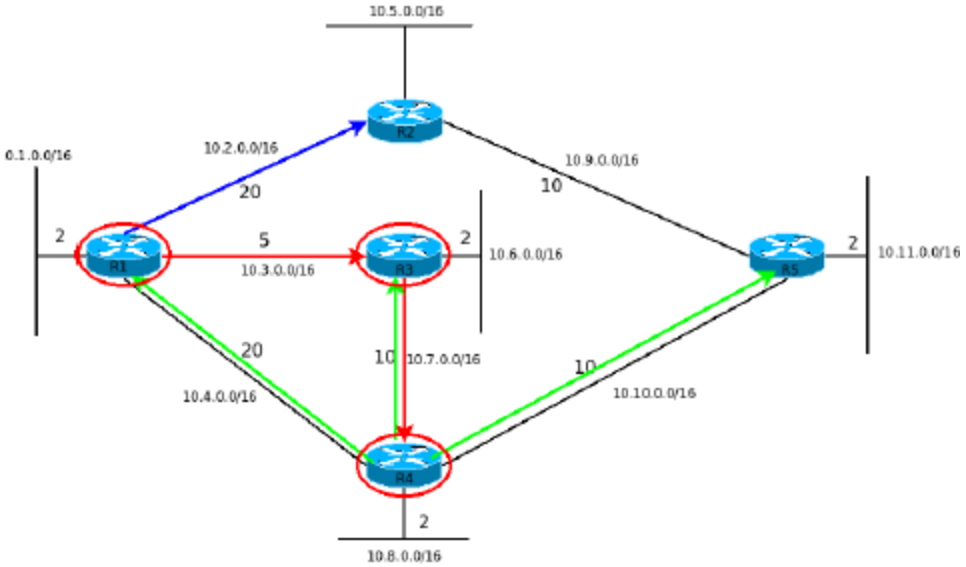
SPF стабло
R1->R3, 5

кандидати
R1->R2, 20
~~R1->R3, 5~~
~~R1->R4, 20~~
R3->R4, 15

Суседи управо додатог чвора

R1, R3, R4 susedi od R4



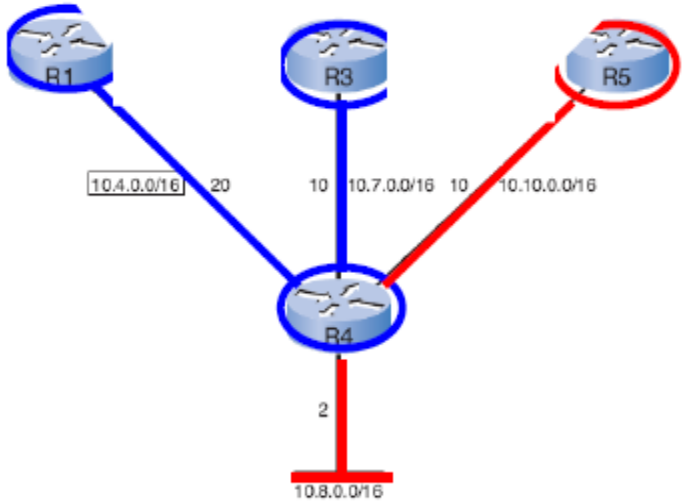


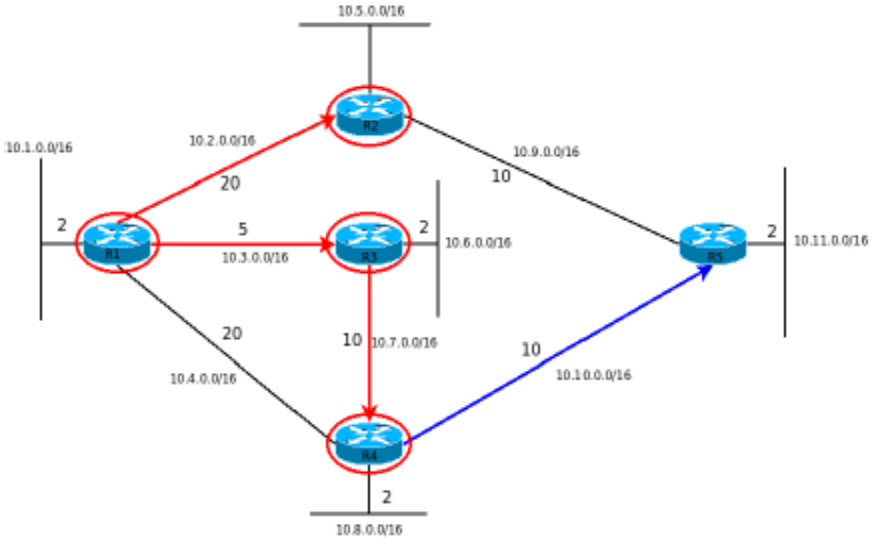
SPF стабло
R1-> R3, 5 -> R4, 15

R1->R2, 20
~~R1->R3, 5~~
~~R1->R4, 20~~
~~R3->R4, 15~~

Суседи управо додатог чвора
R4->R1, 20 (не додајемо, чвор постоји)
R4->R3, 10 (не додајемо, чвор постоји)
R4->R5, 10 (додајемо, +15)

R1, R3, R4 kandidati od R4



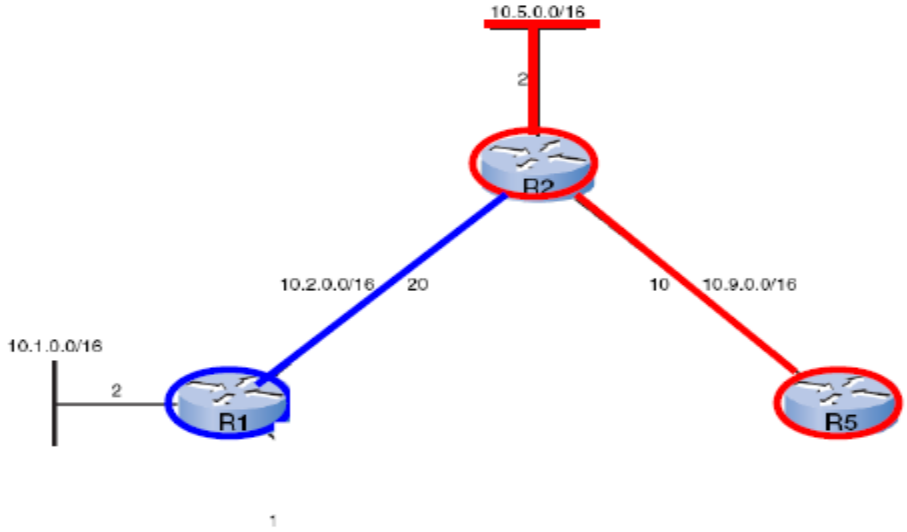


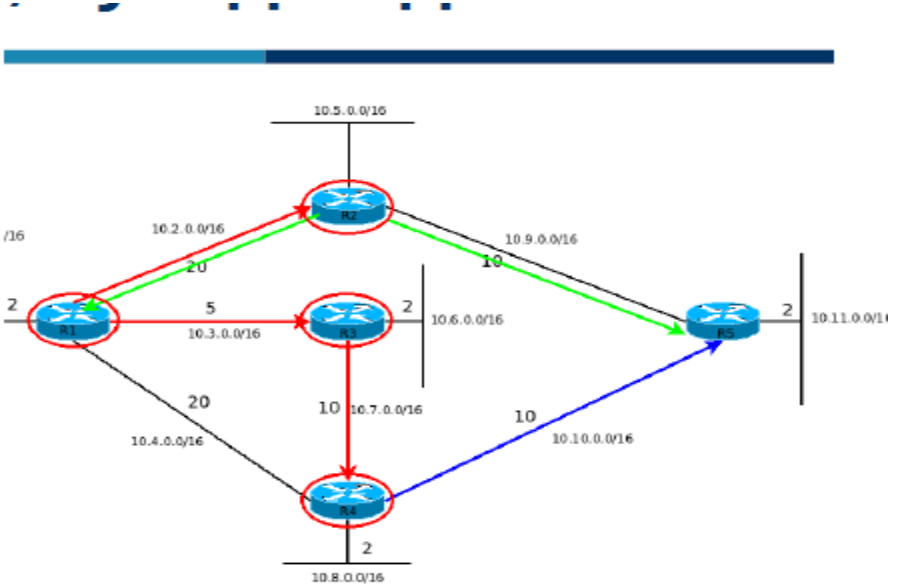
SPF стабло
R1-> R3, 5 -> R4, 15

кандидати
R1->R2, 20 (SPF)
~~**R1->R3, 5**~~
~~R1->R4, 20~~
~~**R3->R4, 15**~~
R4->R5, 25

Суседи управо додатог чвора

R1, R3, R4; R1, R2 susedi od R2



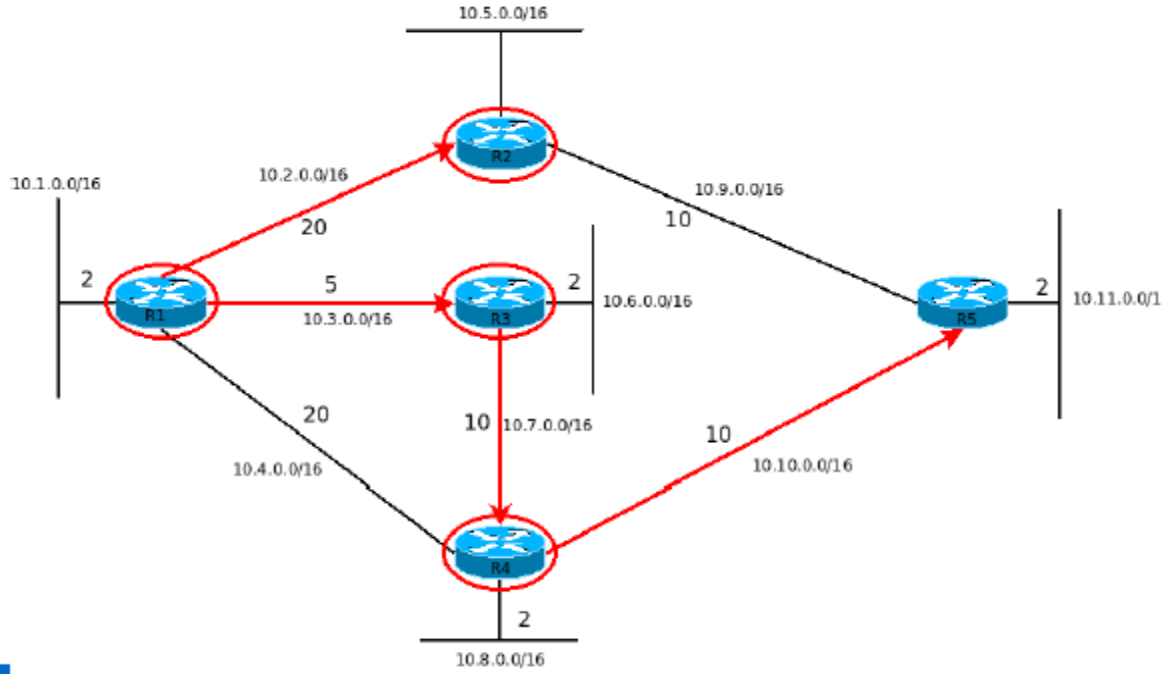


SPF стабло
R1-> R3, 5 -> R4, 15
R1-> R2, 20

кандидати
~~R1->R2, 20~~
~~R1->R3, 5~~
~~R1->R4, 20~~
~~R3->R4, 15~~
R4->R5, 25

Суседи управо додатог чвора
R2->R1, 20 (не додајемо, чвор постоји)
R2->R5, 10 (не додајемо: 10+20=30>25, јер постоји краћи пут до R5, постоји бољи кандидат)

R1, R3, R4; R1, R2 kandidati od R2

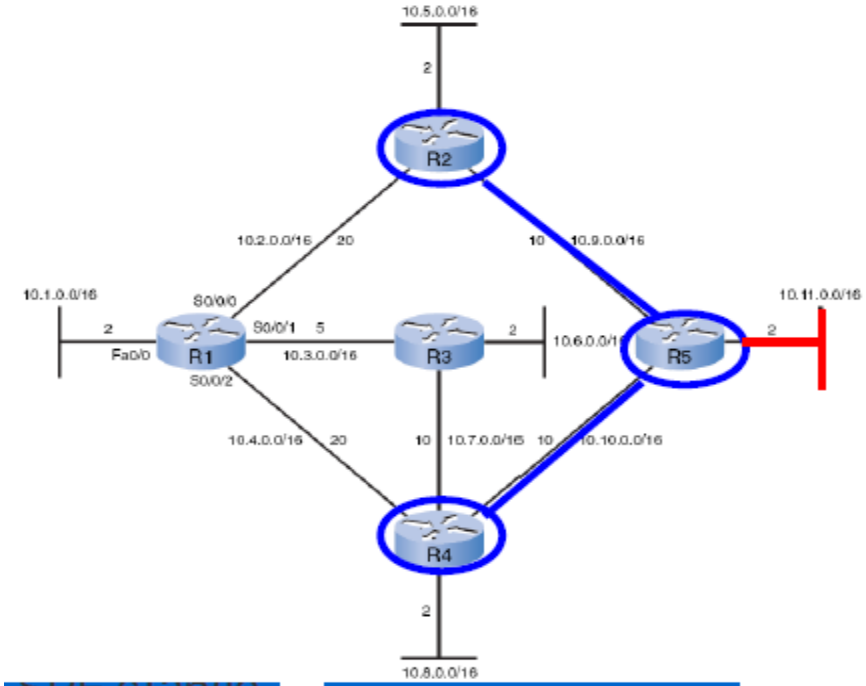


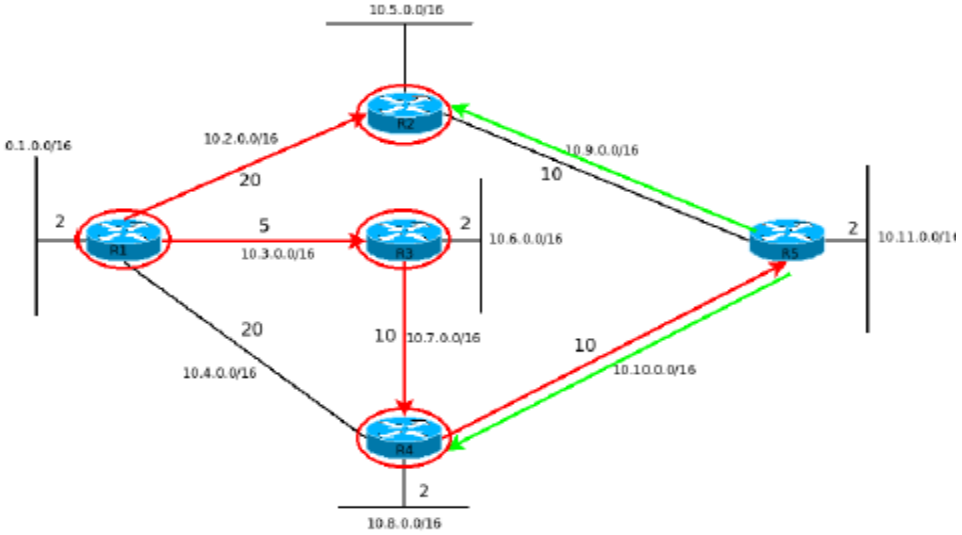
SPF стабло
R1-> R3, 5 -> R4, 15
R1-> R2, 20

кандидати
~~R1->R2, 20~~
~~R1->R3, 5~~
~~R1->R4, 20~~
~~R3->R4, 15~~
R4->R5, 25 (SPF)

Суседи управо додатог чвора

R1, R3, R4, R5; R1, R2 susedi od R5





SPF стабло
R1-> R3, 5 -> R4, 15 -> R5, 25
R1-> R2, 20

кандидати
~~R1->R2, 20~~
~~R1->R3, 5~~
~~R1->R4, 20~~
~~R3->R4, 15~~
~~R4->R5, 25 (SPF)~~

Суседи управо додатог чвора
R5->R2, 10 (не додајемо, чвор постоји)
R5->R4, 10 (не додајемо, чвор постоји)