

## Procedura za crtanje bond grafa

Da bi smo došli do bond graf (BG) modela na osnovu *idealizovanog fizičkog modela* (IFM) koristimo sistematizovanu proceduru koja se okvirno sastoji od:

- identifikacije domena i osnovnih BG elemenata,
- formiranje strukture veza (junction structure),
- postavljanje elemenata u tu strukturu,
- eventualnog pojednostavljenja grafa.

Ova procedura se razlikuje za mehanički domen u odnosu na ostale domene. Na ovu razliku se ukazuje u zagradama. Koraci 1, 2, 3 i 4 se odnose na identifikaciju domena, baznih elemenata i karakterističnih veličina.

1. Utvrditi koji fizički domeni postoje i koji se bazni BG elementi poput C, I, R, Se, Sf, TF i GY postoje (Svakom elementu pridružiti jedinstvenu oznaku - da bi se razlikovao u odnosu na ostale elemente.).
2. Odrediti sve karakteristične napore (brzine u mehaničkom domenu) i pridružiti im jedinstvene oznake.
3. Odrediti sve međusobne razlike napora (razlike brzina u mehanici) koje su potrebne da bi smo portove elemenata iz prvog koraka povezali na strukturu veza. Označiti ove razlike jeinstvenim oznakama, po mogućstvu da ukazuju na ovu razliku. (Npr. razlika između e1 i e2 može se označiti e12)
4. Usvojiti za svaki domen referentni napor (referentnu brzinu sa pozitivnim smerom za mehanički domen - samo u mehaničkom domenu referentna veličina ima smer).

Koraci od 5 i 6 se odnose na formiranje strukture veza (junction structure)

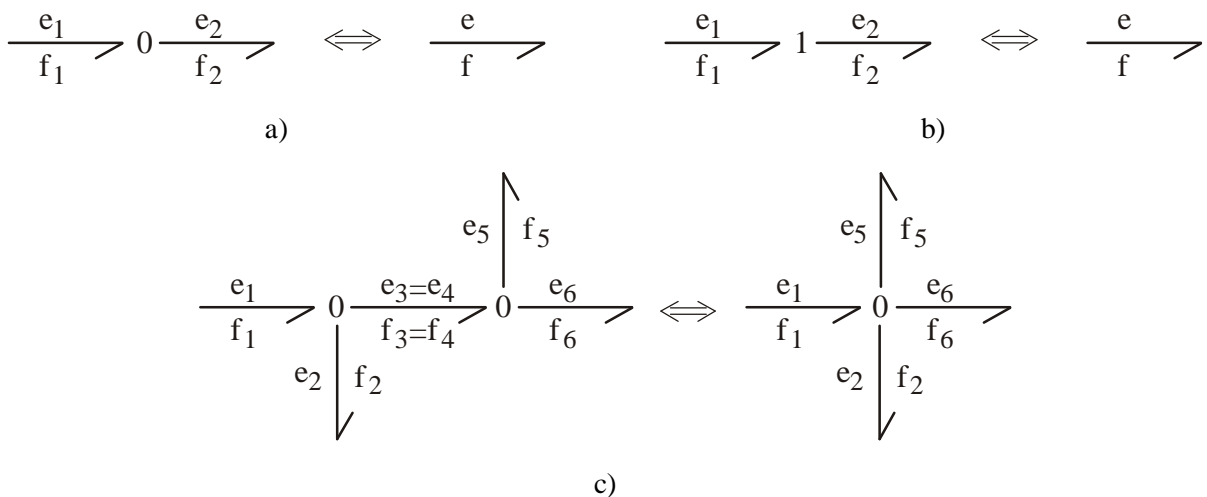
5. Prikazati ove napore (brzine u mehaničkom domenu), grafički pomoću 0-veza (u mehanici 1-veza). Zadržati, ako je moguće, isti raspored kao i kod IFM-a.
6. Prikazati razlike napora pomoću 1- veza (razlike brzina pomoću 0-veza u mehanici) prema slici:

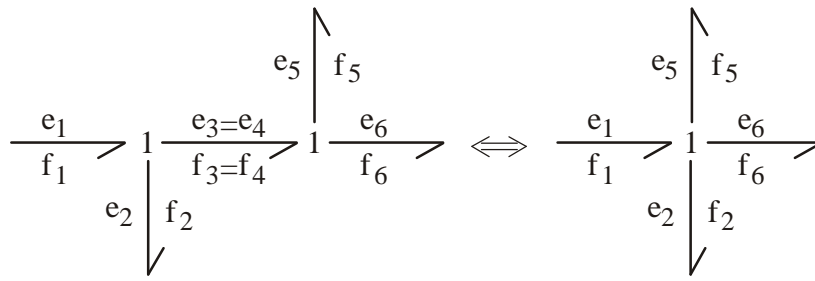


Slika 1: Grafički prikaz razlika veličina

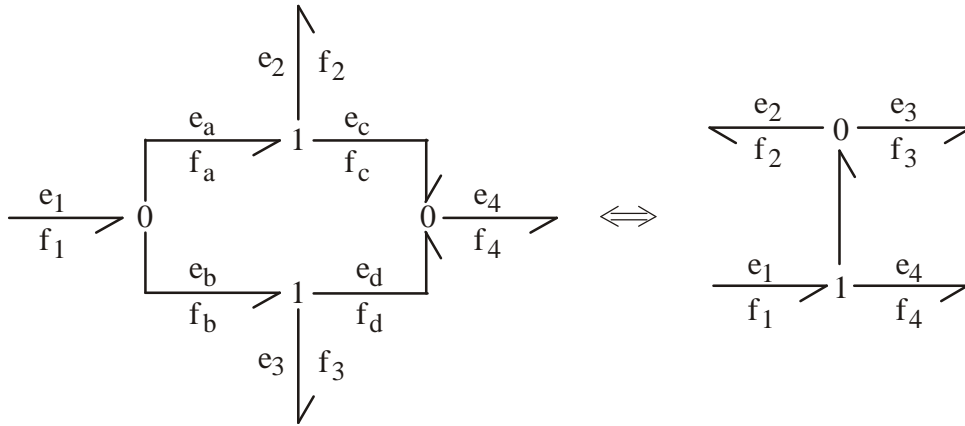
Struktura veza (skelet modela) sada je spremna da se na nju povežu elementi.

7. Povezati portove svih elemenata iz prvog koraka sa 0-vezama odgovarajućih napora ili razlika napora (u mehanici sa 1-vezama odgovarajućih brzina odnosno razlika brzina).
8. Uprostiti rezultujući graf prema sledećim pravilima (Slika 2)
  - a) iz modela ukloniti sve 0-veze koje odgovaraju referentnim naporima (sve 1-veze koje odgovaraju referentnim brzinama),
  - b) distributivni mehanizam (DM) između dva bonda se može izostaviti ako postoji samo jedan ulazni i samo jedan izlazni bond (Slika 2: a,b),
  - c) bond između dva ista DM se može izostaviti a DM se mogu spojiti u jedan (Slika 2: c,d),
  - d) dve iste razlike napora ili toka se mogu spojiti u jednu razliku.

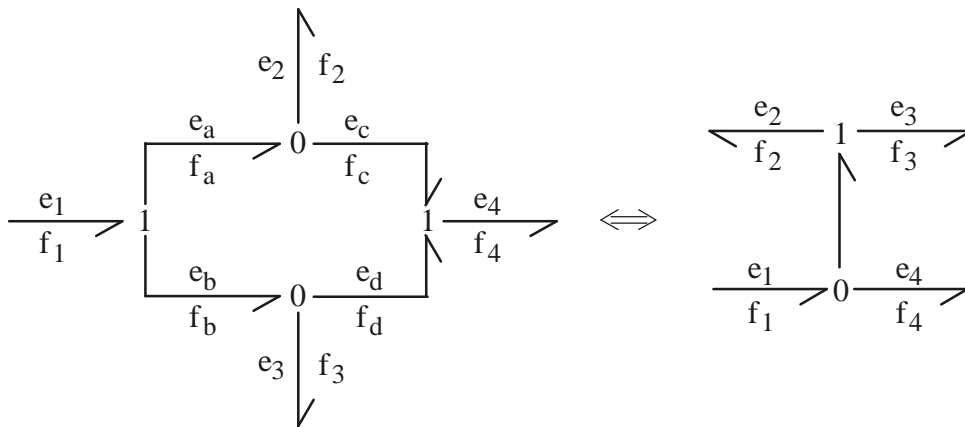




d)



e)

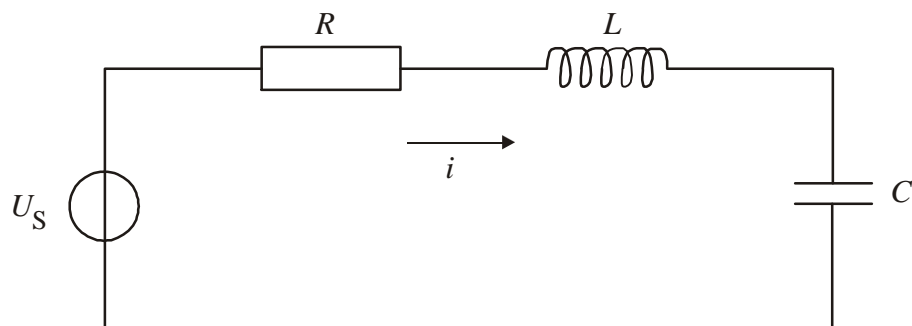


f)

Slika 2: Pravila za uprošćavanje strukture veza

## Ilustracija procedure crtanja bond grafa

Proceduru crtanja BG ilustrujemo na primeru električnog kola čiji je idealizovan fizički model prikazan na Slici 3.



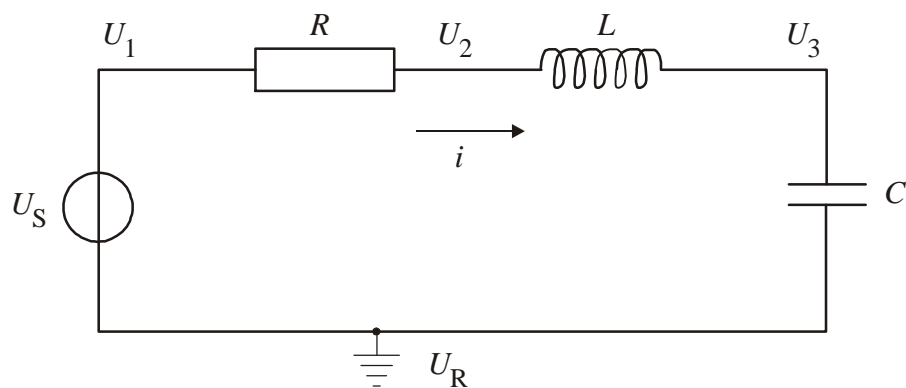
Slika 3: Idealizovani fizički model električnog kola

### Korak 1

Sistem pripada električnom domenu sa sledećim osnovnim elementima: naponski izvor ( $Se:U_S$ ), mehanizam gubitaka ( $R:R$ ), I-akumulator ( $I:L$ ), C-akumulator ( $C:C$ ). Naporu odgovara napon a toku struja.

### Korak 2

Karakteristični naponi (napori) su  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_R$  i prikazani na slici 4.



Slika 4: Idealizovani fizički model sa referentnim naponom

### Korak 3

Potrebni su nam sledeće razlike napona:

- na naponskom izvoru imamo porast napona:  $U_S = U_{IR} = U_1 - U_R$
- na otporniku imamo pad napona:  $U_{12} = U_1 - U_2$
- između krajeva kalema promena napona je:  $U_{23} = U_2 - U_3$

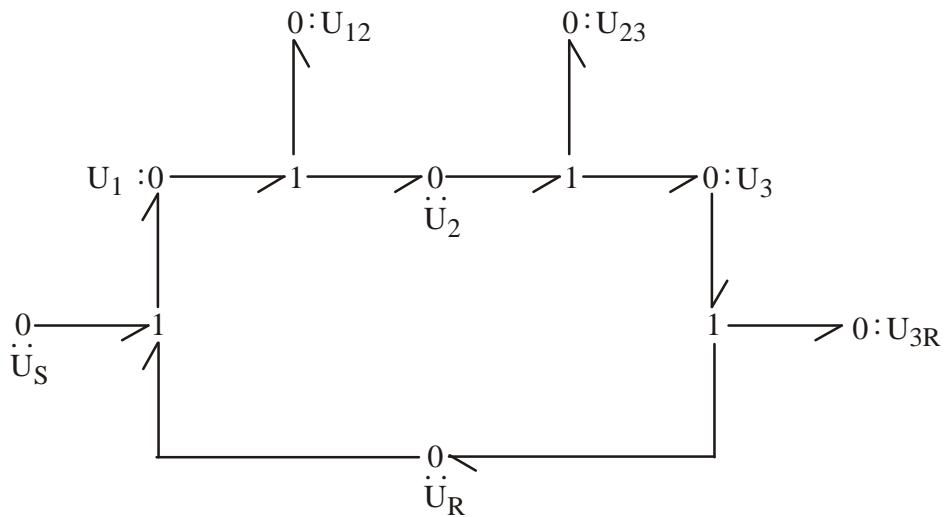
- između krajeva kondenzatora promena napona je:  $U_{3R} = U_3 - U_R$

Korak 4

Napon  $U_R$  usvajamo kao referentni napon.

Koraci 5 i 6

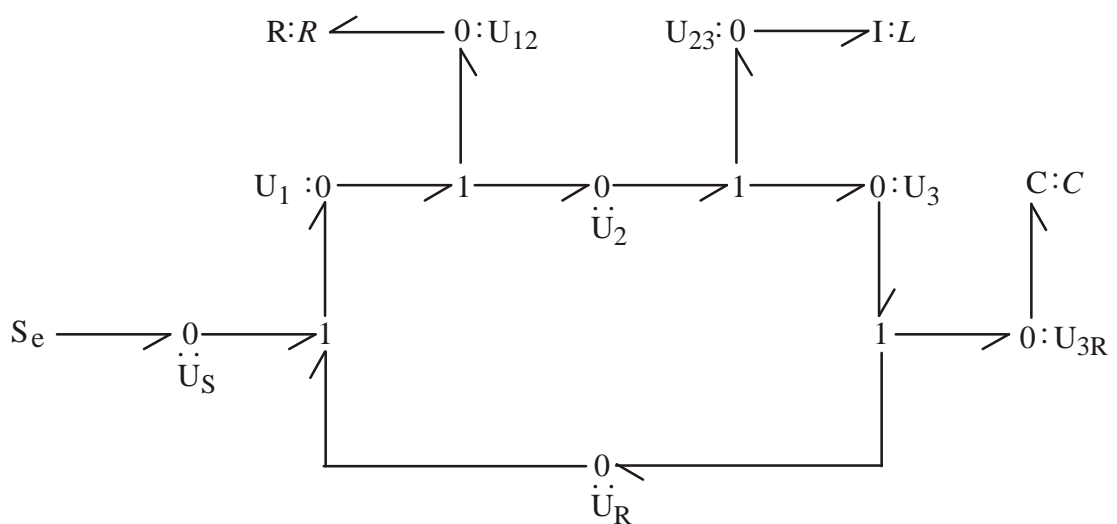
Grafički prikaz napona (korak 3) i promena napona (korak 4) dat je na slici 5.



Slika 5: Grafički prikaz karakterističnih napona IFM-a sa slike 4

Korak 7

Povezujemo portove svih elemenata iz prvog koraka sa 0-vezama odgovarajućih napona ili razlika napona (Slika 6).

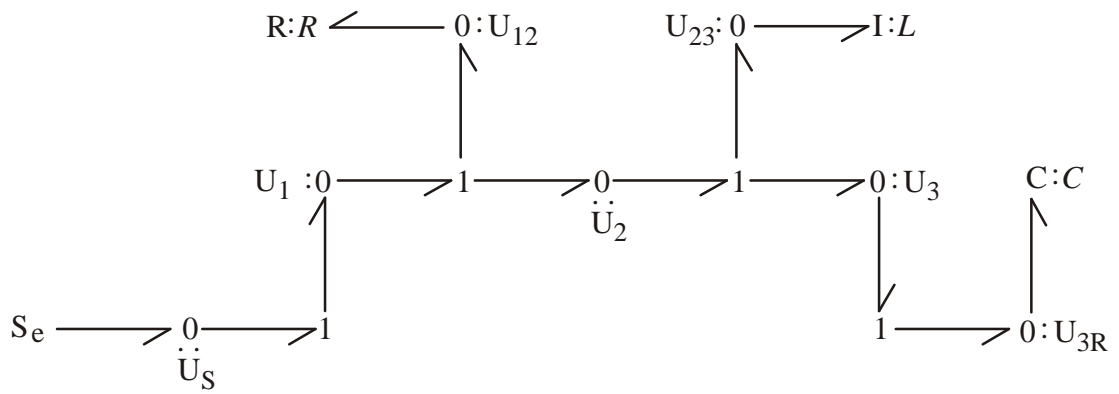


Slika 6: BG električnog kola

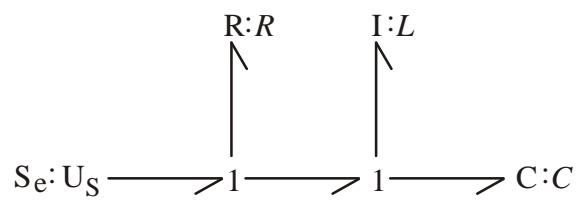
## Korak 8

### Uprošćavanje BG-a.

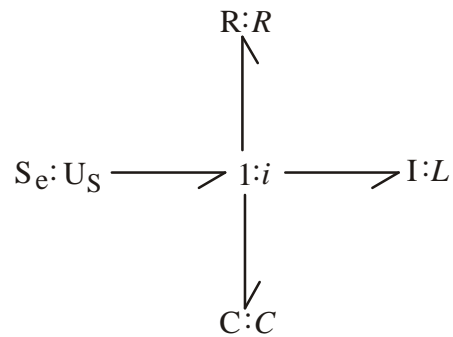
- iz modela uklanjamo 0-vezu koja odgovaraju referentnim naponu (Pravilo 8a - Slika 7a)
- uklanjamo 0 i 1 veze sa jednim ulaznim i jednim izlaznim bondom (Pravilo 8b - Slika 7b)
- uklanjamo bond između dve iste 1-veze (Pravilo 8c - Slika 7c)



a)



b)



c)

Slika 7: Uprošćavanje BG-a

## Kauzalna analiza

Kauzalna analiza je određivanje smjera signala koji pripadaju bondovima. Energetska veza (bond) se sada posmatra kao dvosmerni tok signala. Rezultat je kauzalni BG koji se može posmatrati kao kompaktna blok dijagram. Kauzalna analiza je u principu kompletno pokrivena sa softverskim alatima, pa u praksi ne postoji potreba da se ona ručno određuje. Međutim, kauzalna analiza nam pored jednačina daje i bolji uvid u korektnost i kompetentnost modela pa se zato ovde obradjuje.

Zavisno od vrste i jednačina elementa, portovi elementa mogu uvesti ograničenja za povezane bondove. Postoje četiri ograničenja koja ćemo pogledati pre sistematske procedure za kauzalnu analizu BG.

### *Kauzalna ograničenja*

#### *Fiksna kauzalnost*

Ova kauzalnost se javlja kod elemenata koji imaju tačno određenu kauzalnost. Drugim rečima, tačno određena veličina može biti ulazna (odnosno izlazna). Takav slučaj se javlja kod izvora: Izvor  $S_e$  po definiciji, uvek ima napor kao izlaznu veličinu-kauzalna crtica je na drugom kraju bonda. Ova kauzalnost se zove *e-kauzalnost*. Jasno je  $S_f$  ima *f-kauzalnost*.

Drugi slučaj kada se javlja fiksna kauzalnost je kod nelinearnih elemenata, gde jednačine za dati port ne mogu biti invertovane (npr. deljenje sa nulom). Ovo je moguće kod R, GZ, TF, C i I elemenata.

To znači da postoje dva razloga za uvođenje fiksne kauzalnosti:

- ne postoji relacija (sprega) između energetskih veličina nekog porta,
- jednačine nisu inverzne (ne može se odrediti izlazna veličina za dopuštene promene ulazne - čisto matematički razlog).

#### *Ograničena kauzalnost (Constrained causality)*

Kod elemenata TF, GY, 0 i 1 veze (imaju više od jednog porta), postoji relacija između kauzalnosti portova koji pripadaju tom elementu. Ove relacije su kauzalna ograničenja, pošto kauzalnost određenog porta povlači kauzalnost drugih portova. Kod TF elementa ako jedan port ima *e-kauzalnost* onda drugi mora da ima *f-kauzalnost*. Kod GY oba porta imaju istu kauzalnost (bilo *e* bilo *f*). Kod 0 veze, gde su svi napori međusobno jednaki, tačno jedan port određuje napor. To znači da kod 0-veze postoji tačno jedna kauzalna crta na njenoj strani. Kauzalnost 1-veze je dualna forma kauzalnosti 0-veze. Svi tokovi su jednaki tako da samo jedan bond određuje tok što znači da samo jedan bond ima kauzalnu crtu na drugoj strani.

### *Prioritetna kauzalnost (Preferred causality)*

Kod akumulatora kauzalnost određuje da li se primenjuje integraljenje ili diferenciranje po vremenu. Integraljenje ima prednost u odnosu na diferenciranje. Kod integralne forme mora se postaviti početni uslov. Sem toga, integraljenje u odnosu na vreme se može fizički realizovati. Numeričko diferenciranje se ne može fizički realizovati pošto je potrebna vrednost o veličini u nekom budućem trenutku. Drugi problem sa diferenciranjem se javlja kada na ulazu imamo odskočnu funkciju: izlaz tada teži beskonačnosti. Zato se integralna kauzalnost posmatra kao prioritetna kauzalnost. Zato effort-out kauzalnost kod C elementa i flow-out kauzalnost kod I elementa imaju prednost.

### *Primer*

Kada se napon  $u$  na kondenzatoru diktira spolja, struja  $i$  je rezultat konstitutivne relacije kondenzatora:

$$i = C \frac{du}{dt}$$

Tada se javlja diferenciranje. Problem se javlja kada se napon skokovito promeni na drugu vrednost jer će struja imati beskonačnu vrednost. Ovaj problem ne postoji kada se struja diktira spolja. Tada se koristi integral:

$$u = u_0 + \int idt$$

Kod effort-out kauzalnosti se javlja veličina stanja sa početnim uslovom  $u_0$

### *Proizvoljna kauzalnost*

Proizvoljna kauzalnost se koristi kada ne postoje kauzalna ograničenja. Kod linearnog R elementa potpuno je svejedno koja od energetski veličina porta će biti ulazna/izlazna. Diktiranjem struje (tok) daje:

$$u = iR$$

A isto tako je moguće nezavisno menjati napon (napor):

$$i = \frac{u}{R}$$

### *Rezime:*

Elementi  $S_e$  i  $S_f$  imaju fiksnu kauzalnost, C i I imaju prioritetnu kauzalnost, TF, GY 0 i 1 imaju ograničenu kauzalnost, a R ima proizvoljnu kauzalnost. Kada jednačine nisu invertibilne mora se koristiti fiksna kauzalnost.



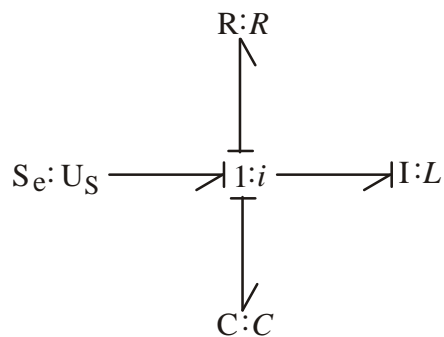
### *Procedura kauzalne analize*

Procedura dodeljivanja kauzalnosti na BG počinje od elemenata koji imaju najjače kauzalno ograničenje, od fiksne kauzalnosti. Ako na jednom mestu dodelimo kauzalnost, onda se ta kauzalnost preko bondova (tj. veza) prenosi na preostali deo grafa u obliku kauzalnih ograničenja. Ovo prenošenje kauzalnost se naziva kauzalno širenje (causality propagation).

Koraci u određivanju kauzalnosti su sledeći:

- 1a) Početi sa dodelom kauzalnosti elementima sa fiksnom kauzalnošću, tj. izvorima. Za svaki izvor, na osnovu kauzalnih ograničenja, proširiti efekat ove dodele na preostali deo grafa.
- 1b) Portovima sa fiksnom kauzalnošću usled neinvertibilnih konstitutivnih relacija dodeliti kauzalnost. Proširiti efekat ove dodele na preostali deo grafa.
- 2) Preostalim portovima sa prioritetskom kauzalnošću dodeliti kauzalnost. Proširiti efekat ove dodele na preostali deo grafa.
- 3) Portovima sa proizvoljnom kauzalnošću, kojima još nije dodeljena kauzalnost, dodeliti kauzalnost. Proširiti efekat ove dodele na preostali deo grafa.

BG električnog kola sa slike 7c nakon dodele kauzalnosti izgleda kao na slici 8.



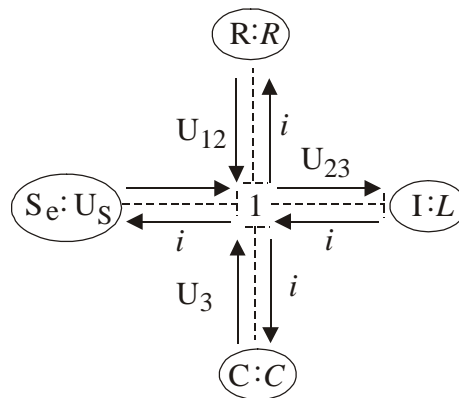
Slika 8: *Kauzalni BG električnog kola*

## Transformisanje BG u blok dijagram

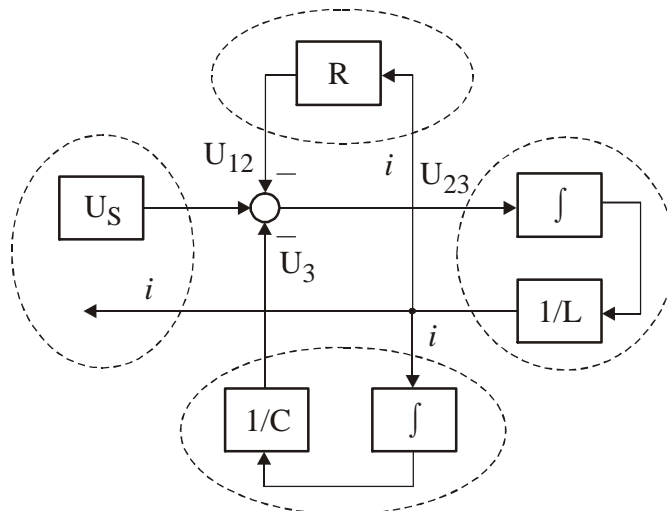
Transformacija BG-a u blok dijagram (BD) sastoji se od tri koraka:

1. Predstaviti bondove pomoću bilateralnih tokova signala (po dva signala suprotnih smerova).  
Kauzalna crtica pokazuje smer naporne veličine.
2. Zameniti sve BG elemente odgovarajućim blok dijagramima. Znak na sabiraču kod svakog mehanizma za distribuciju odrediti prema smeru polustrelice na bondu.
3. Nacrtati BD u standardnoj formi: integratore u direktnoj grani (slevo na desno) a ostale operatore ili u direktnoj ili povratnoj grani. Uvesti moguća uprošćenja.

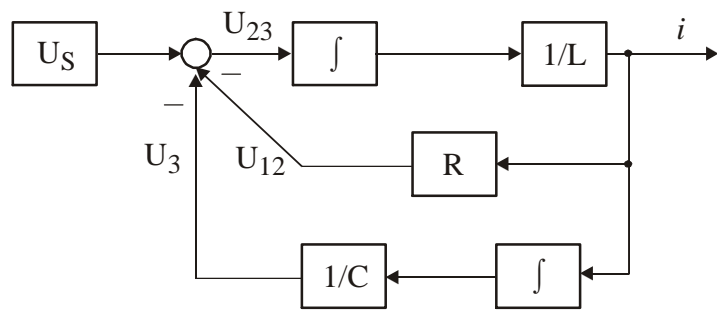
Ovu transformaciju ilustrujemo na primeru kauzalnog BG-a sa slike 9.



a)



b)



c)

Slika 9: Transformacija BG-a u BD