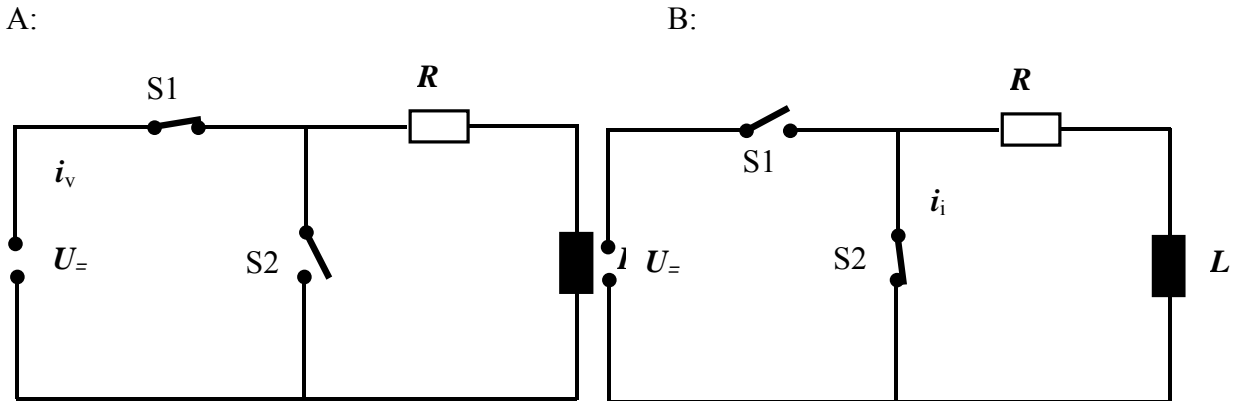


2.6 Principi pulznega upravljanja ES (PUES) priključenih na enosmerno mrežo

Bistvo PUES je v tem, da neprestano vklopljamo / izklopljamo neki element v tokokrogu mrežamotor in s tem spreminjamo določeni parameter stroja, ki je bistven za spreminjanje vrtiljajev motorja. S spremembo takta napajanja (frekvence ali relativne vklopne dobe) tako dosežemo enostavno spreminjanje vrtiljajev motorja.

2.6.1 Pulzno upravljanje pasivnega tokokroga



Slika 1: vklop in izklop pasivnega tokokroga z enakima časovnima konstantama.

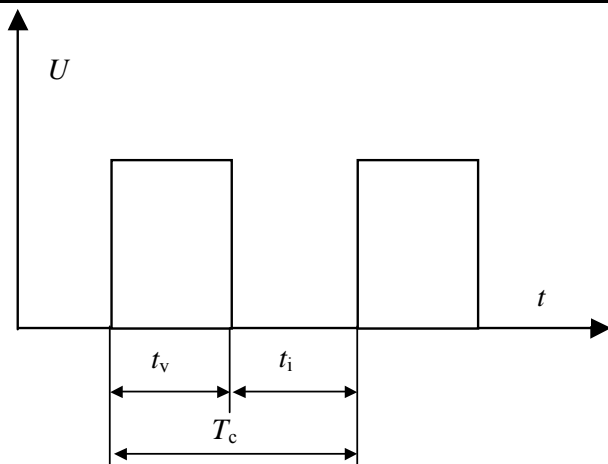
Stanje A oz. B zapišemo z enačbama (1) in (2)

$u = i \cdot R + L \frac{di}{dt} \quad (1)$	$0 = i \cdot R + L \frac{di}{dt} \quad (2)$
---	---

Zaradi enostavnosti vzamimo, da sta vklopna in izklopna časovna konstanta enaki.

$$T_v = T_i = \frac{L}{R} \quad (3)$$

frekvenca napajalne napetosti	relativna vklopna doba	relativna izklopna doba
$f = \frac{1}{T_c}$	$\varepsilon = \frac{t_v}{T_c}$	$(1 - \varepsilon) = \frac{t_i}{T_c}$

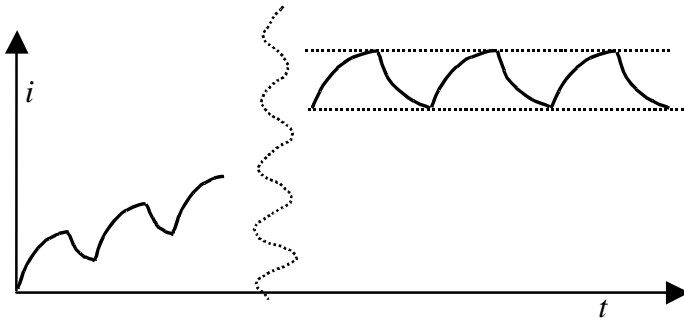


Slika 2: časovni potek napetosti pri vklopu/izklopu stikal

t_i, t_v, T_c čas izklopa, čas vklopa, celotni čas

Če periodično vklopljamo oz. izklopljamo stikali S1 in S2 v pasivnem tokokrogu prihaja do spreminjanja toka, slika 3, ki najprej narašča, nato pa pada, kar opisujeta rešitvi enačb (1) in (2), enačbi (4) in (5).

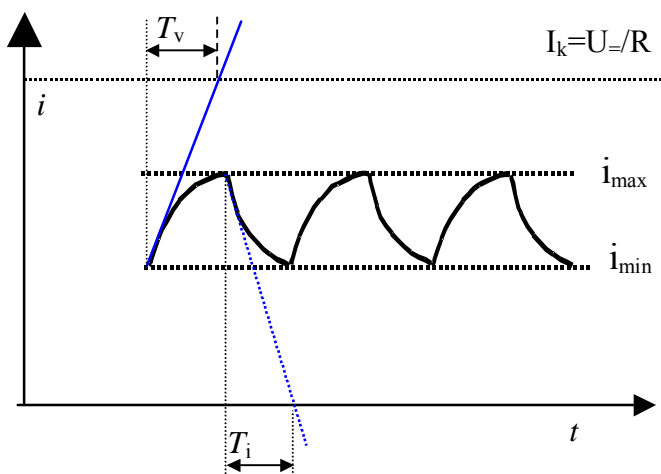
$i = i_{zv} + (I_k - i_{zv}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (4)$	$i = i_{zi} e^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$
I_k tok kratkega stika pasivnega tokokroga	



Slika 3: časovni potek toka pri vklopu/izklopu stikal

Po določenem času bo nastopilo kvazistacionarno stanje slika 4, ko se bo tok spreminjal med **maksimalno in minimalno** vrednostjo. Časovni potek toka enačbi (6) in (7), lahko izračunamo s pomočjo (4) in (5), ko postavimo začetni vrednosti toka pri vklopu oz. izklopu ($i_{zv} \Rightarrow i_{min}$, $i_{zi} \Rightarrow i_{max}$)

$i = i_{min} + (I_k - i_{min}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = I_k - (I_k - i_{min}) e^{-\frac{t}{T}} \quad (6)$	$i = i_{max} e^{-\frac{t}{T}} \quad (7)$
--	--



Slika 4: časovni potek toka pri vklopu/izklopu stikal v kvazistacionarnem stanju ($T_v = T_i$)

Maksimalno in minimalno vrednost toka (8) in (9) dobimo, ko postavimo v (6) in (7) za čas vrednosti t_v in t_i .

$t = t_v = \varepsilon T_c : \Rightarrow$	$t = t_i = (1 - \varepsilon) T_c : \Rightarrow$
$\Rightarrow i_{max} = I_k - (I_k - i_{min}) e^{-\frac{\varepsilon T_c}{T}}$ (8)	$\Rightarrow i_{min} = i_{max} e^{-\frac{(1-\varepsilon)T_c}{T}}$ (9)

Srednjo vrednost toka v kvazistacionarnem stanju lahko izračunamo s pomočjo (6) in (7), po enačbi (10).

$$I_s = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} i(t) dt = \frac{1}{T_c} \left\{ \int_0^{\varepsilon T_c} \left[I_k - (I_k - i_{min}) e^{-\frac{t}{T}} \right] dt + \int_0^{(1-\varepsilon)T_c} i_{max} e^{-\frac{t}{T}} dt \right\} \quad (10)$$

Ob upoštevanju (8) in (9) dobimo srednjo vrednost toka podano v zelo enostavni obliki (11). **I_s je sorazmeren toku kratkega stika in relativni vklopni dobi.**

$$I_s = \varepsilon I_k \quad (11)$$

Če izrazimo tok kratkega stika v (11), dobimo podobni izraz za napetost (12).

$$I_s = \varepsilon I_k = \varepsilon \frac{U}{R} \Rightarrow \langle U' = R I_s \rangle \Rightarrow U' = \varepsilon U \quad (12)$$

Lahko rečemo, da se pri pulznem napajanju pasivni tokokrog obnaša, kot da ga napajamo z zmanjšano napetostjo U' . Nihanje toka bo tem manjše, čim manjši je T_c napram T .

Pri dovolj visoki frekvenci napajanja, **ki je predpogoj za uspešno pulzno upravljanje**, lahko eksponentialno krivuljo v času t_v in t_i lineariziramo (13). Tako lahko zapišemo enačbi (8) in (9) v obliki (14), (15).

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (13)$$

$i_{max} = i_{min} + \frac{I_k - i_{min}}{T} \varepsilon T_c$ (14)	$i_{min} = i_{max} \left(1 - \frac{1 - \varepsilon T_c}{T} \right)$ (15)
--	---

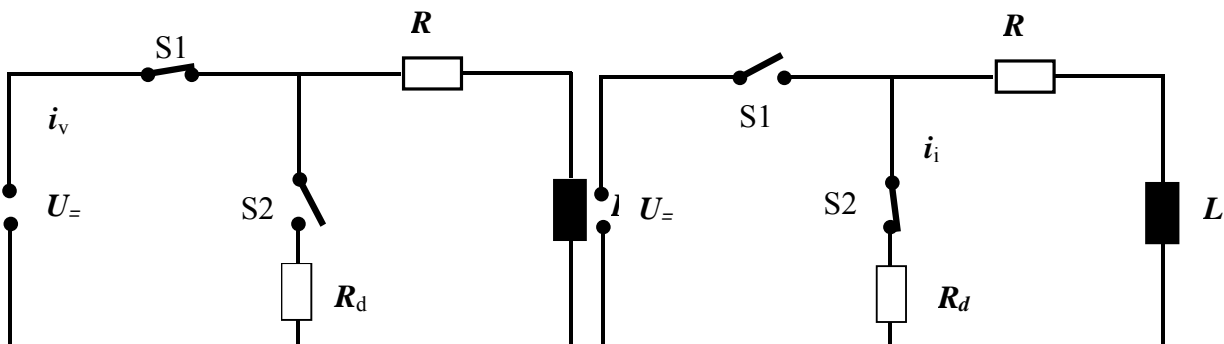
Če izračunamo maksimalno in minimalno ter srednjo vrednost toka dobimo naslednje enačbe (16), (17) in (18).

$$i_{max} = \frac{I_k}{\frac{1}{\varepsilon} - \frac{T_c}{T}(1-\varepsilon)} \quad (16) \qquad i_{min} = \frac{I_k \left[1 - \frac{T_c}{T}(1-\varepsilon) \right]}{\frac{1}{\varepsilon} - \frac{T_c}{T}(1-\varepsilon)} \quad (17)$$

$$I_s = \frac{i_{max} + i_{min}}{2} = \frac{I_k \left[2 - \frac{T_c}{T}(1-\varepsilon) \right]}{2 \left[\frac{1}{\varepsilon} - \frac{T_c}{T}(1-\varepsilon) \right]} \quad [T \gg T_c] \Rightarrow I_s = \varepsilon I_k \quad (18)$$

Poglejmo kaj se spremeni, če sta časovni konstanti (T_v, T_i) pri vklopu oz. izklopu različni, slika 5.

$$T_v = \frac{L}{R}, T_i = \frac{L}{R + R_d} \quad (19)$$



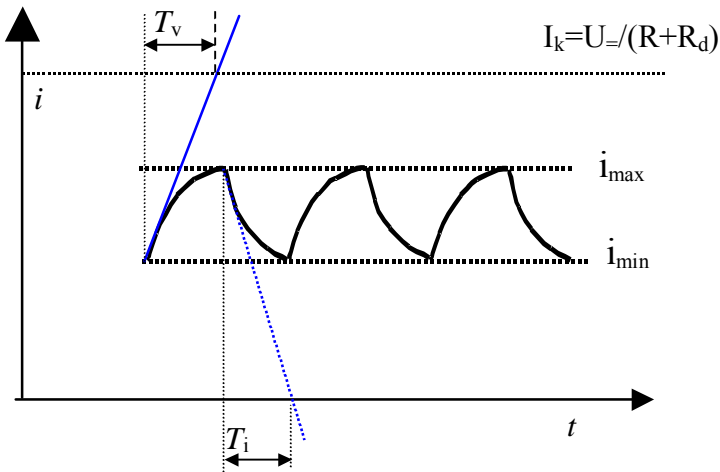
Slika 5: vklop in izklop pasivnega tokokroga z različnima časovnima konstantama.

Glede na prejšnje izvajanje je potrebno v ustreznih enačbah edino upoštevati

- ♦ pri vklopu ($T \Rightarrow T_v$)
- ♦ pri izklopu ($T \Rightarrow T_i$, $R \Rightarrow R + R_d$)

Nato je izpeljava časovnega poteka toka identična. Maksimalna in minimalna vrednost toka je sedaj

$t = t_v = \varepsilon T_c : \Rightarrow$	$t = t_i = (1-\varepsilon) T_c : \Rightarrow$
$\Rightarrow i_{max} = I_k - (I_k - i_{min}) e^{-\frac{\varepsilon T_c}{T_v}} \quad (20)$	$\Rightarrow i_{min} = i_{max} e^{-\frac{(1-\varepsilon) T_c}{T_i}} \quad (21)$



Slika 6: časovni potek toka pri vklopu/izklopu stikal v kvazistacionarnem stanju ($T_v \neq T_i$)

Ob upoštevanju linearizacije eksponentialne krivulje, lahko zapišemo za maksimalno in minimalno vrednost toka naslednje enačbe

$$i_{max} = i_{min} + \frac{I_k - i_{min}}{T_v} \varepsilon T_c \quad (22) \quad i_{min} = i_{max} \left(1 - \frac{1 - \varepsilon T_c}{T_i} \right) \quad (23)$$

$$i_{max} = \frac{I_k}{1 + \frac{T_v}{T_i} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \frac{T_c}{T_i} (1 - \varepsilon)} \quad (24) \quad i_{min} = \frac{I_k \left[1 - \frac{T_c}{T_i} (1 - \varepsilon) \right]}{1 + \frac{T_v}{T_i} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \frac{T_c}{T_i} (1 - \varepsilon)} \quad (25)$$

$$I_s = \frac{i_{max} + i_{min}}{2} = \frac{I_k}{2} \cdot \frac{2 - \frac{T_c}{T_i} (1 - \varepsilon)}{1 + \frac{T_v}{T_i} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} - \frac{T_c}{T_i} (1 - \varepsilon)} \quad (26)$$

Ker je $T_i \gg T_c$, lahko v zgornji enačbi zanemarimo ustrezna člena, tako da dobimo za srednjo vrednost toka naslednji izraz

$$I_s = I_k \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \frac{T_v}{T_i} (1 - \varepsilon)} = \varepsilon' I_k \quad ; \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \frac{T_v}{T_i} (1 - \varepsilon)} \quad (27)$$

ε' ekvivalentna relativna vklopna doba.

Ker je v praksi običajno poznano ε' , kot faktor pri katerem dosežemo potrebni tok I_s oz. napetost U' , dejansko relativno vklopno dobo izračunamo z naslednjim izrazom.

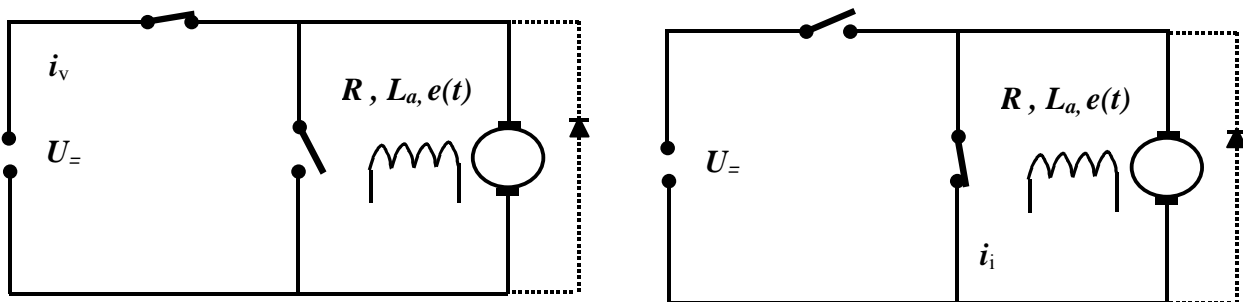
$$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon' + \frac{T_v}{T_i} (1 - \varepsilon')} \quad (28)$$

Podobni izraz kot prej dobimo tudi za napetost. Tokokrog se tudi sedaj obnaša, kot da je priključen na konstantno napetostjo U' .

$$U' = \varepsilon' U \quad (29)$$

2.6.2 Pulzno upravljanje enosmernega stroja

Seveda prikazanih rešitev ne moremo direktno prenesti na aktivni tokokrog, ki ga predstavlja električni stroj, vendar podobni zaključki veljajo tudi sedaj. Na sliki 7 sta prikazani dve stanji pri pulznem upravljanju ES.



Slika 7: enosmerni motor s tujim vzbujanjem

Za obe stanji lahko zapišemo naslednji enačbi:

$$u = i(t) \cdot R_a + L_a \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (30)$$

$$0 = i(t) \cdot R_a + L_a \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (31)$$

Zaradi kompleksnosti pri obravnavi realnega stroja, bomo vpeljali določene poenostavitve (**linearni model**) in obravnavali samo primer, ko je $T_m \gg T_e$, kar odgovarja dovolj velikemu vztrajnostnemu momentu motorja in delovnega mehanizma. V tem primeru se mehanski prehodni pojav odvija bistveno počasneje kot električni, kar pomeni, da lahko v kvazistacionarnem stanju upoštevamo v enačbah konstantne vrtljaje oz. konstantno inducirano napetost.

$$\begin{aligned} R_a, L_a &= \text{konst.} \\ T_m &\gg T_e \\ e(t) &\Rightarrow E = \text{konst.} \end{aligned}$$

Tako dobita prejšnji enačbi podobno obliko, kot enačbi pri pasivnem tokokrogu.

$$u - E = i \cdot R_a + L_a \frac{di}{dt} \quad (32)$$

$$-E = i R_a + L_a \frac{di}{dt} \quad (33)$$

Zaradi tega je tudi rešitev zelo podobna.

$$i = i_{zv} + \left(\frac{U - E}{R_a} - i_{zv} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (34)$$

$$i = i_{zi} e^{-\frac{t}{T}} - \frac{E}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (35)$$

Ko je doseženo kvazistacionarno stanje tok niha med maksimalno in minimalno vrednostjo (36), (37), ki jo lahko izračunamo, ko postavimo $t = t_v$ in $t = t_i$ z enačbama (38) in (39).

$$i = \frac{U - E}{R_a} - \left(\frac{U - E}{R_a} - i_{min} \right) e^{-\frac{t}{T}} \quad (36)$$

$$i = -\frac{E}{R_a} + \left(\frac{E}{R_a} + i_{max} \right) e^{-\frac{t}{T}} \quad (37)$$

$$i_{max} = \frac{U - E}{R_a} - \left(\frac{U - E}{R_a} - i_{min} \right) e^{-\frac{\varepsilon T_c}{T}} \quad (38)$$

$$i_{min} = -\frac{E}{R_a} + \left(\frac{E}{R_a} + i_{max} \right) e^{-\frac{(1-\varepsilon)T_c}{T}} \quad (39)$$

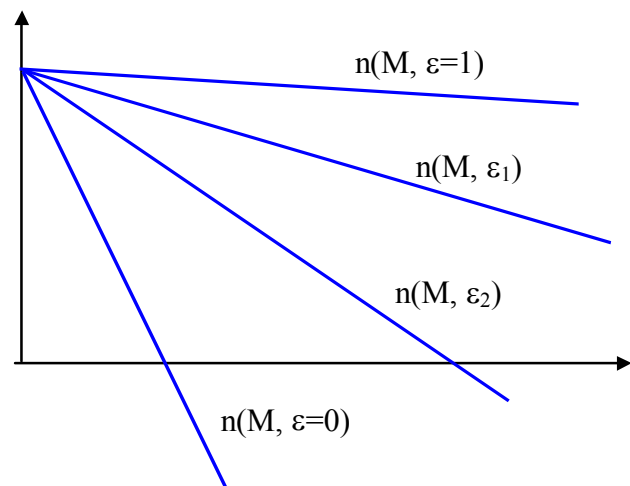
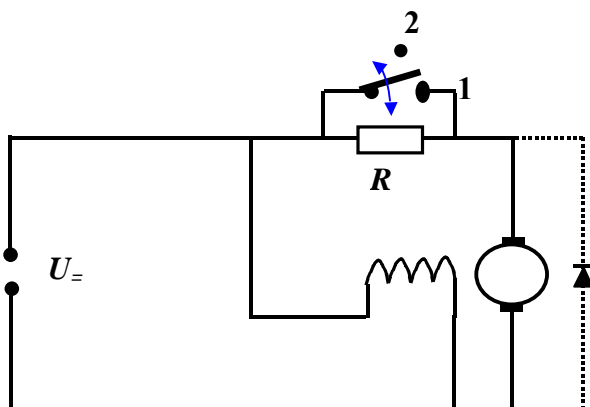
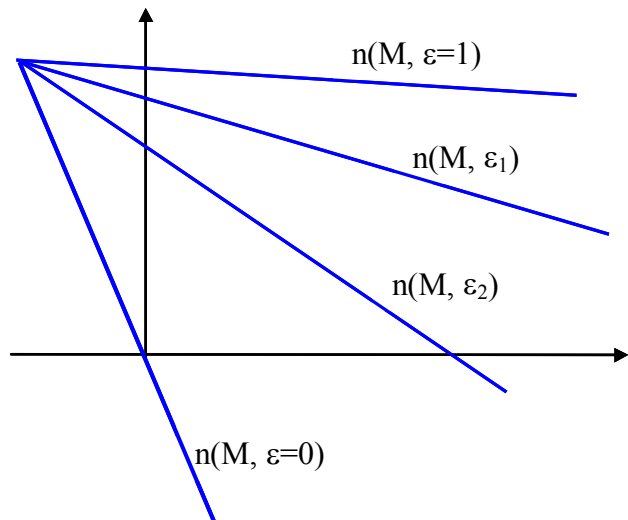
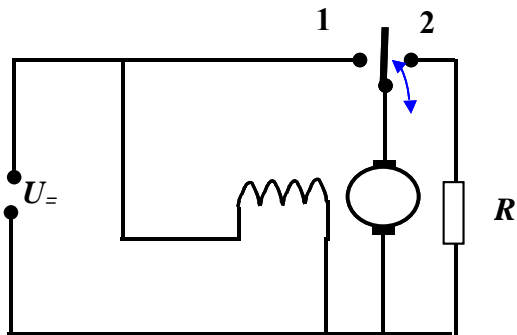
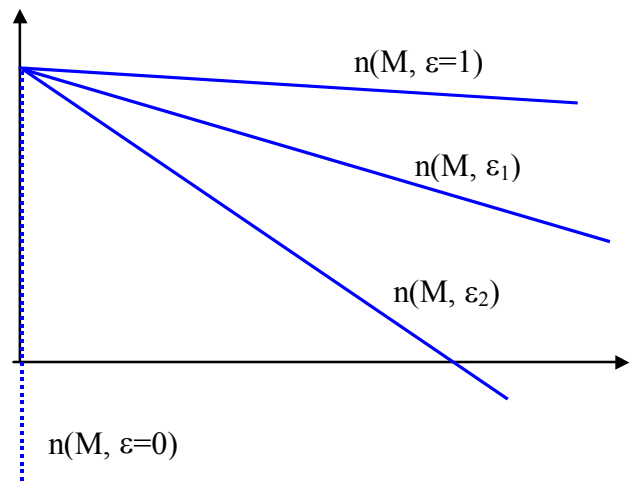
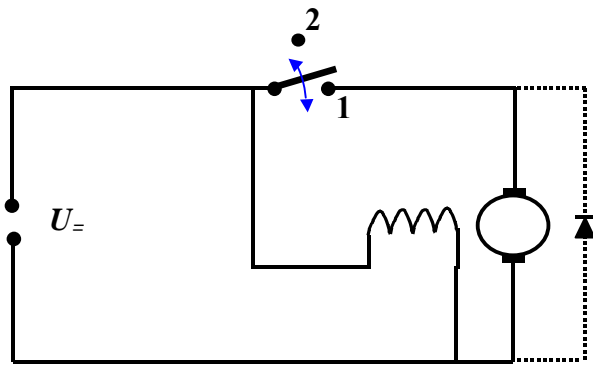
Srednjo vrednost toka pri pulznem napajanju izračunamo enako kot prej.

$$I_s = \frac{1}{T_c} \left[\int_0^{\varepsilon T_c} (36) dt + \int_0^{(1-\varepsilon)T_c} (37) dt \right]$$

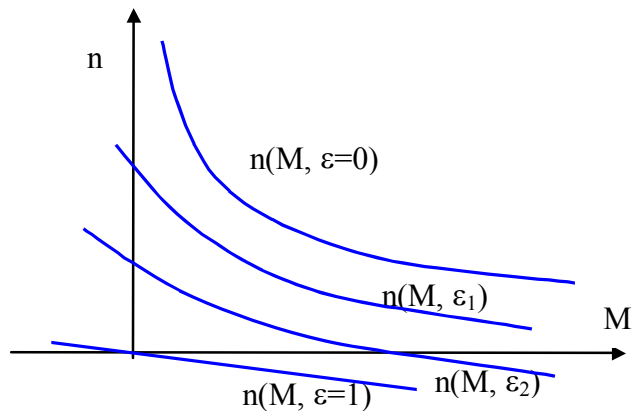
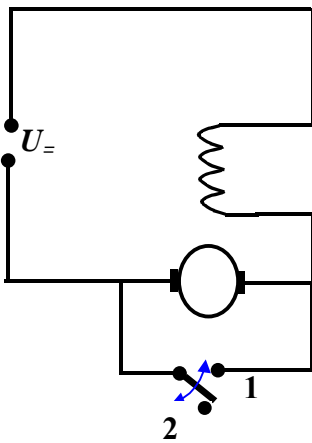
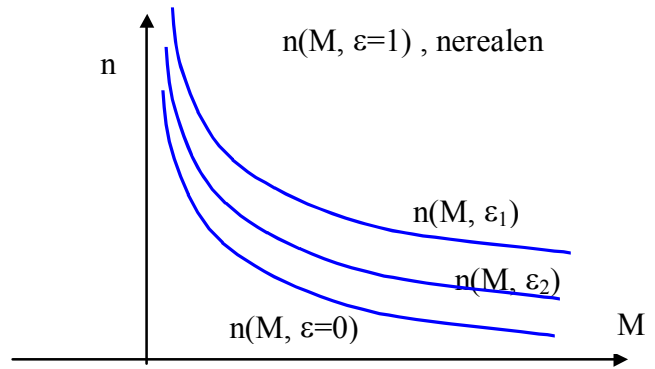
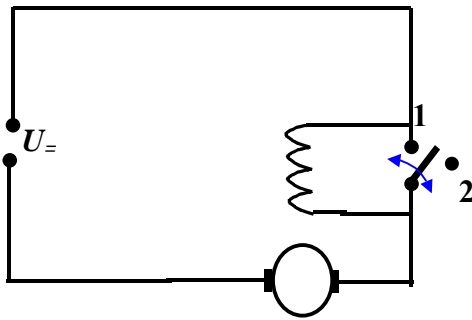
$$I_s = \frac{U}{R_a} \varepsilon - \frac{E}{R_a} = \frac{U' - E}{R_a} \quad , \quad U' = \varepsilon U \quad (41)$$

Veličine	Kontinuirano napajanje		Pulzno napajanje	Karakteristike
Napajalna napetost	U	\Rightarrow	$U_{sr} = \varepsilon U$	$n_{sr} = \frac{\varepsilon U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_{asr} R}{k_e^* \phi_g} = \frac{\varepsilon U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M_{sr}$
Inducirana napetost	E		E_{sr}	
Rotorski tok	I_a		I_{asr}	
Vrtljaji	n		n_{sr}	$M_{sr} = k_m \phi_g I_{sr}$
Vrtilni moment	M		M_{sr}	

Primeri pulznega upravljanja EM s kvazistatičnimi karakteristikami $n(M)$



$\epsilon=1$..ko je stikalo trajno v poziciji 1. $\epsilon=0$..ko je stikalo trajno v poziciji 2.



$\epsilon=1$..ko je stikalo trajno v poziciji 1. $\epsilon=0$..ko je stikalo trajno v poziciji 2.

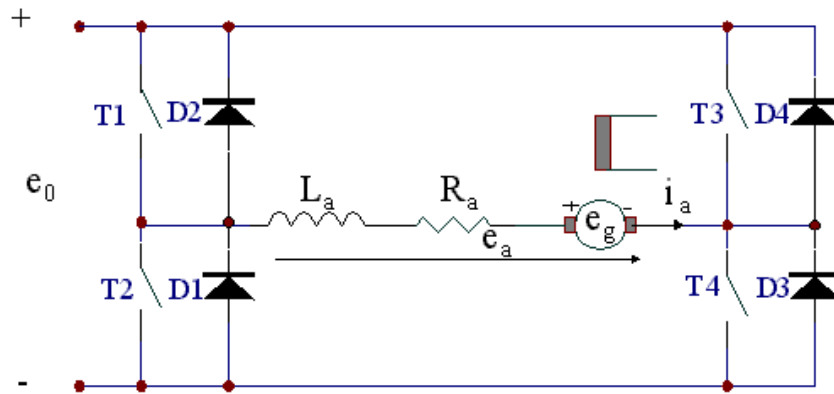
DC / DC PRETVORNIKI ZA NAPAJANJE EM

Type	Chopper configuration	$V_a - I_a$ characteristics	Function
First quadrant (step down) choppers			$V_a = V_0$ for S_1 on $V_a = 0$ for S_1 off and D_1 on
Second quadrant, regeneration (step - up) chopper			$V_a = 0$ for S_2 on $V_a = V_0$ for S_2 off and D_2 on
Two quadrant chopper			$e_a = V_0$ for S_1 or D_2 on $e_a = -V_0$ for S_2 or D_1 on $i_a > 0$ for S_1 or D_1 on $i_a < 0$ for S_2 or D_2 on
Two quadrant chopper			$V_a = +V_0$ for S_1 & S_2 on $V_a = -V_0$ for S_1 & S_2 off and D_1 & D_2 on
Four quadrant chopper			S_4 on & S_3 off S_1 & S_2 operated $V_a > 0$ i_a - reversible S_2 on & S_1 off S_3 & S_4 operated $V_a < 0$ i_a - reversible

Ion Boldea, S.A.Nasar: ELECTRIC DRIVES

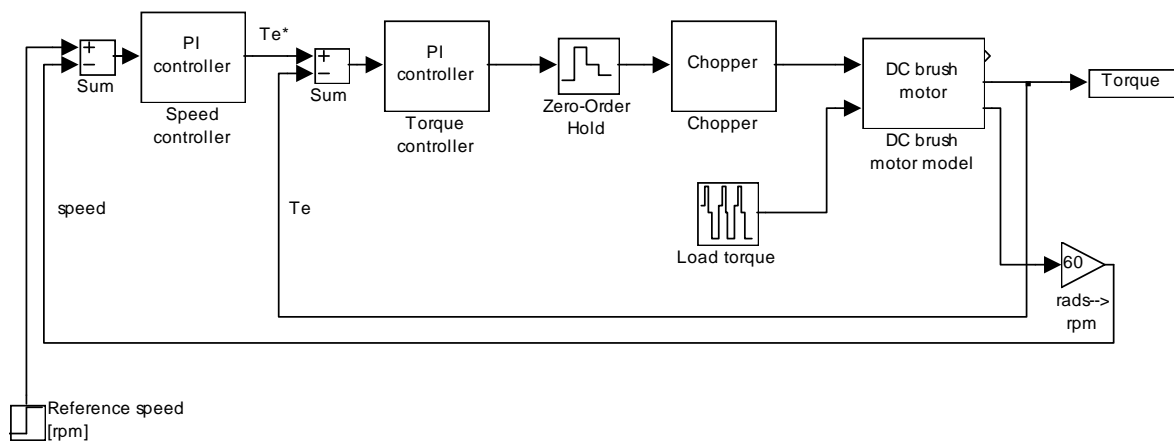
Simulacija delovanja reguliranega enosmernega motorja s Chopper napajalnikom

Prikazani so rezultati simulacije enosmernega motorja s štirikvadrantnim "Chopperjem". Na sliki 1 je prikazan osnovni krog štirikvadrantnega Chopperja.



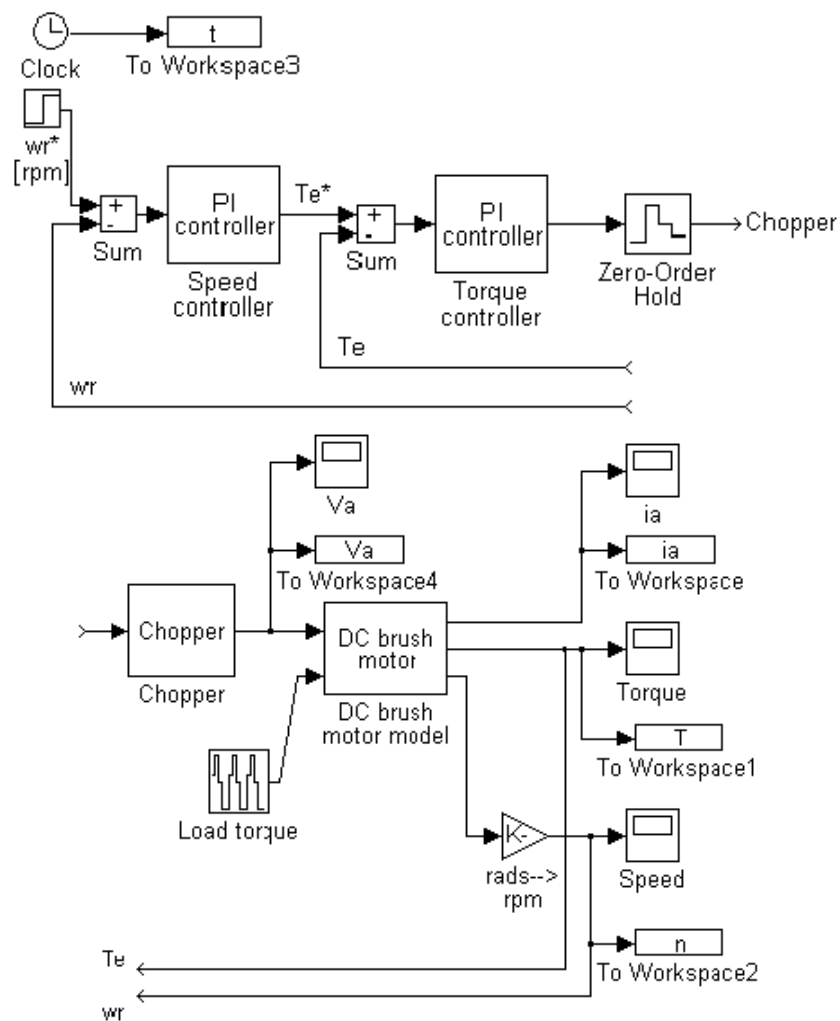
Slika 1 - Osnovni krog štirikvadrantnega Chopperja.

Pregleden model motorja je podan v obliki blok diagrama in prikazan na sliki 2.



Slika 2 - Blok diagram enosmernega motorja s Chopperjem (pregleden model)

Celoten model motorja je podan v obliki blok diagrama in prikazan na sliki 3.

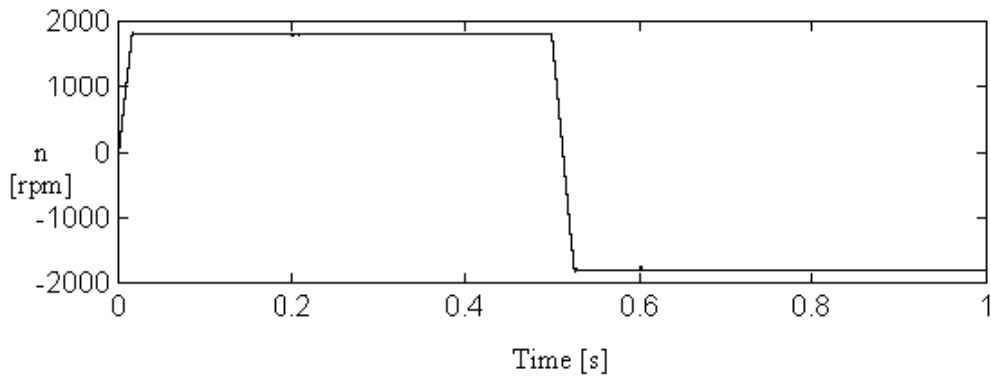


Slika 3 - Blok diagram enosmernega motorja s Chopperjem

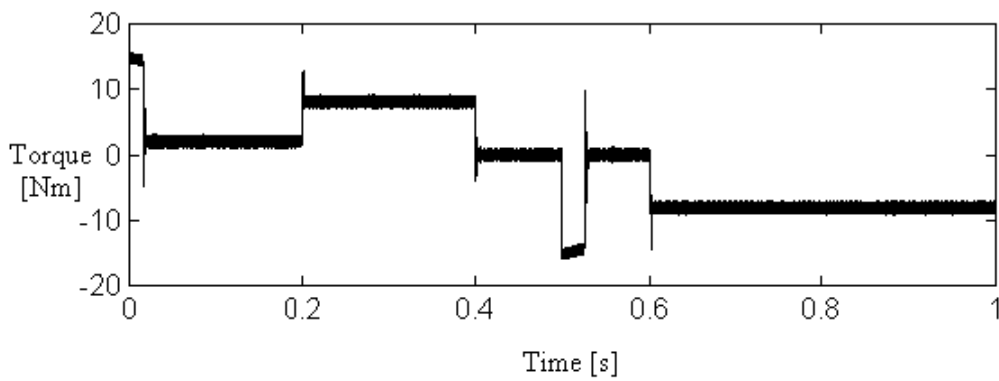
Primer prikazuje zagon, spremembo momenta po času 0.2 s in reverziranje brez obremenitve po času 0.5 s in ponovno spremembo momenta po času 0.6 s. Integracijski korak je 10 μ s in frekvenca Chopperja je 20 kHz.

Parametri uporabljenega motorja so naslednji: $U = 120$ V, $I_n = 20$ A, $n_n = 3000$ min⁻¹, $R_a = 0.5$ Ω , $L_a = 0.0025$ H, $J = 0.001$ kgm², $c_e = 2.2$ Vs.

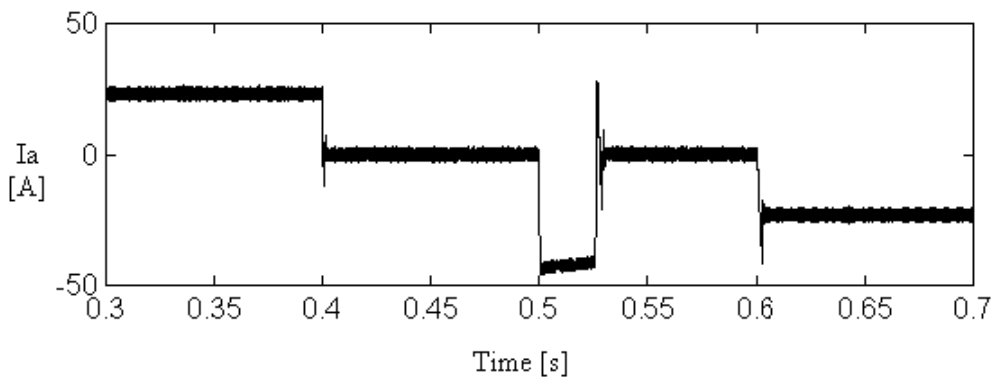
Slika 3 prikazuje spreminjanje hitrosti motorja, slika 4 moment motorja, slika 5 potek toka in slika 6 potek napetosti.



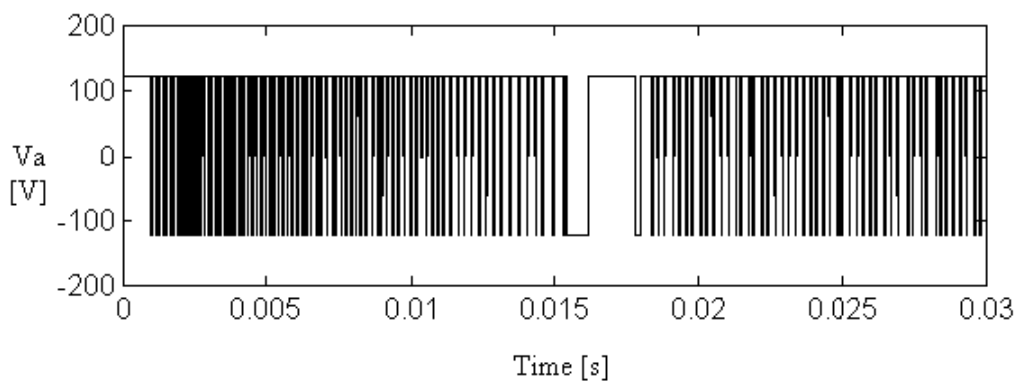
Slika 3 - spreminjanje hitrosti motorja



Slika 4 - potek momenta na gredi motorja



Slika 5 - tok



Slika 6 - napetost na sponkah motorja