

Ranko Čelustka, Blaško Vladimir
SOUR Rade Končar, OOUR Elektrotehnički institut,
Baštijanova b.b., Zagreb

TRANZISTORSKI ČETVOROKVADRANTNI ČOPER ZA
UPRAVLJANJE BRZINOM VOZILA SA SERIJSKIM
ISTOSMJERNIM MOTOROM

A FOUR-QUADRANT TRANSISTOR CHOPPER FOR
SPEED CONTROL OF VEHICLE WITH DC SERIES
MOTOR

SAŽETAK - U članku je provedena analiza motorskog rada, reverziranja i kočenja elektromotornog pogona s istosmjernim serijskim motorom i tranzistorskim čoperom. Detaljnije je opisano rekuperativno kočenje serijskog istosmjernog motora. Dani su eksperimentalni rezultati dobiveni na laboratorijskom modelu. Opisani čoper namijenjen je za upravljanje brzinom vozila s autonomnim izvorom električne energije.

ABSTRACT - This paper presents analysis of motor and braking operation of electric drive with DC series motor and transistor chopper. Regenerative braking operation is given in more detail. Experimental results obtained on laboratory model are presented. Described chopper is used for speed control of vehicles with an autonomus power supply.

1. UVOD

Elektromotorni pogon vozila za unutrašnji transport sastoji se od istosmjernog serijskog motora, akumulatorske baterije i uređaja za regulaciju brzine. Starija rješenja takvih uređaja baziraju se na:

- promjeni otpora u armaturnom krugu
- promjeni napona na motoru prespajanjem pojedinih sekcija baterije
- promjeni uzbude (sistemi sa forsiranom uzbudom)
- kombinaciji navedenih rješenja.

Takva rješenja relativno su jednostavna i jeftina, ali imaju i nekih nedostataka kao što su:

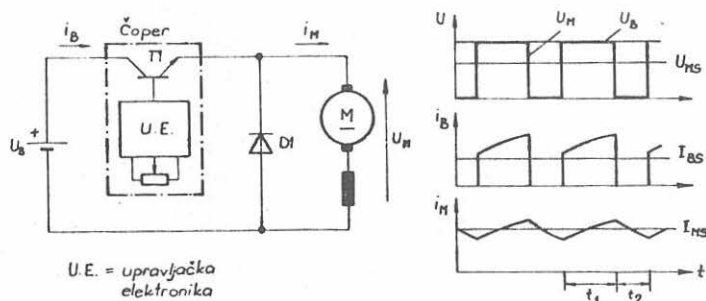
- skokovite promjene momenta motora
- mali faktor korisnog djelovanja

Novija rješenja zasnivaju se na impulsnoj modulaciji i omogućuju kontinuiranu regulaciju momenta motora, uz male gubitke u samom regulacionom uređaju. Dodatkom minimalnog broja komponenti moguće je s njima ostvariti kočne spojeve kod kojih se energija vraća u bateriju, čime se dodatno povećava radijus kretanja vozila.

Zahvaljujući sve nižoj cijeni energetskih tranzistora i dioda takva rješenja postaju konkurentna starijim i po cijeni.

2. PRINCIP RADA ČOPERA

Regulacioni uređaj, čiji je uobičajeni naziv čoper, omogućuje da se iz izvora istosmjernog napona na motor dovede napon čija se srednja vrijednost može podešavati promjenom odnosa vremena vođenja nevođenja tranzistora T_1 , slika 1..



Sl. 1.
Princip rada
čopera

Tranzistor T_1 radi u režimu sklopke. Za vrijeme vođenja tranzistora struja teče u krugu: baterija, tranzistor, motor. Tokom nevođenja tranzistora struja teče u krugu: motor, dioda. Valni oblici struje motora i_M , struje baterije i_B , napona baterije u_B i motora u_M prikazani su na slici 1..

Srednji napon na motoru U_{MS} podešava se vremenom vođenja (t_1) i nevođenja (t_2) tranzistora i iznosi:

$$U_{MS} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_B = d U_B \quad (1)$$

gdje je d faktor popunjenosti impulsa.

Srednji iznos struje motora I_{MS} iznosi:

$$I_{MS} = I_{BS}/d \quad (2)$$

gdje je I_{BS} srednji iznos struje baterije.

Faktor popunjenosti impulsa općenito je moguće podešavati na

više načina:

- vrijeme vođenja tranzistora t_1 je konstantno, a mijenja se period $T = t_1 + t_2$
- period T je konstantan, a mijenja se faktor popunjenosti impulsa
- vrijeme nevođenja tranzistora T_2 je konstantno, a tranzistor se isključuje kada struja dosegne neku zadanu vrijednost
- amplituda pulzacije struje motora se održava konstantnom.

U čoperu koji će ovdje biti opisan odabran je princip upravljanja tranzistorskom sklopkom koji održava amplitudu pulzacije struje motora konstantnom. Taj princip je odabran jer omogućava da čoper nikada ne radi frekvencijom višom od frekvencije potrebne da se održi zadana valovitost struje, pa su frekventno ovisni gubici u čoperu minimalni.

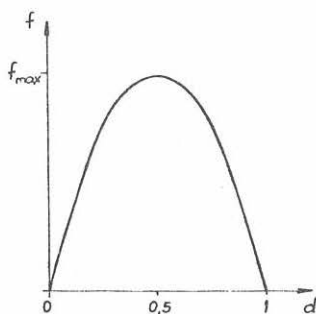
Frekvencija čopera f iznosi:

$$f = 4 f_{\max} d (1 - d) \quad (3)$$

gdje je f_{\max} maksimalna frekvencija čopera određena naponom baterije U_B , ukupnim induktivitetom motora L_M i zadanim iznosom valovitosti struje motora I :

$$f_{\max} = U_B / 4 L_M I \quad (4)$$

Ovisnost frekvencije o faktoru popunjenosti impulsa prikazana je na slici 2..



Sl. 2.

Ovisnost frekvencije čopera o faktoru popunjenosti impulsa

3. OPIS RJEŠENJA ČETVOROKVADRANTNOG TRANZISTORSKOG ČOPERA

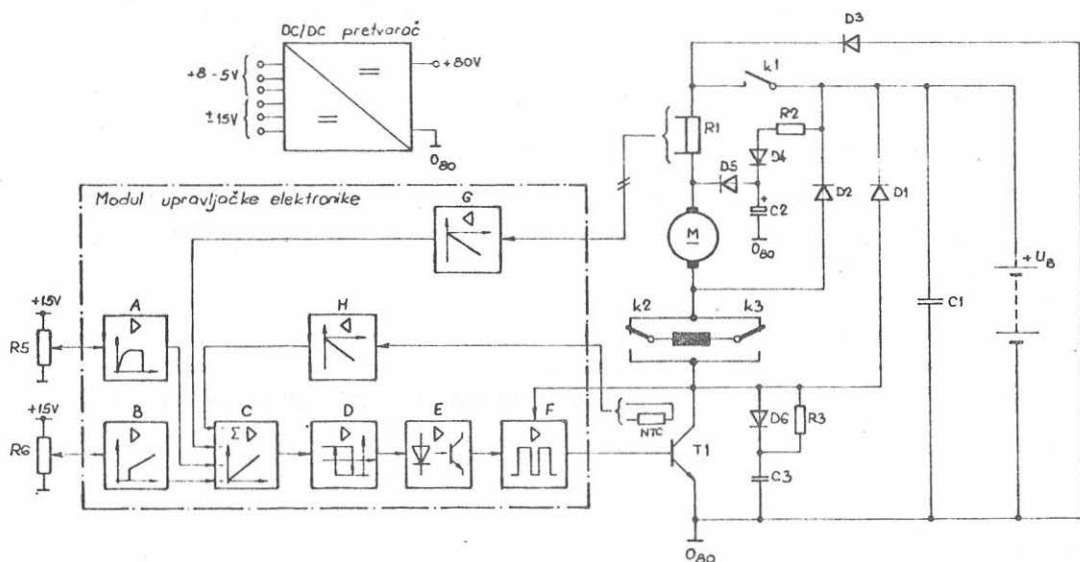
Funkcionalna blok shema realiziranog četvorokvadrantnog čopera dana je na slici 3.. Čoper je dimenzioniran za napon napajanja

nja 80 V, trajnu struju motora 125 A i maksimalnu struju od 300 A. Namijenjen je za regulaciju brzine vozila za unutrašnji transport.

Čoper se sastoji od modula upravljačke elektronike, DC/DC pretvarača i energetskog kruga.

Modul upravljačke elektronike

Na komparatoru s histerezom D uspoređuju se referentni napon (s potencijometra koji se nalazi na papučici gasa R_5 ili s potencijometra koji se nalazi na papučici kočnice R_6) s pojačanim naponom na shuntu R_1 i zavisno od njihova odnosa, preko optokaplera E daje se nalog pojačalu impulsa F da uključi ili isključi tranzistorsku sklopku T_1 . Detaljniji opis takve povratne veze dan je u [13].



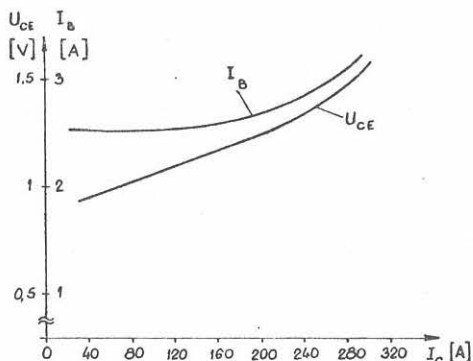
Sl. 3. Funkcionalna blok shema četvorokvadratnog tranzistorskog čopera

Blok H smanjuje struju motora ako temperatura hladnjaka tranzistorske sklopke dosegne 70°C .

Blok A, osim što prenosi referentni napon, omogućuje postepeni porast struje motora ako je papučica gasa naglo pritisnuta (što sprečava nagla ubrzanja tokom pokretanja vozila), te prebacivanje sklopnika k_2 i k_3 u bezstrujnom stanju.

U pojačalu impulsa ostvarena je povratna veza po naponu U_{CE}

energetskog tranzistora T_1 , [L1]. Pojačalo impulsa daje tranzistoru onoliko bazne struje koliko je potrebno da se tranzistor nalazi u stanju kvazizasićenja. Time je umanjena disipacija u pojačalu impulsa i smanjeno vrijeme zadržavanja tranzistora, a nije bitno povećan napon U_{CE} . Slika 4. prikazuje ovisnost struje baze i napona U_{CE} tranzistorske sklopke, realizirane s tri paralelno spojena tranzistora MJ 10200, o kolektorskoj struji.



Sl. 4.

Ovisnost struje baze I_B i napona U_{CE} tranzistorske sklopke o kolektorskoj struji

U slučaju da kroz tranzistorsku sklopku poteče prevelika struja i napon U_{CE} poraste iznad 2,5 V pojačalo impulsa isključuje tranzistorsku sklopku.

Energetski krug

Sklop za ograničenje brzine porasta napona U_{CE} (du/dt limit) izveden je s elementima D_6 , R_3 , C_3 , [L1, L5].

Kondenzator C_1 eliminira utjecaj induktiviteta kablova između baterije i čopera. Isti kondenzator omogućava da struja baterije bude glada nego što je prikazano na slici 1, što povoljno djeluje na faktor korisnosti akumulatora [L4].

Izbor smjera vrtnje motora vrši se sklopnicima k_2 ili k_3 . U režimu rekuperativnog kočenja mijenja se smjer uzbudne struje i otvara se sklopnik k_1 . Početnu struju uzbude pri prelasku na kočni režim osiguravaju elementi D_5 , C_2 , D_4 , R_2 .

DC/DC pretvarač

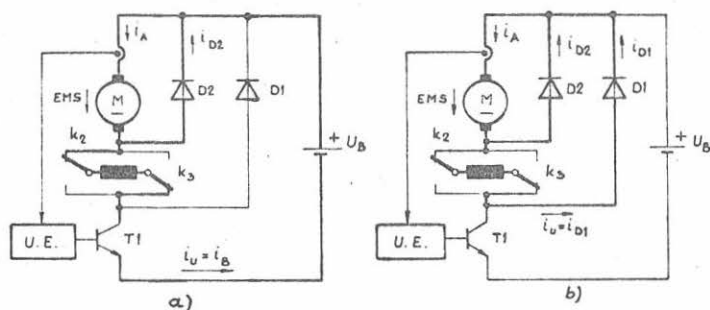
DC/DC pretvarač daje napone za napajanje modula upravljačke elektronike. Izveden je kao samooscilirajući polumosni (puš - pul) pretvarač, [L6].

4. REŽIMI KOČENJA S IMPULSNO UPRAVLJANIM SERIJSKIM ISTOSMJERNIM MOTOROM

Protustrujno kočenje

Protustrujni kočni spoj dobiva se dodatkom diode D_2 osnovnom energetskom krugu, slika 5. U vučnom režimu ona nema utjecaja na rad kruga.

Režim protustrujnog kočenja ostvaruje se promjenom smjera struje kroz uzbuđni namot. Motor se za to vrijeme i dalje vrti u istom smjeru i zbog toga inducirana EMS u armaturi mijenja smjer, te dioda D_2 postaje propusno polarizirana.



Sl. 5. Tok struje tokom protustrujnog kočenja:

- za vrijeme vođenja tranzistora T_1
- za vrijeme nevođenja tranzistora T_1

Za vrijeme vođenja tranzistora T_1 kroz armaturni namot teče struja određena referentnim naponom (tj. položajem papučice gasa). Veći dio armaturne struje teče kroz diodu D_2 , a kroz uzbuđni namot teče manji dio armaturne struje potreban da se u armaturi inducira mala EMS.

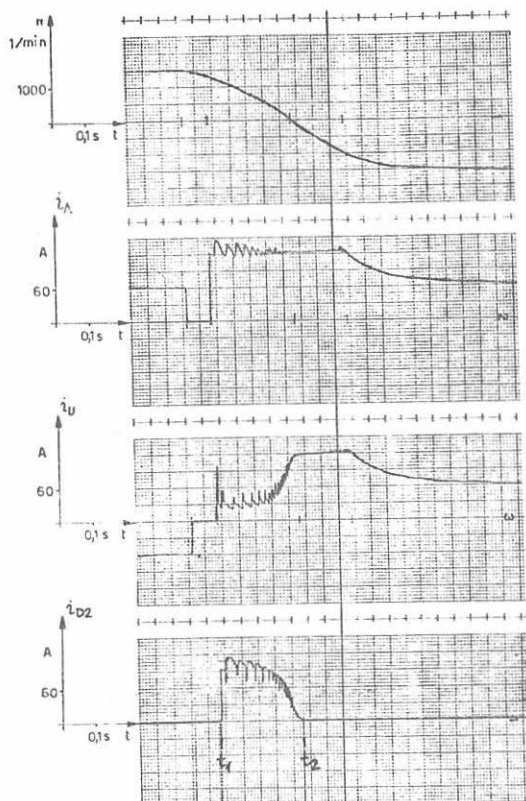
Za vrijeme nevođenja tranzistora struja i dalje teče kroz diodu D_2 , a zbog elektromagnetske energije induktiviteta uzbuđnog namota teče struja kroz diodu D_3 .

Ako se ^{ne}otпусти papučica gasa kada se motor zaustavi, motor će se zaletiti u suprotnom smjeru.

Valni oblici struja kroz armaturu, uzbuđu i diodu D_2 , te brzine vrtnje motora tokom reverziranja motora prikazani su na slici 6.. Kočenje počinje u trenutku t_1 . Armaturna struja je skokovito narasla jer je isključeno djelovanje sklopa za usporeni zalet. U trenutku t_2 brzina motora pala je na nulu, a s obzirom da je pedala gasa i dalje

pritisnuta, motor se zalijeće u drugom smjeru.

Ovakav način kočenja primjenjuje se kada se vozilo želi zaustaviti i ubrzati u drugom smjeru.



Sl. 6.

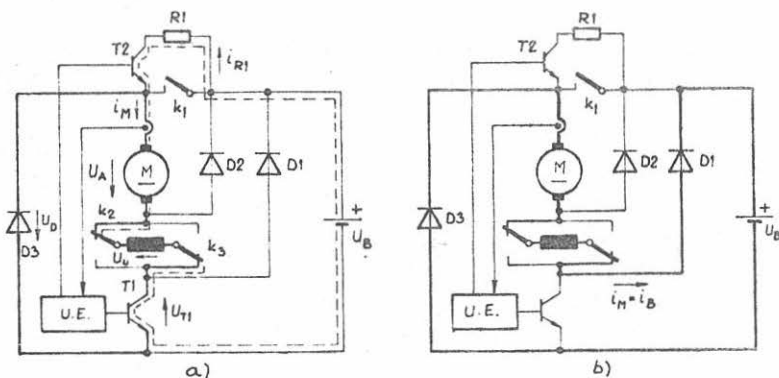
Valni oblici brzine vrtnje n , armaturene struje i_A , uzbudne struje i_U i struje kroz diodu D_2 tokom reverziranja motora bez usporednog zaleta

Rekuperativno kočenje

Serijski motor je u generatorskom radu, u principu nestabilan. Ako se brzina vrtnje održava konstantnom serijski motor će biti neuzbuđen, ili će struja, teoretski, rasti do beskonačnosti. Upotrebom čopera moguće je ostvariti stabilan kočni spoj koji omogućuje vraćanje energije u bateriju.

Rekuperativni kočni spoj dobiven je dodavanjem diode D_2 i D_3 , transformatora T_2 , otpora R_1 , te sklopnika k_1 osnovnom energetskom krugu, slika 7..

Prilikom prelaska iz režima vuče u kočni režim potrebno je otvoriti sklopnik k_1 i promijeniti smjer uzbudne struje. Struju motora tokom kočenja određuje položaj papučice kočnice, tj. zakret potencijometra R_6 , slika 3..



Sl. 7. Tok struje tokom rekuperativnog kočenja

- a) za vrijeme vođenja tranzistora T_1
 b) za vrijeme nevođenja tranzistora T_1

Tokom vođenja tranzistora struja raste u krugu: motor, tranzistor T_1 , dioda D_3 i pri tom se povećava elektromagnetska energija u induktivitetu motora na račun kinetičke energije vozila. Kada struja dostigne određeni iznos, tranzistor prestaje voditi i struja pada u krugu: motor, dioda D_1 , baterija B, dioda D_3 . Tokom ovog vremena povećava se kemijska energija baterije na račun elektromagnetske energije induktiviteta motora.

Stabilnost pri kočenju s velikom strujom i brzinom vrtnje motora osigurava dioda D_2 . Ona smanjuje struju uzbude u slučaju da EMS motora postane veće od napona baterije.

Na samom početku kočenja kroz otpor R_1 i tranzistor T_2 teče struja potrebna za stvaranje početnog magnetskog toka (prikazano isprekidanom linijom na slici 7.-a). U trenutku kada je inducirana EMS u motoru dovoljno velika poteći će struja u krugu motor, tranzistor T_1 , dioda D_3 , tj. doći će do samouzbuđivanja motora. Nakon tog momenta može se isključiti struja kroz otpor R_1 tranzistorom T_2 da bi se izbjegla nepotrebna disipacija na otporu R_1 .

Neophodni uvjeti da dođe do samouzbuđivanja su:

$$\frac{di_M}{dt} > 0 \quad (5)$$

i

$$U_A = U_D + U_U + U_{T1} \quad (6)$$

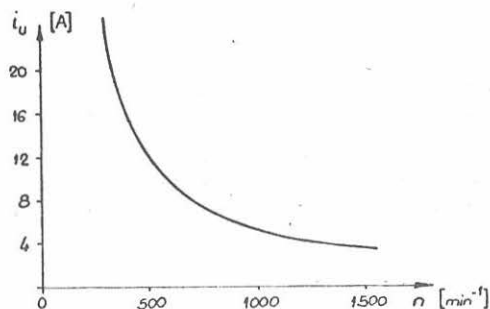
gdje su oznake prema slici 8.-a.

Minimalna struja uzbude i_{Mmin} koja zadovoljava (5) i (6) iznosi:

$$i_{Mmin} = \frac{U_D + U_{\check{C}} + U_T}{k \cdot n - (R_A + R_U)} \quad (7)$$

gdje je U_D pad napona na diodi, $U_{\check{C}}$ pad napona na četkicama, U_T pad napona na tranzistoru, k konstanta ovisno o konstrukciji motora, n brzina vrtnje motora, a R_A i R_U otpori armaturnog i uzbudnog namota.

Ovisnost minimalne početne struje uzbude o brzini vrtnje motora prikazuje slika 8..



Sl. 8.
Minimalna početna struja uzbude

Drugačiji sklop koji osigurava početnu struju uzbude, prikazan je na slici 3., a sačinjavaju ga otpor R_2 , diode D_4 i D_5 , te kondenzator C_2 . Takav sklop je jednostavniji od prethodnog, jer otpada upravljanje tranzistorom T_2 (slika 7.), ali je nešto većih dimenzija.

Kondenzator C_2 stalno je nabijen na napon baterije (preko R_2 i D_4). Kada se pritisne kočnica sklopnik k_1 se otvara, tranzistor T_1 provede i kondenzator C_2 se prazni u krugu: kondenzator C_1 , motor, tranzistor T_1 . Maksimalna struja koja pri tome teče kroz motor iznosi, uz zanemarene otpore u krugu:

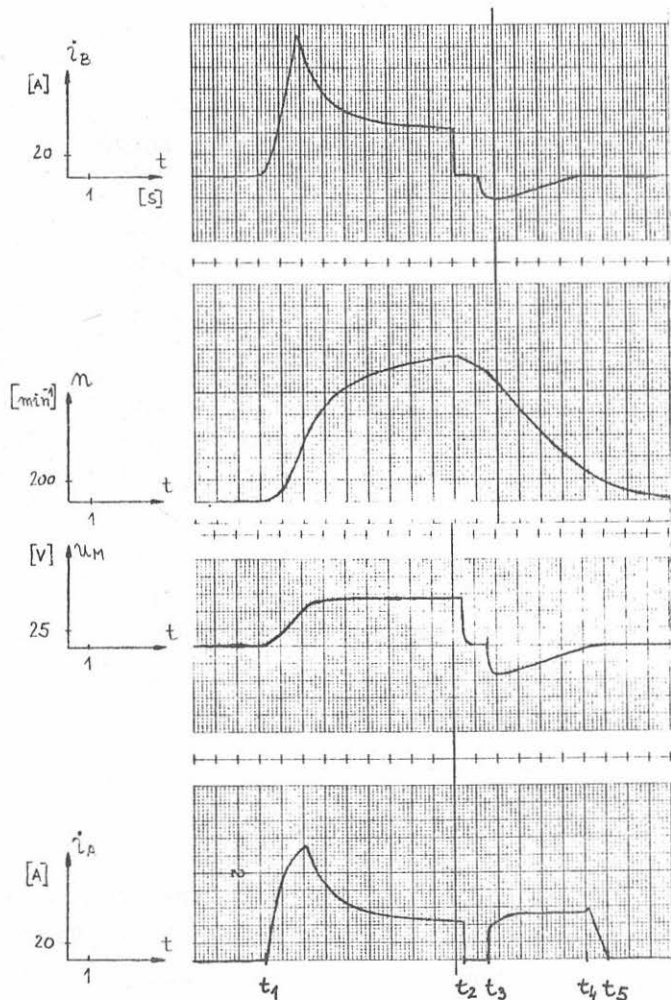
$$i_{Mmax} = \frac{U_B}{\frac{L_A + L_U}{C_2}} \quad (8)$$

gdje su L_A i L_U induktiviteti armaturnog i uzbudnog namota.

Iz jednadžbi (7) i (8) mogao bi se izračunati potreban kapacitet kondenzatora C_2 , međutim, zbog vrtložnih struja u motoru, magnet-ski tok u motoru u momentu kada je struja pražnjenja maksimalna nije maksimalan. Zbog toga je potreban kapacitet određen eksperimentalno. Sigurno kočenje postignuto je s elektrolitskim kondenzatorom kapaciteta 1500 μF .

Oscilogram valnih oblika struje baterije i_B i napona i struje motora (U_M i i_A), te brzine vrtnje motora n prikazan je

na slici 9. U trenutku t_1 pritisnuta je papučica gasa i motor radi u motorskom režimu do trenutka t_2 kada je papučica gasa otpuštena. Papučica kočnice pritisnuta je u trenutku t_3 . Podešena je struja kočenja od oko 50 A. U momentu t_4 tranzistorska sklopka počinje trajno voditi jer je inducirana EMS premala da podrži rast struje (u krugu prikazanom na slici 7.-a), te ona počinje padati. Kočni moment također pada i u trenutku t_5 struja i moment motora jednaki su nuli.



Sl. 9.

Valni oblici struje baterije, brzine vrtanje motora, napona motora i struje armature tokom zaleta i kočenja

Energija se vraća u bateriju samo do trenutka t_4 , a nakon toga se kinetička energija pretvara u toplinsku energiju.

Da bi se motor potpuno zaustavio potrebno je upotrijebiti mehaničku kočnicu.