

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

BATERIJE I POGON ELEKTRIČNOG VILIČARA

Rijeka, svibanj 2019.

Đani Krvar

0069067952

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

BATERIJE I POGON ELEKTRIČNOG VILIČARA

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Saša Sladić

Rijeka, svibanj 2019.

Đani Krvar

0069067952

TEHNIČKI FAKULTET

Povjerenstvo za završne ispite preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike

Br.: 602-04/18-14/18

Ur. br.: 2170-15-12-18-1

Rijeka, 19.03.2018.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Dani Krvar

Matični broj: 0069067952

Lokalni matični broj: 14800008

Naziv zadatka:

BATERIJE I POGON ELEKTRIČNOG VILIČARA

Title (*English*):

Forklift Batteries and Electric Drive

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika

Grana znanstvenog područja: 2.03.02 elektrostrojstvo

Opišite baterije koje se koriste u viličaru. Istražite komercijalna rješenja istosmjernih pretvarača koja se koriste u viličarima te opišite elektromotorni pogon istosmjernog stroja. Teorijsko razmatranje nadopunite simulacijom silaznog pretvarača.

Zadano: 19.3.2018.

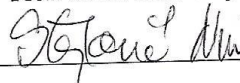
Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Saša Sladić



Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nino Stojković



Zadatak preuzeo dana: **19.3.2018.**

Dani Krvar



Dostaviti:

Mentor (1x) Evidencija studija (1x) Pristupnik (1x) Predsjednik Povjerenstva(1x)

IZJAVA

Sukladno s člankom 9. stavak 1) Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku br. 2170-15-12-18-1, klasa 602-04/18-14/18 u razdoblju od 19. ožujka 2018. do 21. svibnja 2019. godine.

Đani Krvar

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POGON ELEKTRIČNOG VILIČARA.....	2
2.1. Primjena istosmjernog stroja u električnom viličaru.....	3
2.2. Konstrukcija istosmjernog električnog stroja.....	4
2.3. Vrste pogonskih motora električnog viličara.....	5
2.3.1. Istosmjerni motor s paralelnom uzбудom.....	6
2.3.2. Istosmjerni motor sa serijskom uzбудom.....	8
3. BATERIJE.....	10
3.1 Olovni akumulator.....	11
3.2 Punjenje baterije i kapacitet.....	11
3.2.1 Punjenje - Pražnjenje.....	12
3.2.2 Potpuno pražnjenje.....	12
3.2.3 Samo - pražnjenje.....	12
3.2.4 Punjenje za očuvanje.....	12
3.3 Građa baterije.....	13
3.3.1 Sastav ćelija baterije.....	13
3.3.2 Napon ćelije.....	13
4. PRETVARAČI.....	14
4.1. Osnovni pretvarač s prekidačem.....	15
4.2. Silazni pretvarač.....	17
4.2.1. Analiza spoja sa zatvorenom sklopkom.....	18
4.2.2. Analiza spoja sa otvorenom sklopkom.....	19
4.3. Način djelovanja.....	20

5. ISTOSMJERNI STROJ.....	24
5.1. Princip rada istosmjernog stroja.....	25
5.2. Moment sile.....	28
6. REGULACIJA ISTOSMJERNOG STROJA.....	29
6.1. Učinkovitost stroja.....	29
6.2. Promjena napona tijekom rada električnog viličara.....	30
7. ELEKTRIČNI VILIČAR.....	34
8. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
SAŽETAK.....	37
SUMMARY.....	38

1. UVOD

Viličari su industrijska vozila odnosno transportna sredstva koja se koriste za dizanje i pomicanje materijala na kratkim udaljenostima. Viličari su postali nezaobilazni dio opreme u proizvodnji i skladištenju. Predviđeni su za opterećenja pri određenoj maksimalnoj težini i određenom centru težišta prema naprijed.

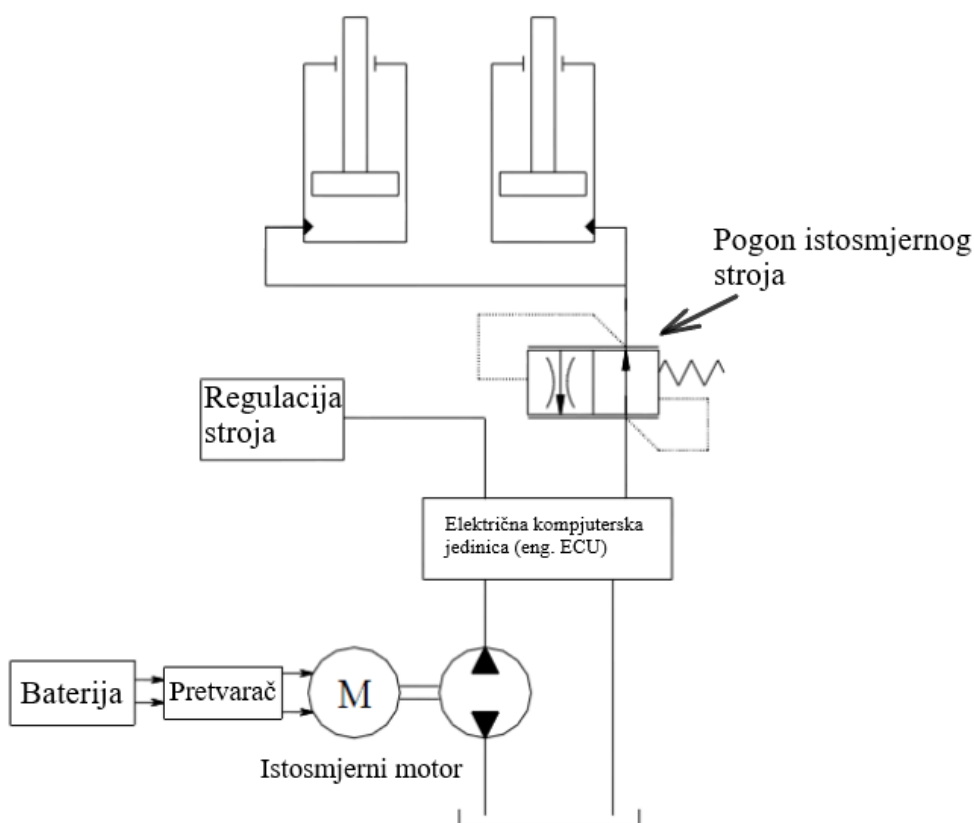
Sredinom 19. stoljeća razvija se prva tehnologija za podizanje i premještanje teških tereta, ta tehnologija dovodi do današnjih modernih viličara. Prethodnik suvremenog viličara bio je na ručni pogon pomoću kojeg se podizao teret. Kasnih 1930-ih godina razvija se koncept prvih električnih viličara uz upotrebu standardiziranih paleta. Od tog vremena pa do danas razvijale su se najviše sigurnosne i tehničke značajke te njegova nosivost i vrsta pogona koji ga pokreće što je ujedno bilo i ključno za prodaju. Moderni viličari odlikuju se većom izlaznom snagom, isplativiji su i njihova je učinkovitost znatno veća u odnosu na prethodne strojeve. To je postignuto zahvaljujući novim električnim pogonima. Skokovite promjene iz generacije na drugu se mogu uočiti na industrijskim strojevima na baterije gledajući sa ekonomske, a isto tako i funkcionalne strane. [1]

Električni viličar pokreću pogonske baterije, jednostavni su za rukovanje, stabilni su te imaju nisku razinu buke i nula emisija što je pogodno za rad u higijenskim skladištima. Upravo zbog tih se značajki povećava potražnja za električni pogon. U razvijenim zemljama se oni puno više koriste od uobičajenih viličara na gorivo. To je usko povezano sa zaštitom okoliša u tim zemljama. Pogotovo u lukama, skladištima, duhanskoj industriji, prehrambenoj i tekstilnoj industriji, električni viličari u potpunosti zamjenjuju viličare na gorivo [2].

2. POGON ELEKTRIČNOG VILIČARA

Električni viličar pokreće istosmjerni stroj sa serijskom uzbudom. Električni motor je stroj koji pretvara električnu energiju u mehaničku koristeći princip elektromagnetske indukcije. Postoje dvije kategorije električnih strojeva, a dijelimo ih prema izvoru napajanja na istosmjerne strojeve i izmjenične strojeve. Unutar tih kategorija su brojne vrste, od kojih svaka nudi jedinstvene sposobnosti koje odgovaraju za funkciju koju trebaju obavljati. U većini slučajeva, bez obzira na vrstu, električni stroj se sastoji od statora (stacionarnog polja) i rotora (rotirajućeg polja ili armature) i djeluju na podlozi međudjelovanja magnetskog toka, uzbude i električne struje kako bi se dobila brzina rotacije i zakretni moment.[1]

Istosmjerni stroj se proizvodi u različitim veličinama. Veliki strojevi koji mogu podnijeti opterećenja od 1000 konjskih snaga koriste se kao zamjena motora sa unutarnjim izgaranjem u industriji. Primjer takvih strojeva su: dizala, električni vlakovi, električne dizalice i slični strojevi. Manji strojevi koriste se za pogon: automobila, viličara, robota, ručnih alata te aparata za kućnu upotrebu[3].



Slika 2.1. Blok shema električnog viličara

2.1. Primjena istosmjernog stroja u električnom viličaru

Električni viličar pokreće istosmjerni motor snage (12, 24, 36 i 48 VDC) koji koristi za napajanje trakcijske baterije kapaciteta (10-75 KWh). Mehanizam za podizanje tereta je kombinacija elektronike i hidraulike. Hidrauličnu pumpu pokreće istosmjerni motor uz pomoć kojeg podižemo teret, hidraulički tlak podiže dizalicu koja je sastavljena od vilice i prijenosnog sustava uz pomoć kojeg se vilica stroja podiže gore odnosno spušta dolje ovisno o poslu koji je potrebno obaviti. Na slici 2.2 možemo vidjeti 24V istosmjerni motor za pokretanje viličara i istosmjerni motor za pokretanje hidraulike.[9]



(a)



(b)

Slika 2.2. (a) Pogonski istosmjerni stroj, (b) Istosmjerni stroj za pokretanje hidraulike

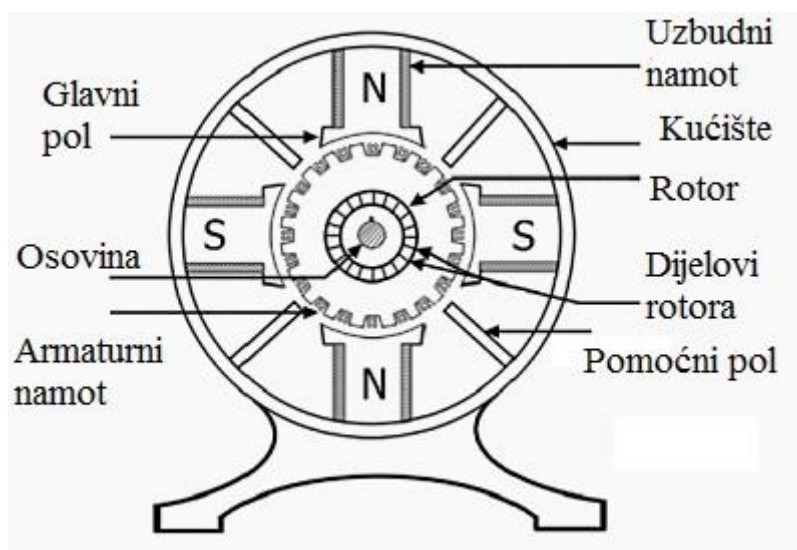
2.2. Konstrukcija istosmjernog električnog stroja

Istosmjerni stroj sastoji se od rotirajuće armature koju nazivamo rotor, unutar drugog skupa namotaja ili permanentnih magneta, koje nazivamo stator. Primjenom napona na zavojnicu stvara se zakretni moment u rotoru, što rezultira kretanjem.

Stator je fiksni vanjski dio stroja. Energija teče kroz stator na ili iz rotirajuće komponente sustava. U električnom stroju, stator osigurava rotirajuće magnetsko polje. Magnetski tog može stvoriti permanentni (stalni) magnet ili elektromagnet. Kako bi se smanjili gubitci u motoru, proizvođači koriste bakar kao vodljivi materijal u namotajima.

Rotor je unutarnji dio motora koji se okreće. Sastoji se od namotaja koji su spojeni na vanjski krug kroz mehanički komutator, koji prilikom svakog okretaja rotora dva puta promjeni smjer toka struje kroz armaturni namot stvarajući tako moment koji zakreće motor. Kao i stator, rotor se izrađuje od feromagnetskih materijala.

Armaturni namot sastoji se od serijski ili paralelno spojenih zavojnica. To je namot kroz koji se inducira napon kako bi stvorili zakretni moment u armaturi. Namotaji su izrađeni od bakra [2][3].



Slika 2.3. Konstrukcija istosmjernog motora [3]

2.3. Vrste pogonskih motora električnog viličara

Istosmjerne motore dijelimo prema spoju armature i polja. Različiti način povezivanja armature i polja dovodi do različitih izvedbi motora potrebnih za obavljanje djelatnosti za koje su namijenjeni. Motori se izvedu sa serijskom ili s paralelnom uzbudom. Kod istosmjernih motora s paralelnom uzbudom napajanje je preko vanjskog izvora, a armatura i polje su paralelno spojeni. Dok istosmjerni motori sa serijskom uzbudom koriste unutarnje napajanje, a armatura i polje su serijski spojeni. Zbog mogućnosti kontroliranja brzine okretanja istosmjerni motor koristimo za pogon električnih viličara. Bitno je naglasiti spoj između momenta i brzine motora. Kako bi se motor učinkovito iskoristio za primjenu, potrebno je razumjeti njegovu karakteristiku krivulje. Za svaki motor je posebna krivulja za brzinu vrtnje i moment te karakteristika za snagu. Brzina vrtnje stroja ovisi o mehaničkom opterećenju, brzina se mijenja ovisno o tome da li je potpuno neopterećen ili opterećen [7]

Brzinu vrtnje možemo izraziti kao:

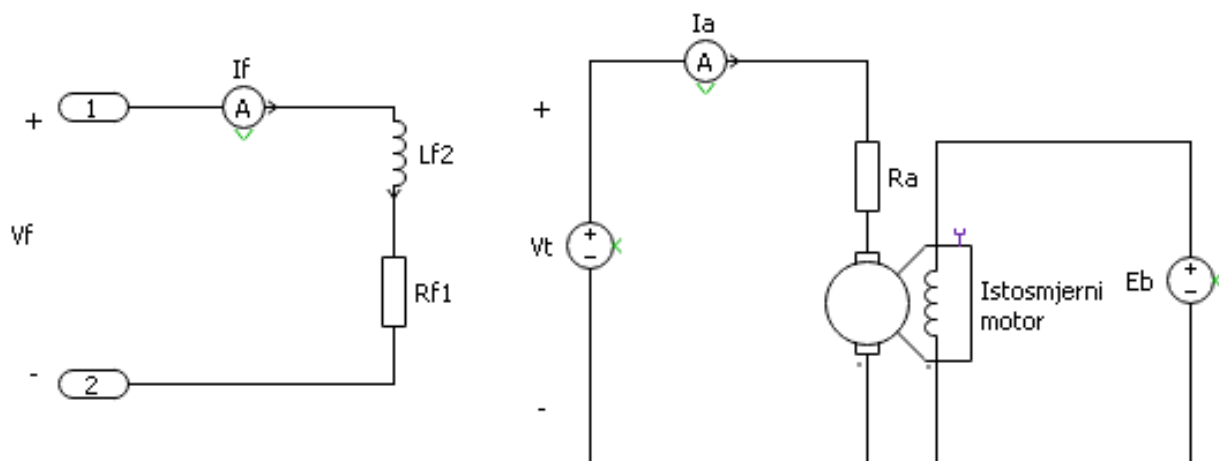
$$\text{Brzina vrtnje} \quad (BV) \equiv \frac{N_{\text{neopterećen}} - N_{\text{potpuno opterećen}}}{N_{\text{potpuno opterećen}}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Gdje je $N_{\text{neopterećen}}$ = broj okretaja neopterećenog stroja

$N_{\text{potpuno opterećen}}$ = broj okretaja stroja s mehaničkim opterećenjem

2.3.1. Istosmjerni stroj s paralelnom uzбудom

Kod istosmjernog motora s paralelnom uzбудom armatura i polje su paralelno spojeni preko vanjskog izvora napajanja.



Slika 2.4. Shema spoja istosmjernog stroja s paralelnom uzбудom

Ulazna snaga jednaka je: $P_{ul} = V_f \cdot I_f + V_t \cdot I_a$ (2.2)

Iz izraza za inducirani napon :

$$E_b = K \cdot \Phi \cdot \omega_m \quad (2.3)$$

te izraza za unutarnji napon :

$$V_t = E_b + I_a \cdot R_a \quad (2.4)$$

Dobili smo dva izraza za inducirani napon. Ako usporedimo ta dva napona dobili smo izraz koji je jednak:

$$E_b = K \cdot \Phi \cdot \omega_m = V_t - I_a \cdot R_a \quad (2.5)$$

Moment koji je nastao na rotoru (armaturi) je jednak:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_a \quad (2.6)$$

Iz izraza za moment (2.7), struju I_a možemo izraziti kao:

$$I_a = \frac{M}{K \cdot \Phi} \quad (2.7)$$

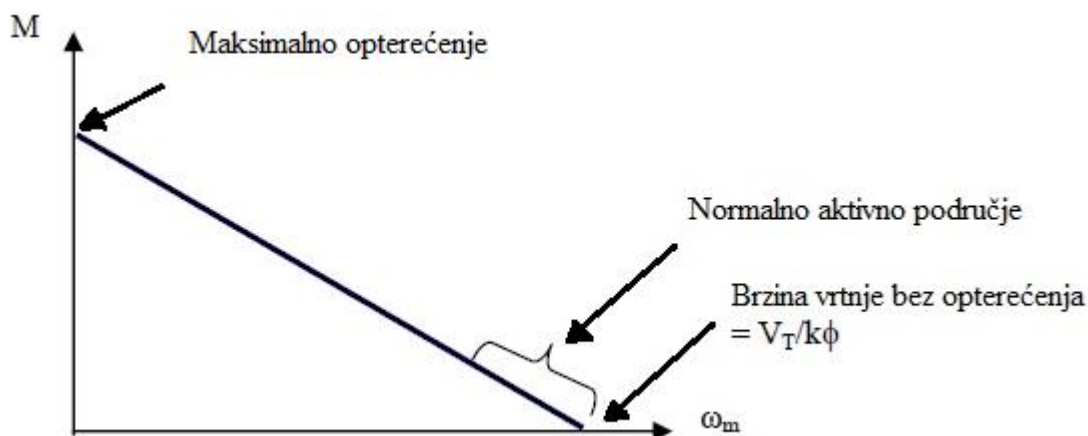
Uvrštavanjem I_a u jednadžbu (2.5), dobijemo:

$$V_T - K \cdot \Phi \cdot \omega_m = R_a \cdot \frac{M}{K \cdot \Phi} \quad (2.8)$$

Dakle, moment je jednak:

$$M = \frac{K \cdot \Phi}{R_a} \cdot (V_T - K \cdot \Phi \cdot \omega_m) \quad (2.9)$$

Ova jednadžba prikazuje odnos između momenta i brzine kod istosmjernog stroja s paralelnom uzбудom. Kad bi napon armature (V_T) i magnetski tok (Φ) bili konstantni, odnos između brzine i momenta bi bio "slika (2.4)".

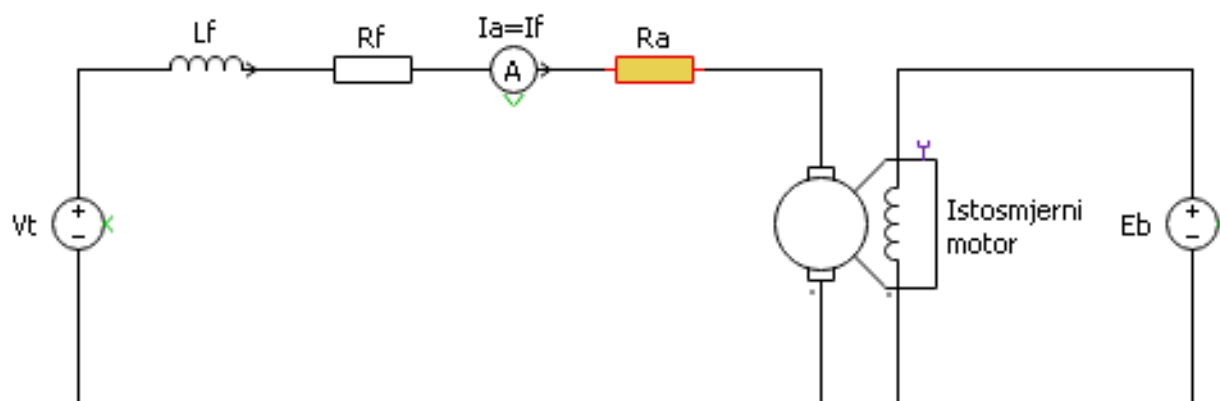


slika 2.5. Graf ovisnosti momenta (T) i brzine ω_m

Slika (2.5) prikazuje krivulju momenta i brzine za istosmjerni motor s paralelnom uzбудom. Moment je obrnuto proporcionalan brzini vrtnje, drugim riječima postoji razlika između količine zakretnog momenta i brzine okretanja motora. Kad je motor maksimalno opterećen, graf predstavlja točku u kojoj je moment maksimalan, a brzina vrtnje je nula. U toj točki motor se ne rotira a moment je najveći. Kad je motor bez ikakvog opterećenja, brzina vrtnje motora je maksimalna dok je zakretni moment nula. To je točka u kojoj motor rotira bez trenja i njegova brzina je maksimalna [5][6][7].

2.3.2. Istosmjerni motor sa serijskom uzбудom

Kod istosmjernog motora sa serijskom uzбудom, polje i armatura su serijski spojeni preko unutarnjeg izvora V_t .



Slika 2.6. Shema spoja istosmjernog stroja sa serijskom uzбудom

Moment koji je nastao na rotoru je jednak:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_a \quad (2.10)$$

Uz pretpostavku da je magnetski tok (Φ) proporcionalan struji polja I_f :

$$\Phi \propto I_f \quad (2.11)$$

Budući da je serijska uzbuda $I_f = I_a$, pa je izraz za magnetski tok:

$$\Phi = K_f^1 \cdot I_a \quad (2.12)$$

Usporedimo izraz (2.11) te izraz (2.12), izraz za moment možemo zapisati kao:

$$M = (K_f \cdot I_a) \cdot (K \cdot I_a) = K' \cdot I_a^2 \quad (2.13)$$

¹ K_f = Konstanta koja ovisi o broju okretaja, položaju magnetskog kruga i o B-H karakteristici materijala.

Izraz za napon V_T je:

$$V_T = R_f \cdot I_a + R_a \cdot I_a + E_b \quad (2.14)$$

Inducirani napon E_b je jednak:

$$\begin{aligned} E_b &= K \cdot \Phi \cdot \omega_m \\ &= K \cdot (K_f \cdot I_a) \cdot \omega_m = K' \cdot I_a \cdot \omega_m \end{aligned} \quad (2.15)$$

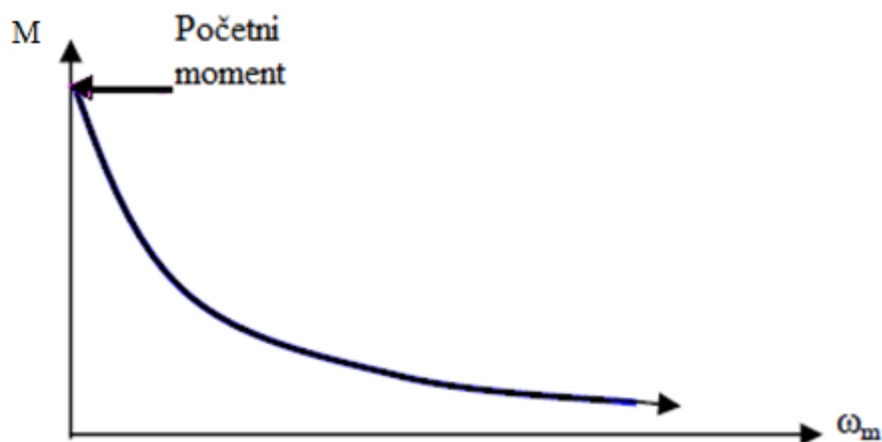
Uvrštavanjem izraza (2.15) u izraz (2.14) dobijemo struju I_a :

$$I_a = \frac{V_T}{R_a + R_f + K' \cdot \omega_m} \quad (2.16)$$

Dakle moment je jednak:

$$M = \frac{K' \cdot V_T^2}{(R_a + R_f + K' \cdot \omega_m)^2} \quad (2.17)$$

Kad bi napon V_T bio konstantan, brzina motora bi bila obrnuto proporcionalna kvadratnom korijenu od momenta (T). Veliki moment je postignut pri malim brzinama, a mali moment pri velikim brzinama. Odnos između momenta i brzine kod istosmjernog motora sa serijskom uzбудom možemo vidjeti na slici (2.7).[5][6][7]

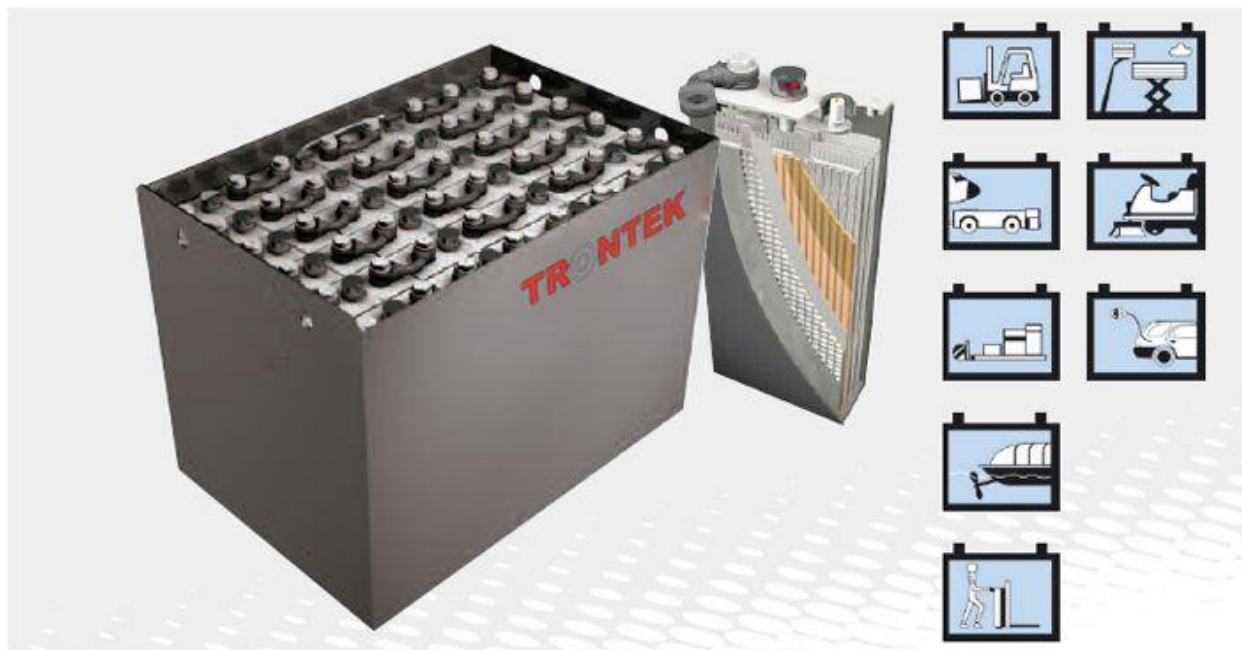


slika 2.7. Graf ovisnosti momenta (M) i brzine ω_m

3. BATERIJE

Za pokretanje i pogon transportnih vozila koriste se trakcijske baterije. Trakcijska baterija sastoji se od pozitivno oklopljene cjevčaste elektrode, negativne rešetkaste elektrode i mikroporoznog separatora. Mikroporozni separator je izrađen na bazi polivinil - klorida sa slojem staklenog vlakna. Ploče koje su spojene polnim mostićima imaju polne izvode. Oni služe pri spajanju ćelija u seriju pomoću zavarenih spojnika. Posuda i poklopac su izrađeni od polipropilena kako bi imali svojstva elastičnosti, otpornosti na vibraciju i promjene tlaka. Trakcijske baterije moraju biti dizajnirane s visokim amper-sat kapacitetom.

Baterije za električna vozila su karakterizirane po njihovom relativno visokom omjeru snage i težine: manje, lakše baterije smanjuju težinu vozila i poboljšavaju njegovu učinkovitost. U usporedbi sa gorivom, većina baterija ima puno manju specifičnu energiju i to najčešće utječe na maksimalni domet koji može vozilo proći u jednom punom ciklusu rada, odnosno broj radnih sati koje radni stroj može odraditi od punog kapaciteta baterije do pražnjenja. Punjive trakcijske baterije se koriste cijeli dan i pune cijelu noć. Trakcijske baterije ovisno o snazi viličara mogu biti 24V, 48V i 80V, a prikazuju se u omjeru V/Ah tako da se njihova snaga u amper satima često kreće od 400Ah do 1200Ah [10].



Slika 3.1. Primjer trakcijske baterije i njezina komercijalna primjena[10]

3.1 Olovni akumulator

Olovni akumulator sa ćelijama napunjenim kiselinom su najjeftinije i najviše se koriste kod trakcijskih baterija. Postoje dvije osnovne izvedbe olovnih baterija, a to su: automobilske baterije koje služe za pokretanje motora te baterije "dubokog ciklusa" što je ujedno i drugi naziv za trakcijske baterije. Takozvane baterije "dubokog ciklusa" imaju drugačiju građu za pozitivne elektrode. U toj građi pozitivna elektroda nije ravna ploča već redak cilindara olovnog oksida ili cijevi poslagane jedna kraj druge. Prednost ovakve građe je povećana površina u kontaktu s elektrolitom što omogućuje veće struje punjenja / pražnjenja od ravne ploče istog volumena. To čini cilindričnu građu posebno prikladne za visoke struje s ograničenjima veličine i težine baterije. Međutim, kako zbog njihove cilindrične građe imaju manje aktivnih tvari u istom volumenu kao i pločasta građa, također im je i energetska učinkovitost manja [10].

3.2 Punjenje baterije i kapacitet

Količina punjenja akumulatora navodi se u amper-satima (Ah). U praksi je uobičajen naziv "kapacitet" (nazivni kapacitet) za količinu punjenja baterije. Kapacitet je funkcija veličine struje pražnjenja te krajnjeg napona pražnjenja baterije, odnosno napona nakon završetka pražnjenja. Postoje razni postupci pražnjenja, kao npr.: - Pražnjenje s konstantnom strujom

- Pražnjenje preko konstantnog otpora

- Pražnjenje s konstantnom snagom.

Kapacitet baterije se razlikuje ovisno o postupku pražnjenja. Množenjem nazivnog kapaciteta s nazivnim naponom dobiva se sadržaj energije u Watt-satima (Wh). Da bi povećali napon sastavlja se više ćelija istog kapaciteta. u redu jedna za drugom.

Punjenjem baterije upravlja regulator punjenja, koji ovisno o vrsti baterije koristi različite postupke punjenja [8].

3.2.1 Punjenje - Pražnjenje

Za punjenje se koristi odgovarajući regulator, kako bi izbjegli preveliko punjenje te ograničili stvaranje plinova. Napon baterije iznosi 24,4 V, ako dođe do stvaranja plina znači da je baterija napunjena iznad dozvoljenog napona, zbog čega se umjesto olova i sulfata, voda pretvara u kiselinu, a vodik se elektrolizira. Plin koji tada nastaje naziva se "praskajući plin" (mješavina O_2 i H_2) je eksplozivan i preporučuje se oprez.

3.2.2 Potpuno pražnjenje

Potpuno pražnjenje se ne smije dogoditi kod olovnih baterija, jer bi to dovelo do nepopravljivih oštećenja na bateriji i može ju učiniti neuporabivom.

3.2.3 Samopražnjenje

Ako je baterija u stanju mirovanja i ne koristi se, tijekom vremena ona gubi jedan dio pohranjene energije. Taj proces nazivamo samo-pražnjenje. Preporučuje se skladištenje potpuno napunjenih baterija. U mjesec dana samo-pražnjenje baterije iznosi oko 5-10 %. Duže skladištenje ispražnjenih baterija će dovesti do njihovog uništenja.

3.2.4 Punjenje za očuvanje

Za očuvanje baterije od samo-pražnjenja koristi se način punjenja za očuvanje. Baterija je konstantno priključena na stalni napon te se održava u potpuno napunjenom stanju. Najprije se baterija napuni do kraja te se onda preko upravljača namjesti pogodan napon da ne bi napon baterije prešao preko dozvoljenog napona. [8][10]

3.3 Građa baterije

Baterije su građene od ćelija koje se ugrađuju u korita složene u redu. Ovisno o vrsti baterija, postoje različite dimenzije korita. Na dimenzije korita utječu različite mogućnosti rasporeda (sheme) ćelija. Stoga su korita za baterije podijeljena u različite klase. Razlikujemo korita tipa "A", "B" i "C". Ove baterije označavamo kao standardne. Sheme spajanja različitih tipova može se vidjeti na upravljačkim površinama za odgovarajuće napone. Pored standardnih baterija koriste se i baterije s koritima različitog oblika izrade, za različita električna vozila ili viličare.[10]

3.3.1 Sastav ćelija baterije

Olovne baterije koje se koriste kod električnih viličara sastoje se od olovnog dioksida (PbO_2) na pozitivnom polu i od fino podijeljenog poroznog olova (olovna spužva) na negativnom polu. Kao elektrolit koristi se 20% sumporna kiselina (H_2SO_4). Odlikuju se kratkotrajno dopuštenim velikim jakostima struje koje su npr. potrebne za baterije elektro-pokretača.

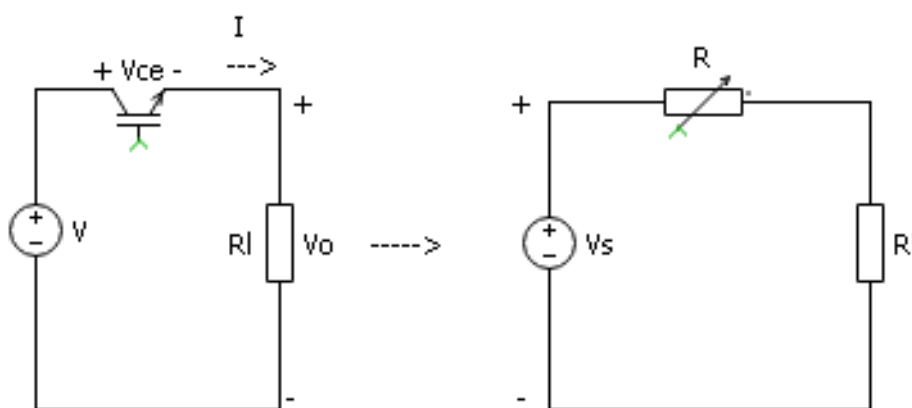
Ćelija se sastoji od slojeva ploča. Ovisno o broju ploča u jednoj ćeliji, razlikujemo tipove "2 PzS", "3 PzS".... "6 PzS" itd. Za određivanje baterije odlučujuće su dimenzije ćelija. H = visina bez pola, H_t = visina s polovima, L = dužina. Ćelije se nadalje razlikuju jednostrukim ili dvostrukim polaritetom.

3.3.2 Napon ćelije

Nazivni napon ćelije je 2V, ali oscilira ovisno o struji punjenja odnosno pražnjenja i o stanju punjenja između cca 1,75-2,4V. Gustoća kiseline je pokazatelj stanja punjenja. Kada je baterija napunjena iznosi cca $1,28 \text{ gr/cm}^3$, a kada je baterija prazna $1,10 \text{ gr/cm}^3$ [10].

4. PRETVARAČI

Za pogon električnog viličara, regulaciju brzine te za postizanje bolje učinkovitosti stroja potrebno je generirati napon baterije odnosno napon izvora na drugu razinu napona koja je potrebna motoru da bi radio. Za transformaciju napona izvora tj. napona baterije na određeni napon potreban za rad motora koristimo pretvarače. Osnovni pretvarač sa višeg napona na niži je jednostavan krug koji možemo vidjeti na slici 4.1.



Slika 4.1. Jednostavni pretvarač sa višeg na niži napon

Izlazni napon V_o jednak je:

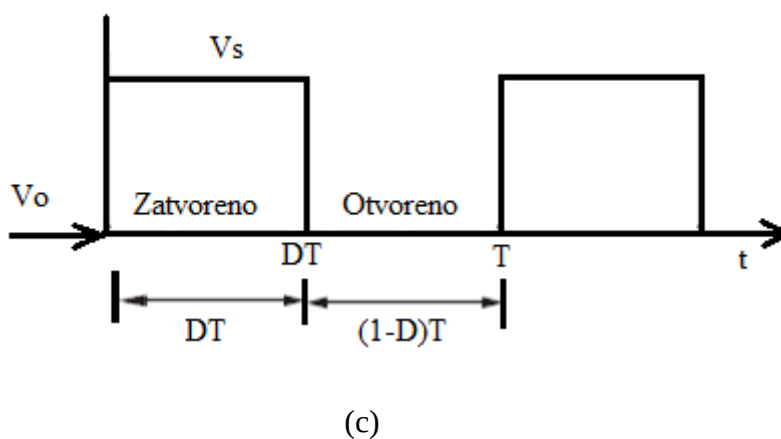
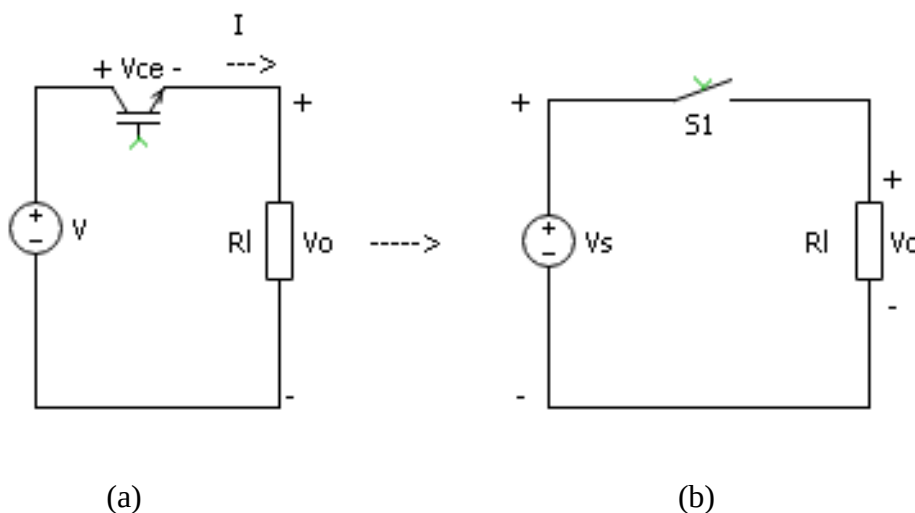
$$V_o = I \cdot R_l \quad (4.1.)$$

Struja I se kontrolira pomoću tranzistora. Podešavanjem bazne struje tranzistora, izlazni napon može biti kontroliran u rasponu od 0 pa skoro do napona V_s . Bazna struja se može podesiti tako da nadoknadi promjene nastale kod ulaznog napona ili kod opterećenja s čime se regulira izlazni napon. Ovakav tip pretvarača naziva se linearni pretvarač ili linearni regulator, zbog toga što se tranzistor nalazi u linearnom području, a ne u zasićenju ili graničnim područjima. Kod linearnog pretvarača tranzistor se ponaša kao potencijometar.

Linearni pretvarač je najjednostavniji oblik pretvarača i rijetko se upotrebljava u struci zbog njegovih nedostataka. Veliki gubitci snage u transformatoru, zbog relativno male bazne struje, ovakav pretvarač čine neefikasnim.[12]

4.1. Osnovni pretvarač s prekidačem

Pretvarač s prekidačem je učinkovita alternativa linearnom regulatoru. Kod pretvarača s prekidačem, tranzistor se ponaša kao elektronički prekidač sa dvije osnovne metode rada, a to su ili da sklop je potpuno upaljen ili je ugašen.



Slika 4.2. (a) Shema osnovnog pretvarača, (b) zamjena s prekidačem, (c) napon na izlazu

Uz pretpostavku da je idealna sklopka na slici 4.2., izlazni napon je isti kao i ulazni kad je sklopka zatvorena, a kad je otvorena izlaz je nula. Izlazni napon s otvorenom i zatvorenim sklopkom možemo promatrati na grafu Slika 4.2. (c).

Prosječna ili istosmjerna komponenta izlaznog napona može se izraziti kao:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s \cdot D \quad (4.2.)$$

Izlazni napon V_0 se kontrolira pomoću područja djelatnosti stroja D , koji se postigne u prijelazu prebacivanja sklopke.

Područje djelatnosti stroja D možemo izraziti na sljedeći način:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} = T_{on} \cdot f \quad (4.3.)$$

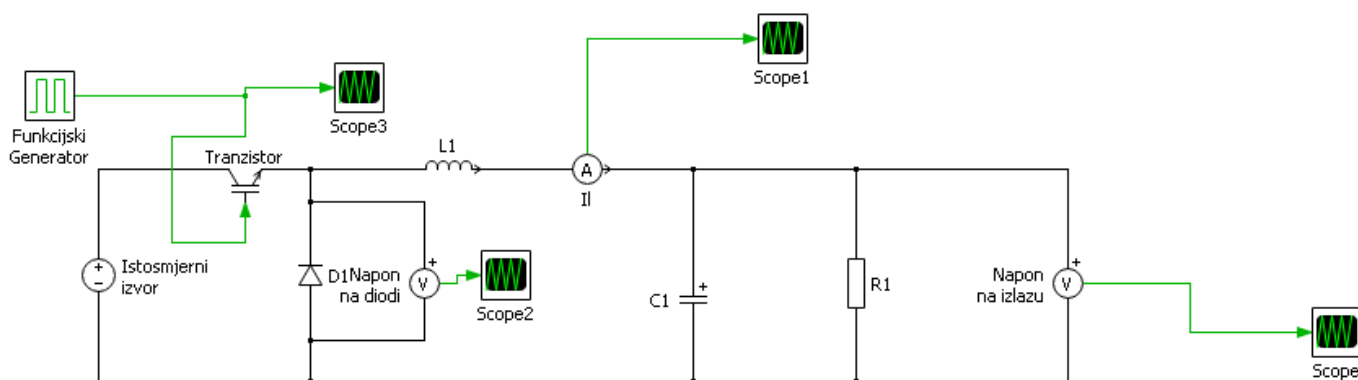
Gdje je : D = Područje djelatnosti stroja (duty ratio)

f = Frekvencija prebacivanja

Kad je prekidač otvoren on ne provodi struju, a kad se prekidač zatvori nema napona između stezaljki. Kod idealnog pretvarača ovakvog tipa sva snaga usmjerena je prema trošilu i energetska učinkovitost ovakvog pretvarača je 100%. U praksi situacija je malo drugačija, postoje određeni gubitci energije u prekidaču iz razloga što postoji napon između stezaljki kad je sklopka zatvorena i prekidač mora proći kroz linearno područje kad prebacuje iz jednog područja u drugo.[12]

4.2. Silazni pretvarač

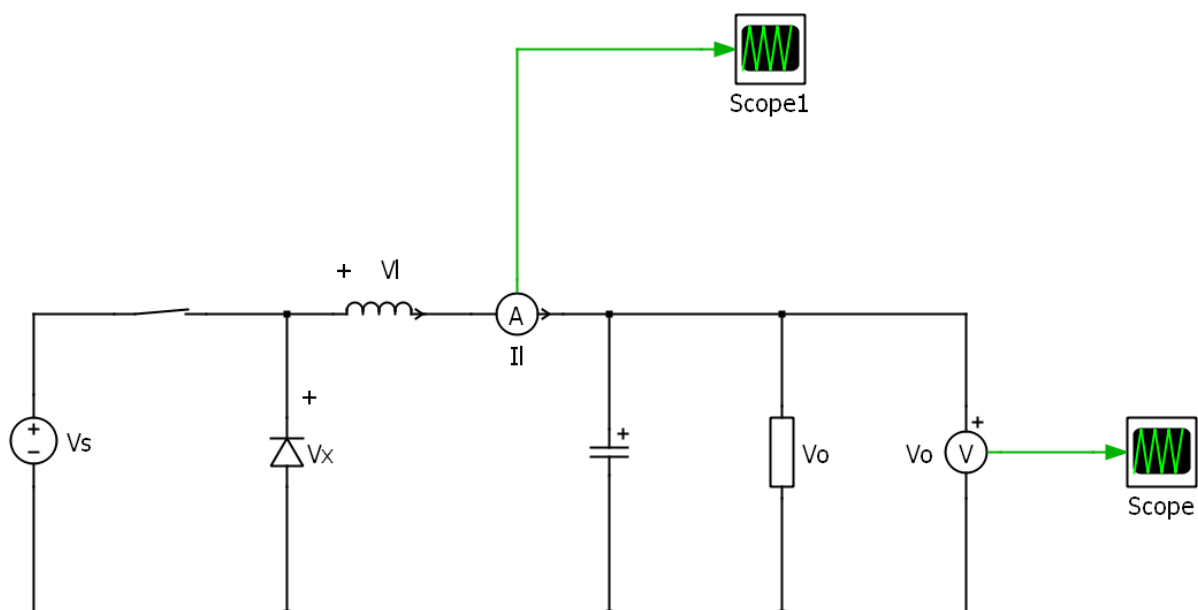
Silazni pretvarači koriste se u osnovnoj izvedbi istosmjernih motora koji se koriste za pokretanje električnih viličara. Podešavanje izlaznog napona na način koji je objašnjen na primjeru (4.2) i (4.3) kod pretvarača s prekidačem nije pogodan za regulaciju brzine istosmjernog motora. Za precizniju kontrolu brzine te bolju učinkovitost u osnovni pretvarač sa slike 4.2(b) se nakon prekidača nadoda LC nisko-propusni filter. Dioda osigurava tok struje I_c kad je sklopka otvorena, a kad se sklopka zatvori dioda postaje reverzno polarizirana. Na izlazu je onda napon manji nego na ulazu te se zato ovaj pretvarač zove silazni pretvarač. Kod električnih viličara se on koristi iz razloga da smanji napon baterije na potreban napon za pokretanje stroja i uz to je pogodan za regulaciju brzinu.



Slika 4.3. Shema silaznog pretvarača sa funkcijskim generatorom

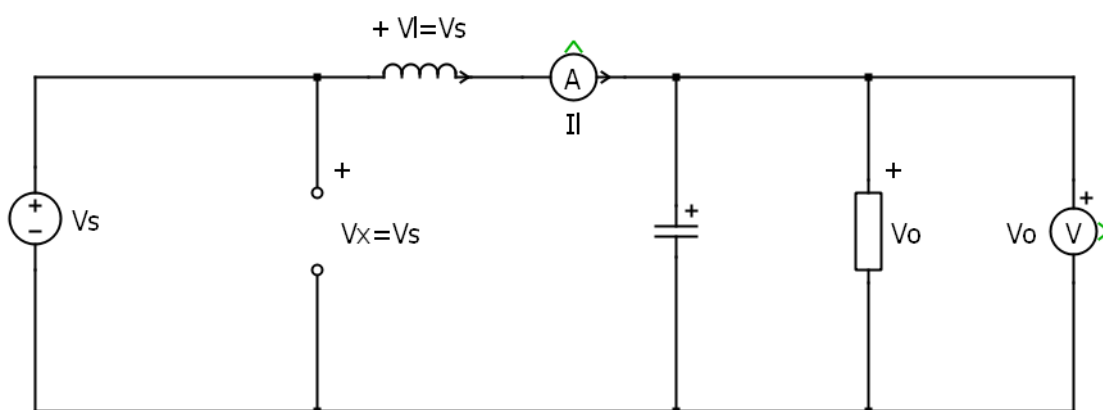
Kad bi nisko-propusni filter bio idealan, izlazni napon bi bio prosjek ulaznog napona na filter. Ulazni napon na filter V_x na slici 4.3. je jednak naponu V_s kad je sklopka zatvorena i nula kad je sklopka otvorena, osiguravajući struju I_L da bude pozitivna i da dioda bude propusno polarizirana. Kad bi se sklopka prebacivala periodično s područjem djelovanja D , napon na ulazu pretvarača bi bio $V_s \cdot D$ kao što je opisano jednačbom (4.2.). [8][12]

4.2.1. Analiza spoja sa zatvorenom sklopkom



Slika 4.4. Silazni pretvarač nakon što se zatvori sklopka

Kad se zatvori sklopka silaznog pretvarača slika (4.4.), dioda je reverzno polarizirana te sklop postane kao na slici (4.5.).



Slika 4.5. Nadomjesna shema sa zatvorenom sklopkom

Napon kroz zavojnicu V_L možemo izraziti na slijedeći način:

$$V_L = V_s - V_0 = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (4.4.)$$

Uvrstimo:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (4.5.)$$

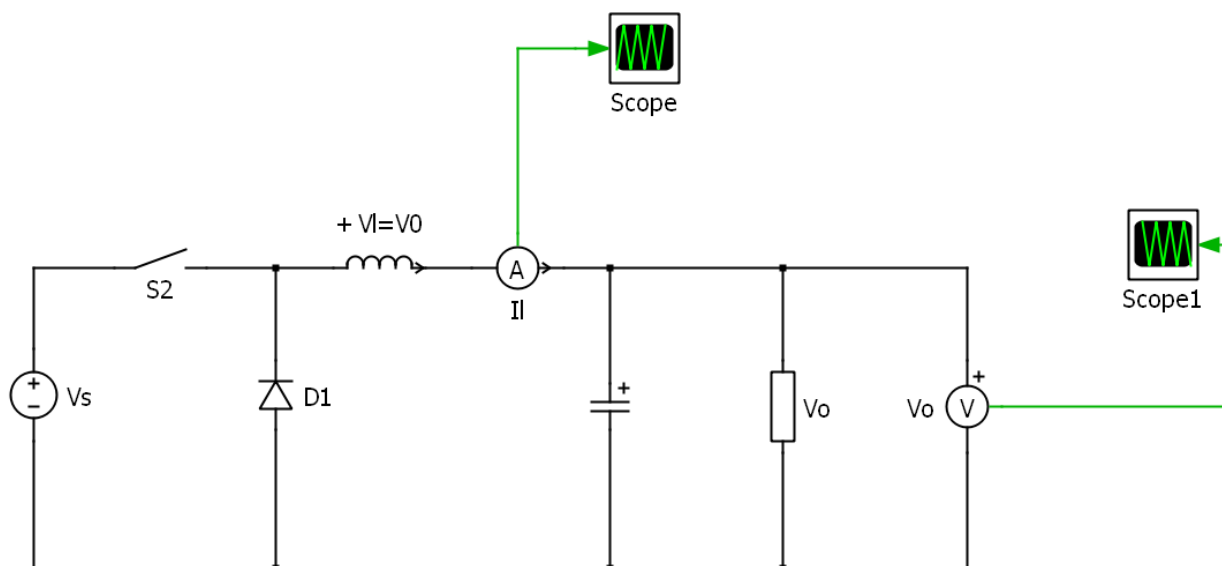
Budući da je derivacija struje kroz zavojnicu pozitivna, struja raste linearno.

Promjena struje dok je sklopka zatvorena izračunava se mijenjanjem prethodne jednačbe:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{\Delta T} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (4.6.)$$

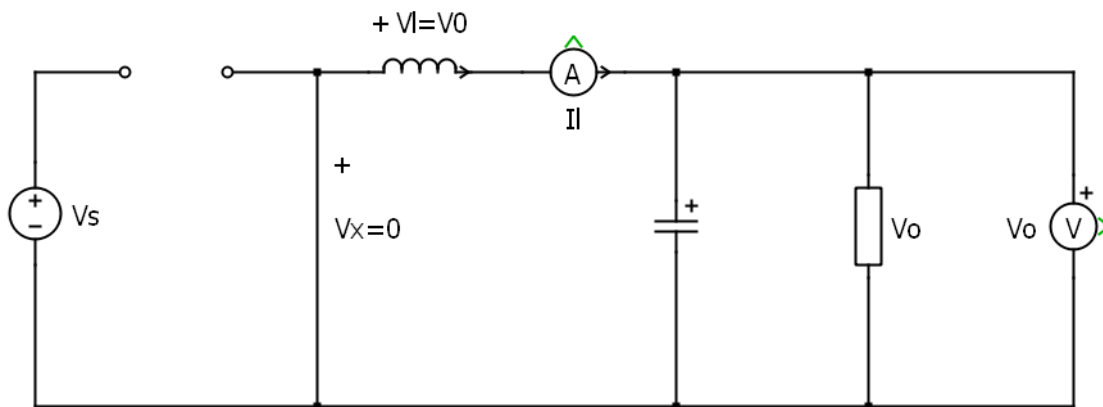
$$(\Delta i_L)_{\text{zatvorena}} = \left(\frac{V_s - V_0}{L} \right) DT \quad (4.7.)$$

4.2.2. Analiza spoja sa otvorenom sklopkom



Slika 4.6. Silazni pretvarač nakon što se otvori sklopka

Kad se sklopka silaznog pretvarača slika (4.7.) otvori, dioda postane propusno polarizirana.



Slika 4.7. Nadomjesna shema sa otvorenom sklopkom

Napon kroz zavojnicu V_L možemo izraziti na slijedeći način:

$$V_L = -V_0 = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (4.8.)$$

Uvrstimo:

$$\frac{di_L}{dt} \cdot l = v \quad (4.9.)$$

Kad se sklopka otvori derivacija struje kroz zavojnicu je negativna, pa struja linearno opada.

Promjenu struje dok je sklopka otvorena možemo izraziti kao:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_0}{L} \quad (4.10.)$$

$$(\Delta i_L)_{otvorena} = -\left(\frac{V_0}{L}\right)(1-D)T \quad (4.11.)$$

4.3. Način djelovanja

Rad u stabilnom stanju zahtijeva da se upravljanjem napona izvora preko zavojnice L kroz koju teče struja I_L na kraju ciklusa spusti napon na izlazu pretvarača, na razinu koja je potrebna za rad istosmjernog stroja za električni viličar. Za dobivanje izlaznog napona V_0 koristimo jednadžbu (4.13.)

Uvrstimo iz jednadžbe (4.7.) i (4.11.):

$$\left(\frac{V_s - V_0}{L}\right)(DT) - \frac{V_0}{L}(1 - D)T = 0 \quad (4.12.)$$

Rješenje za V_0 :

$$V_0 = V_s \cdot D \quad (4.13.)$$

Što je isti rezultat kao u izrazu (4.2.). To je dokaz kako silazni pretvarač uistinu spušta napon na izlazu u odnosu na napon na ulazu. Kod silaznih pretvarača napon na izlazu je manji nego napon na ulazu. Promjena izlaznog napona temelji se na naponu zavojnice. Budući da je napon na zavojnici nula tijekom jednog razdoblja, koristit ćemo slijedeći izraz za određivanje napona:

$$V_L = (V_s - V_0)Dt + (-V_0)(1 - D)T = 0 \quad (4.14.)$$

Iznos izlaznog napona ovisi jedino o ulaznom naponu i o području djelovanja D . Ako ulazni napon oscilira izlazni napon može se podešavati odgovarajućim reguliranjem faktora opterećenja D . Struja I_L koja teče kroz zavojnicu mora biti jednaka struji I_R koja teče kroz otpor. Budući da struja I_C koja teče kroz kondenzator mora biti nula u stabilnom stanju koristimo:

$$I_L = I_R = \frac{V_0}{R} \quad (4.15.)$$

Promjenu struje I_L možemo izračunati pomoću jednadžbi (4.7.) i (4.11.) te iz toga možemo izračunati minimalnu i maksimalnu vrijednost struje.

$$\begin{aligned} I_{min} &= I_L + \frac{\Delta I_L}{2} \\ &= \frac{V_0}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{L} (1 - D)T \right] = V_0 \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2 \cdot L \cdot f} \right) \end{aligned} \quad (4.16.)$$

$$I_{maks} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$= \frac{V_0}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{L} (1 - D) T \right] = V_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2 \cdot L \cdot f} \right) \quad (4.17.)$$

Gdje je: $f = 1/T$

Ispravnost pretvarača možemo jednostavno testirati pomoću izraza za I_{min} (4.17.). Budući da je minimalna vrijednost struje I mora biti pozitivna za istosmjerni napon, negativna vrijednost dobivena iz izraza (4.17) nije dozvoljena zbog diode i to nam ukazuje na izmjenični napon. Izraz (4.17.) koristimo za određivanje kombinacije induktiviteta L i frekvencije f , koje će u konačnici rezultirati istosmjernom komponentom struje potrebne za rad istosmjernog stroja. $I_{min} = 0$ je granica između istosmjerne i izmjenične komponente struje koju možemo prikazati na sljedeći način:

$$I_{min} = 0 = V_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2 \cdot L \cdot f} \right) \quad (4.18.)$$

$$(L \cdot f)_{min} = \frac{(1-D) \cdot R}{2} \quad (4.19.)$$

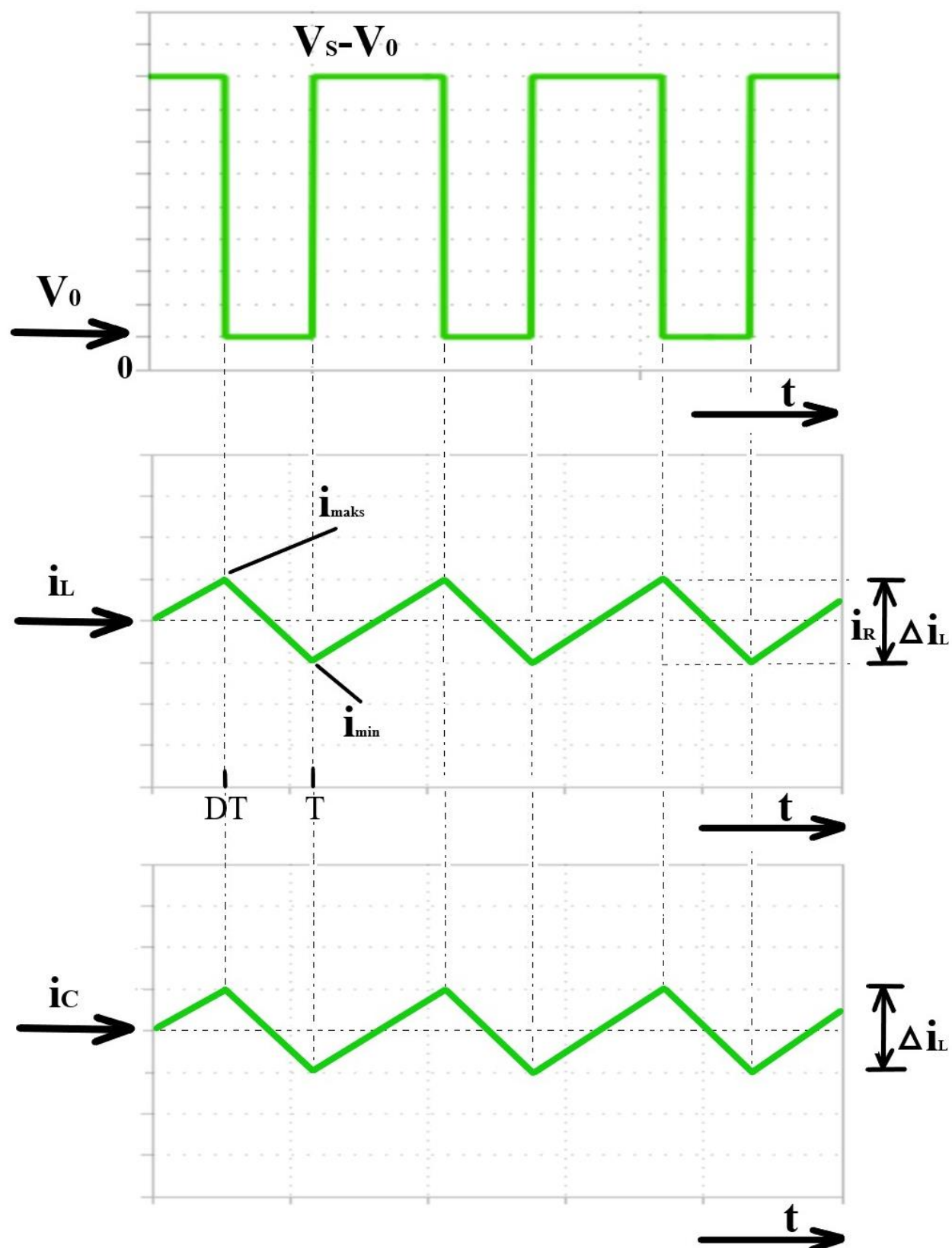
Nakon što se postigne poželjna frekvencija koristimo sljedeći izraz za podešavanje izlaznog napona za istosmjerni napon:

$$L_{min} = \frac{(1-D) \cdot R}{2f} \quad (4.20.)$$

Gdje je: L_{min} = minimalni iznos induktiviteta zavojnice potreban za istosmjerni napon

U praksi za postizanje istosmjernog napona potrebnog za rad električnog viličara iznos induktiviteta zavojnice L treba biti veći od L_{min} .

Svrha silaznog pretvarača je da spusti napon baterije na napon potreban za rad stroja. Mjerenje je izvršeno sa naponom baterije 12V, induktivitetom zavojnice 0.5 mH, kapacitet kondenzatora je $100 \cdot 10^{-6}$ F, te otporom tereta 1k Ω .



Slika 4.8. Graf prikazuje napon V_0 i struje i_L i i_C kroz cikluse silaznog pretvarača koje generira funkcijski generator. Struja i_L ($0.2A/d.s., 0.5s/d.s.$), struja i_C ($0.2A/d.s., 0.5s/d.s.$) i napon V_0 ($1V/d.s., 0.5s/d.s.$)

5. ISTOSMJERNI STROJ

Induciranjem napona na vodič koji leži okomito na magnetsko polje, zbog struje koja teče u vodiču i struje u magnetskom polju rezultirat će rotacijom. Postoje dva uvjeta koji su nužni da se ispune kako bi proizveli silu na vodiču. Kroz vodič mora teći električna struja i mora biti unutar magnetskog polja. Kad su uvjeti ispunjeni oko vodiča će nastati sila koja će pokušati premjestiti vodič u smjeru okomito na magnetsko polje. To je osnovna teorija kako funkcionira rad istosmjernog motora.[4]

Sila na vodiču može se izraziti na sljedeći način:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (5.1)$$

Gdje je F = sila (N)

B = jakost magnetskog polja (T)

I = struja kroz vodič (A)

l = duljina vodiča (m)

Smjer sile na vodič kroz koji teče struja u magnetskom polju određuje se pravilom lijeve ruke.²
[5]

² Pravilo lijeve ruke : Postavimo lijevu ruku tako da silnice magnetskog polja ulaze u dlan, a smjer ispruženih prstiju da se podudara sa smjerom struje. Ispruženi palac tada će pokazivati smjer sile koja djeluje na vodič.

5.1. Princip rada istosmjernog stroja

Razmotrimo zavojnicu u magnetskom polju jakosti B . Kad su krajevi zavojnice povezani preko izvora odnosno baterije, struja teče kroz njih. Sila je izvršena na zavojnici kao rezultat postojanja magnetskog polja i električne struje. U stvarnom istosmjernom motoru, na rotor su namotane nekoliko takvih zavojnica na koje djeluje sila što u konačnici rezultira rotacijom. Što je veća struja kroz žicu ili jakost magnetskog polja B rotacija će biti veća zbog toga što je sila veća.

Istodobno se proizvodi moment sile te se vodiči kreću u magnetskom polju. Na različitim položajima mijenja se magnetski tok povezan s vodičem, što uzrokuje induciranjem električnog magnetskog toka (emf)

(5.2)

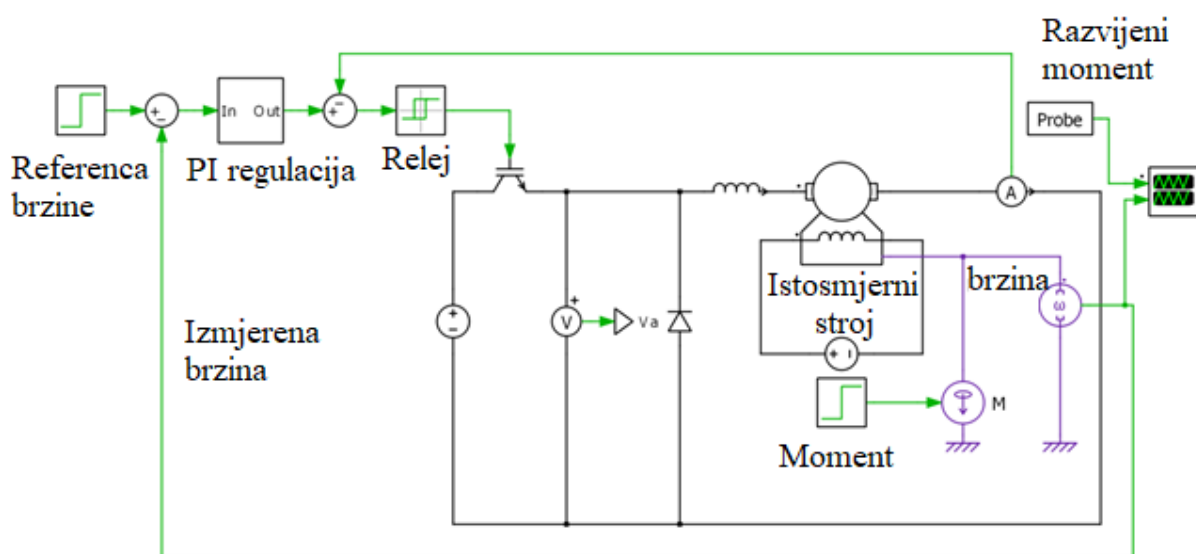
$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

Gdje je e = električna komponenta polja

Φ = magnetski tok (Wb)

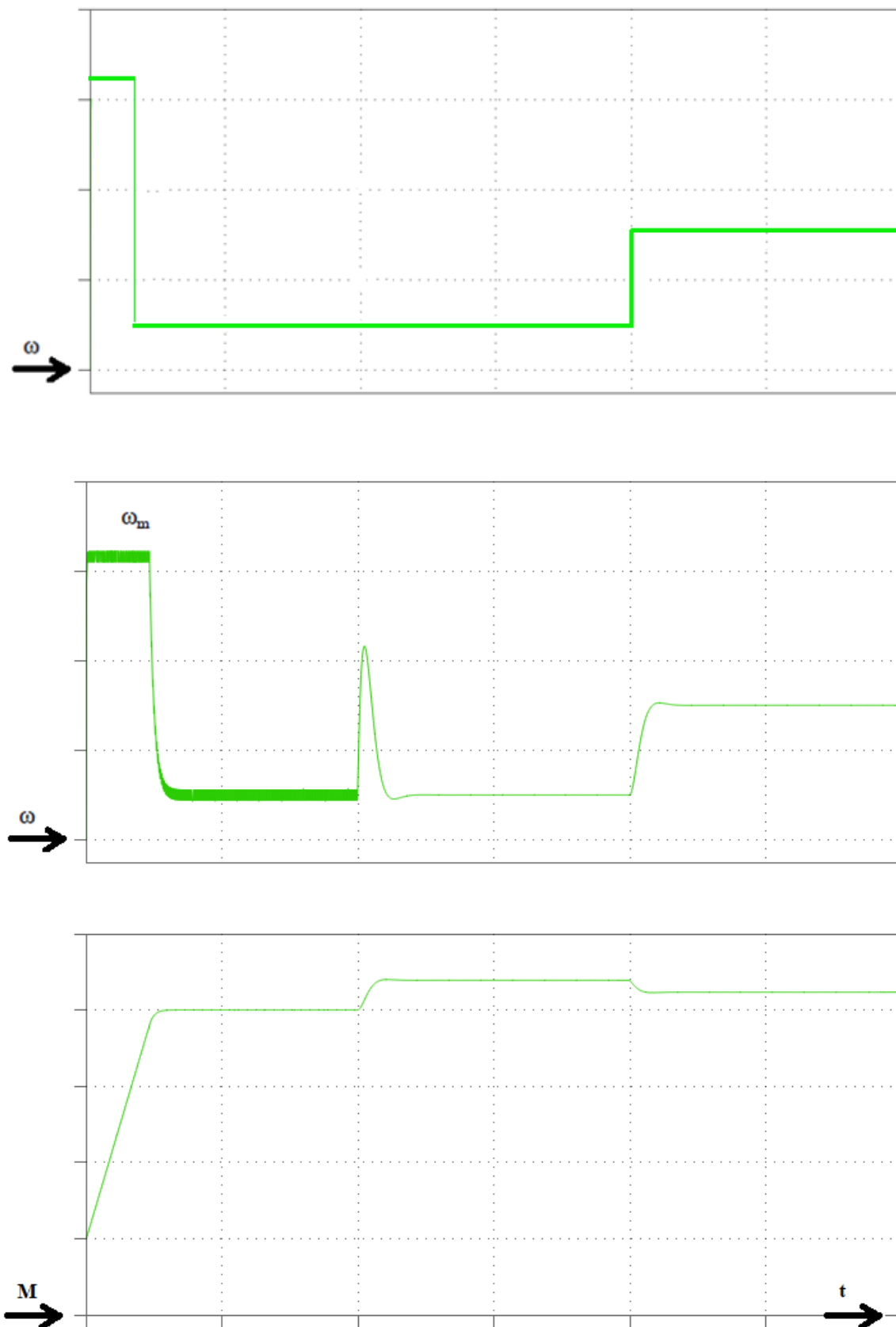
t = vrijeme (s)

Ovaj izraz nazivamo "Faradayev zakon indukcije". Predznak minus je povezan sa smjerom induciranog napona. Takav je smjer iz razloga da struja koja nastaje zbog induciranog napona stvara magnetsko polje koje djeluje suprotno promjeni magnetskog toka, odnosno nastoji spriječiti gibanje koje je nastalo zbog inducirane struje. To pravilo za smjer inducirane struje zovemo "Lenzovo pravilo". Magnetsko polje koje djeluje suprotno promjeni magnetskog toka u konačnici rezultira usporavanje rotora. Na kraju se rotor usporava tako da snaga koju stvara magnetsko polje ($F = B \cdot I \cdot l$) bude jednaka sili opterećenja koja se primjenjuje na osovini.[5]



Slika 5.1. Shema istosmjernog motora, regulacija brzine stroja, ref. brzine i moment sile upravlja se pomoću referentne vrijednosti

Ref. brzine



Slika 5.2. Prikaz odnosa brzine motora i momenta sile, brzina motora ω_m (20 rad/d.s., 0.5s/d.s.) i moment sile motora M (50Nm/d.s., 0.5s/d.s.)

5.2. Moment sile

Jednadžba momenta sile razvijena u istosmjernom motoru može se izvesti na sljedeći način:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (5.3)$$

Imajte na umu da su B^3 i I^4 vektorske veličine.

Budući da je: $B = \Phi/A$ gdje je A u području zavojnice. Stoga je moment za zavojnicu s više okretaja sa strujom armature I_a :

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_a \quad (5.4)$$

Gdje je M = Moment sile (Nm)

K = Konstanta zavojnice

Φ = Magnetski tok (Wb)

I_a = Struja armature (A)

Moment sile (M) je funkcija sile i udaljenosti, jednadžba (5.4) spaja sve konstante (npr.: dužina, smještaj i udaljenost zavojnice) u jednu konstantu koju označavamo slovom K .

Stvorena mehanička snaga je produkt motorne sile (M) i mehaničke brzine uzrokovane rotacijom (ω_m) koju označavamo P_m :

$$\begin{aligned} P_m &= \omega_m \cdot M \\ &= \omega_m \cdot K \cdot \Phi \cdot I_a \end{aligned} \quad (5.5)$$

Zanimljivo je naglasiti kako se istosmjerni motori mogu koristiti kao motor te kao generator [5][6].

³ B = jakost magnetskog polja (T)

⁴ I = struja (A)

6. REGULACIJA ISTOSMJERNOG STROJA

Istosmjerni motor u usporedbi s izmjeničnim motorom je puno lakše kontrolirati, zbog čega ga koristimo za pogon električnih viličara te ostalih industrijskih vozila i pomagala. Mnogi aparati i vozila zahtijevaju kontrolu brzine u širokom rasponu. Iz formule za napon E_b :

$$E_b = K \cdot \Phi \cdot \omega_m = V_T - I_a \cdot R_a \quad (6.1)$$

Izlučimo brzinu motora ω_m te dobijemo:

$$\omega_m = (V_T - I_a \cdot R_a) / K \cdot \Phi \quad (6.2)$$

Iz tog izraza možemo zaključiti kako brzinu električnog stroja reguliramo pomicanjem napona V_T , magnetskog toka Φ te otpora armature R_a [11].

6.1. Učinkovitost stroja

Učinkovitost stroja može se izračunati kao omjer izlazne snage i ukupne ulazne snage. Ukupnu ulaznu snagu računamo kao:

$$P_{ul} = V_T \cdot I_a + V_f \cdot I_f \quad (6.3)$$

Gdje je I_a struja armature dovedena sa izvora napajanja. Snaga koja se izgubi prilikom rotacija je približno proporcionalna brzini stroja [8]. Možemo to napisati kao: Snaga na izlazu = Proizvedena snaga - Gubitci prilikom rotacije. Učinkovitost stroja istosmjernog motora je:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \times 100\% \quad (6.4)$$

Uz gubitke u armaturi i polju, konačni izraz za učinkovitost stroja je:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul} + P_{gub-arm} + P_{gub-polja} + \text{Gubitci zbog rotacije}} \quad (6.5)$$

6.2. Promjena napona u režimu rada električnog viličara

Napravljen je test promjene napona kod električnog viličara marke Jungheinrich. Mjerenja su izvršena za pogonski istosmjerni stroj i za istosmjerni stroj koji pokreće hidrauliku.



Slika 6.1. Pločica s oznakom napona i snage električnog viličara

S pločice je vidljivo da se radi o tipu viličara s istosmjernim strojem od 24V te snagom 2,2kW.

U sljedećem koraku izmjeren je napon trakcijske baterije bez opterećenja na pogonskom odnosno hidrauličkom motoru. Mjerni instrument spojen je na stezaljke trakcijske baterije te smo dobili očitavanje od 24,4V.



Slika 6.2. Izmjereni napon na bateriji neopterećenog viličara

Nakon što je obavljeno mjerenje napona na bateriji kod neopterećenog viličara, sljedećim mjerenjem izmjeren je napon na bateriji kod opterećenog viličara.

Voltmetrom su dobiveni rezultati prikazani na slici 2.13., uočljiva je razlika između napona neopterećenog i opterećenog viličara. Uočena razlika na voltmetru je 0.9V.



Slika 6.3. Izmjereni napon na bateriji opterećenog viličara

U trećem, ujedno i zadnjem mjerenju voltmetrom izmjerena je razlika napona na pogonskom istosmjernom motoru električnog viličara. U testu je dokazano kako se promjenom brzine promjenio i napon. Na slikama 2.14., 2.15., i 2.16. možemo uočiti kako viličar ubrzava, ujedno se podiže i napon na motoru.



Slika 6.4. Pogonski istosmjerni motor električnog viličara, te napon na pokretanju



Slika 6.5. Postupno ubrzavanje viličara prikazuje veći napon na voltmetru



Slika 6.6. Napon pri maksimalnoj brzini

7. ELEKTRIČNI VILIČAR



Slika 7.1. Električni viličar marke Jungheinrich

Električni viličar slika 7.1. služi za prijenos paleta u skladištu. Viličar je snage 2.2 kW i napona baterije 24V.



Slika 7.2. Baterija električnog viličara i izmjereni napon na voltmetru

8. ZAKLJUČAK

Viličari su ključni element za obavljanje poslova u distribucijskim centrima i skladištima. Nužno je da ove strukture budu dizajnirane tako da odgovaraju učinkovitom i sigurnom kretanju viličara. Kritična karakteristika u prijenosu tereta je njegova nestabilnost. Viličar i teret moraju se smatrati jedinicom s kontinuirano promjenjivim težištem sa svakim kretanjem tereta. Dizajn viličara ovisi o najvećoj dopuštenoj težini tereta koju može prenositi.[12]

Kada je riječ o industrijskoj opremi, čimbenici koji su od vitalnog značaja za električna vozila su upravljivost, udobnost, emisija i vrijeme rada u razmacima. Danas postoji velika potražnja za vozilima koja se ne oslanjaju isključivo na fosilna goriva. Ljudi su mnogo više svjesni sve većih problema sa zagađivanjem okoliša, a uvedeni su propisi za tvrtke kako bi potražili ekološki prihvatljivija rješenja. Uz zagađivanje okoliša cijene goriva su se utrostručile u posljednjih pet godina. Učinkovita zamjena za gorivo je električna energija. Dugi niz godina električni viličari bili su ograničeni na prijevoz manjih tereta, a njihova upotreba bila je isključivo za unutarnju upotrebu. U posljednjih deset godina došlo je do napretka koji je omogućio električnim viličarima da zauzmu mjesto mnogih viličara sa motorom s unutarnjim izgaranjem. Progresivan napredak otkrio je činjenicu da smo koristili vrlo neučinkovit proces za napajanje stroja. Prvi stroj napravljen je sa istosmjernim motorom. Napravljen je za napajanje uređaja stalnom količinom napona. S ovim sustavom bilo je teško podešavati količinu energije potrebnu za rad, a zbog toga su se morali koristiti razni bakreni vodovi za uređaje koji su zahtijevali više ili manje napona. To je za korisnika bilo neisplativo i bilo je potrebno smisliti efikasniji način. Zbog tih problema proizvođači su daljnjim napretkom osmislili sustav za napajanje sa trofaznim izmjeničnim motorom.[13][14]

Danas je trofazni izmjenični motor u potpunosti je zamijenio istosmjerni motor. S izmjeničnim motorom u odnosu na istosmjerni motor velike količine energije mogu se prenijeti na veće udaljenosti, samim time njegova učinkovitost je puno veća. Najveći problem izmjeničnog motora bio je postizanje promjenjive brzine motora. Elektronika potrebna za izmjenični motor bila je fizički prevelika i preskupa za industrijsko vozilo. Zbog mnogih tehnoloških dostignuća kroz vrijeme izmjenični motori postali su daleko kompaktniji, jeftiniji i energetske učinkovitiji [15].

LITERATURA

- [1] Linde: Forklift Trucks. (2000)
- [2] Johnson, J.: OSHA Orders Forklift Training. Transport Topics, Trucking's Electronic Newspaper (1998)
- [3] Division „Battery-Powered Drives“ at ABM Greiffenberger (2006)
- [4] Allan R. Hambley., Electrical Engineering Principles and Applications (1996)
- [5] Giorgio Rizzoni. Principles and Applications of Electrical Engineering (1993)
- [6] Hughes, J.: Intelligent transportation system. Mechanical Engineering, New York (1999)
- [7] Johnson, J.: OSHA Orders Forklift Training. Transport Topics, Trucking's Electronic Newspaper (1998)
- [8] Komastu: Advanced Designs for Higher Productivity. (2000)
- [9] Estabilio, D: Powered Industrial Truck Operator Training (1999)
- [10] Tvrtka „Mlakar viličari d.o.o.“
- [11] Miková, L., Virgala, I., & Kelemen, M.. Speed Control of DC Motor. American Journal of Mechanical Engineering (2016)
- [12] Hart. W. D.. Power electronics. New York: McGraw-Hill (2011)
- [13] Hall, L: Forklift Fatalities. Safety Meeting Outline (1996)
- [14] Larsson, TJ & Rechnitzer, G: Forklift trucks- analysis of severe and fatal occupational injuries, critical incidents and priorities for prevention (1994)
- [15] Robertson, R: Power Play: Big score with these new powered industrial trucks. (2000)

SAŽETAK

U radu je opisan električni viličar s istosmjernim motorom. On koristi trakcijske baterije za napajanje i silazni pretvarač za dobivanje potrebnog napona za rad sustava. Detaljno je opisan istosmjerni motor sa serijskom i paralelnom uzбудom, konstrukcija i funkcionalnost samog stroja s učinkovitosti i parametrima iskoristivosti. Istražena su komercijalna rješenja istosmjernih pretvarača koji se koriste u viličarima te je teorijsko razmatranje nadopunjeno simulacijom. Simulacijom je prikazano podešavanje napona na izlazu sklopa, odnosno kako silazni pretvarač spušta napon sa ulaza na napon koji je potreban na izlazu kako bi stroj funkcionirao.

Ključne riječi: električni viličar, istosmjerni stroj sa serijskom uzбудom, istosmjerni stroj sa paralelnom uzбудom, silazni pretvarač, baterije

SUMMARY

In this paper there is an electric forklift with a DC motor analysis. It uses traction batteries for power supply and step down converters to obtain the required voltage for system operation. It is detailed described a DC motor with serial and parallel excitement, construction and functionality of the machine itself with efficiency and usability parameters. Commercial solutions of DC inverters used in forklifts were investigated and theoretical considerations supplemented by simulation. The simulation shows the setting of the voltage at the output of the circuit, how the step-down inverter lowers the input voltage from the input voltage needed to operate the machine.

Keywords: electric forklift, DC motor serial excited, DC motor parallel excited, step-down inverter, battery