Зоран Ивановић
Евгеније Аџић

Хибридна и електрична возила

Прво издање
- презентације за предавања –

Нови Сад 2016.

Наставно-научно веће Факултета које је одржано дана 30.03.2016. године, на основу предлога Одлуке Савета за библиотечку и издавачку делатност бр.: 014-112/102, је одобрило коришћење РРТ „Хибридна и електрична возила“, чији су аутори Зоран Ивановић и Евгеније Аџић, као помоћно наставно средство на студијском програму *Механизација и конструкционо машинство.*

Хибридна и електрична возила

План предмета

План предмета

- Увод
  - Историја електричних аутомобила
  - Утицај на окружење
- Врсте електричних возила и њихова архитектура
  - Електрична возила заснована на батеријама
  - Хибридна електрична возила
  - Возила заснована на горивним ћелијама
  - Возила заснована на замајцима и суперкондензаторима
  - Електрична возила на соларни погон
  - Електрична возила будућности

План предмета

- Батерије, замајци и суперкондензатори
  - Параметри батерија
  - Врсте батерија и њихова примена
    - Оловне батерије
    - Батерије на бази никла
    - Натријумове батерије
    - Литијумске батерије
    - Батерије метал – ваздух (Metal- Air)
    - Суперкондензатори и замајци
  - Дизајн и пројектовање батерија
  - Пуњење батерија
  - Батерије у електричним возилима
  - Моделовање батерија

План предмета

- Електрично напајање
  - Инфраструктура за пуњење електричних возила
  - Различити концепти пуњења батерија
- Горивне ћелије
  - Горивне ћелије на бази водоника
  - Термодинамика горивних ћелија
  - Ефикасност горивних ћелија
- Водоник као гориво, производња и складиштење

План предмета

- Електричне машине и управљање
  - Машине једносмерне струје
  - Машине једносмерне струје без четкица
  - Асинхроне машине
  - Switch reluctance машине
  - Хлађење, ефикасност и прорачун мотора
  - Електричне машине за хибридна возила

План предмета

- Моделовање електричних возила
  - Погонска напрезања
  - Моделовање убрзања возила
  - Моделовање погонског циклуса
- Пројектовање сустава електричних возила
  - Аеородинамика
  - Шасија и дизајн
  - Дизајн помоћних система
- Ефикасност и утицај на околину

План предмета

- Обновљиви извори електричне енергије
  - Соларна енергија
  - Енергија ветра
  - Енергија таласа
  - Биомаса
  - Геотермална енергија
- Примери електричних возила
- Будућност електричних возила

План предмета

- Хибридна електрична возила
  - Концепт
  - Архитектура
    - Серијска хибридна ел. возила
    - Паралелна хибридна ел. возила
  - Дизајн и управљање серијским и паралелним хибридним возилима
  - Основе регенеративног кочења

Хибридна и електрична возила

Увод

Увод

- Значај електричних возила
  - Аспект очувања околине и смањења енергетске зависности, глобално загревање
- Кратка историја
  - Michael Faraday, 1821.год. – откриће које је довело до проналаска ел. мотора.
  - William Sturgeon, 1832. год. – откриће прве комутаторске машине
  - Robert Davidson, 1837. – откриће прве ел. локомотиве (непуњиве батерије), прва елитрификована линија 6,4 km, Baltimore – Belt line

Увод

Историјат

- Електрични трамваји и тролејбуси су први пут експериментално инсталирани у Санкт Петерсбургу, Русија, 1880. год.
- Први регуларни тролејбус је инсталиран је у предграђу Берлина 1881. год. од стране Siemens-а.
- До почетка првог светског рата многи градови широм света су имали трамвај.

Лондонски трамвај , 1910 год.

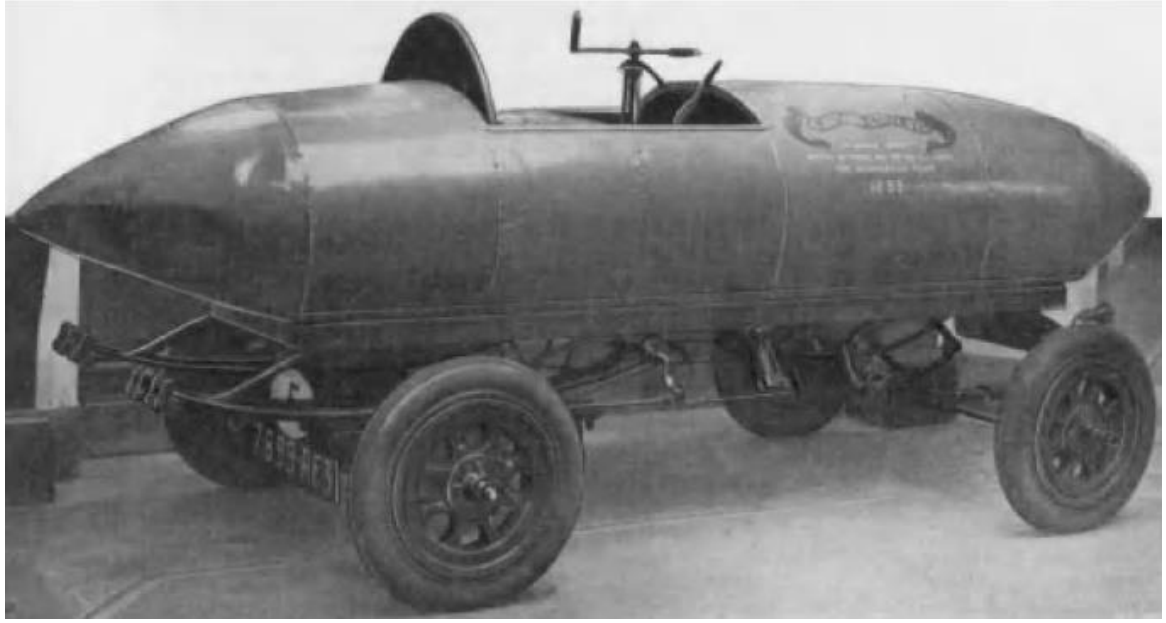
Историјат

- Прошло је скоро пола века до појаве батерија које би се могле користити у комерцијалним електричним возилима
- Електрично возило, направљено од стране Baker Runabout-а, у USA извезено је у Немачку захваљујући оснивачу компаније Varta Batteries

- Прошло је скоро пола века до појаве батерија које би се могле користити за аутономну примену у ел. возилима

Историјат

- Прво електрично возило које је могло да развије брзину преко 100 km/h , 1899. год
- Крајем 1900. године са масовном продукцијом пуњивих батерија, електрична возила су почела да се користе широм света. Приватни ел. аутомобили су били права реткост, међутим за друге примене су се користили навелико.



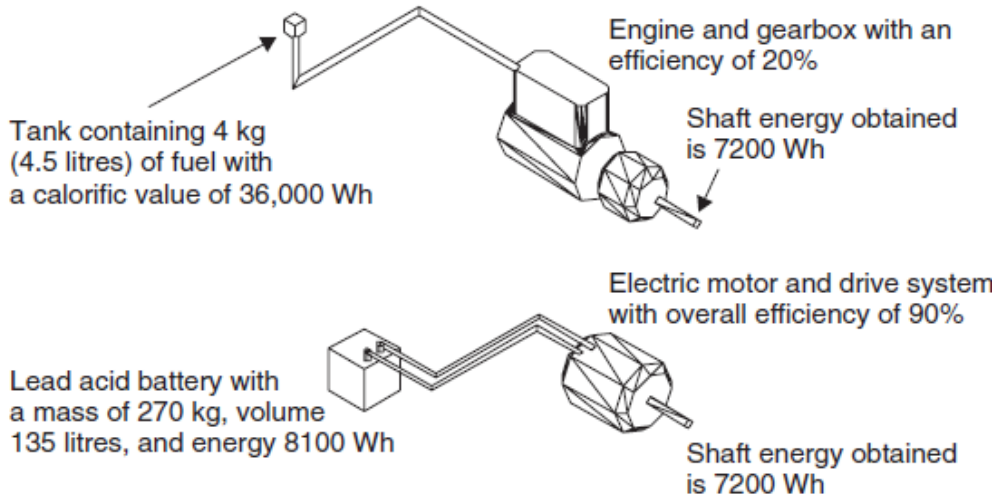
Историјат

- Почетком двадесетог века постале су јасне предности и мане електричних возила и дошло се до закључка да се морају истражити и карактеристике других видова возила. Ту се пре свега мисли на моторе са унутрашњим сагоревањем и парне машине.
- У то време електрична возила су била релативно поуздана и покретала су се тренутно, док су се СУС мотори палили преко полуге, ручно, били су неефикасни и имали су високи степен издувних гасова. У случају парних машина, такође је проблем био ефикасност.
- 1920. године је на тржишту постојало неколико стотина хиљада електричних возила: аутомобили, ванови, такси, доставна возила и аутобуси.
- 1911. године драстичан пад цене нафте и открића везана за паљење СУС мотора стављају СУС моторе у први план.

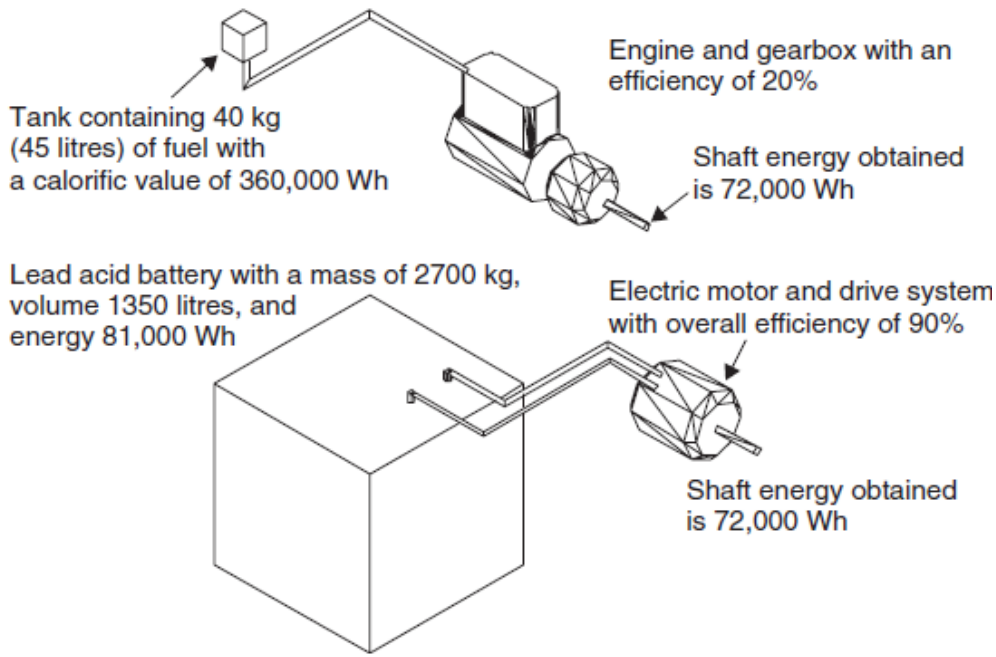
Историјат

- Разлози за успех СУС мотора у односу електричне
  - Специфична енергија нафте у односу на батерије је јако велика (9000 Whkg−1 наспрам 30 Whkg−1 код батерија)
  - Ефикасност нпр са 4.7 литара нафте се могло прећи око 50 км, док би код електричних аутомобила за то требала оловна батерија масе 270 kg
  - Аутономност је на страни СУС мотора, довољно је повећати резервоар, док код електричних мора да се убаци још једна батерија
  - Што је батерија тежа више енергије је потребно тако да се не може једноставно само удвостручити батерија.
  - Регенеративно кочење – плус код батерија
  - Проблем поновног пуњења батерија - потребно неколико сати, док се бензин наточи за неколико минута.
  - Цена електричних аутомобила
  - Ограничен век трајања батерија

Vehicle with a range of about 50 km



Vehicle with a range of about 500 km



Историјат

- Концепт хибридног возила уведен 1900. године од стране Ferdinand Porsche-a

Lohner Porshe – прво хибридно возило

Средина XX века

- Развој СУС мотора бацио је у други план развој електричних аутомобила, трамваја и тролејбуса, док су локомотиве нашле своју примену.
- Предности електричних возила – емисија штетних гасова, и рад мотора без звука.
- Електрична колица за људе са инвалидитетом су нашла примену, пре свега због тога што мане које се приписују генерално електричним возилима овде не играју улогу – не захтева се велика аутономија (довољно је неколико километара)
- Електрични аутомобили и даље су се користили као доставна возила због предности у условима крени – стани где су се СУС мотори показали као неефикасни

Крај XX и почетак XXI века

- Акценат је стављен на развој брзих возова. Први брзи електрични воз је развијен у Јапану 1964. године. Превалио је раздаљину Tokyo – Osaka од 515.4 km за 4 сата.
- Данашњи возови у Јапану достижу брзине преко 300 km/h. Тренутно превозе 151 милион путника годишње.
- Брзи возови се успешно користе и у другим државама,попут Француске, Кине итд. У Француској је постигнута највећа брзина од 548,8 km/h – воз Grande Vitesse.
- Левитациони возови у Јапану – рекордна брзина од 581 km/h воз JR-Maglev, за ову примену се користе линеарни мотори

Крај XX и почетак XXI века

JR-Maglev на тест шинама, Јапан 2005

- Брзина кретања је ограничена шинама
- Брзина и даље тежи повећању
- Предности чак и у односу на авио превоз - за краће релације

Крај XX и почетак XXI века

- У последње време се види и пораст броја трамваја
- Пример трамваја у Манчестеру

Крај XX и почетак XXI века

- Највећа промена у технологији која се десила у последње време јесте развој литијум-јонске батерије чија је специфична енергија знатно виша, а и време пуњења и пражњења је знатно краће. Ово је неоспорно довело до наглог повећања интересовања компанија за производње електричних и хибридних аутомобила.

Тесла спортски аутомобил

Крај XX и почетак XXI века

- Највећа светска имена на тражишту електричних аутомобила: Renault, Nissan, Mitsubishi . . .

Nissan Leaf

Mitsubishi i-MiEV

Крај XX и почетак XXI века

- Развој хибридних возила: Toyota, Chevrolet
- Chevrolet Volt – пример хибридног аутомобила којио може да пуни батерије из ел. мреже, а СУС мотор служи као додатак за дужа путовања.

Chevrolet Volt

Крај XX и почетак XXI века

- Електрични аутомобили засновани на горивним ћелијама. Принцип рада је заснован на водонику који треба да буде ускладиштен унутар горивне ћелије. Предност у односу на литијумске батерије јесте знатно већа аутономност.
- Постоје и аутобуси засновани на горивним ћелијама

Honda FCX Clarity

Крај XX и почетак XXI века

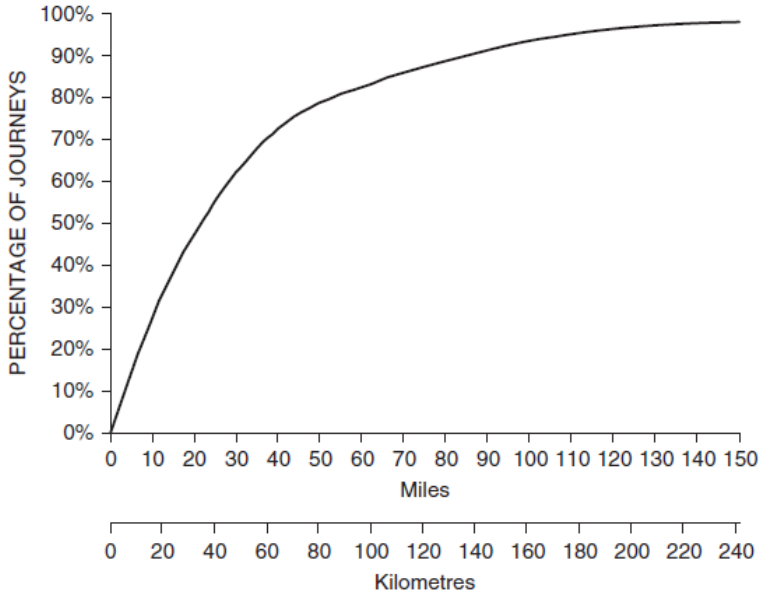
- Електрични бицикли и мотори
- Огроман раст у последње време . Нпр. у Кини са 56000 1998. године на 21 000 000 у 2008.години.

Утицај ел. возила на околину

- Чување енергије и свеукупно смањење емитовања CO_2
- Смањење локалног загађења насеља и градова
- Смањења зависности од нафте

Коришћење електричних возила

- Време пуњења батерије и могућа пређена километража
  - У скоријој будућности није извесно да ће се ова два параметра значајно поправити



Дужина пређеног пута у Америци

Хибридна и електрична возила

Електрична возила

Електрична возила

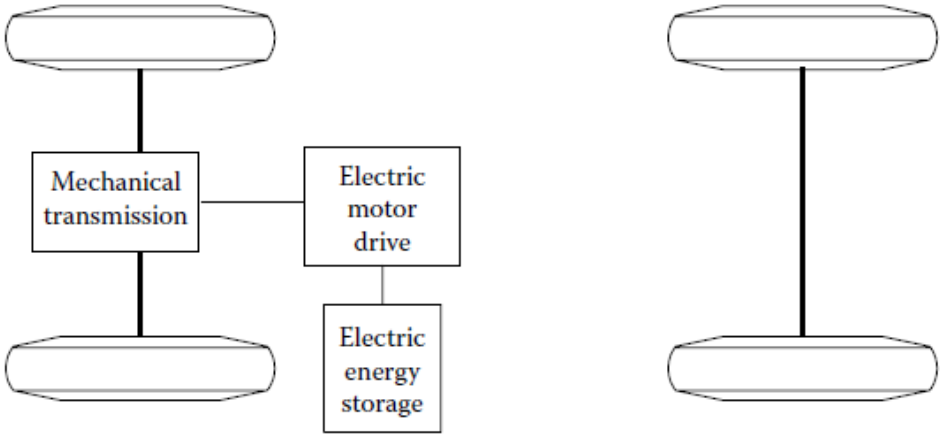
- Електрична возила користе електрични мотор као погонски и одговарајући уређај за складиштење као извор ел.енергије.
- Уређаји за складиштење:
  - Хемијске батерије
  - Гориве ћелије
  - Суперкондензатори
  - Замајци
  - Енергија из ел.мреже
  - Соларна електрана

Електрична возила

- Предности електричних возила у односу на СУС моторе
  - Не постоји емисија штетних гасова
  - Висока ефикасност
  - Енергетска зависност
  - Тих и углађен рад мотора

Врсте електричних возила

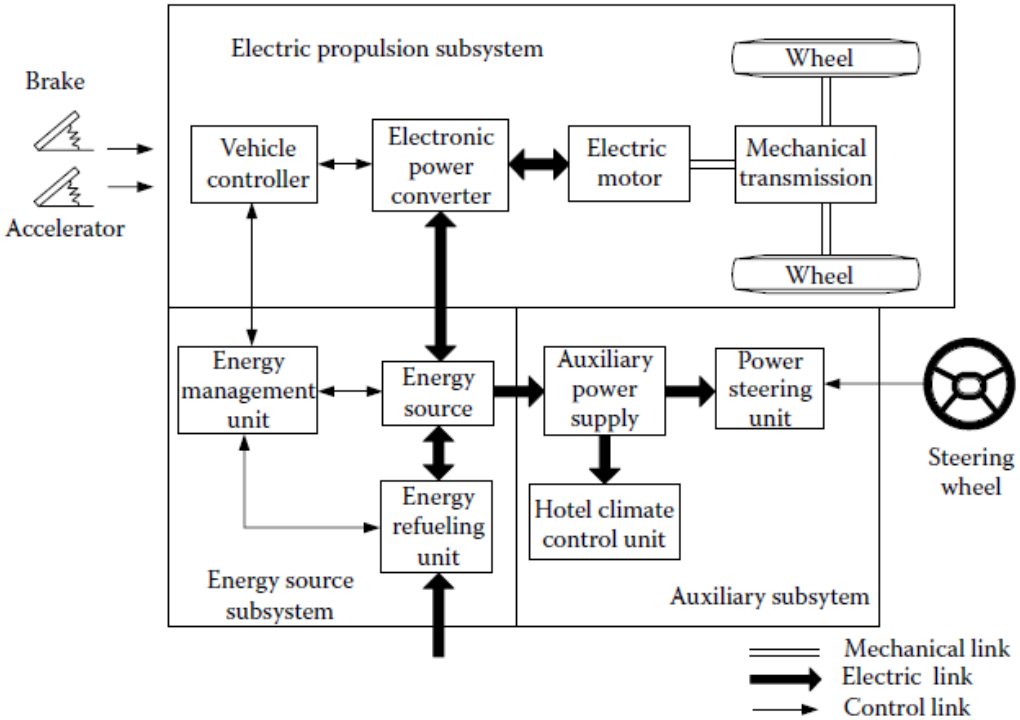
- У почетку су електрична возила настала тако што су СУС мотор и резервоар за гориво замењени са уређајем за складиштење и ел. мотором, док су остале компоненте остале исте



- Мане овог система:
  - Велика маса возила
  - Смањена флексибилност
  - Деградација карактеристика

Савремени концепт ел.возила

- Основни делови:
  - Електрични погонски подсистем
  - Напајање – уређај за складиштење
  - Помоћни подсистем



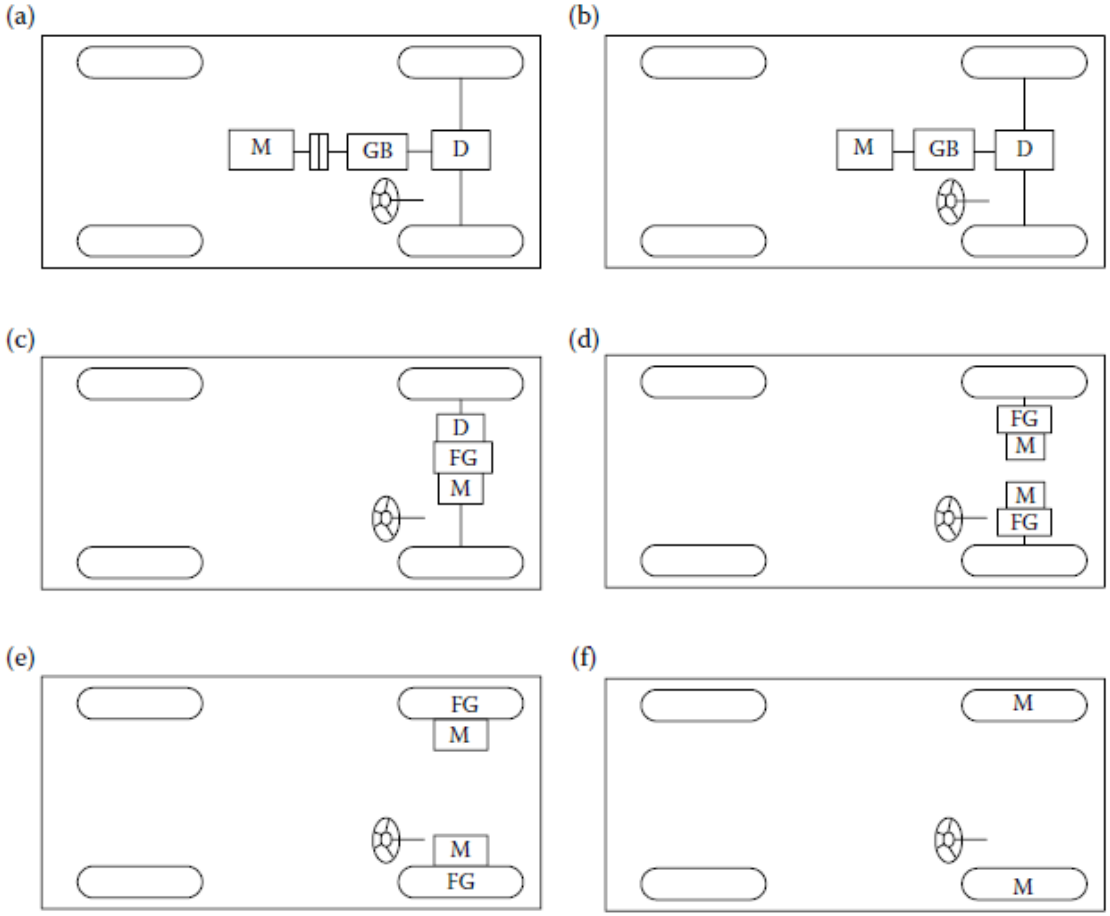
Поједини подсистеми

- Погонски подсистем:
  - Контролер возила (vehicle controller)
  - Претварач енергетске електронике
  - Електрични мотор
  - Механички трансмисиони систем
- Енергетски подсистем:
  - Извор енергије (нпр. батерија)
  - Контролер тока енергије
  - Уређај за пуњење
- Помоћни подсистем :
  - Управљачка јединица
  - Помоћна јединица

Поједини подсистеми

- На основу управљачких улаза (педала гаса или кочнице) управљачка контролна јединица прослеђује одговарајуће управљачке сигнале за претварач енергетске електронике, чија је улога да регулише ток снаге од мотора/генератора ка извору енергије и обрнуто. Ток снаге може бити двосмеран уколико је подржано регенеративно кочење.
- Велики број батерија и других извора за складиштење ел. енергије поседује могућност за прихватање енергије приликом кочења. Energy management unit (јединица за управљање током енергије) је управо за то задужена. Ова јединица је задужена и за надзор допуњавања батерија, као и осталих параметара.
- Јединица за помоћно напајање обезбеђује неопходну снагу за рад помоћних јединица, различите напонске нивое за поједине подсистеме, посебно за јединицу за управљање возилом и за климу.

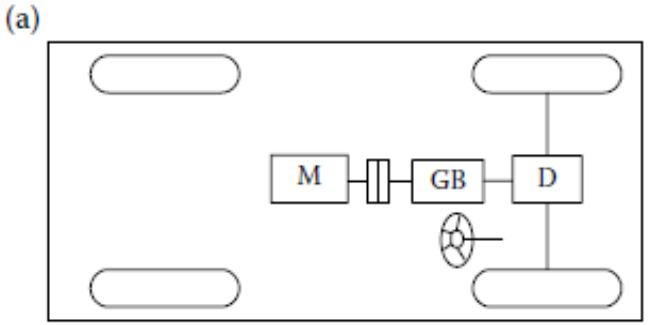
Конфигурације ел.возила



C: Clutch
D: Differential
FG: Fixed gearing
GB: Gearbox
M: Electric motor

Поједини подсистеми

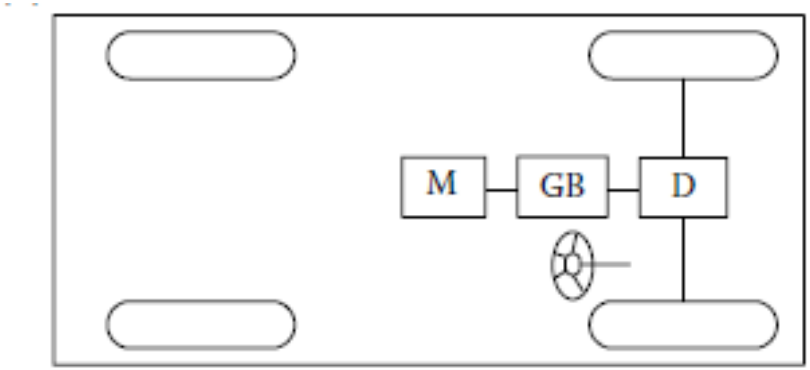
- У овом случају ел.мотор замењује СУС мотор код конвенционалних возила.
- Састоји се од ел. мотора, квачила, мењачке кутије, и диференцијала.
- Квачило и мењачка кутија могу бити замењени аутоматским мењачем
- Квачило се користи како би се осовина мотора одвојила/спојила са осовином погонских точкова
- Диференцијал је механизам који омогућује да се точкови врте различитим брзинама док се доводи исти погонски моменат.



Конвенционални погон са мењачем и квачилом

Поједини подсистеми

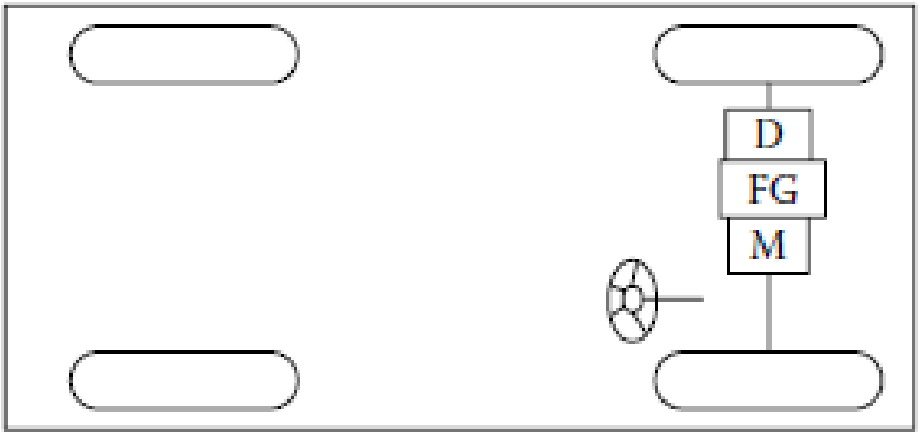
- Уколико ел. мотор има константну снагу у ширем опсегу брзина, фиксни преносни однос може да замени променљиви, и избаци потребу за квачилом. Ово знатно поједностављује ствари са становишта механике, а и електрике, тј. управљања.



Јединствени зупчаник, систем без квачила

Поједини подсистеми

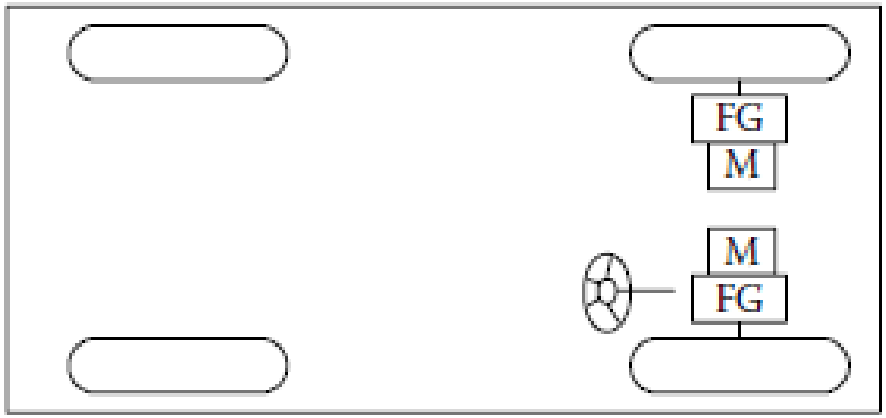
- Ел. мотор, фиксни преносник и диференцијал се могу даље интегрисати у једну целину и као последица тога цео погонски систем се поједностављује.



Интергисан фиксни преносник и диференцијал

Поједини подсистеми

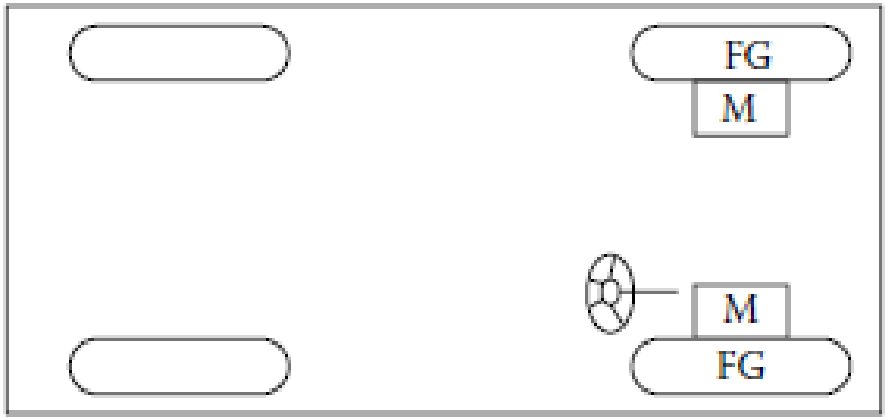
- Механички диференцијал је замењен коришћењем два погонска мотора. Сваки од њих погони један точак и постоји могућност независног подешавања брзине када се возило креће криволинијским путањама



Посебни мотори са посебним осовинама

Поједини подсистеми

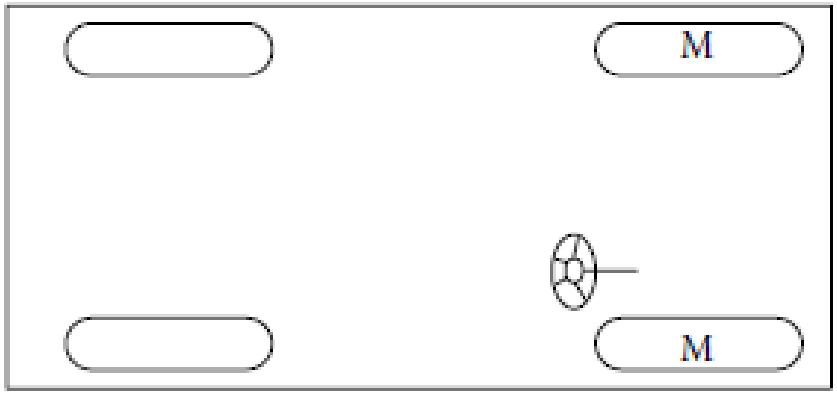
- Како би се систем даље поједноставио, мотор се може поставити унутар точка (in wheel drive). Компактни преносник може бити коришћен како би се смањила брзина и повећао момент.



Директан погон без зупчаника

Поједини подсистеми

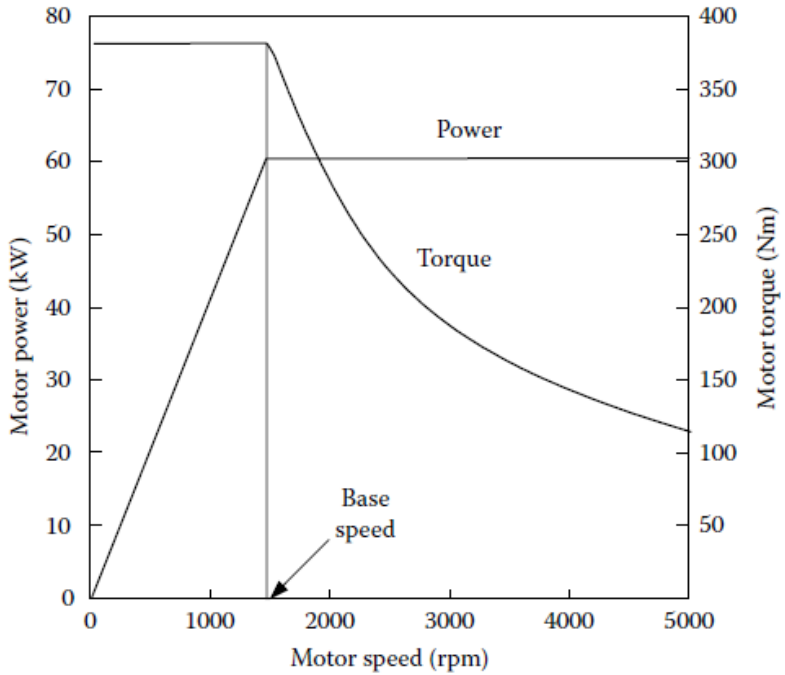
- Код овог решења нема никаквог додатног механичког елемента. Вратило мотора се директно спаја са погонском осовином точка. Управљање мотором се директно одражава на управљање брзином точка. У овом случају се захтева од ел. мотора да има велики полазни моменат како би возило могло несметано да убрзава при старту.



In wheel drive

Понашање ел. возила

- Карактеристике ел. возила се обично посматрају кроз време убрзања и максималне брзине која се може достићи.
- Овде је представљена карактеристика ел. мотора који се обично користе (област константне снаге и константног момента)

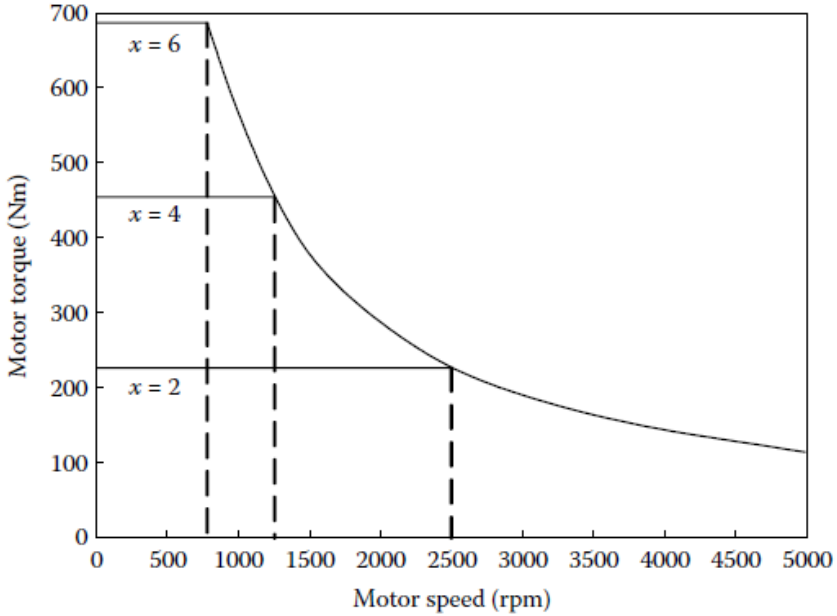


Моментна карактеристика

- Постоје два опсега брзина:
  - Брзине мање од номиналне (област малих брзина)
  - Брзине веће од номиналне (област великх брзина)
- У области малих брзина мотор има константан моменат, док у области већих брзина мотор има константну снагу
- Карактеристика се обично представља преко коефицијента x који представља однос између стварне брзине и номиналне брзине.
- У областима малих брзина напон се полако повећава како расте брзина машине, док се флукс одржава сталним. Када се дистигне номинална брзина и номинални напон иде се на слабљење поља, када моменат опада хиперболички у односу на брзину.

Моментна карактеристика

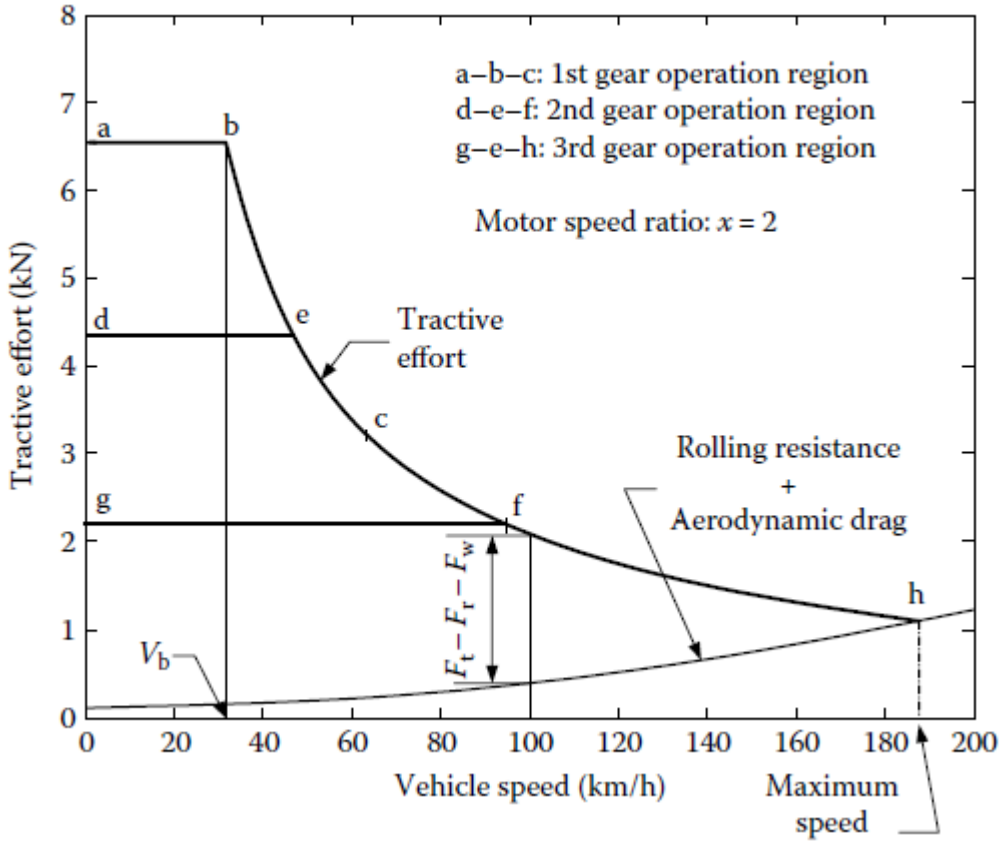
- Што је област консантне снаге већа, то је могуће постићи већи моменат на мотору, самим тим и веће убрзање и бржи старт мотора. Међутим, овај однос се не може произвољно мењати и свака врста мотора има своја ограничења. (PMSM x<2, IM x=4, switch reluctance x>6)



Брзина – моменат карактеристика, 60 kw мотор

Вучна сила и захтеви трансмисије

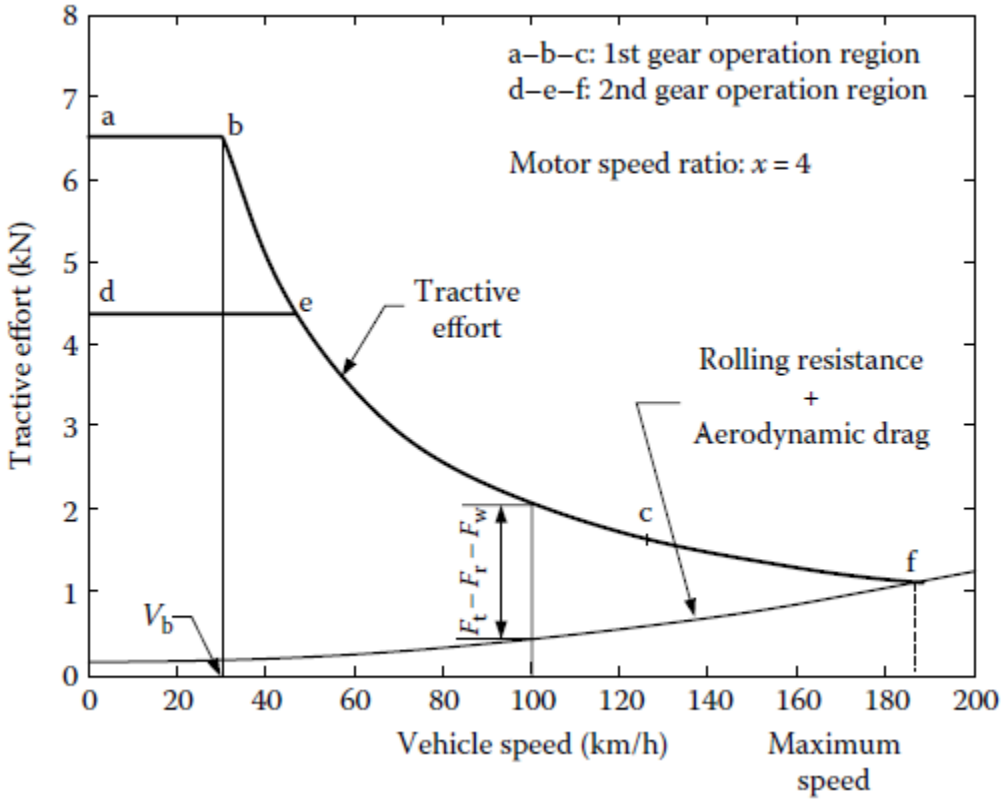
- Ел. мотор са x=2 и тростепеним мењачем
- Од ове карактеристике зависи какав мењач се користи



Вучна сила/ брзина возила

Захтеви преноса момента

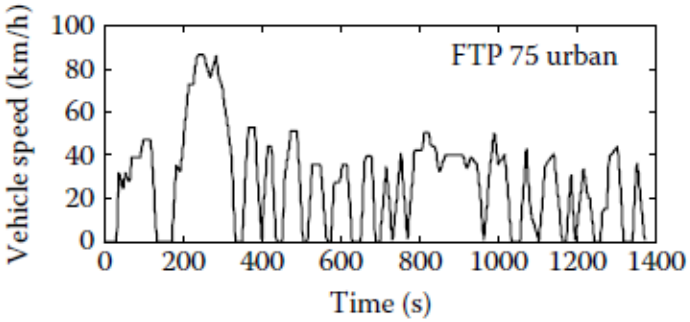
- Ел. мотор са x=4 и двостепеним мењачем
- Од ове карактеристике зависи какав мењач се користи

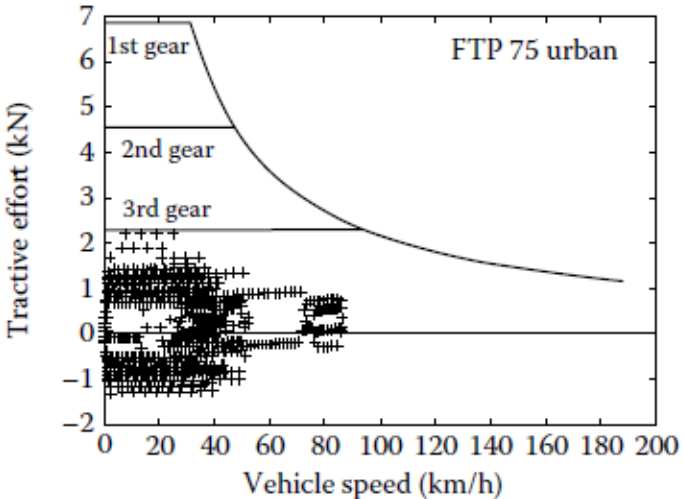


Вучна сила/ брзина возила

Карактеристике возила

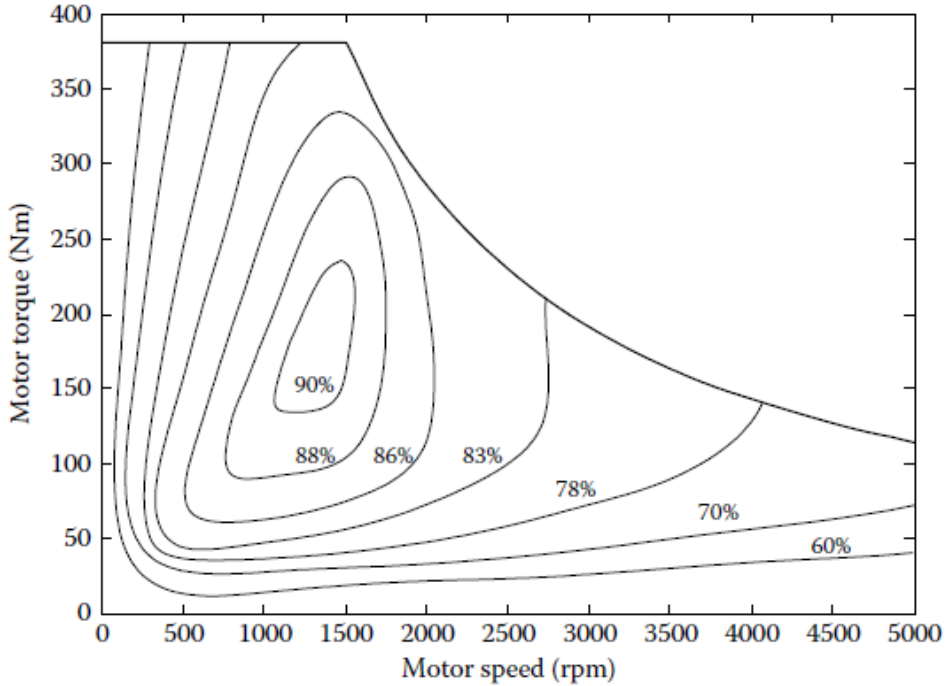
- Максимална брзина коју може да развије
  - Налази се у пресеку карактеристика на карактеристици вучне силе у зависности од брзине возила
- Способност савлађивања успона
- Убрзање
- Нормални радни услови
- Погонски циклус (drive cycle)





Потрошња енергије

- kWh, kWh/km, код СУС мотора потрошња се рачуна као L/100 km, нпр. Тесла прелази 5-6 km / kWh
- Код електричних возила напајаних из батерија мери се потрошња у kWh и даје се растојање које може да се пређе између два пуњења батерије
- Капацитет батерије kWh



Електрична возила напајана из мреже

- Трамвај и тролејбус
- Напаја се из специјално развучене мреже, постоји и батерија како би се обезбедила мала аутономија у случају да се за то укаже потреба
- Из данашње тачке гледишта тешко је видети разлоге зашто је добар део трамваја и тролејбуса повучен из употребе средином прошлог века
- Разлог је била цена, тј. пад цене фосилних горива
- Међутим, у данашње време се поново види могућност примене тако да се постављају нови критеријуми који би требало да повећају примену ових возила

Ел. возила на принципу замајца и супер конднезатора

- Оба начина каректерише велика специфична снага, што значи да они могу да приме и шаљу енергију веома брзо. Мана је та што је количина енергије која се повлачи јако мала. То значи да је густина енергије јако мала.
- Код ових возила постоји замајац који се убрзава помоћу електромотора и на тај начин се ускладишти одређена количине ел. енергије. То складиштење се може нпр. одвијати док трамвај стоји. Касније се та енергија може користити по потреби
- Суперкондензатори се нпр. користе код MAN аутобуса, како би се омогућила рекуперација енегије приликом кочења, и касније како би се повећао могући максимум снаге током већих убрзања. На тај начин се може искористити мањи мотор, или мања горивна ћелија за напајање аутобуса.

Пример замајца

Хибридна и електрична возила

Хибридна возила

Хибридна електрична возила

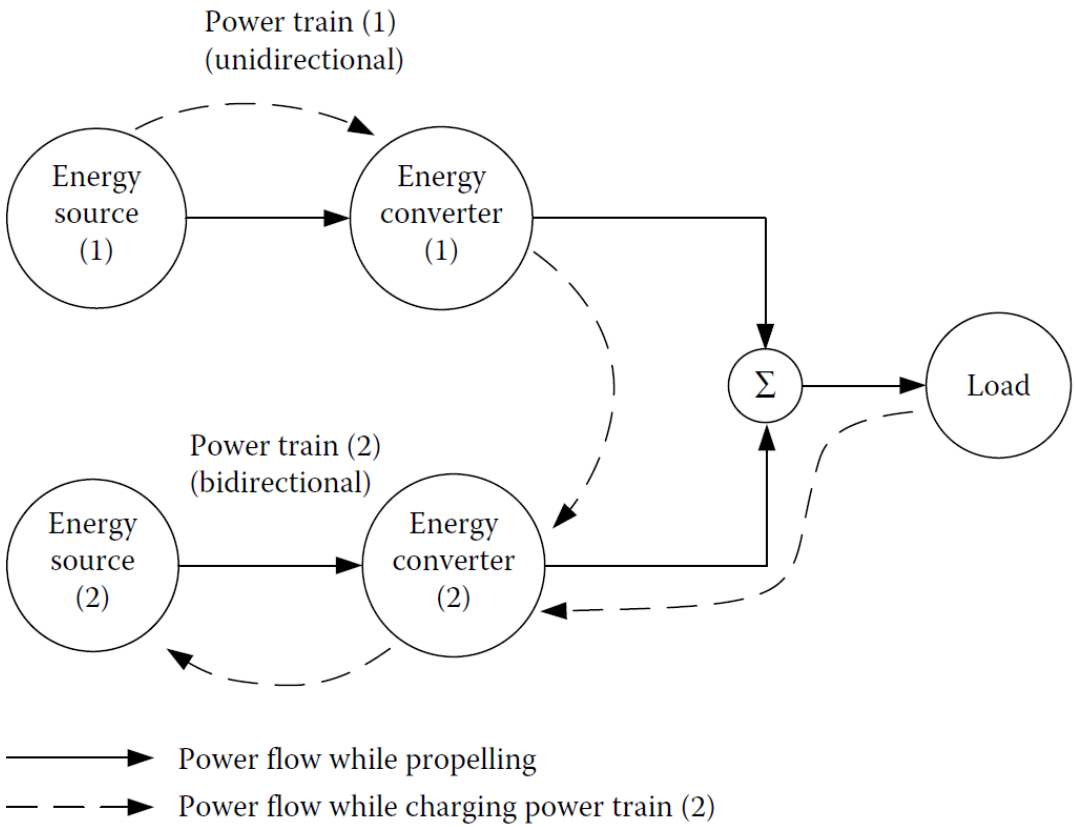
- Проблеми који се јављају код СУС мотора:
  - Загађење човекове околине
  - Мала ефикасност
  - Дисипација енергије током регенеративног кочења, посебно у урбаним срединама
  - Мала ефикасност хидрауличне трансмисије приликом стани/крени вожње
- Предности ел.мотора у возилима:
  - Висока енергетска ефикасност
  - Нема утицаја на човекову околину
- Мане ел. возила:
  - Знатно мања густина енергије складиштене у батеријама у односу на стандардна горива
- Хибридна ел. возила - користе два различита извора енергије и обједињује предности и СУС и ел.возила

Концепт хибридног ел. погона

- Уопштено речено, возило може имати више од једног погона. Погон се дефинише као комбинација извора енергије и претварача енергије. Нпр.:
  - Бензин/дизел + СУС мотор
  - Горивна ћелија + електрични мотор
  - Батерије + електрични мотор итд.
- Возило које има два или више погона се зове хибридно возило. Хибридно возило које укључује електрични погон се назива хибридно ел.возило. Обично хибридно возило има два извора енергије. Не иде се са три или више.
- Због могућности да се прихвати енергија приликом кочења, хибридна возила обично имају бар један погон који омогућује ток енергије у два смера, обично је то ел. погон.

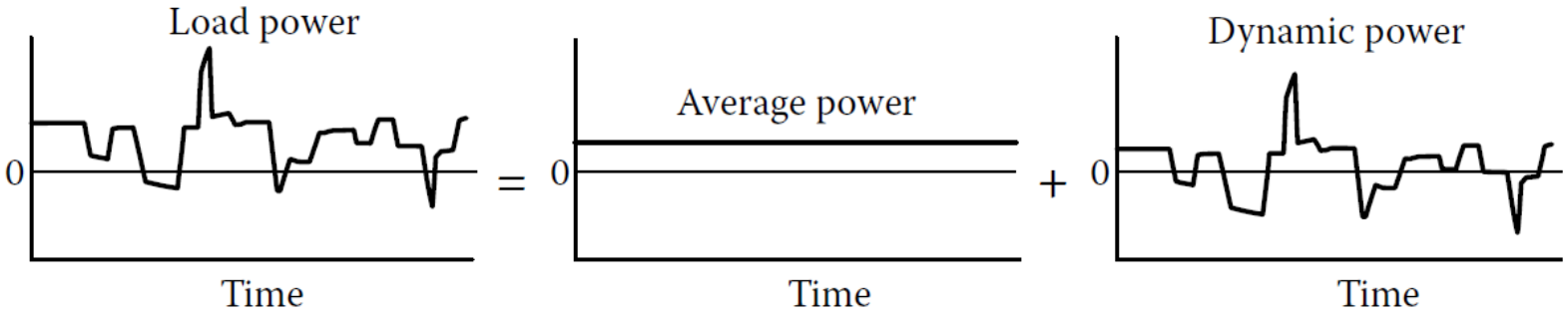
Концепт хибридног ел. погона

- Примери различитих токова снага, постоји девет могућих комбинација.
- У практичној имплементацији се не реализују сви могући режими



Пример оптерећења

- Оптерећење возила се мења током времена услед честог убрзавања и успоравања, пењања уз узбрдицу, спуштање низ низбрдицу...
- Оптерећење се може разложити на две различите компоненте:
  - устањена – стална вредност
  - Променљива – динамичка, чија је средња вредност нула
- Приликом пројектовања хибридног возила може се нпр. статичка компонента поверити СУС мотору, а динамичка електромотору.

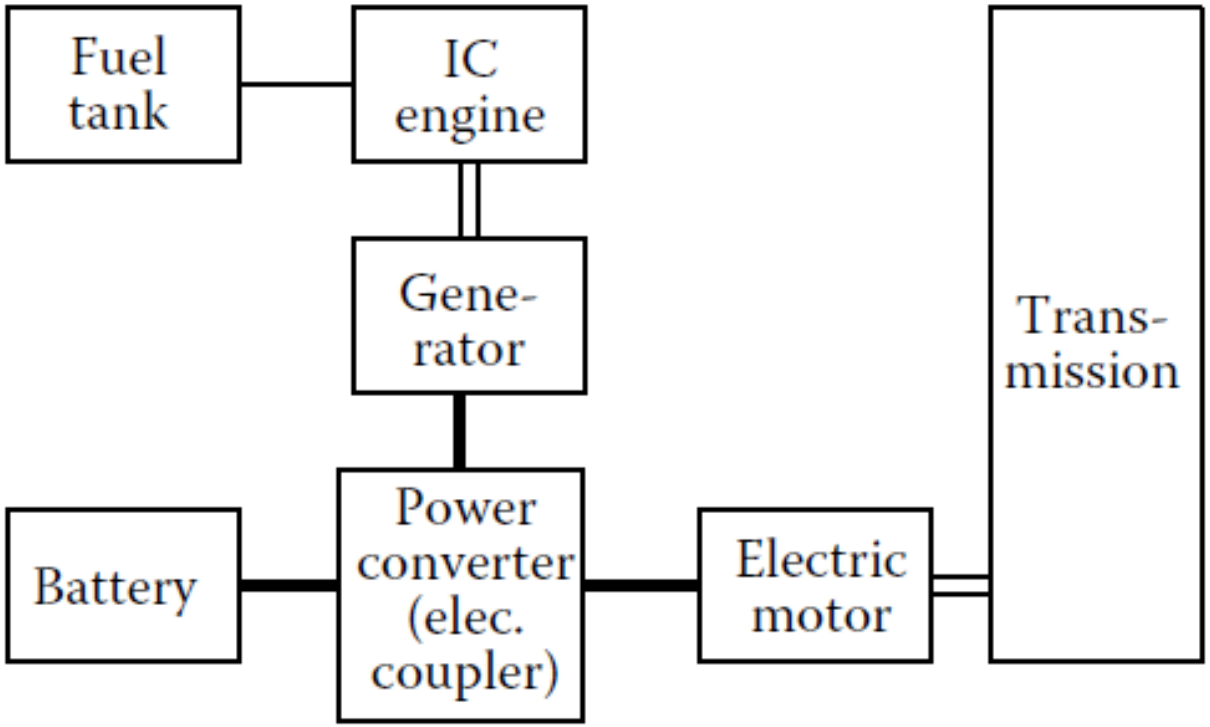


Архитектура хибридног ел. погона

- Уопштено, хибридна ел. возила се могу поделити у четири групе:
  - Серијска
  - Паралелна
  - Серијско-паралелна
  - Сложена

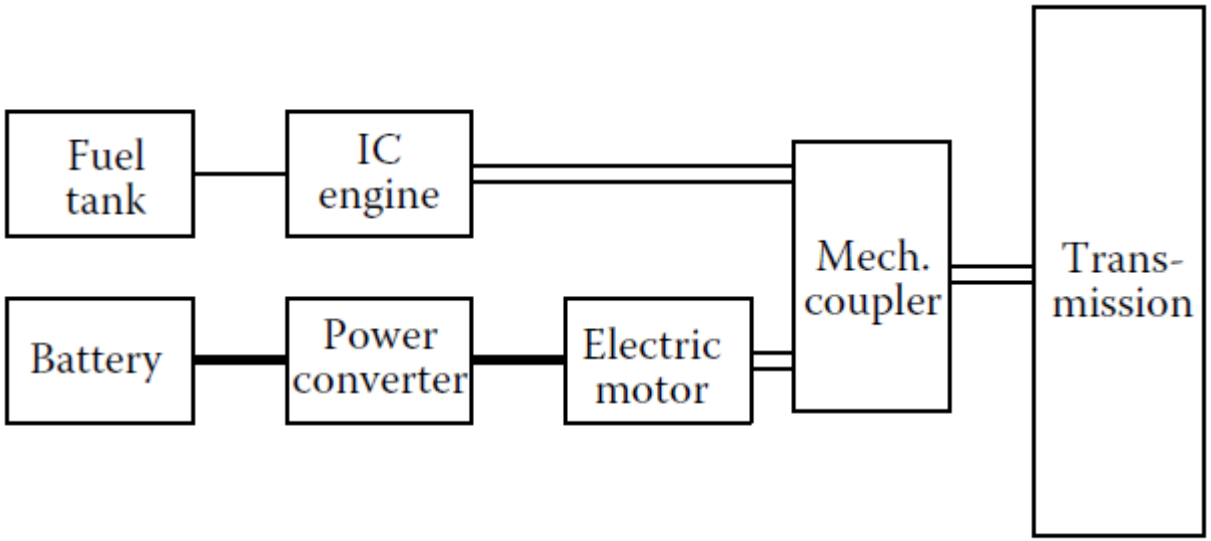
Концепт серијских хибридних ел.возила

- Електрична енергија која долази од стране генератора који је везан на СУС мотор и енергије из батерије иде на заједнички претварач, који обезбеђује напајање за ел. мотор. СУС мотор је главни, а ел.мотор служи као балансер.



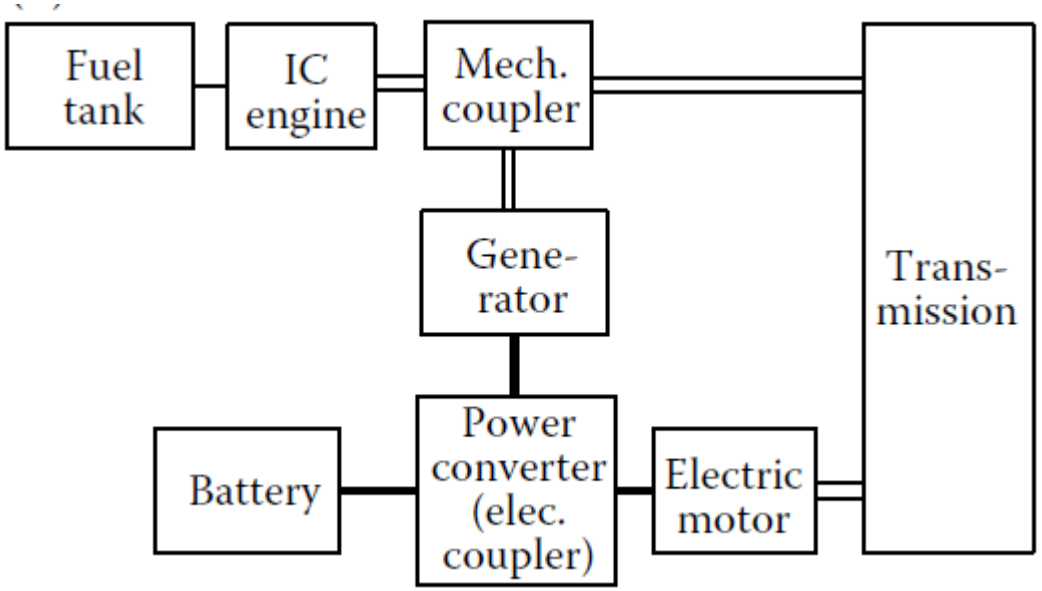
Концепт паралелнх хибридних ел.возила

- Суштина овог принципа јесте да се два механичка излаза спајају преко механичке кутије. СУС мотор је примарни, а ел. мотор служи као балансер.



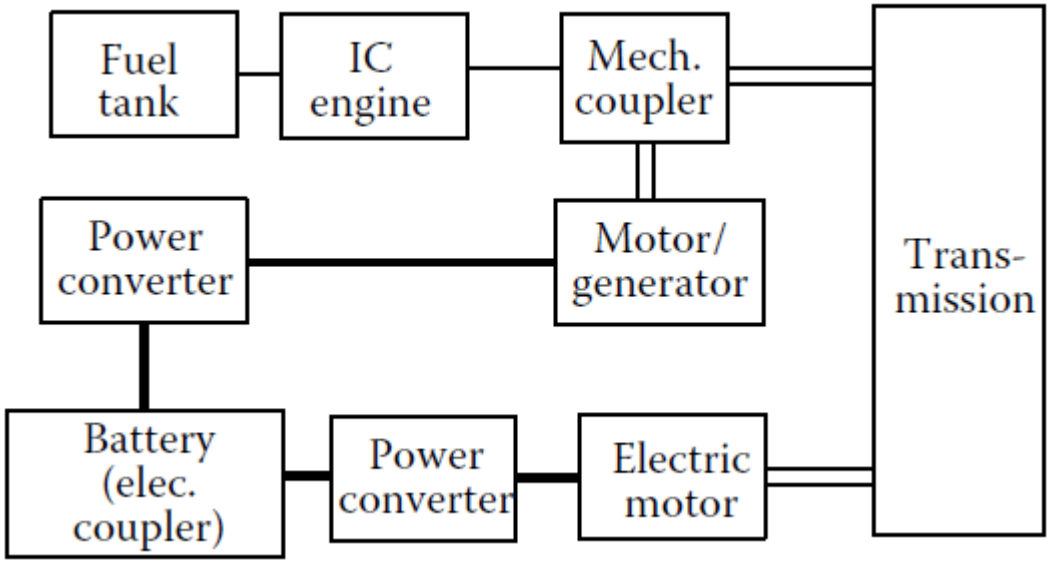
Концепт серијско-паралелних хибридних ел.возила

- Суштина код ове конфигурације је постојање два начина спајања – електрични и механички. Овај систем комбинује добре особине и серијског и паралелног приступа. Мана може бити сложеност и мало већа цена.



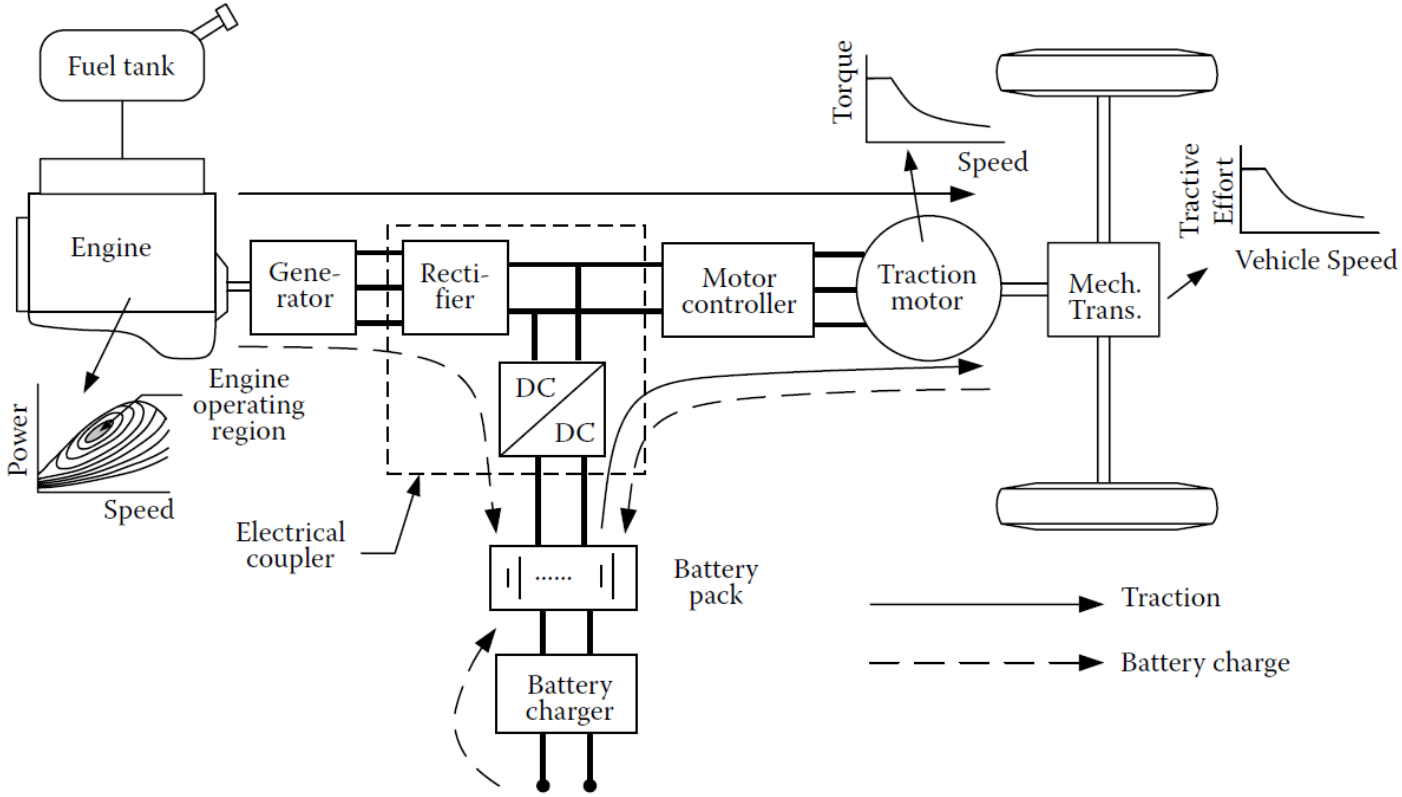
Концепт сложених хибридних ел.возила

- Код овог принципа, главна разлика у односу на претходне је постојање још једног претварача између групе мотор/генератор и батерије



Серијска ел. хибридна возила

- Код овог концепта два електрична извора напајају ел. мотор, који погони ел. возило. Овај концепт је произашао из концепта ел. возила, само је додат СУС мотор како би се продужила аутономија.



Серијска ел. хибридна возила

- На претходној слици није назначен, али потребан је и контролер возила (high level controller). Тај контролер на основу сигнала који долазе са педале гаса и кочнице и других повратних сигнала врши контролу тока енергије.
- Контролер возила врши контролу СУС мотора, кроз тзв. електрични спрежник, односно претварач (регулациони исправљач и dc-dc претварач), као и погонског мотора који обезбеђује одговарајући момент убрзања или кочења у једном од следећих режима рада:
  - Рад само ел. мотора
  - Рад само СУС мотора
  - Рад и ел. и СУС мотора
  - Пуњење батерије + погон механичког подсистема
  - Регенеративно кочење
  - Пуњење батерије
  - Пуњење батерије у хибридном режиму рада (и од оптерећења и од СУС мотора)

Предности серијског концепта

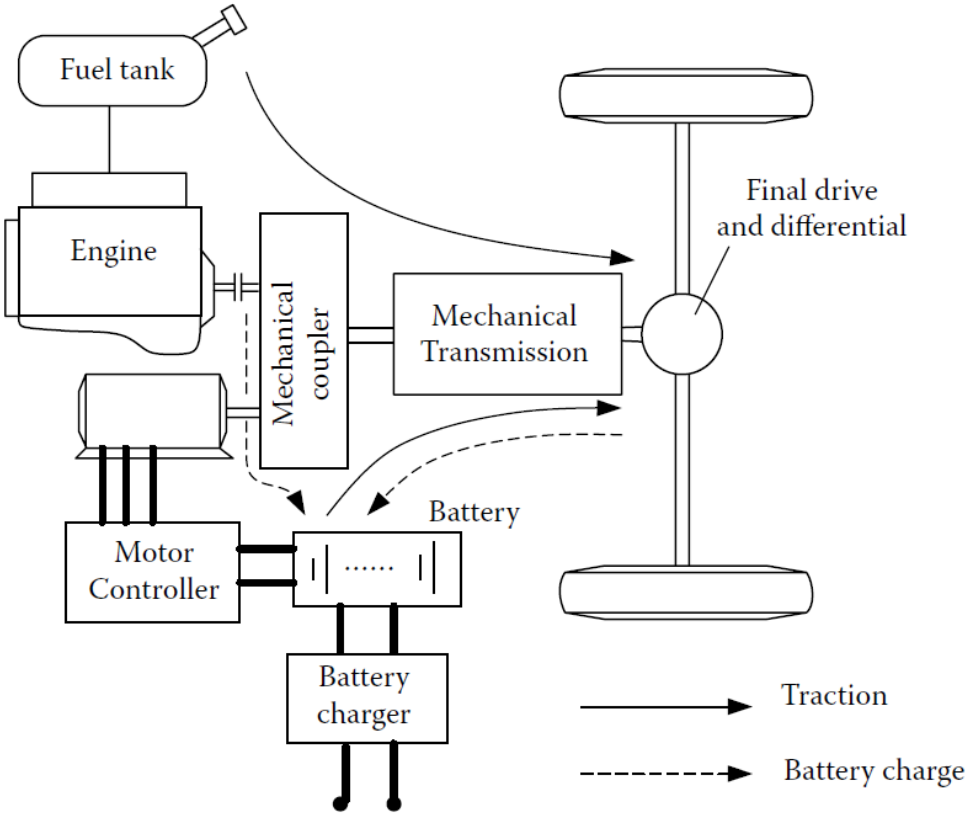
- Нема механичке везе између СУС мотора и погонских точкова, што омогућава да мотор ради у области максималне ефикасности
- Нема потребе за вишестепеним мењачем узимајући у обзир карактеристике електромотора
- Диференцијал се може заобићи тако што се користе два посебна мотора за сваки точак, или четири уколико је погон на сва четири точка, што је посебно битно за теренска возила.
- Управљачка страгегија погоном може бити поједностављена услед потпуне механичке распрегнутости између мотора и точкова

Мане серијског концепта

- Енергија из СУС мотора два пута мења свој облик док дође до точкова (механичка – електрична – механичка)
- Генератор уноси додатну тежину и трошак
- Погонски мотор мора бити димензионисан тако да обезбеди довољно енергије за оптималан рад возила у свим режимима рада

Паралелна ел. хибридна возила

- Механичка енергија из СУС мотора се директно води на погонске точкове. СУС мотор је потпомогнут електричним мотором који је механички спојен преко механичке спојнице са точковима



Предности паралелног концепта

- Мањи губици, с обзиром да се енергија и из механичког и из електричног подсистема преноси директно на погонске точкове
- Компактнији је с обзиром да нема потребе за додатним генератором, а и сам погонски мотор је мањи него у случају код серијског.
- Мана овог концепта је управо та механичка веза између СУС мотора и преносног елемента, пошто не омогућава бензин/дизел мотору да увек ради у оптималном режиму рада.
- Још једна мана је сложеније управљање овим системом

Примена

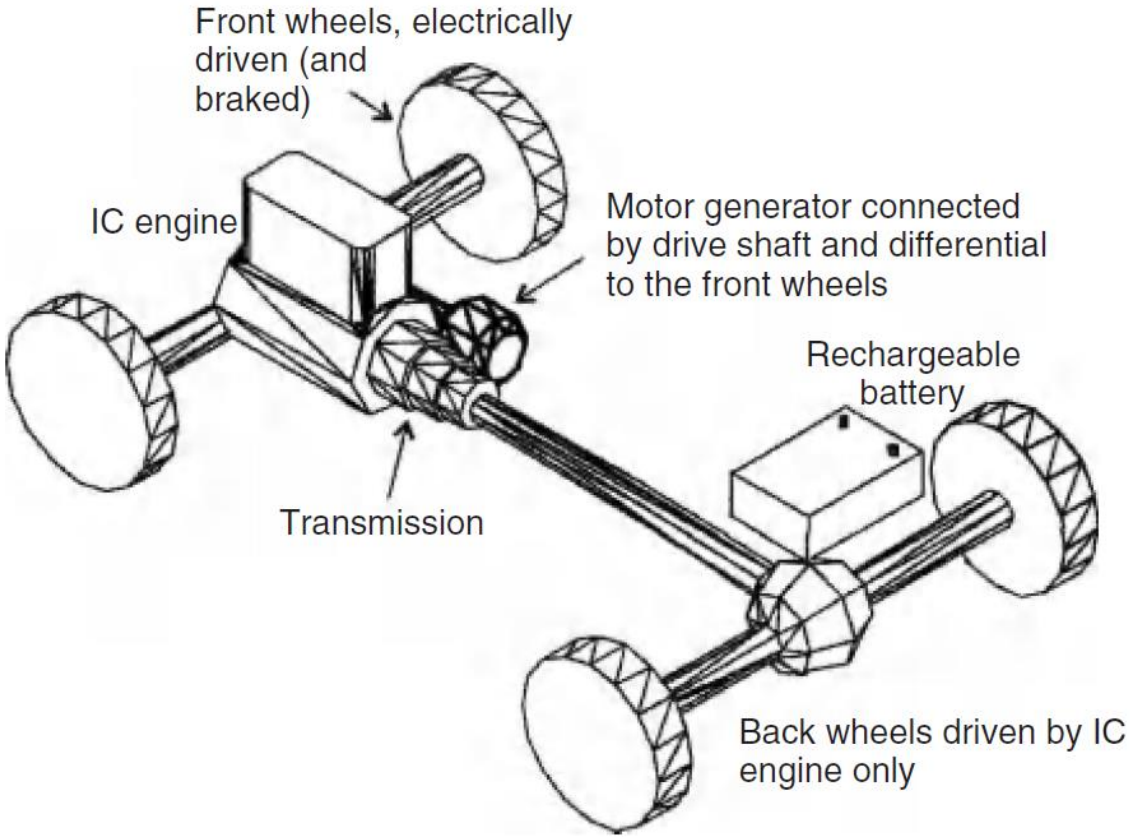
- Серијска хибридна ел. возила – користе се углавном у специфичним апликацијама , нпр. дизелом погоњен мотор за примену у железници. Постоји и примена код бродова
- Паралелна хибридна ел. возила – користе се масовно код електричних аутомобила
- Постоји неколико хибридних возила која се данас могу пронаћи на тржишту
  - Toyota Prius, nickel metal hydride батерија. Приликом покретања или при малим брзинама Prius је погоњен искључиво електричним мотором, на тај начин избегавајући коришћење СУС мотора. Такође је реализовано регенеративно кочење , убрзава до 100 km/h за 13.4 секунди. Батерија се напаја преко мотора, и не користи се спољна утичница за напајање из мреже

Технички подаци

IC engine size	1.5 l, four cylinder, 16 valve
ICE power	52.2 kW
ICE torque	111 N m
Electric motor power	33 kW
Electric motor torque	350 N m at 0–400 rpm
Electrical energy storage	NiMH battery, 288 V, 6.5 Ah
Hybrid system net power	73 kW
Fuel consumption	22/19 km l^{-1} city/highway (EPA estimates)
Transmission	ECCVT[a]
Suspension	Independent MacPherson strut stabiliser bar and torsion beam with stabiliser bar
Steering	Rack and pinion with electro-hydraulic assist
Brakes	Front disc, rear drum, with ABS
Length (m)	4.31
Width (m)	1.69
Height (m)	1.46
Wheelbase (m)	2.55
Weight (kg)	1254
Petrol tank capacity	44.7 l, 11.8 US gallons
Tyres	P175/65R14 low rolling resistance

Остали примери

- Honda Insight
- Daimler Chrysler SUV

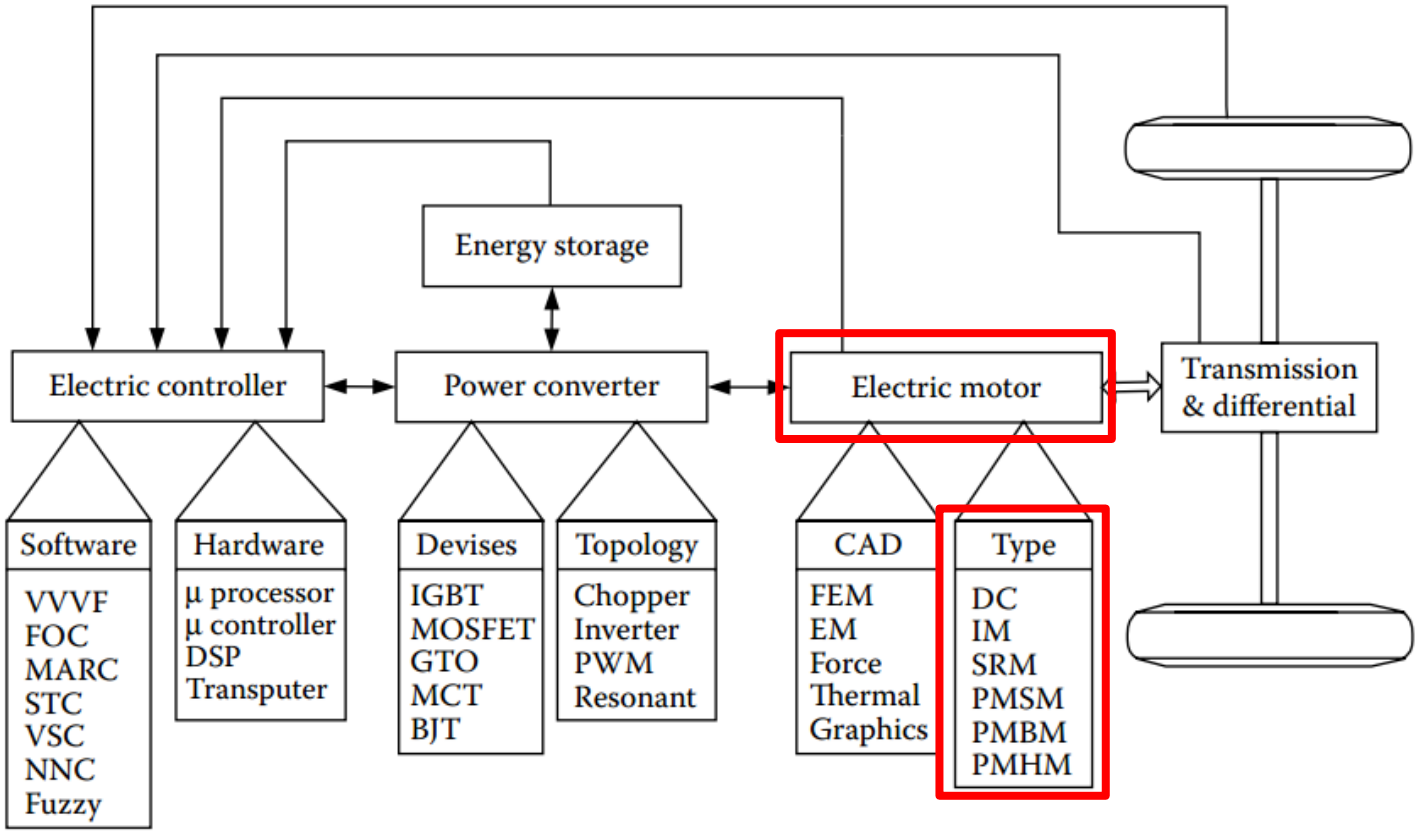


Хибридна и електрична возила

Конструкција и принцип рада ЈСМ

Погонски систем електричних возила

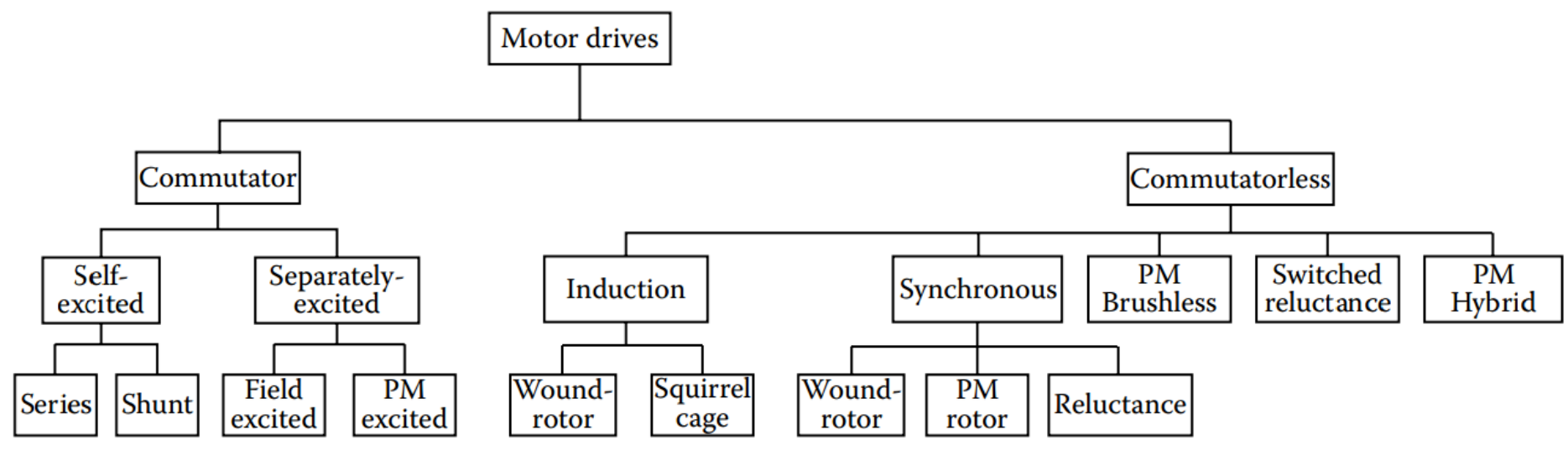
- Електрични мотор као кључна компонента погонског система електричних возила



Класификација електричних мотора код електричних возила

- Подела:
  - Комутаторске машине:

    Машине једносмерне струје: са независном, редном, паралелном, сложеном побудом
  - Машине без комутатора: асинхроне, синхроне, DC безчеткичне, релуктантне

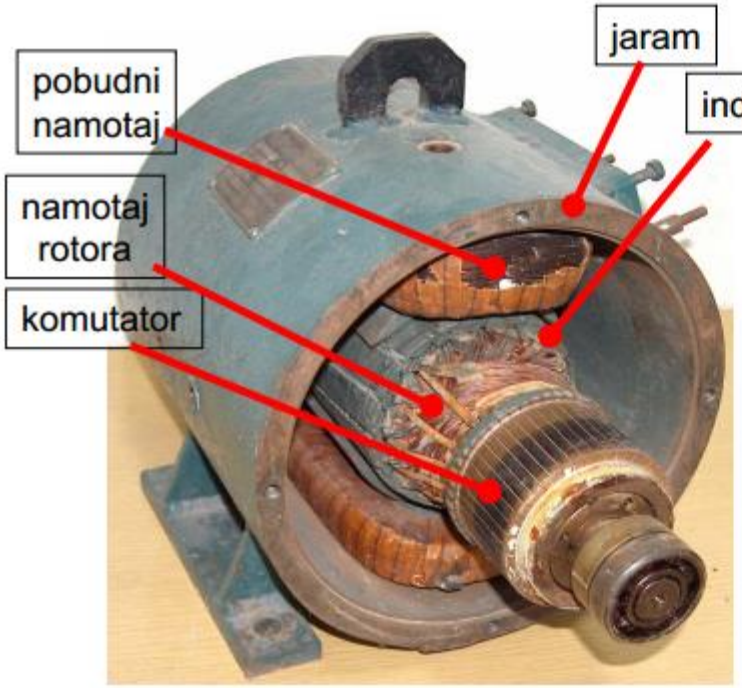


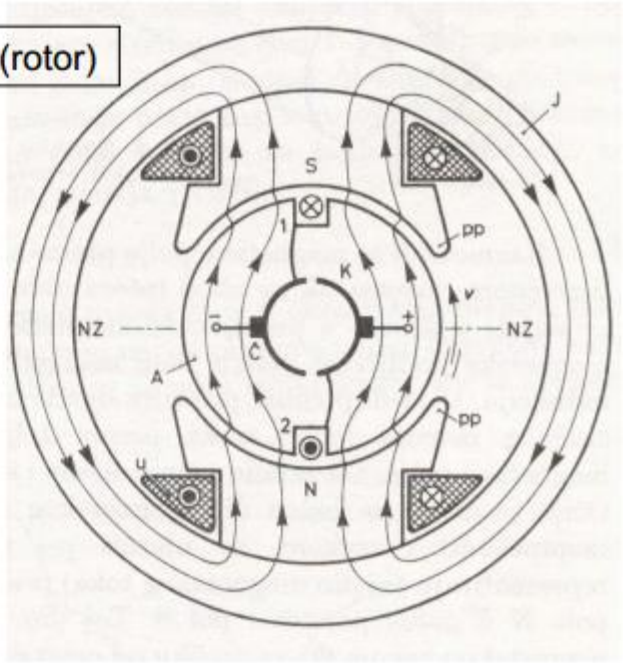
Машине једносмерне струје

- Карактеристике машина једносмерне струје са становишта употребе у електричним возилима:
  - Зрела, испитана технологија
  - Једноставно управљање
  - Добра регулација брзине у широком опсегу
  - Прилагођен за честа стартовања, кочења и једноставно реверзирање (промену смера обртања)
  - Мања поузданост због присуства комутатора и четкица, и потребе за њиховим одржавањем

Конструкција машине једносмерне струје

- Пример двополне машине једносмерне струје са независном побудом – визуелни преглед, принципска шема





S, N **južni i severni pol (induktor);**
A **armatura (indukt);**
K, Č **komutator (kolektor) i četkice;**
pp, **polna papuča;**

NZ **neutralna zona;**

J **jaram .**

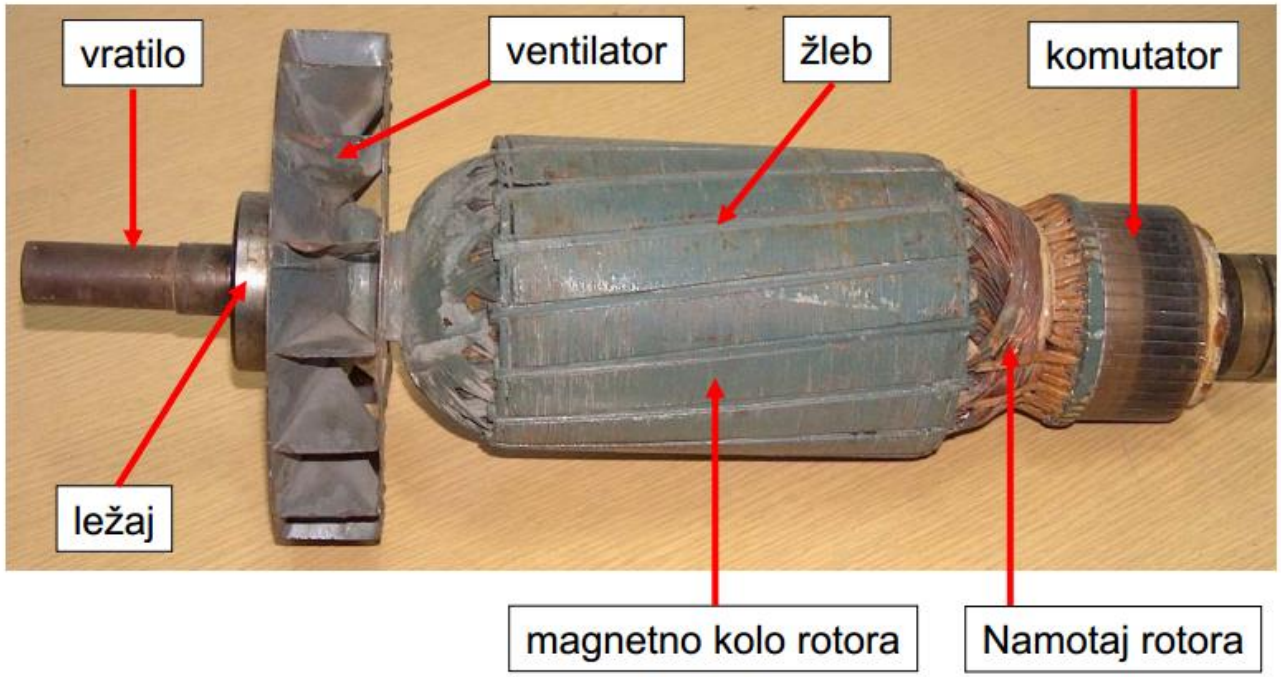
Конструкција машине једносмерне струје

- Сврха побудног намотаја је да створи магнетски флукс у мотору (да намагнетише магнетно коло мотора, како би се омогућила електромагнетна конверзија)

Polovi i namotaj pobude.
Induktor=Uzbuda= Field.

Конструкција машине једносмерне струје

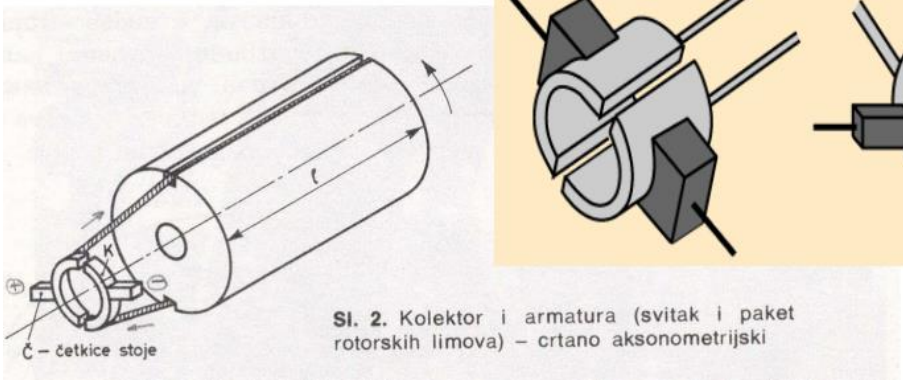
- Намотај арматуре спроводи струју мотора која у интеракцији са магнетским флуксом ствара електромагнетни (погонски) момент мотора



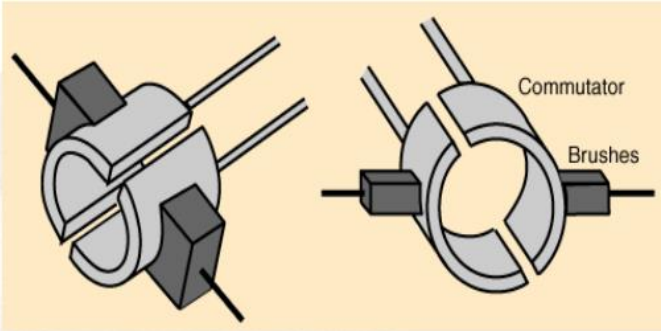
Rotor
Indukt=Armatura=Anker

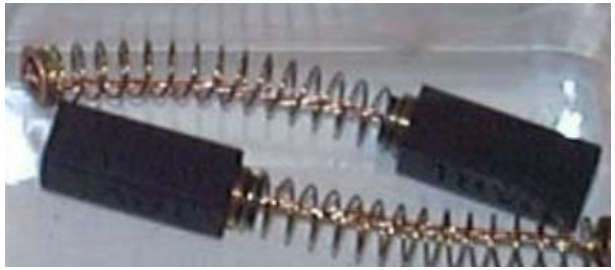
Конструкција машине једносмерне струје

- Комутатор је механички причвршћен за ротор и обрће се са њим – служи да исправи једносмерну струју извора у наизменичну струју намотаја арматуре како би се обезбедио обртни електромагнетни момент у истом смеру



Sl. 2. Kolektor i armatura (svitak i paket rotorskih limova) – crtano aksonometrijski

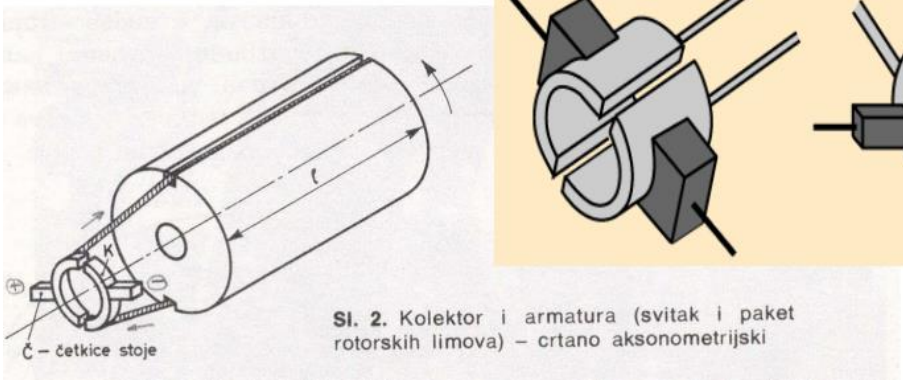




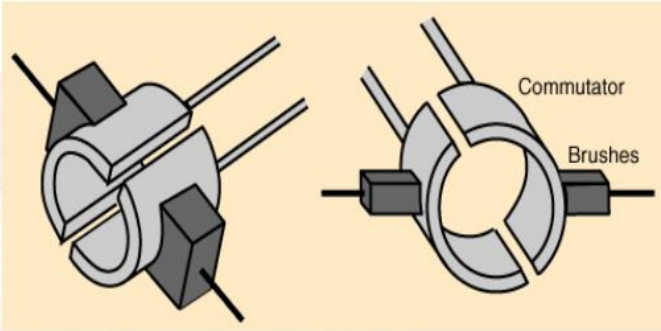
- Везу са спољним извором напајања омогућавају графитне четкице које су механички учвршћене за статор

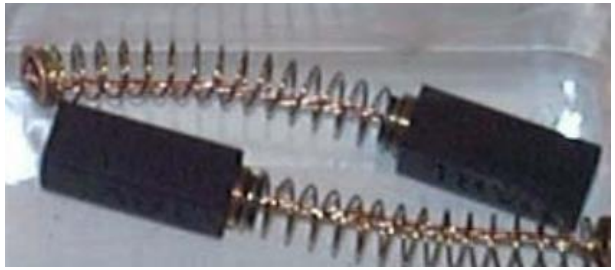
Конструкција машине једносмерне струје

- Комутатор је механички причвршћен за ротор и обрће се са њим – служи да исправи једносмерну струју извора у наизменичну струју намотаја арматуре како би се обезбедио обртни електромагнетни момент у истом смеру



Sl. 2. Kolektor i armatura (svitak i paket rotorskih limova) – crtano aksonometrijski

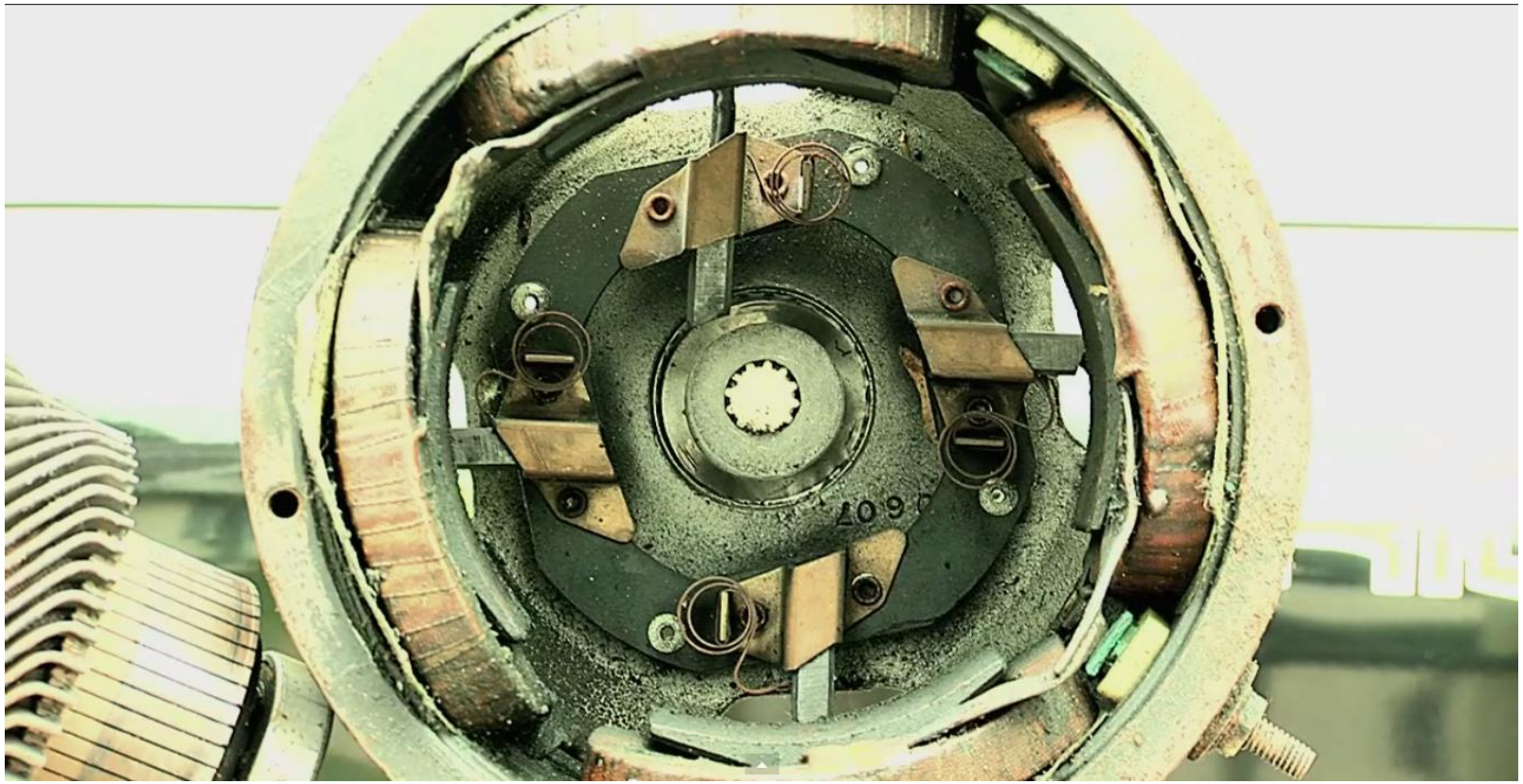




- Везу са спољним извором напајања омогућавају графитне четкице које су механички учвршћене за статор

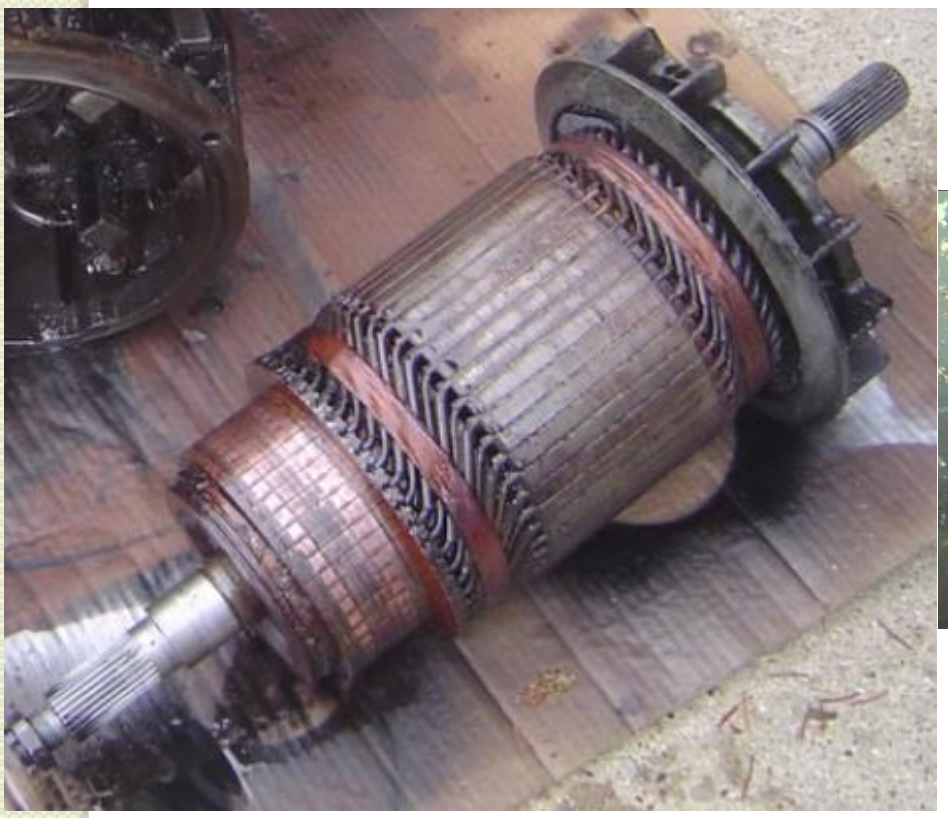
Конструкција машине једносмерне струје

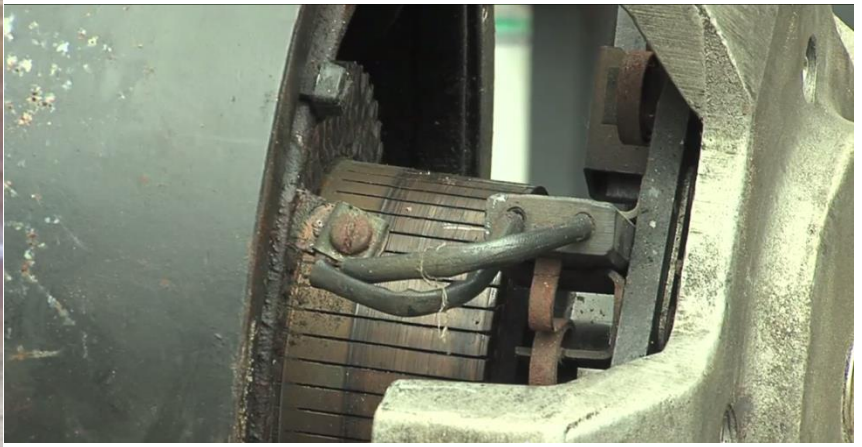
- Пример статора четворополне машине једносмерне струје – примена електрични аутомобил



Конструкција машине једносмерне струје

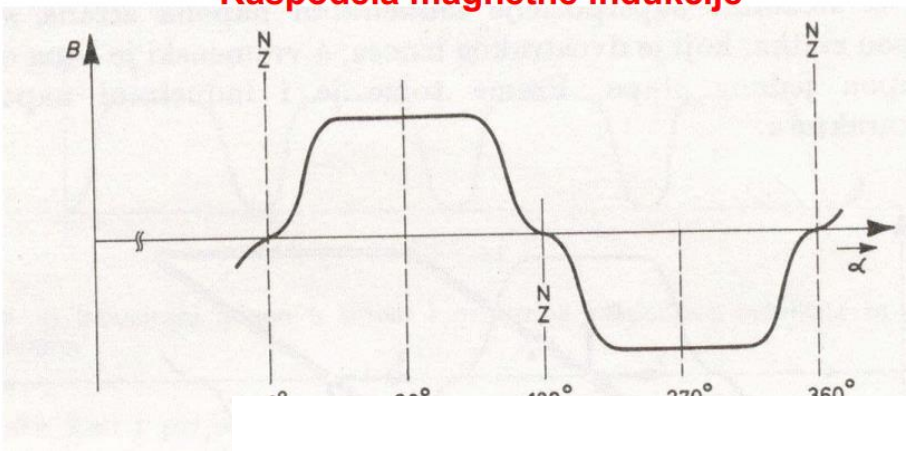
- Пример ротора четворополне машине једносмерне струје – примена електрични аутомобил
- Комутатор и прислањање четкица





Магнетни флукс код JCM

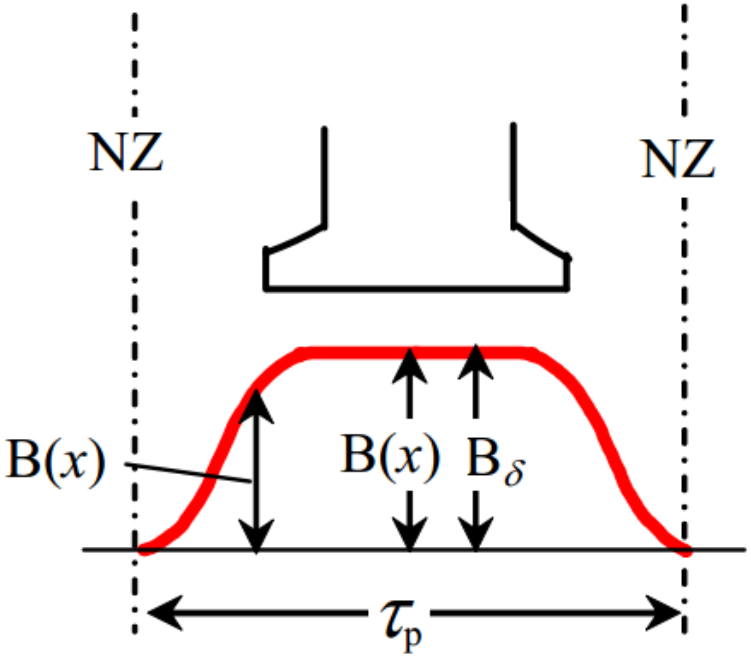
Raspodela magnetne indukcije



Fluks po polu zavisi od raspodele magnetne indukcije:

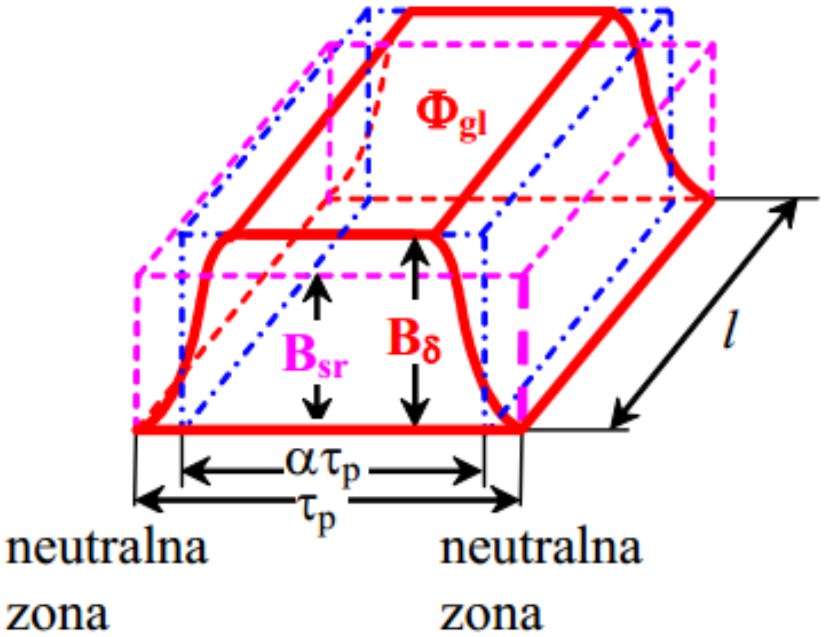
$$\Phi_{gl} = \int_{po\ polu} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\Phi_{gl} = l \int_{0}^{\tau_p} B(x)dx$$



τp je polni korak.

Магнетни флукс код JCM



Fluks po polu se može interpretirati kao zapremina geom. tela.

$$\Phi_{gl} = \tau_p \cdot l \cdot B_{sr}$$ **ili** $$\Phi_{gl} = \alpha \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{\delta}$$

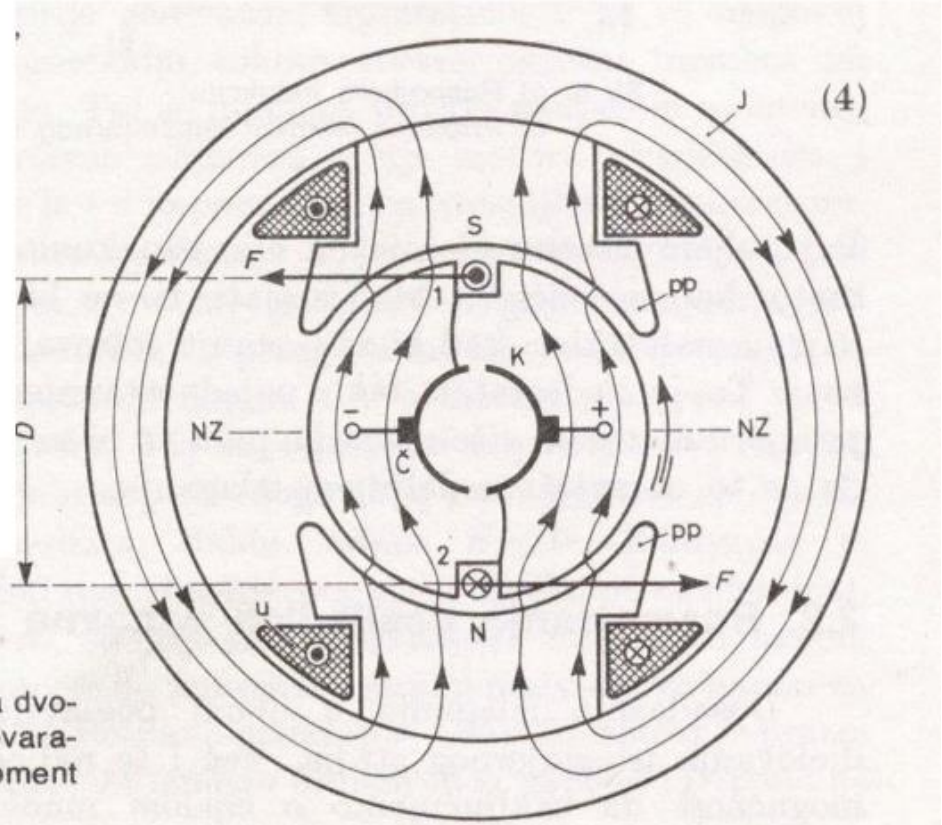
α je faktor pokrivanja pola

α·τp je idealni polni luk.

Обртни момент код JCM

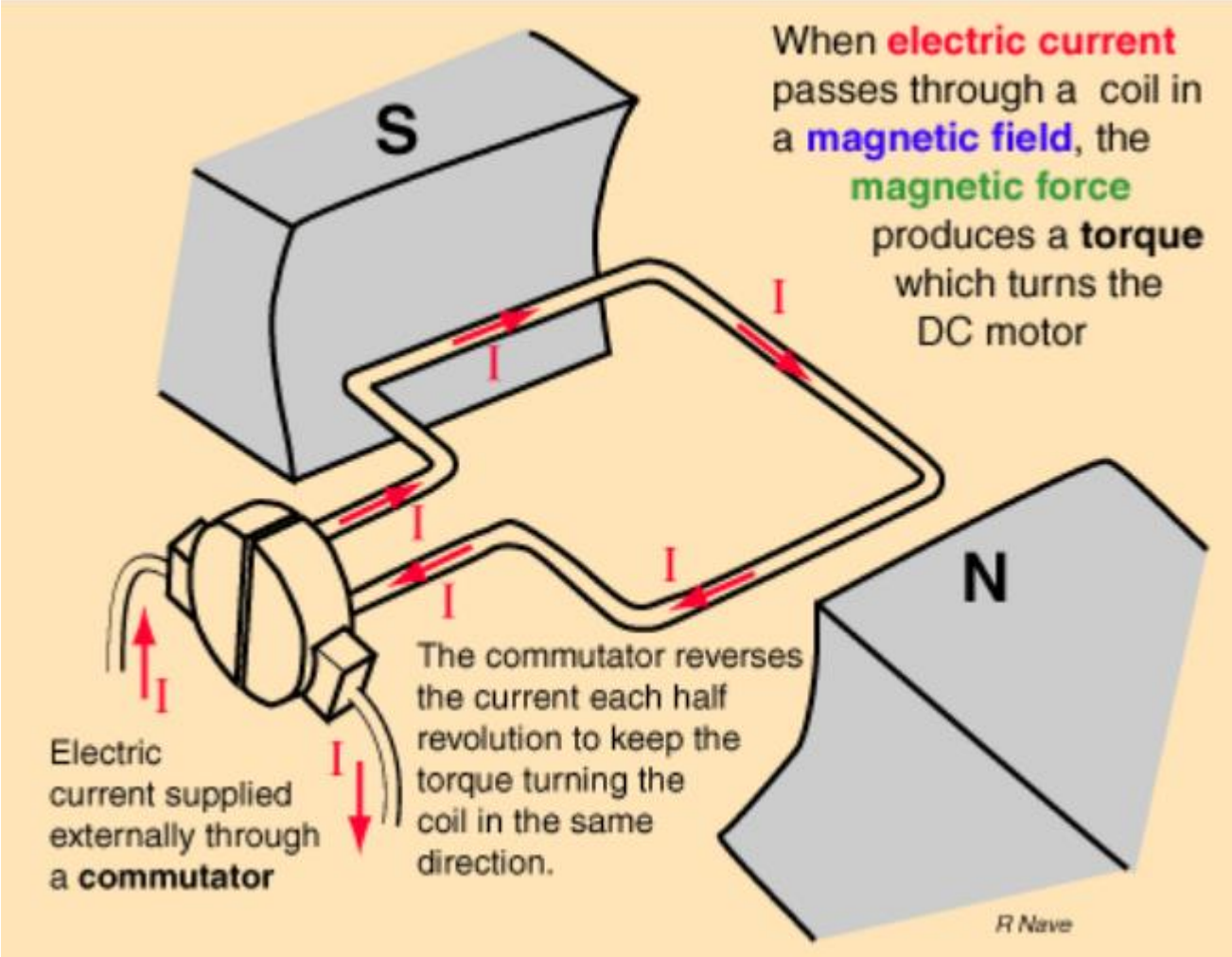
- Мотор мора бити спреман за рад, значи претходно се мотор мора побудити (код мотора са сталним магнетима није потребно јер то они инхерентно чине)

Ако кроз армаturу потекне струја тада се појави момент. Момент може подржавати кретања или се супротстављати кретању. MOTORSKI или GENERATORSKI режим рада.

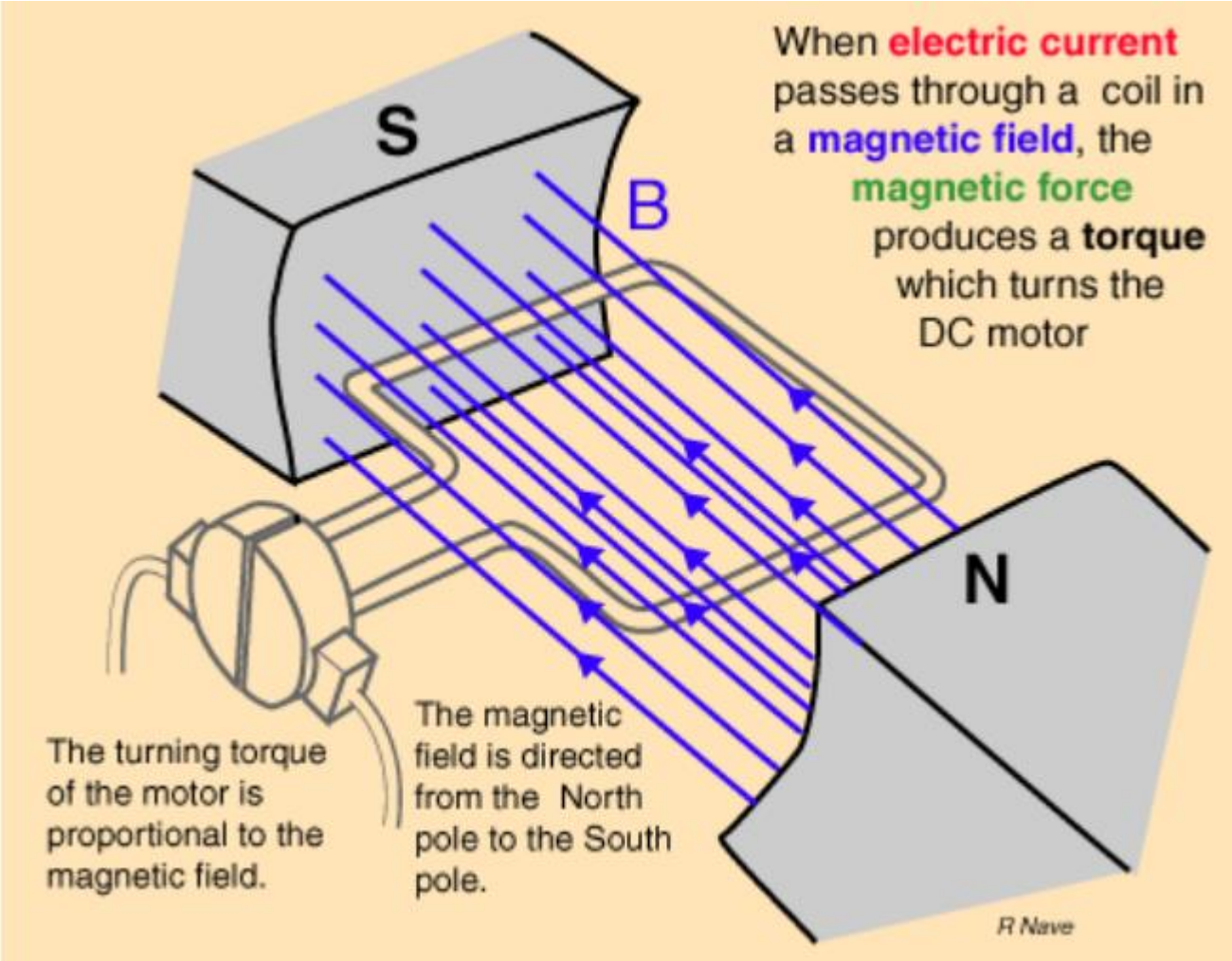


Sl. 7. Skica presjeka pojednostavnjenoga dvopolnog istosmjernog stroja (oznake odgovaraju motorskom radu): sile na vodiče; moment istosmjernog stroja

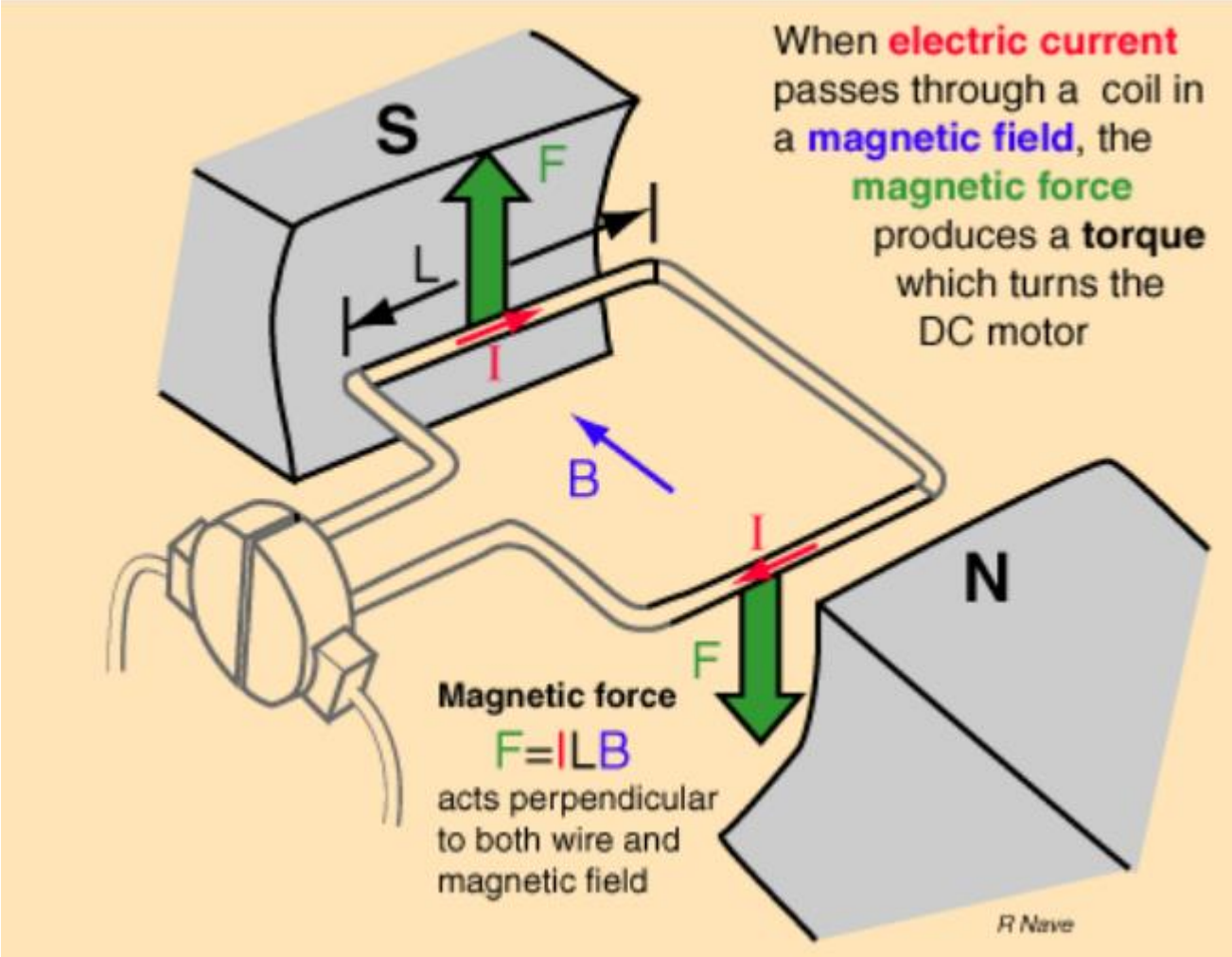
Обртни момент код JCM



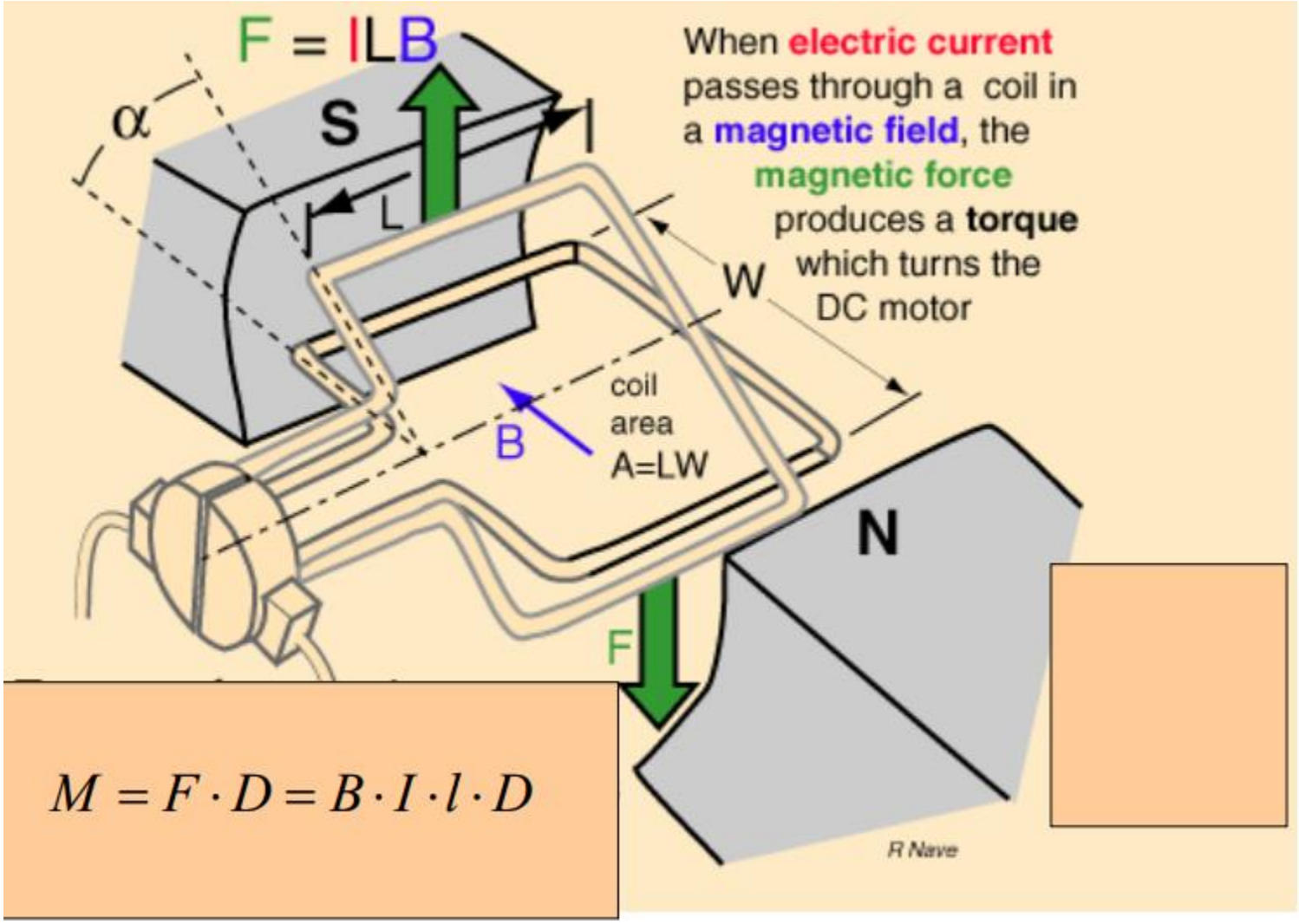
Обртни момент код JCM



Обртни момент код JCM



Обртни момент код JCM

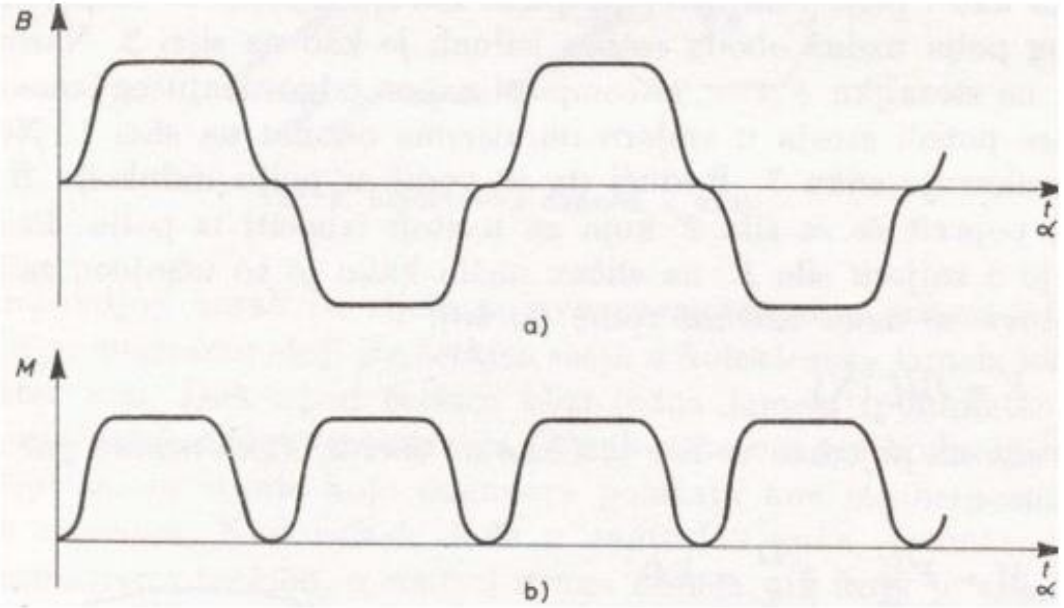


$$M = F \cdot D = B \cdot I \cdot l \cdot D$$

Обртни момент код JCM

- Остварени обртни момент код JCM једнак је производу магнетског обухвата ψ и струје арматуре I

Prema slici:



Sila na provodnik odnosno momenat je:

$$F = B \cdot I \cdot l \qquad M = F \cdot D = B \cdot I \cdot l \cdot D$$

Ukupan momenat motora kada se uvaži momenat kome doprinose svi provodnici armature:

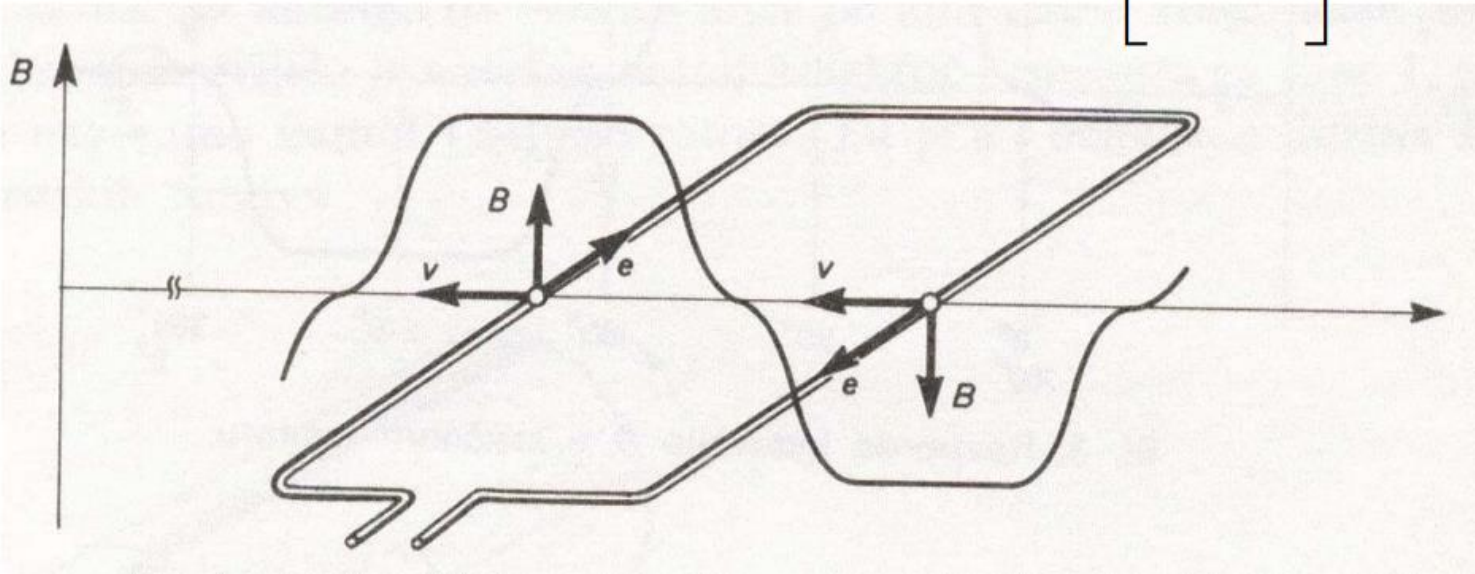
$$M = K \cdot \Phi_{gl} \cdot I = \psi_{gl} \cdot I = \psi_p \cdot I = \psi_f \cdot I$$

Индуковање електромоторне силе код ЈСМ

- При обртању ротора у побуђеном мотору, на крајевима роторског намотаја (арматуре) индукује се електромоторна сила која држи противтежу (контру) доведеном напону на мотор

EMS u navojku.

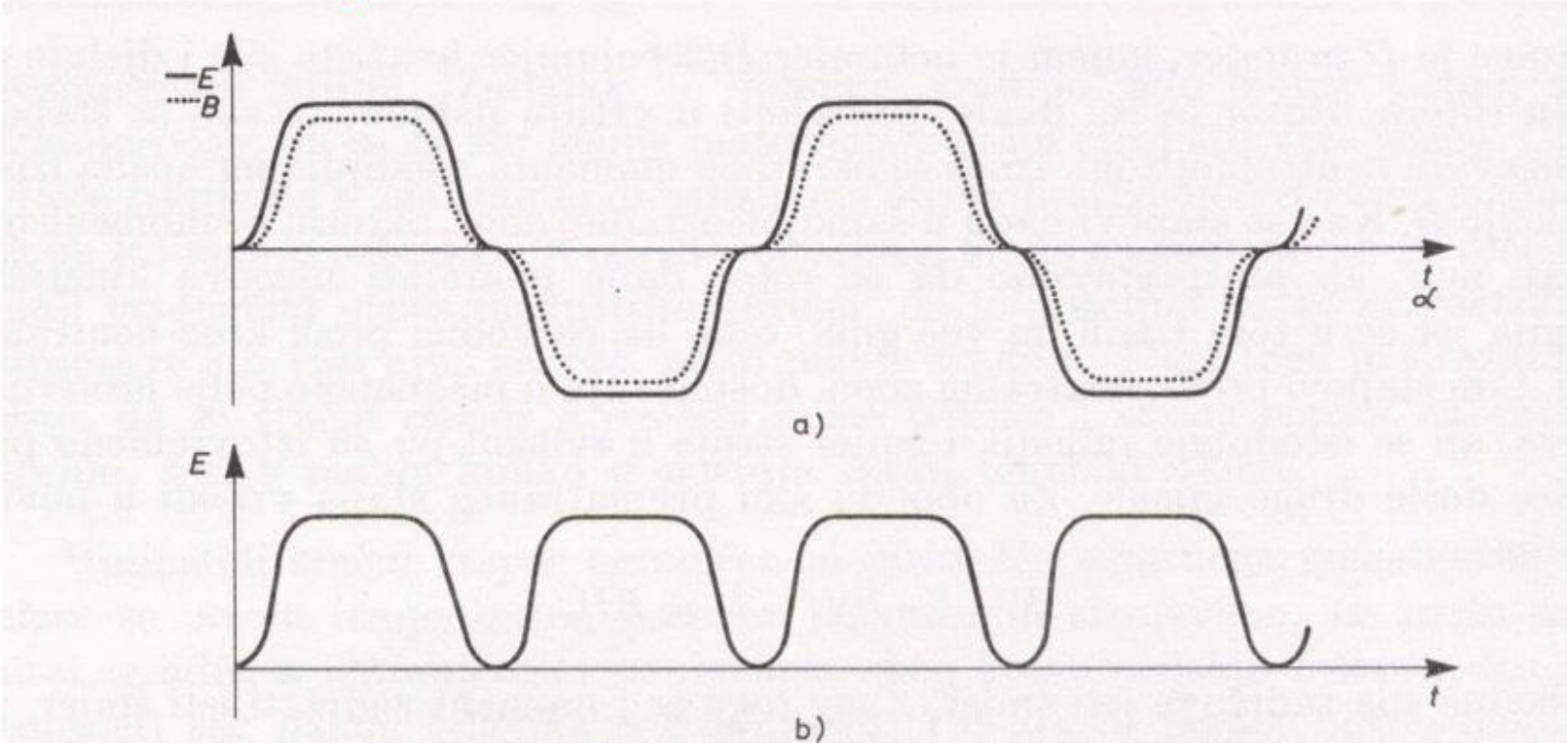
$$e = \left[\vec{v} \; x \; \vec{B} \right] \cdot \vec{l}$$



Индуковање електромоторне силе код ЈСМ

- Комутатор исправља наизменичну индуковану електормоторну силу у навојцима намотаја ротора која се на четкицама и спољним прикључцима види као једносмерни напон (који се супротставља доведном напону извора)

EMS u navojku i na četkicama.



Индуковање електромоторне силе код ЈСМ

Linijska brzina provodnika armature:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \frac{D}{2} = D \cdot \pi \frac{n}{60} = 2 \cdot p \cdot \tau_p \frac{n}{60}$$

iz

$$\Phi_{gl} = \tau_p \cdot l \cdot B_{sr} \qquad \Rightarrow \qquad B_{sr} = \frac{\Phi_{gl}}{\tau_p \cdot l}$$

Indukovana elektromotorna sila u jednom provodniku armature:

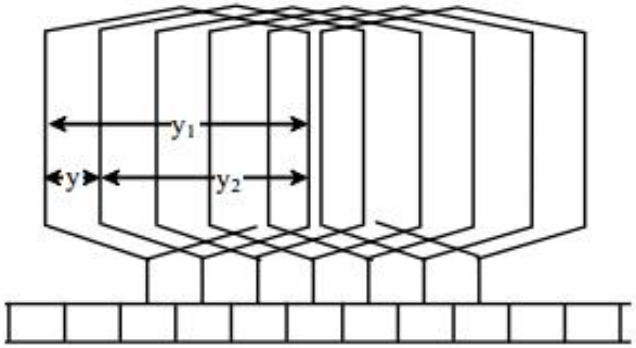
$$e_{sr} = B_{sr} \cdot l \cdot v = \frac{\Phi_{gl}}{l \cdot \tau_p} \cdot l \cdot 2 \cdot p \cdot \tau_p \frac{n}{60} = \frac{p \cdot n}{30} \Phi_{gl}$$

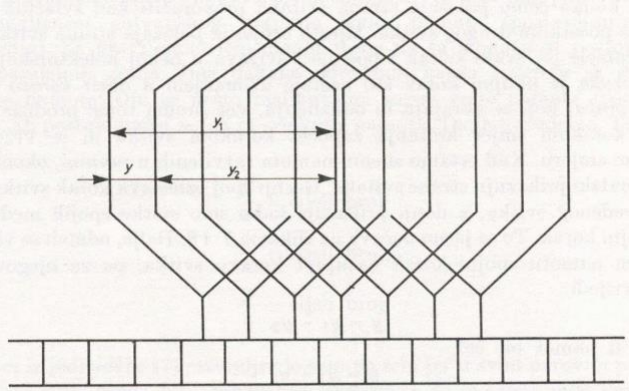
Učestanost indukovane elektromotorna sila u jednom provodniku:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

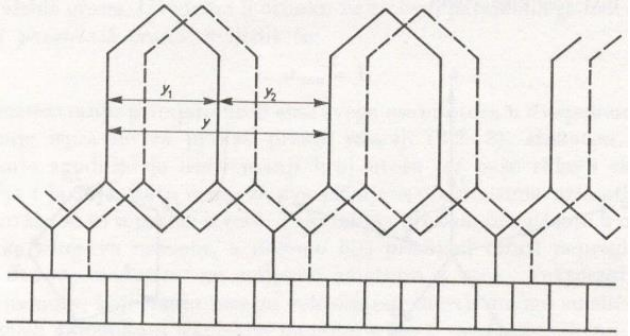
Индуковање електромоторне силе код ЈСМ

Ако се уваži da su navojci armature vezani na red (zbog prirode samog namotaja):





Sl. 7. Princip sheme vezivanja svitaka petljastog namota



Sl. 8. Princip sheme vezivanja svitaka valovitog namota

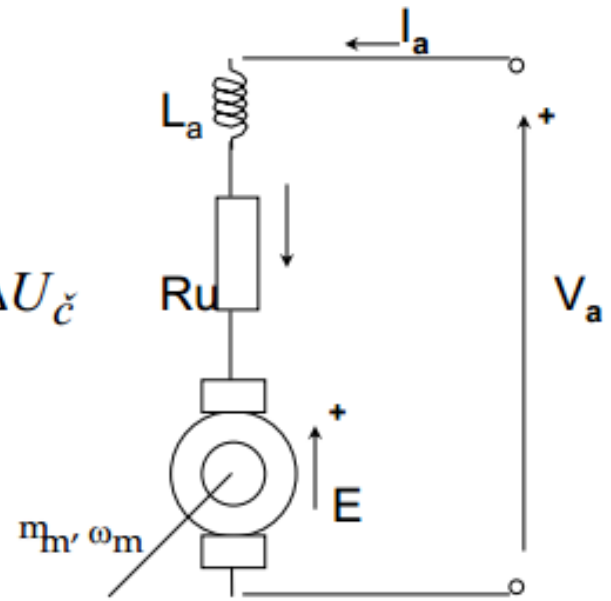
Ako je Na broj provodnika armature.

$$E = \frac{N_a}{2a} \cdot e_{sr} = \frac{N_a}{2a} \cdot \Phi_{gl} \cdot \frac{p \cdot n}{30} = \frac{N_a \cdot p}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi_{gl} \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = K \cdot \Phi_{gl} \cdot \omega = \Psi_{gl} \cdot \omega =$$

$$= \Psi_p \cdot \omega = \Psi_f \cdot \omega$$

Веза напона и ЕМС код JCM

VEZA IZMEĐU INDUKOVANE ELEKTROMOTORNE SILE I NAPONA NA STEZALJKAMA



Generatorski režim rada:

$$E = U + I_a \cdot R_u + \Delta U_č$$

Motorski režim rada:

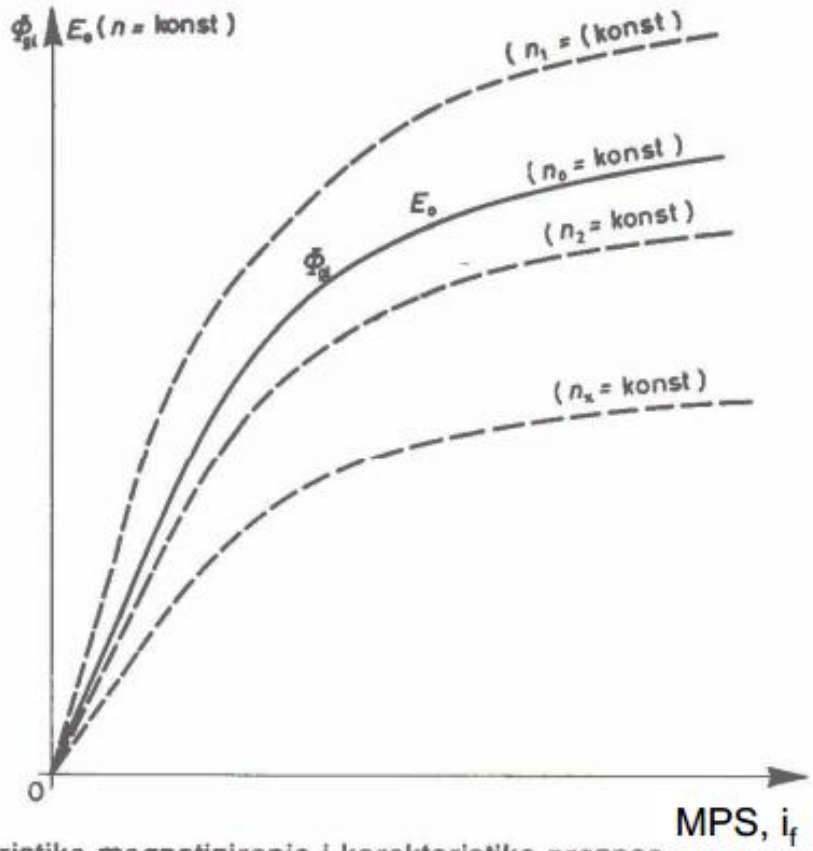
$$U = E + I_a \cdot R_u + \Delta U_č$$

***R_u* ukupni otpor.**

Карактеристика магнећења

MPS pobude

$$MPS = i_f \cdot N_f$$



Sl. 1. Karakteristika magnetiziranja i karakteristike praznog hoda istosmjernog stroja

Хибридна и електрична возила

Спољна карактеристика JCM

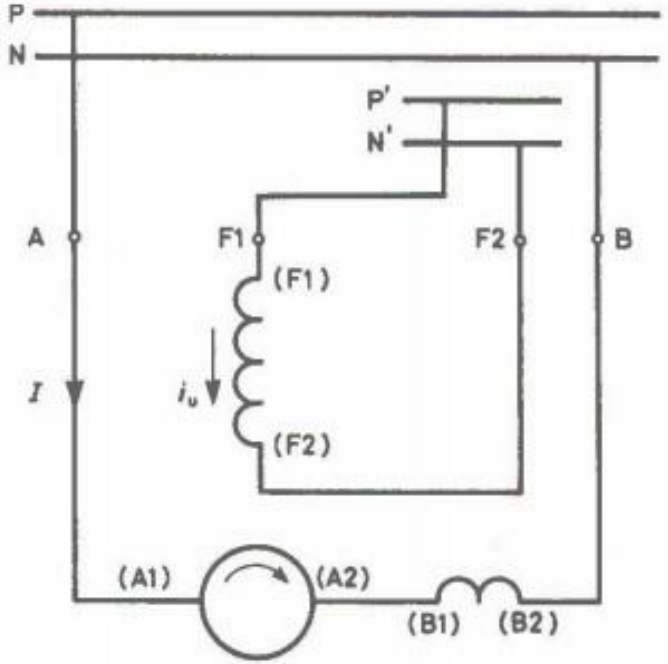
Врсте машина ЈСМ – врсте побуда

- На главне полове једносмерне машине може бити намотано више побудних намотаја напајаних из једног или више изворе
- Укупна магнетопобудна сила једнака је збиру магнетопобудних сила које стварају поједини побудни намотаји. МПС разних намотаја се сабирају ако им је смер обилажења око пола исти а одузимају ако је супротн
- **Једносмерне машине ПОБУЂЕНЕ на различите начине, под оптерећењем показују различита својства. Поседују различите спољне карактеристике: код мотора то је зависност електромагнетног момента од брзине које мотор развија**

Врсте побуда код ЈСМ

- Према начину побуђивања једносмерне машине се толико разликују да их делимо на следеће врсте, машине:
  - Независне побуде
  - Паралелне побуде (поредне)
  - Редне побуде (серијске)
  - Сложене побуде (компаундне)

Независно побуђен ЈСМ



Sl. 18. Nezavisno uzbuđeni motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

Независно побуђен ЈСМ – спољна карактеристика

- Као зависност брзине од момента мотора

Једначина наponske равнотеже:

$$U_a = R_a \cdot I_a + \omega \cdot \psi_f$$

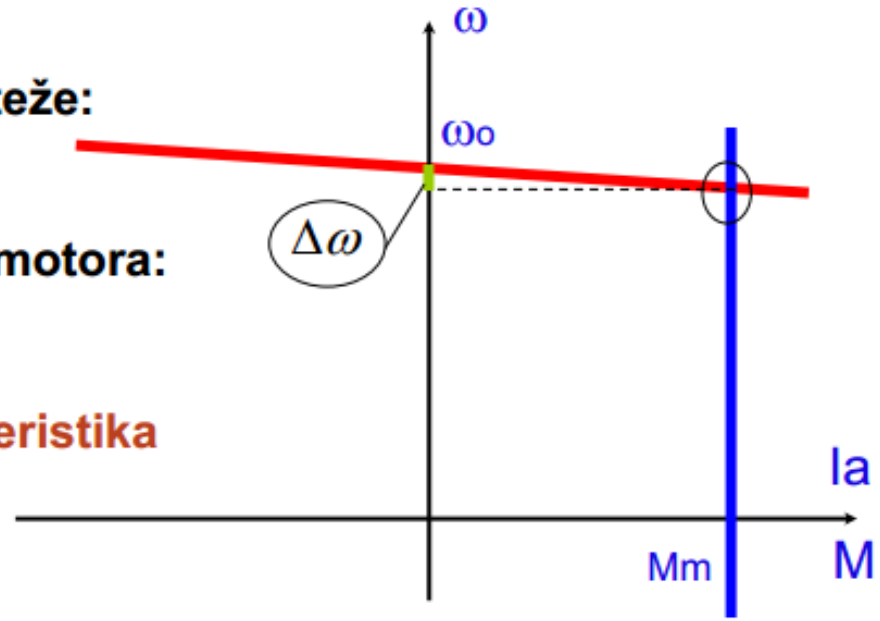
Електромагнетни моменат мотора:

$$M_e = \psi_f \cdot I_a$$

Спољна (механичка) карактеристика мотора:

$$\omega = \frac{U_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} \cdot M_e$$

$$\omega = \omega_o - \Delta\omega(M_m)$$

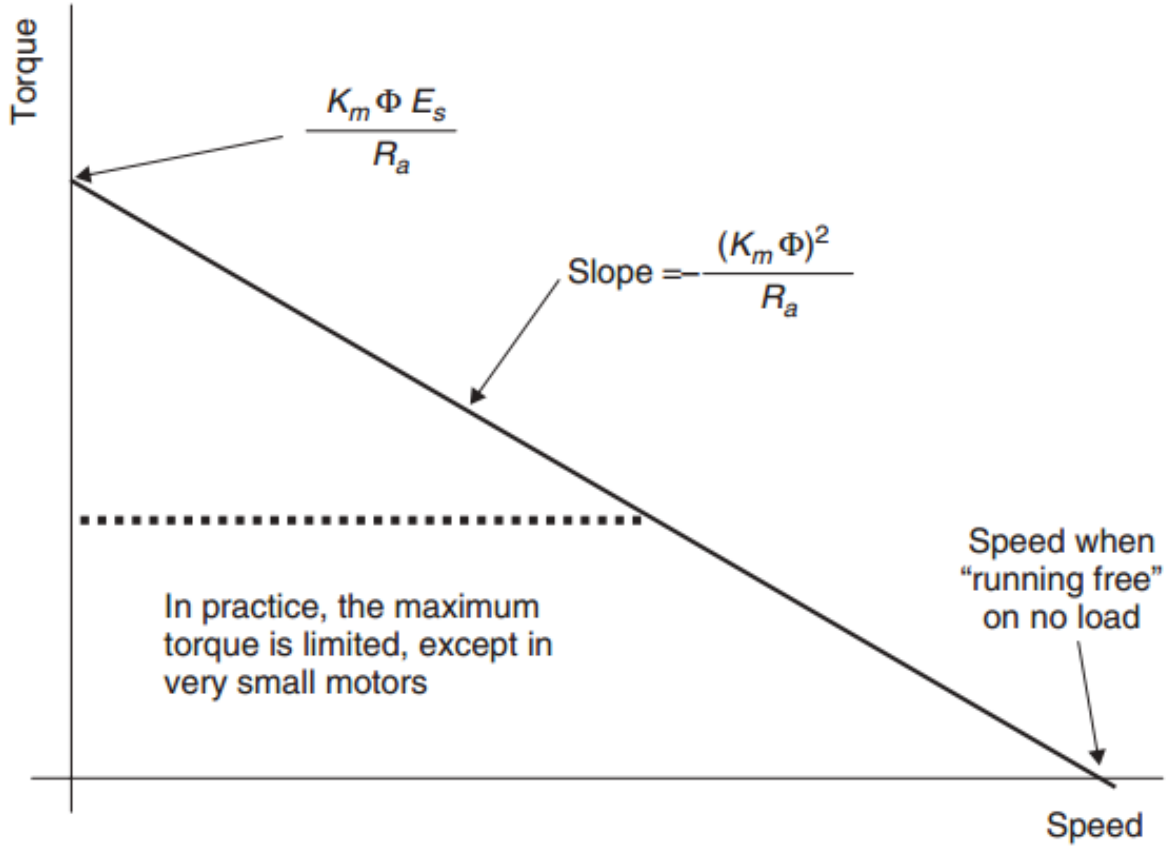


КАРАКТЕРИСТИКА ЈЕ ТВРДА

Независно побуђен ЈСМ

- Као зависност момента од брзине мотора

$$T = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2}{R_a}\omega$$



- T – момент мотора
- KmΦ=Ψ – флуксни обухват, Φ – флукс мотора, Km – конструкциона константа
- Es – напон напајања
- Ra – укупни отпор арматуре

Спољна карактеристика JCM

- Пример
  - Motor speed = 70 rpm V^{-1}
  - Armature resistance = 0.016 Ω.

  24 V supply

$$\omega = \frac{E}{K_m \Phi} \text{ rad s}^{-1} = \frac{60}{2\pi K_m \Phi} E \text{ rpm}$$

$$\frac{60}{2\pi K_m \Phi} = 70 \Rightarrow K_m \Phi = \frac{60}{2\pi \times 70} = 0.136$$

$$T = 205 - 1.16\omega$$

At zero speed there is no back EMF.

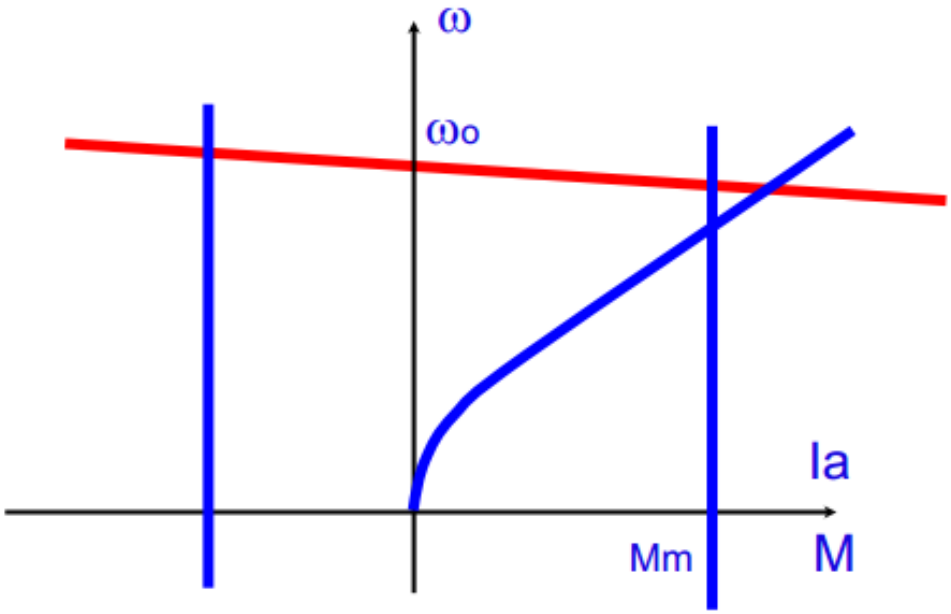
$$I \frac{V}{R} = \frac{E_s}{R_a} = \frac{24}{0.016} = 1500 \text{ A}$$

The stated limit on current is 250 or 350 A for up to 5 s.

$$T = K_m \Phi I = 0.136 \times 250 = 34 \text{ N m}$$

The maximum power is about 5 kW

Механичка карактеристика мотора и оптерећења

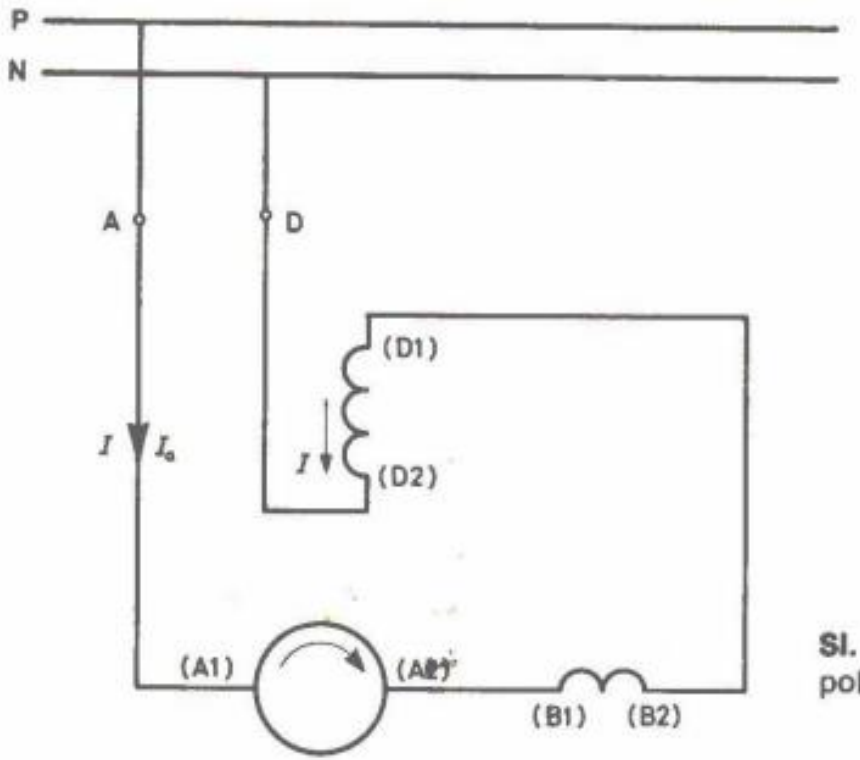


Stacionarna radna tačka se nalazi u preseku mehaničke karakteristike radne mašine i mehaničke karakteristike motora.

$$M_e = M_m$$

Редни мотор једносмерне струје

- Струја побуде једнака је струји арматуре, односно струји мотора, јер су намотаји побуде и арматуре везани редно



Sl. 21. Serijski uzbuđeni motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

Редни ЈСМ – спољна карактеристика

- Као зависност брзине од момента мотора (слично се може извести и обрнута зависност)

Pretpostavimo da je motor nezasićen:

$$\psi_f = M_{af} \cdot I_a$$

Jednačina naponske ravnoteže:

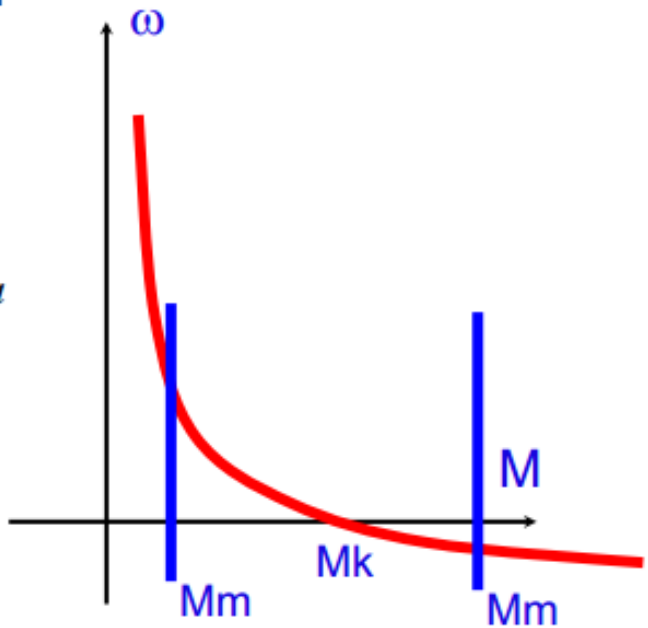
$$U_a = R_u \cdot I_a + \omega \cdot \psi_f = \left(R_u + \omega \cdot M_{af}\right) \cdot I_a$$

Elektromagnetni momenat motora:

$$M_e = \psi_f \cdot I_a = M_{af} \cdot I_a^2$$

Spoljna (mehanička) karakteristika motora:

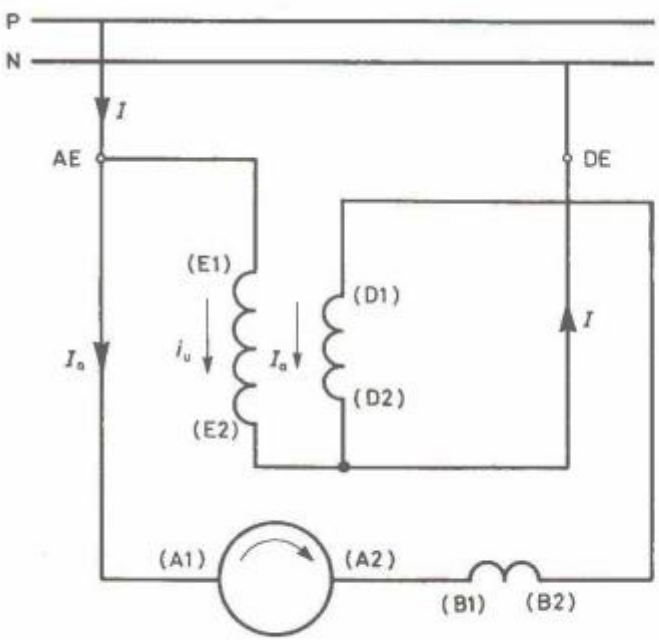
$$\omega = \frac{U_a}{\sqrt{M_{af} \cdot M_e}} - \frac{R_u}{L_f}$$



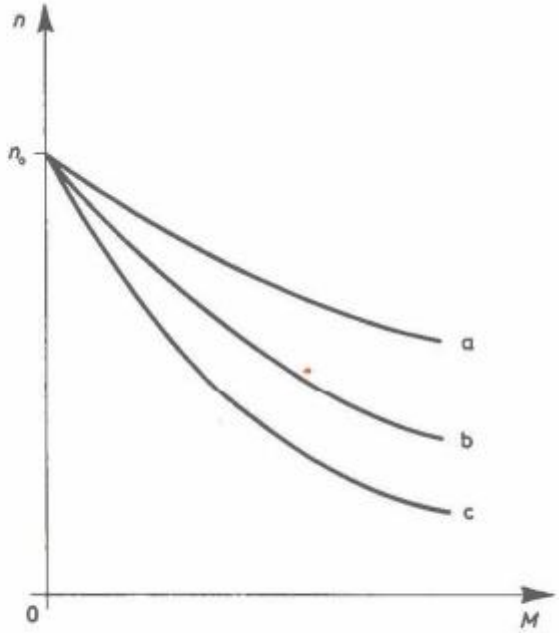
KARAKTERISTIKA JE MEKA

Компаундни ЈСМ – спољна карактеристика

- Део побуде је изведен редно, док је други део побуде изведен паралелно



Sl. 23. Kompaundirani motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)



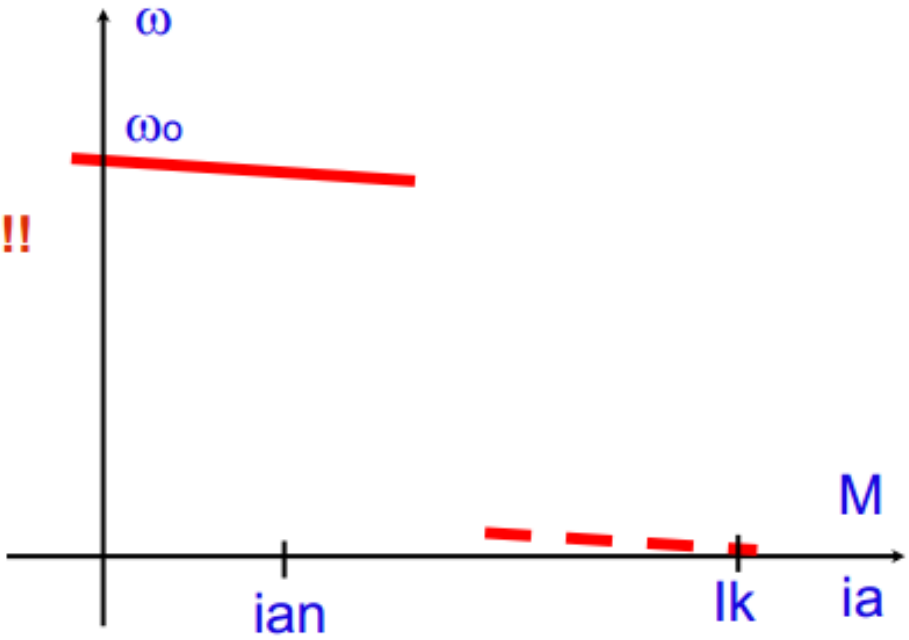
Sl. 24. Vanjske karakteristike kompaundiranog motora

Покретање ЈСМ – начини покретања

Покреću se pri nominalnoj pobudi. Ako bi u trenutku polaska motoru nametnuli nominalan napon indukta struja indukta bi iznosila:

$$I_k \approx \frac{U_{an}}{R_a} >>> I_{an}$$

MOTOR BI BIO UNIŠTEN!!!

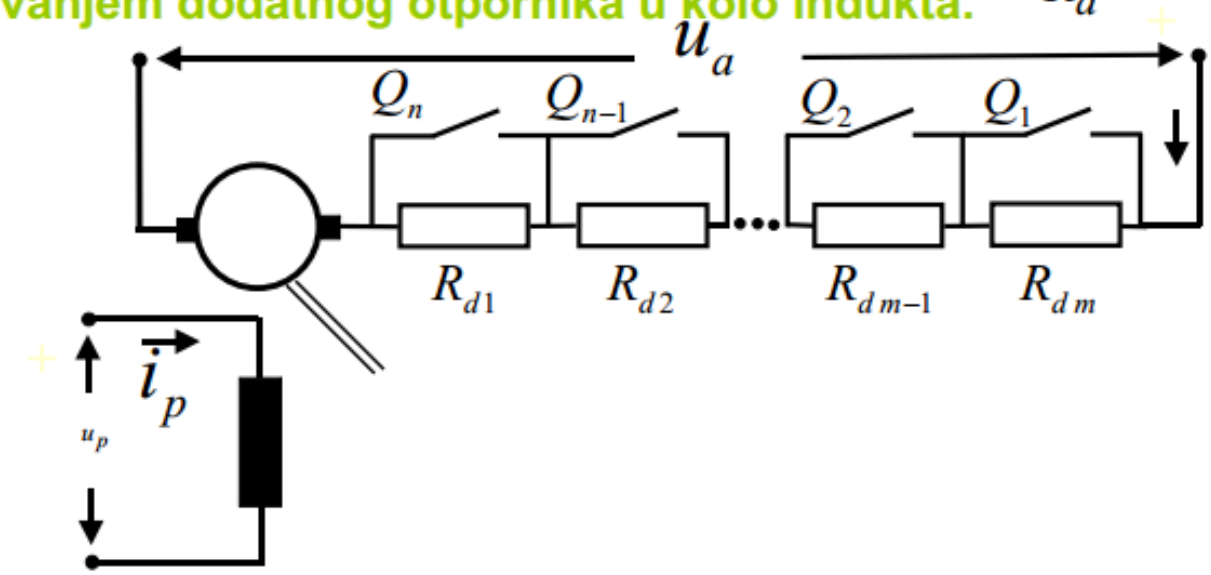


Покретање ЈСМ – начини покретања

Navedini problem prevelike struje polaska može se rešiti na dva načina:

$$I_k \approx \frac{U_{an}}{R_a} >>> I_{an}$$

Dodadvanjem dodatnog otpornika u kolo indukta.



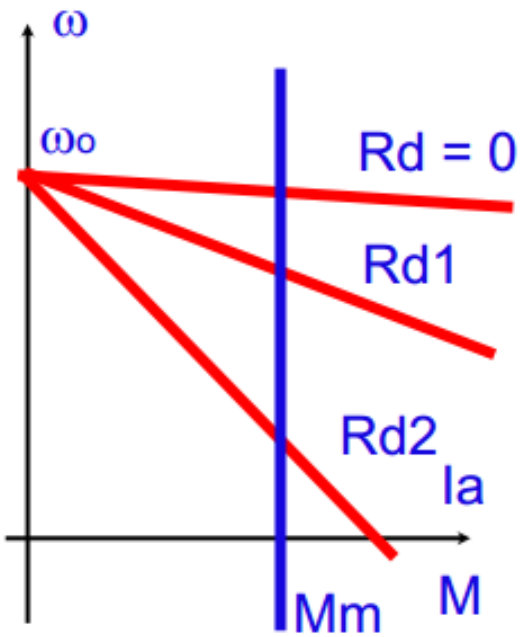
Покретање ЈСМ – начини покретања

- Закључак који се овде може извести: погодним избором спољних параметара може се модификовати изглед механичке карактеристике мотора

Kako izgledaju spoljne karakteristike motora sa dodatnim otpornikom u kolu indukta?

$$\omega = \frac{U_a}{\psi_f} - \frac{R_a + R_d}{\psi_f^2} \cdot M_e$$

$$\omega = \omega_o - \Delta\omega(M_m)$$



Brzina praznog hoda je nepromenjena.
Promenjen je nagib i struja polaska.

Покретање ЈСМ – начини покретања

- Обезбеђује претварач енергетске електронике код електричних возила (нпр. чопер за ЈСМ)

Navedini problem prevelike struje polaska može se rešiti na dva načina:

$$I_k \approx \frac{U_{an}}{R_a} >>> I_{an}$$

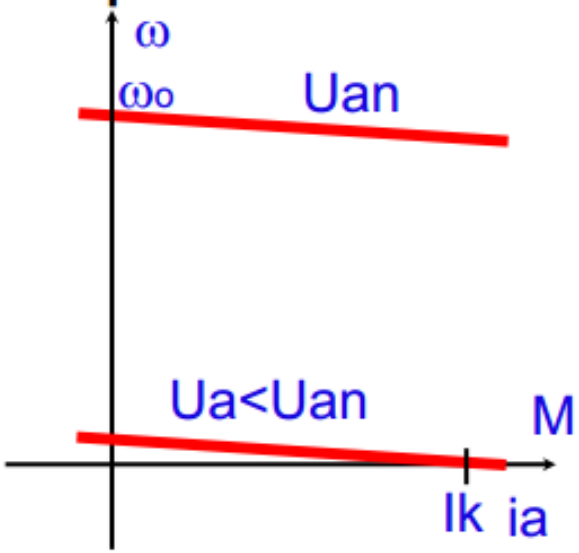
Pokretanjem motora sa sniženim naponom.

Kako izgledaju spoljne karakteristike motora pri sniženom naponu indukta?

$$\omega = \frac{U_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} \cdot M_e$$

$$\omega = \omega_o - \Delta\omega(M_m)$$

Brzina praznog hoda je promenjena.
Nagib karakteristike je stalan.



Управљање брзином ЈСМ (са независном побудом)

$$\omega = \frac{U_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} \cdot M_e$$

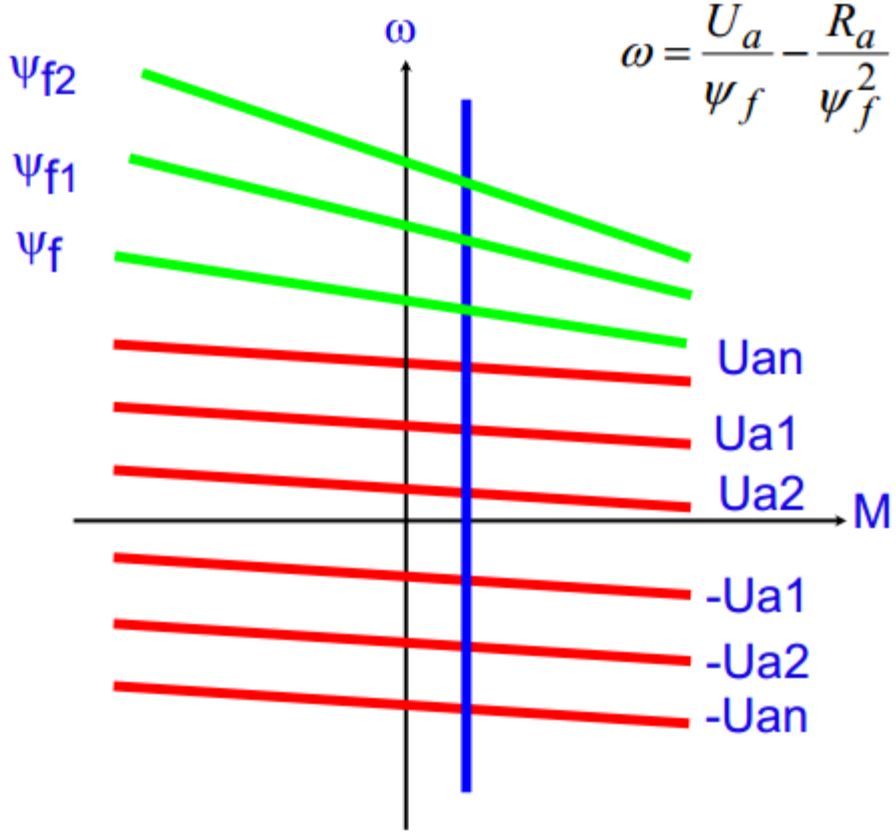
Два су управљачка улаза за подешавање брзине обртања: напон индукта и побудни флукс.

Променом побудног флуксa мења се како нагиб карактеристике тако и брзина празног хода.

Управљање брзином ЈСМ (са независном побудом)

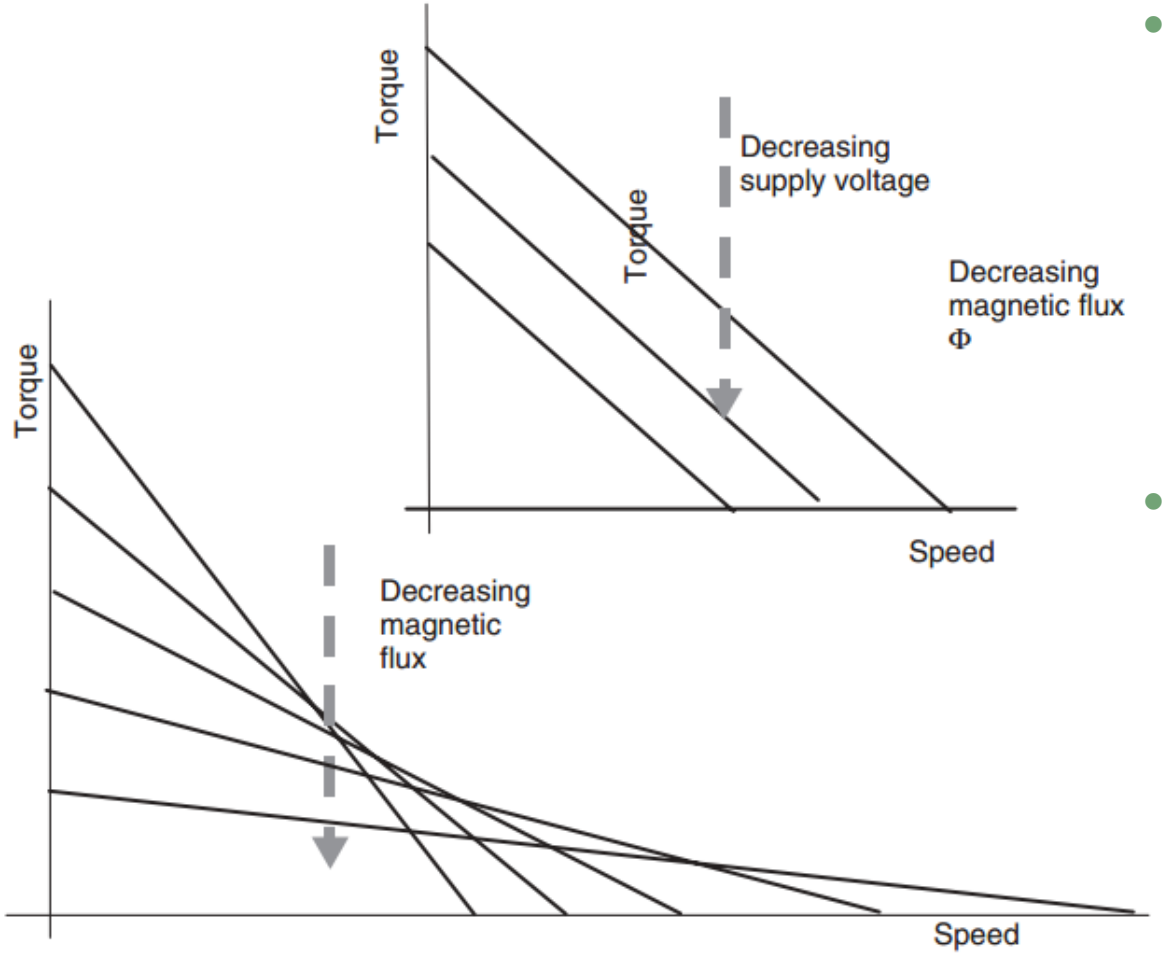
- За брзине мање од номиналне флукс се одржава на номиналној вредности а напон се мења у границама до номиналне вредности; за веће брзине напон се држи на номиналној вредности, а флукс смањује (мах. до 30% номиналне вредности)

$$\omega = \frac{U_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} \cdot M_e$$



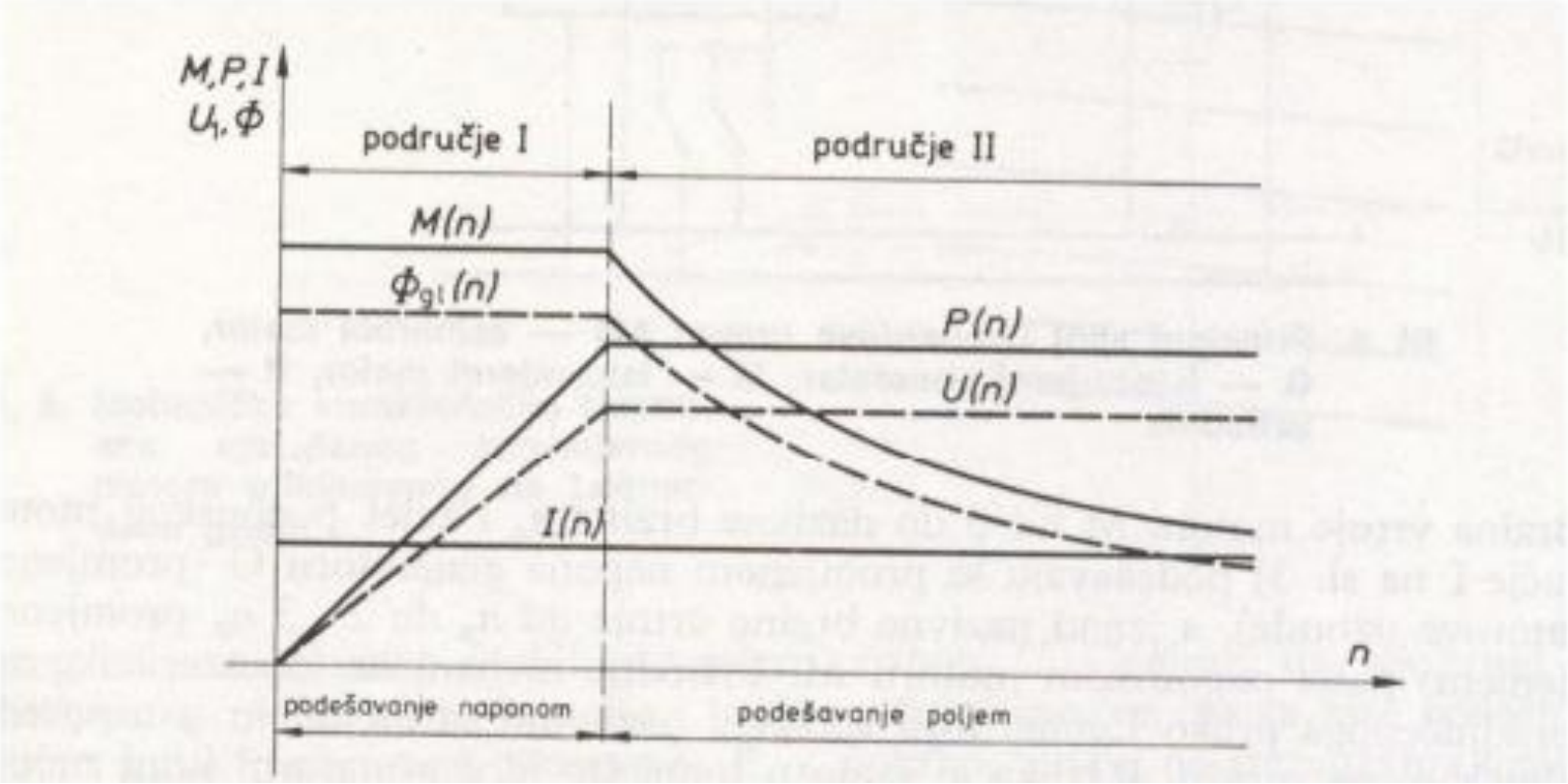
Управљање брзином JCM (са независном побудом)

- Представљено на моментној карактеристици: зависност момента од брзине мотора



- Ако се смањи напон напајања смањује се максимални момент пропорционално (нагиб остаје исти)
- Смањењем флукса такође се смањује момент, али се проширује опсег брзина (погодно код ел. возила)

Управљање брзином ЈСМ (са независном побудом)



Хибридна и електрична возила

Ефикасност и кочење ЈСМ

Губици снаге код JCM

- Губици:
  - Механички
  - У гвожђу
  - Електрични

- Механички губици:
  - Губици на трење
  - Губици на вентилацију
  - Механички губици на колектору

Губици снаге код ЈСМ

- Губици у гвожђу:

- Губици у зубцима ротора:
  - Пропорционални су маси зубаца, B_{max}^2, $f^{1,3}$
  - Зависе од квалитета лимова
  - Не зависе од оптерећења код компензованих машина, док код некомпензованих зависе
- Губици у јарму ротора:
  - Пропорционални су маси јарма, , B_{max}^2, $f^{1,3}$
  - Зависе од квалитета лимова
  - Не зависе од оптерећења
- Губици у гвожђу главних полова
  - Узроковани варијацијом магнетног отпора под половима (због ожлебљености ротора)
  - Пропорционални B_{max}^2, $f^{1,5}$

Губици снаге код JCM

- Електрични губици:
- Губици у одговарајућим намотајима. Зависе од квадрата струје кроз тај намотај.
- Електрични губици на колектору.
  - Настају при проласку струје мотора кроз прелазну отпорност четкица која има инверзну зависност од струје
  - Не мере се
  - Одређују се као: $P_{el\,č} = \Delta U_č \cdot I_a$
    - Где је пад напона на четкицама 1 V за граитне, а 0,3 V за металографитне четкице

Губици снаге код JCM

- Пример:

copper losses

$P = I^2 R$

Copper losses $= k_c T^2$

iron losses

Iron losses $= k_i \omega$

$k_c = 0.8 \qquad k_i = 0.1 \qquad k_w = 10^{-5} \qquad C = 20$

friction and windage

Friction power $= T_f \omega$

windage power $= k_w \omega^3$

good approximation

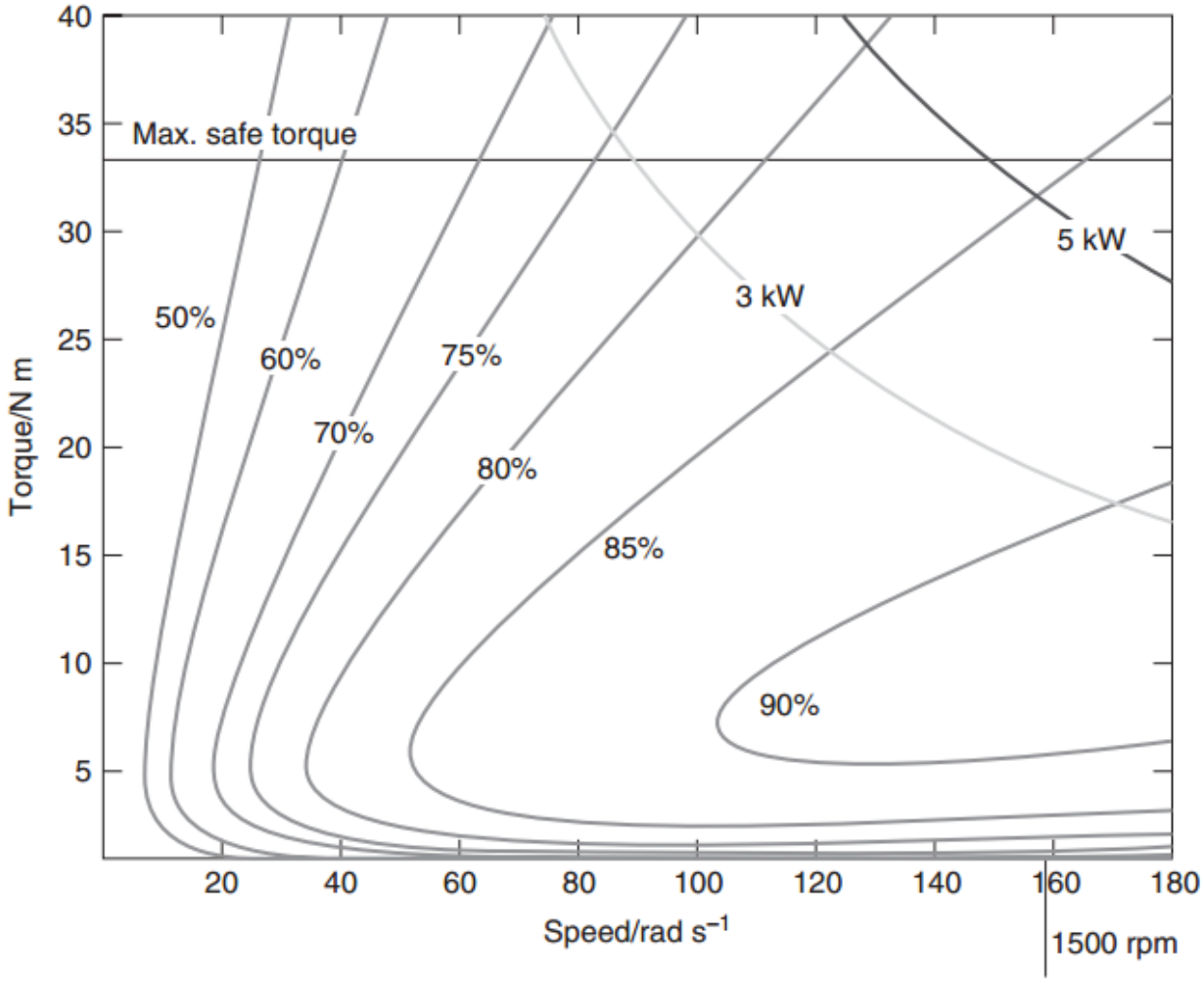
Total losses $= k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C$

$$\eta_m = \frac{\text{output power}}{\text{input power}}$$

$$\eta_m = \frac{\text{output power}}{\text{output power} + \text{losses}} = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C}$$

Губици снаге код JCM

- Пример: ефикасност JCM на различитим брзинама и при различитим оптерећењима



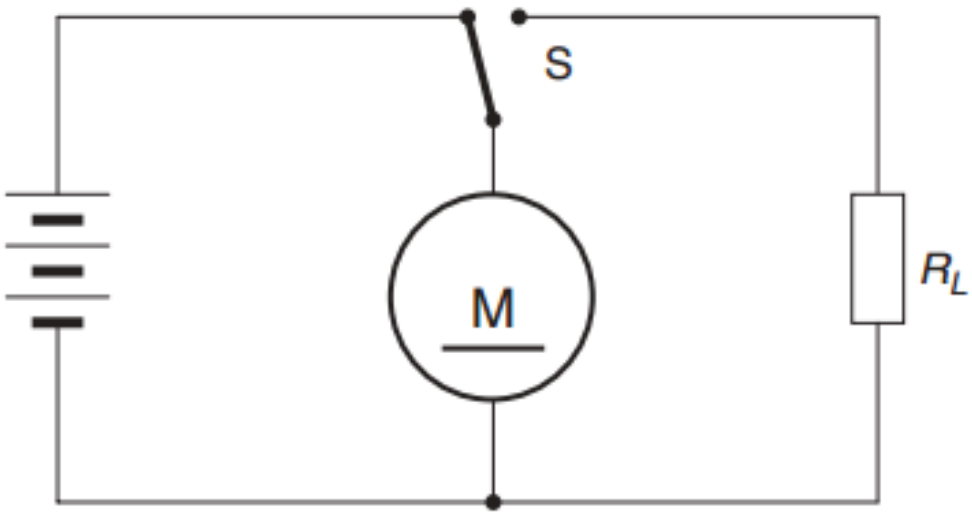
Кочење ЈСМ

- Двосмерна конверзија енергије код електричних машина (реверзибилан рад)
- Најједноставније разумети код ЈСМ, принцип важи и код осталих електричних машина

- Динамичко кочење
- Противструјно кочење

Кочење ЈСМ

- Динамичко кочење
- Генерисана кинетичка енергија се троши у виду топлоте на отпору са којим је мотор оптерећен

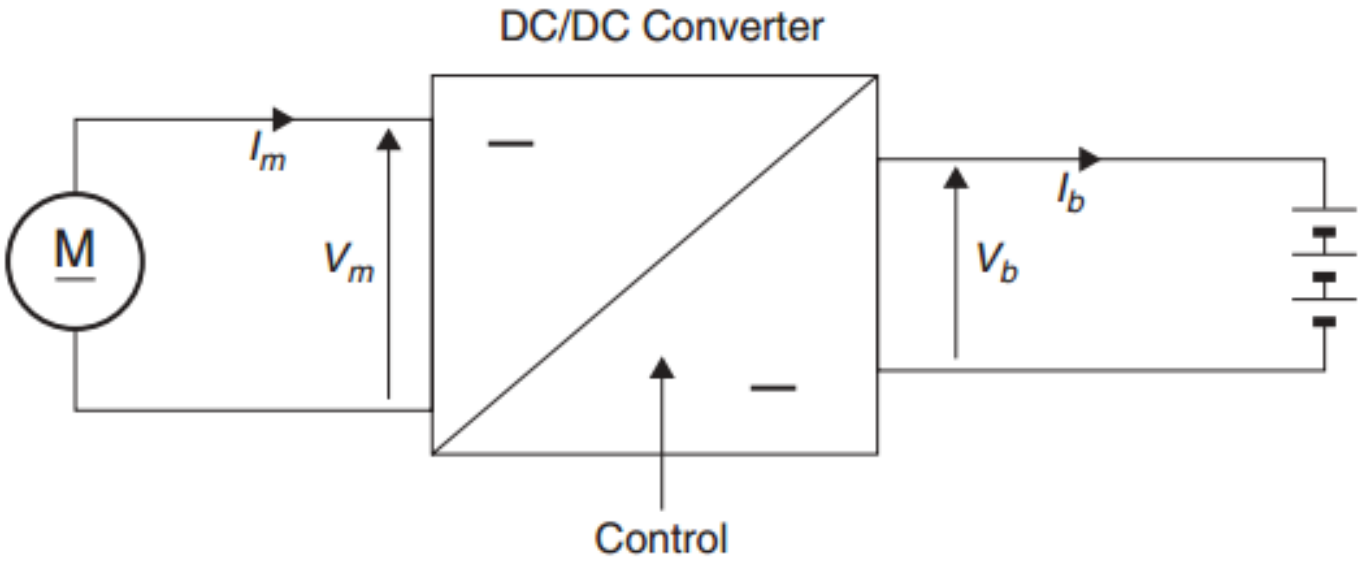


$$I = \frac{K_m \Phi \omega}{R_a + R_L}$$

$$T = -\frac{(K_m \Phi)^2 \omega}{R_a + R_L}$$

Кочење ЈСМ

- Регенеративно (противструјно) кочење



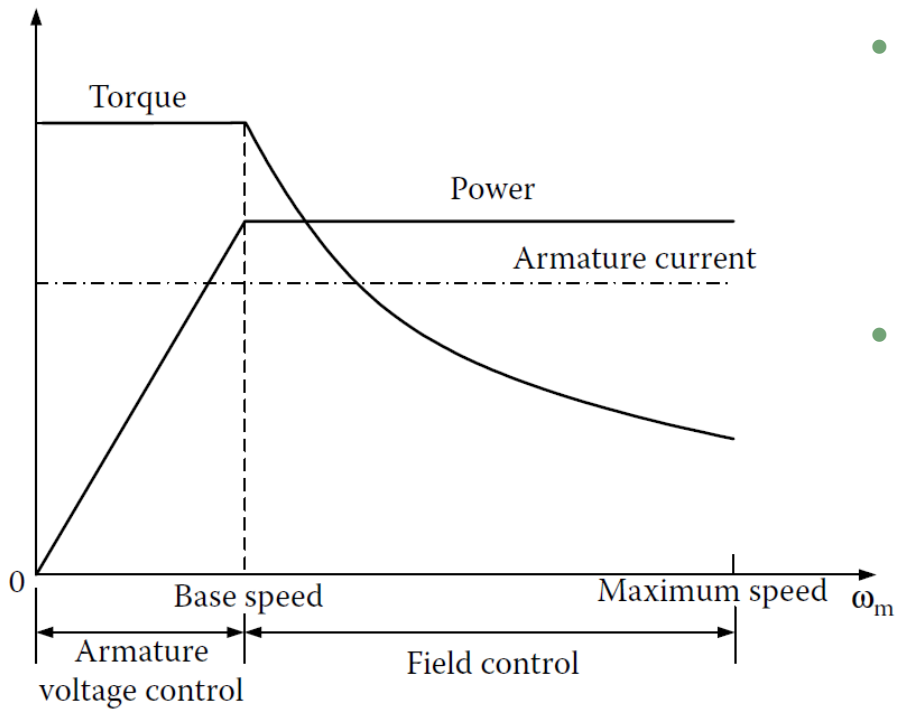
$$I = \frac{V}{R} = \frac{K_m \Phi \omega - V_b}{R_a}$$

Хибридна и електрична возила

Претварачи

Управљање машином једносмерне струје са независном побудом

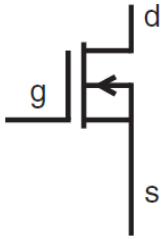
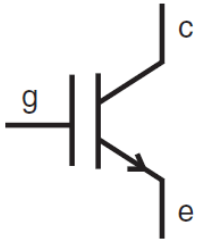
- Најфлексибилнија врста машине са становишта могућности управљања
- Област константног момента испод одређене брзине
- Област константне снаге након те исте радне тачке



- У области константног момента струја ротора и флукс се одржавају номиналним – то значи напон се пропорционално повећава са порастом брзине
- Област константне снаге – напон се одржава номиналним, флукс се смањује како би се електромоторна сила и струја одржала константном

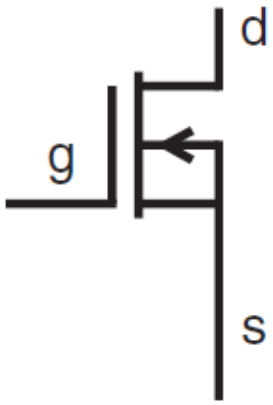
Прекидачке компоненте

- Потреба за различитим нивоима напона и струја
- Већина електронских уређаја захтева одговарајући константни напон
- Код машина обично је потребан променљив напон, који се добија из константног или наизменичног извора

Type	Thyristor	MOSFET	IGBT
Symbol			
Maximum voltage (V)	4500	1000	1700
Maximum current (A)	4000	50	600
Switching time (μs)	10–25	0.3–0.5	1–4

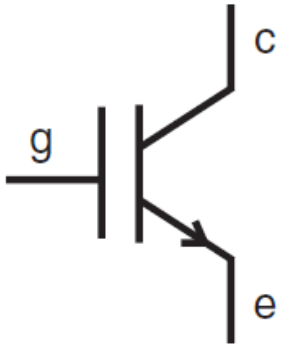
Прекидачке компоненте

- MOSFET - укључује се тако што се на гејт доведе напон између 5 и 10 V
- У укљученом стању отпорност између дрејна и сорса је јако мала $R_{DS_{ON}}$
- Уколико су напонски нивои већи, отпорност је већа, па су и губици већи
- Ове компоненте се користе за апликације где су мање снаге у оптицају



Прекидачке компоненте

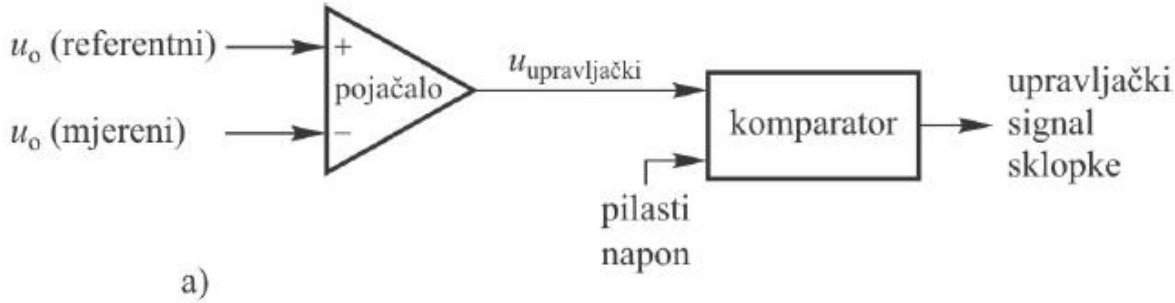
- IGBT – insulated gate bipolar transistor
- Комбинује добре особине биполарних транзистора и MOSFET-а
- Захтева мали напон на гејту, уз занемарљиву струју гејта
- Главна струја протиче од колектора ка емитеру
- Користи се за апликације од снага 1 KW па до реда MW
- Бржи од транзистора



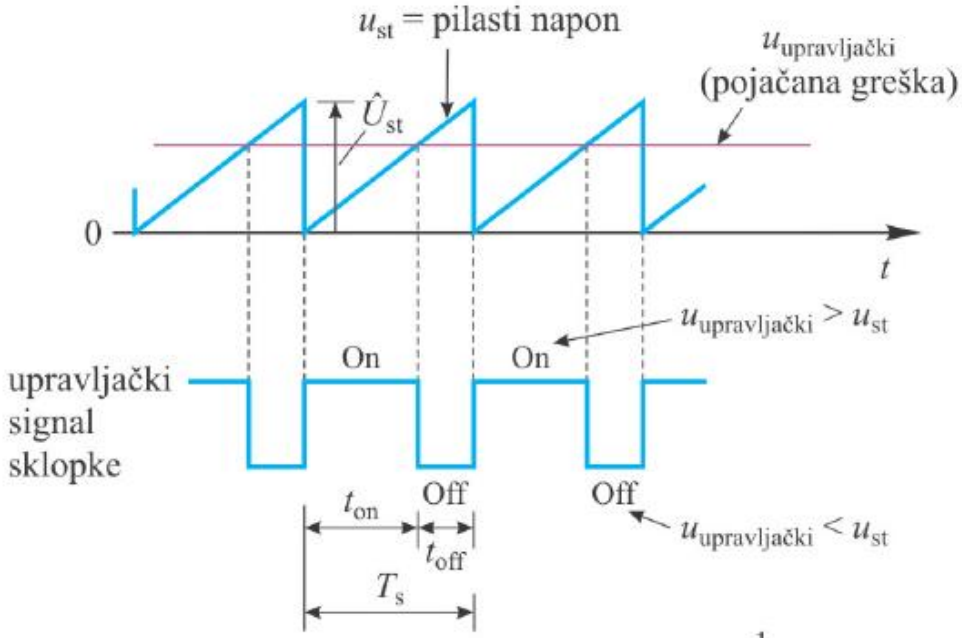
Прекидачке компоненте

- Користи се искључиво у енергетским апликацијама
- Паљење тиристора – доводе се импулси на гејт
- Највећи опсег напона и струја
- Са становишта ел. аутомобила то није значајно, с обзиром да се са IGBT прекидачима може постићи довољна снага
- Примена тиристора често у вучи, посебно железница

Начело управљања прекидачима



a)



b) (sklopna frekvencija $f_s = \frac{1}{T_s}$)

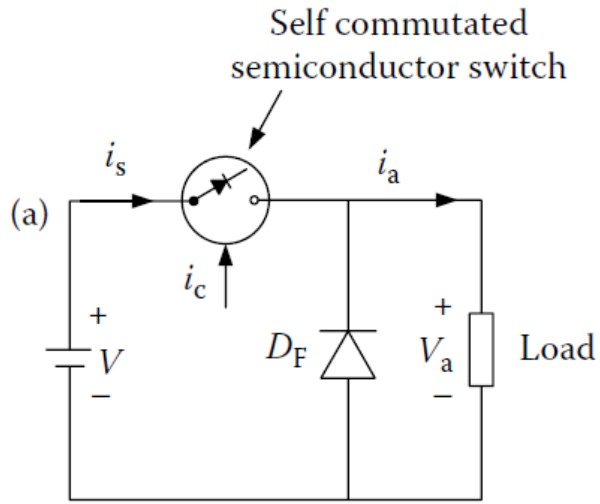
Врсте претварача енергетске електронике

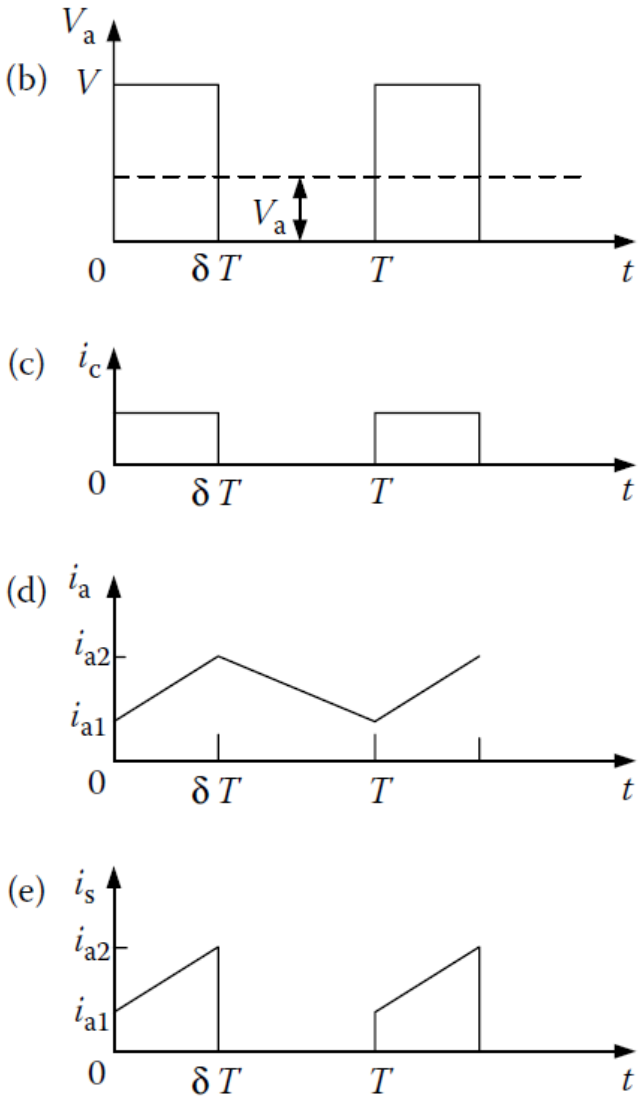
- Подизач напона – boost converter
- Спуштач напона – buck converter
- Чопери
  - Једноквадрантни
  - Двоквадрантни
  - Четвороквадрантни
- Диодни исправљачи
- Тиристорски исправљачи
- Инвертори

Спуштач напона

- Ови претварачи имају бројне предности: велика ефикасност, флексибилност у смислу управљања, мала маса и величина, брз одзив, могућност рекуперације при веома малим брзинама
- Висока фреквенција прекидања – омогућава мању таласност напона арматуре, те стога и струје арматуре. То доводи и до мањих губитака, и бољег транзијентног одзива

Спуштач напона





Спуштач напона

- За коло са претходне слике претпостављамо да имамо индуктивни потрошач на излазу (дигресија за RL потрошач)
- Прекидач S (може бити било која прекидачка компонента) се отвара и затвара периодично у току једне периоде T и остаје затворен време $t_{on}=\delta T$, где δ има вредности $0<\delta<1$.
- $\delta= t_{on}/T$ се назива фактор испуне претварача

$0\leq t\leq \delta T$ се назива интервал вођења
$\delta T \leq t\leq T$ се назива интервал замајне диоде

- Замајна диода – freewheeling diode – служи да одржи континуитет струје потрошача током периода када прекидач не води. Поред овога, спречава да се појави транзијентни напон на прекидачу услед комутације или наглог захтева за променом струје на индуктивности

Спуштач напона

$$V_a = \frac{1}{T}\int_0^T v_a \, dt = \frac{1}{T}\int_0^{\delta T} V \, dt = \delta V$$

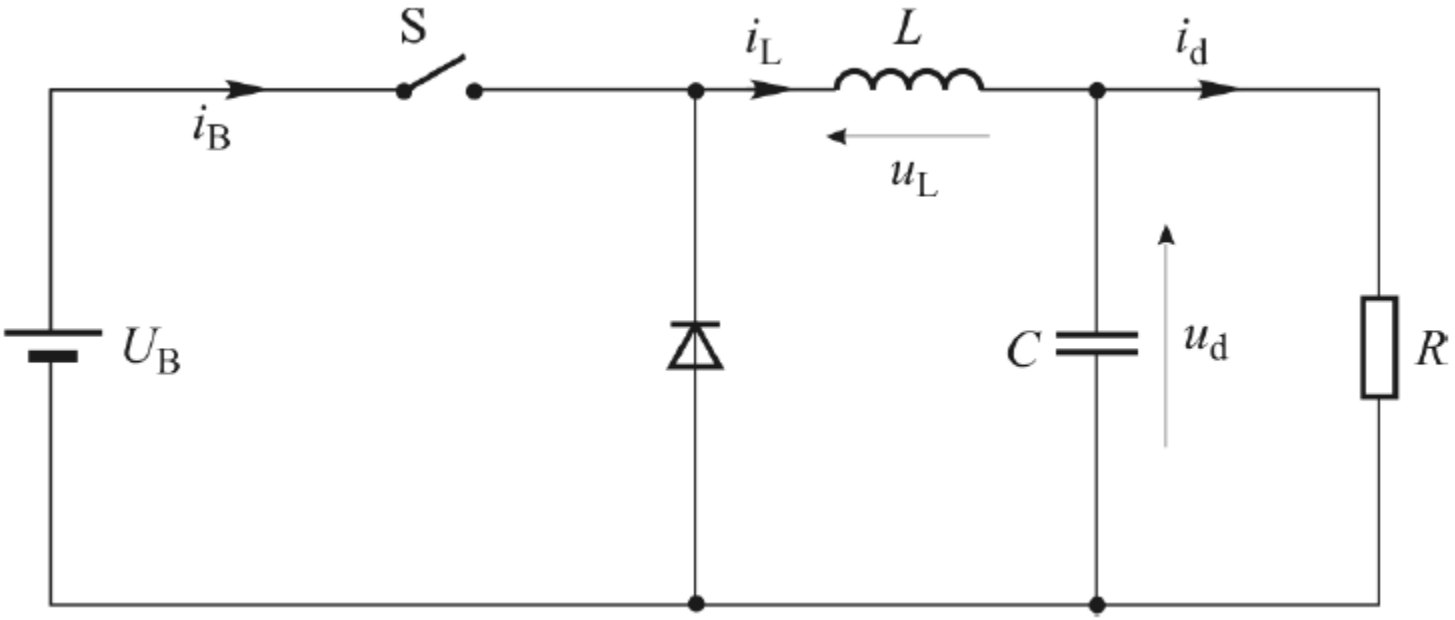
- Мењањем фактора испуне δ између 0 и 1, напон се мења у границама између 0 и V.
- Прекидач S може бити контролисан на различите начине, како би се постигао променљиви фактор испуне δ
  - Time ratio control – импулсна модулација
    - Константна фреквенција (T се не мења, мења се период укључења)
    - Променљива фреквенција (мења се T или се мења и t_{on} и T)
  - Current limit control - амплитудна модулација
- Рад претварача са малим фреквенцијама лоше утиче на карактеристике мотора, потребан је филтар, што поскупљује систем, те се стога ређе користи

Спуштач напона

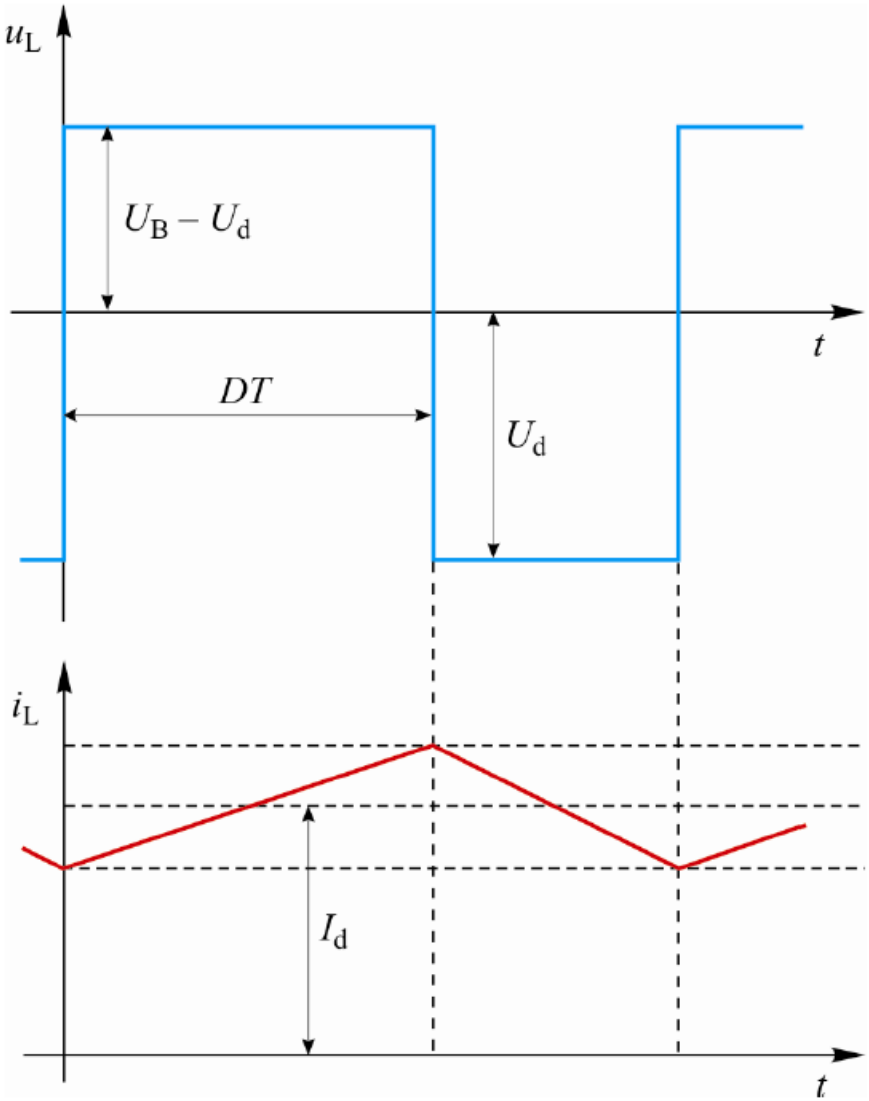
- Код амплитудне модулације, δ се контролише индиректно, одржавањем струје ротора, између неке минималне и максималне вредности
- Ова метода резултује променљивом учестаношћу и променљивим временом вођења
- Генерално, код подизача напона се могу уочити сл. чињенице:
  - Струја извора (нпр. батерије) није константна већ је пулсна (има више хармонике), што може утицати на напон извора. Због тога се обично користи LC филтар, како би се сметње ограничиле, и не би утицале на друге уређаје
  - Управо због смањења хармоника, спуштач треба да ради на што је могуће већој фреквенцији, а да губици буду прихватљиви
  - Напон на потрошачу (мотору) није идеалан једносмерни напон
- Овај претварач се назива и чопер класе А

Спуштач напона – друга конфигурација

- Претпоставимо да је вредност капацитивности кондензатора толико велика да је напон на потрошачу константан
- Средња вредност струје кроз потрошач је једнака средњој вредности струје индуктивности
- Средња вредност напона на диоди је једнака средњој вреднсоти напона потрошача



Спуштач напона – друга конфигурација



- Континуални режим рада
- Средња вредност напона на индуктивности у устаљеном стању је нула

$$(U_B - U_d)\cdot D\cdot T = U_d\cdot(1-D)\cdot T$$

$$U_B\cdot D - U_d\cdot D = U_d - U_d\cdot D$$

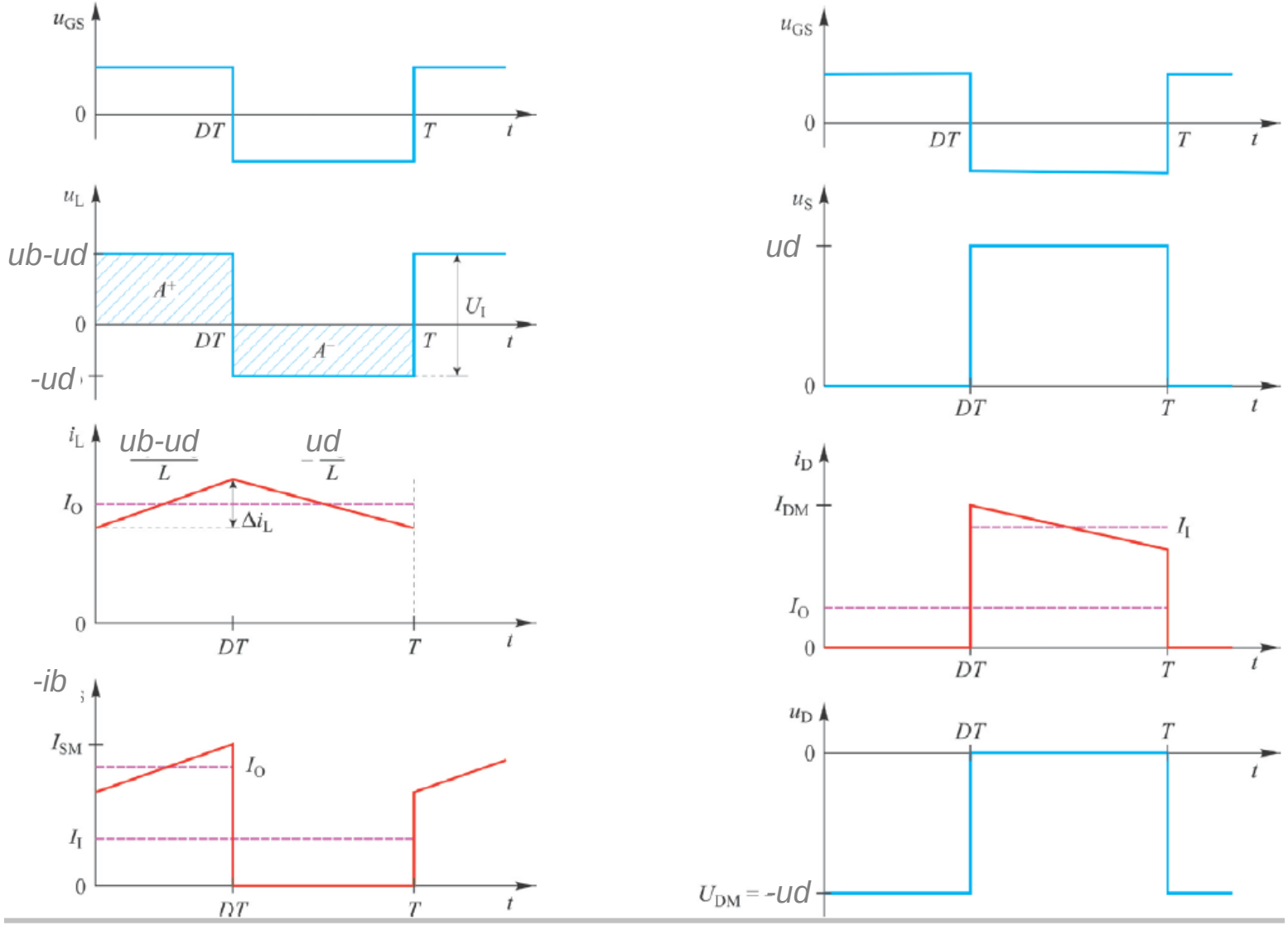
$$U_d = D\cdot U_B$$

$$P_B = P_d$$

$$U_B\cdot I_B = U_d\cdot I_d$$

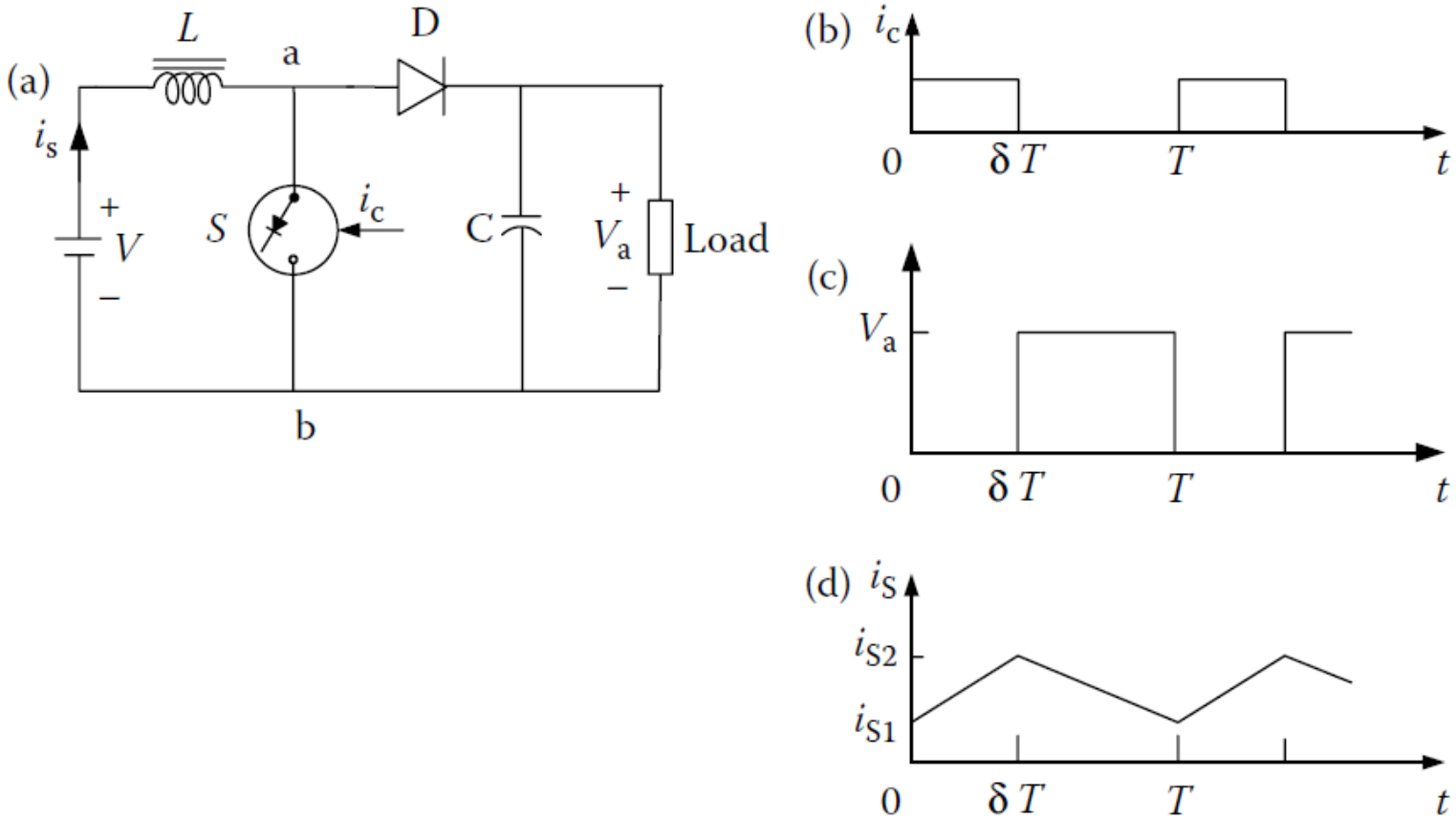
$$I_d = \frac{1}{D}\cdot I_B$$

Спуштач напона – друга конфигурација – детаљнији дијаграми

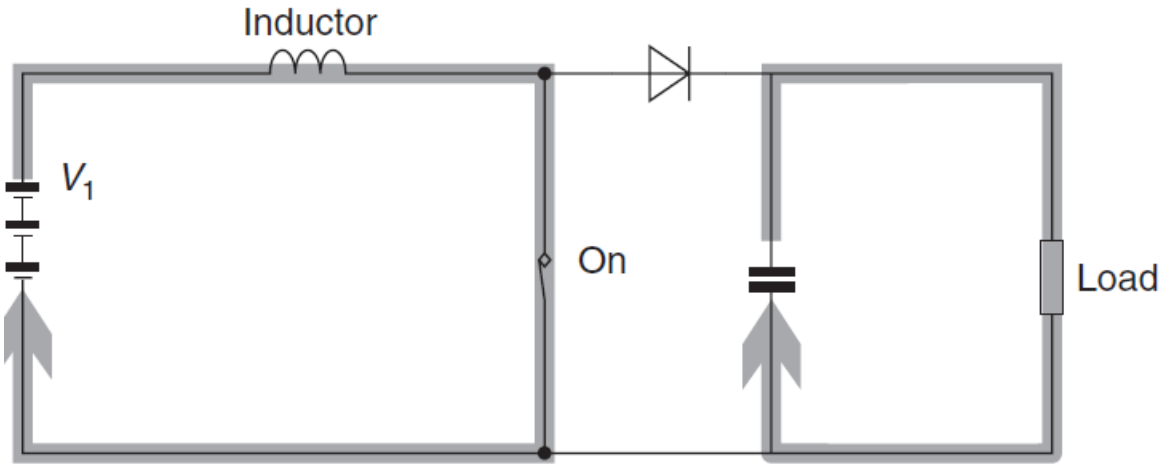


Подизач напона

- Овај чопер се назива чопер класе B
- Примена код ел. возила
- Користи се и код регенеративног кочења

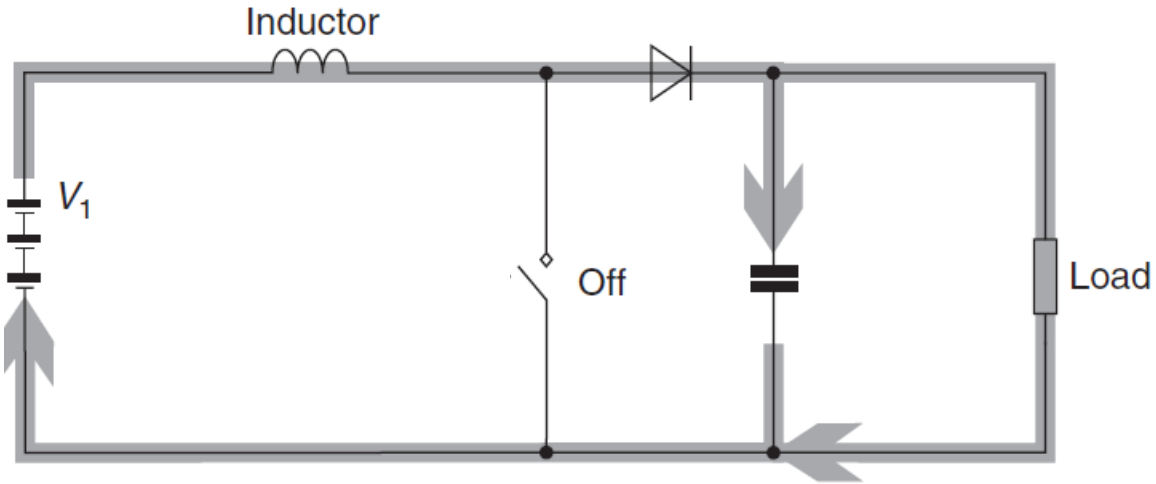


Подизач напона



Current paths while switch is ON

(a)



Current flow while switch is OFF

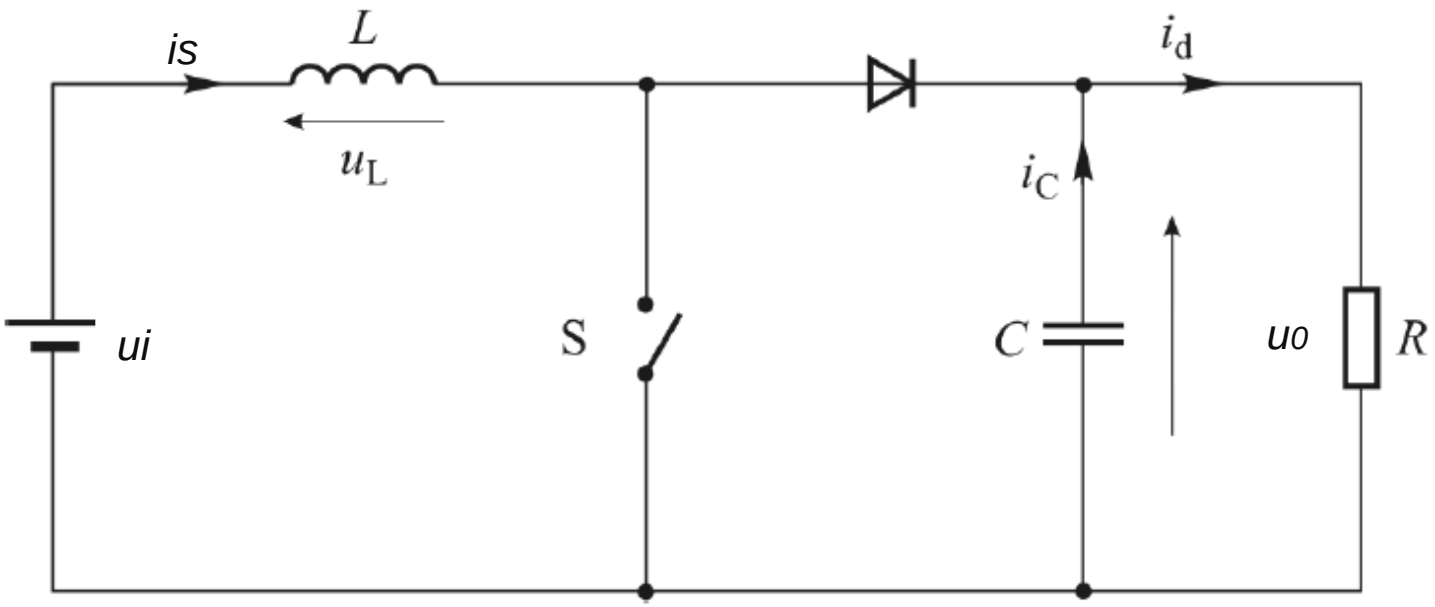
Подизач напона

- Континуални и дисконтинуални режим рада
  - Континулани – струја кроз калем не стигне да падне на нулу
  - Дисконтинуални – постоји период када струја индуктивности има нулту вредност
- Прекидач води док је обезбеђен импулс за паљење на његовој управљачкој електроди
- Током времена, вођена струја тече кроз индуктивност и расте линеарно, док се потрошач напаја из кондензатора. Ако је кондензатор довољно велике вредности, напон на излазу ће бити константан
- Када је прекидач отворен, струја тече кроз индуктивност, диоду и онда се дели на струју кондензатора и струју потрошача.

Подизач напона

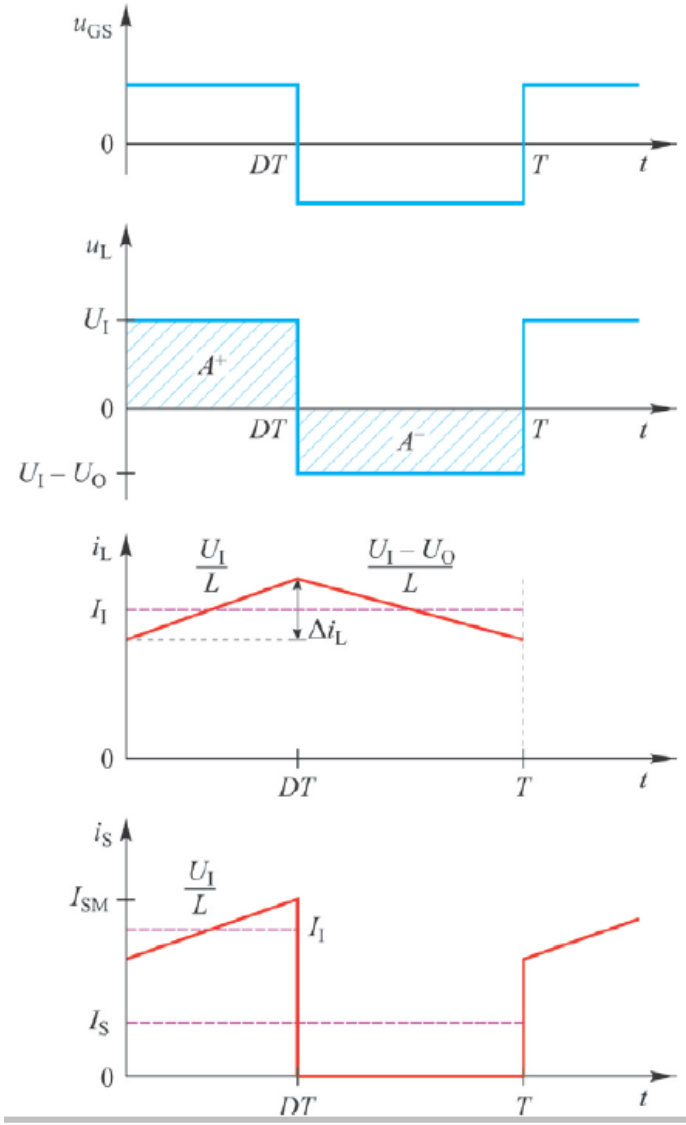
- Улога кондензатора је двострука
  - У тренутку отварања прекидача струје кроз индуктивност и потрошач нису исте, али када не би било кондензатора те две струје би се изједначиле, што би довело до великог индукованог напона на индуктивности, али и на потрошачу.
  - Друга улога кондензатора јесте да се смањи таласност излазног напона
  - Диода спречава да струја тече од оптерећења ка извору

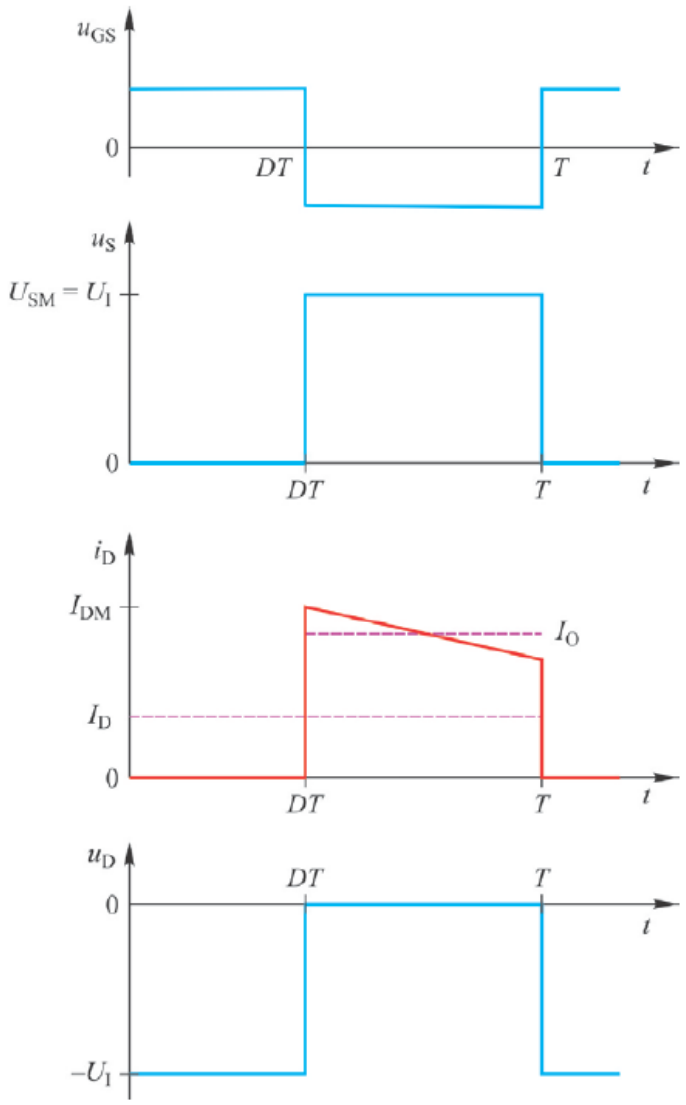
Подизач напона



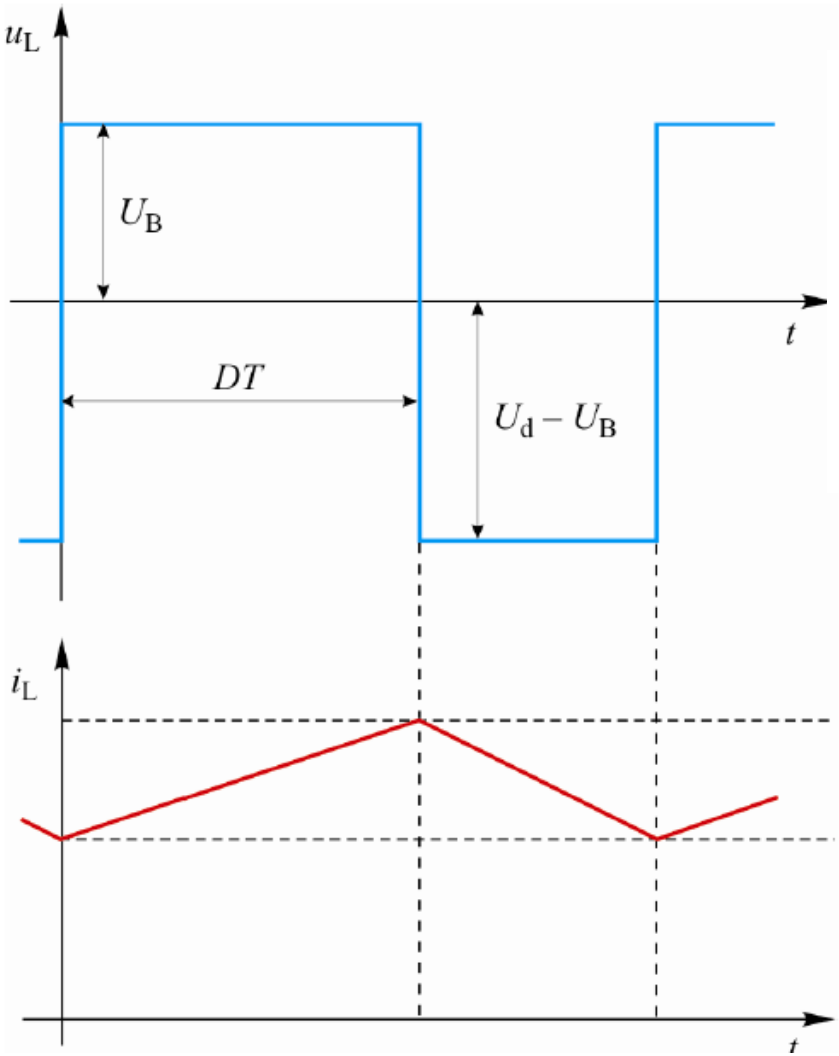
- Претпоставка: Вредост капацитивности кондезнатора је толико велика да је напон u0 константан

Подизач напона





Подизач напона



$$U_B \cdot D \cdot T = (U_d - U_B) \cdot (1 - D) \cdot T$$

$$U_B \cdot D = U_d - U_B - U_d \cdot D + U_B \cdot D$$

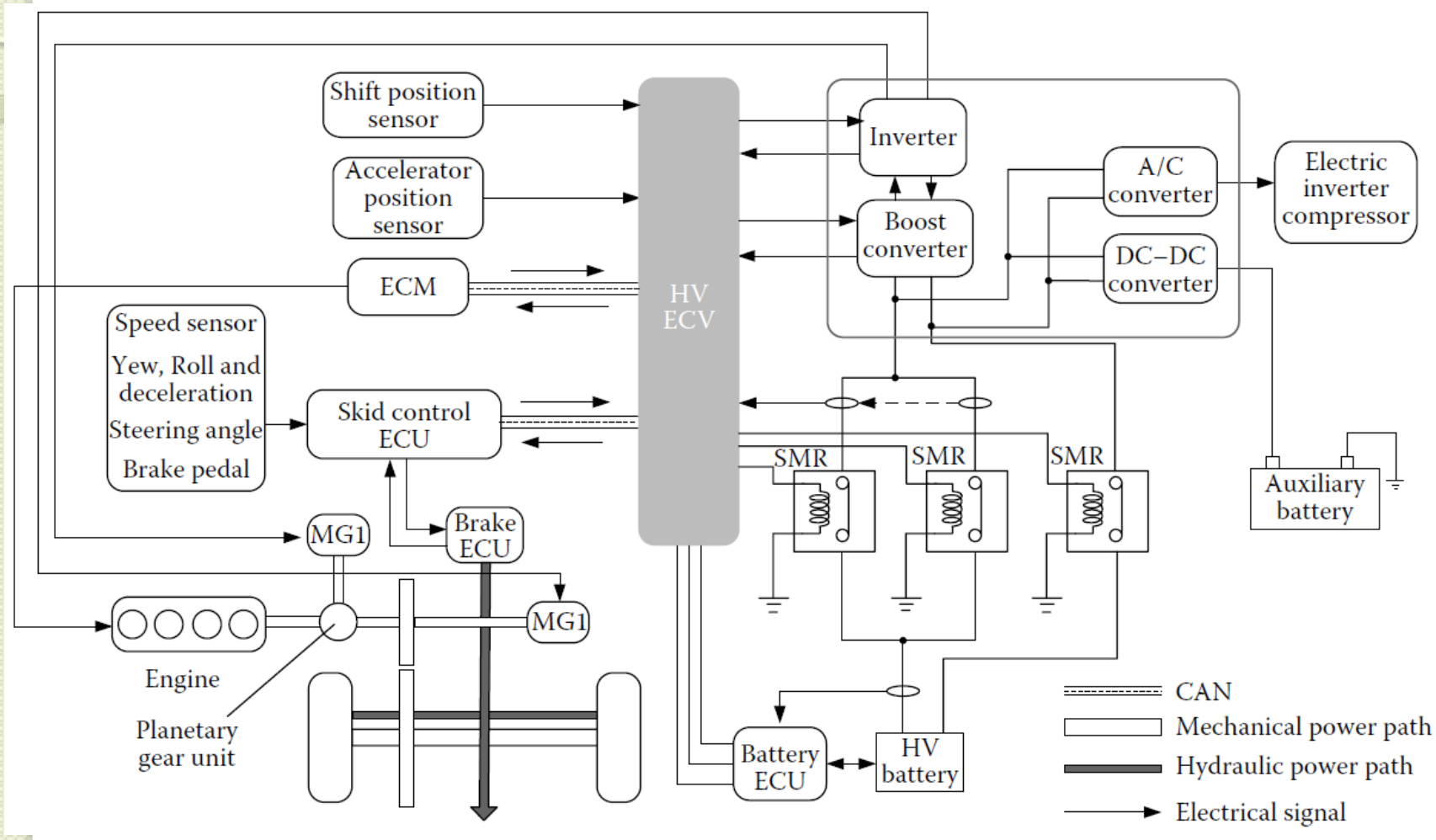
$$U_B = U_d (1 - D)$$

$$\frac{U_d}{U_B} = \frac{1}{1 - D}$$

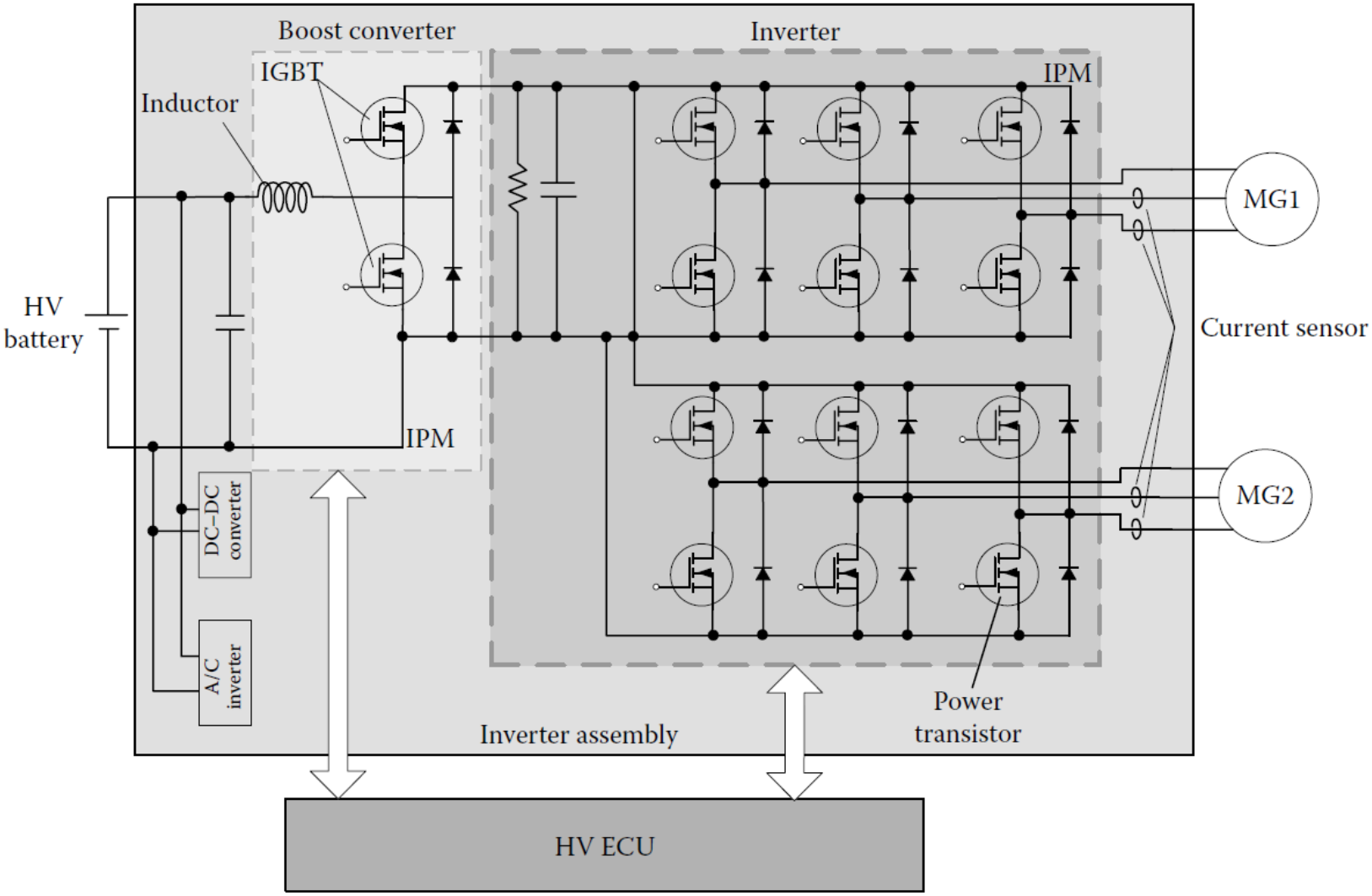
$$P_B = P_d \rightarrow U_B \cdot I_B = U_d \cdot I_d$$

$$\frac{I_d}{I_B} = \frac{U_B}{U_d} = 1 - D$$

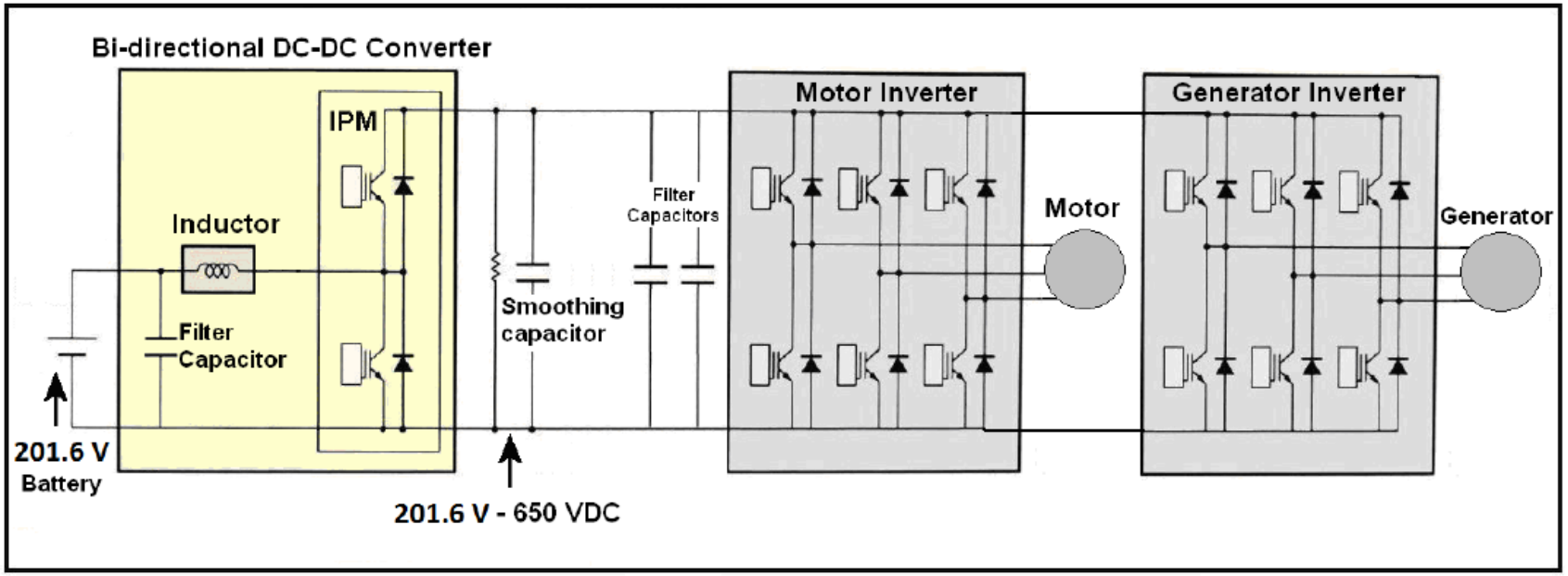
Примена подизача напона



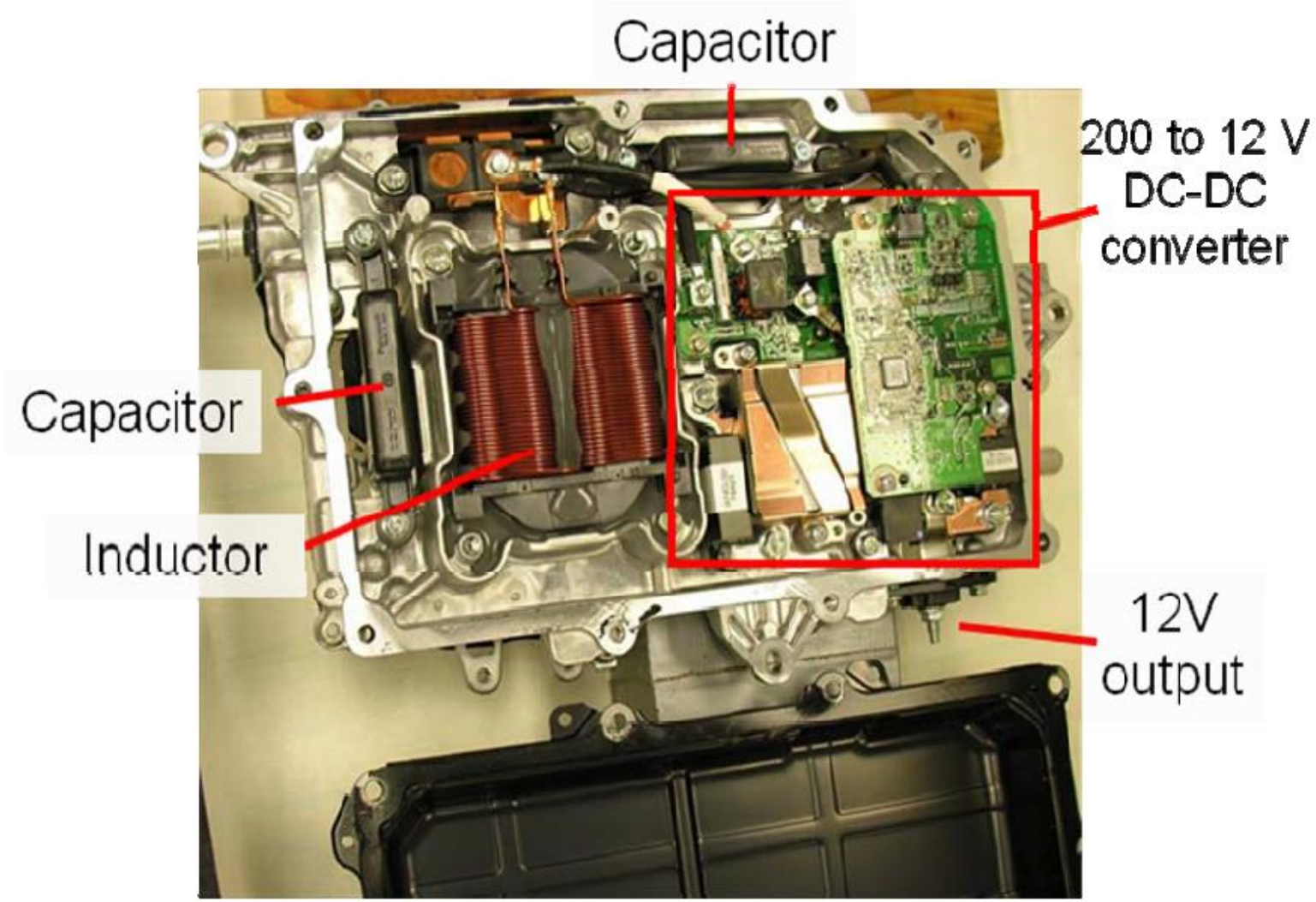
Примена подизача/спуштача напона



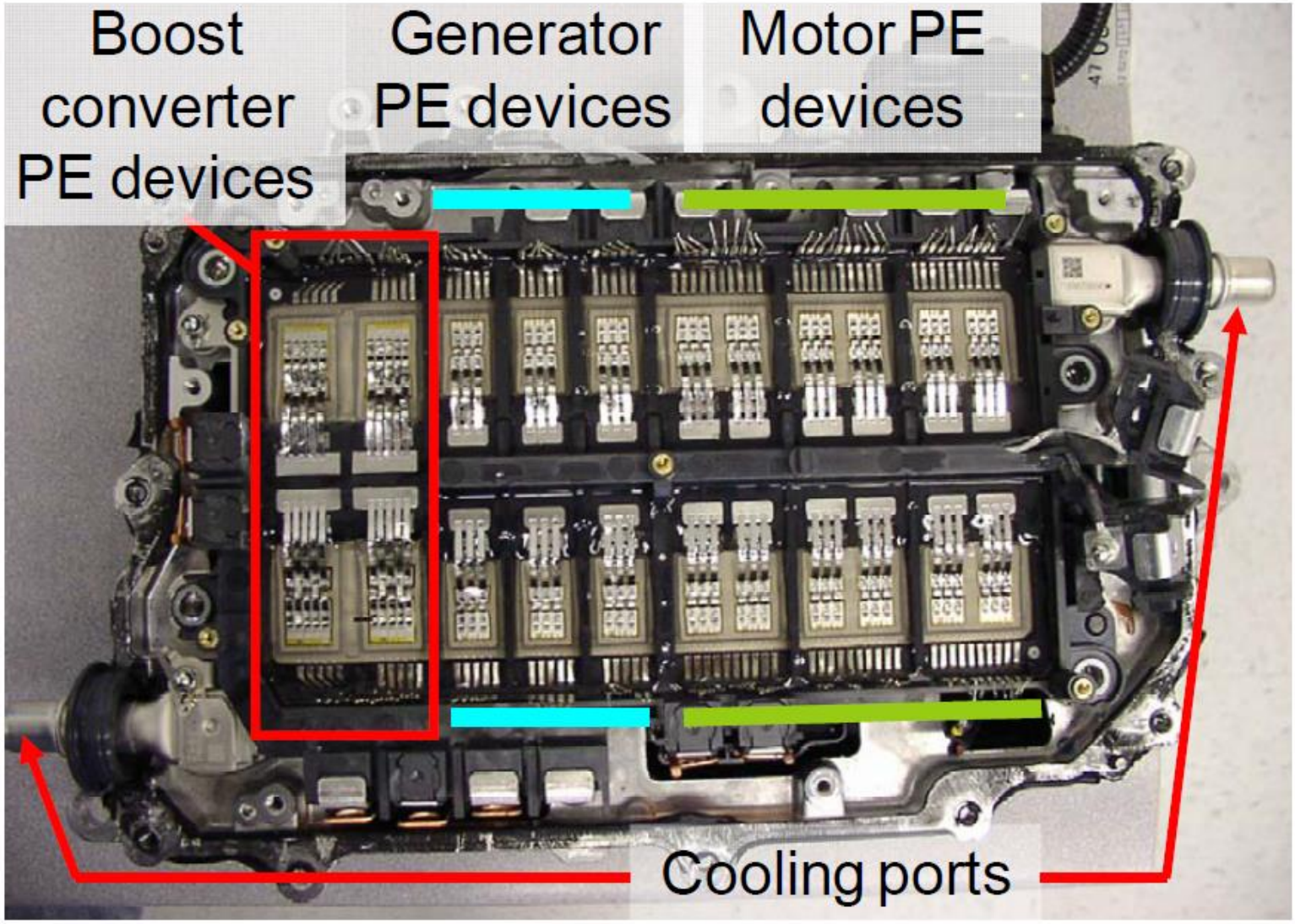
Примена подизача/спуштача напона



Изглед подизача/спуштача напона



Изглед подизача/спуштача напона

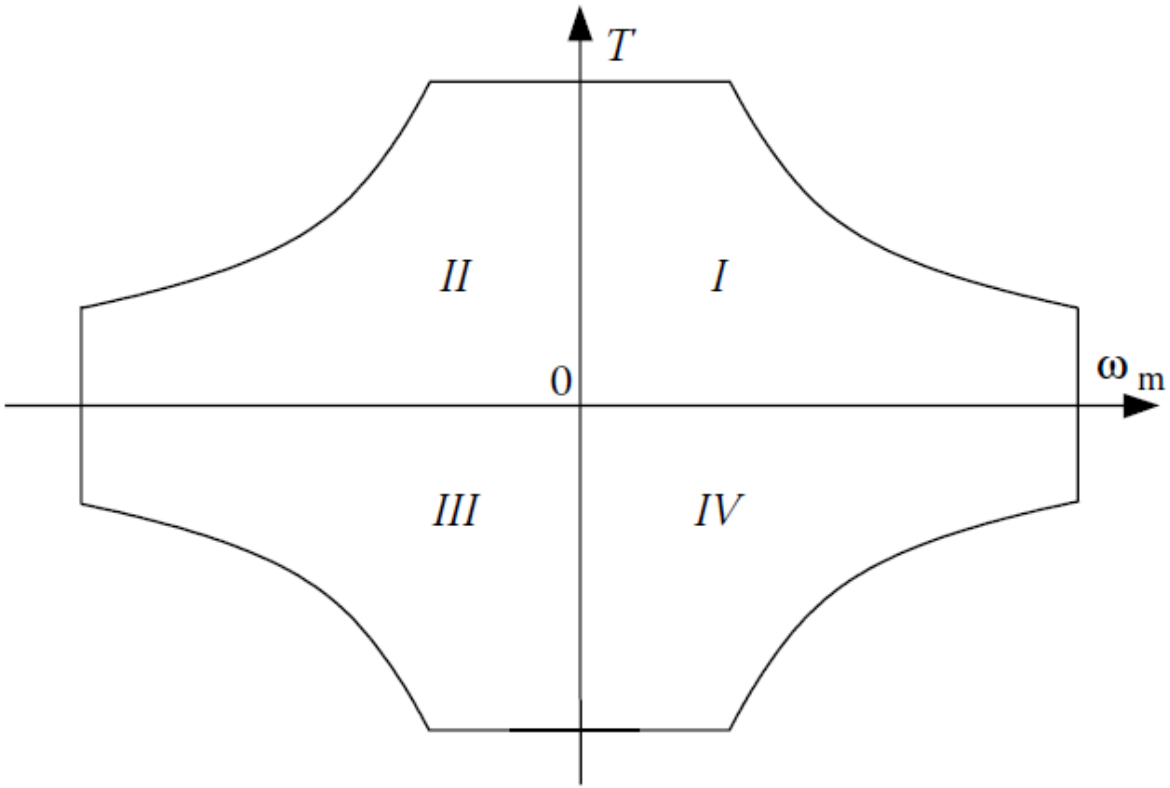


Хибридна и електрична возила

Претварачи

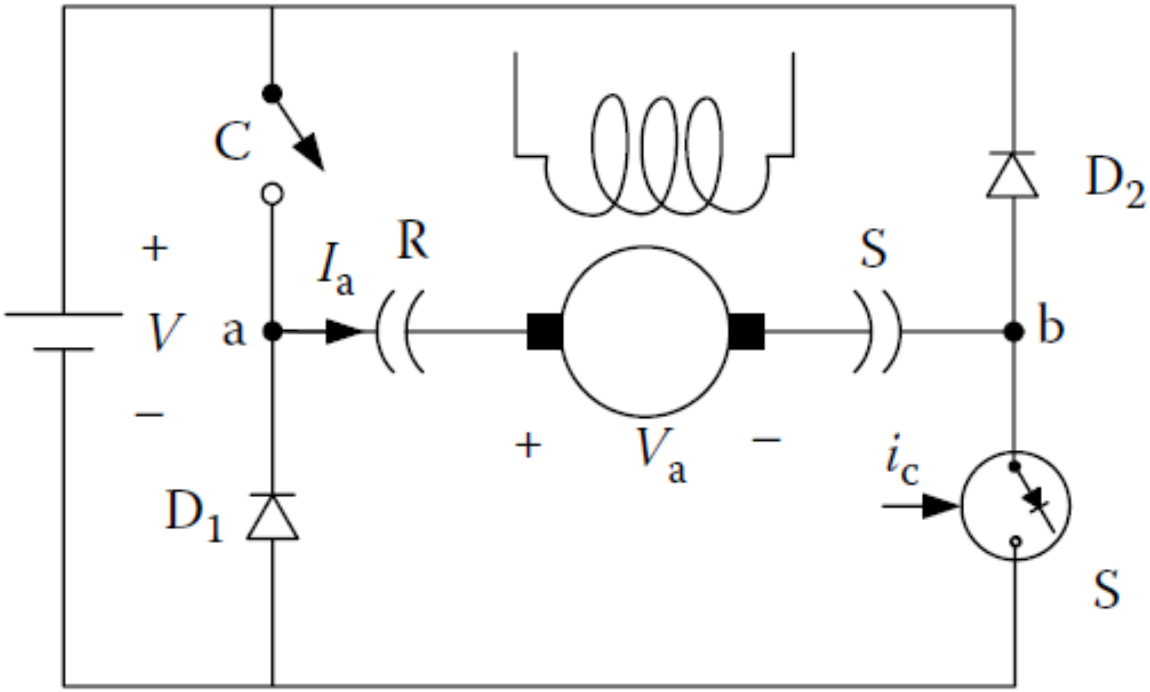
Вишеквадрантни режими рада

- Да би се реализовао двоквадрантни режим рада који укључује убрзање и регенеративно кочење неопходни су претварачи који раде у више квадраната



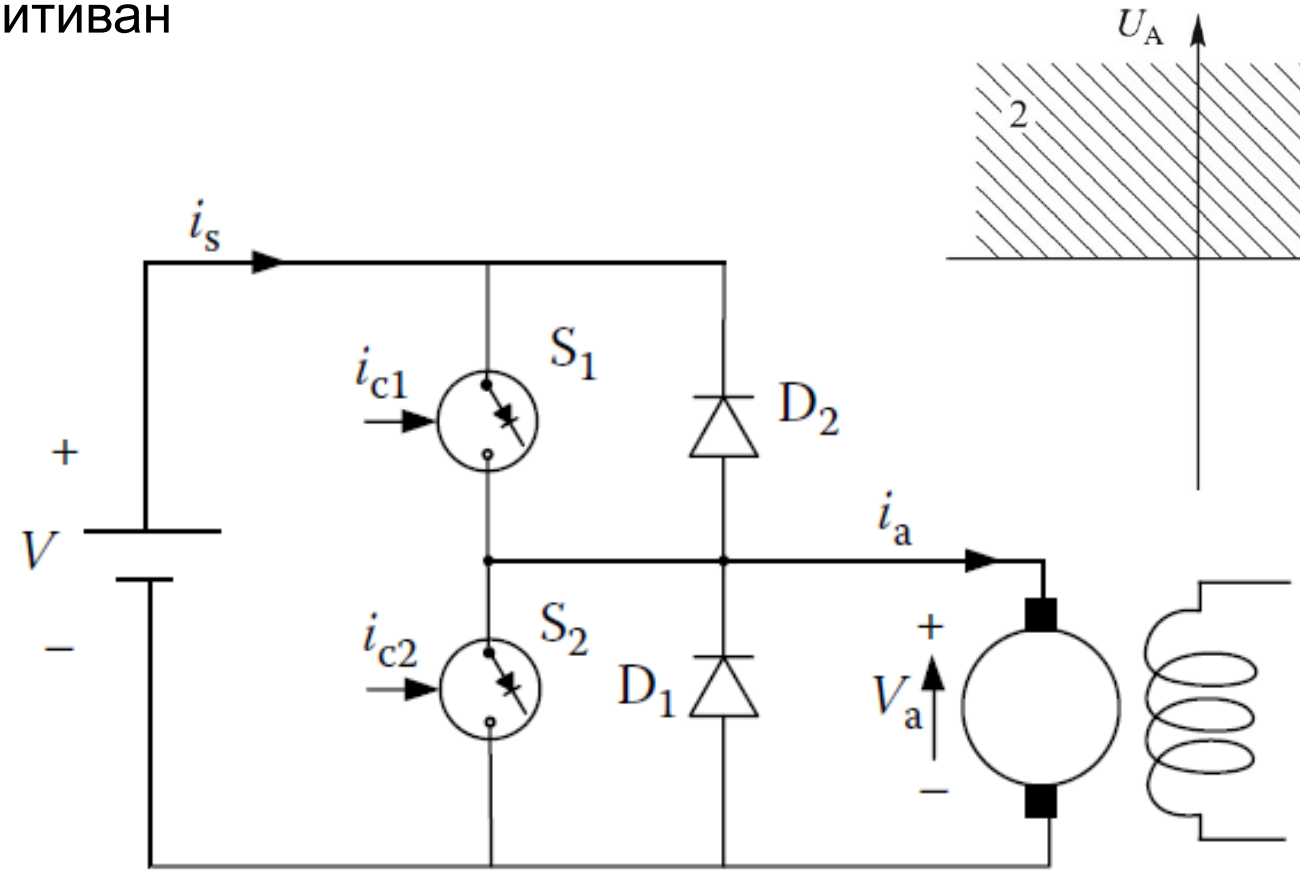
Пример чопера са комутационим прекидачем

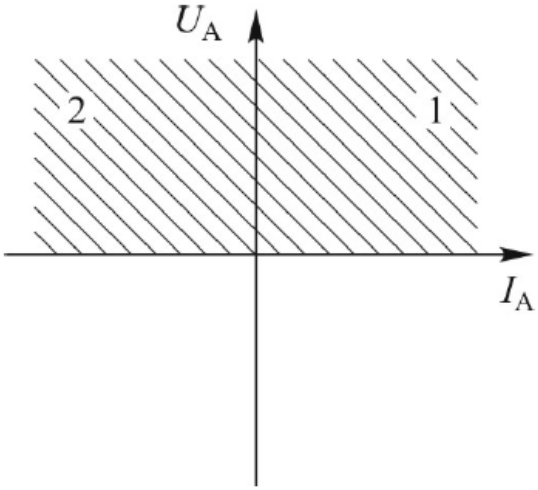
- Када су C и S затворени имамо моторски режим рада у смеру ка напред
- Регенеративно кочење се постиже када је прекидач C отворен, а + и – замењени помоћу RS прекидача



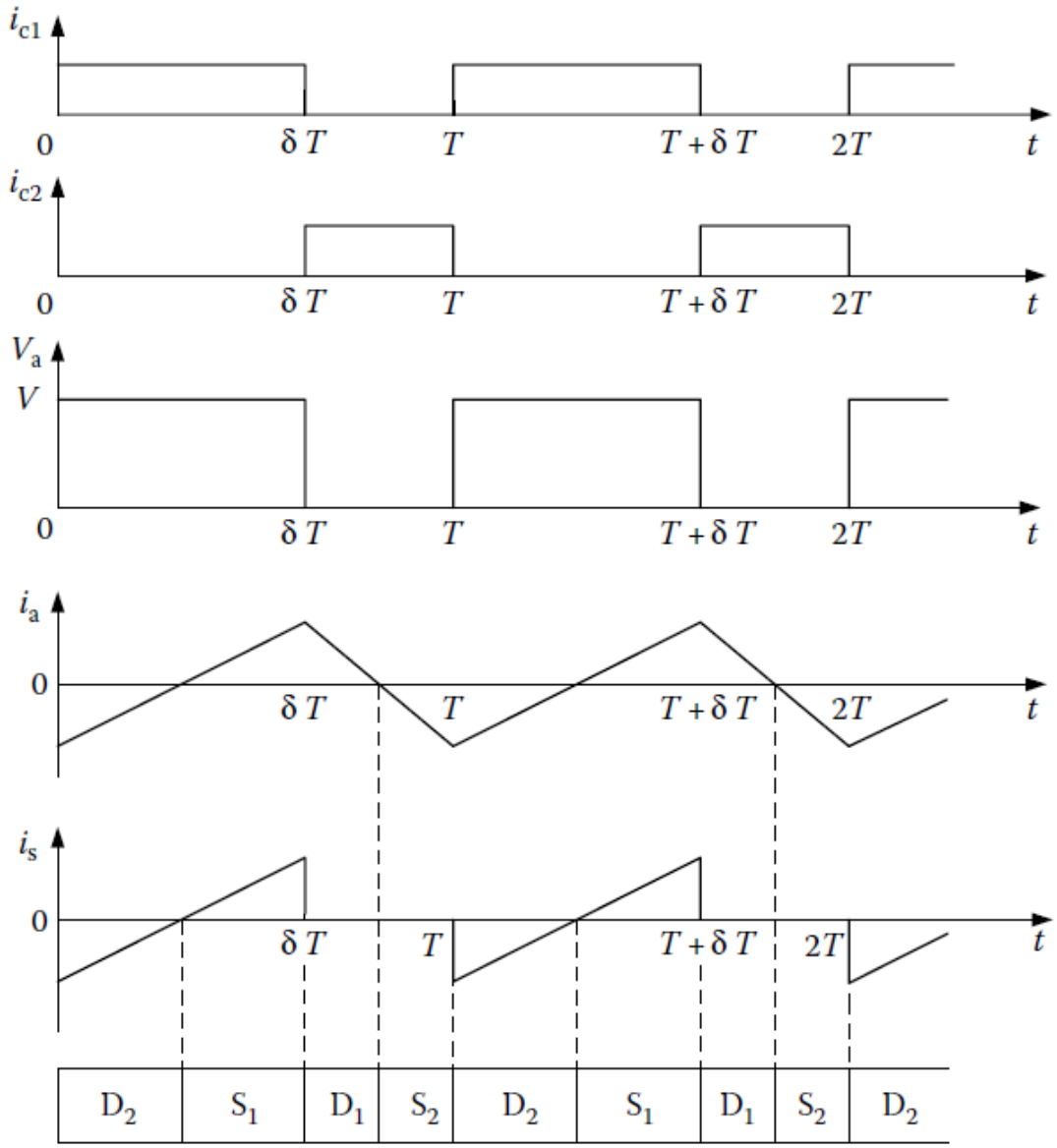
Двоквадрантни чопер

- Код овог чопера обезбеђује се двоквадрантни режим рада, струја може мењати знак, док је напон увек позитиван





Двоквадрантни чопер



$$I_a = \frac{\delta V - E}{R_a}$$

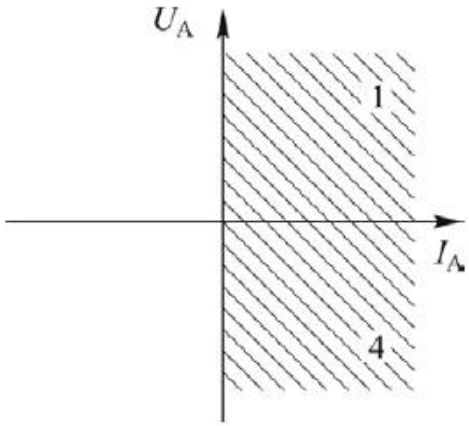
Двоквадрантни чопер

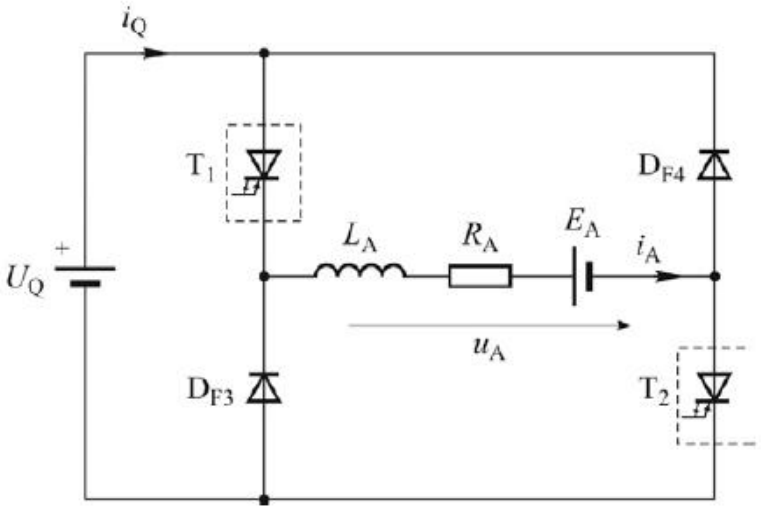
- S1 и D1 сачињавају један чопер, док S2 и D2 сачињавају други чопер
- Оба су контролисана истовремено, како у моторном режиму, тако и у режиму кочења
- Прекидачи S1 и S2 се наизменично отварају и затварају
- Прекидач проводи струју када има сигнал на контролном улазу и при томе је још позитивно поларисан. У делу када је негативно поларисан, проводи диода

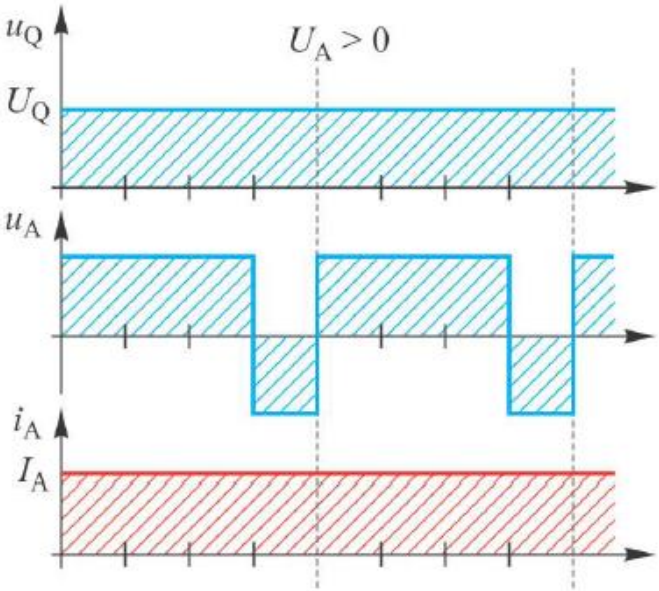
Двоквадрантни чопер

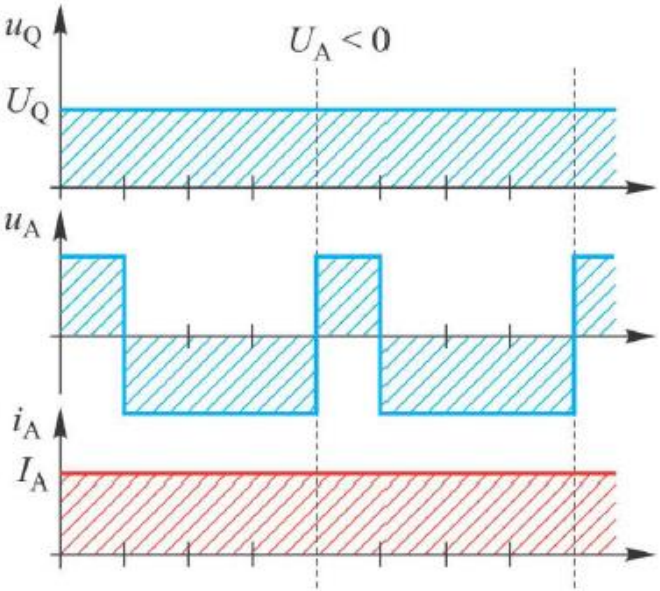
- Чопер који ради у I и IV квадранту
- Може се нпр. реализовати помоћу тиристора
- Од тога колико времена су тиристори укључени зависи колики ће бити средњи напон, да ли ће бити позитиван или негативан

Двоквадрантни чопер



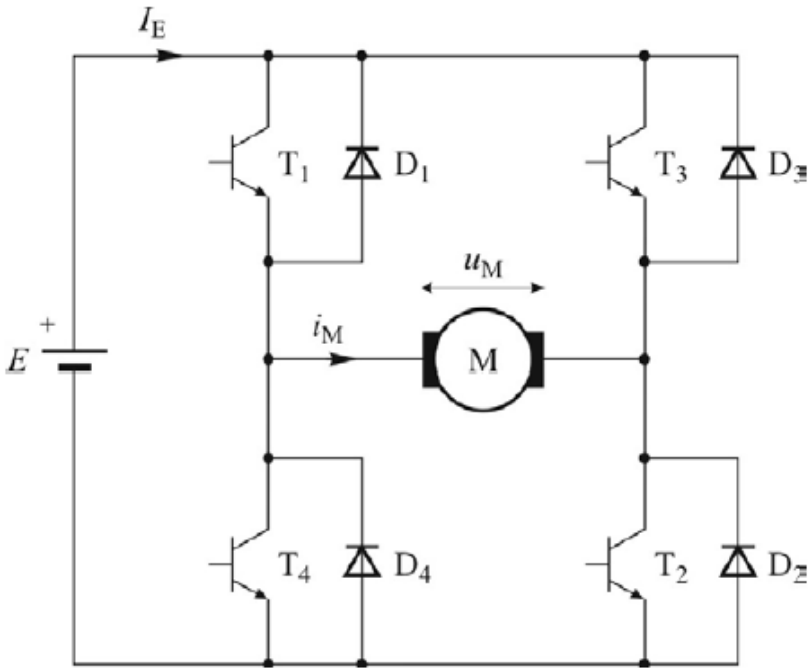


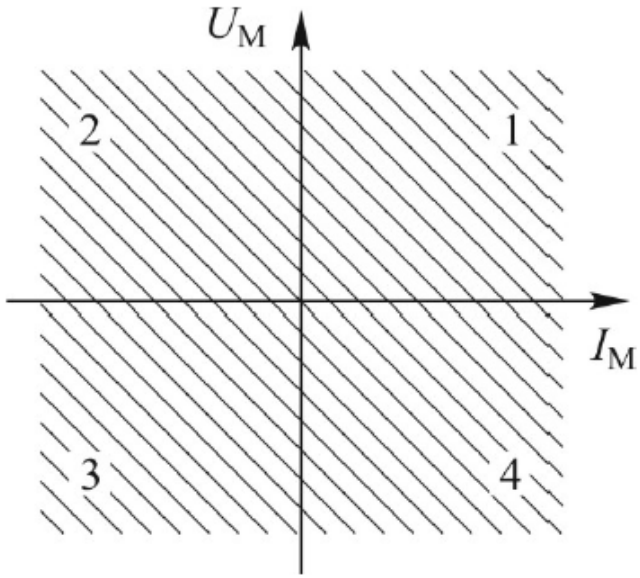




Четвороквадрантни чопер

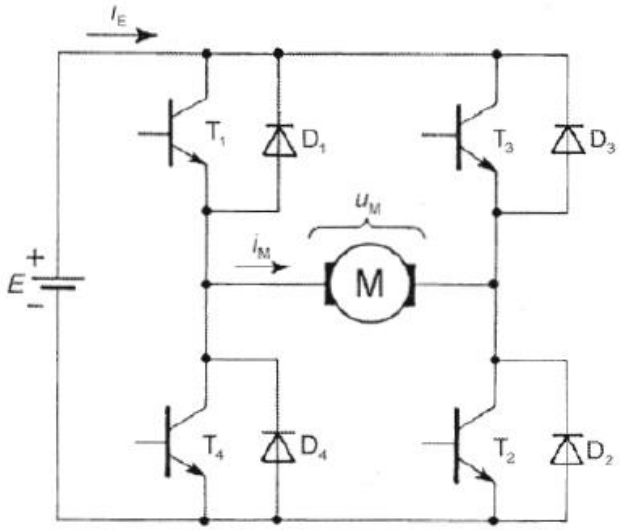
- Четвороквадрантни чопер је најчешће коришћен претварач у ел. возилима са једносмерним моторима
- Покрива све могуће режиме рада

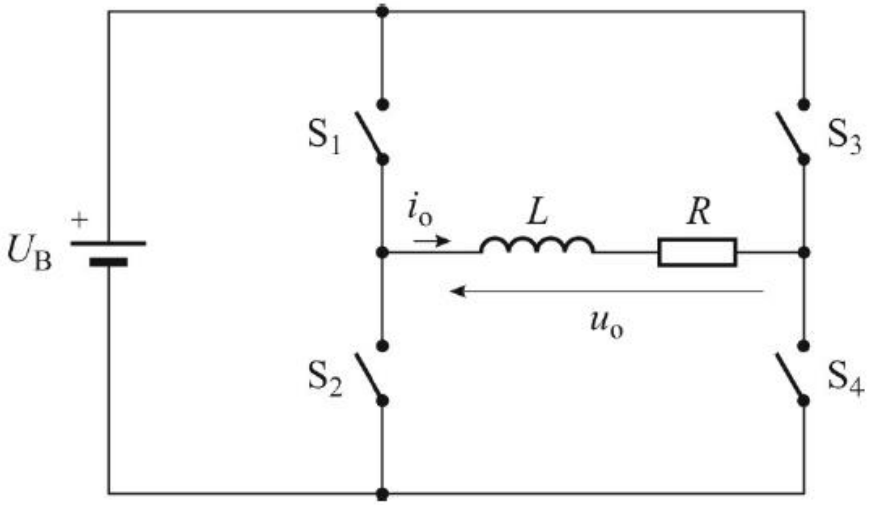




Четвороквадрантни чопер

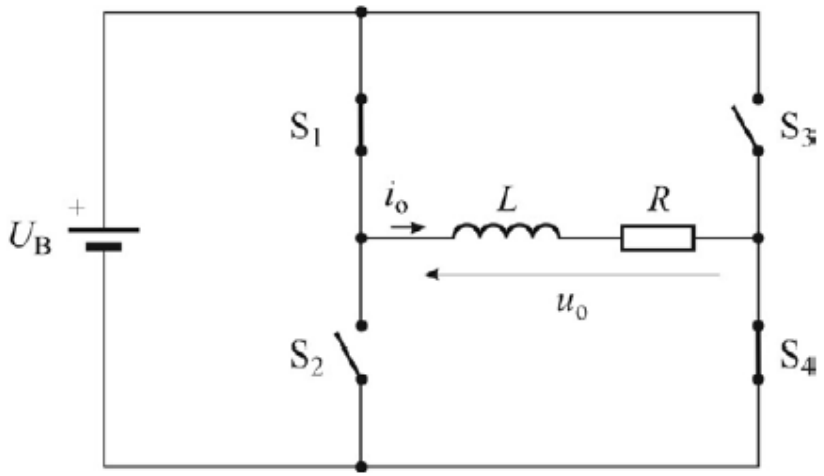
- Анализу рада најједноставније је за почетак објаснити преко идеалних прекидача
- Дозвољена су три напонска нивоа на потрошачу и она се могу добити на четири различита начина

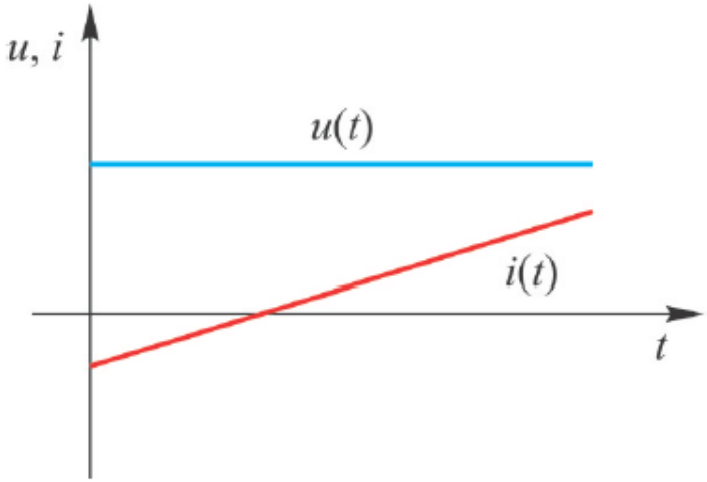




Четвороквадрантни чопер

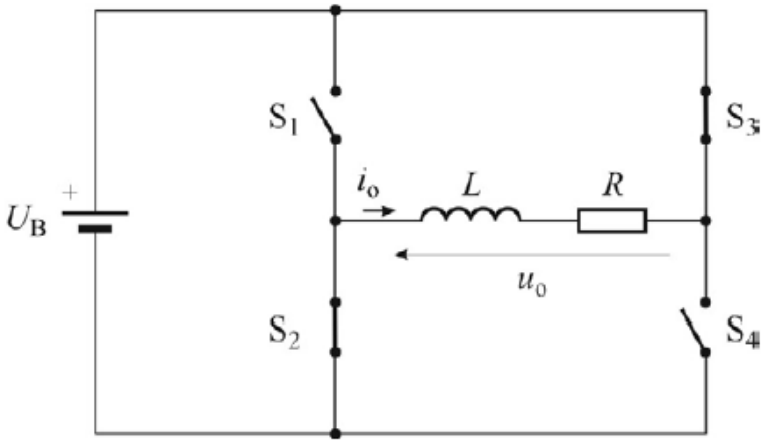
- Уколико се затворе прекидачи S1 и S4 на потрошачу се јавља позитиван напон, док струја може бити и позитивна и негативна, у зависности од услова у колу
- Струја зависи од напона батерије и од електромоторне силе индуковане у роторском колу

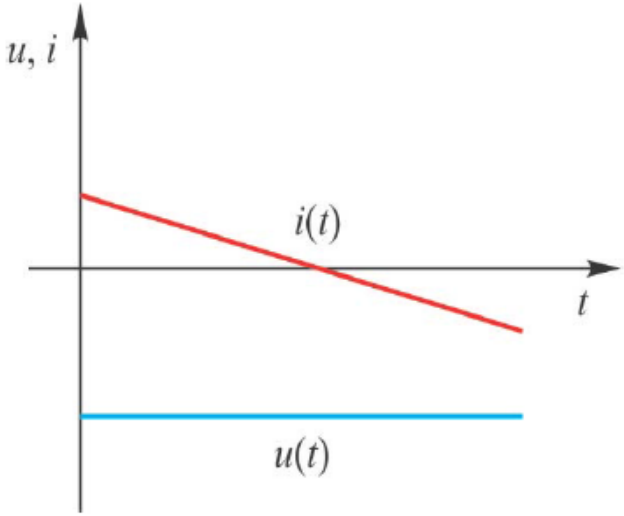




Четвороквадрантни чопер

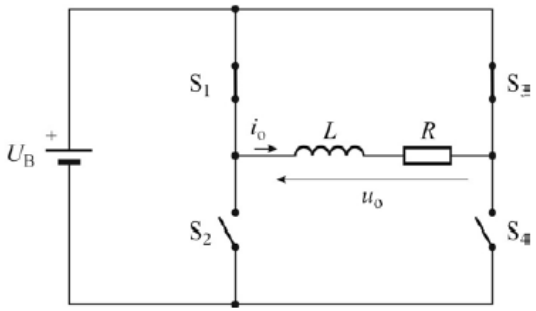
- Уколико се затворе прекидачи S2 и S3, на потрошачу се јавља негативан напон, док струја може бити и позитивна и негативна, у зависности од услова у колу
- Струја зависи од напона батерије и од електромоторне силе индуковане у роторском колу

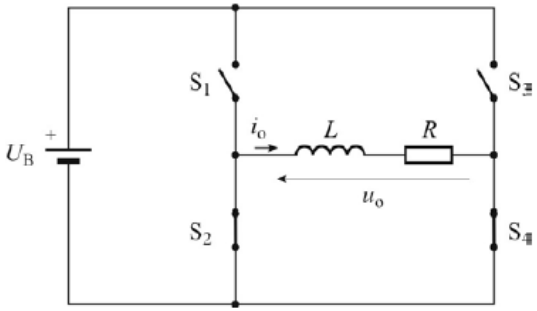


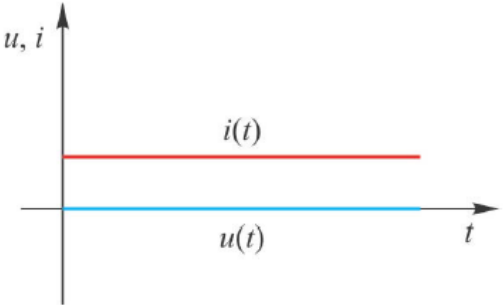


Четвороквадрантни чопер

- Уколико се затворе прекидачи S1 и S3, или пак S2 и S4 потрошач, тј. мотор је кратко спојен, па је напон на њему једнак нули
- Струја у идеалном случају задржава вредност коју је имала пре, међутим, у реалности то није случај, пошто постоје отпорности те ће струја опадати



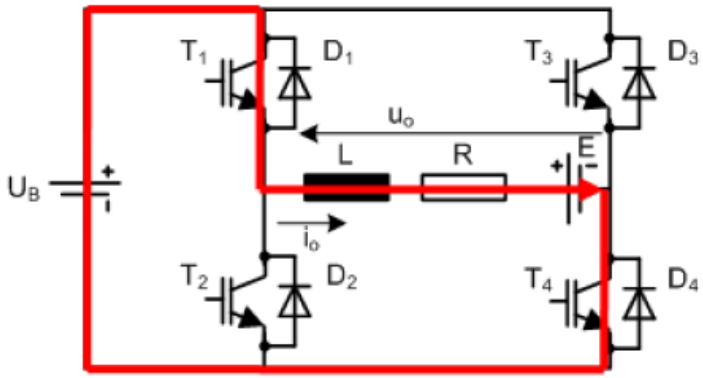




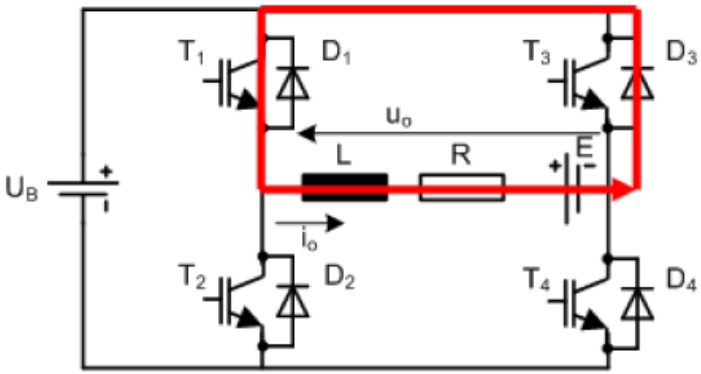
Четвороквадрантни чопер

$i_O > 0$

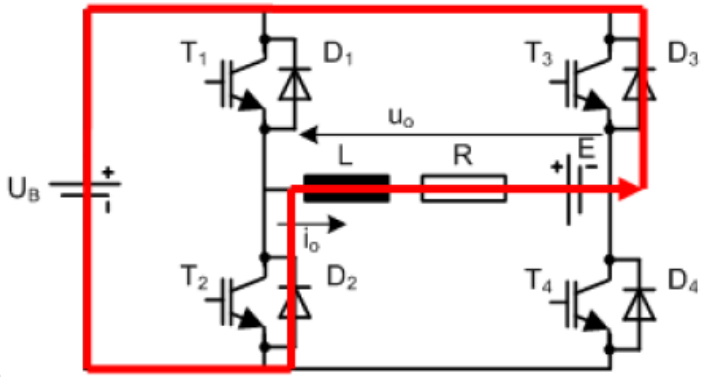
$u_O = +U_B$



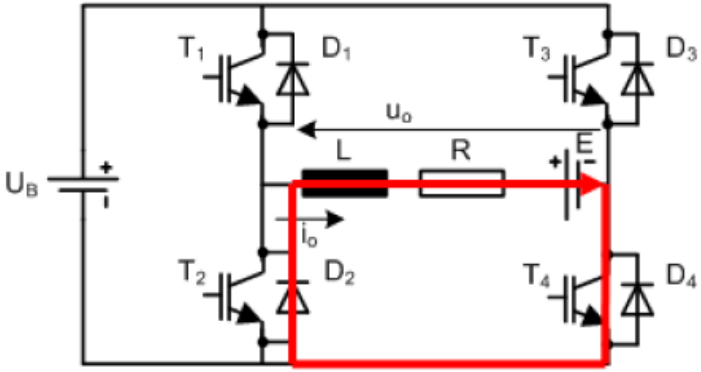
$u_O = 0$



$u_O = -U_B$



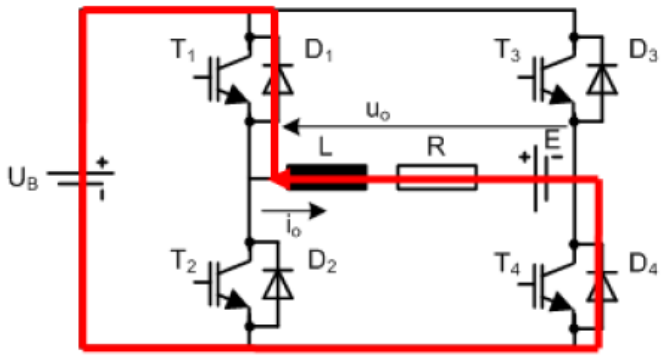
$u_O = 0$



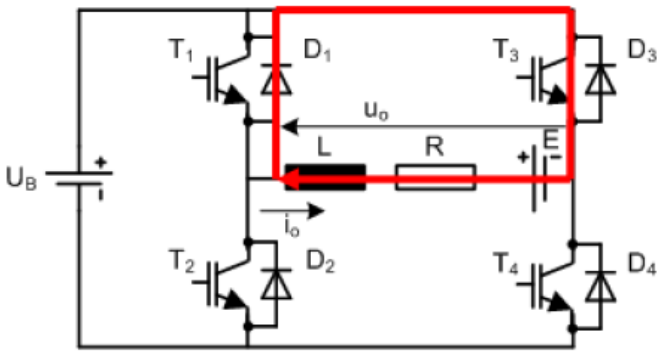
Четвороквадрантни чопер

$i_O < 0$

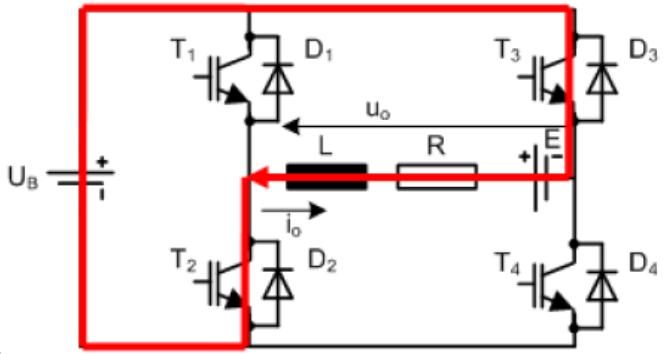
$u_O = +U_B$



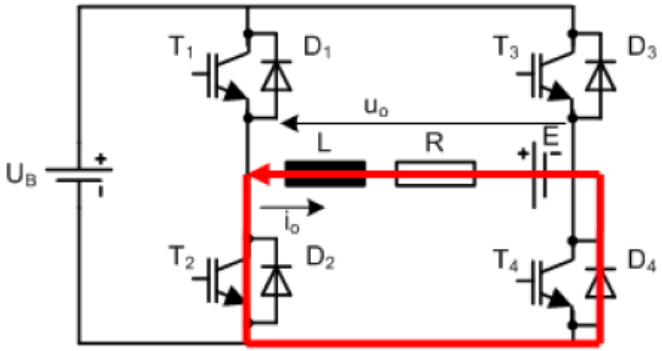
$u_O = 0$



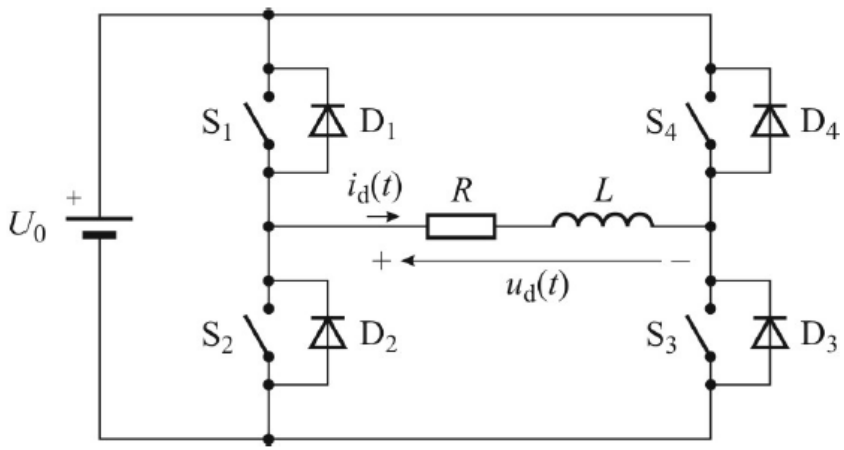
$u_O = -U_B$

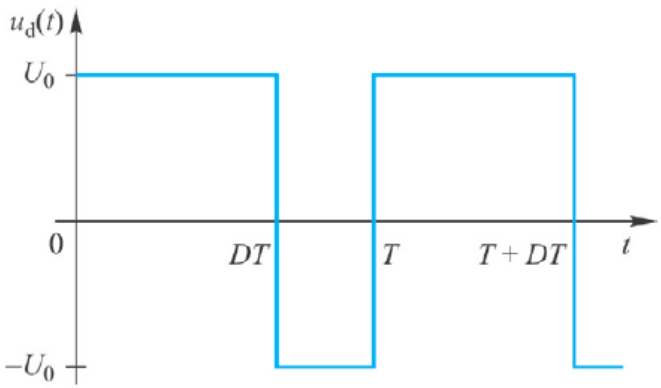


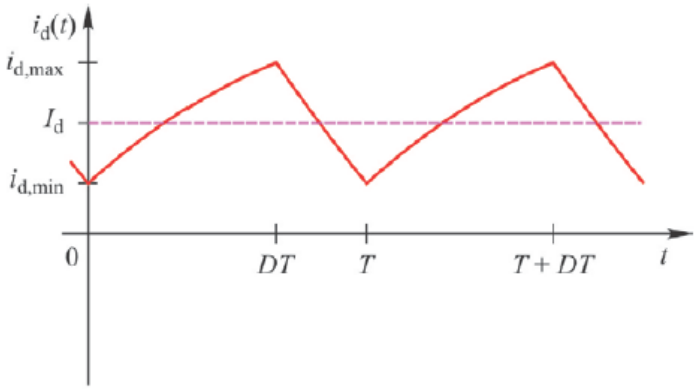
$u_O = 0$



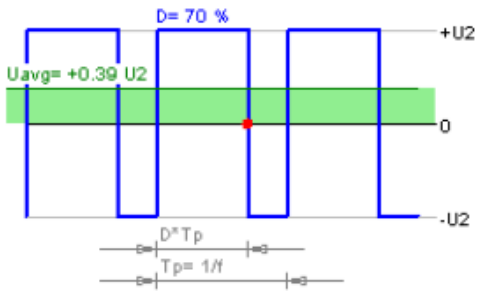
Четвороквадрантни чопер

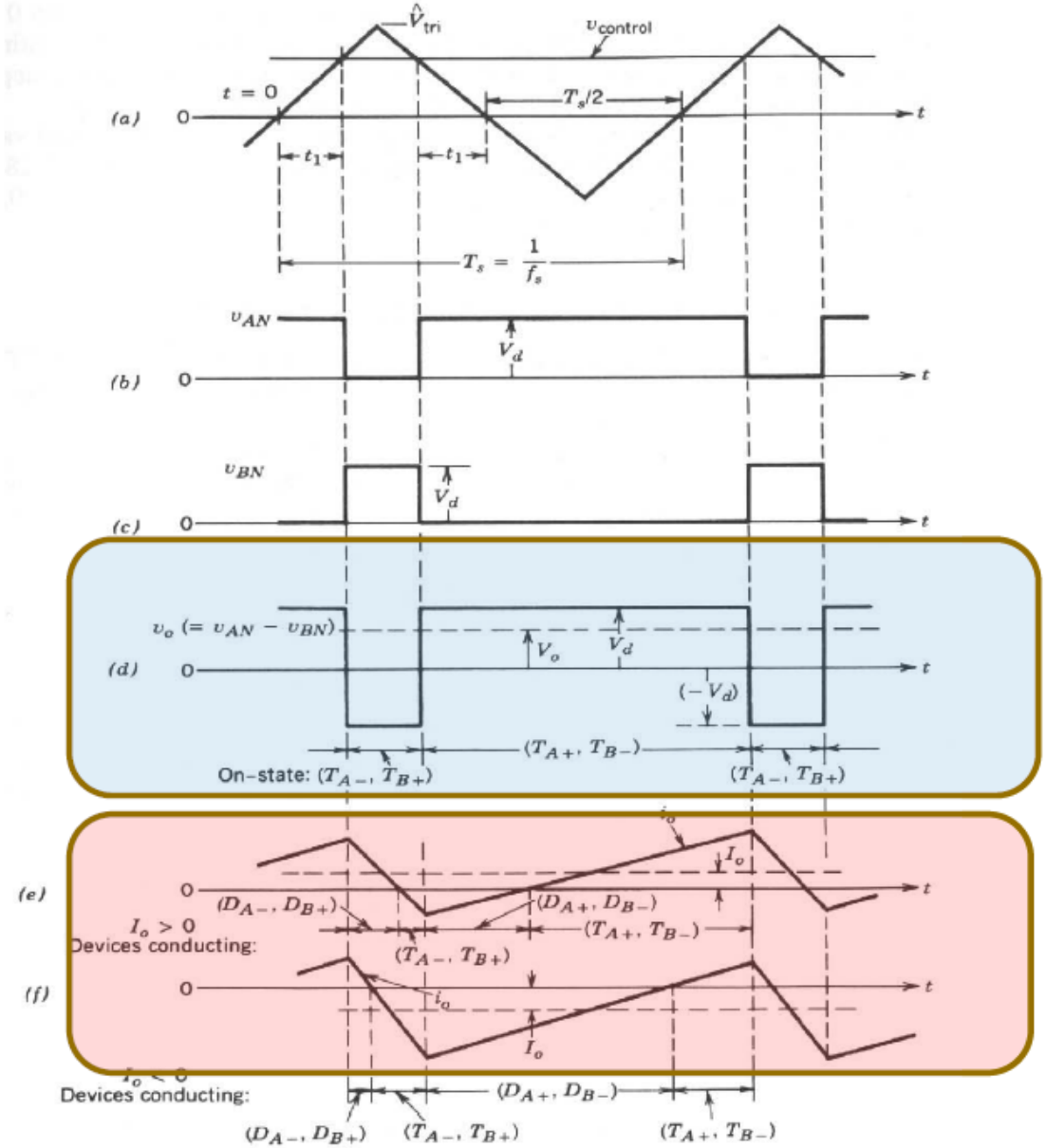






Четвороквадрантни чопер





Napon na trošilu

Struja trošila

Хибридна и електрична возила

Управљање
DC мотором

Управљање DC мотором

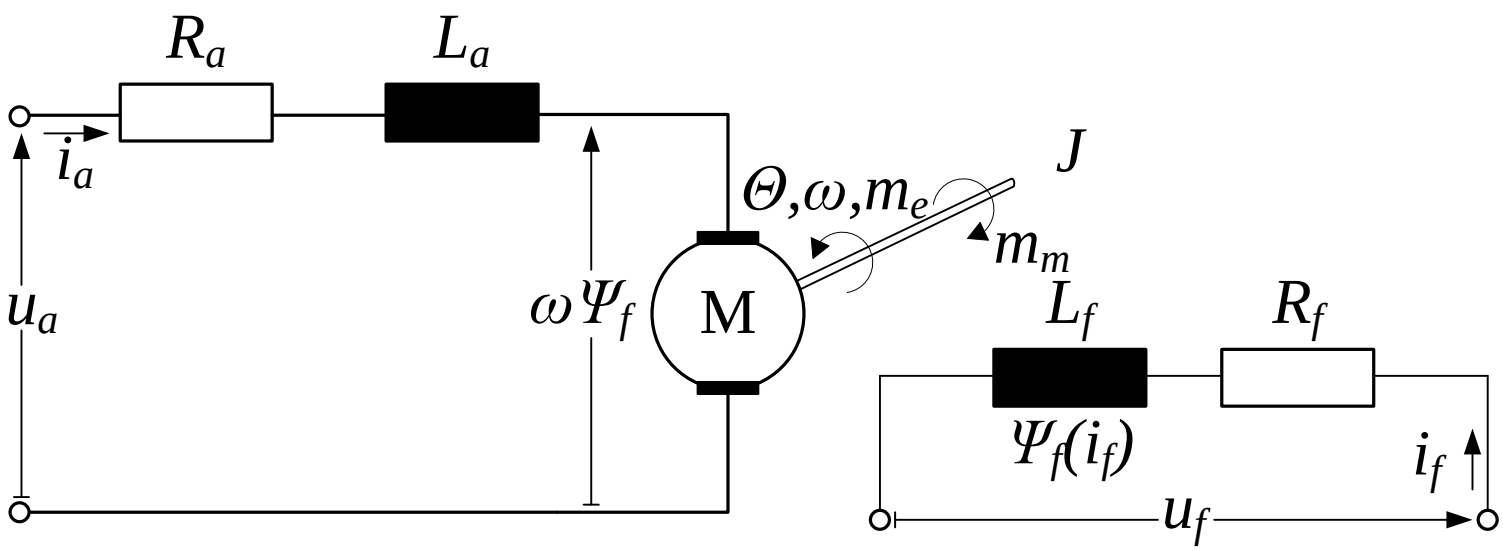
- Управљање у отвореној повратној спрези
- Управљање у затвореној повратној спрези
  - Управљање по струји
  - Управљање по брзини
- Реализација управљања се врши коришћењем савремених микропроцесора

Модел једносмерног мотора

- Модел се састоји из скупа диференцијалних и алгебарских једначина

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + \omega \cdot \Psi_f \qquad u_f = R_f i_f + n\frac{d\psi_f}{dt}$$

$$J\frac{d\omega}{dt} = m_e - m_m \qquad m_m = m_m(\omega, \vartheta, t)$$



Модел једносмерног мотора

- У устаљеном стању модел се поједностављује:

$$u_a = R_a i_a + \omega \psi_f \qquad m_e = i_a \psi_f$$

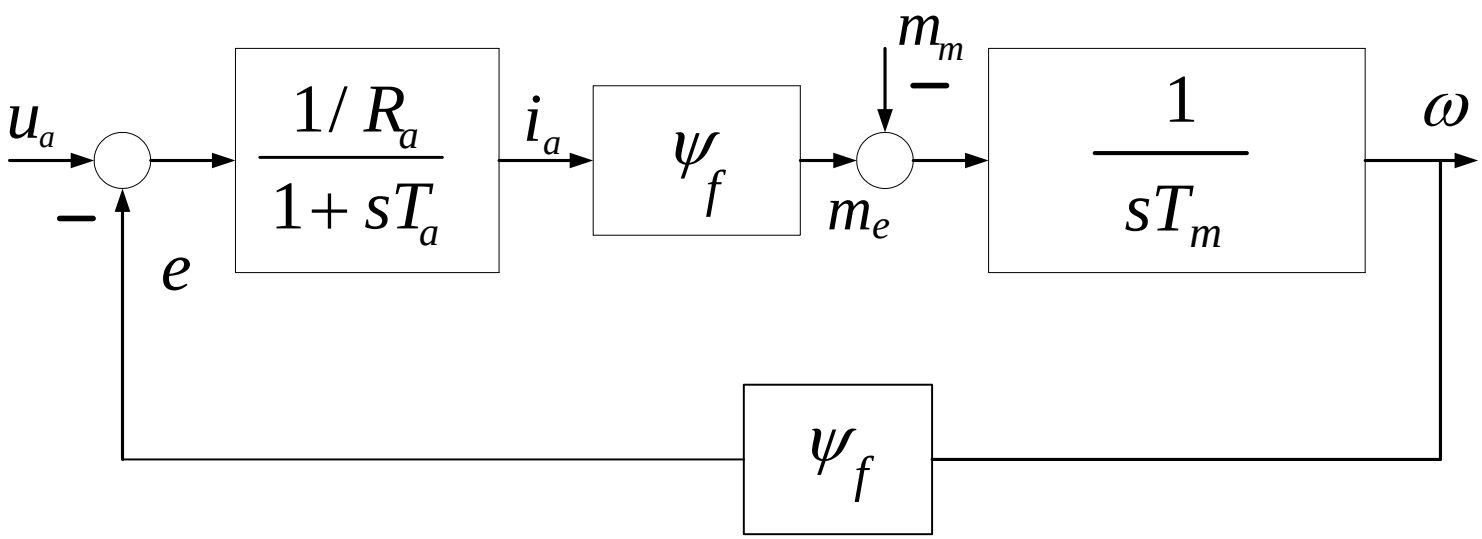
- Након нормализације:

$$u_a = R_a \cdot i_a + T_a \cdot \frac{di_a}{dt} + \omega \cdot \Psi_f \qquad T_m \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_m \qquad m_e = i_a \psi_f$$

- Та је временска константа ротора $T_a = \dfrac{L_a}{R_a}$

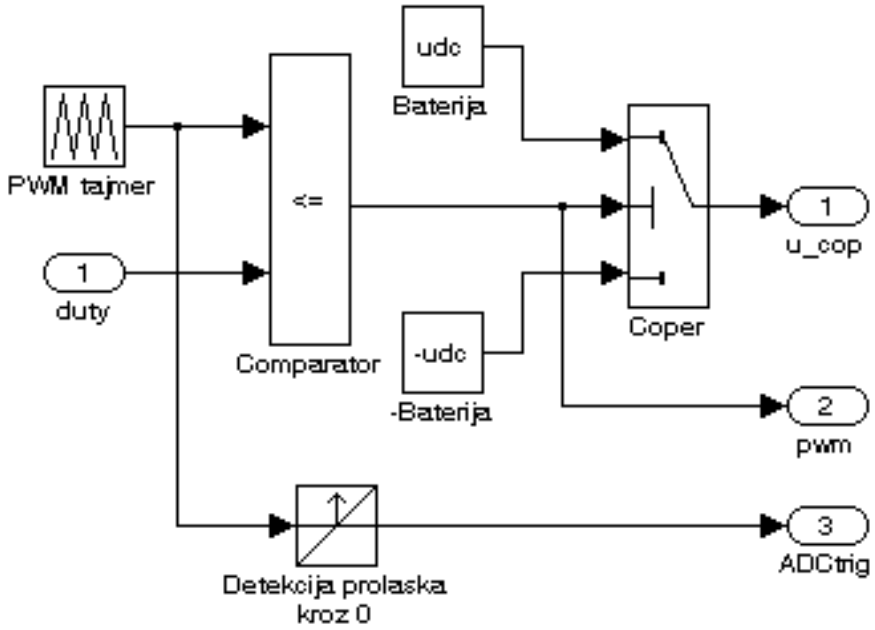
Блок дијаграм

- На основу претходних јендачина може се направити блок дијаграм мотора једносмерне струје који има сталана флукс
- Сама динамика машине се представља преносном функцијом првог реда



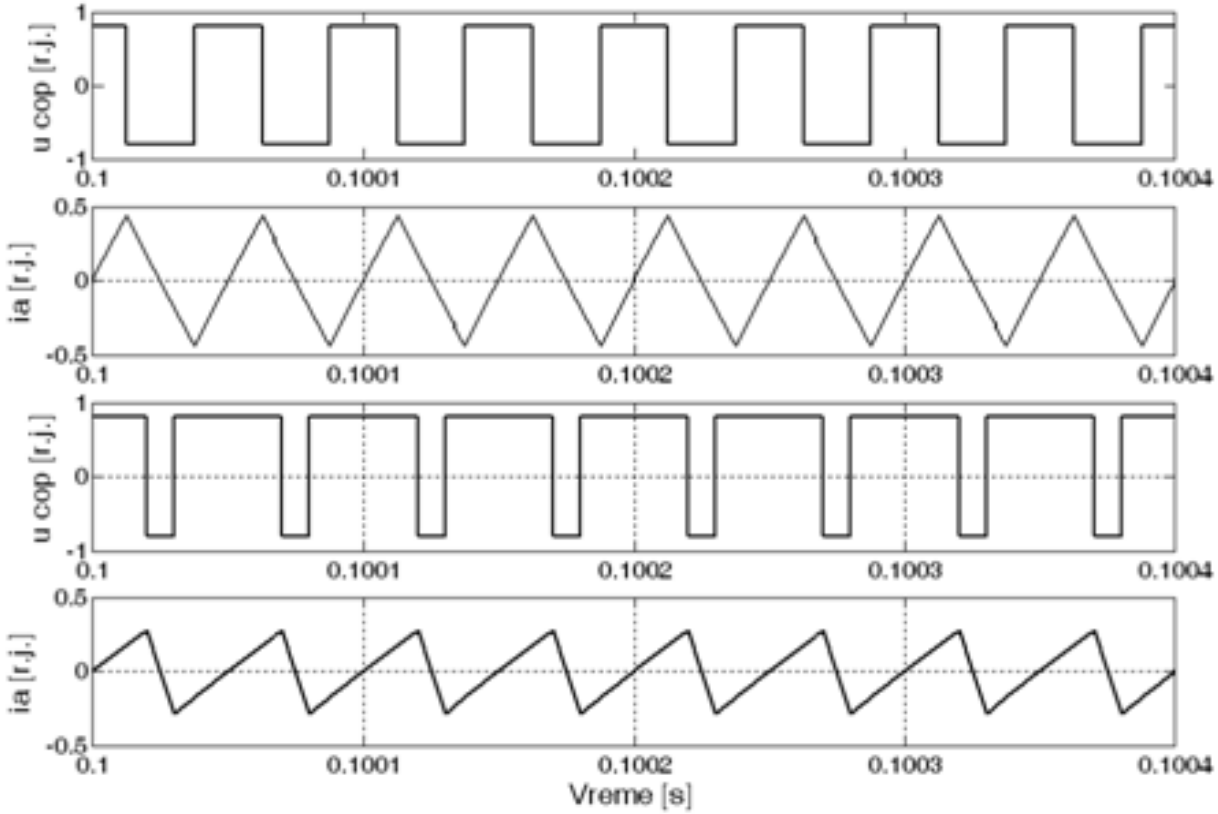
Модел чопера

- PWM тајмер који генерише троугаони сигнал
- Временска база одређује прекидачку фреквенцију чопера
- Фактор испуне се пореди са троугаоним сигналом и на тај начин се добија напон на мотору



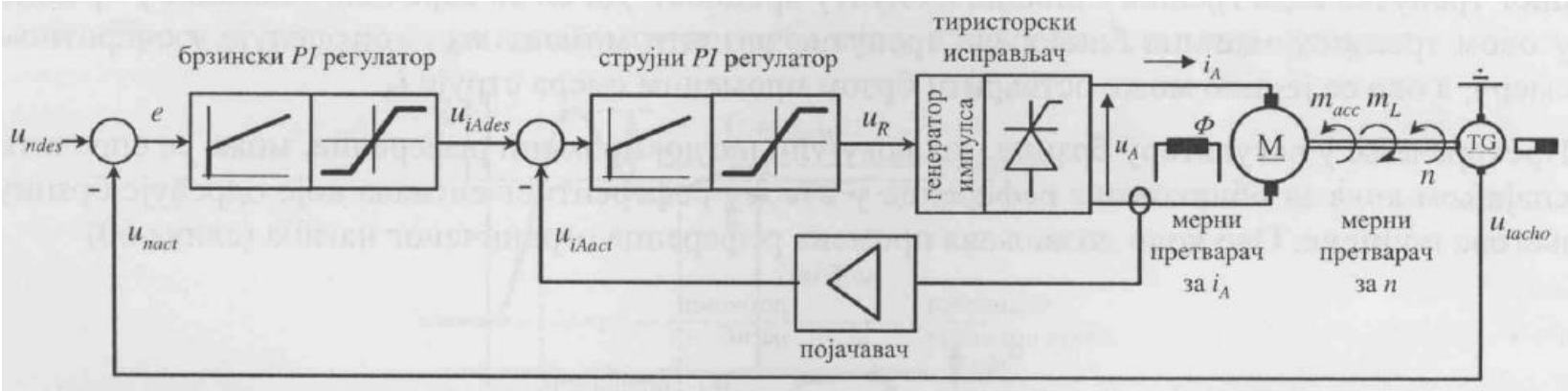
Симулација рада чопера

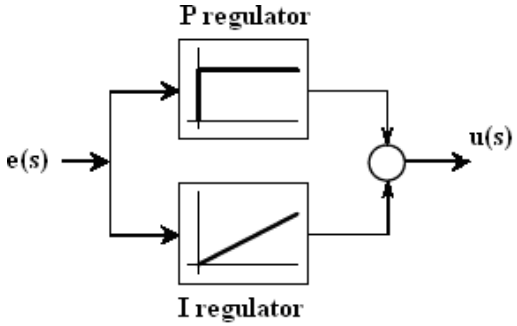
- Напон на мотору и таласност изалазне струје за факторе испуне 50% и 80%
- Највећа таласност се добије за фактор испуне од 50 %, смањује се додавањем пригушнице на ред са мотором

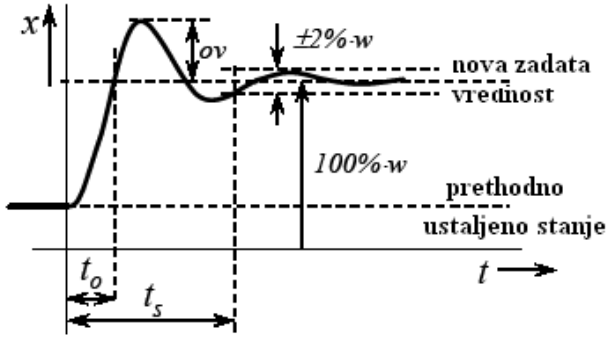


Регулација струје и брзине

- Каскадна веза регулатора

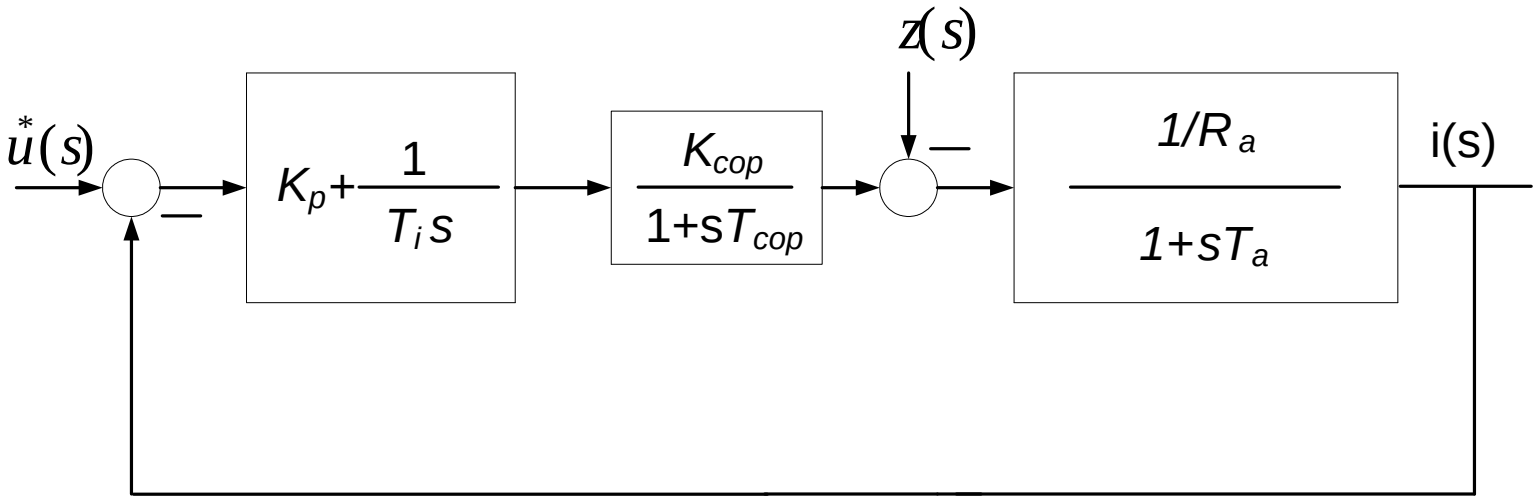






Прорачун струјног регулатора

- Прорачун параметара регулатора – модулни оптимум

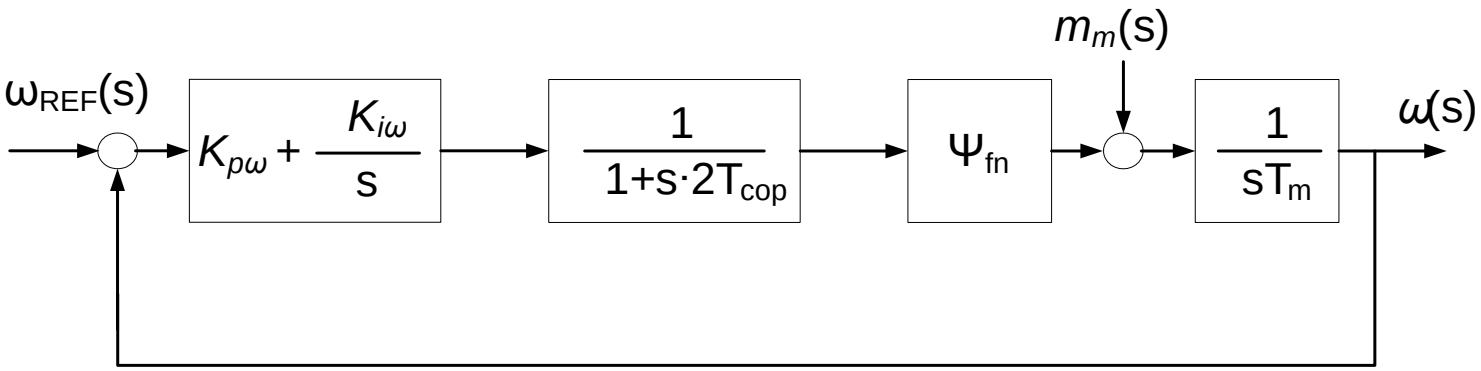


$$G_{PI}(s) = K_P + \frac{K_i}{s} = K_P + \frac{1}{T_i \cdot s} = \frac{1 + K_P \cdot T_i \cdot s}{T_i \cdot s} = \frac{1 + T_n \cdot s}{T_i \cdot s}$$

$$K_P = \frac{T_n}{2 \cdot K_{PS} \cdot \sigma} \qquad T_n = T_a \qquad \sigma = T_{cop} \qquad G_{cop}(s) = \frac{K_{cop}}{1 + T_{cop} \cdot s} = \frac{K_{cop}}{1 + T_{pwm}/2 \cdot s}$$

Прорачун брзинског регулатора

- Прорачун параметара регулатора – модулни оптимум

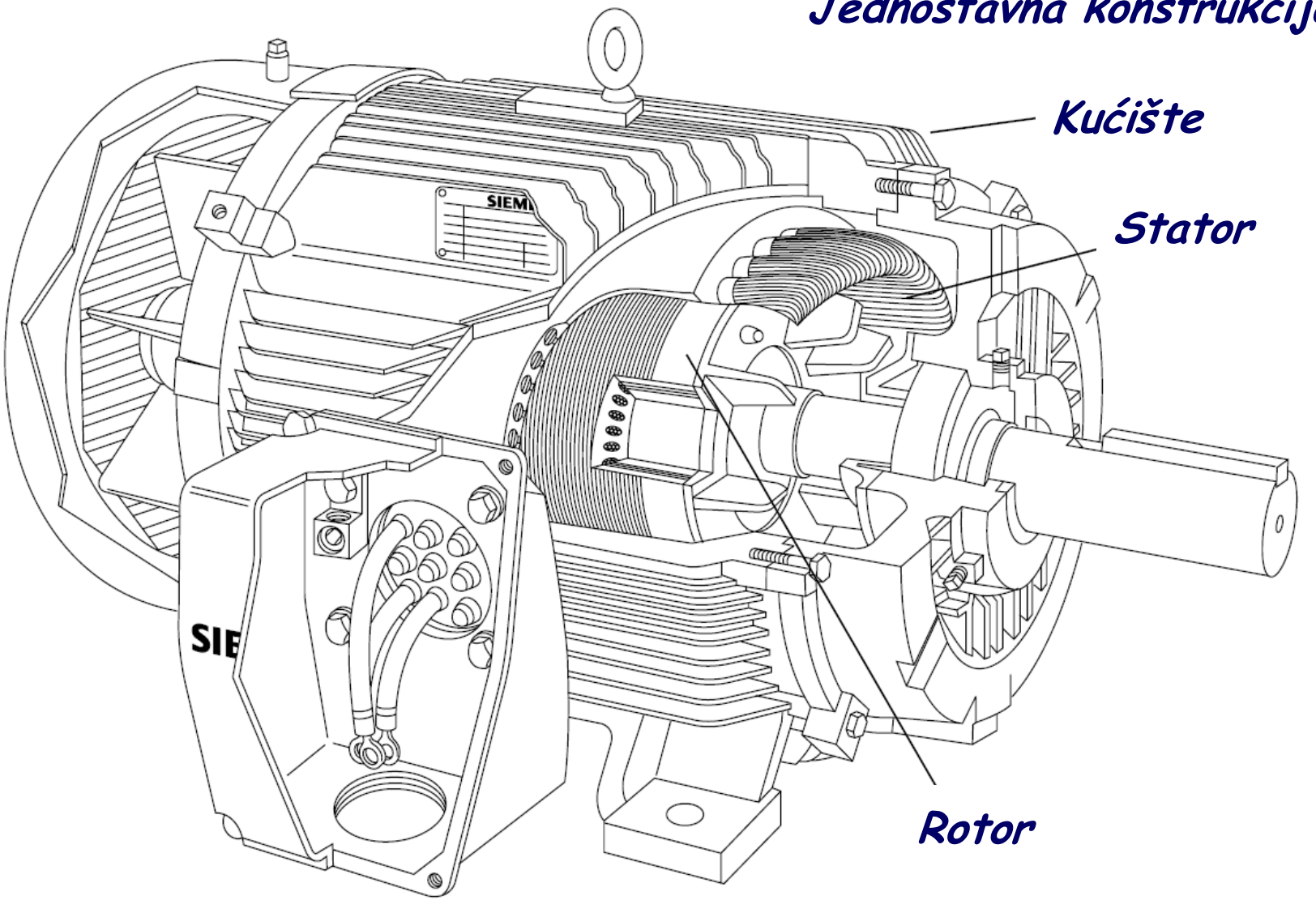


- Прескок 4,3 %

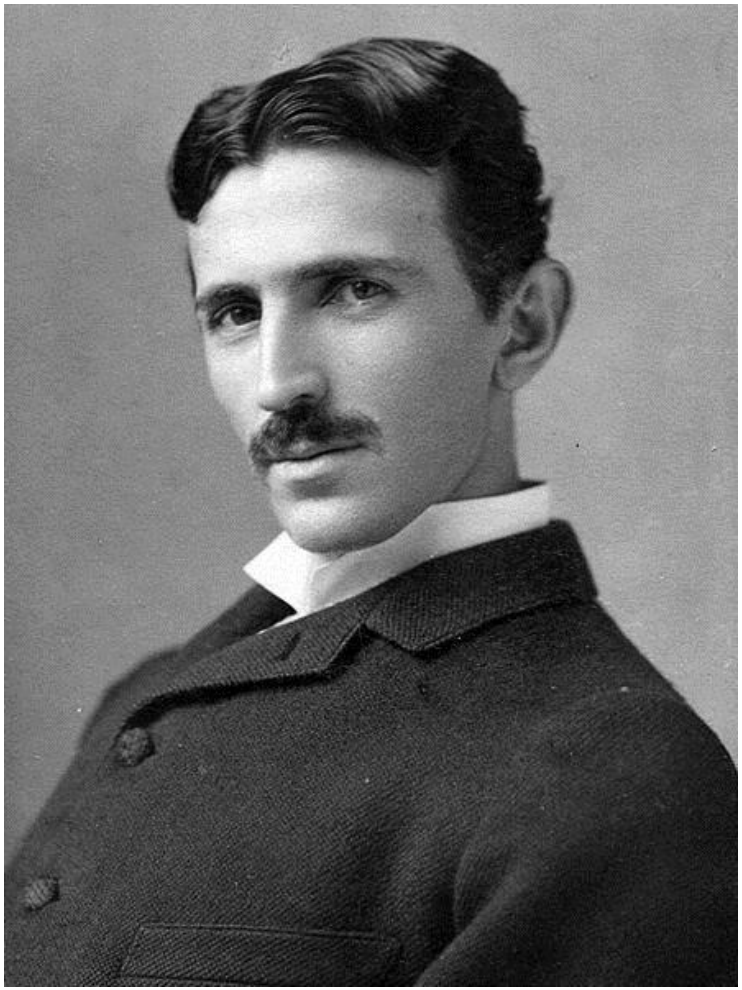
$$G_{el}(s) \approx \frac{1}{1+2\cdot T_{cop}\cdot s} \qquad K_{pw} = \frac{T_m}{4\cdot T_{cop}\cdot \psi_n} \qquad K_{iw} = \frac{K_{pw}}{T_{iw}}$$

$$T_{iw} = 4\cdot\left(2\cdot T_{cop}\right)$$

ASINHRONI MOTORI



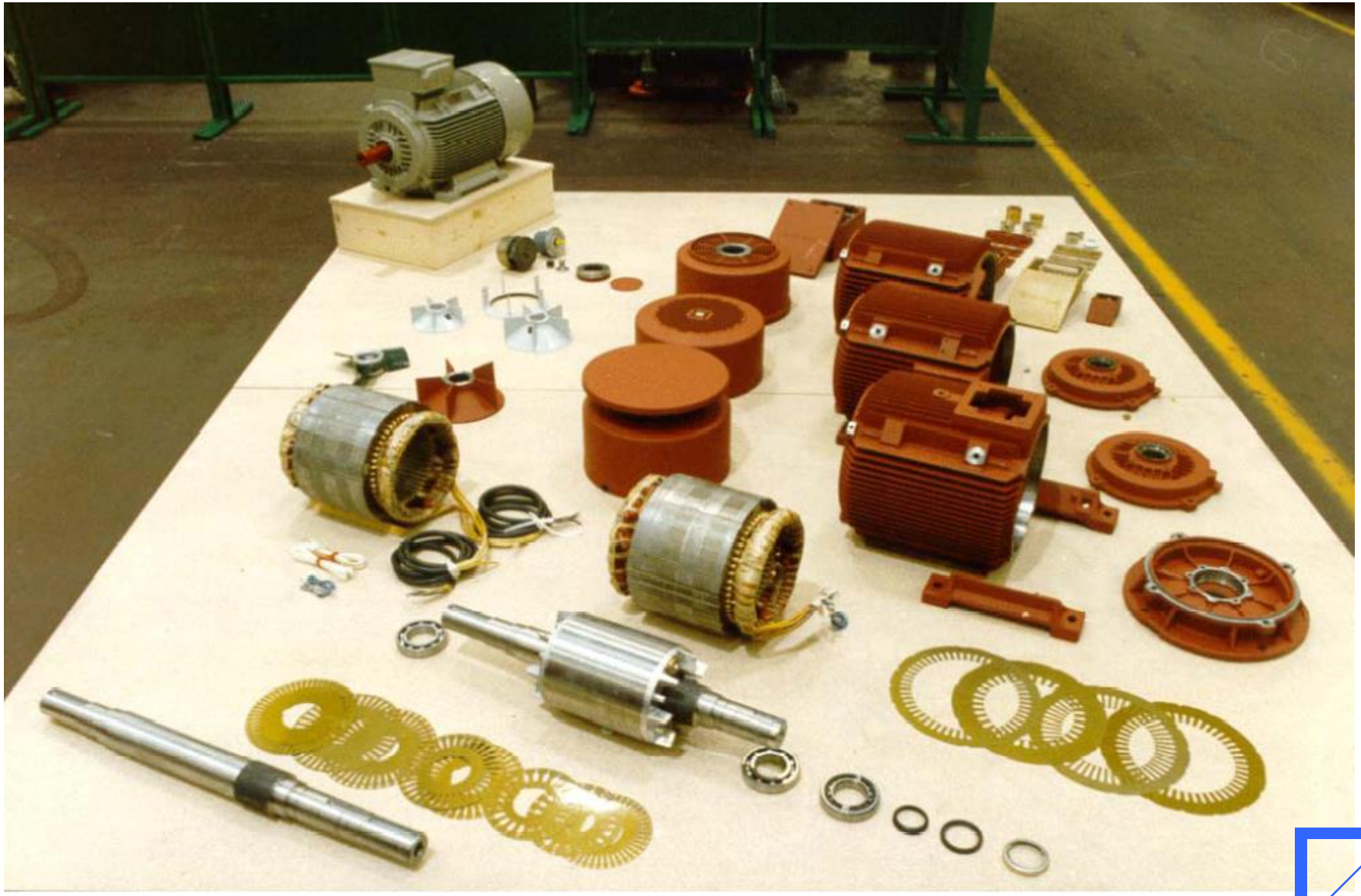
NIKOLA TESLA



PODELA

- *Prema obliku kretanja:* rotacione (rotating machines), linearne (linear machines) asinhrone mašine (induction machines).
- *Prema konstrukciji rotora:* asinhrone mašine sa kaveznim rotorom (squirrel cage rotor induction motors), kliznokolutnim (namotanim) rotorom (wound rotor induction motors).
- *Prema broju faza:* trofazne i jednofazne (za male snage) asinhrone mašine.
- *Prema veličini nazivnog napona:* niskonaponske (do 1kV), visokonaponske mašine (iznad 1kV do 15kV).
- *Prema režimu rada:* asinhroni motori, asinhroni generatori.

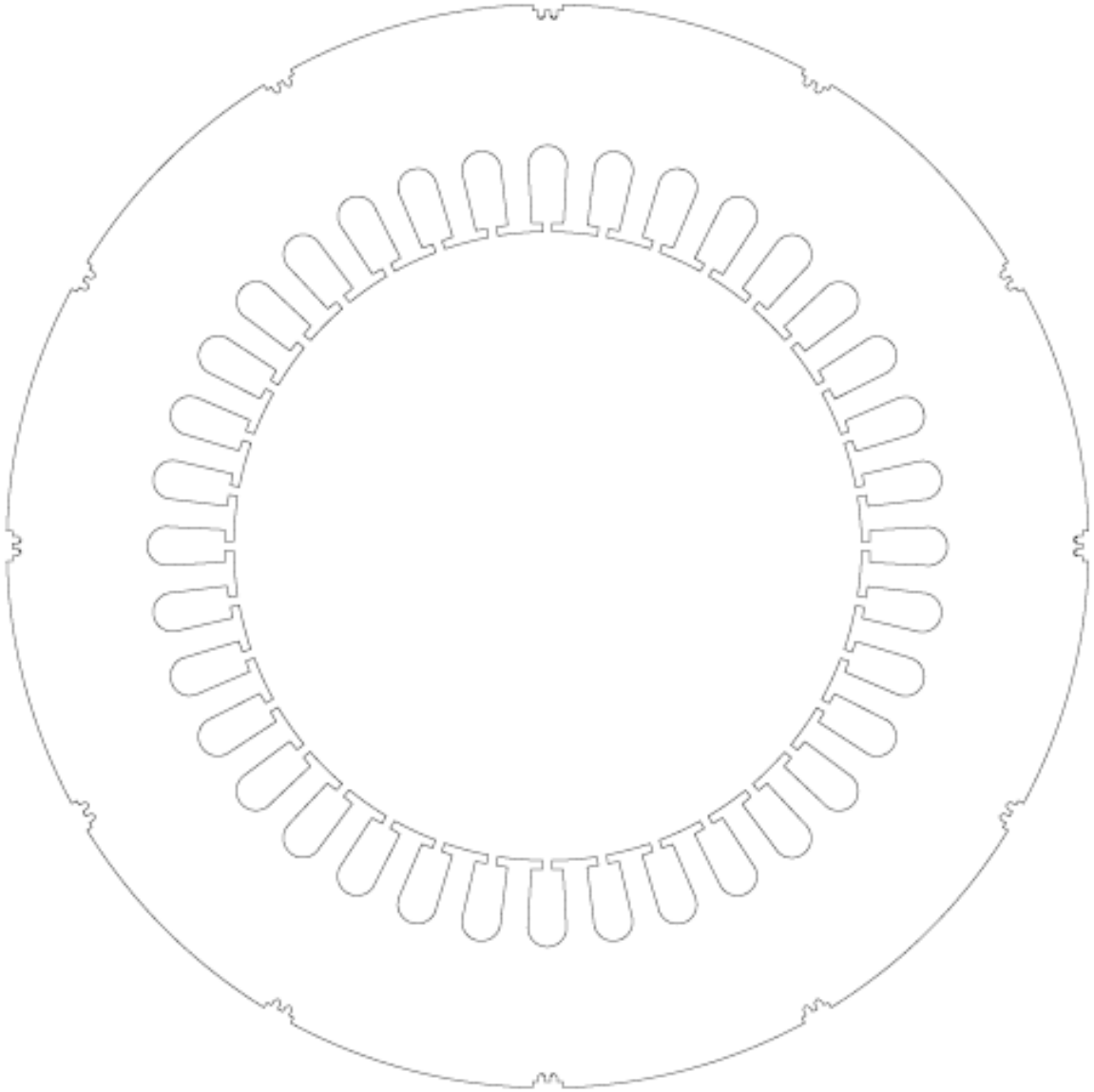
KONSTRUKCIJA MOTORA



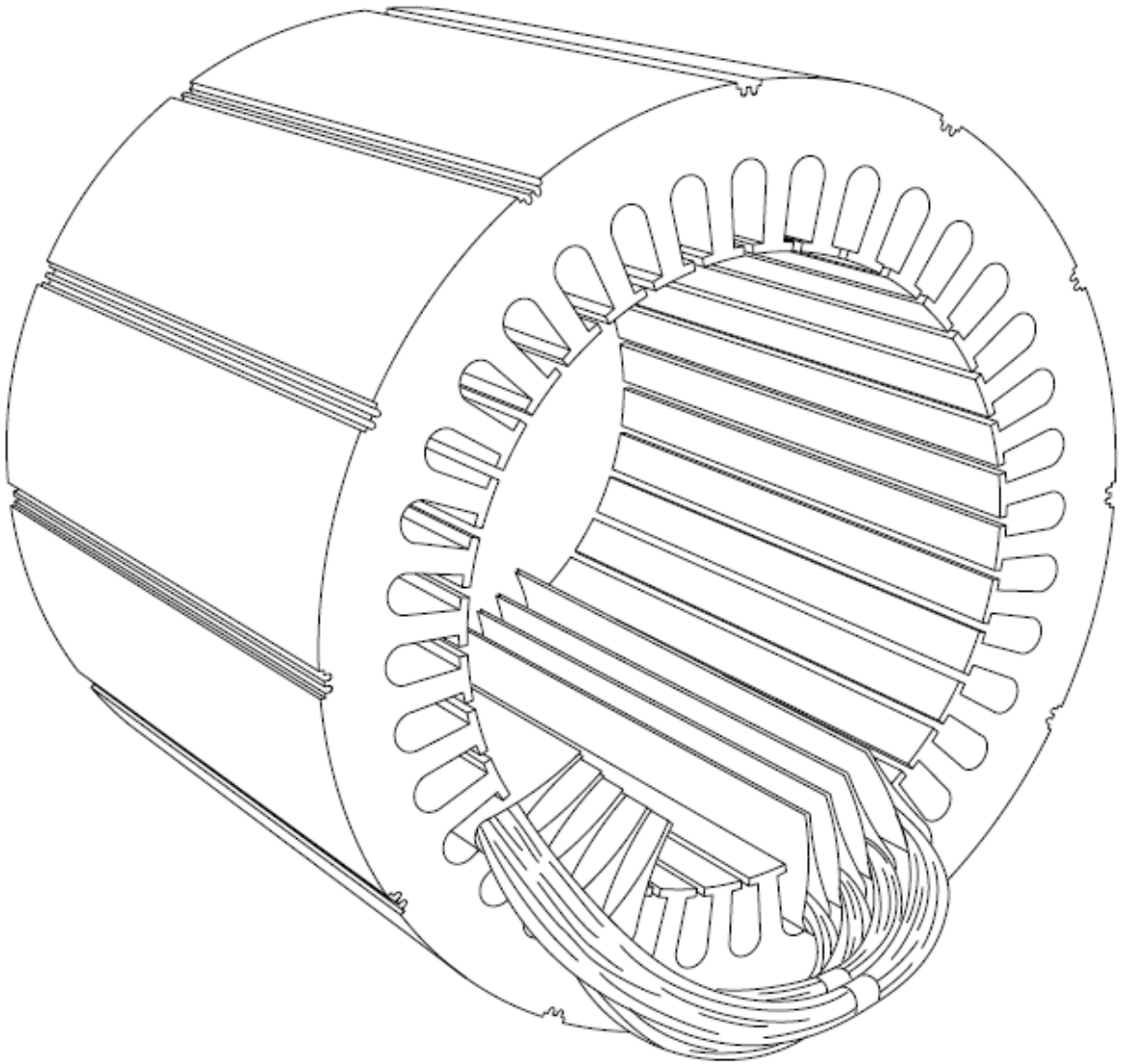
MAGNETNO KOLO

- Magnetno kolo se izrađuje od neorijentisanog Si feromagnetnog lim.
- Za učest.do 300Hz debljina limova je 0,5mm uz gubitke od 2-4W/kg pri 1T i 50Hz.
- Za veće učestanosti mora se koristiti tanji lim.
- Za učestanosti iznad 500Hz koriste se feritna jezgra.
- Vazdušni zazor iznosi 0,2 ÷ 3mm i njegova minim. veličina je određena potrebnim mehaničkim tolerancijama (veća vrednost odgovara AM od 1MW)

KONSTRUKCIJA STATORA



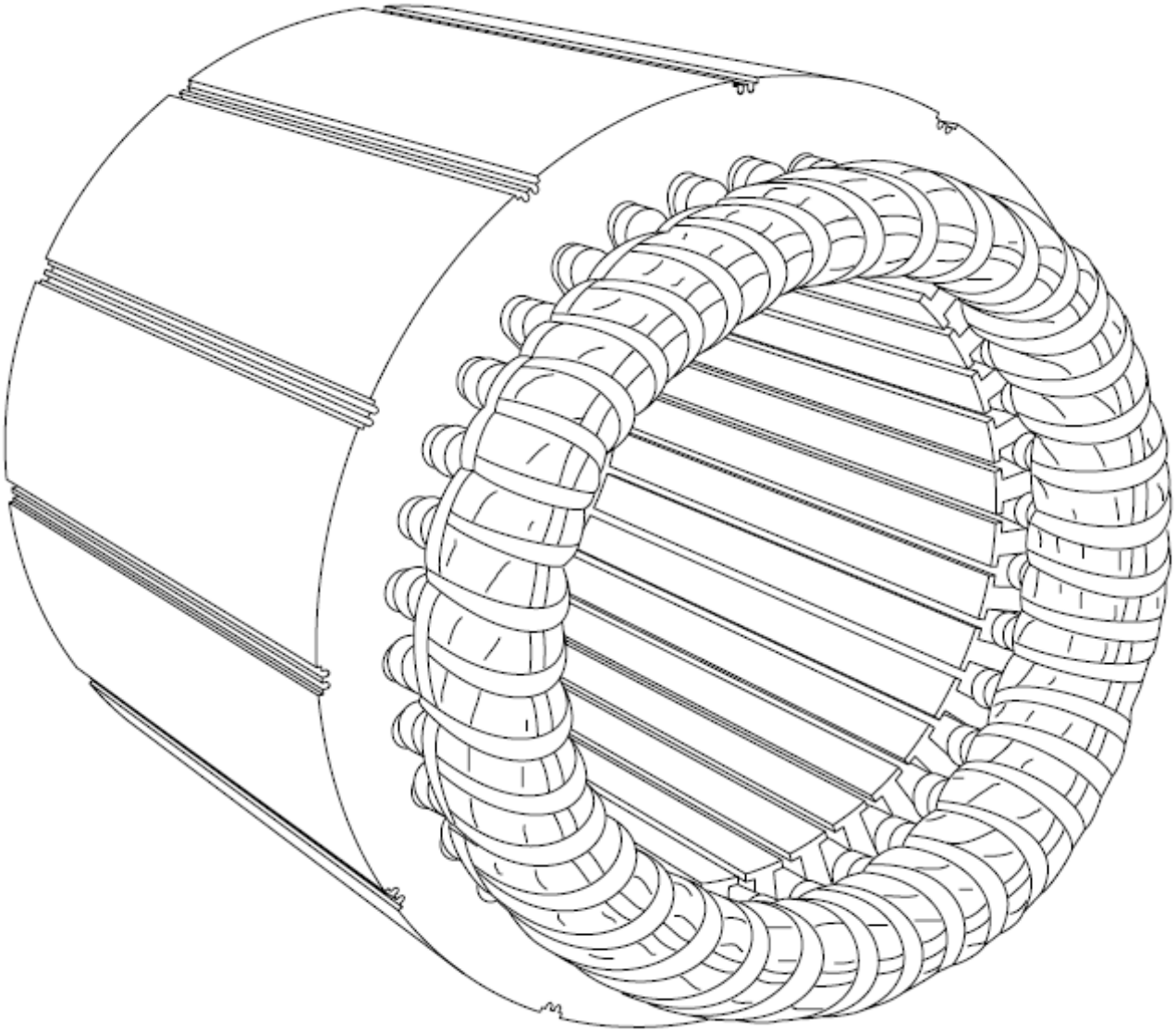
KONSTRUKCIJA STATORA



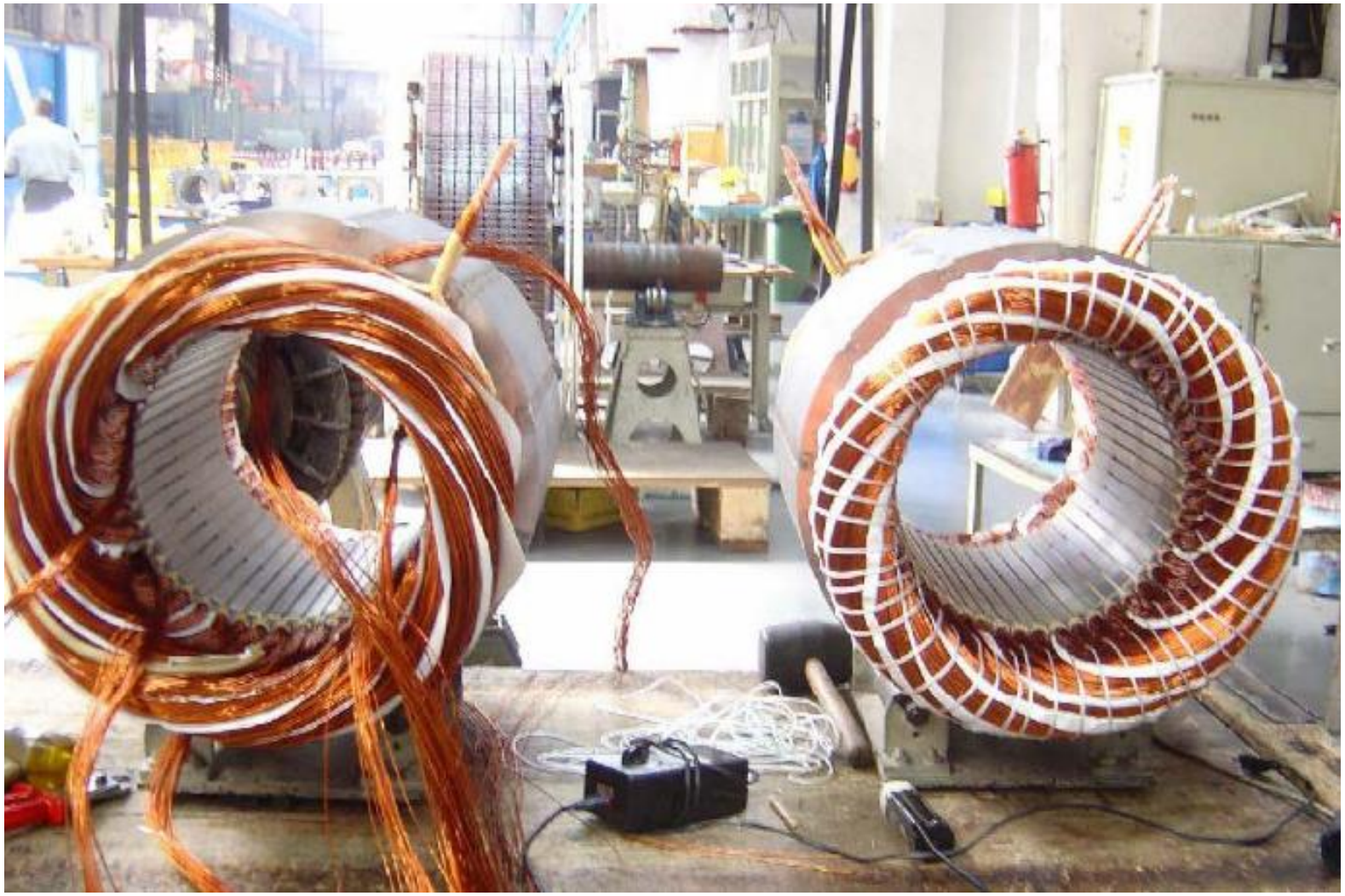
KONSTRUKCIJA STATORA

Statorski paket (magnentnog kola) trofaznog asinhronog motora pripremljen za ulaganje namota.

KONSTRUKCIJA STATORA

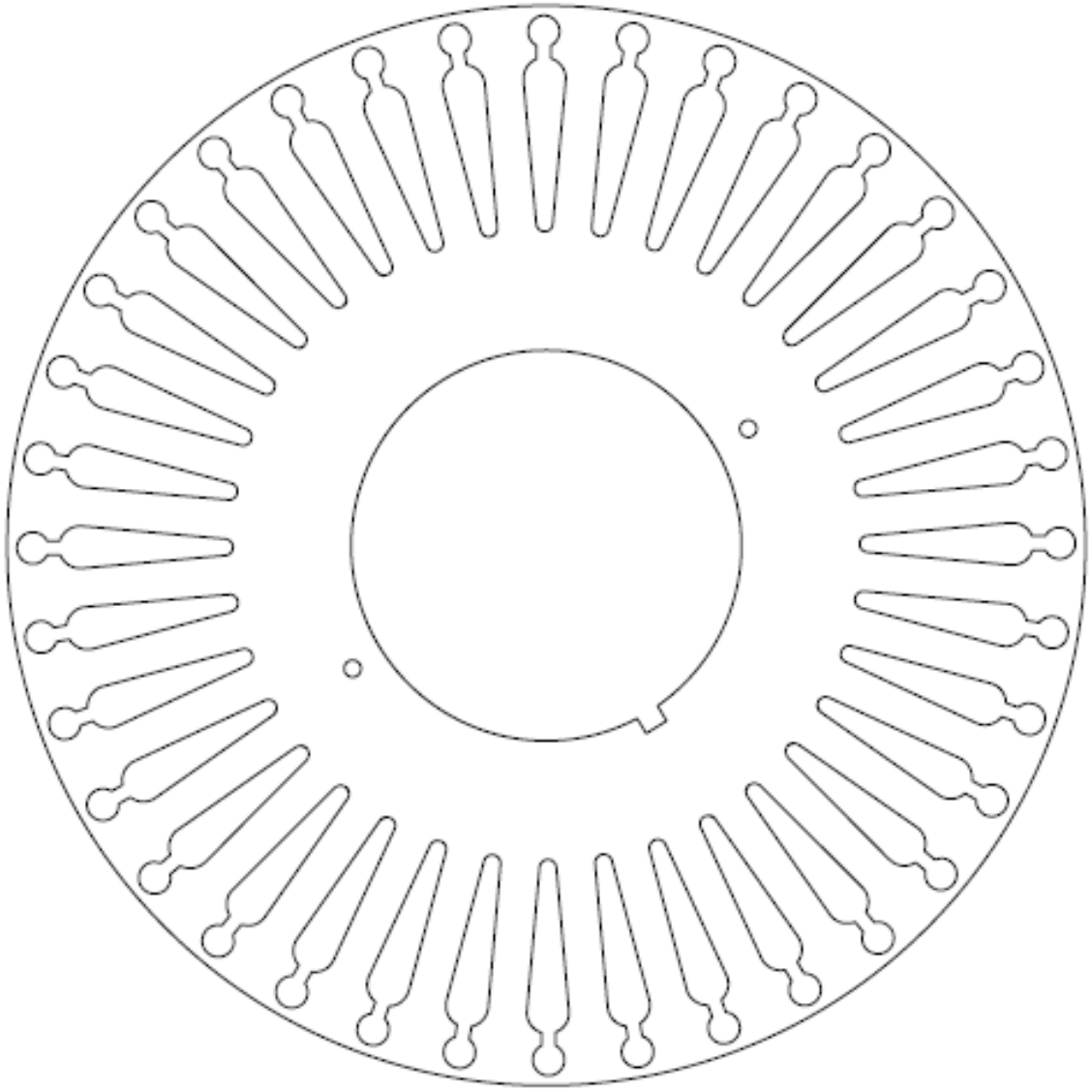


KONSTRUKCIJA STATORA



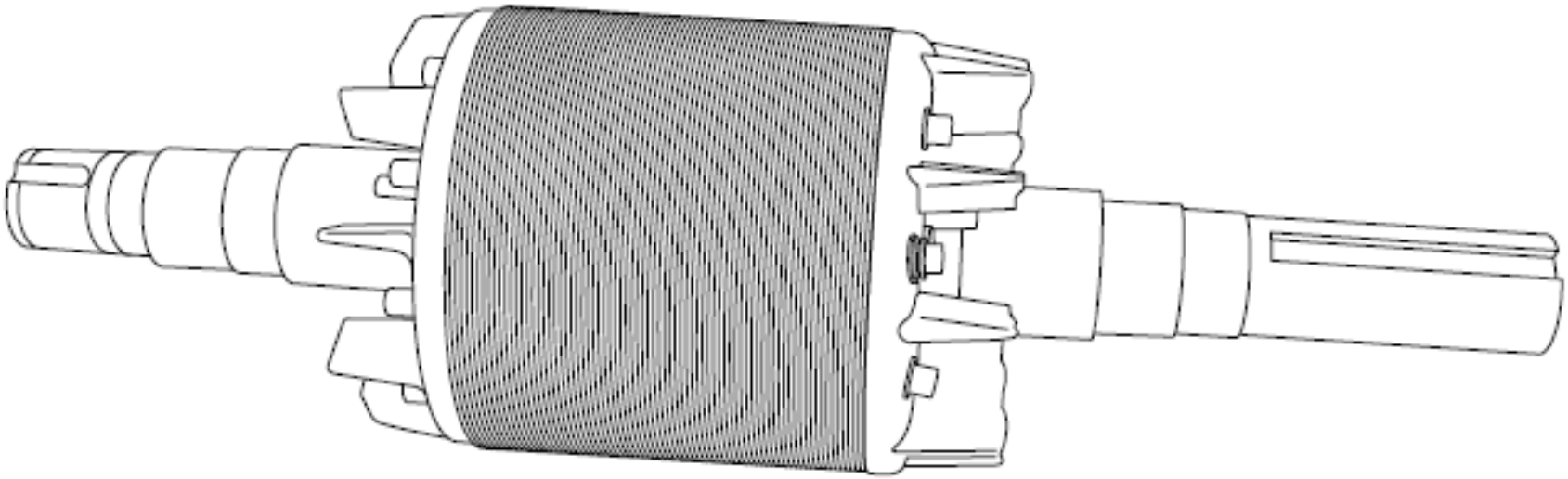
Ulaganje namota u statorski paket trofaznog asinhronog motora (400 V, 50 Hz).

KONSTRUKCIJA ROTORA

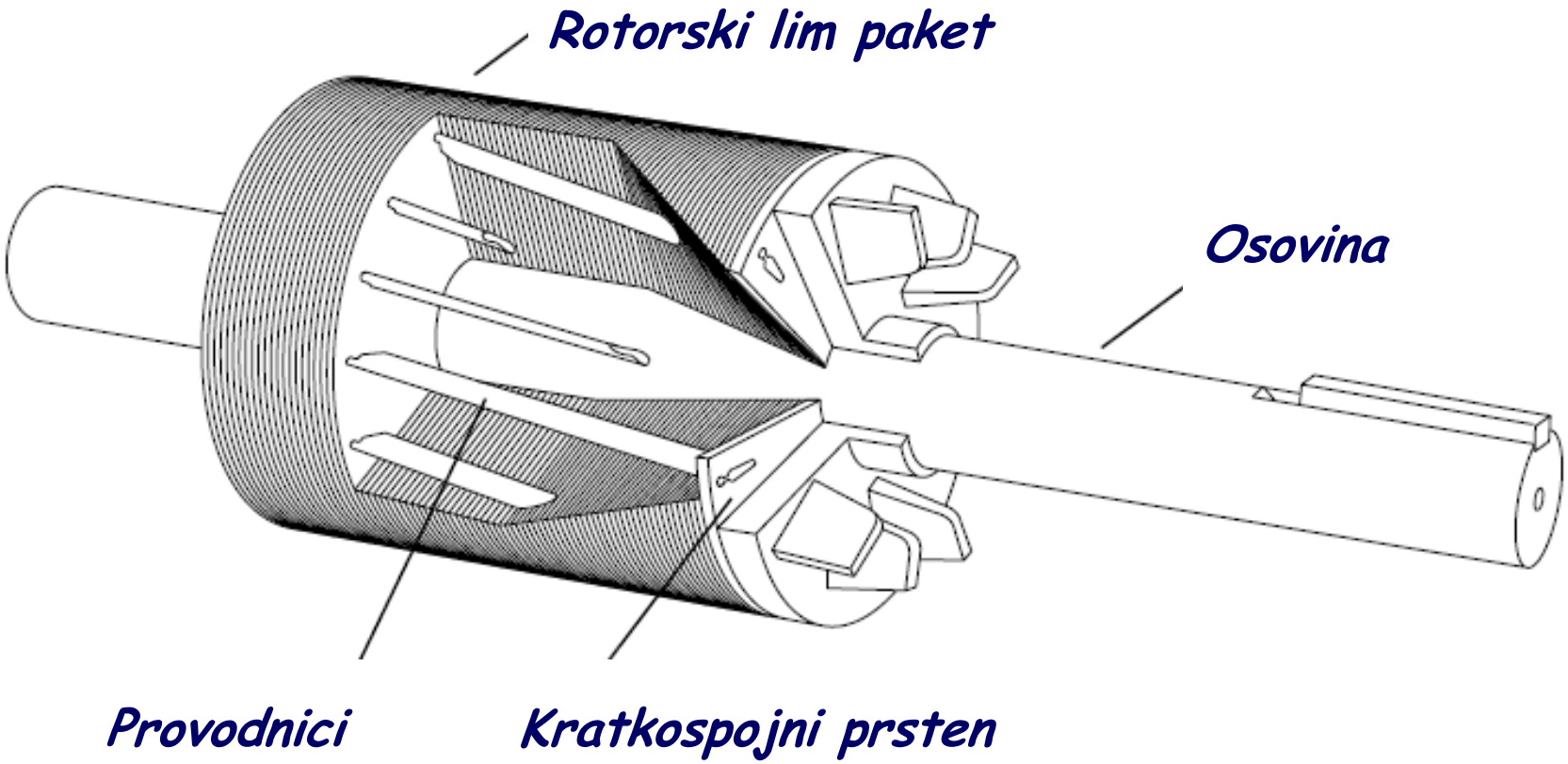


TIPOVI ROTORA

- *Kavezni rotor.*
- *Namotani rotor.*



KONSTRUKCIJA ROTORA



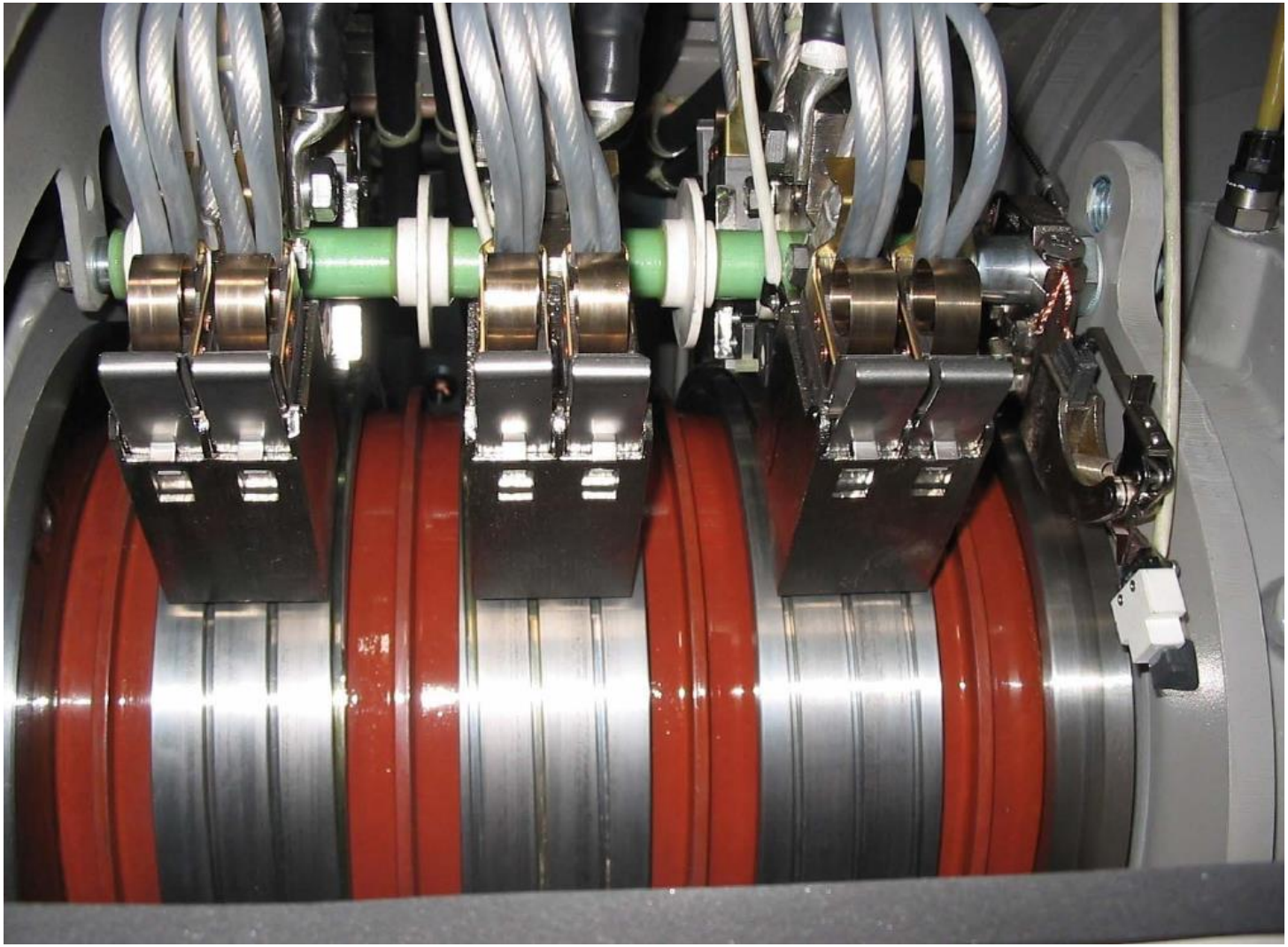
Kavez je od: aluminijuma (ulivanje) za više desetina kW, bakra (donji, radni) i bronze (gornji, startni) za srednje i velike snage.

KONSTRUKCIJA ROTORA

KONSTRUKCIJA ROTORA

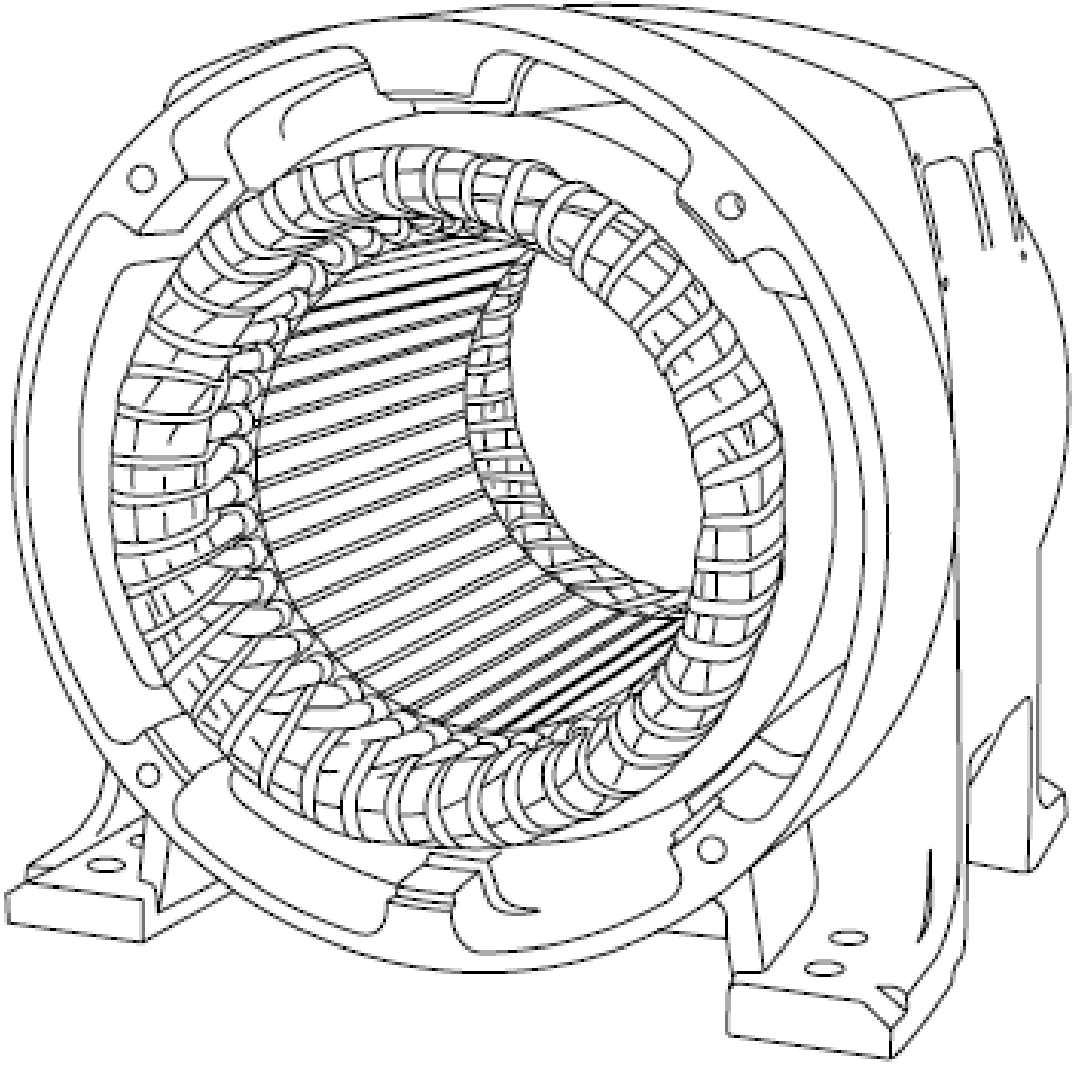
Krajevi namotanog rotora asinhronog motora

KONSTRUKCIJA ROTORA

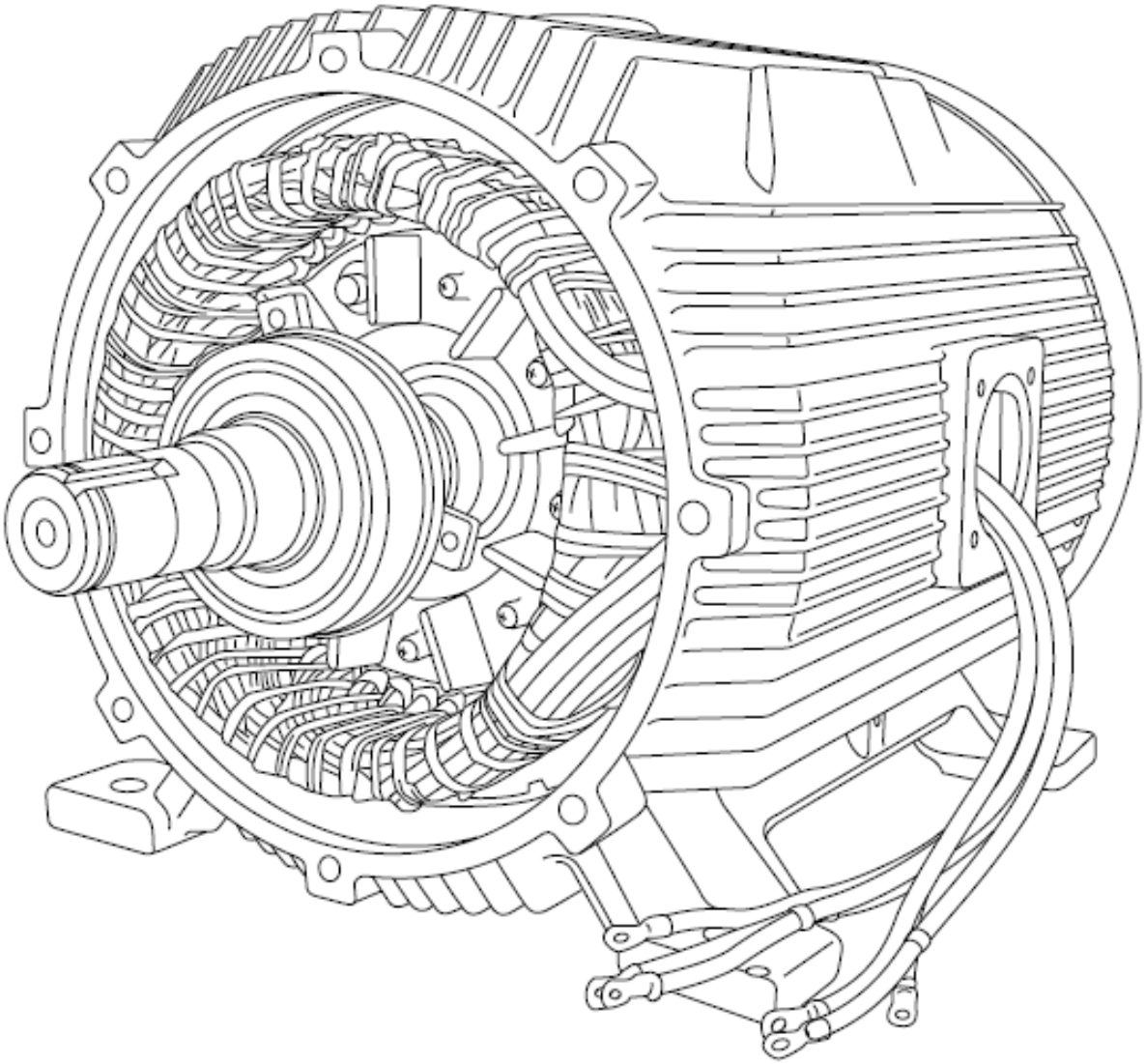


Klizni prstenovi sa nosačima četkica

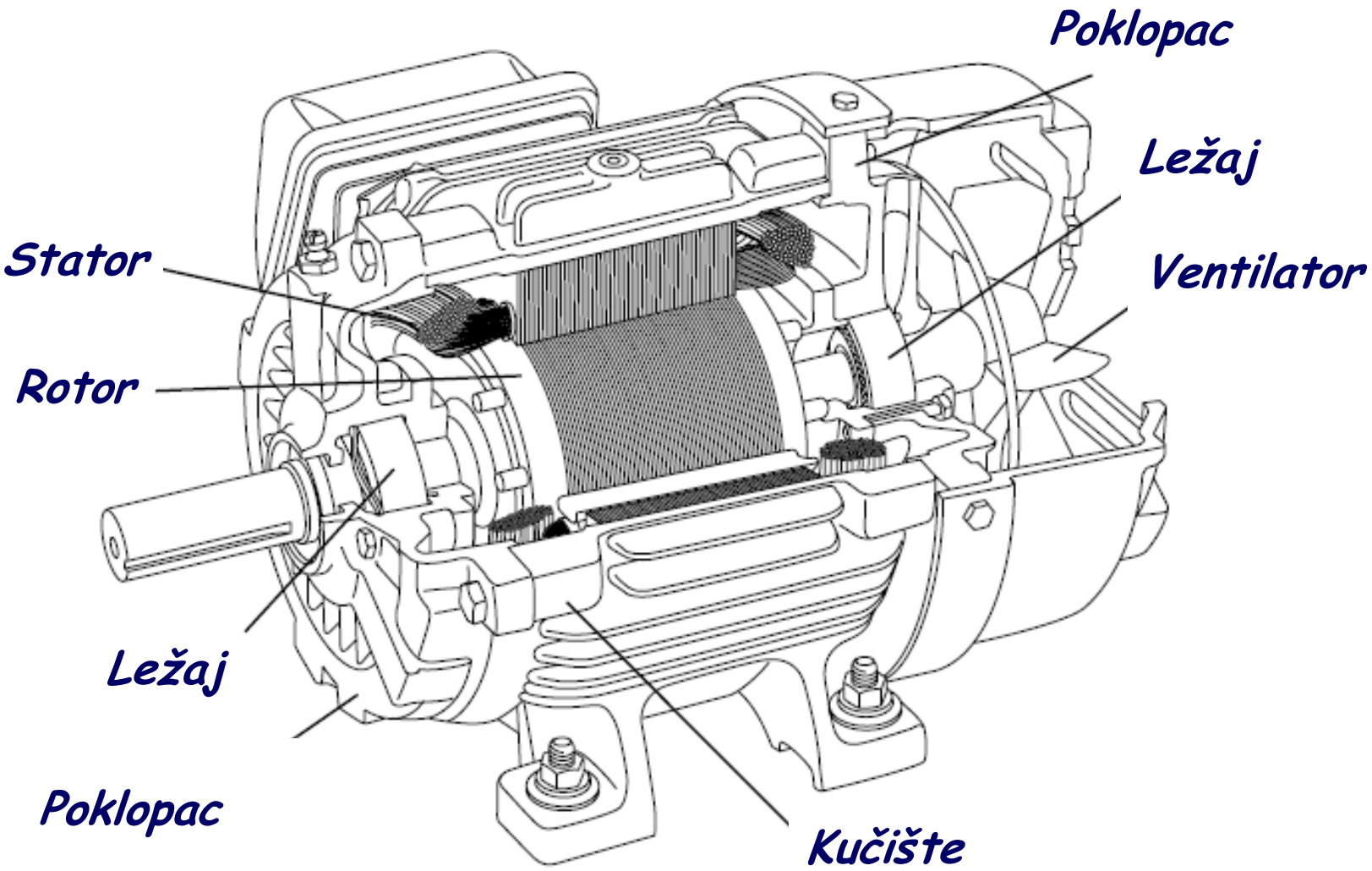
KUĆIŠTE MOTORA



KUĆIŠTE MOTORA



KUĆIŠTE MOTORA



TABLICA MOTORA

SIEMENS

PE•21 PLUS™ PREMIUM EFFICIENCY

ORD.NO.	1LA02864SE41	E NO.			
TYPE	RGZESD	FRAME	286T		
H.P.	30.00	SERVICE FACTOR	1.15	3 PH	
AMPS	34.9	VOLTS	460		
R.P.M.	1765	HERTZ	60		
DUTY	CONT 40°C AMB.	DATE CODE			
CLASS INSUL	F	NEMA DESIGN	B	K.V.A. CODE	G
NEMA. NOM. EFF.	93.6				
SH. END BRG.	50BC03JPP3	OPP. END BRG.	50BC03JPP3		

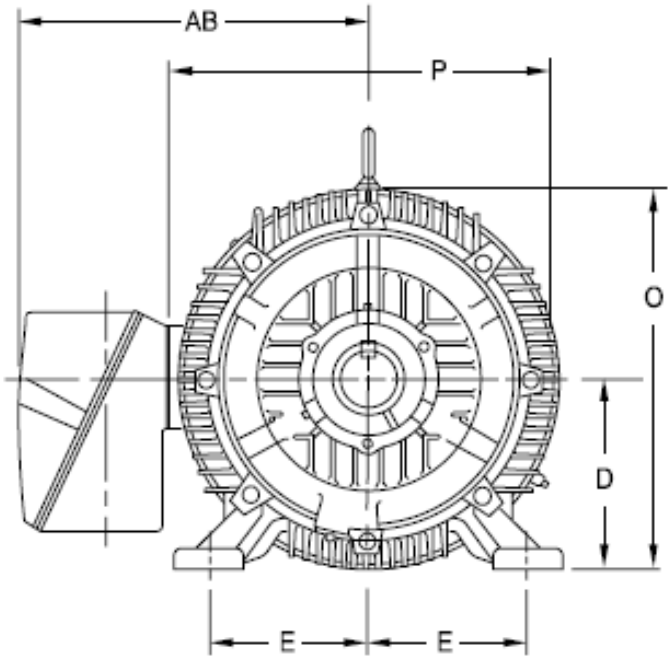
51-770-642

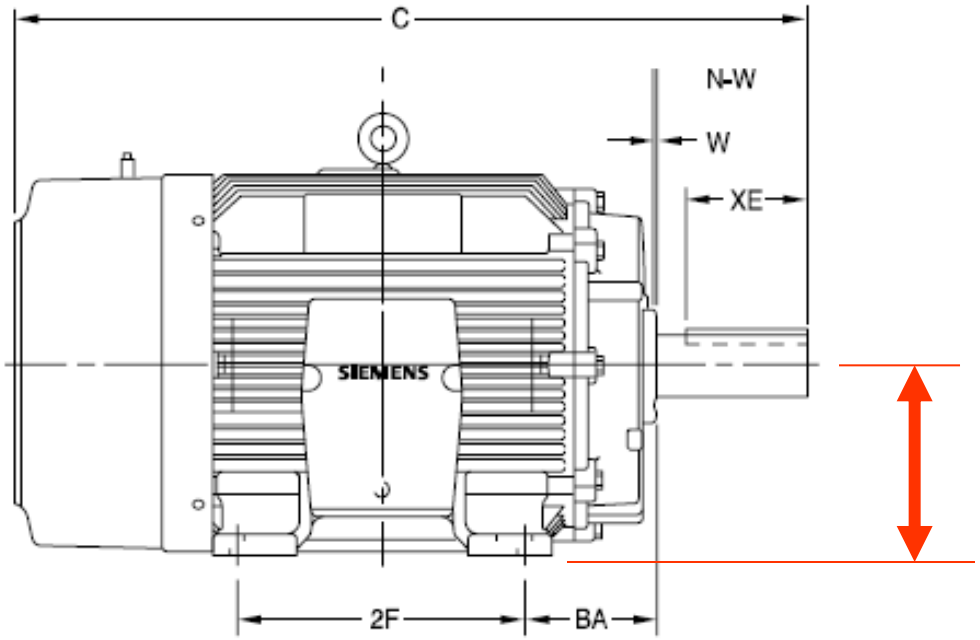
MILL AND CHEMICAL DUTY QUALITY INDUCTION MOTOR

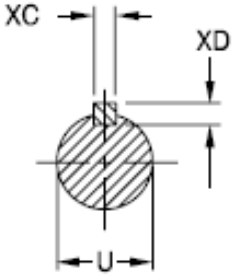
Siemens Energy & Automation, Inc. Little Rock, AR

MADE IN U.S.A.

DIMENZIJE MOTORA





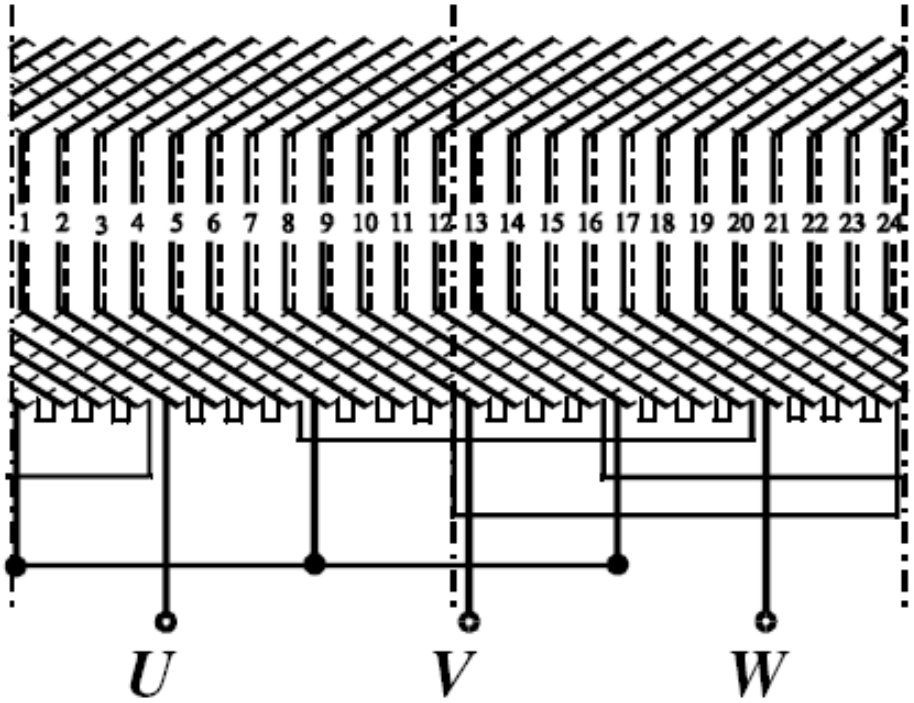


NAMOTAJI ASINHRONOG MOTORA

- Statorski namotaj je višefazan simetrični, najčešce trofazni, spojen u trougao ili zvezdu.
- Kod manjih motora je napravljen od okrugle žice sa velikim brojem navoja.
- Kod većih motora statorski namotaj ima mali broj navoja i napravljen je od profilnih provodnika.
- Pri tome se koriste jednoslojni ili dvoslojni namotaji sa skraćenim koracima.
- Na rotorskoj strani pored navedenih namotaja koristi se i višefazni kratko spojeni namotaj u kaveznoj izvedbi.
- Sprege koje se upotrebljavaju kod faznih namotaja statora i rotora su: Y/y ili D/y

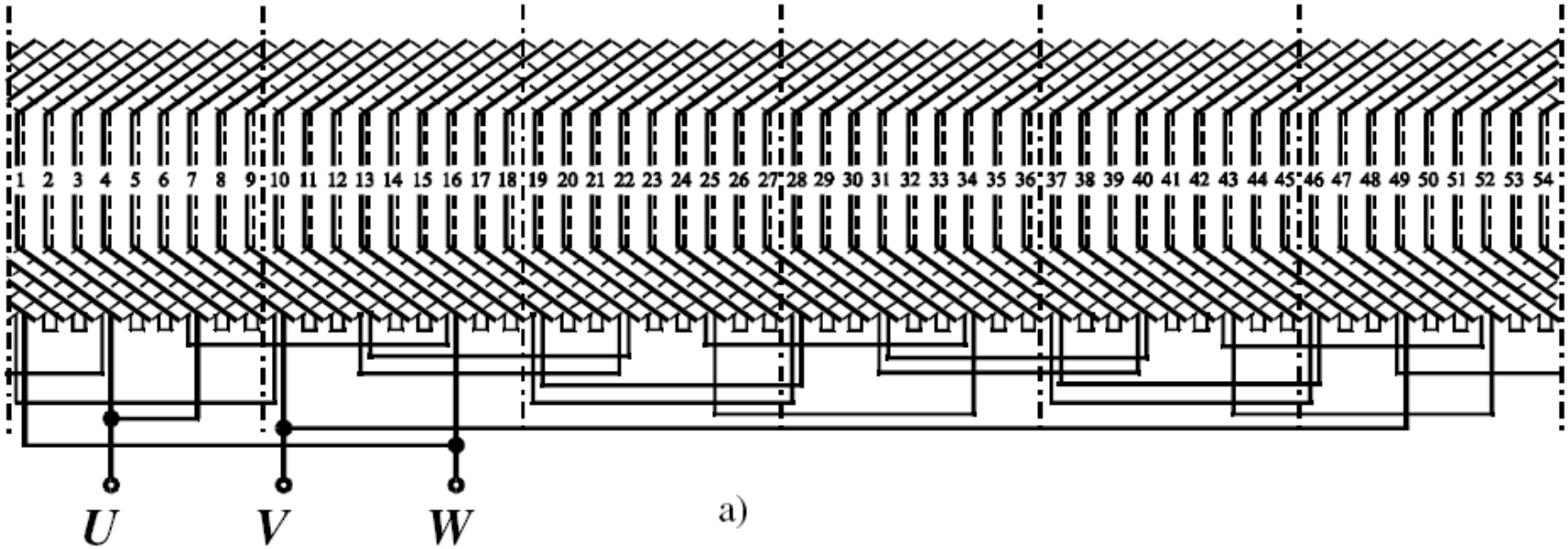
gde su oznake D i Y sledeće: D-trougao, Y-zvezda.

NAMOTAJI ASINHRONOG MOTORA



Razvijena šema 2-polnog asinhronog motora sa 24 žleba na statoru. Namotaj je dvoslojni, spojen u zvezdu, a izveden je bez paralelnih grana. Polni korak, meren brojem žlebova, iznosi 12. Namotaj je skraćen za 4 žleba, pa korak namotaja iznosi S = 8.

NAMOTAJI ASINHRONOG MOTORA



Razvijena šema statorskog namotaja 6-polnog motora sa 54 žlebova. Namotaj je dvoslojni, spojen u trougao. Izveden je bez paralelnih grana. Polni korak iznosi 9 žlebova. Namotaj je skraćen za dva žleba, pa korak namotaja iznosi S = 7.

INDUKOVANA ELEKTROMOTORNA SILA

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -N_1\frac{d\phi}{dt} \qquad \phi = -\phi_m \cos\omega t = \phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \qquad e_1 = -N_1\frac{d\phi}{dt} = -N_1\phi_m\omega\sin\omega t$$

$$E_{1m} = N_1\phi_m\omega$$

Indukovana elektromotorna sila po N_1 navojaka:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1\phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1\phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N_1\phi_m = 4{,}44 f N_1\phi_m$$

Uz uvažavanje navojnih sačinilaca.

$$E_2 = \sqrt{2}\pi\phi N_2 f$$

$$\boxed{E_2 = \sqrt{2}\pi\phi f N_2\xi = 4{,}44\phi f N_2\xi}$$

$$\xi = \xi_1\xi_2 \qquad N_2 = \frac{Zz}{2m}$$

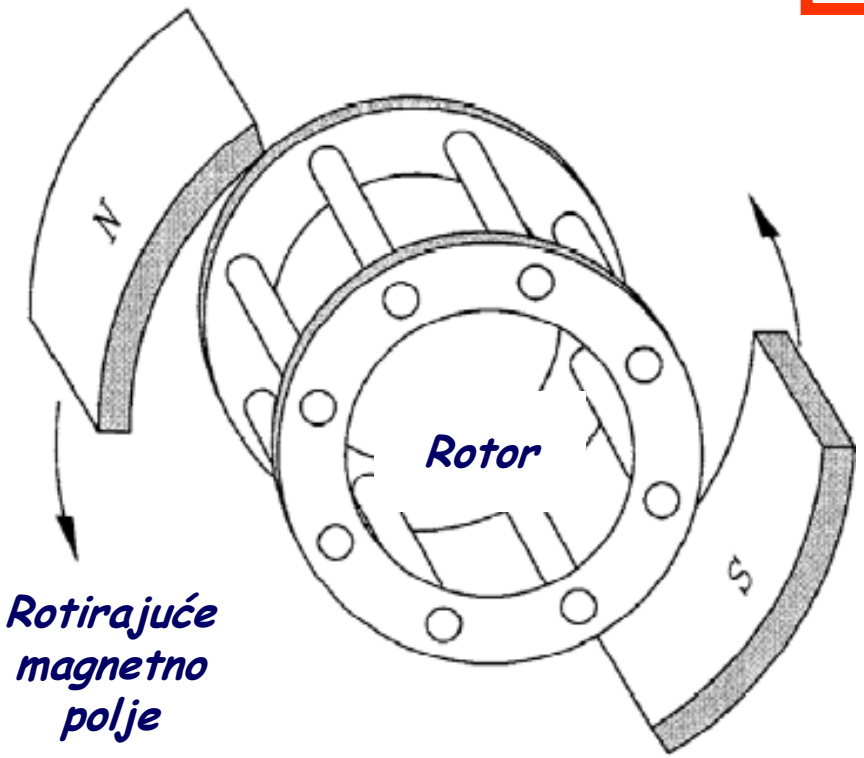
Oznake:

- ***N – broj navojaka po fazi,***
- ***Φ – amplituda fluksa,***
- ***f – frekvencija indukovanog napona,***
- ***ξ – rezultantni navojni sačinilac,***
- ***Z – ukupan broj žlebova,***
- ***m – broj faza,***
- ***z – broj provodnika po žlebu.***

ASINHRONI MOTORI - PRINCIP RADA

Obrtno magnetno polje stvoreno statorskim strujama obrće se sinhronom brzinom:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = konst\left[\min^{-1}\right]$$



U namotaju rotora pod dejstvom obrtnog polja sa statora indukuje se elektromotorna sila. Ona tera struju kroz rotor koji nalazi u obrtnom polju.

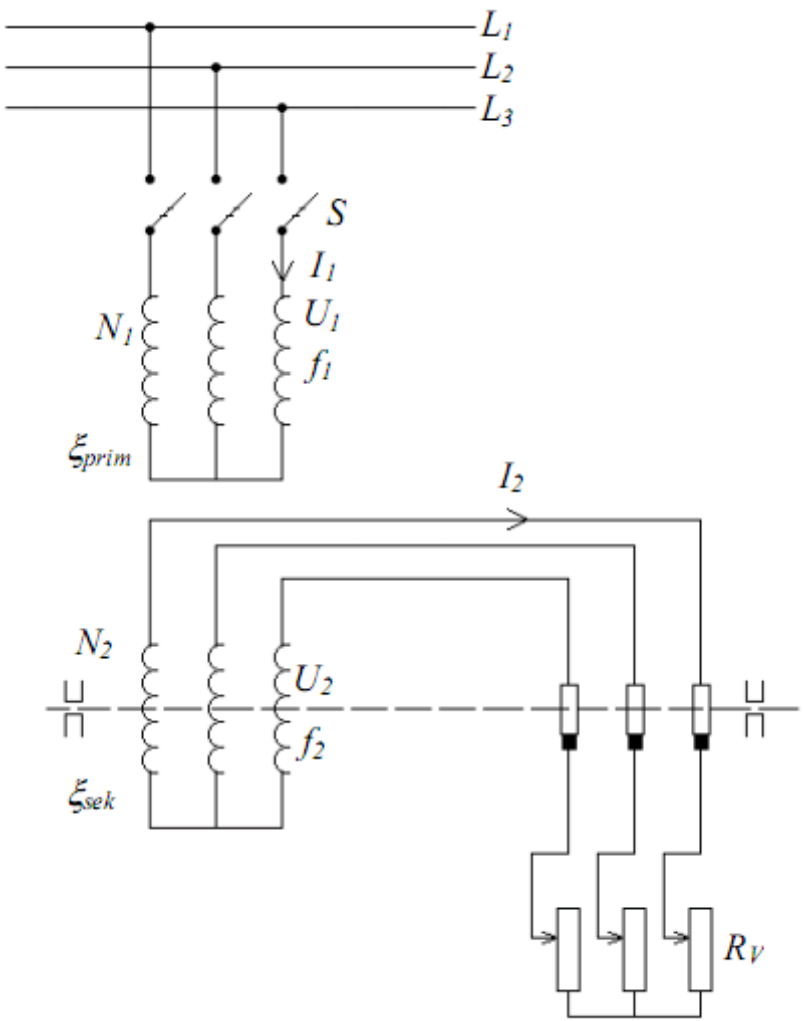
ASINHRONI MOTORI - PRINCIP RADA

Usled toga se javlja sila na provodnike rotora, pod čijim dejstvom rotor počinje da se kreće u smeru obrtnog polja. Struje rotorskog namotaja stvaraju svoje obrtno polje.
Magnetna polja statora i rotora privlače se uzajamno obrazujući obrtni momenat:

$$\boxed{M = K\Phi I_r \sin(\varphi_r)}$$

Rotor sledi brzinu obrtanja obrtne magnetno pobudne sile statora brzinom n_2 koja ne može dostići vrednost sinhrone brzine n_1 jer u tom slučaju u rotorskim namotajima se ne bi indukovao napon. Zbog toga je u motornom režimu $n_2 < n_1$. Obzirom da brzina obrtanja rotora zavisi od opterećenja i ima promenljivu vrednost, ove mašine nazivamo asinhronim mašinama.

OZNAKE



$$\frac{stator}{rotor} = \frac{primar}{sekundar} = \frac{induktor}{indukt}$$

R_V-spoljašnji otpornik
U_1-primarni fazni napon.
U_2-sekundarni fazni napon.
f_1-primarna frekvencija.
f_2-sekundarna frekvencija.
I_1-primarna struja.
I_2-sekundarna struja.
n_2-brzina obrtanja rotora.[min^{-1}].

Principijelna šema kliznokolutne mašine

KLIZANJE

Relativna brzina statorskog polja u odnosu na rotor (apsolutno klizanje):

$$n'' = n_{kliz} = n_1 - n_2 \qquad \omega'' = \omega_1 - \omega_2$$

Relativno klizanje (u odnosu na statorsko polje):

$$s = \frac{n''}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \qquad s = \frac{\omega''}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

Relativno klizanje (izraženo u procentima):

$$s[\%] = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100$$

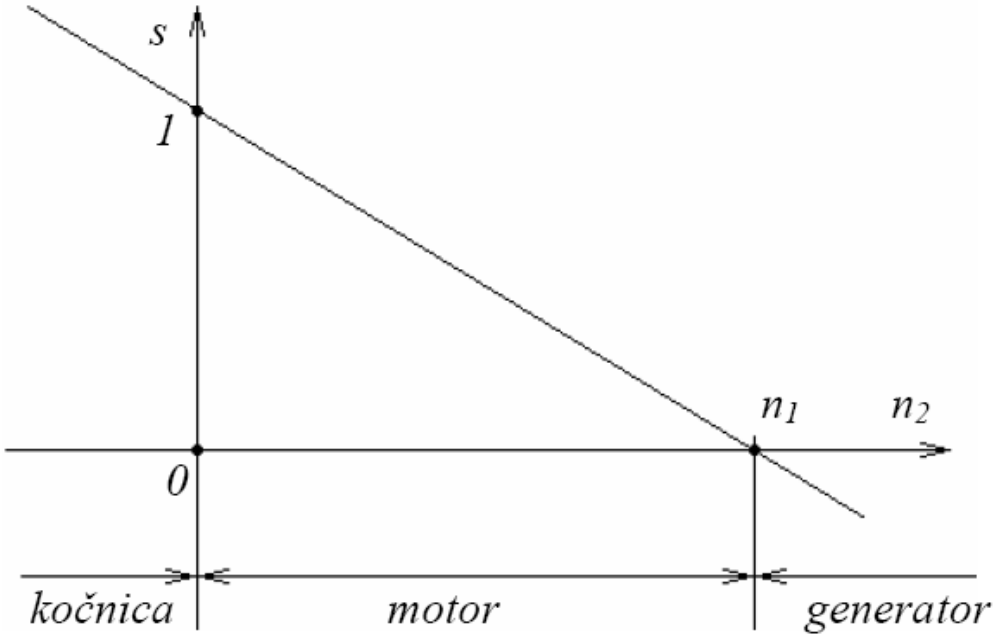
Veza između ugaone brzine obrtanja u rad/s i o/min:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}$$

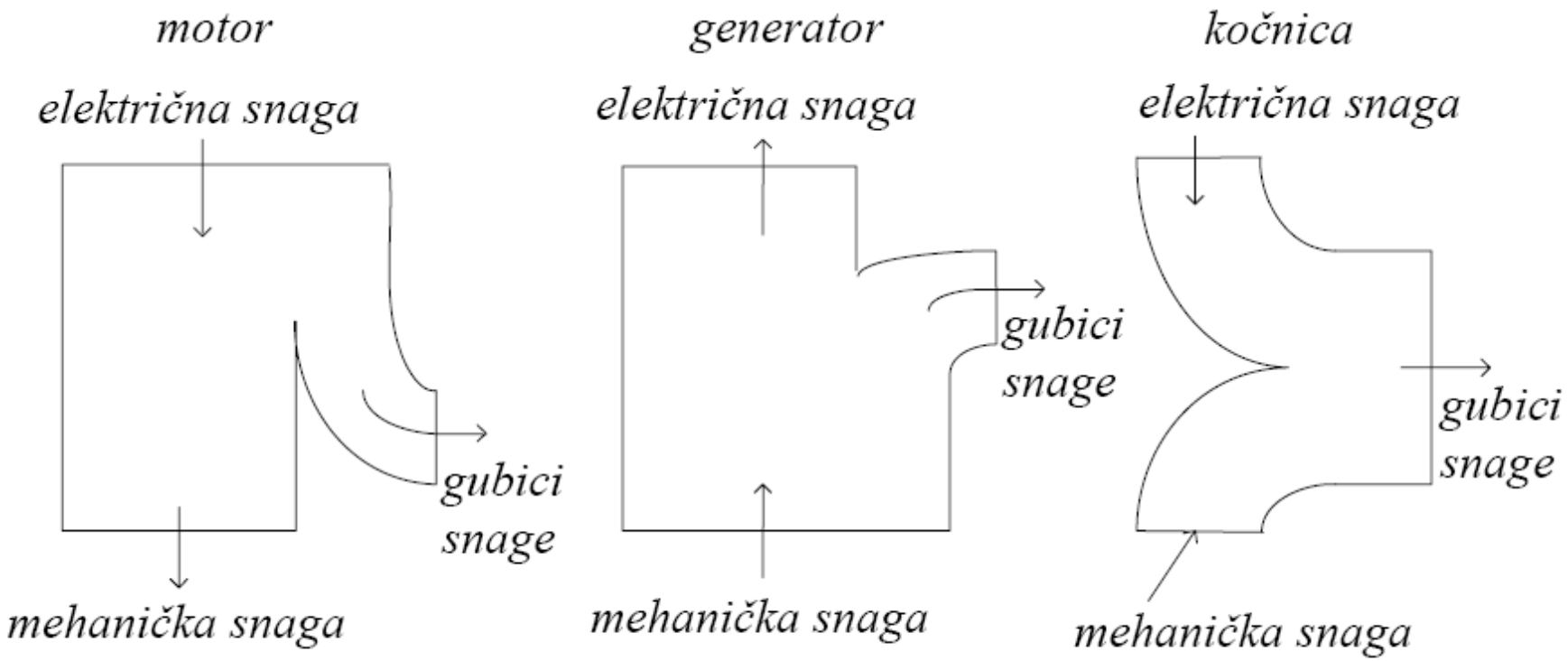
KLIZANJE

Klizanje u iznosima mora biti sasvim mala veličina(zbog uticaja na gubitke energije) te se zbog toga iskazuje u %.
Iznosi 0,1÷5%.

- *Ako se rotor obrće sinhronom brzinom s = 0*
- *Dok rotor stoji (zakočen, s=1*
- *Brzina obrtanje rotora manje od sinhrone s > 0 (M)*
- *Vrti li se rotor brže od obrtnog polja s < 0 (G)*
- *Vrti li se rotor u suprotnu stranu (n<0) od obrtnog polja s > 1 (K)*



PROTOK SNAGE



Senkijevi dijagrami

FREKVENCIJA I INDUKOVANI NAPON ROTORA PRI OBRTANJU

Statorska frekvencija je:

$$f_1 = \frac{n_1 p}{60}$$

Rotorska frekvencija je:

$$f_2 = \frac{n'' p}{60} = \frac{(n_1 - n_2) p}{60}$$

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = s \qquad ;$$

Ukoliko je: $n_2 \neq n_1$; $f_2 \neq f_1$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\sqrt{2}\pi \Phi f_1 N_1 \xi_{prim}}{\sqrt{2}\pi \Phi f_2 N_2 \xi_{sek}} = \frac{N_1 \xi_{prim}}{N_2 \xi_{sek}} \frac{1}{s}$$

$$\frac{E_2}{s} = E_1 \frac{N_2 \xi_{prim}}{N_1 \xi_{sek}}$$

FREKVENCIJA I INDUKOVANI NAPON ROTORA PRI OBRTANJU

ukoliko je: s=1 ; $E_2 = E_{20}$

Indukovani napon rotora u mirovanju je:

$$E_{20} = E_1 \frac{N_2 \xi_{prim}}{N_1 \xi_{sek}} \quad ; \quad \boxed{\frac{E_2}{s} = E_{20}}$$

$$\boxed{E_2 = s \cdot E_{20}}$$

pri tom je: E_{20} -indukovani napon rotora pri mirovanju.

ODREĐIVANJE VREDNOSTI STRUJE ROTORA

U cilju olakšanja razmatranja rada uvodimo:

R_2- Otpornost namotaja rotora po fazi.

X_{2S}- Reaktansa rasipanja rotora po fazi.

L_{2S}- Induktivnost rasipanja rotora po fazi.

Reaktansa rasipanja rotora po fazi je:

$$X_{2S} = 2\pi f_2 L_{2S}$$

Sekundarna struja u faznim namotajima rotora je:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2S}^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (2\pi f_2 L_{2S})^2}}$$

ODREĐIVANJE VREDNOSTI STRUJE ROTORA

Ukoliko uvedemo reaktansu rasipanja rotora X_2 izračunatu na primarnoj frekvenciji:

$$X_2 = 2\pi f_1 L_{2s}$$

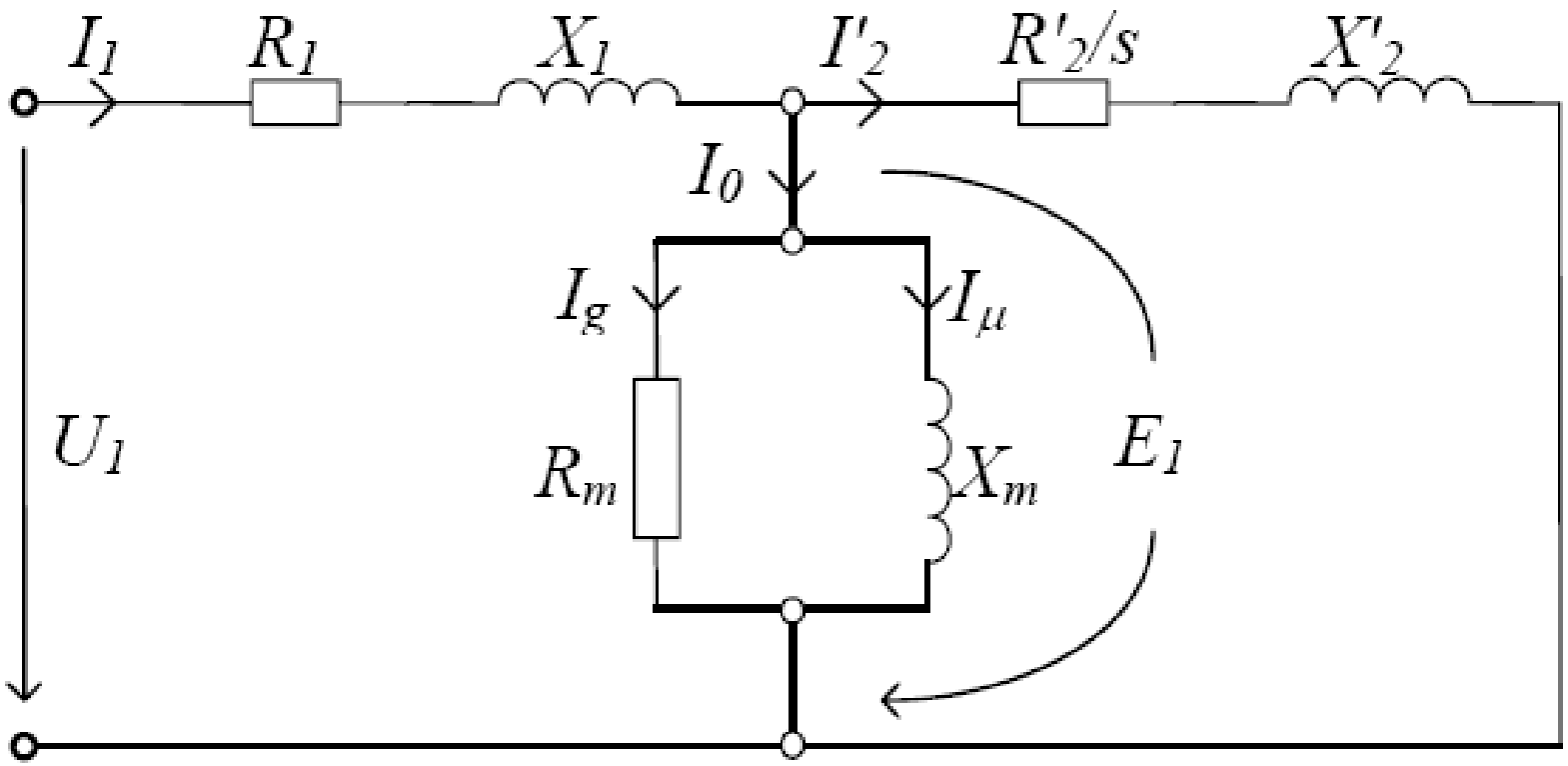
onda promenljivu reaktansu rasipanja sekundara možemo izraziti preko klizanja:

$$\frac{X_{2s}}{X_2} = \frac{f_2}{f_1} = s \quad ; \quad X_{2s} = sX_2$$

Vrednost sekundarne struje je:

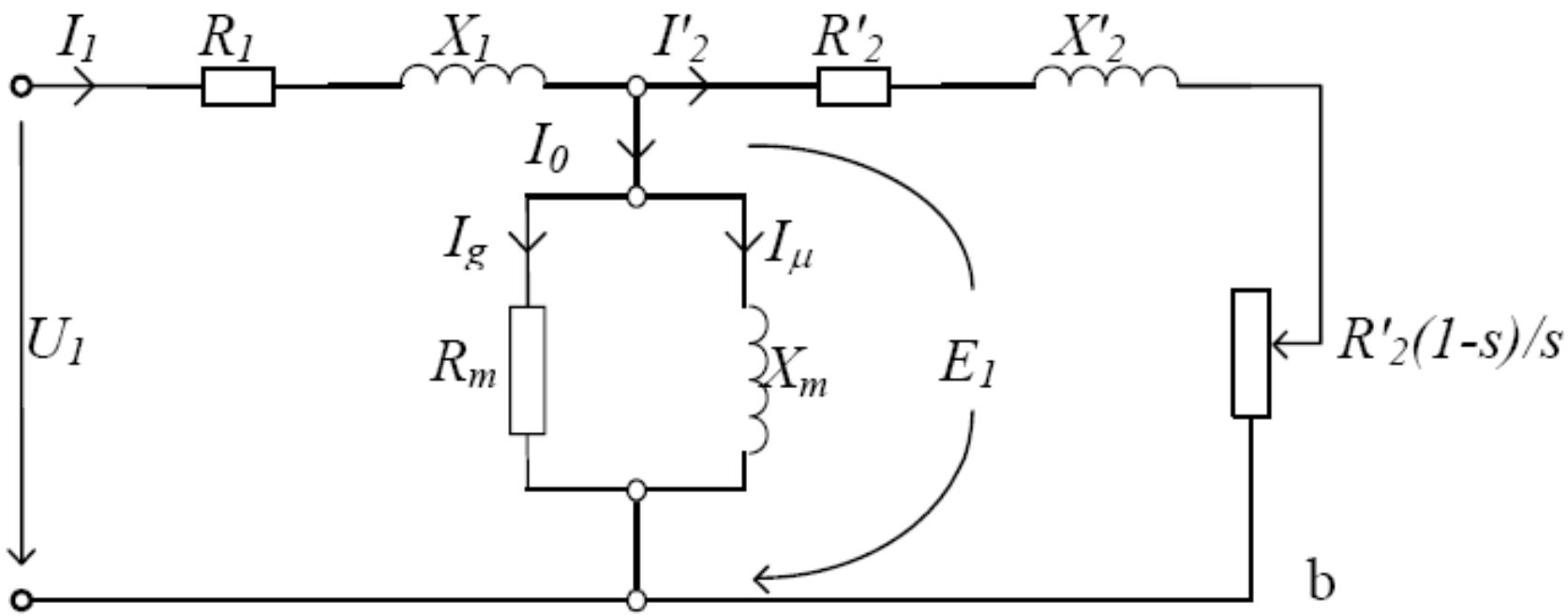
$$I_2 = \frac{E_{20}\, s}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} = \boxed{\frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}} \longrightarrow \boxed{\frac{R_2}{s} - R_2 = \frac{R_2}{s}(1-s)}$$

EKVIVALENTNE ŠEME ASINHRONE MAŠINE



$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s}$$

EKVIVALENTNE ŠEME ASINHRONE MAŠINE



$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s}$$

EKVIVALENTNE ŠEME ASINHRONE MAŠINE

Kada je AM u praznom hodu s=0 pa sledi da je I_μ jednaka struji praznog hoda. Kako u praznom hodu nema el.mehaničke konverzije (osim onog dela kojim se pokrivaju mehanički gubici i koji se mogu zanemariti) to znači da je struja statora u praznom hodu pretežno reaktivna radi obezbeđenja potrebne reaktivne energije za magnećenje magnetnog kola.

Reaktansa i struja magnećenja opisuju reaktivnu energiju potrebnu za magnećenje magnetnog kola.

U AM postoje statorsko i rotorsko obrtno polje kojima odgovaraju statorski i rotorski fluks. Deo ovih flukseva se rasipa i oni su opisaniinduktivnostima (reaktansama) rasipanja.

Rezultatntno polje u mašini je vektorski zbir statorskog i rotorskog obrtnog polja u mašini postoji zajednički fluks - koji se obuhvata i sa namotima statora i rotora. Prema tome zajednički fluks potiče od ukupnog delovanja zbira struja statora i rotora, to je fluks koji postoji u vazdušnom zazoru i uzrokovan je I_μ. I_μ je ekvivalentna struja kojom se opisuje nastanak zajedničkog fluksa. L_m povezuje zajednički fluks i I_μ.

EKVIVALENTNE ŠEME ASINHRONE MAŠINE

Gubici u u Fe se ne mogu opisati ekvivalentiraju jednostavno sa omskim otporom R_m u grani magnećenja. El.param.R_m se ekvivalentiraju gubici čija je priroda nastanka magnetna.

Ako se razdvoji snaga obrtnog polja koja se oslobađa na R_2/s na snagu Džulovih gubitaka u rotoru i snagu konverzije dobija se ekvivalentna šema asinhronog motora. Novo uvedeni parametar je fiktivan.

$$\boxed{\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s}}$$

SVOĐENJE SEKUNDARNIH VELIČINA NA PRIMAR

Analogno sa svođenjem kod transformatora sledi:

$$E_1 = E'_{20} = \frac{N_1 \xi_{prim}}{N_2 \xi_{sek}} E_{20}$$

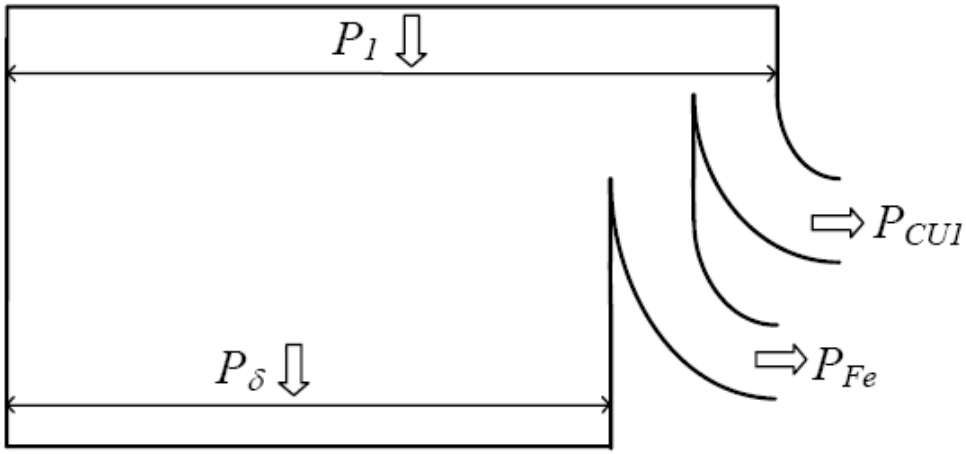
$$I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \frac{N_2 \xi_{ssek}}{N_1 \xi_{prim}} I_2$$

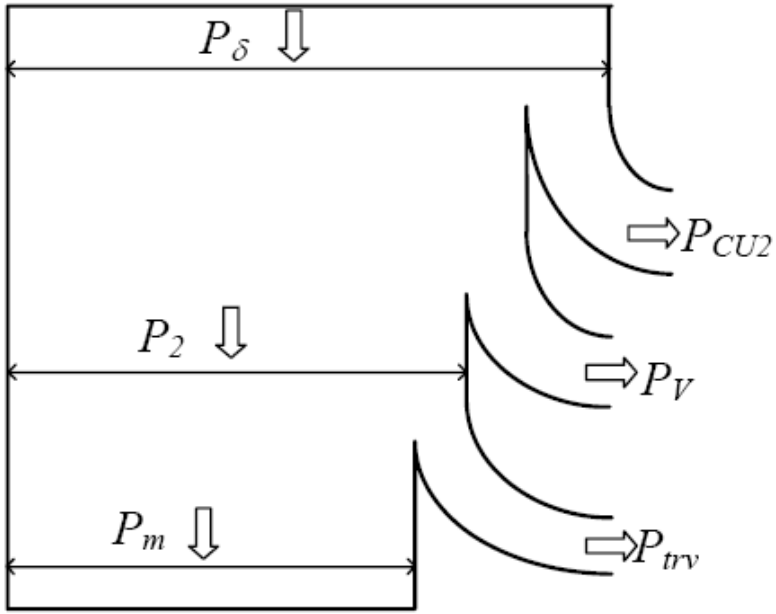
$$R'_V = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 \xi_{prim}}{N_2 \xi_{sek}} \right)^2 R_V$$

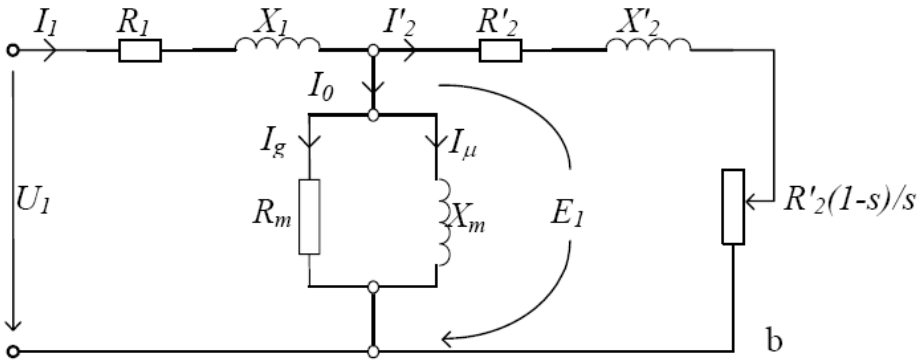
$$R'_2 = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 \xi_{prim}}{N_2 \xi_{sek}} \right)^2 R_2$$

$$X'_2 = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 \xi_{prim}}{N_2 \xi_{sek}} \right)^2 X_2$$

BILANS SNAGE







BILANS SNAGE

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

$$P_{CU1} = m_1 I_1^2 R_1$$

$$P_{Fe} = m_1 I_g^2 R_m$$

$$P_\delta = P_1 - P_{CU1} - P_{Fe}$$

$$P_\delta = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

$$R_V \neq 0$$

$$P_\delta = m_2 I_2^2 \frac{R_2 + R_v}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2' + R_V'}{s}$$

$$R_V \neq 0$$

$$P_{CU2} = m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'$$

$$P_V = m_2 I_2^2 R_V = m_1 I_2'^2 R_V' \qquad P_{CU2} + P_V = sP_2$$

BILANS SNAGE

$$P_2 = P_\delta - P_{CU2}$$

$R_V \neq 0$

$$P_2 = P_\delta - P_{CU2} - P_V$$

$$P_2 = P_\delta (1 - s)$$

$$P_2 = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s}(1 - s) = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}(1 - s)$$

$R_V \neq 0$

$$P_2 = m_2 I_2^2 \frac{R_2 + R_V}{s}(1 - s) = m_1 I_2'^2 \frac{R_2' + R_V'}{s}(1 - s)$$

$$P_m = P_2 - P_{trv}$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_1}$$

OBRTNI MOMENT ASINHRONOG MOTORA

Opšta jednačina za određivanje momenta:

$$M = \frac{P}{\Omega}$$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} = \frac{n}{9{,}55}$$

$$M = \frac{60}{2\pi}\frac{P}{n} = 9{,}55\frac{P}{n}$$

$$\boxed{M = 9{,}55\frac{P_2}{n_2} = 9{,}55\frac{P_\delta}{n_1}}$$

$$P_2 = P_\delta(1-s)$$

$$n_2 = n_1(1-s)$$

OBRTNI MOMENT ASINHRONOG MOTORA

$$P_{CU2} = sP_{\delta}$$

$$R_V = 0$$

$$\boxed{M = 9{,}55\frac{m_2 I_2^2 R_2}{n_1 s} = 9{,}55\frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{n_1 s}}$$

$$R_V \neq 0$$

$$M = 9{,}55\frac{m_2 I_2^2 (R_2 + R_V)}{n_1 s} = 9{,}55\frac{m_1 I_2'^2 (R_2' + R_V')}{n_1 s}$$

OBRTNI MOMENT ASINHRONOG MOTORA

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

$E_{20} \neq const$

$E_1 \neq const$

$R_V = 0$

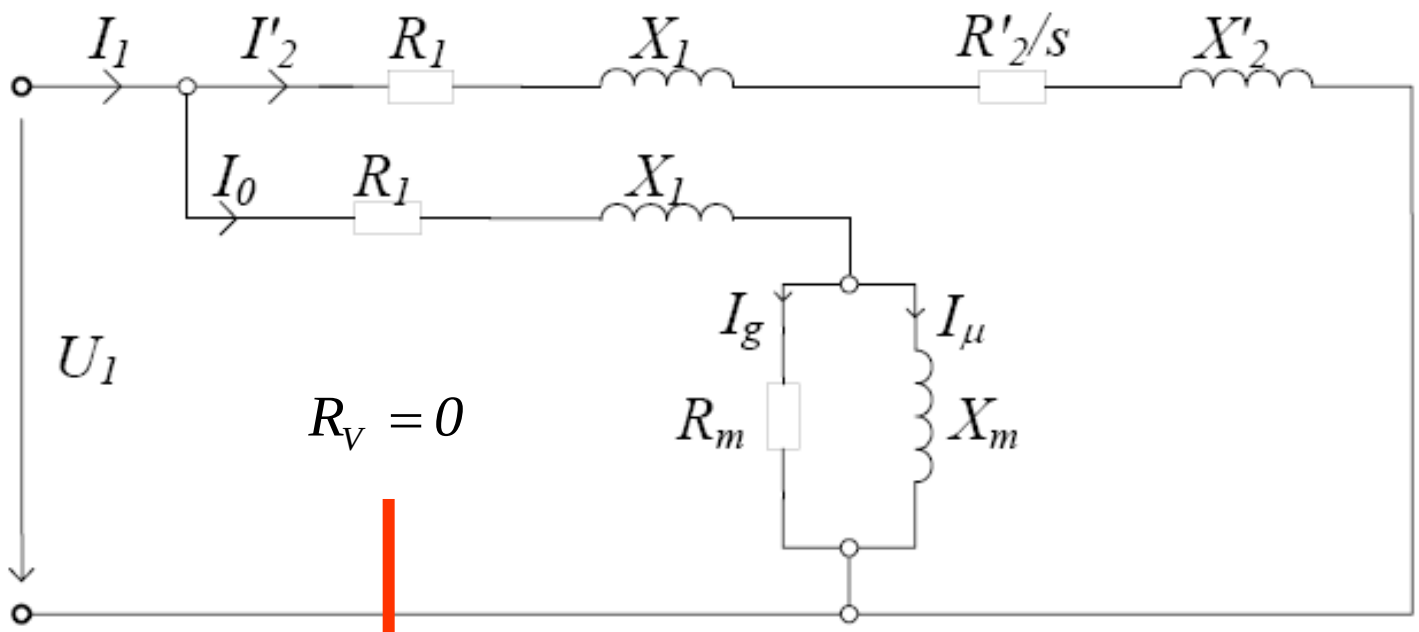
$$\boxed{M = 9{,}55 \frac{m_2 E_{20}^2 R_2}{n_1\left(\frac{R_2^2}{s} + sX_2^2\right)} = 9{,}55 \frac{m_1 E_1^2 R_2'}{n_1\left(\frac{R_2'^2}{s} + sX_2'^2\right)}}$$

$R_V \neq 0$

$$M = 9{,}55 \frac{m_2 E_{20}^2 (R_2 + R_V)}{n_1\left(\frac{(R_2 + R_V)^2}{s} + sX_2^2\right)} = 9{,}55 \frac{m_1 E_1^2 (R_2' + R_V')}{n_1\left(\frac{(R_2' + R_V')^2}{s} + sX_2'^2\right)}$$

OBRTNI MOMENT ASINHRONOG MOTORA

Iz uprošćene ekvivalentne šeme sledi:



$$I'_2 \approx \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

$$M = \frac{9{,}55 m_1 U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{n_1\left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2\right)}$$

OBRTNI MOMENT ASINHRONOG MOTORA

$$R_V \neq 0$$

$$I_2' \approx \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_V'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$M = \frac{9{,}55 m_1 U_1^2 \frac{R_2' + R_V'}{s}}{n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2' + R_V'}{s}\right)^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2\right]}$$

OBRTNI MOMENT ASINHRONOG MOTORA

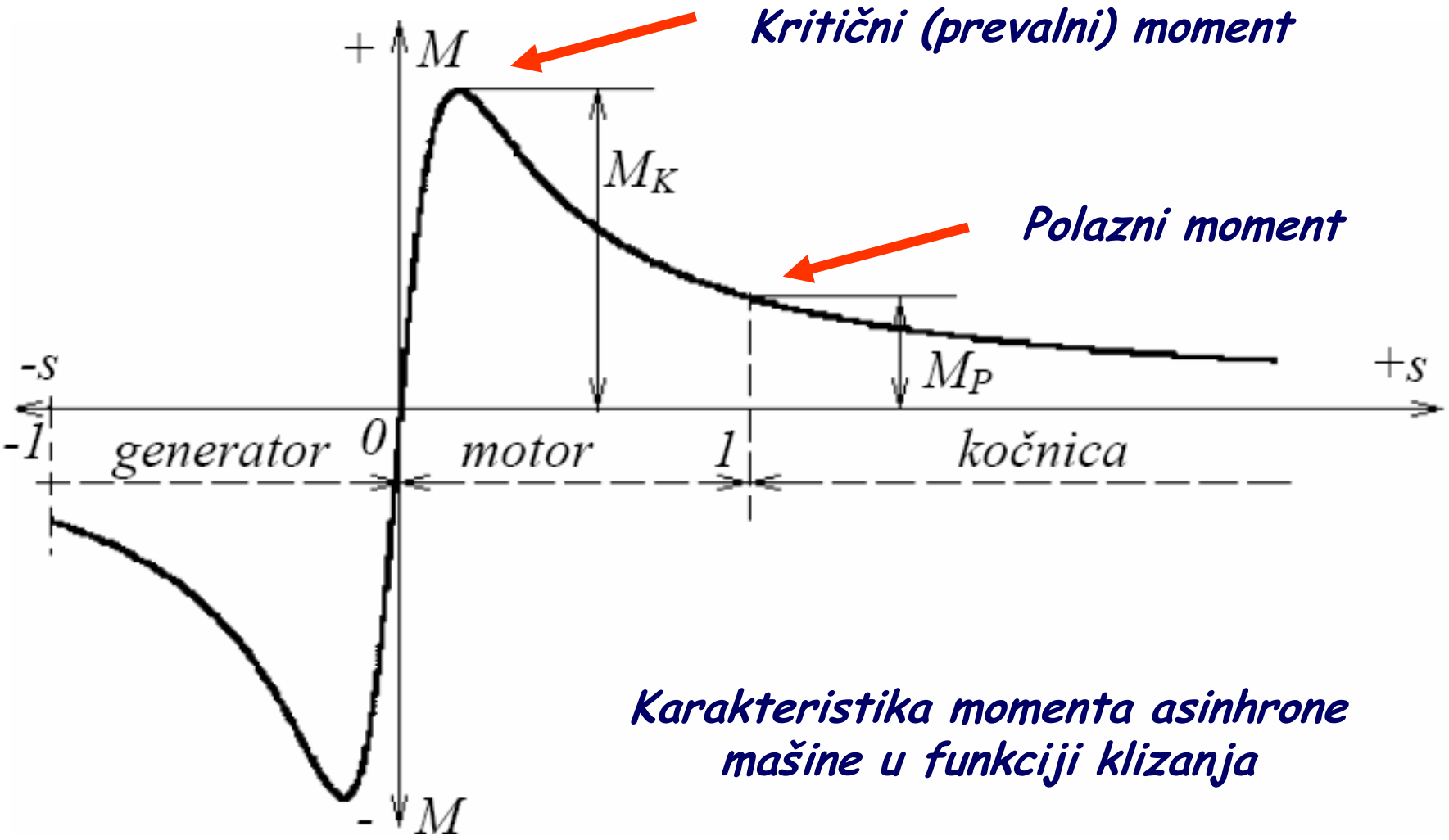
Moment trenja i ventilacije:

$$M_{trv} = 9{,}55 \frac{P_{trv}}{n_2}$$

Mehanički moment vratila:

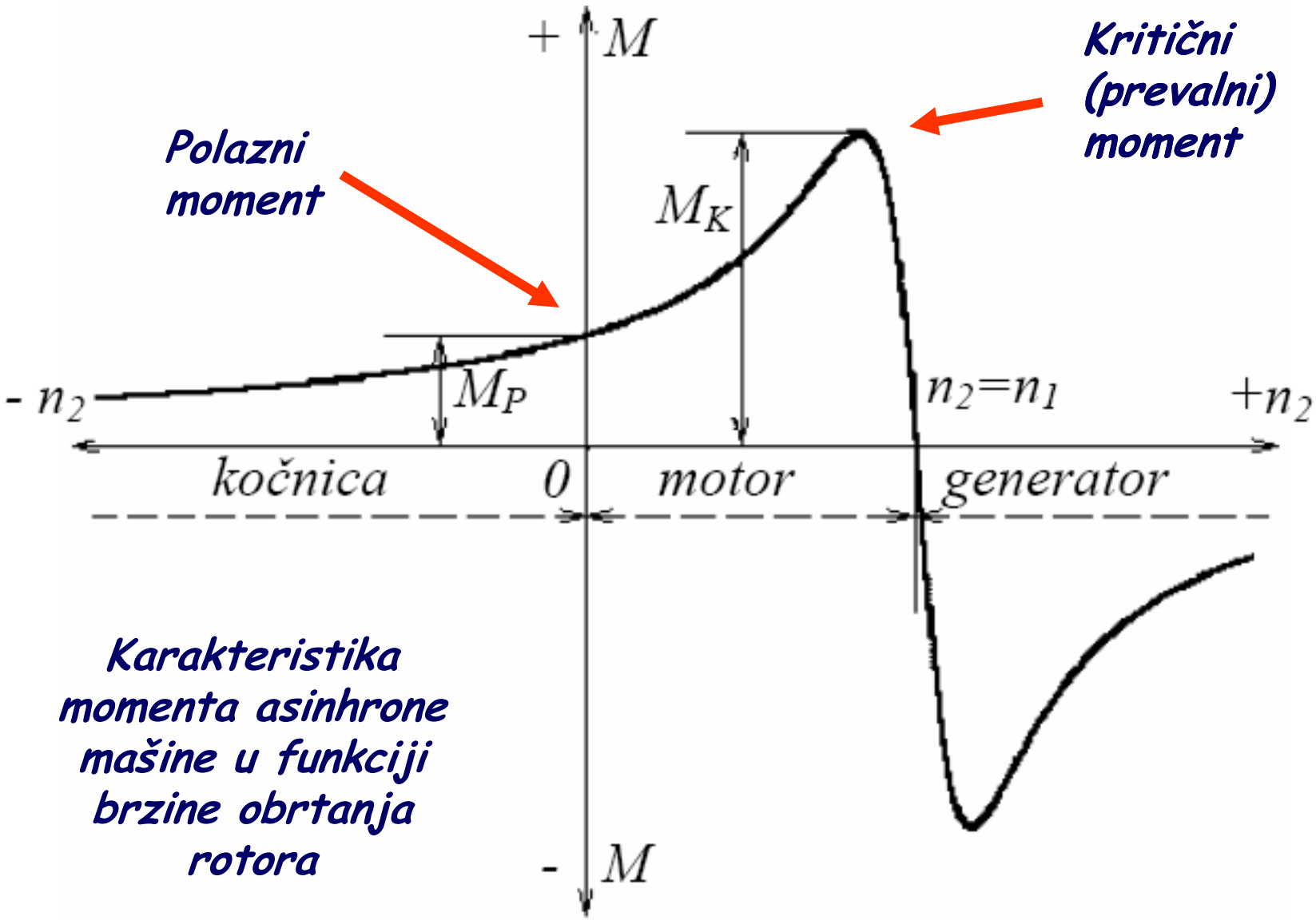
$$\boxed{M_m = M - M_{trv}}$$

KARAKTERISTIKA MOMENTA ASINHRONE MAŠINE



Karakteristika momenta asinhrone mašine u funkciji klizanja

KARAKTERISTIKA MOMENTA ASINHRONE MAŠINE



Karakteristika momenta asinhrone mašine u funkciji brzine obrtanja rotora

KRITIČNI MOMENT

$$R_V = 0$$

$$M = \frac{9{,}55 m_1 U_1^2 \dfrac{R_2'}{s}}{n_1\left[\left(R_1 + \dfrac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2\right]} = \frac{9{,}55 m_1 U_1^2 R_2'}{n_1\left[\dfrac{(sR_1 + R_2')^2}{s} + s(X_1 + X_2')^2\right]} = \frac{u}{v}$$

$$\frac{dM}{ds} = \frac{u'v - v'u}{v^2} = 0 \quad \Longrightarrow \quad u'v - v'u = 0$$

$$u = 9{,}55 m U_1^2 R_2' \qquad u' = 0$$

$$v = n_1\left[\frac{(sR_1 + R_2')^2}{s} + s(X_1 + X_2')^2\right]$$

$$v' = n_1\left[\frac{2(sR_1 + R_2')R_1 s - (sR_1 + R_2')^2}{s^2} + (X_1 + X_2')^2\right]$$

KRITIČNI MOMENT

$$u \neq 0 \quad v' = 0$$

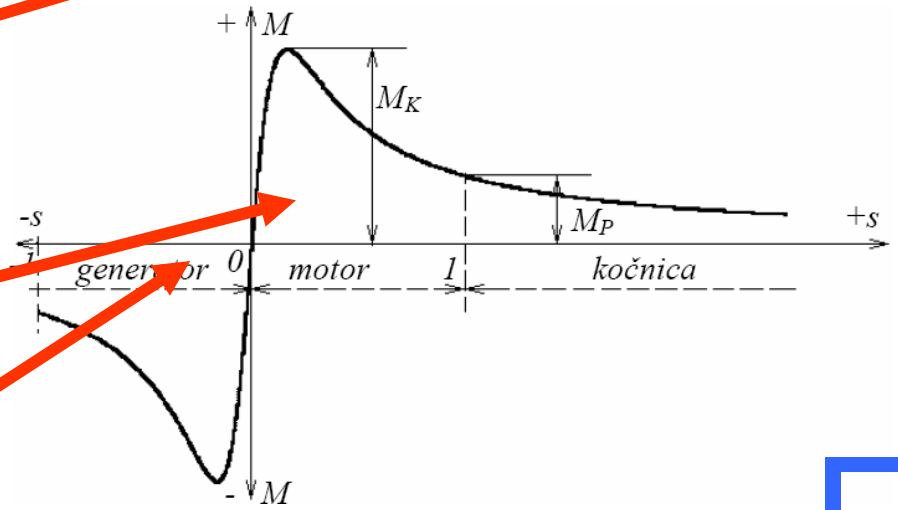
$$2(sR_1 + R_2')R_1 s - (sR_1 + R_2')^2 + s^2(X_1 + X_2')^2 = 0$$

$$2s^2R_1^2 + 2sR_1R_2' - s^2R_1^2 - 2sR_1R' - R_2'^2 + s^2(X_1 + X_2')^2 = 0$$

$$s^2\left[R_1^2 + (X_1 + X_2')^2\right] = R_2'^2$$

$$\boxed{s_K = \pm\frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}}$$

Kritično (prevalno) klizanje



+ motorni režim,
– generatorski režim.

KRITIČNI MOMENT

$$R_1 << (X_1 + X_2') \longrightarrow \boxed{s_K \approx \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}}$$

$$X_1 \approx 0 \longrightarrow s_K \approx \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{R_2}{X_2}$$

$$\downarrow$$

Ova pretpostavka nije realna!

U stvarnosti: $X_1 \approx X_2'$

KRITIČNI MOMENT

$$\frac{R_2'}{s_K} = \pm\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

$$M_K = \frac{9{,}55 m_1 U_1^2 \left[\pm\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right]}{n_1\left[\left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2\right]}$$

$$\boxed{M_K = \pm\frac{9{,}55 m_1 U_1^2}{2n_1\left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right]}}$$

+ motorni režim,
– generatorski režim.

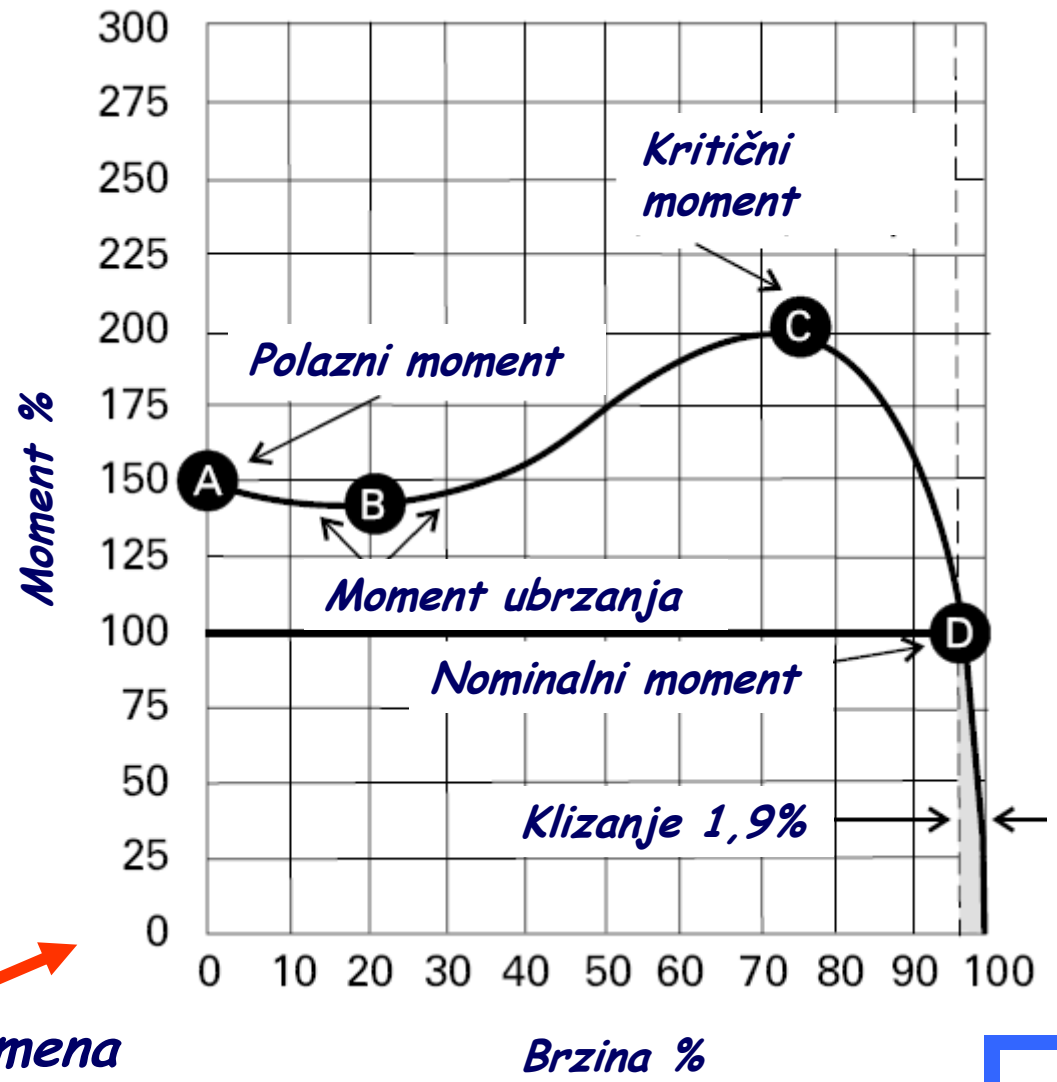
Kritični momenat ne zavisi od vrednosti otpora rotora R_2' ***.***

$$R_1 << (X_1 + X_2') \longrightarrow \boxed{M_K \approx \pm\frac{9{,}55 m_1 U_1^2}{2n_1(X_1 + X_2')}}$$

RELATIVNI MOMENTI

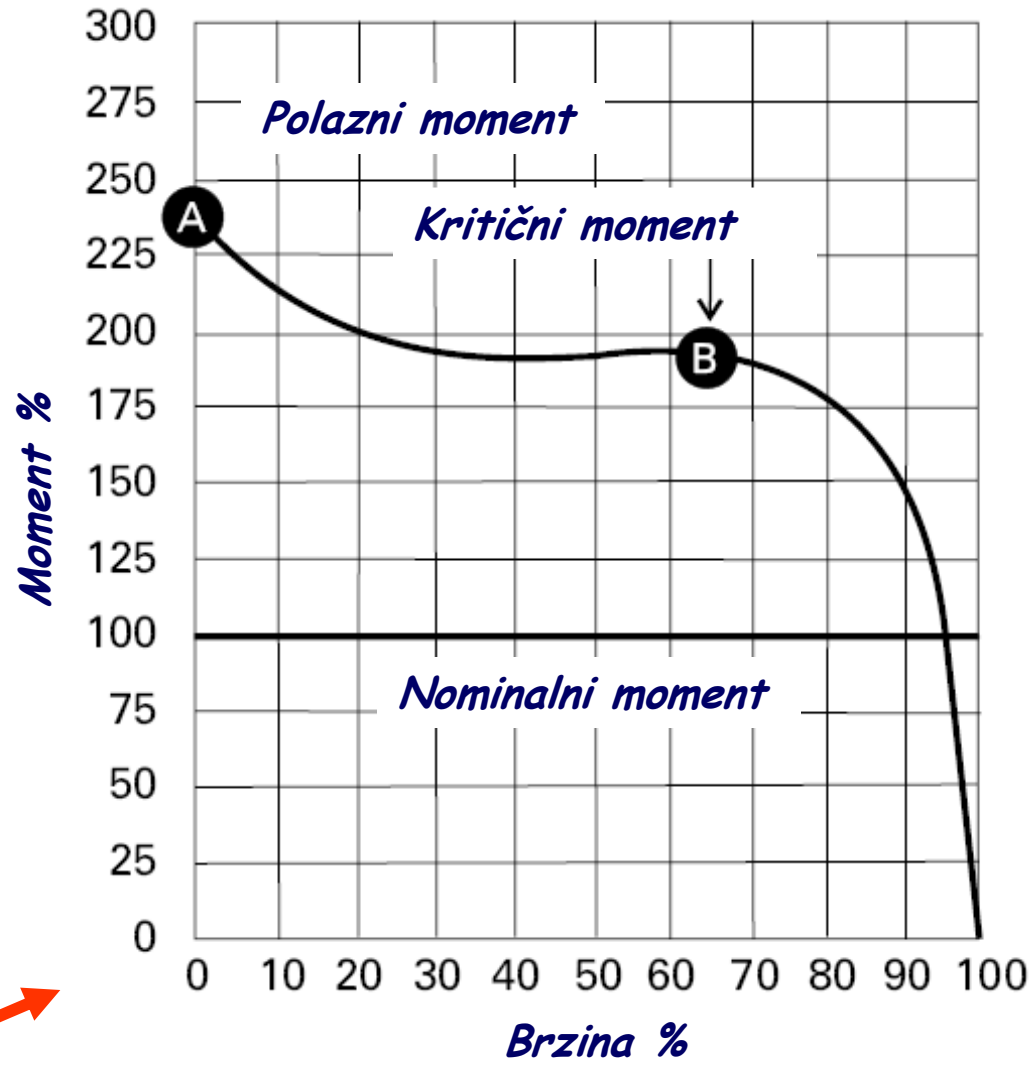
$$\frac{M_p}{M_n}$$ *Relativni polazni moment (0,7-2.5).*

$$\frac{M_K}{M_n}$$ *Relativni kritični moment (2-3).*



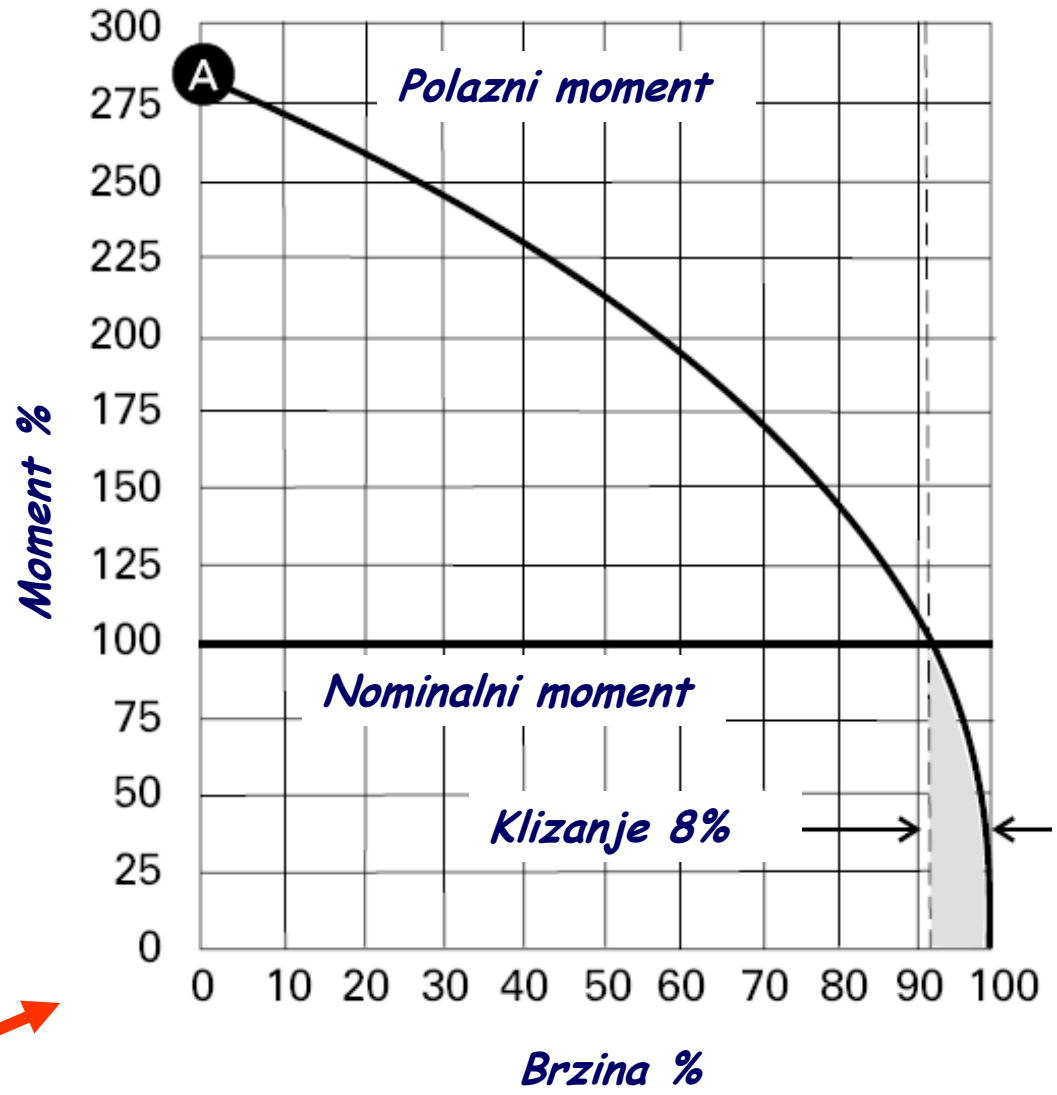
NEMA B – Generalna primena

RELATIVNI MOMENTI



NEMA C

RELATIVNI MOMENTI



KLOSOVA JEDNAČINA

$$\frac{M}{M_K} = \frac{\dfrac{9{,}55 m_1 U_1^2 \dfrac{R_2'}{s}}{n_1\left(\left(R_1 + \dfrac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2\right)}}{\dfrac{9{,}55 m_1 U_1^2}{2n_1\left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right]}} = \frac{2+\beta}{\dfrac{s}{s_K} + \dfrac{s_K}{s} + \beta}$$

$$\beta = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \approx 2s_K \qquad s_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Klosova jednačina vredi za kolutne AM i za one kavezne AM koji nemaju izražen efekat potiskivanja struje u rotoru.

UPROŠĆENA KLOSOVA JEDNAČINA

$$R_1 << (X_1 + X_2') \rightarrow \beta \approx 0 \rightarrow s_K = \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}$$

$$\boxed{\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}}$$

$$s = s_K \left(\frac{M_K}{M} - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M}\right)^2 - 1} \right)$$

$$s_K = s \left(\frac{M_K}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_K}{M}\right)^2 - 1} \right)$$

$$\nu = \frac{M_K}{M}$$ ***Preopteretljivost.***

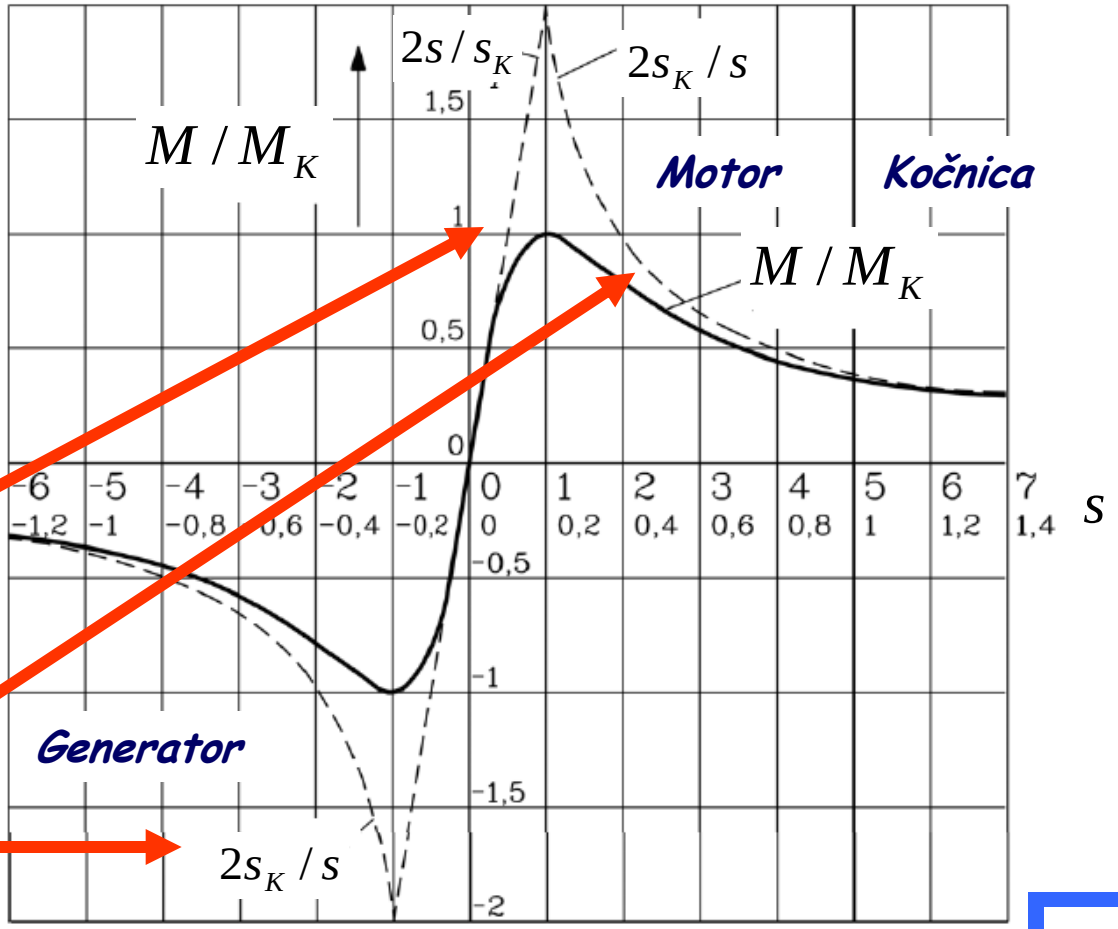
UPROŠĆENA KLOSOVA JEDNAČINA

Za dovoljno mala i dovoljno velika klizanja Klosova jednačina se može aproksimirati sa:

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

$$\left(\frac{M}{M_K}\right)_{s \to 0} = \frac{2s}{s_K}$$

$$\left(\frac{M}{M_K}\right)_{s >> s_K} = \frac{2s_K}{s}$$



UTICAJ SPOLJAŠNJE OTPORNOSTI

$$M_K = \pm \frac{9{,}55 m_1 U_1^2}{2n_1\left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right]}$$

Kritični momenat ne zavisi od vrednosti otpora rotora.

$$R_2' \rightarrow R_2' + R_V'$$

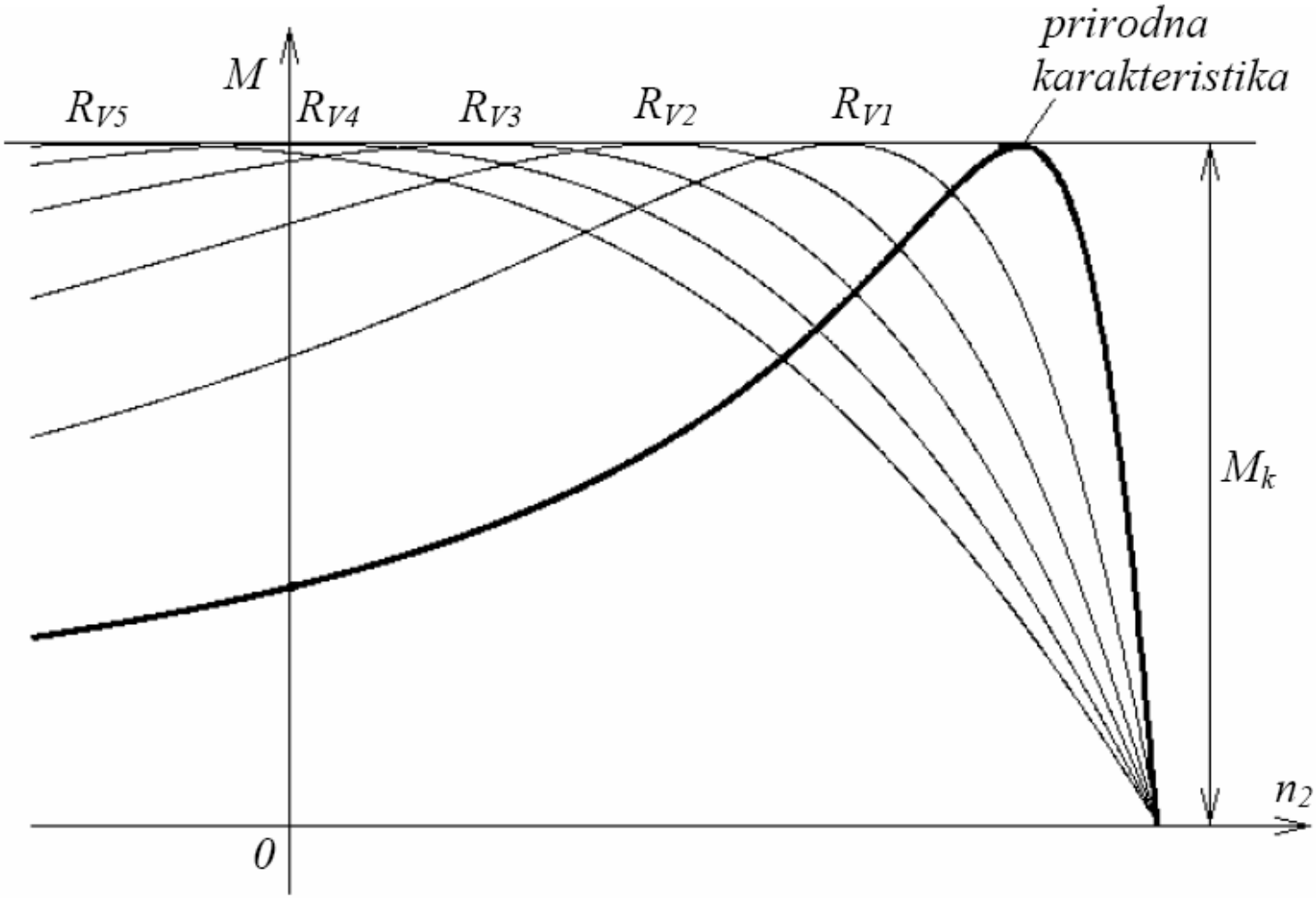
$$s_K = \frac{R_2' + R_V'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Spoljašnja otpornost rotora povećava kritično klizanje, ali ne utiče na vrednost kritičnog momenta.

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_V'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Spoljašna otpornost u rotorskom kolu smanjuje sekundarnu struju.

UTICAJ SPOLJAŠNJE OTPORNOSTI

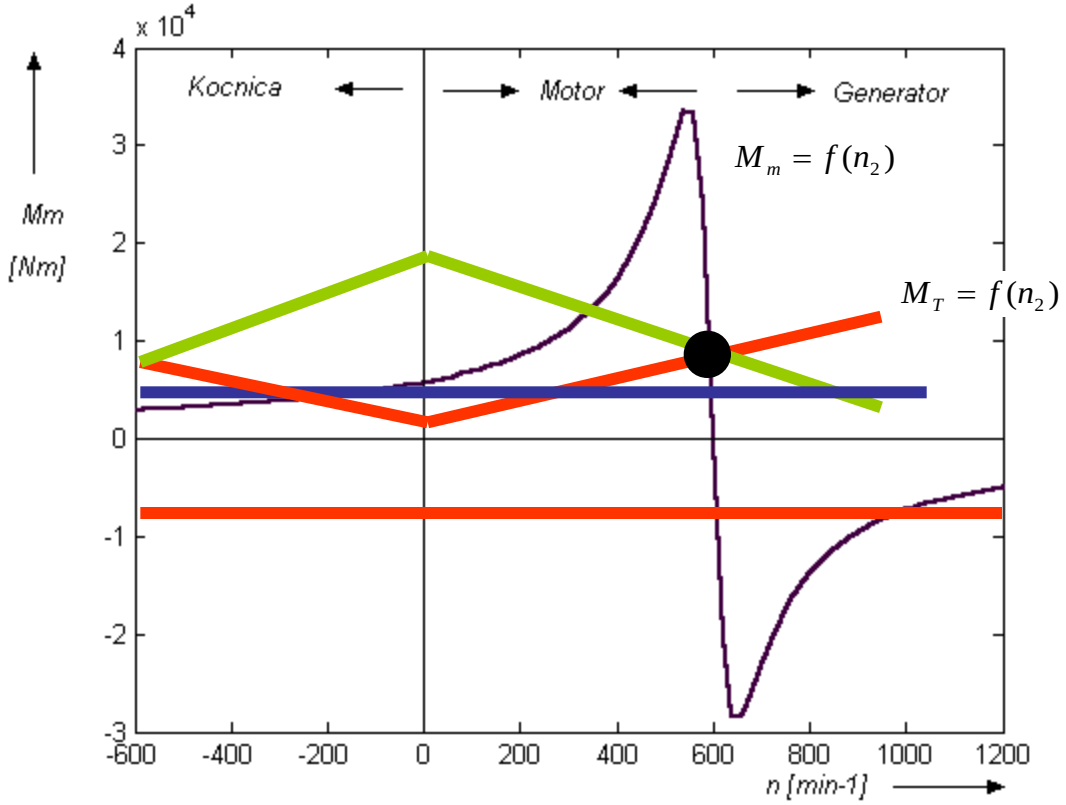


Uticaj spoljašnje otpornosti rotora na karakteristiku momenta kliznokolutne mašine

STATIČKA RADNA TAČKA, STABILNOST

$M_m = f(n_2)$ *Karakteristika momenta motora.*

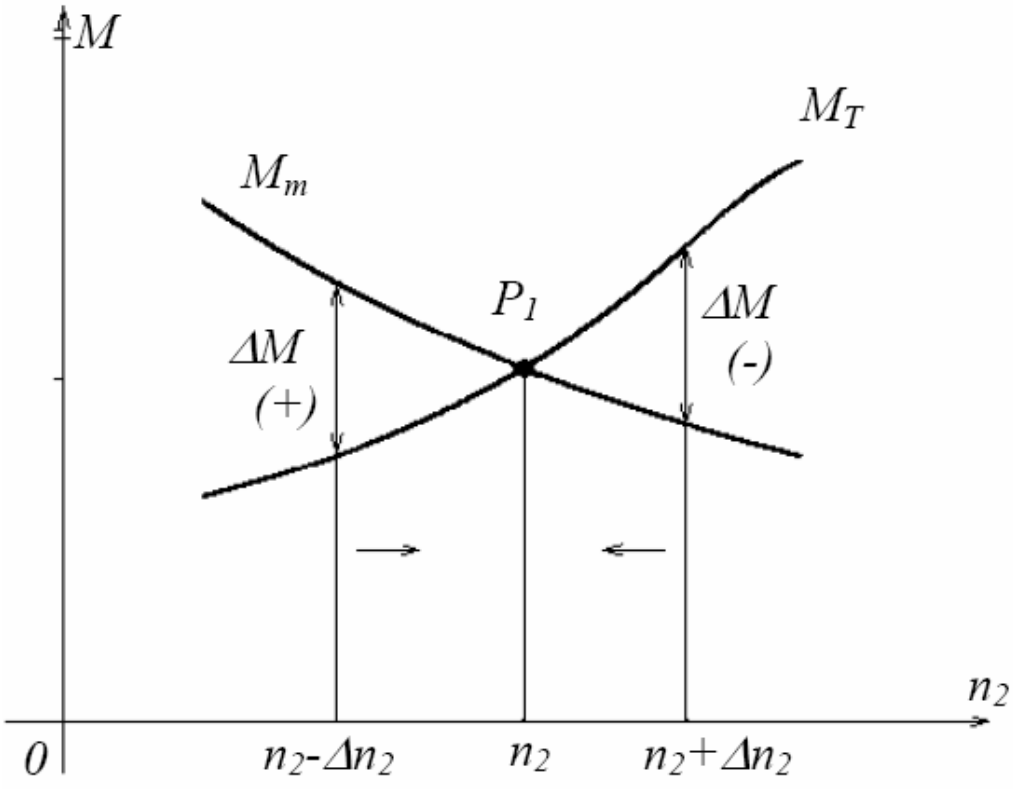
$M_T = f(n_2)$ *Karakteristika momenta radne mašine.*



Presečna tačka karakteristika je statička radna tačka.

STATIČKA RADNA TAČKA, STABILNOST

Stabilna statička radna tačka:



$$\Delta M = M_m - M_T$$

Radna tačka je stabilna, ako moment ΔM nakon prestanka poremećaja brzine Δn vraća rotor motora nazad u radnu tačku

$$\boxed{\frac{\Delta M}{\Delta n} < 0 \rightarrow \frac{dM}{dn} < 0}$$

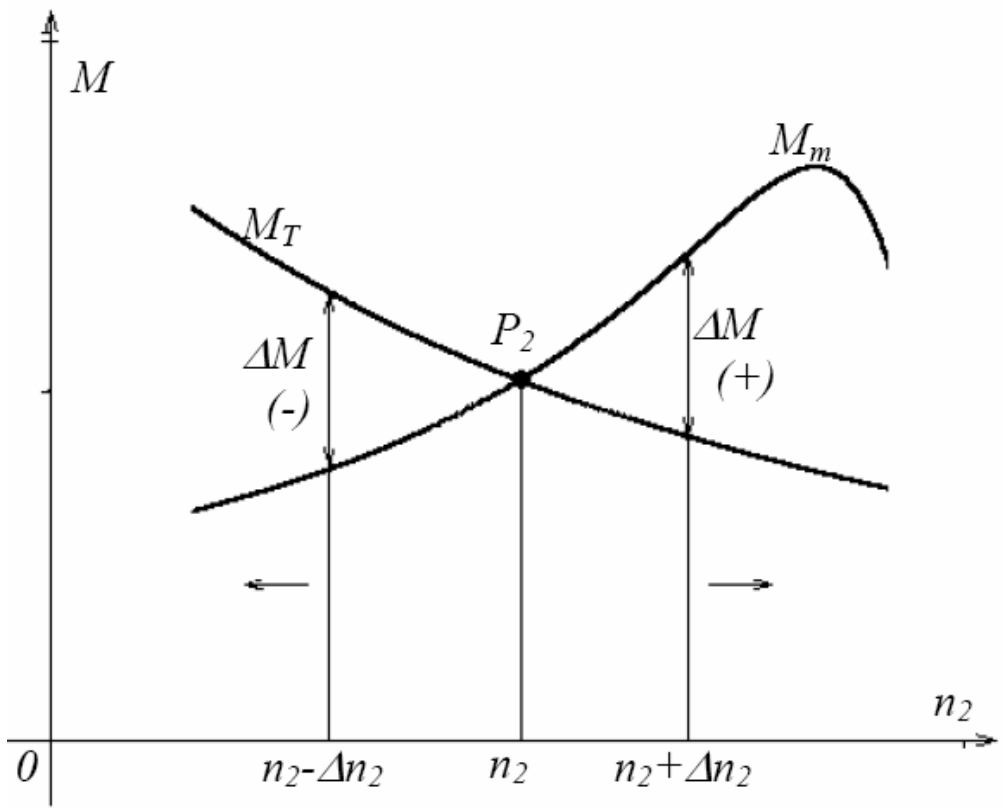
$\Delta n > 0 \wedge \Delta M < 0$ ***Razlika momenta ima kočioni karakter.***

$\Delta n < 0 \wedge \Delta M > 0$ ***Razlika momenta ima ubrzavajući karakter.***

STATIČKA RADNA TAČKA, STABILNOST

Labilna statička radna tačka:

$$\Delta M = M_m - M_T$$



Radna tačka je labilna, ako moment ΔM nakon prestanka poremećaja brzine Δn udaljuje rotor motora od radne tačke

$$\cancel{\frac{\Delta M}{\Delta n} < 0 \rightarrow \frac{dM}{dn} < 0}$$

$$\Delta n > 0 \wedge \Delta M > 0$$

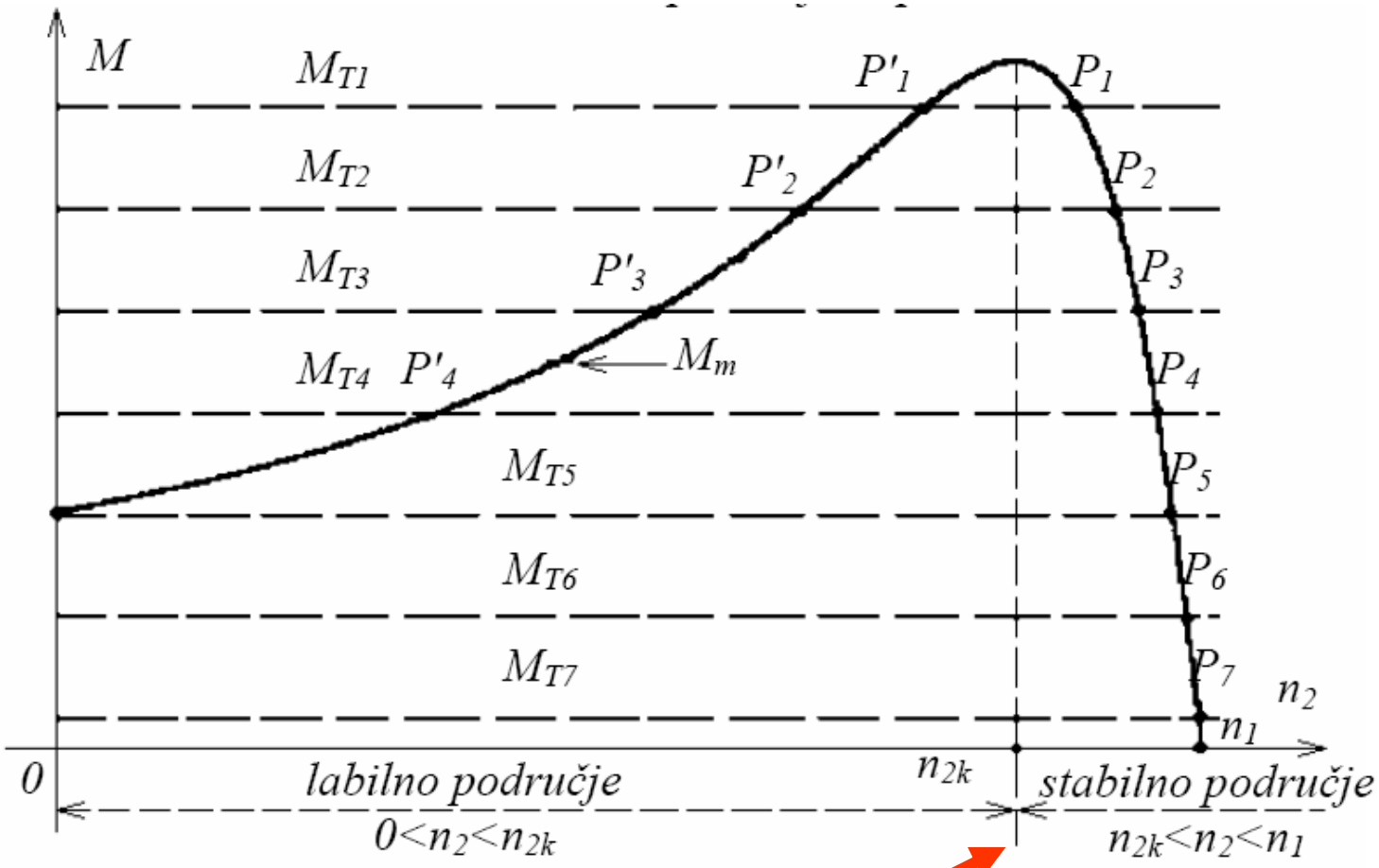
$$\Delta n < 0 \wedge \Delta M < 0$$

Razlika momenta ima ima isti karakter kao i promena brzine.

STATIČKA RADNA TAČKA, STABILNOST

Konstantan moment tereta:

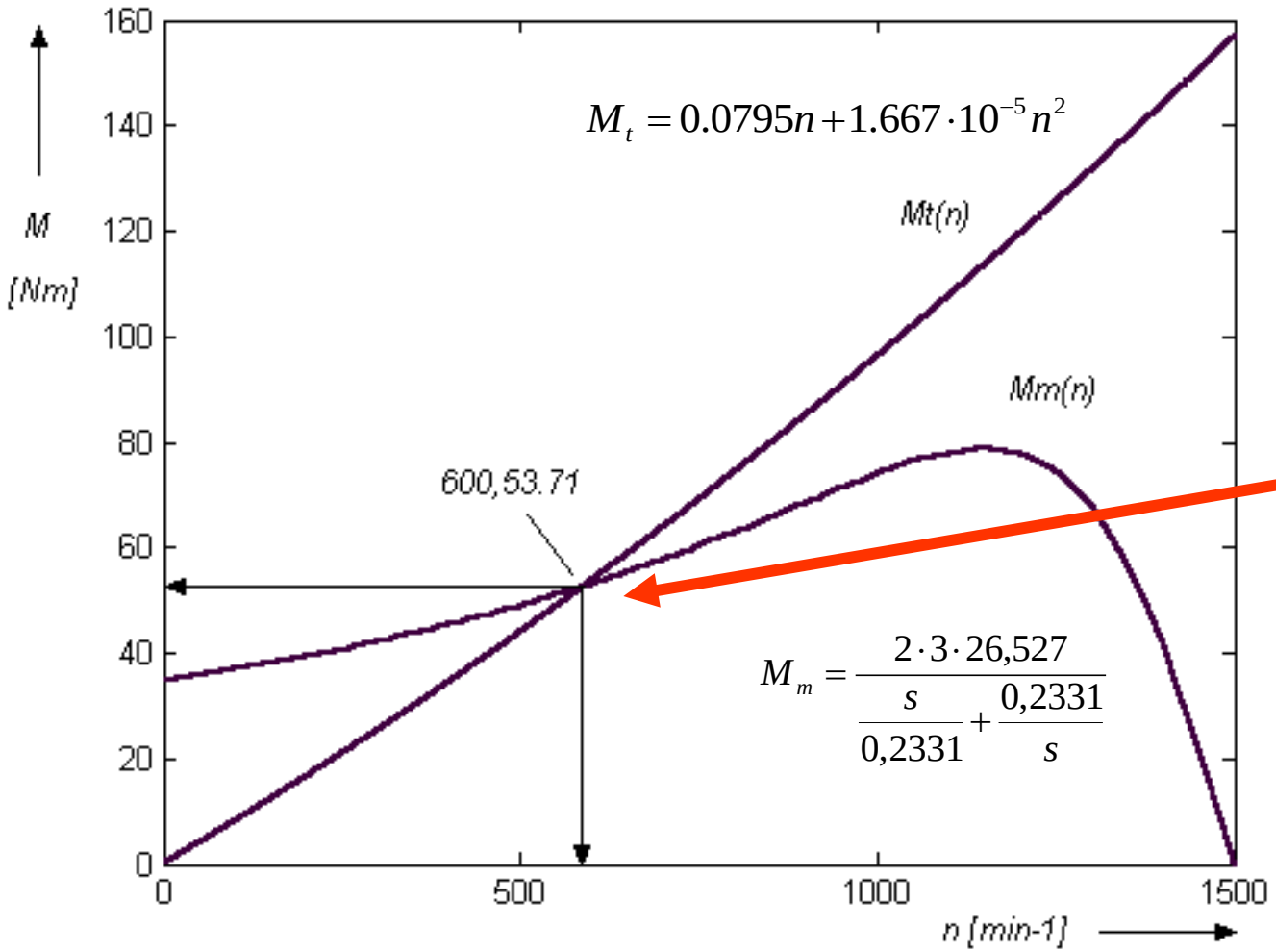
$$\Delta M = M_m - M_T$$



Kritična brzine obrtanja.

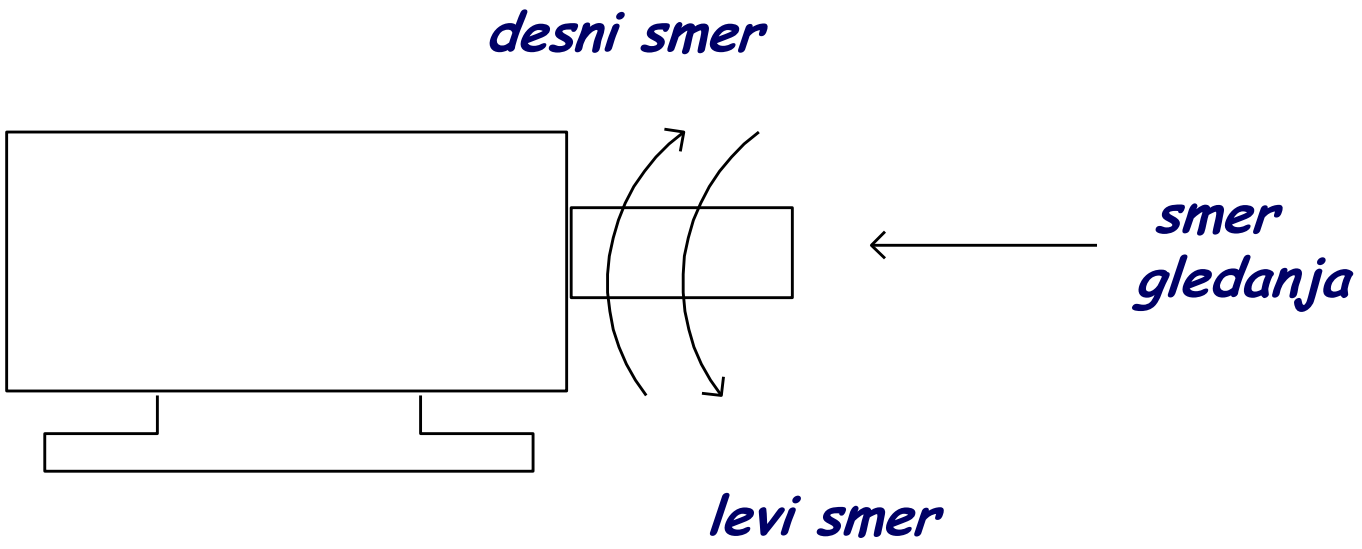
STATIČKA RADNA TAČKA, STABILNOST

Nelinearan moment tereta:



Kako je klizanje motora veće od kritičnog, motor radi sa lošim stepenom iskorišćenja.

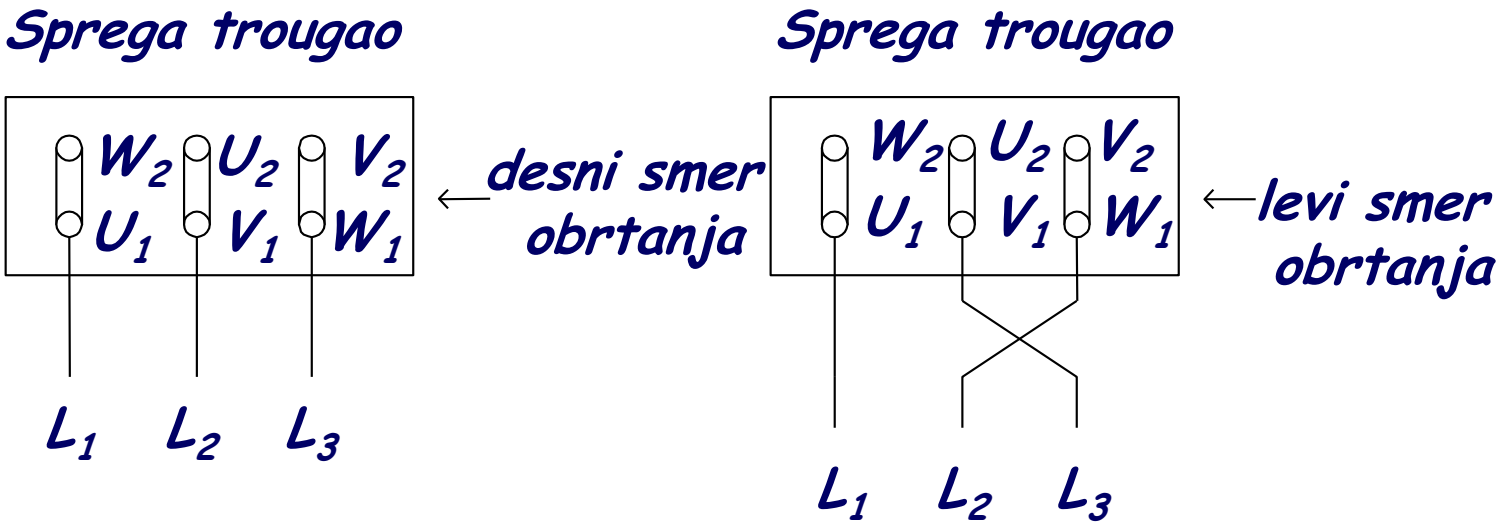
SMERA OBRTANJA



Način određivanja smera obrtanja kod asinhronih motora.

- *Smer gledanja : sa strane slobodnog kraja vratila.*
- *Desni smer obrtanja : smer kretanja kazaljke na satu.*
- *Levi smer obrtanja : suprotan smer u odnosu na smer kretanja kazaljke na satu.*

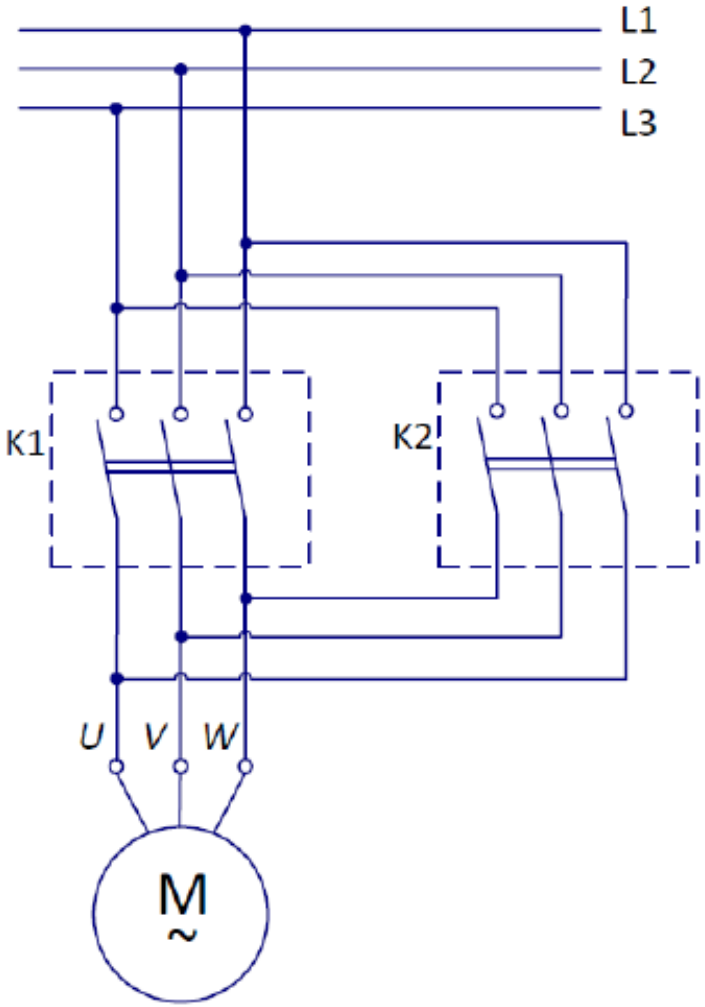
PRIKLJUČNE PLOČE



Položaj veznice i način priključenja dovoda mreže za desni i levi smer obrtanja.

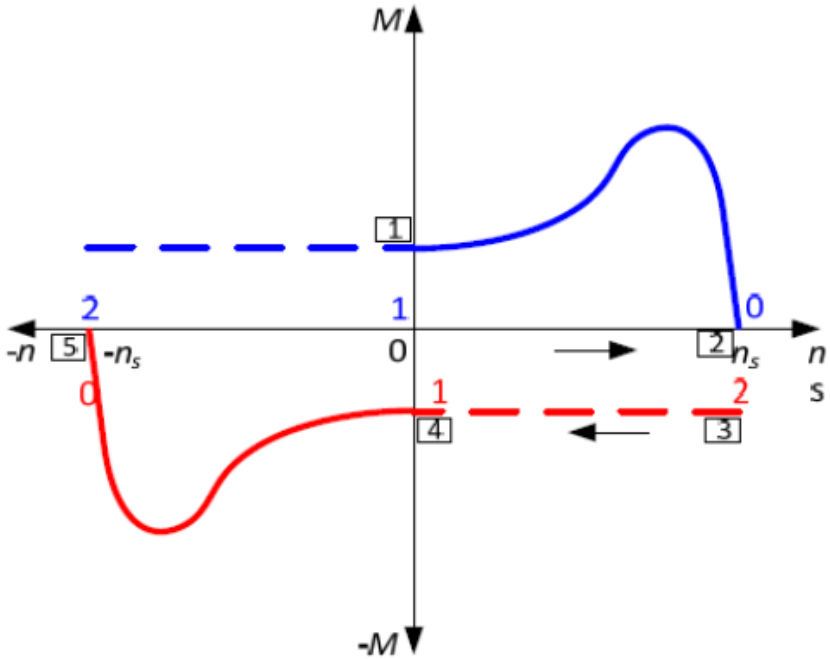
Primedba: Kod sprega namotaja u zvezdu veznicama treba kratko spojiti izvode U_2-V_2-W_2. Dovod priključnih kablova pri željenom smeru obrtanja kod sprege zvezda ostaje na istom mestu kao kod sprege u trougao.

PROMENA SMERA OBRTANJA



Rotor prati smer obrtnog polja. Smer obrtnog polja određen je redosledom faza. Ako je potrebno promeniti smer obrtanja dovoljno je međusobno zameniti priključke 2 od 3 fazna namota trofaznog motora. Reverziranje – promena smera obrtanja se može realizovati upotrebom kontaktora.

PROMENA SMERA OBRTANJA



Momentna karakteristika u procesu reverziranja.

1 – Motor kreće iz mirovanja (s=1)
2 –Motor se zaleće do približno sinhrone brzine obrtanja (s<<)
3 – Uz beznaponsku pauzu vrši se zamena redosleda faza, motor prelazi u protivstrujno kočenje (s=2)
4 Motor do 0 (– koči brzine s=1)
5 – Motor se zaleće do približno sinhrone brzine obrtanja u suprotnom smeru (s<<)

PROMENA BRZINE ASINHRONIH MOTORA

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$$

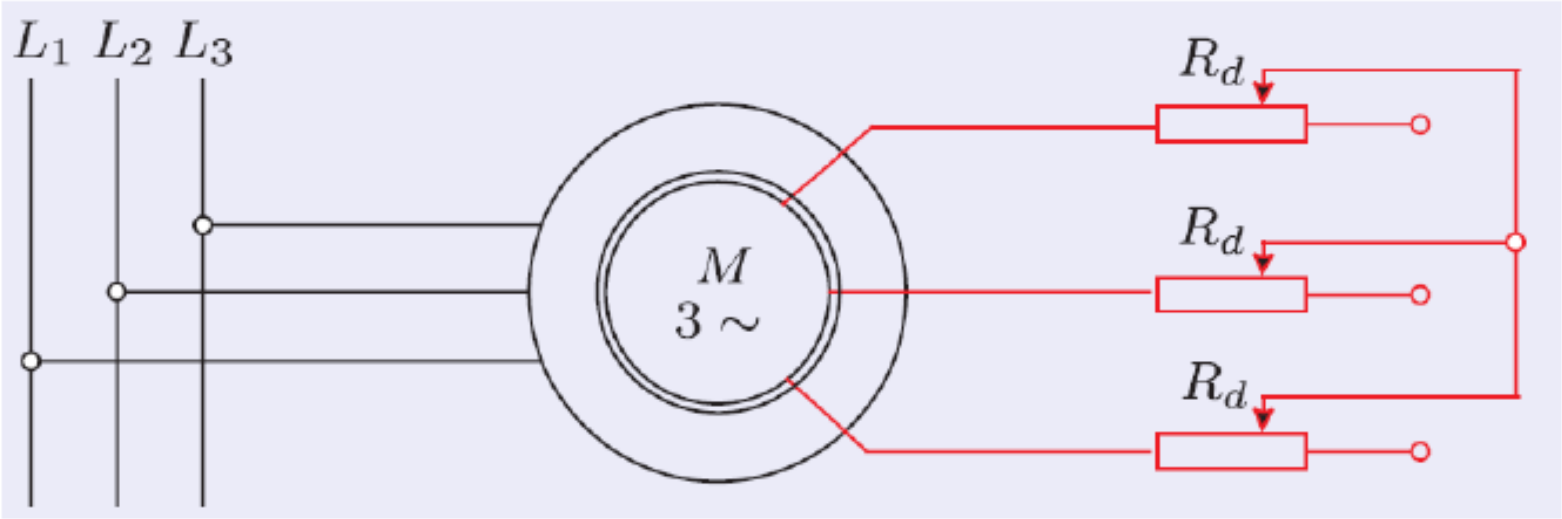
Brzina obrtanja se može menjati:

a) Sa klizanjem s, koje možemo izvoditi promenom spoljašnog otpornika rotora ili promenom napona motora, ili sa različitim kaskadnim povezanjem (preko rotora).

b) Sa promenom pari polova p, izmenom veze navoja statora.

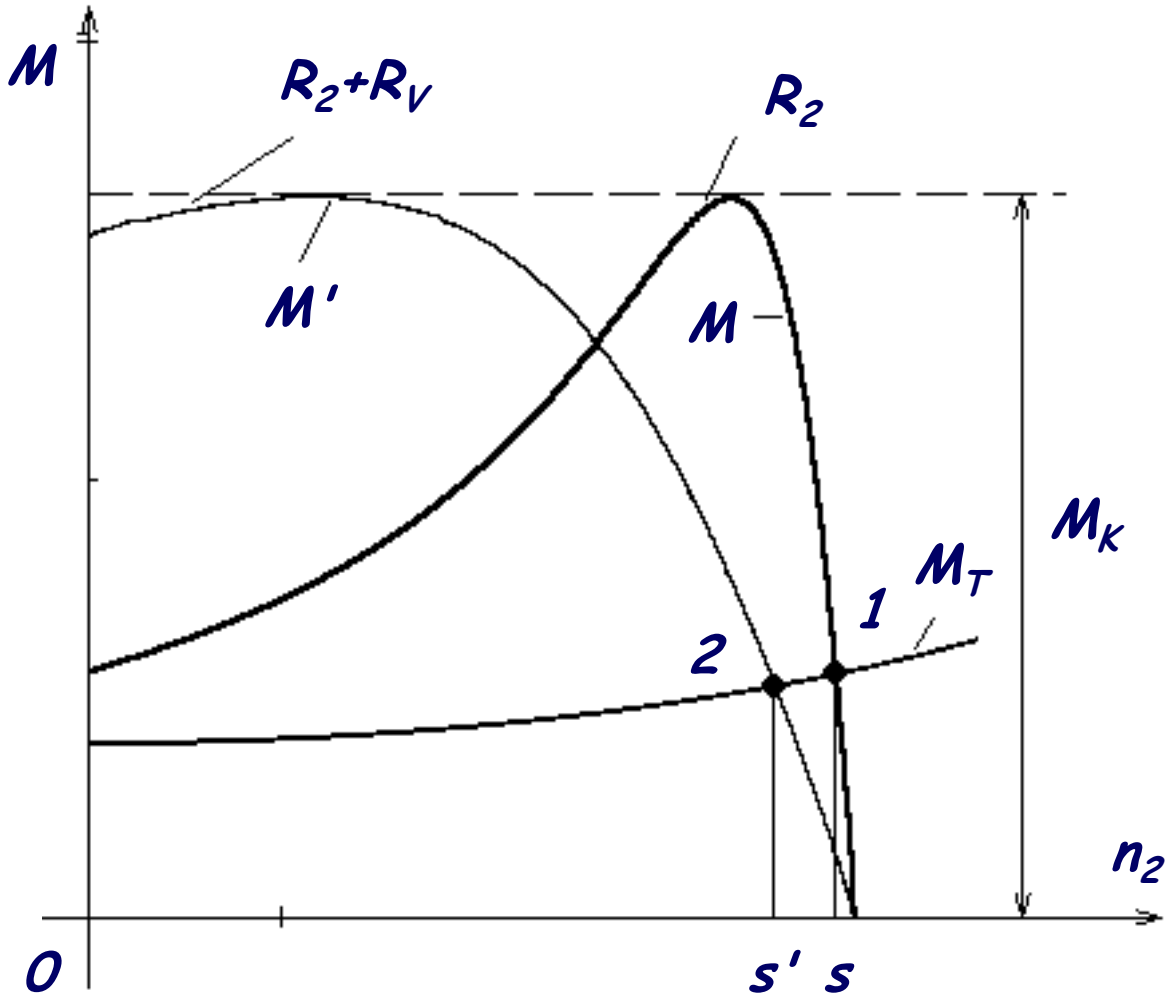
c) Sa promenom frekvencije f_1 i napona napajanja u_1 isto vremeno.

PROMENA OTPORA U ROTORU



Uključenjem otpornika u kolo rotora smanjuje se struja a samim tim i obrtni momenat i motor se usporava, povećava se klizanje.
Zbog povećanja klizanja raste indukovani napon koji povećava struju. Klizanje se povećava sve dok se pri nekoj sniženoj brzini ne izjednači momenat koji motor razvija sa momentom opterećenja – momenat radne mašine.

PROMENA OTPORA U ROTORU

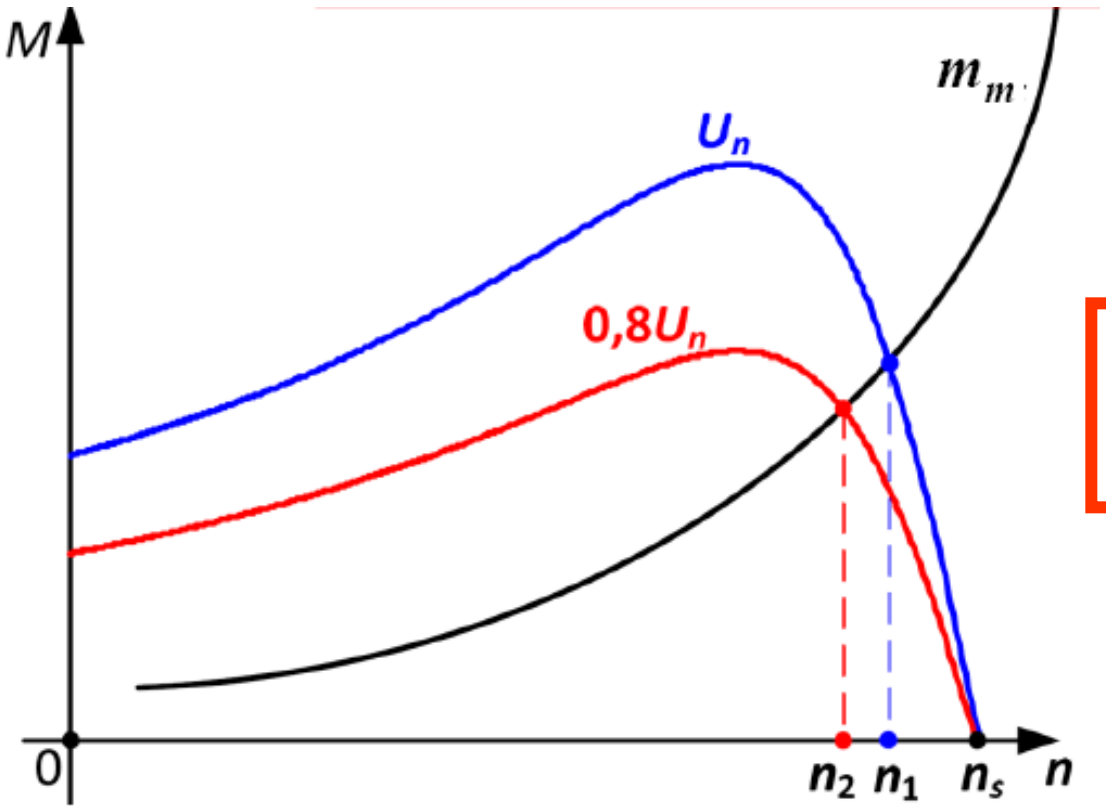


Uticaj spoljašnje otpornosti na karakteristiku momenta motora

Primena: kod kliznokolutnih motora za smanjivanje brzine obrtanja. Uključivanjem otpornika u rotorskom kolu povećava se kritično klizanje uz nepromenjeni kritični moment.

Mana: smanjivanje brzine obrtanja je izvodljivo samo uz dodatni gubitak snage na vanjskom otporniku.

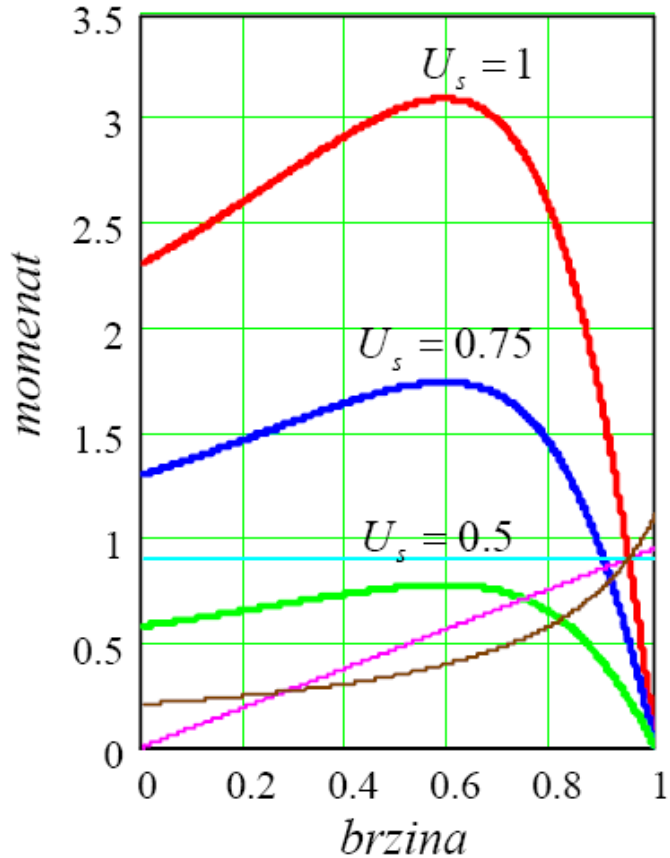
PROMENA NAPONA NAPAJANJA

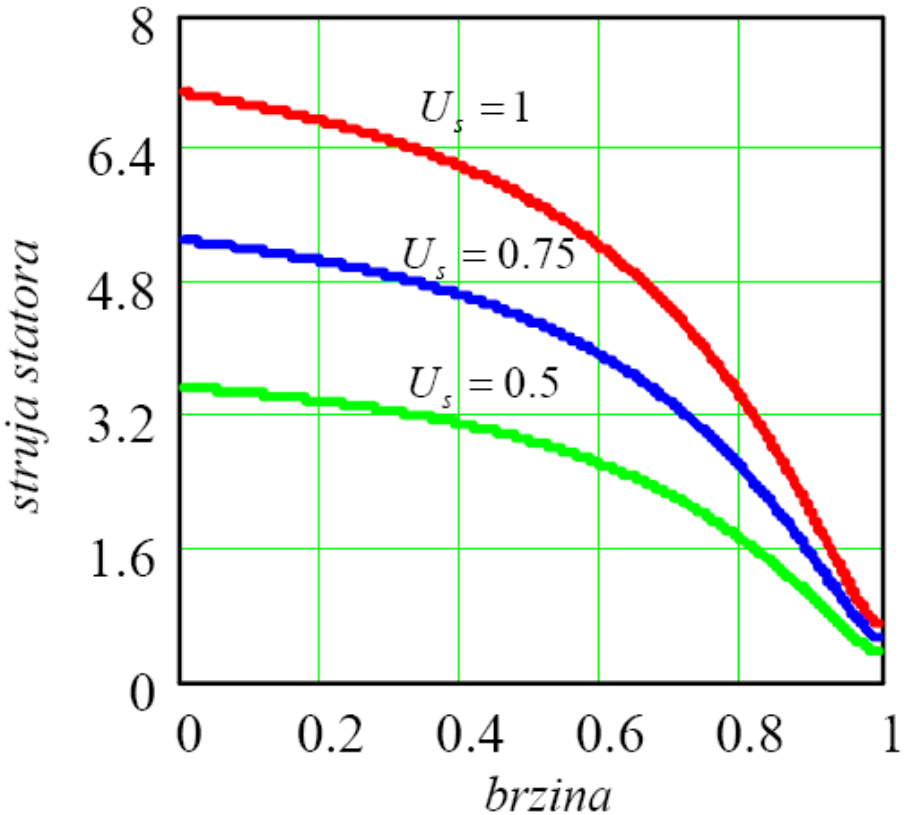


$$s' = s\left(\frac{U_1}{U_1'}\right)^2 \frac{M_T'}{M_T}$$

Promena brzine promenom napona napajanja, uz stalnu frekvenciju,momentna k-ka se menja prema $M=f(U^2)$. Svakom naponu odgovara druga k-ka. K-ka opterećenja je određena vrstom opterećenja. Radna tačka je u preseku karakteristike motora i opterećenja.

PROMENA NAPONA NAPAJANJA





Promenom napona, uz stalnu frekvenciju napajanja, postiže se promena brzine u uskom intervalu oko sinhrone brzine. Energetski gledano, promena brzine na ovaj način nije optimalna jer su gubici energije neizbežni.

PROMENA NAPONA NAPAJANJA

Mane su da preopteretivost opada: $\nu = \frac{M_K}{M}$

Povećavaju se gubici u bakru rotora i smanjuje koeficijent korisnog dejstva.

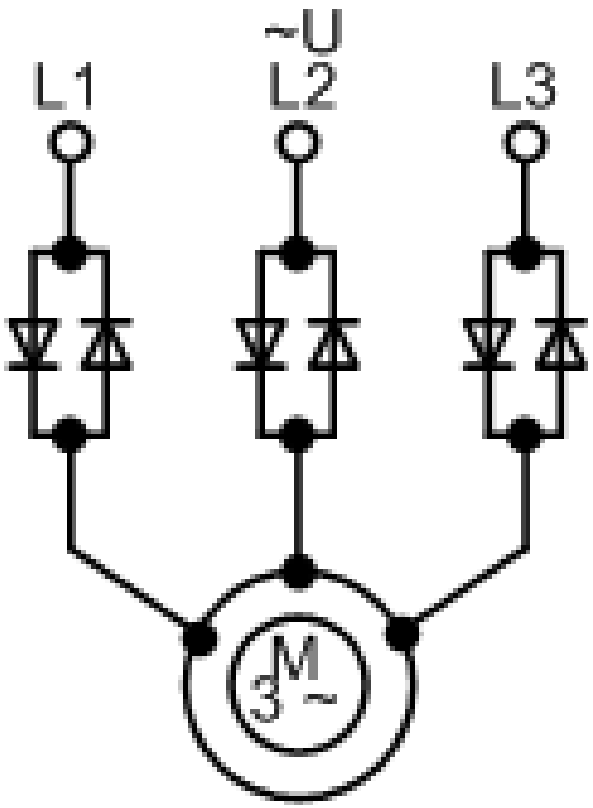
Pretpostavimo da je momenat opterećenja konstantan:

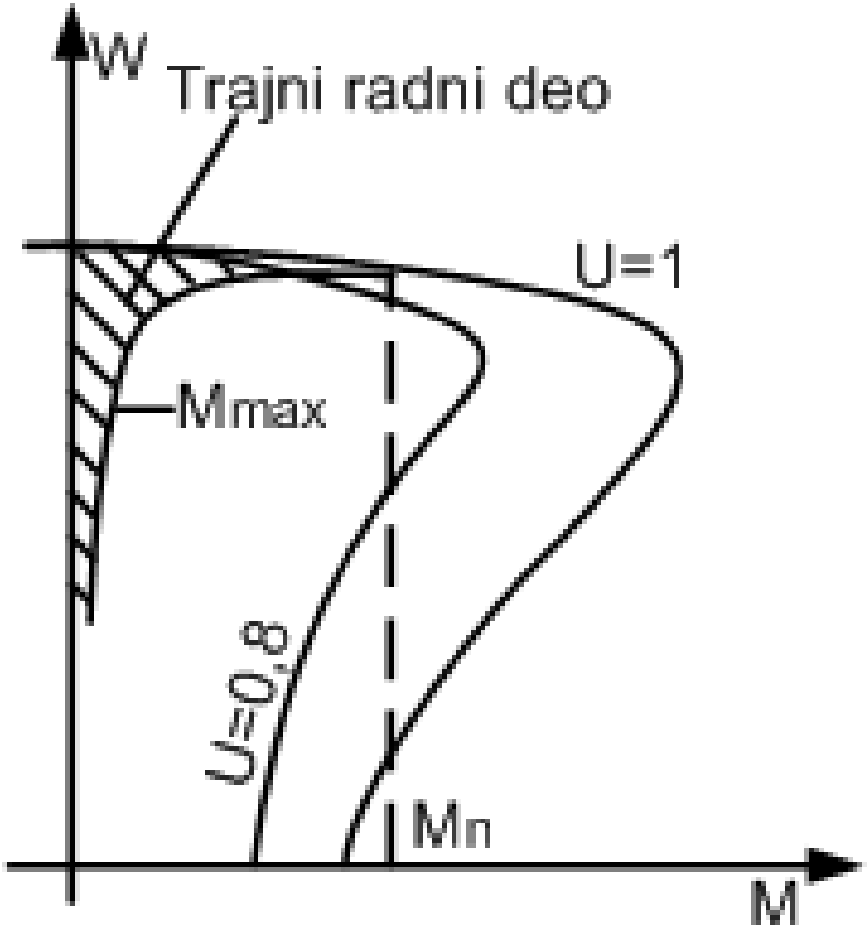
$$M_T = M_T' = konst$$

Smanjenjem napona opadaće brzina, a klizanje će da raste. Snaga konverzije će opadati, a gubici u bakru rotora će da rastu.

$$P_2 = P_\delta(1-s) = M_T\Omega_1(1-s) \qquad P_{CU2} = sP_2$$

PROMENA NAPONA NAPAJANJA





Pretvarači energetske elektronike omogućuju regulaciju napona u širokim granicama.

PROMENA PRIMARNE FREKVENCIJE

Brzina obrtanja direktno je proporcionalna frekvenciji:

$$\boxed{n = \frac{60 f}{p}(1 - s)}$$

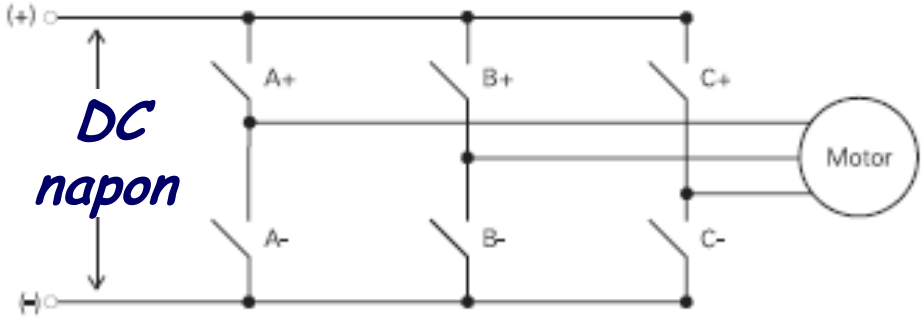
Ali, se u motoru sa promenom frekvencije menja i fluks - indukcija što utiče na promenu razvijenog momenta.

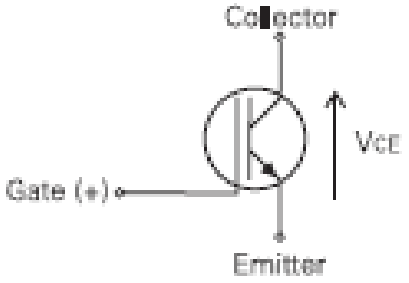
$$E_1' = \sqrt{2}\pi\, f_1' \Phi' N_1 \xi_{prim}$$

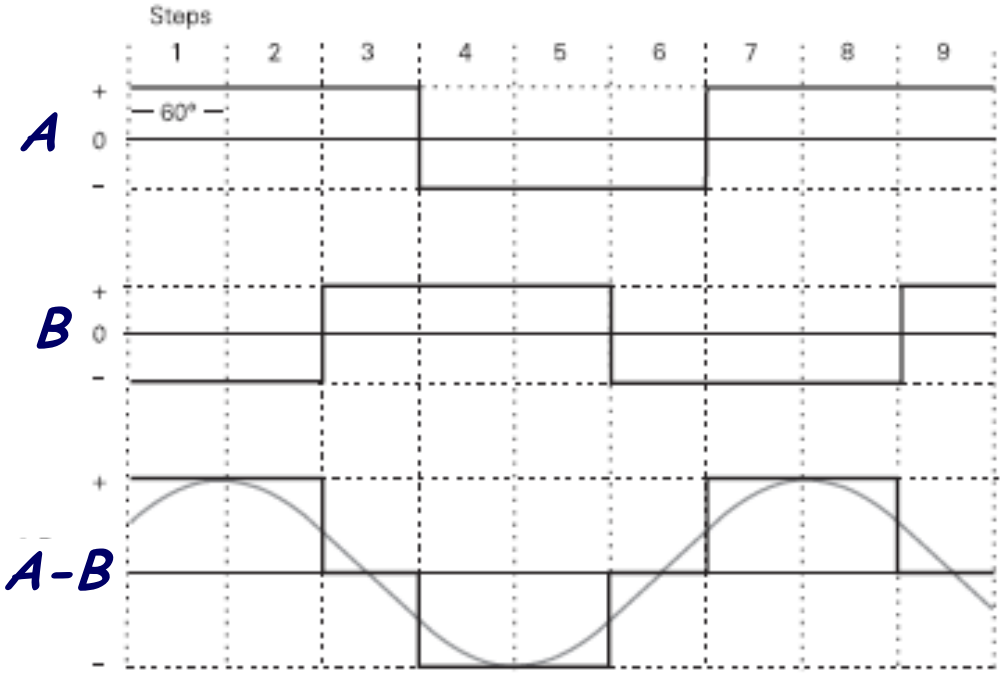
Ako promenimo frekvenciju uz stalan napon promeniće se fluks, odnosno indukcija. Povećanje indukcije nije dozvoljeno zbog zasićenja magnentnog kola, a smanjenje fluksa nije prihvatljivo jer je praćeno smanjenjem momenta koji motor razvija. Zbog toga se istovremeno menjaju napon i frekvencija tako da je njihov odnos stalan.

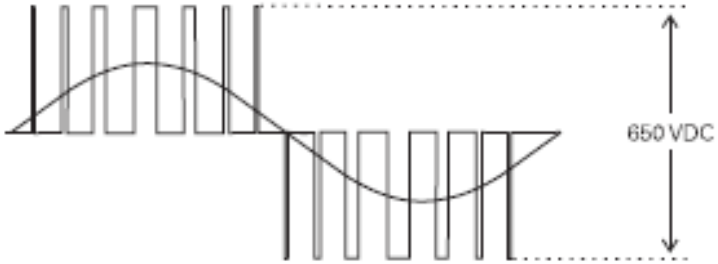
$$\frac{f_1'}{f_1} = \frac{E_1'}{E_1} \approx \frac{U_1'}{U_1} \qquad \Phi' = \Phi = konst \qquad \boxed{\frac{U_1'}{f_1'} = \frac{U_1}{f_1} = konst}$$

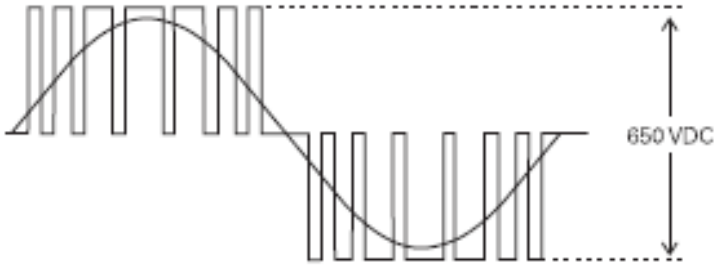
PROMENA PRIMARNE FREKVENCIJE



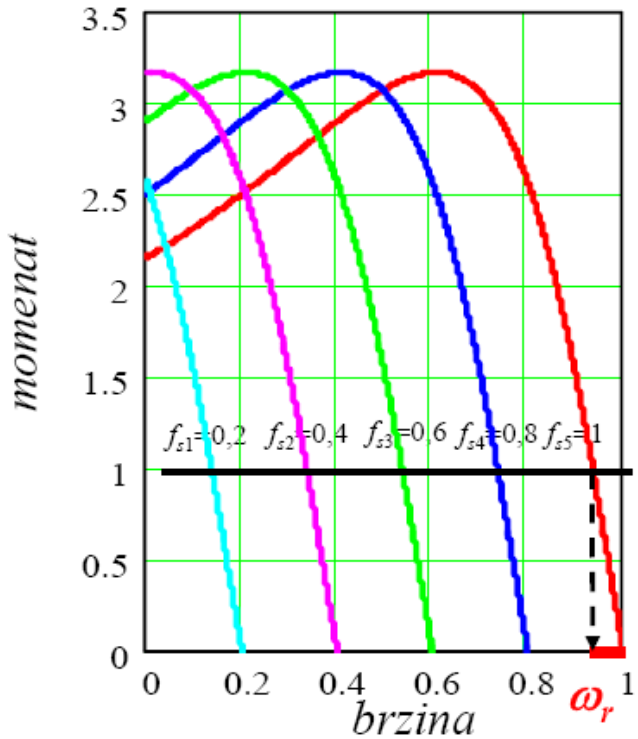


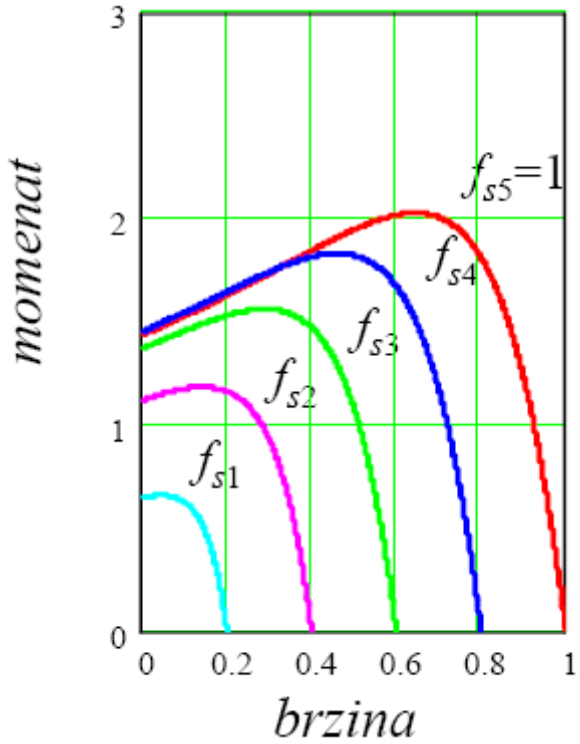






PROMENA PRIMARNE FREKVENCIJE



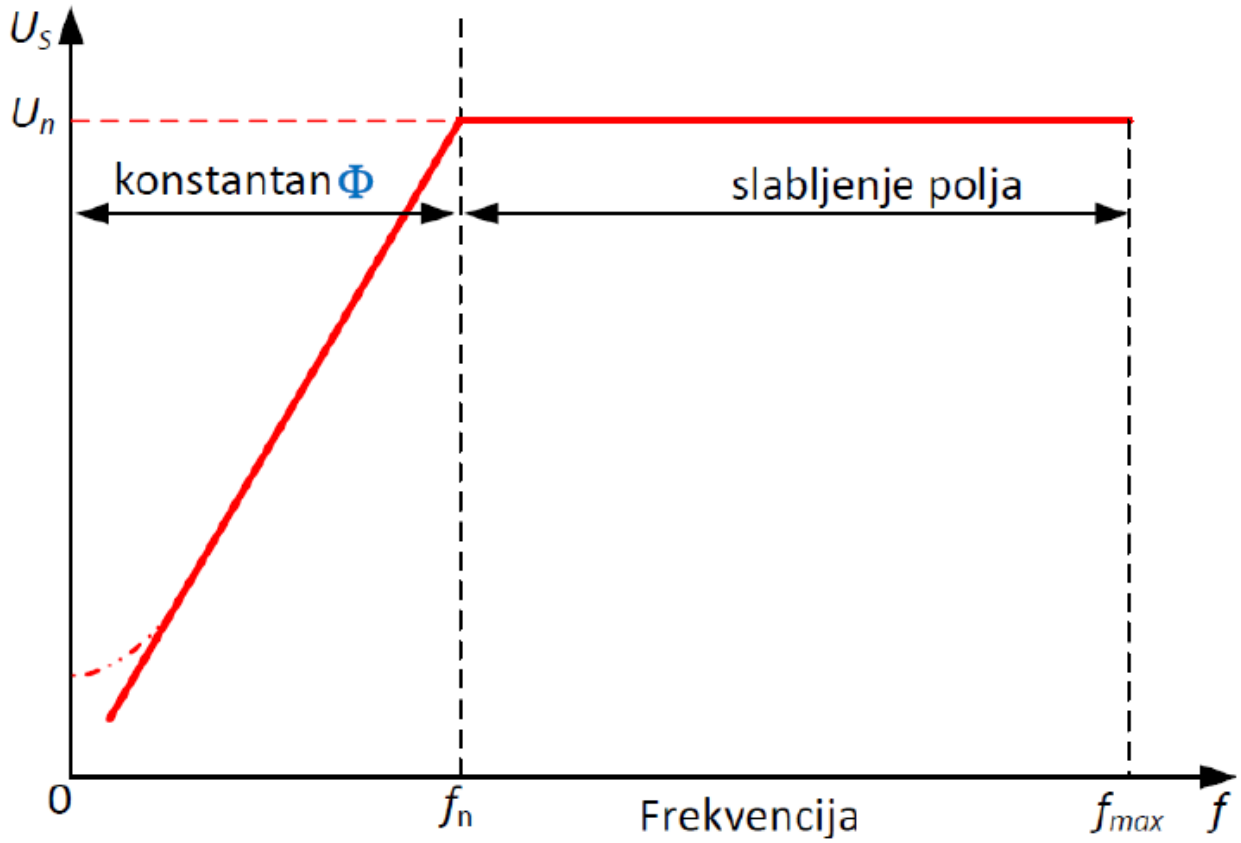


$$M_K \approx \pm \frac{9{,}55 m_1 U_1^2}{2n_1(X_1 + X_2')}$$

$$M_K = \pm \frac{9{,}55 m_1 U_1^2}{2n_1\left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}\right]}$$

Ako R_1 nije zanemarljvo prevalni momenat pada sa smanjenjem frekvencije

PROMENA PRIMARNE FREKVENCIJE

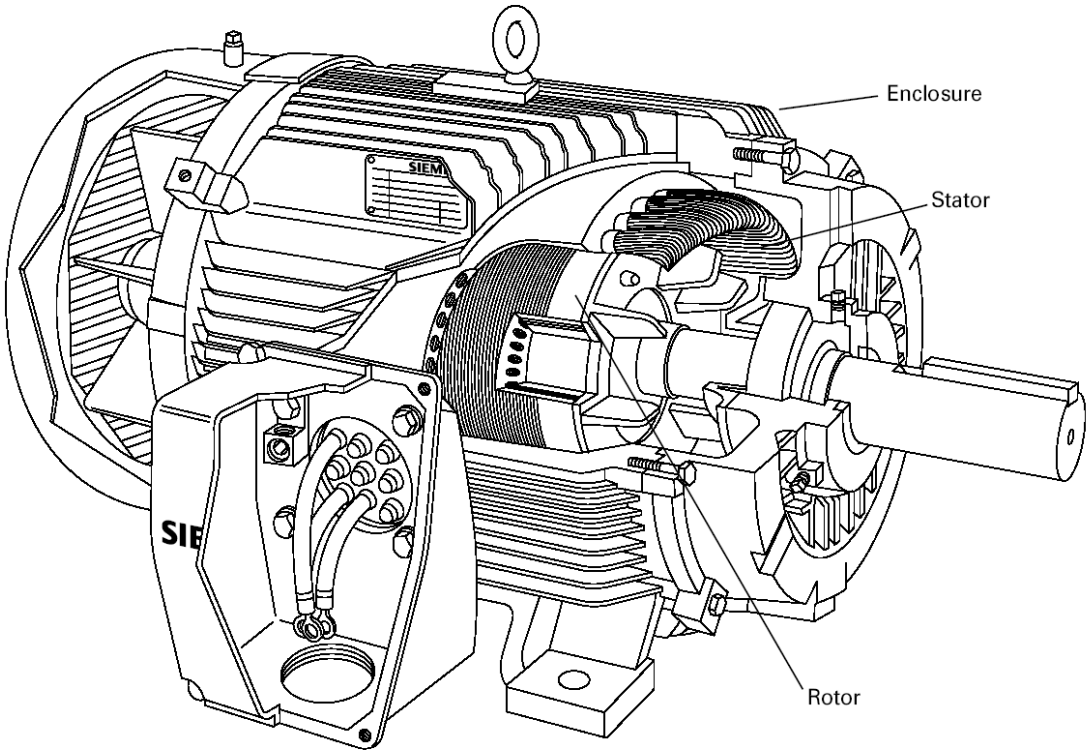


Promena napona i frekvencije pri U/f zakonu upravljanja. Promena frekvencije napajanja omogućuje napona podešavanje brzine u širokom opsegu do $2f_{1nom}$.

ASINHRONI MOTOR

Prednosti:

- Jednostavan.
- Robustan.
- Lak za održavanje.
- Niža cena u odnosu na jednosmerni.
- Kratkotrajno veliko preopterećenje.



Mane:

- Složen za upravljanje.

Razlog nemogućnost merenja rotorske struje i fluksa.

Regulacija brzine:

$$n = \frac{(1 - s) \times f \times 60}{p}$$

Posmatrajući gornji izraz može se zaključiti na koji je način moguće regulisati (menjati) brzinu obrtanja motora:

- ***Promenom broja pari polova p (polno preklopivi motori);***
- ***Promenom klizanja s:***
  - ***promenom statorskog napona;***
  - ***u kolu rotora:***
    - ***dodavanjem rotorskih otpornika;***
    - ***kaskadnim kuplovanjem;***
    - ***podsinhrona kaskada (primena uređaja energetske elektronike);***
- ***Promenom frekvencije f napona napajanja motora (frekventna regulacija).***

Frekventna regulacija

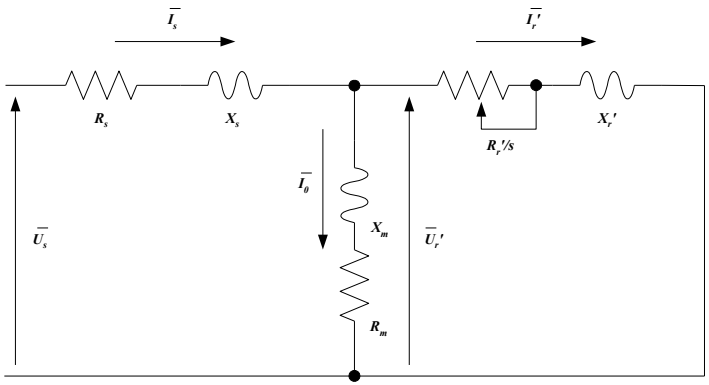
$$M_e = \frac{P}{\Omega} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P}{n} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{\mu U I \cos\varphi}{f \cdot \frac{60}{\pi}} \approx K \cdot \left(\frac{U}{f}\right) \cdot I$$

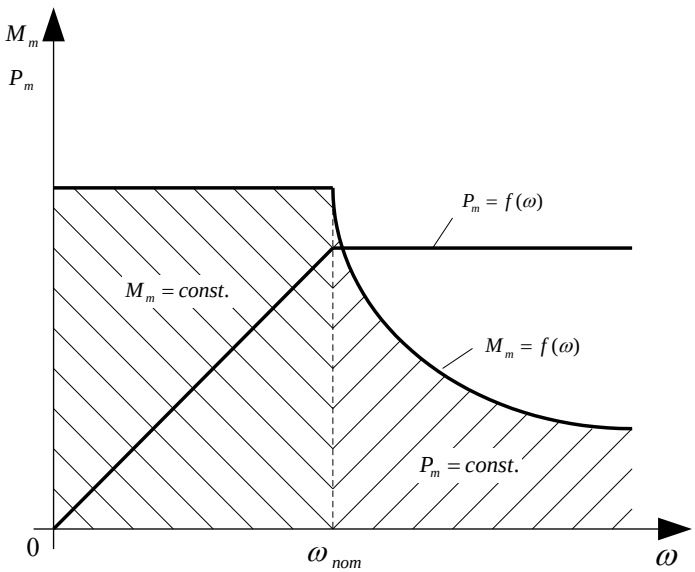
Da bi momenat motora bio konstantan, potrebno je Istovremeno menjati napon i frekvenciju.

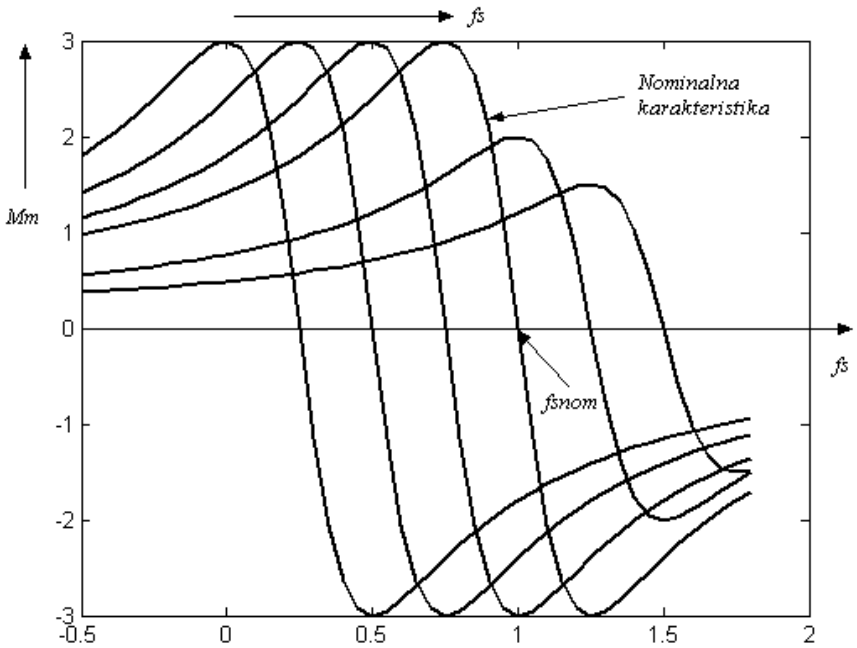
REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA

$$\omega_{sh} = \frac{2}{p}\omega \quad \left[\frac{rad}{s}\right]$$

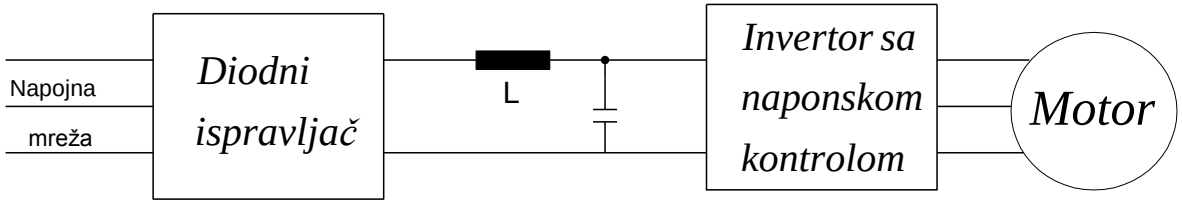
$$s = \frac{\omega_{sh} - \omega_m}{\omega_{sh}}$$



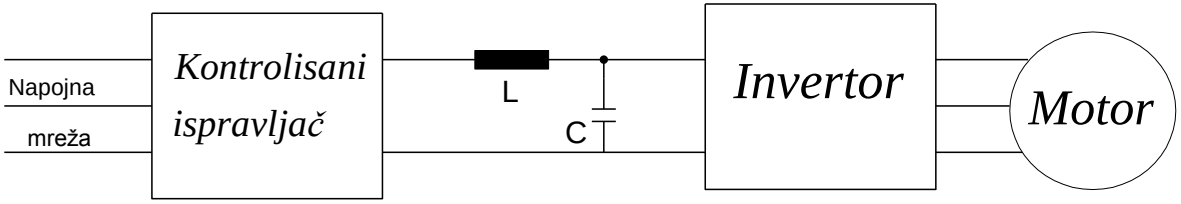




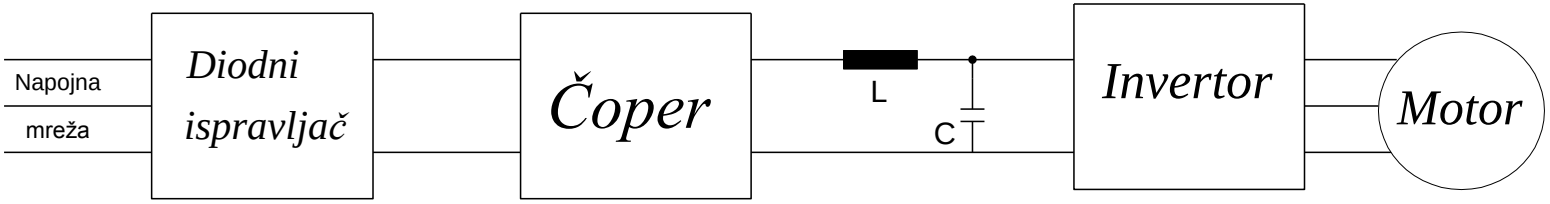
Pretvarači frekvencije



a)

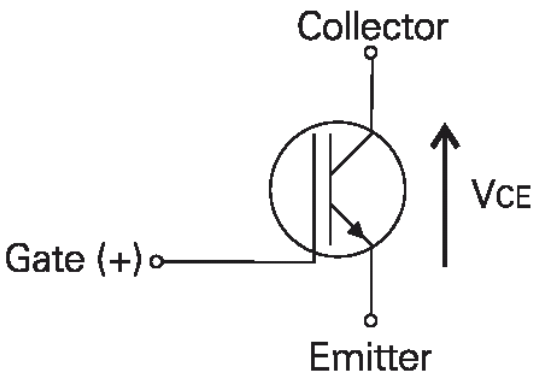


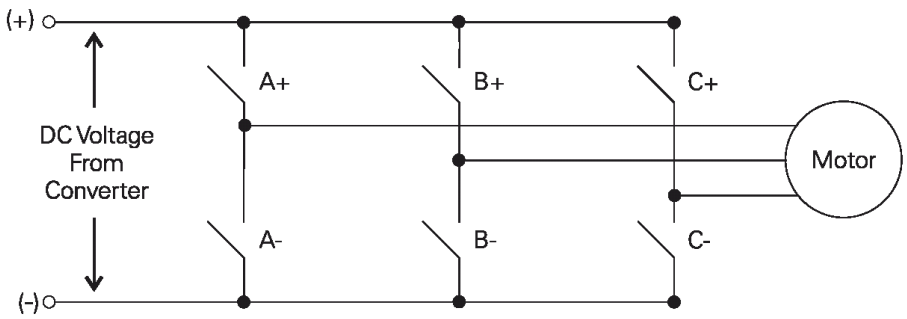
b)

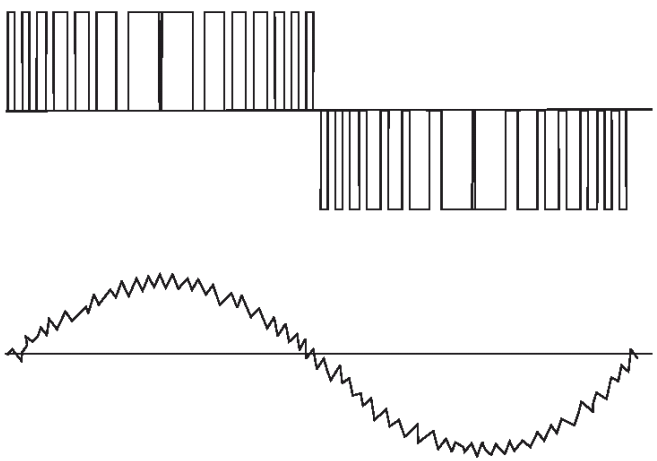


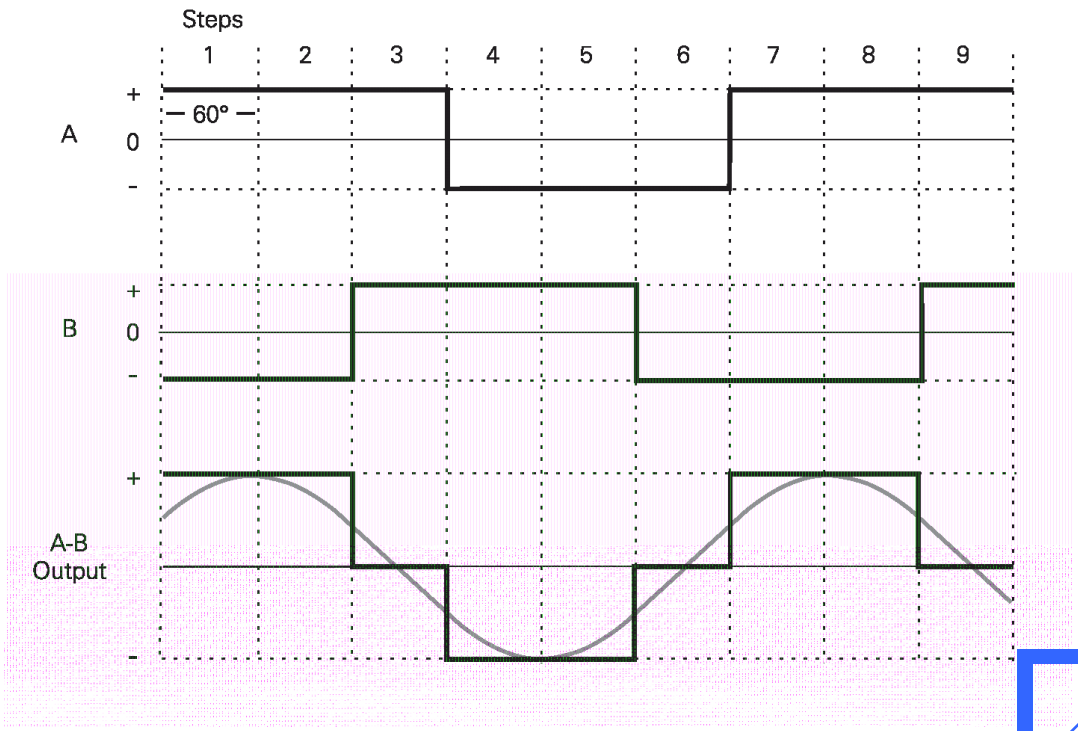
c)

REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA

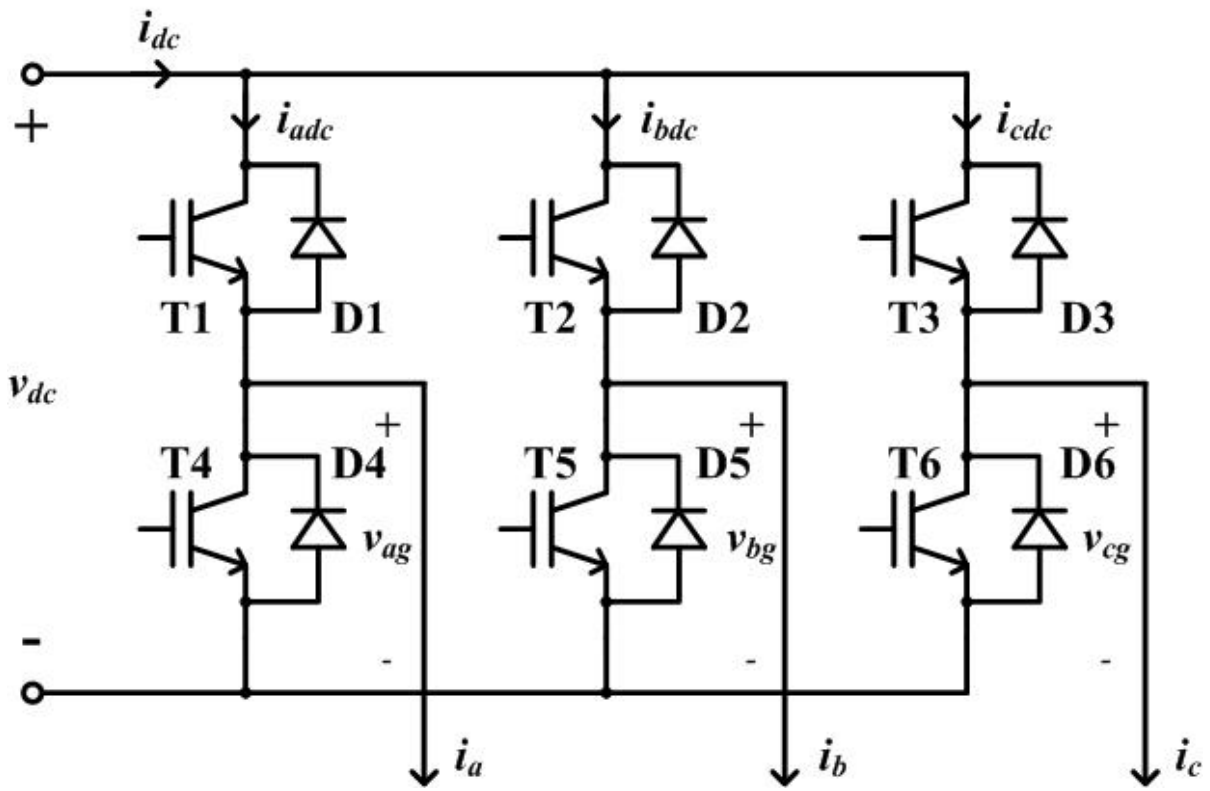








REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA



$$S_a = \begin{cases} 1, & T1 \ on \\ 0, & T4 \ on \end{cases} \qquad S_b = \begin{cases} 1, & T2 \ on \\ 0, & T5 \ on \end{cases} \qquad S_c = \begin{cases} 1, & T3 \ on \\ 0, & T6 \ on \end{cases}$$

REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA

$$\begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \cdot v_{dc}$$

$$v_{ab} = v_{ag} - v_{bg}$$

$$v_{bc} = v_{bg} - v_{cg}$$

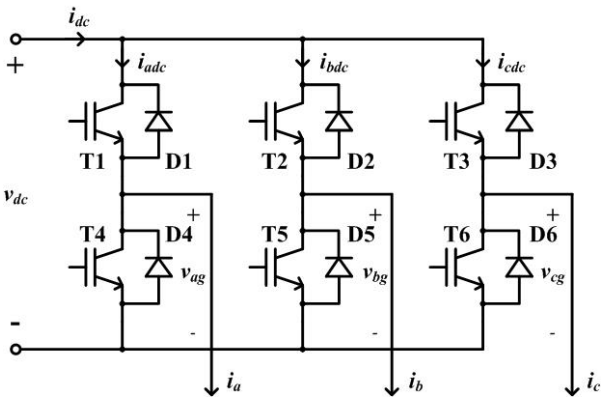
$$v_{ca} = v_{cg} - v_{ag}$$

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} \cdot v_{dc}$$

$$v_{ag} = v_a - v_{ng}$$

$$v_{bg} = v_b - v_{ng}$$

$$v_{cg} = v_c - v_{ng}$$



$$v_{ng} = \frac{1}{3} \cdot \left(v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}\right) - \frac{1}{3} \cdot \left(v_a + v_b + v_c\right)$$

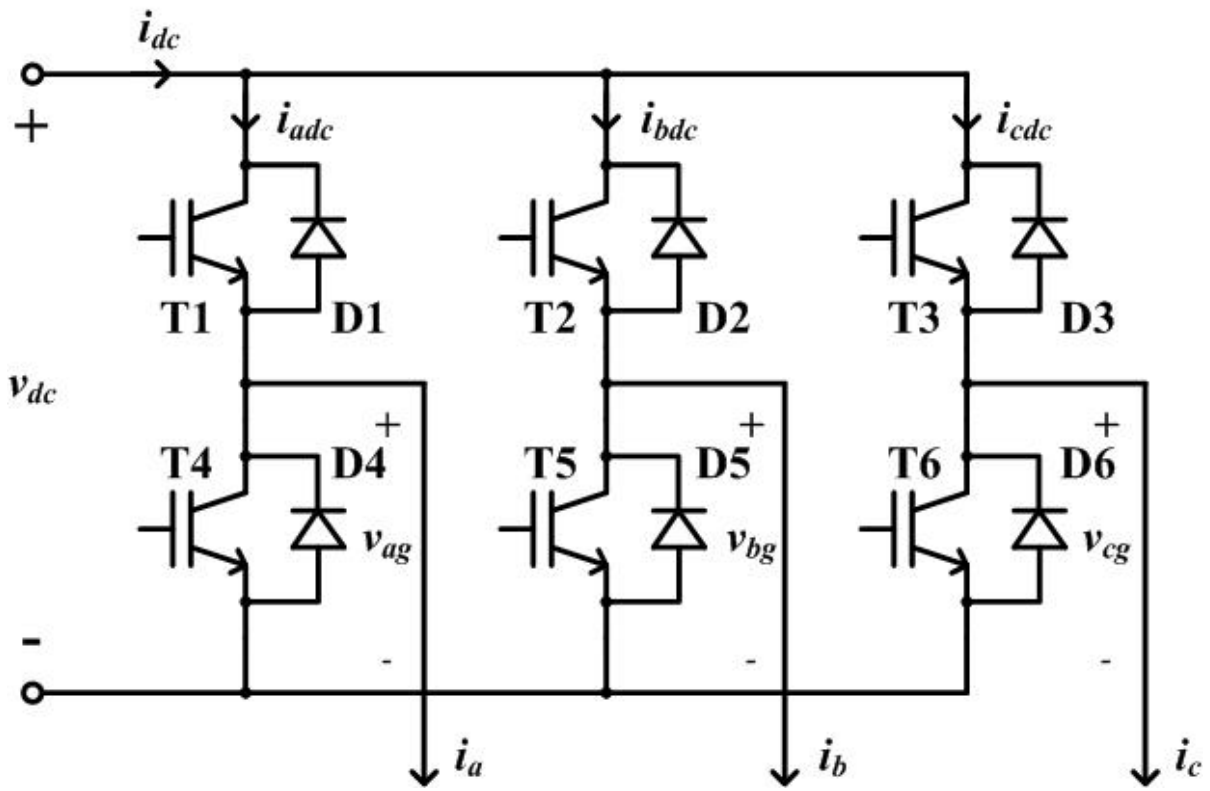
$$v_{ng} = \frac{1}{3} \cdot \left(v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}\right)$$

$$v_a = \frac{2}{3} \cdot v_{ag} - \frac{1}{3} \cdot v_{bg} - \frac{1}{3} \cdot v_{cg}$$

$$v_b = \frac{2}{3} \cdot v_{bg} - \frac{1}{3} \cdot v_{ag} - \frac{1}{3} \cdot v_{cg}$$

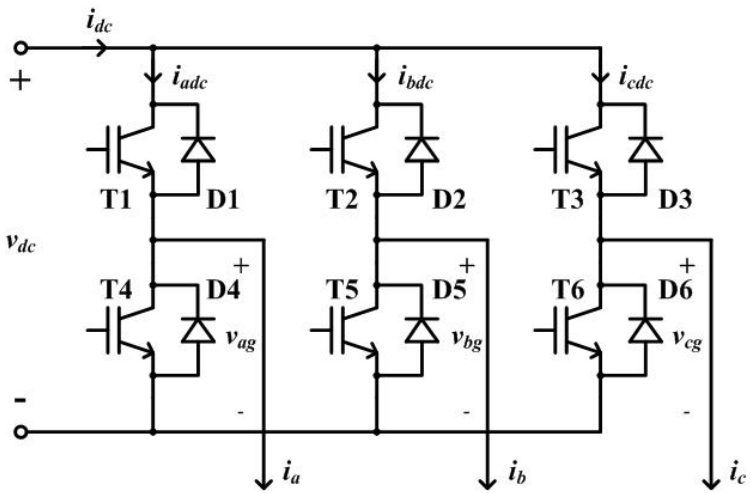
$$v_c = \frac{2}{3} \cdot v_{cg} - \frac{1}{3} \cdot v_{ag} - \frac{1}{3} \cdot v_{bg}$$

REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA



$$v_a = \frac{1}{3}\cdot\left(2\cdot S_a - S_b - S_c\right)\cdot v_{dc} \qquad v_b = \frac{1}{3}\cdot\left(2\cdot S_b - S_a - S_c\right)\cdot v_{dc} \qquad v_c = \frac{1}{3}\cdot\left(2\cdot S_c - S_a - S_b\right)\cdot v_{dc}$$

REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA



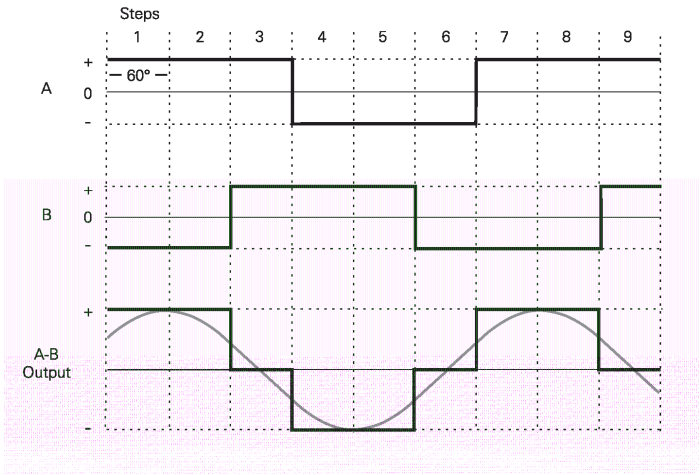
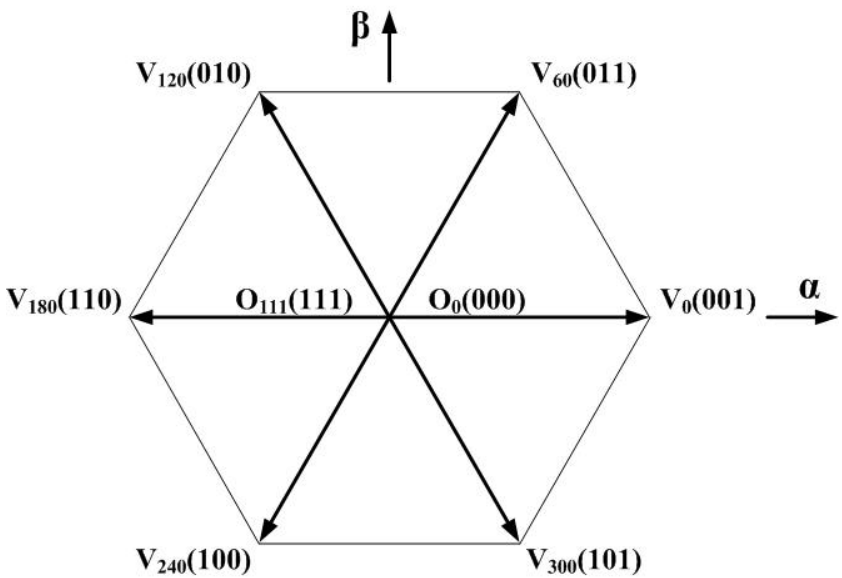


Tabela. Kombinacije stanja prekidača i trenutne vrednosti napona trofaznog invertora.

c	b	a	v_a	v_b	v_c	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	v_{dc}	0	$-v_{dc}$
0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}$	v_{dc}	0
0	1	1	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	0	v_{dc}	$-v_{dc}$
1	0	0	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	0	$-v_{dc}$	v_{dc}
1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	v_{dc}	$-v_{dc}$	0
1	1	0	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-v_{dc}$	0	v_{dc}
1	1	1	0	0	0	0	0	0

REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA



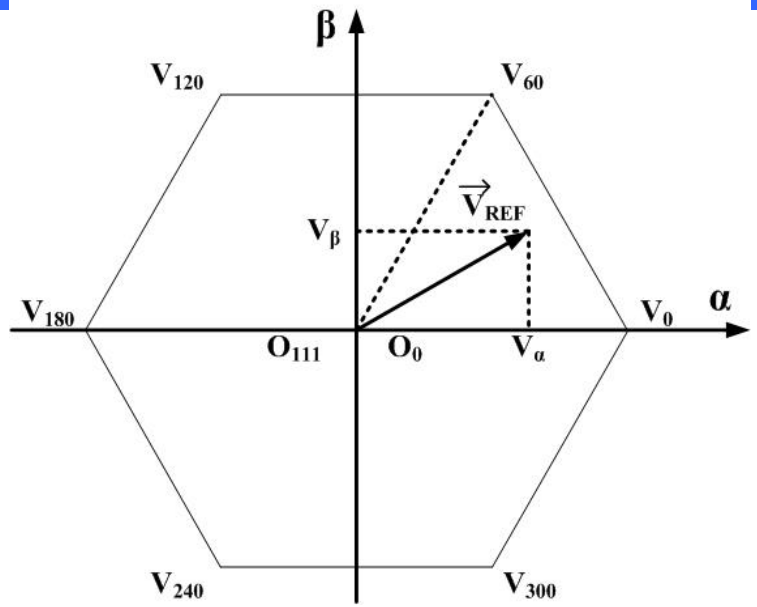


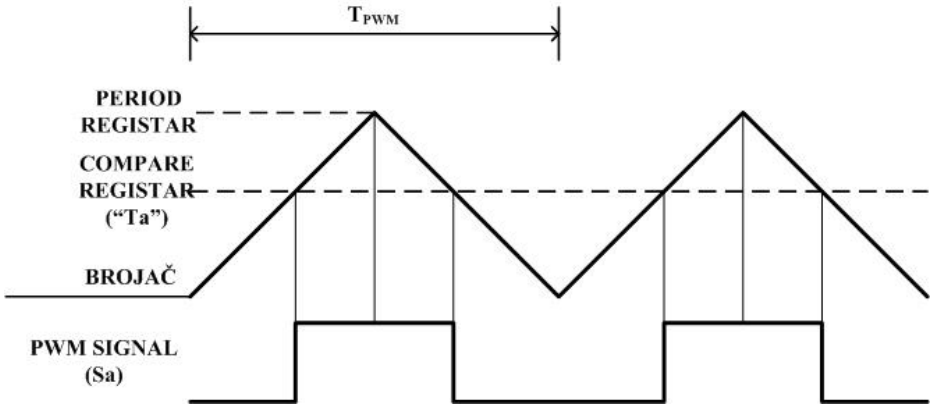
Tabela 2.3-1. Prekidačka šema, odgovarajući prostorni vektori i njihove *α* i *β* komponente.

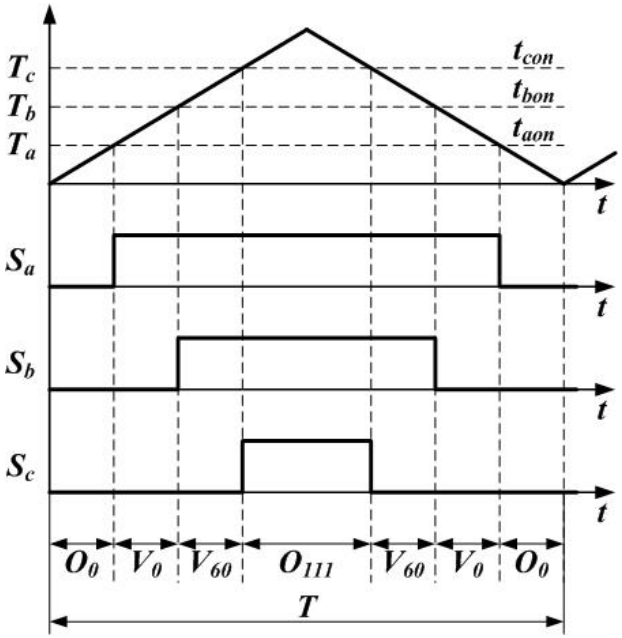
c	b	a	v_α	v_β	Vektor
0	0	0	0	0	O_0
0	0	1	$2v_{dc}/3$	0	V_0
0	1	0	$-v_{dc}/3$	$v_{dc}/\sqrt{3}$	V_{120}
0	1	1	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/\sqrt{3}$	V_{60}
1	0	0	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/\sqrt{3}$	V_{240}
1	0	1	$v_{dc}/3$	$-v_{dc}/\sqrt{3}$	V_{300}
1	1	0	$-2v_{dc}/3$	0	V_{180}
1	1	1	0	0	O_{111}

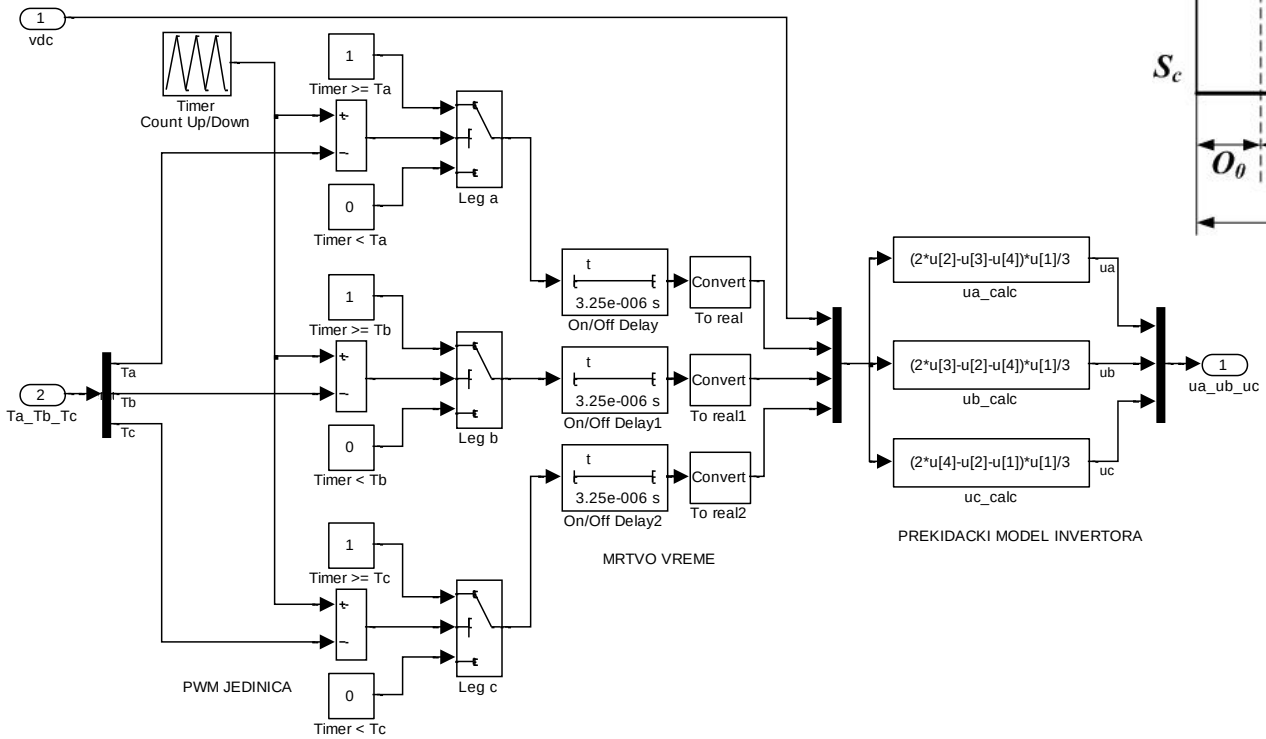
$$v_\alpha = \frac{2}{3}\cdot\left[v_a - \frac{1}{2}\cdot v_b - \frac{1}{2}\cdot v_c\right]$$

$$v_\beta = \frac{2}{3}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\left[v_b - v_c\right]$$

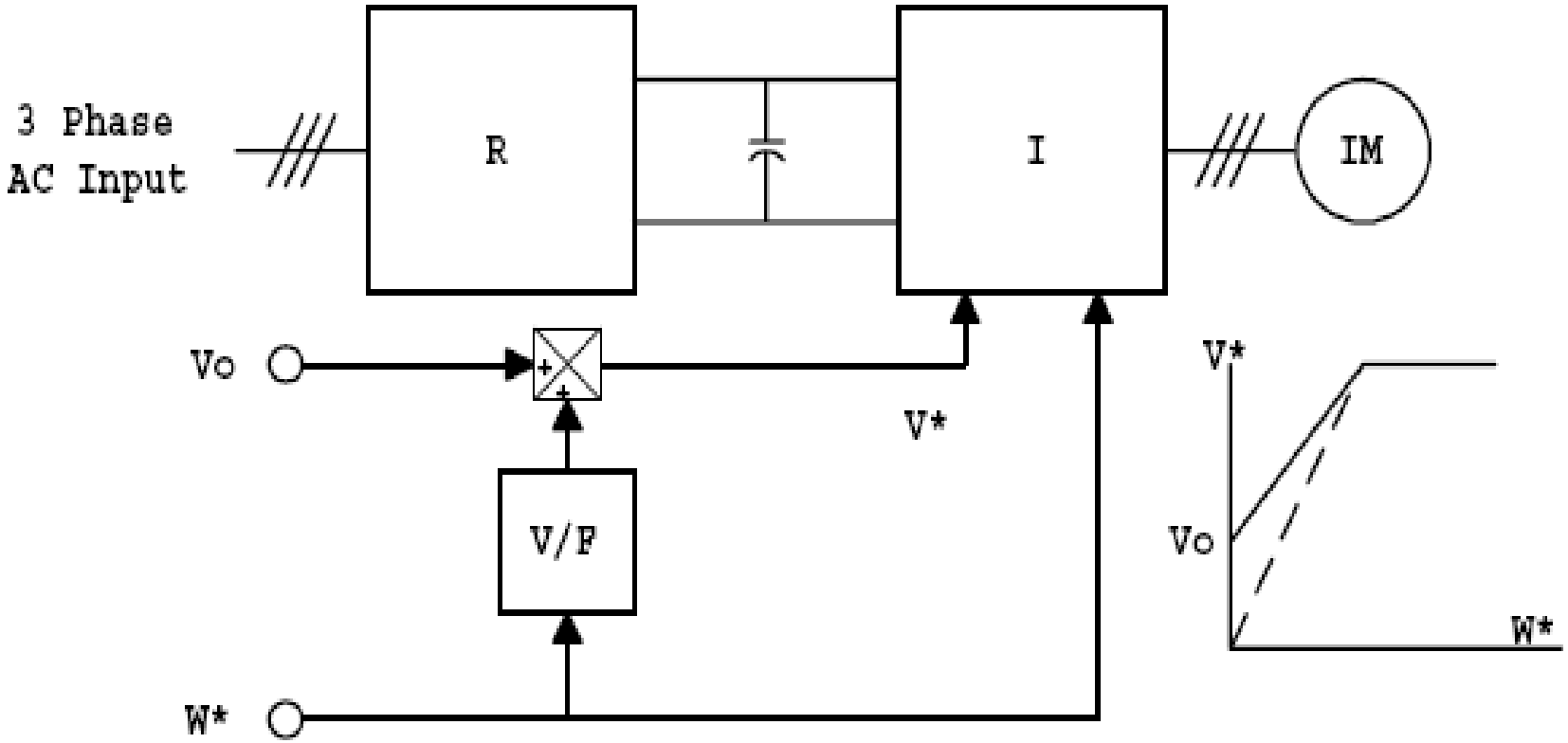
REGULACIJA ASINHRONIH MOTORA



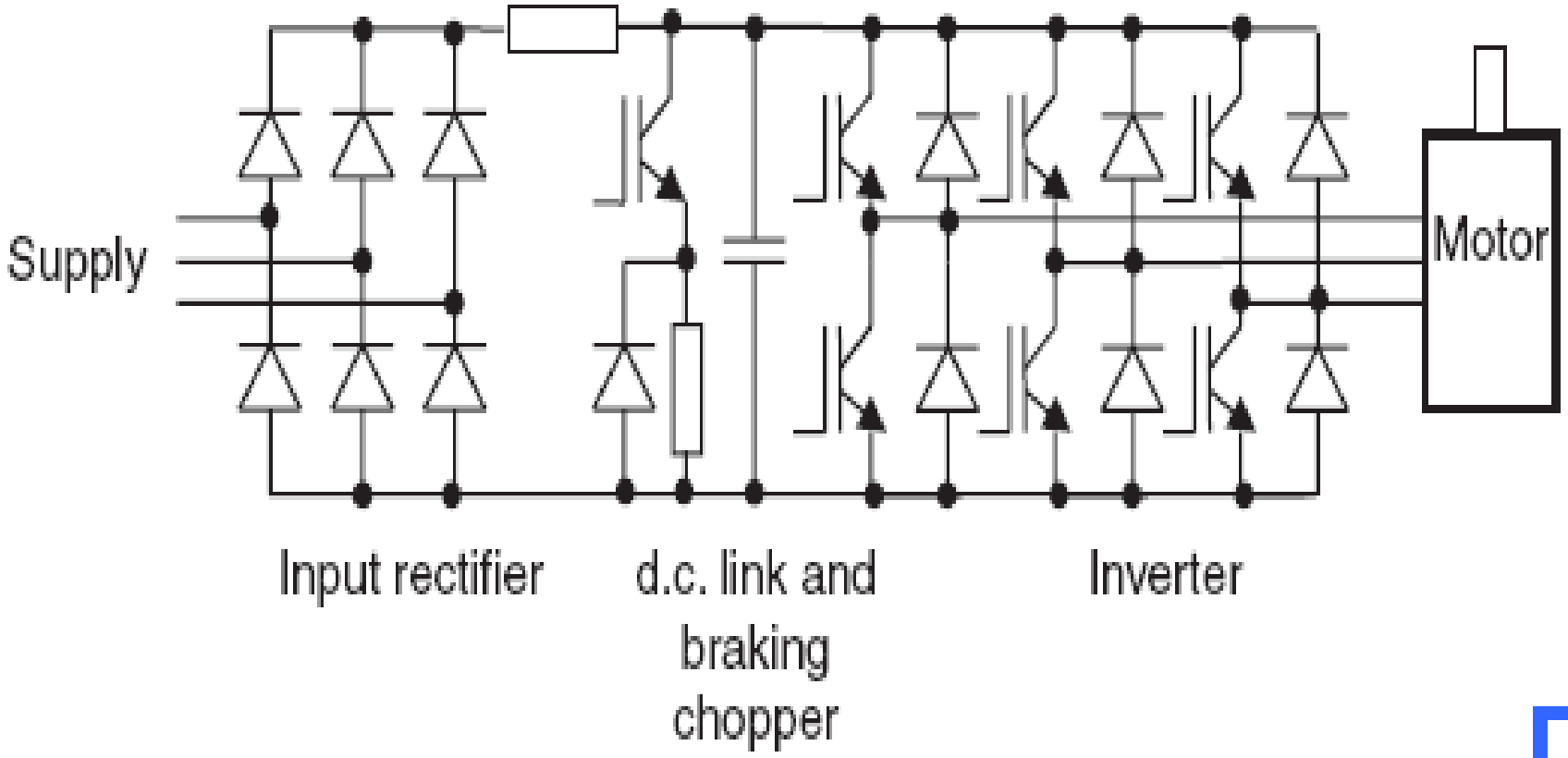




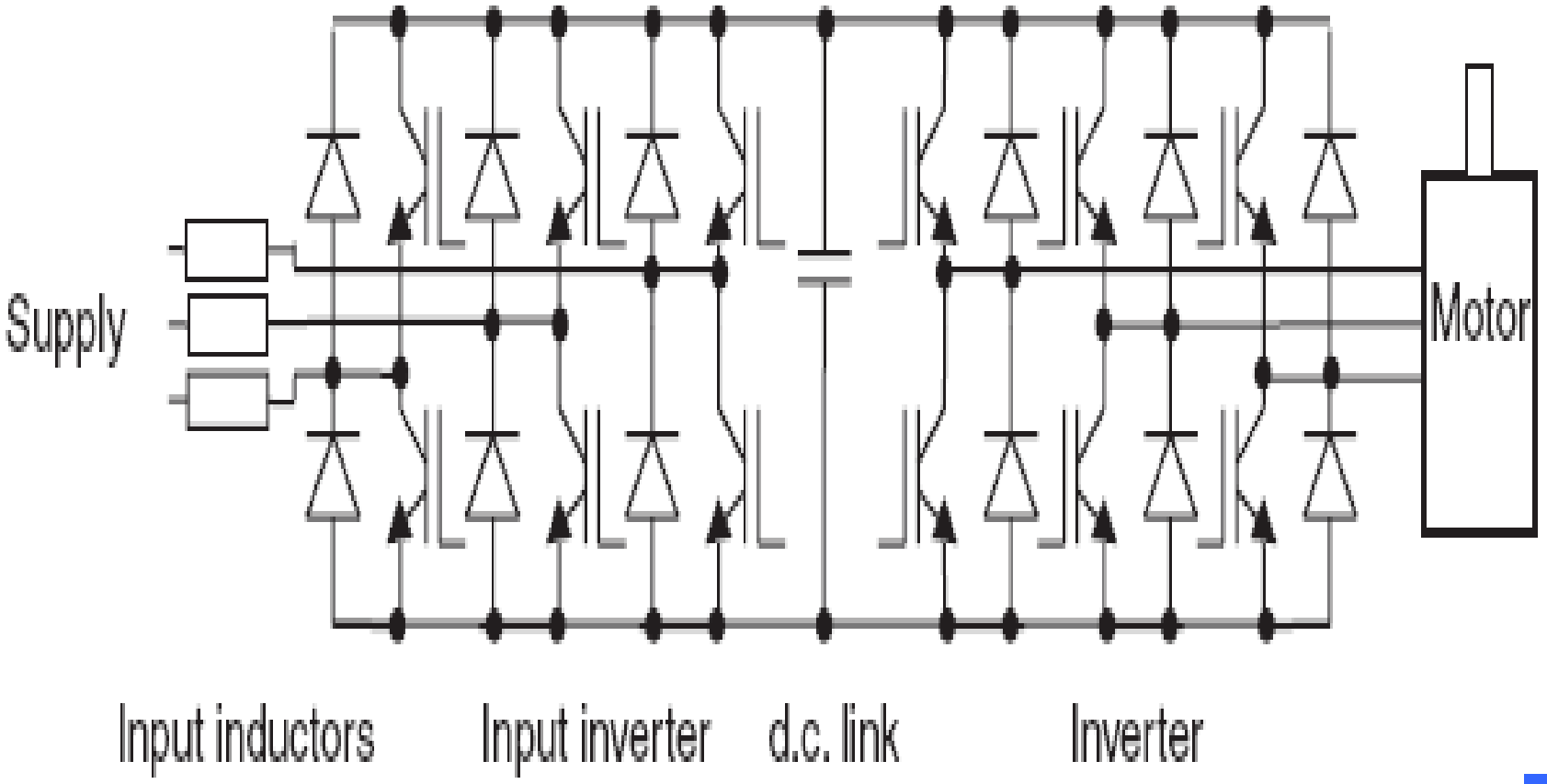
Skalarno upravljanje



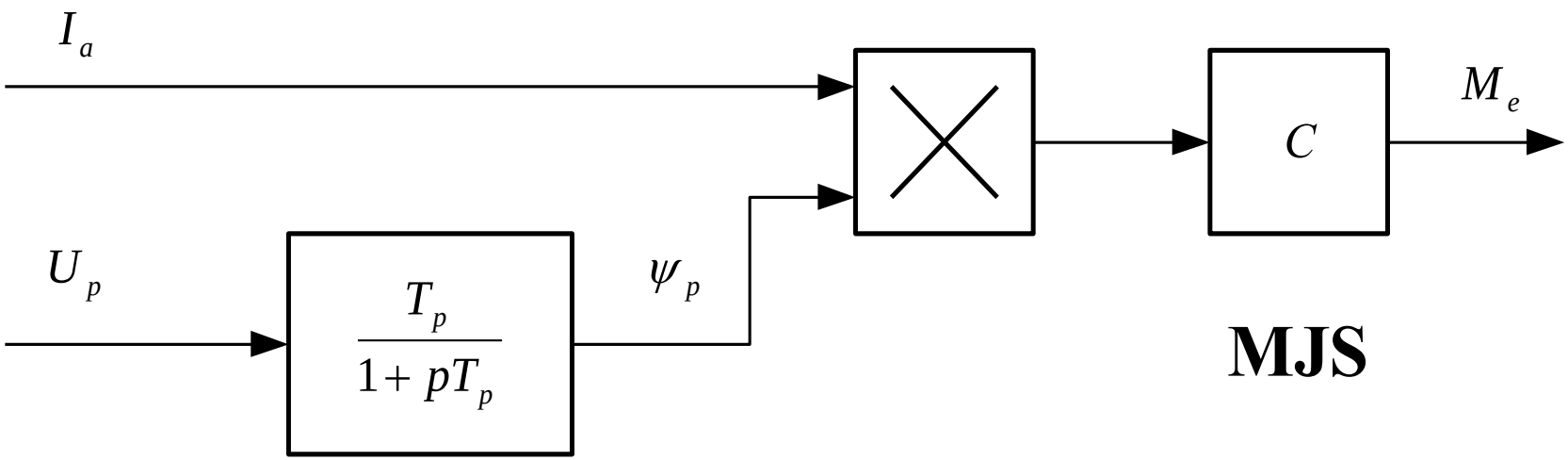
STANDARDNI PRETVARAČ



ČETVOROKVADRANTNI PRETVARAČ



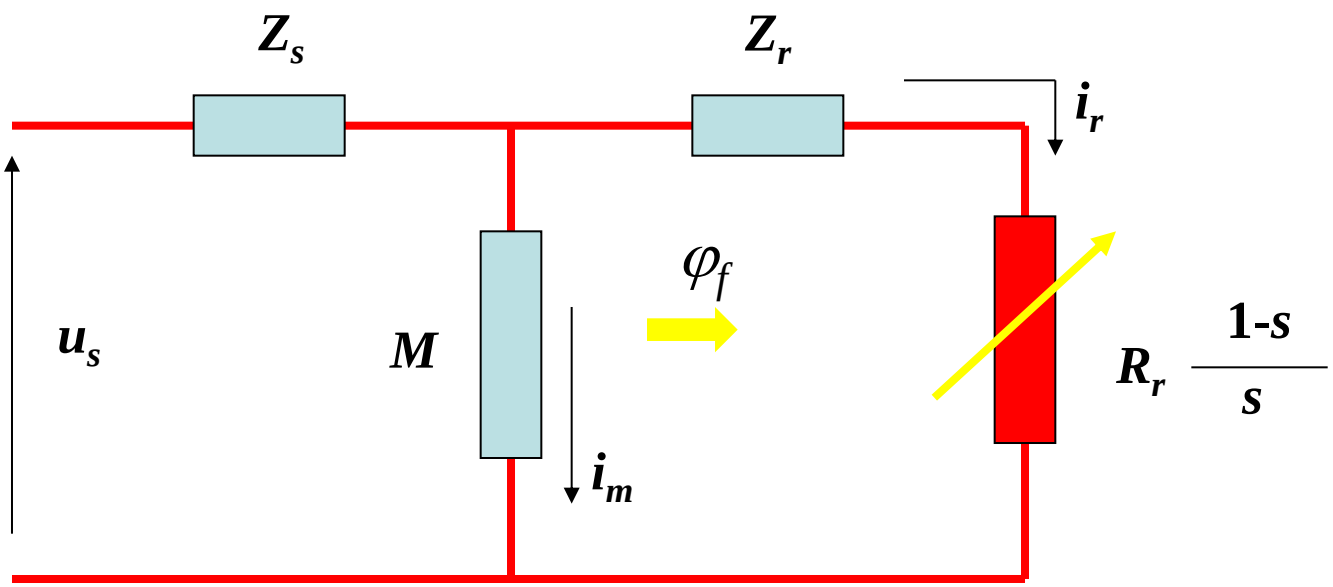
Model motora jednosmerne struje



Moment = $$M_e = c\frac{T_p}{1+pT_p}U_p I_a$$

- ***Dve promenjive kod jednosmernog motora određuju moment, i to pobudni napon određuje fluks a rotorska struja moment.***

Asinhroni motor?



$$m_e \sim i_m \, i_r$$

Da li je moguće održati stalnu struju magnećenja, a momenat menjati preko struje rotora?

DA!!!!!!

Raspregnuta kontrola fluksa i momenta =

VEKTORSKO UPRAVLJANJE

= orijentacija vektora MPS prema rotorskom fluksu;

DIREKTNO VEKTORSKO UPRAVLJANJE

= položaj i amplituda fluksa se određuje merenjem u vazdušnom međuprostoru mašine;

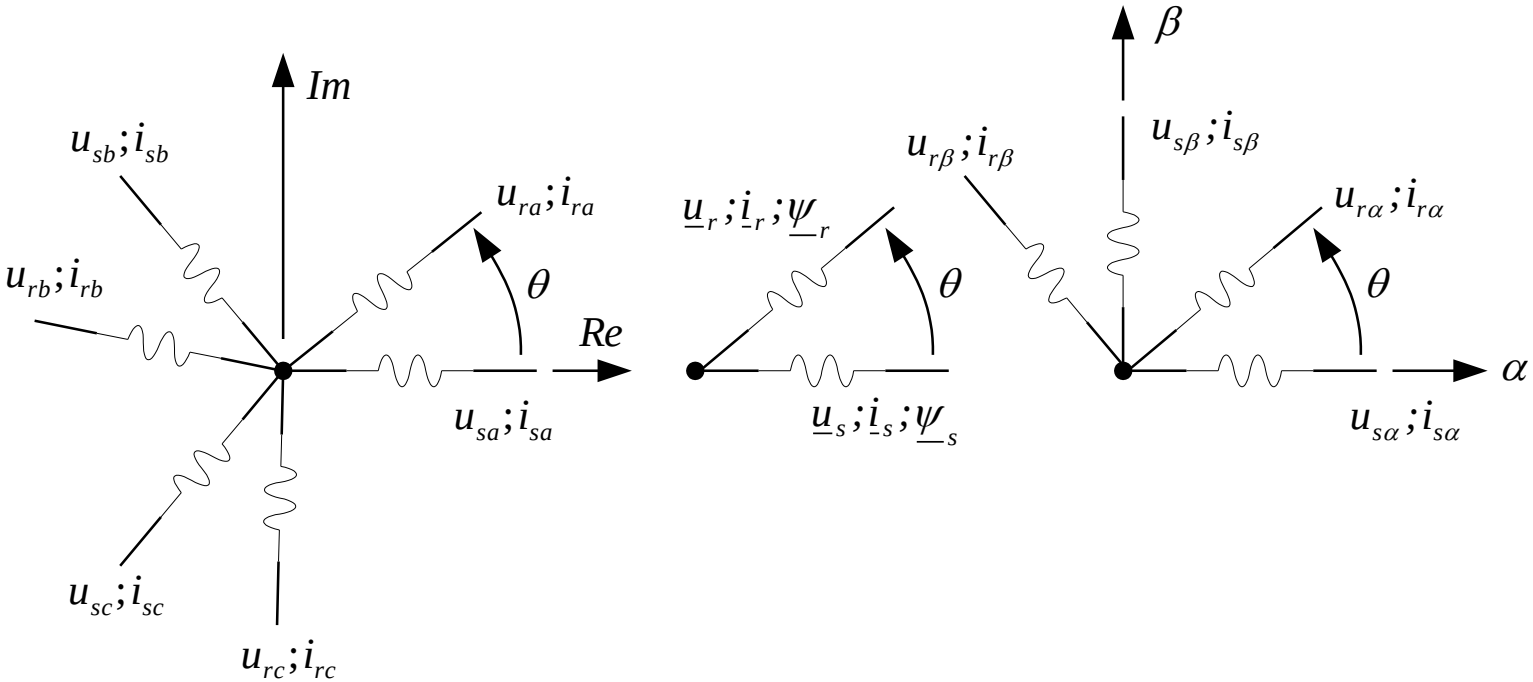
INDIREKTNO VEKTORSKO UPRAVLJANJE

= položaj i amplituda fluksa dobija se procesiranjem brzine i struje u strujnom modelu rotorskog kola mašine.

Upravljanje se postiže manipulacijom statorske struje ili napona, tako da se nezavisno kontrolišu MPS statora normalna na fluks i komponenta paralelna sa fluksom.

U oba slučaja amplituda fluksa je određena paralelnom komponentom a moment normalnom.

Zahtevi realizacije

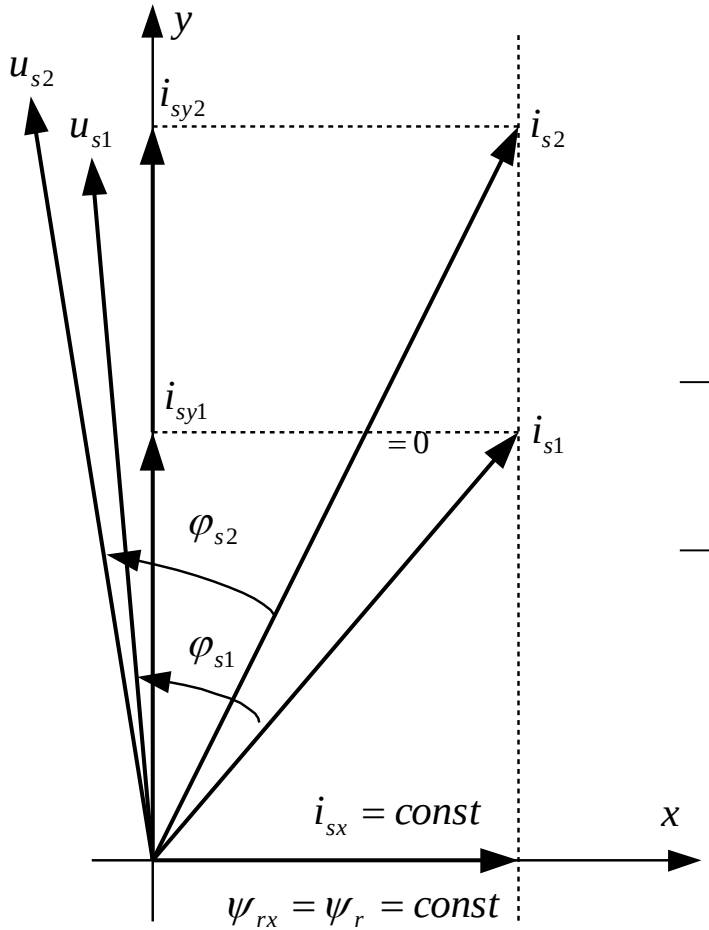


Realizacija vektorskog upravljanja zahteva

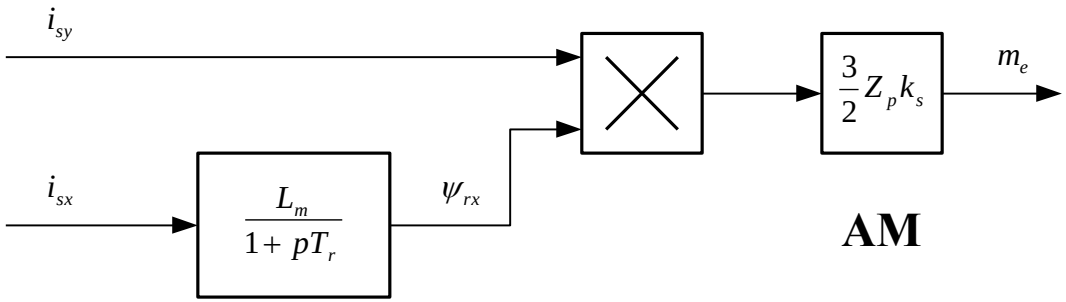
transformaciju koordinata, složena izračunavanja fluksa

i upravljanje energetskim pretvaračem za napajanje.

Model vektorski upravljanog asinhronog motora



$$m_e = \frac{3}{2} Z_p k_s \left(\psi_{rx} i_{sy} - \underbrace{\cancel{\psi_{ry} i_{sx}}}_{=0} \right)$$

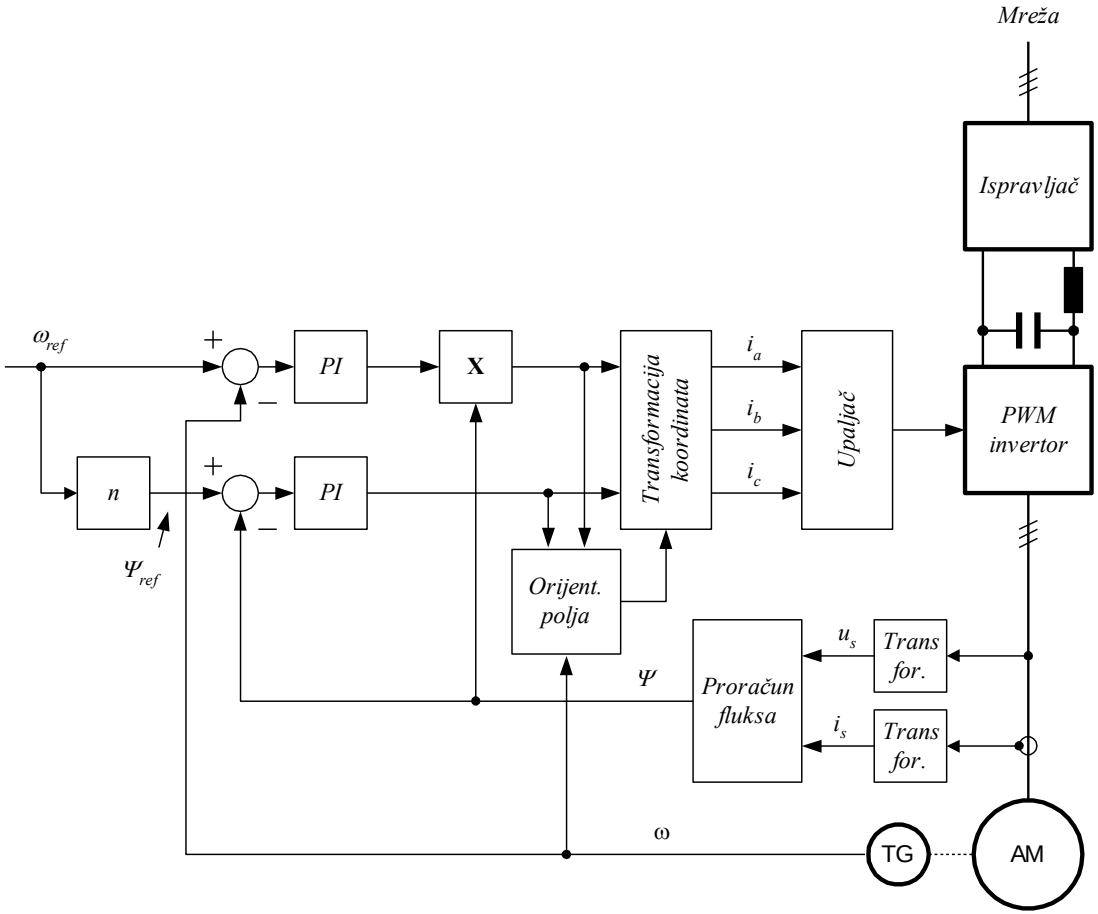


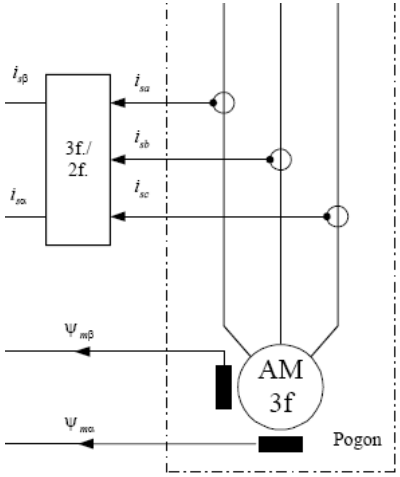
$$\psi_{ry} = 0$$

$$\psi_{rx} = \frac{L_m}{1+pT_r} i_{sx}$$

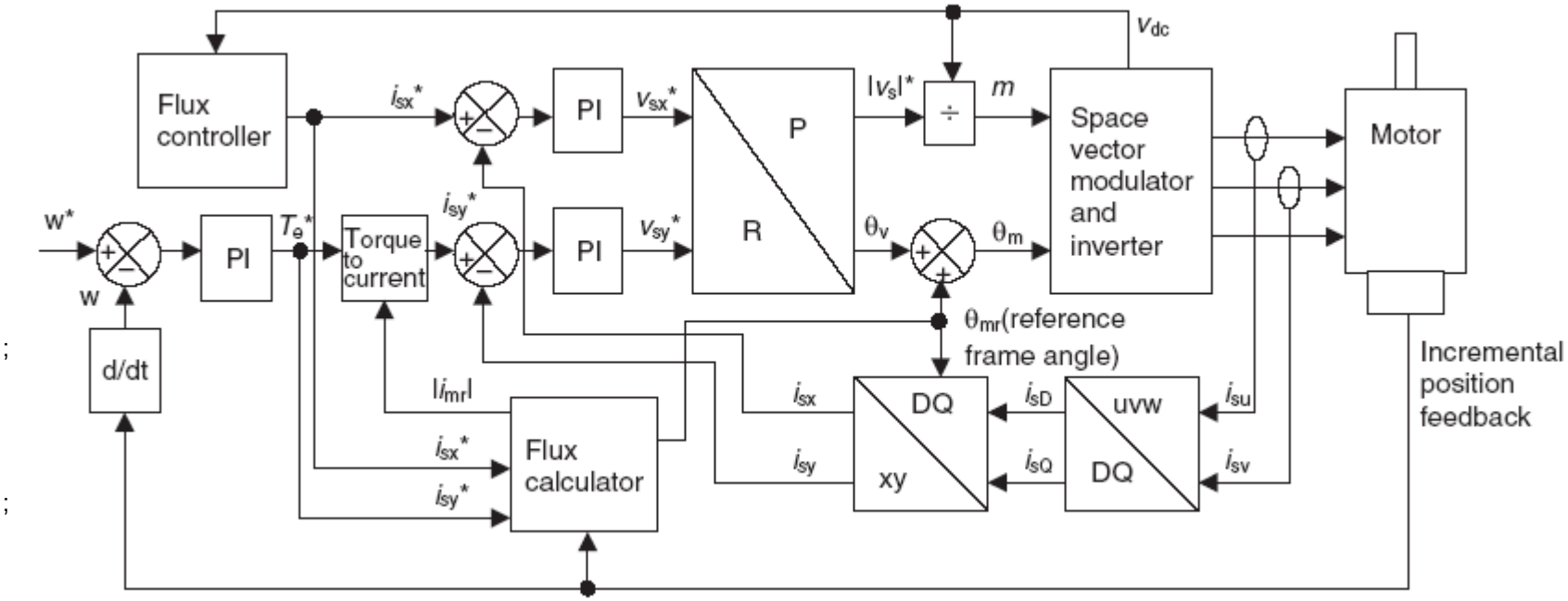
$$m_e = \frac{3}{2} Z_p k_s \frac{L_m}{1+pT_r} i_{sx} i_{sy}$$

Indirektna i direktna vektorska regulacija





Senzorska vektorska regulacija



Dobre dinamičke regulacione karakteristike u čitavom opsegu regulacije.

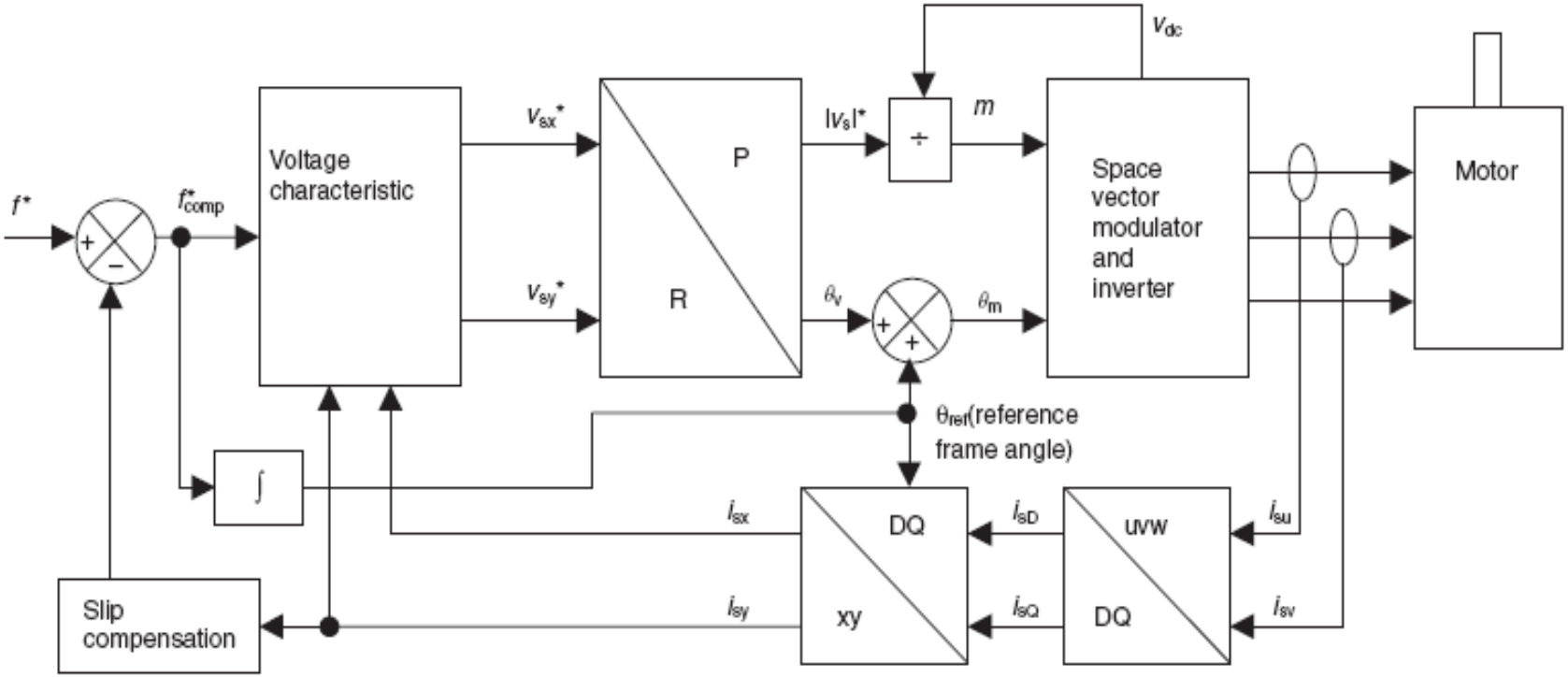
$$\omega_r = \omega_s - \omega = \frac{\frac{1}{T_r} i_{sy}}{\frac{1}{1 + pT_r} i_{sx}}$$

$$\theta = \int \omega \, dt$$

$$\theta_r = \int \omega_r \, dt$$

$$\theta_k = \theta + \theta_r$$

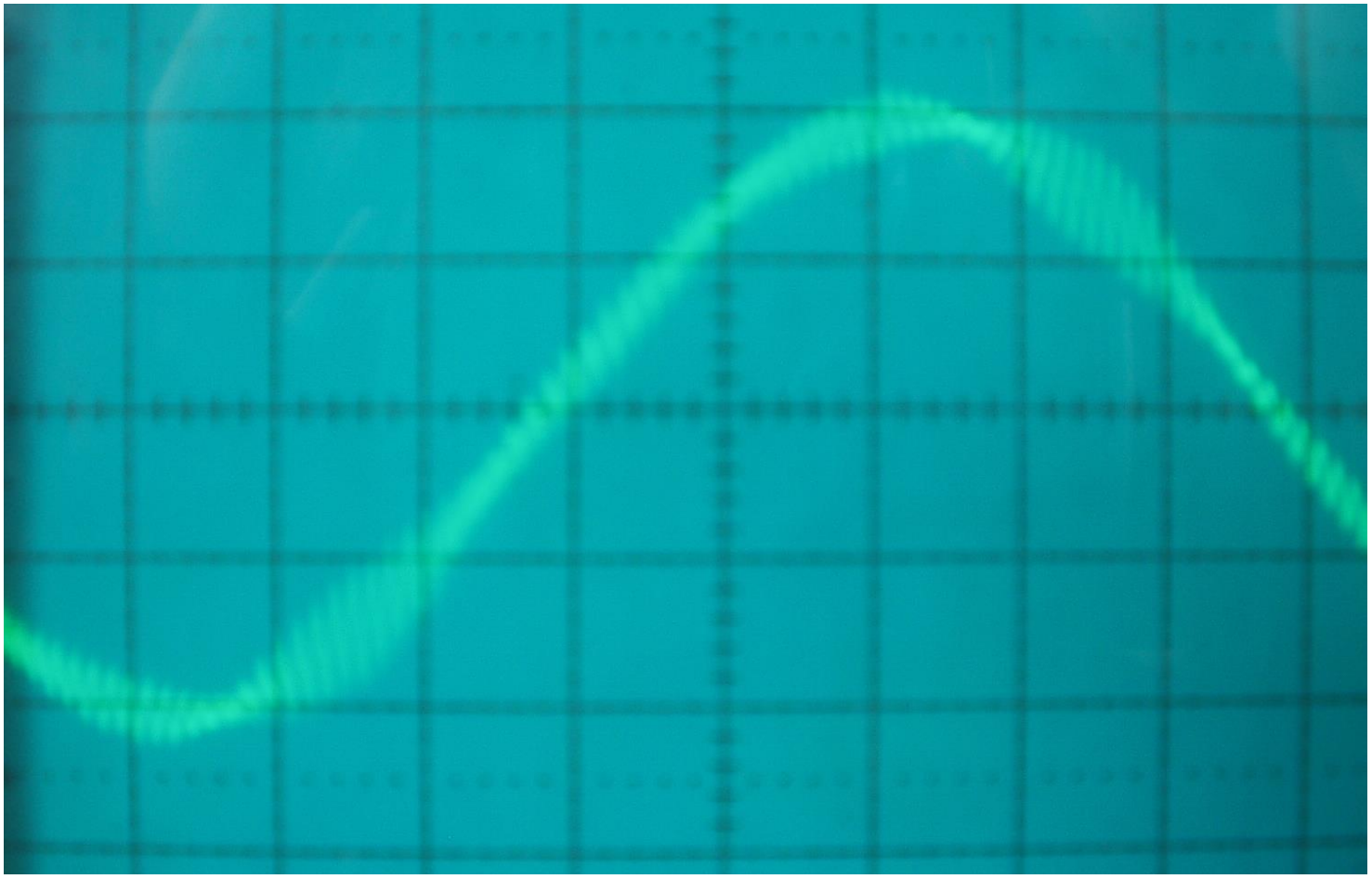
Bezsenzorska vektorska regulacija



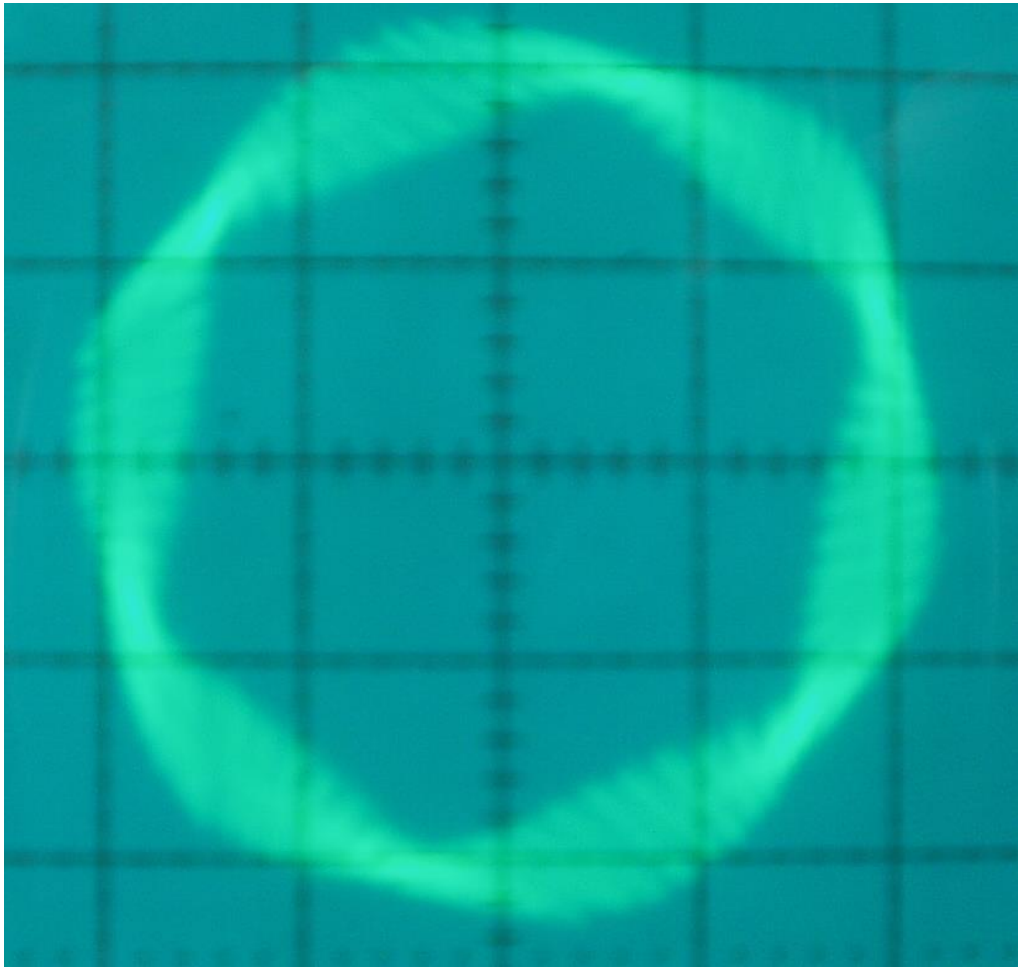
Lošije dinamičke regulacione karakteristike pri malim brzinama.

$$U_s = R_s i_s + \omega \psi_s$$

Talasni oblik statorske struje



Vektor statorske struje



Хибридна и електрична возила

Батерије

Уређаји за складиштење електричне енергије

- Уређај за складиштење ел.енергије је кључна компонента електричних возила.
- У класичним електричним возилима батерија је једини уређај за складиштење енергије, и уједно компонента која има највећу цену, димензије и тежину
- Шта је електрична батерија? Батерија се састоји из више ћелија које су повезане на одговарајући начин
- Ћелије претварају хемијску енергију у електричну
- Свака ћелија се састоји из позитивне и негативне електроде које се налазе у одговарајућем електролиту.
- Хемијска рекација између електрода и електролита производи једносмеран напон
- Уколико су батерије пуњиве реакција се може одиграти и у другом смеру

Уређаји за складиштење електричне енергије

- Оловне батерије су једне од најстаријих
- Батерије које су погодне за електричне аутомобиле:
  - lead acid
  - nickel iron
  - nickel cadmium
  - nickel metal hydride (NiMH)
  - lithium polymer
  - lithium iron
  - sodium sulfur
  - sodium metal chloride

Батерије

- Карактеристике батерија битне са становишта пројектовања:
  - Специфична енергија
  - Густина енергије
  - Специфична снага
  - Напон батерије
  - Ефикасност
  - Комерцијална доступност
  - Цена
  - Радна температура
  - Индекс самопражњења (self discharge rate)
  - Број животних циклуса
  - Индекс поновног пуњења (recharge rate)
- Рециклажа батерија

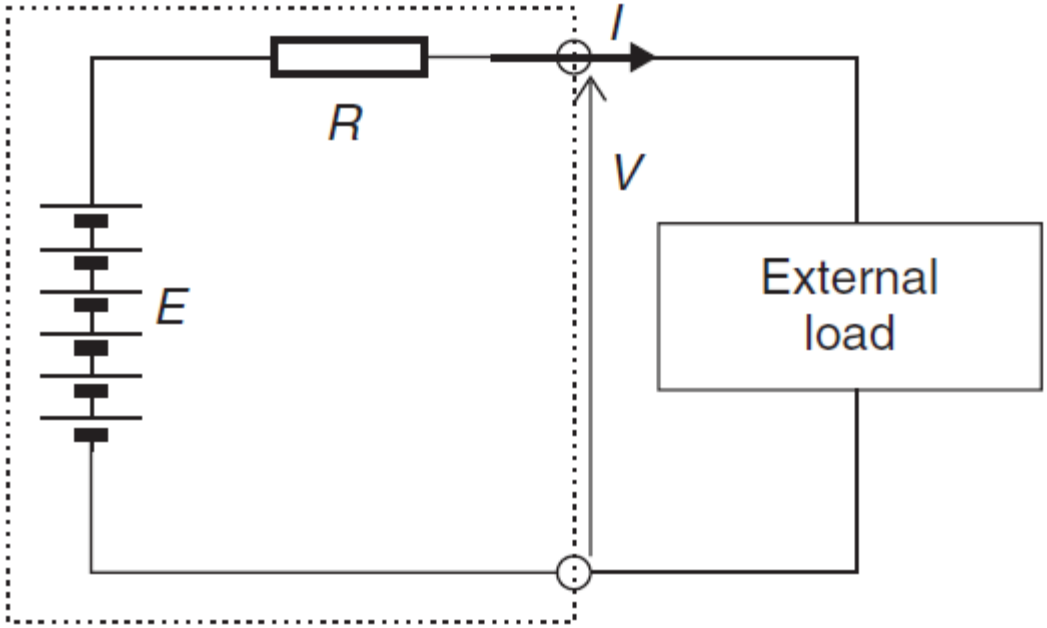
Параметри батерије

- Номинални напон ћелије

  Код батерија које се користе у ел. возилима напон ћелије је обично 6 или 12 V. Ове ћелије се везују на ред како би се остварио жељени напон. У пракси, напон батерије није сталан као што је то случај у теорији.
- Приликом пражњења батерије напон ће имати тенденцију опадања, док ће приликом пуњења постојати тенденција раста.
- Ова појава се најбоље описује помоћу појма унутрашње отпорности

Параметри батерије

- Номинални напон



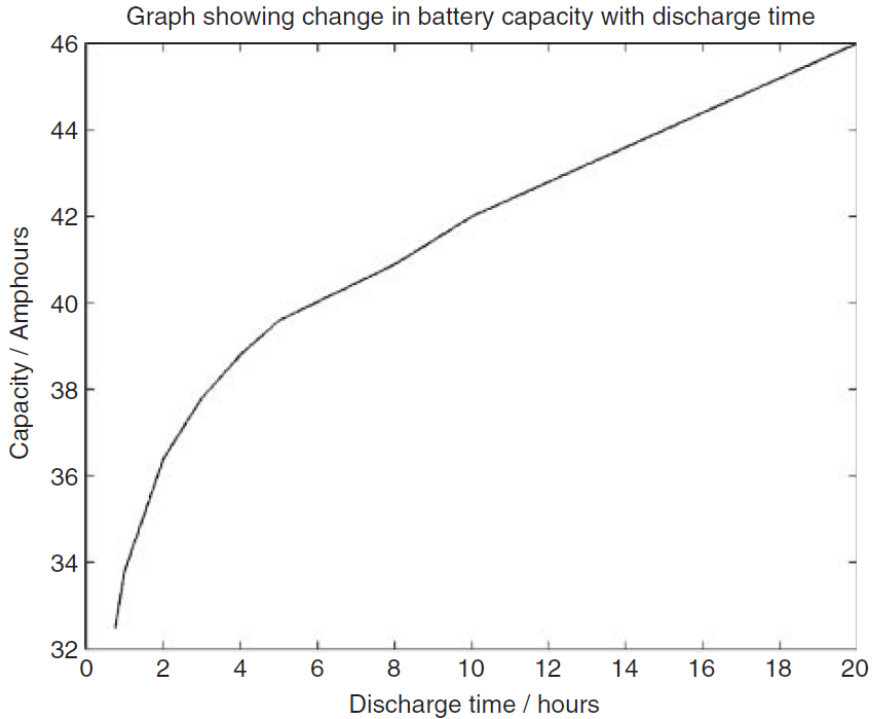
$$V = E - IR$$

E - напон празног хода

R - унутрашња отпорност

Капацитет батерије

- Мери се у As(C- кулон), тј. практичније у Ah.
  Шта значи 10 Ah?
- Није исто 10 A за 1h и 1 A за 10 h
- Капацитет батерија већих снага у електричним возилима се обично пројектује на 5 сати пражњења



- 42 Ah номинални капацитет батерије
- Овде се види ефекат бржег и споријег пуњења
- Капацитет пада због споредних реакција у самој ћелији.

Капацитет батерије

- Капацитет батерије се означава словом С
  - Пример: батерија 42 Ah → капацитет С = 42 А. Корисници обично кажу, струја пражњења 2 С , тада се мисли да се батерија празни са 84 А. Нпр пуни се са 0.4 С значи да се пуни са 16.8 А
  - Нпр. за батерију 42 Ah, 10 h време пражњења, ознака 0.5 C_{10} значи струја пражњења од 21 А. Број 10 се односи на номинално време пражњења

Енергија ускладиштена у батерији

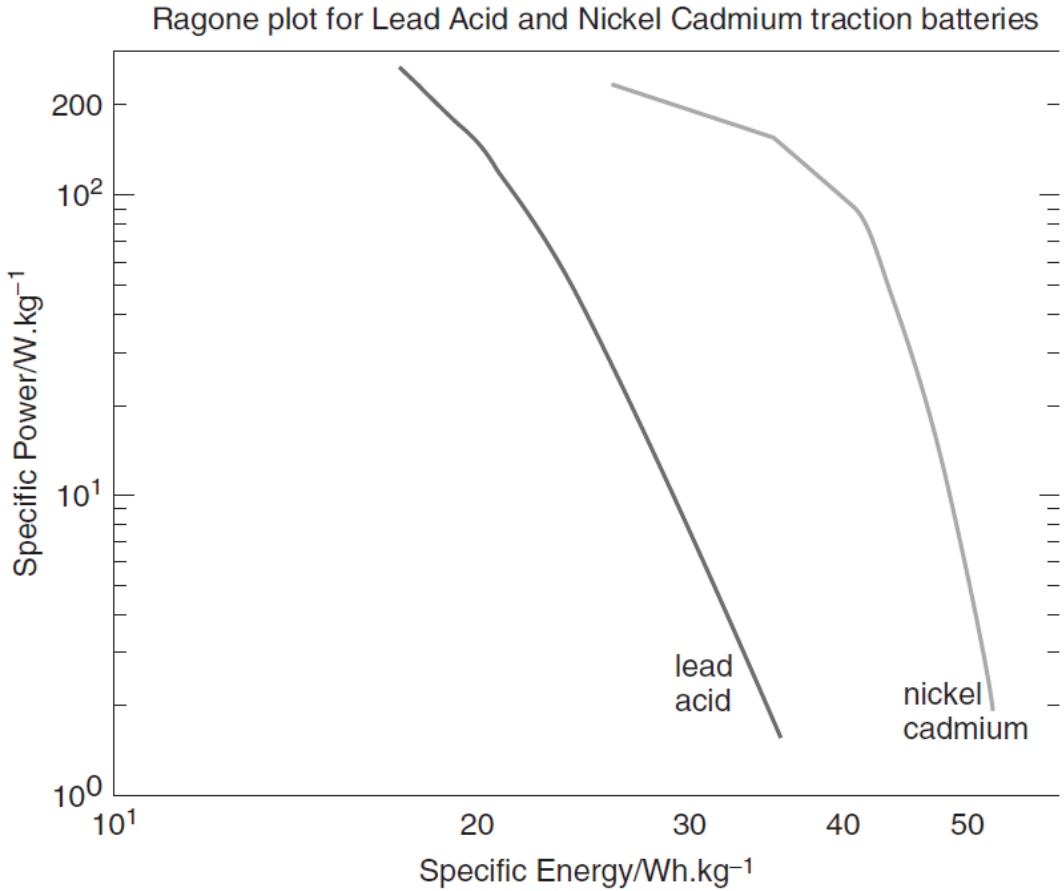
- Ускладиштена енергија у батерији зависи од напона и количине ускладиштеног наелектрисања
- Јединица је Џул, али је то такође непрактична јединица па се користи Wh (1 Wh =3600 J). Ускладиштена енергија се добија као производ капацитета и напона (E=VxC)
- Треба бити обазрив код коришћења ове дефиниције, с обзиром да се и V и C мењају са начином употребе батерије. Уколико се струја нагло повећава напон и капацитет опадају.

Специфична енергија

- То је количина ускладиштене ел. енергије, изражена по килограму батерије
- Даје се чисто информативно и на основу ње се може проценити маса батерије
- Ово треба узети са резервом с обзиром да ускладиштена енергија у батерији није увек стабилна и зависи од пуно фактора.

Густина енергије

- То је количина електричне енергије која се ускладишти по m^3 запремине. (Whm^{-3}). Уколико се капацитет батерије подели са густином енергије добијају се димензије батерије. Овај параметар нам говори колику раздаљину аутомобил може да пређе

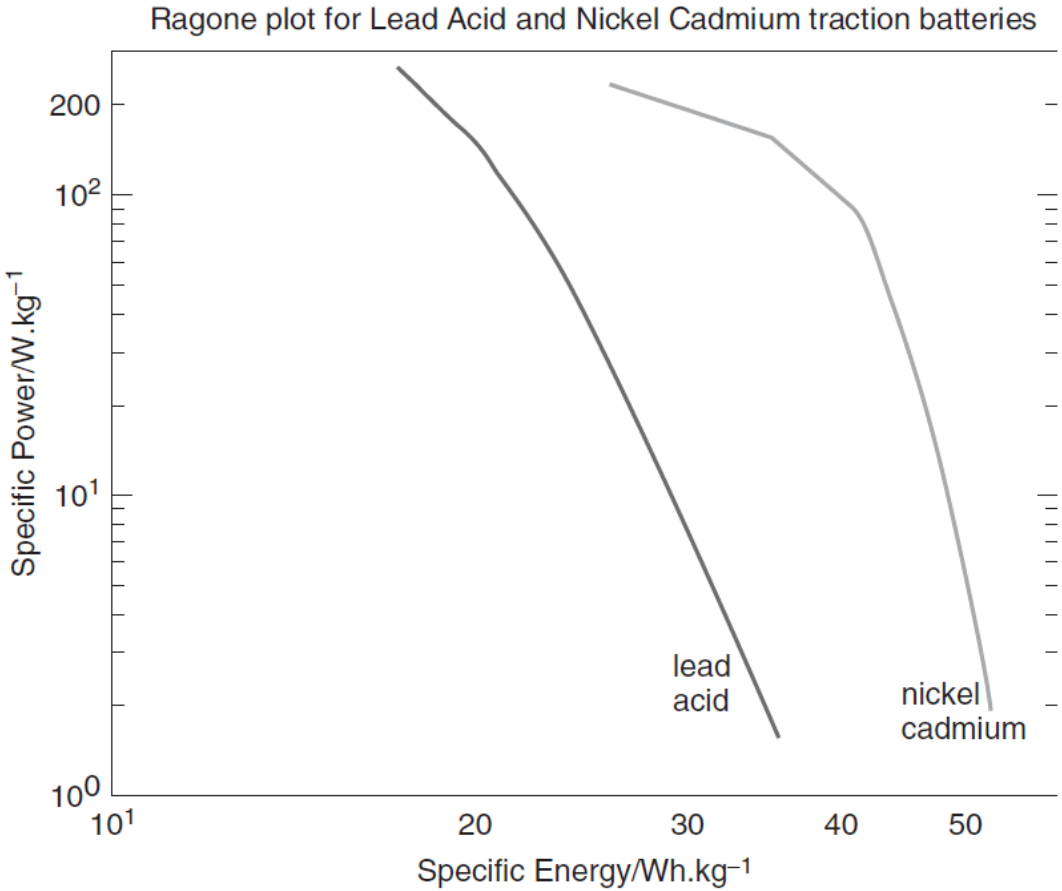


Специфична снага

- То је количина снаге која се добија по килограму батерије
- Овај параметар је доста променљив, с обзиром да снага која се узима из батерије зависи пре свега од потрошача
- Батерије не треба да се искоришћавају дуже времена око максималне снаге, с обзиром да на тај начин брзо слабе њихове карактеристике, смањује се животни век, и нису најефикасније
- Јединица је Wkg^{-1}
- Неке батерије могу имати веома високу специфичну енергију, али ниску специфичну снагу, што значи да оне могу да складиште велике количине енергије, али је не могу брзо испоручивати.
- Са становишта ел. возила то би значило да возило може прећи дуже раздаљине, али уз малу брзину.

Специфична снага/енергија

- Ragone дијаграм – зависност специфичне снаге од специфичне енергије
- Логаритамска скала – зато што снага која се повлачи из батерије може да варира у широком опсегу



Ефикасност батерије

- Ефикасност батерије се разликује од тога на који начин се пуни односно празни
- Потребно је да ефикасност буде велика, како би се смањиле димензије батерије

Индекс пражњења батерије

- Батерије се празне када се не користе и то је познато као процес самопражњења
- Поједине батерије не могу да се оставе дуго без пуњења
- Разлози варирају у зависности од врсте батерије, температуре и других чиниоца

Потреба за хлађењем

- Већина батерија ради на температури амбијента
- Поједине батерије захтевају грејање како би кренуо процес пражњења, а касније хлађење у устаљеном режиму рада
- Уколико су батерије изложене ниским температурама брзо ће изгубити своја својства, тако да се приликом пројектовања ел. аутомобила мора водити рачуна и о томе

Животни век батерије

- Обично је то неколико стотина циклуса пражњења/пуњења
- Међутим, то зависи од врсте батерије и од тога како је та батерија коришћена

Оловне батерије

- Lead acid
- Користе се обично код акумулатора (за стартовање мотора и остале помоћне уређаје у мотору)
- Код електричних возила користе се доста робустније оловне батерије које могу да издрже дубоко пражњење и користе гел уместо течног електролита
- Овакве батерије су знатно скупље за производњу

Table 3.1 Nominal battery parameters for lead acid batteries

Specific energy	20–35 Wh kg^{-1} depending on usage
Energy density	54–95 Wh l^{-1}
Specific power	~250 W kg^{-1} before efficiency falls very greatly
Nominal cell voltage	2 V
Amphour efficiency	~80%, varies with rate of discharge and temperature
Internal resistance	Extremely low, ~0.022 Ω per cell for 1 Ah cell
Commercially available	Readily available from several manufacturers
Operating temperature	Ambient, poor performance in extreme cold
Self discharge	~2% per day (but see text)
Number of life cycles	Up to 800 to 80% capacity
Recharge time	8 h (but 90% recharge in 1 h possible)

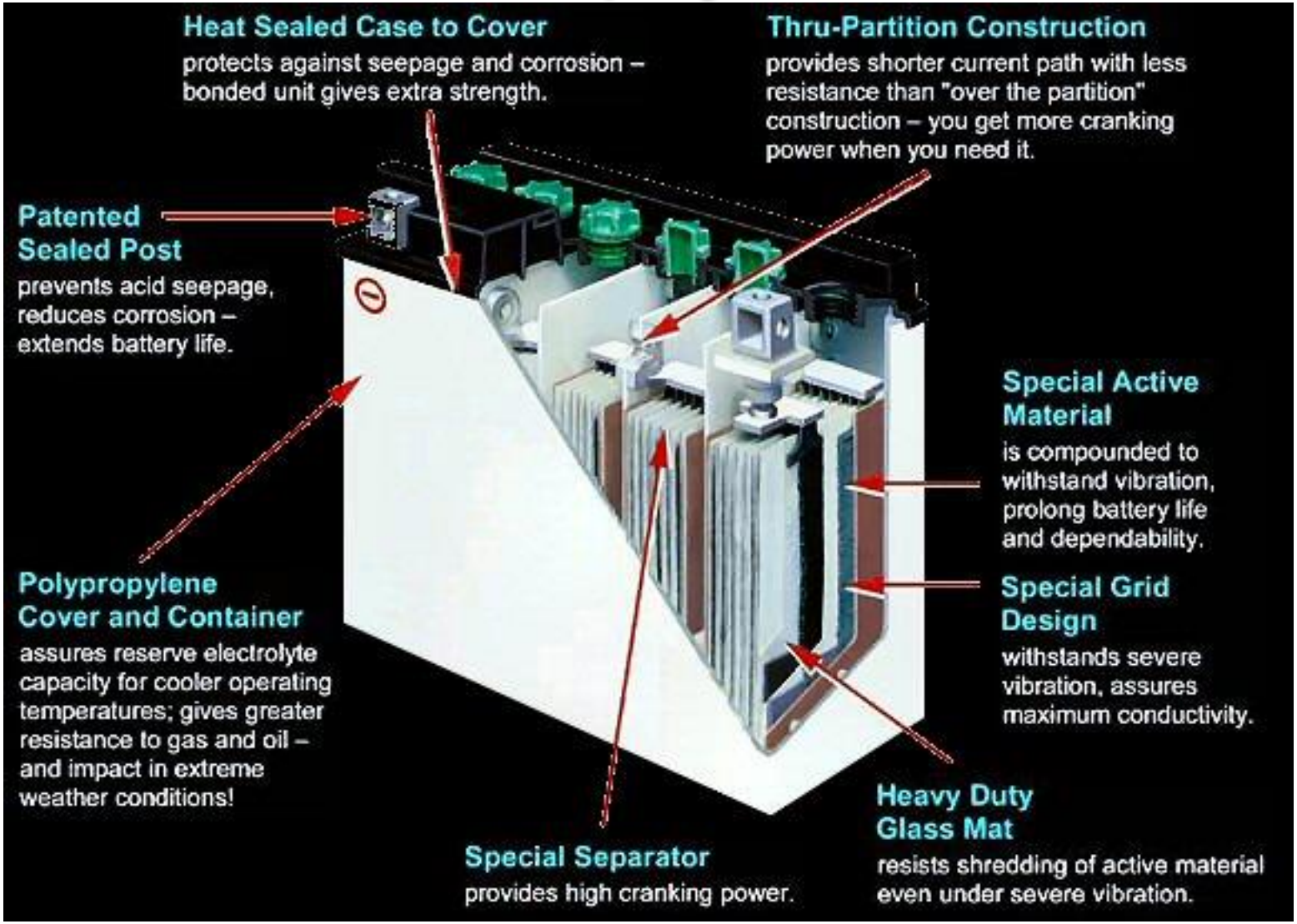
Оловне батерије

- Најраспрострањеније због своје цене
- Нису малих димензија
- Поуздане су
- Напон по ћелији око 2 V
- Јако мала унутрашња отпорност

$$R = \text{no. of cells} \times \frac{0.022}{C_{10}}\Omega$$

- C_{10} представља капацитет за 10 сати
- Број ћелија се може добити уколико се номинални напон батерије подели са 2V

Оловне батерије



Оловне батерије

Оловне батерије

- Приликом хемијских процеса који се дешавају у батерији, појављују се и споредне реакције
- Додатни елементи који се ослобађају приликом хемијске реакције јесу водоник и кисеоник
- То доводи до процеса самопражњења. Колико брзо се дешава самопражњење зависи од температуре ћелије, чистоће компонената које се користе, укључујући електроде и електролит.
- Што се брже батерија празни/пуни то ће производња нежељеног водоника и кисеоника бити већа
- Оно што је битно јесте да током процеса пражњења хемијска рекација не одиграва истом брзином у свим ћелијама. То значи да ће се толерисати да неке ћелије буду “препуњене”, како би се све ћелије напуниле

Оловне батерије

- Када дође до процеса “препуњавања”, нормална појава јесте губитак течности тј. воде и њено разлагање на кисеоник и водоник
- Код старијих изведби батерија, водоник и кисеоник су испуштани напоље и као последица тога повремено је требало досипати воду у електролит како би се избегло сушење батерије
- У савременим батеријама које су запечаћене за овим нема потребе, чак и није могуће то урадити. Гас остаје заробљен у кућишту и користи се за рекомбинацију и касније за поновно стварање воде. Оно о чему је потребно водити рачуна јесте брзина стварања водоника и кисеоника, како би сав гас могао да се рекомбинује

Животни век и одржавање

- Код савремених батерија није потребно никакво одржавање електролита
- Ипак кућиште није баш скроз запечаћено, постоји вентил који служи за испуштање гасова при одређеном притиску, уколико дође до такве ситуације. Тај губитак течности је неповратан, и немогуће је надокнадити
- Овај вентил је ту из сигурносних разлога
- Ослобађање гасова се може десити и уколико је напон пуњења сувише велики, тако да треба водити рачуна и о номиналном напону пуњења батерије
- Поред свих ових предности, то не значи да ће ове врсте батерија трајати доживотно

Животни век и одржавање

- Иако нема губитка течности, код ових врста батерија постоји много додатних ефеката који могу утицати на смањење њиховог животног века
- Најпознатији од свих је СУЛФАЦИЈА. Дешава се када се батерија дуже време излаже само пражњењу (нпр. две недеље)
- Сулфат олова се таложи на електродама и претвара се у кристале, који се касније тешко поново регенеришу у олово и оловну киселину. Ово ставара изолациони слој око електрода. Некад се спорим пуњењем ова изолација може разбити, а у већини случајева нема помоћи
- Уколико се води рачуна да батерија може имати јако дугачак животни век
- Међутим, постоје проблеми на које се не може утицати

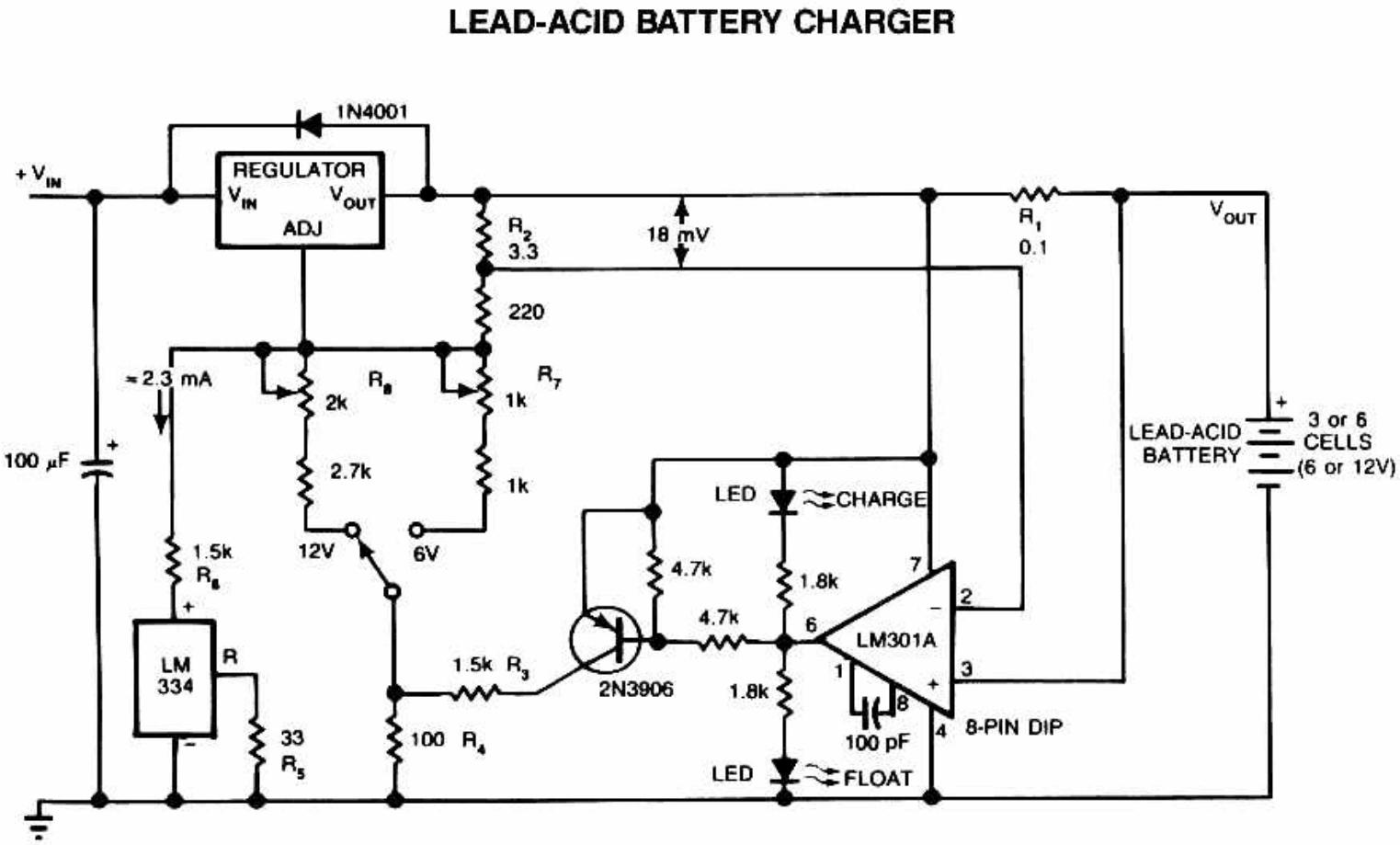
Животни век и одржавање

- Корозија на електродама доводи до тога да се временом унутрашња отпорност батерије повећава, док се на крају може десити да дође до потпуног раздвајања контаката
- Све ово значи да је животни век батерије око 700 циклуса, или 7-8 година

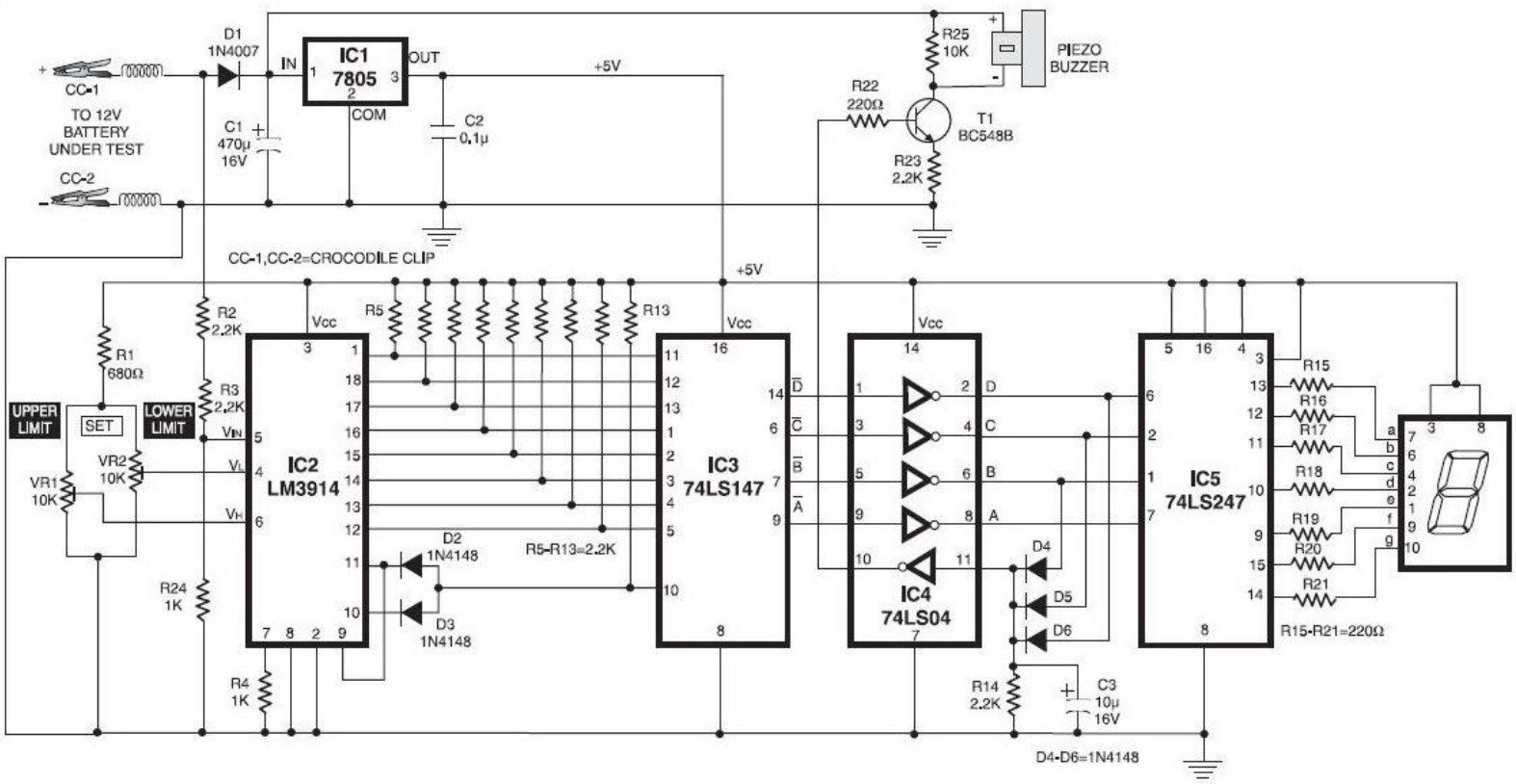
Пуњење батерија

- Пуњење батерије је сложен процес. Уколико се не извршава прописно и не поштују норме произвођача то доводи до смањења животног века батерије
- Најбоља техника пуњења оловних батерија јесте тзв. техника вишестепеног пуњења – батерија се напуни до одређеног нивоа, затим се искључи довод струје, када напон падне на нови задати напонски ниво поново се укључује напајање. Проблем је што ти предодређени напони зависе од конкретне врсте батерија и произвођача
- Предност је што су то најраспрострањеније батерије тако на тржишту има доста добрих пуњача ових батерија

Пуњење батерија



Пуњење батерија – процес надгледања



Закључак – оловне батерије

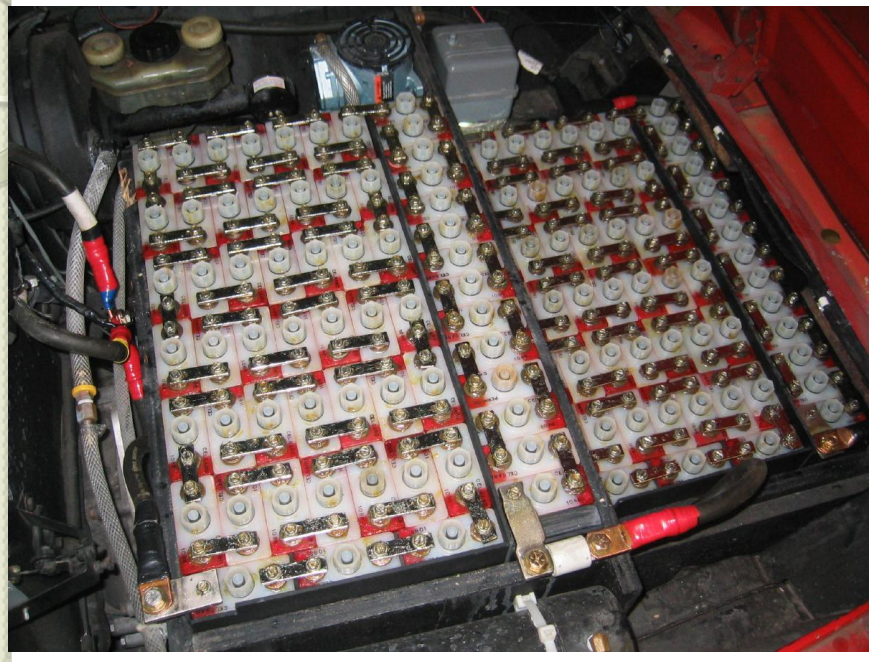
- Најјефтиније пуњиве батерије по kWh и остаће тако у догледној будућности
- Мала специфична енергија, те се стога не могу користити у возилима која су намењена да прелазе веће раздаљине
- Погодне за примену у хибридним возилима
- Међутим, у данашње време постоје друге врсте батерија којима се даје предност

Батерије засноване на никлу

- Постоји доста врста батерија које користе никл као материјал за позитивну електроду
- Nickel – Iron
- Nickel – Zinc – добре карактеристике, али кратак животни век
- Nickel – Cadmium батерије
- NiMH – батерије које највише обећавају

Nickel-Cadmium батерије

Nickel-Cadmium батерије



- Alfa romeo – електрична верзија
- 118 батерија везаних на ред које дају 142V

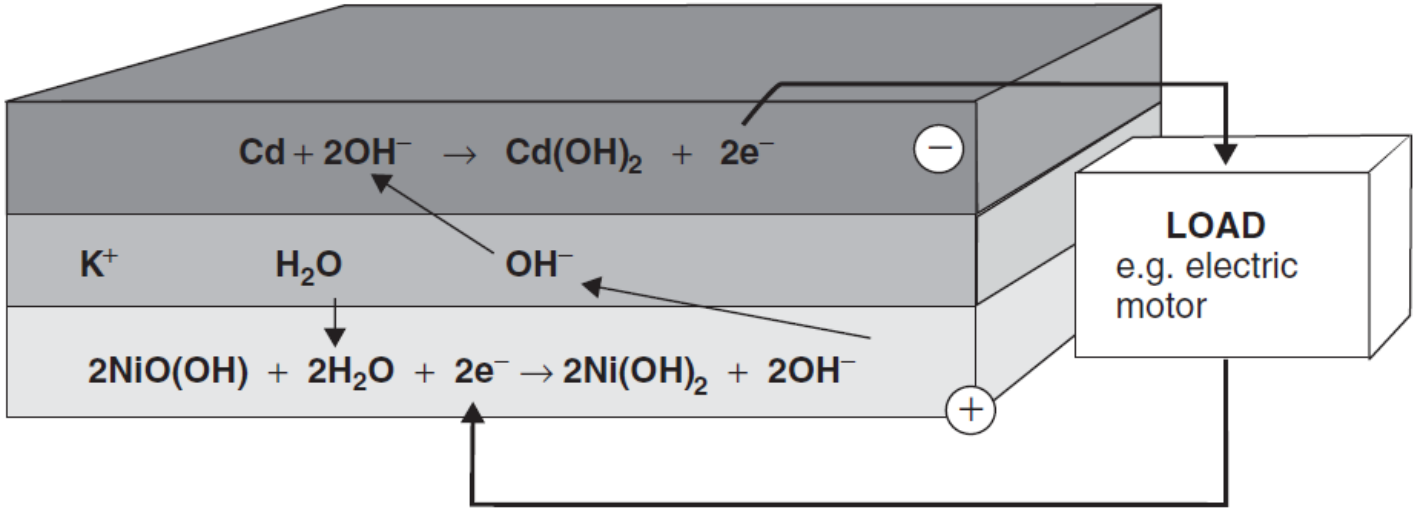
Nickel-Cadmium батерије

- Electric Porsche 914

Nickel-Cadmium батерије

- У односу на Lead – Acid (оловне) батерије имају двоструко већу специфичну енергију.
- Хемијска реакција:

$$Cd + 2\,NiOOH + 2\,H_2O \leftrightarrow Cd(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2$$



Reactions during the **discharge** of the NiCad battery.
Note that the electrolyte loses water, becoming more concentrated.

Nickel-Cadmium батерије

- Висока специфична снага
- Дуг животни век – преко 2500 циклуса
- Широк спектар радних темепература (-40°– 80 °)
- Мали индекс самопражњења
- Дугорочна стабилност
- Може се правити у различитим облицима и димензијама
- Није једноставно направити батерију већих димензија због чега се ређе користе у електричним аутомобилима
- Радни напон сваке ћелије је 1.2 V, што значи да је за напон од 12 V потребно повезати 10 ћелија на ред
- Ово је уједно објашњење зашто су ове батерије скупље
- Поред овога, цена кадмијума је вишеструко већа од цене Олова. Такође, кадмијум је канцероген и погубан по околину

Nickel-Cadmium батерије

- Цена им је око три пута већа од цене оловних батерија, али треба имати у виду да им је животни век знатно дужи,тако да се то на неки начин компензује
- Поред свих набројаних карактеристика, користе се у одређеним ел. возилима као што су електричне верзије Peugeot 106, Citroen AX, Renault Clio, Ford
- Уопштене карактеристике су приказане у табели:

Table 3.2 Nominal battery parameters for nickel cadmium batteries

Specific energy	40–55 Wh kg^{-1} depending on current
Energy density	70–90 Wh l^{-1} depending on current
Specific power	~125 W kg^{-1} before becoming very inefficient
Nominal cell voltage	1.2 V
Amphour efficiency	Good
Internal resistance	Very low, ~0.06 Ω per cell for a 1 Ah cell
Commercially available	Good in smaller sizes, difficult for larger batteries
Operating temperature	−40 to +80 °C
Self-discharge	0.5% per day, very low
Number of life cycles	1200 to 80% capacity
Recharge time	1 h, rapid charge to 60% capacity 20 min

Nickel-Cadmium батерије

- Процес пражњења је сличан као код оловних батерија.
- Пуне се константном једносмерном струјом, степенасто као што је то био случај код оловних батерија
- Ове врсте батерија се “паметно” боре са појавама које се дешавају приликом препуњавања.
- Нема споредних ефеката, и сви електрони се и рекомбинују, тако да нема водоника и кисеоника као што је то био случај са оловним батеријама.
- Појава преоптерећења може трајати практично неограничено дуго, једини проблем је губитак енергије. Што се тиче батерије, на њу то не утиче

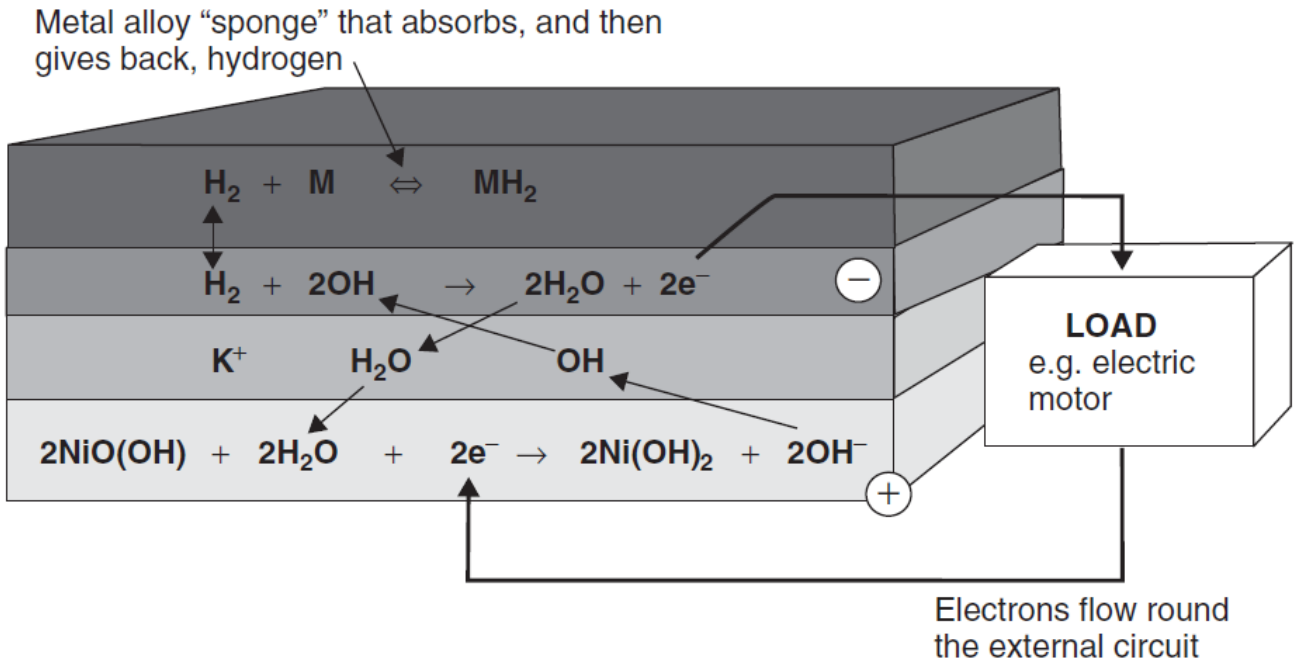
Nickel-Cadmium батерије

$$R = \text{no. of cells} \times \frac{0.06}{C_3}\,\Omega$$

- Унутрашња отпорност је мала, али не тако мала као код оловних батерија
- Отпорност је већа услед већег коефицијента с једне стране, и већег броја ћелија са друге стране

Nickel Metal Hydride батерије

- NiMH батерије се слично понашају као NiCad батерије, с главном разликом што код NiMH батерије на негативној електроди се користи водоник, који је абсорбован у метал хидриду. На овај начин нема потребе за кадмијумом што је огромна предност
- Негативна електрода се понаша исто као горивна ћелија



Nickel Metal Hydride батерије

- Са становишта густине енергије и густине снаге NiMH батерије су у благој предности у односу на NiCad
- Номинални напон ћелије је 1.2 V
- Предност у односу на NiCad батерије је и могућност бржег пуњења, чак се може пунити толико брзо да је потребно обезбедити додатно хлађење

Table 3.3 Nominal battery parameters for nickel metal hydride batteries

Specific energy	~65 Wh kg^{-1} depending on power
Energy density	~150 Wh l^{-1}
Specific power	200 W kg^{-1}
Nominal cell voltage	1.2 V
Amphour efficiency	Quite good
Internal resistance	Very low, ~0.06 Ω per cell for a 1 Ah cell
Commercially available	A good range of small cells, traction batteries difficult to obtain
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Poor, up to 5% per day
Number of life cycles	~1000 to 80% discharge
Recharge time	1 h, rapid charge to 60% capacity 20 min

Nickel Metal Hydride батерије

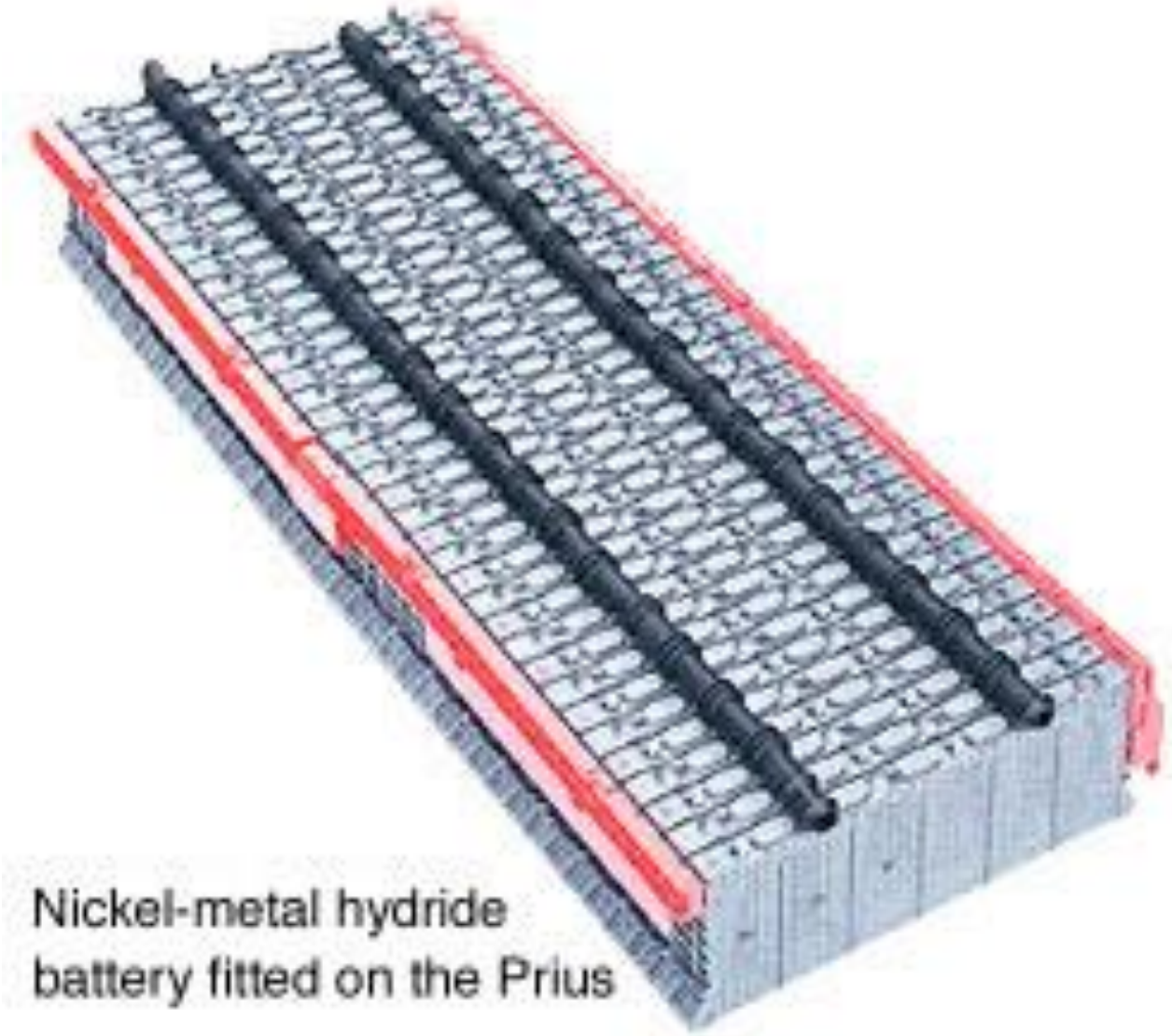
- Уколико се примењују за електричне и хибридне аутомобиле, хлађење је неопходно
- Хлађење се обично изводи помоћу вентилатора
- У скутерима, ел. бициклима нема потребе за хлађењем

Nickel Metal Hydride батерије

Nickel Metal Hydride батерије

- Ово су батерије које се највише користе код електричних и хибридних возила
- Користе се код Toyota Prius хибридног аутомобила
- Цена им је још увек доста велика, али се очекује да са порастом тражње цена падне у наредним годинама
- Систем за управљање батеријом (Battery management system) је задужен да се батерија пуни/празни на најефикаснији могући начин

Nickel Metal Hydride батерије



Nickel-metal hydride battery fitted on the Prius

Nickel Metal Hydride батерије

Ni-MH baterija: 28 serijski vezanih paketa po 7,2 V = 202 V; 6,5 Ah; 30 kg; trajnost 300.000 km.

Батерије засноване на натријуму (Sodium battiries)

- Течни натријум се користи за негативну електроду
- Ове батерије раде на високим температурама
- Имају интересантну особину да користе једну или више течних електрода у форми течног натријума и коришћењем чврстог керамичког електролита
- Због потребе да раде на високој температури практичне су једино за велике система, као што су електрични и хибридни аутомобили и аутобуси
- Нису погодни за скутере и бицикле

Sodium sulphur batteries

- Натријум сумпорне батерије
- Раде на температурама између 300° и 350°
- Кућиште мора бити специјално изоловано како би се унутар њега одржавала температура
- Ове батерије имају велику специфичну енергију, чак 6 пута већу од оловних батерија, али маса кућишта која је задужена за температура знатно увећава њихову масу
- Проблем сигурности

Specific energy	100 Wh kg^{-1} (potentially 200 Wh kg^{-1})
Energy density	150 Wh l^{-1}
Specific power	200 W kg^{-1}
Nominal cell voltage	2 V
Amphour efficiency	Very good
Internal resistance	Broadly similar to NiCad
Commercially available	Not on the market at all
Operating temperature	300–350 °C
Self-discharge	Quite low, but when not in use energy must be supplied to keep the battery warm
Number of life cycles	~1000 to 80% capacity
Recharge time	8 h

Sodium metal chloride(ZEBRA) batteries

- ZEBRA – zero emissions battery research association
- Сви недостаци везани за безбедност код претходних батерија су овде решени
- Напон ћелије је 2.5 V, али мана је што приликом процеса пражњења брзо пада до 1.6 V
- Велика специфична енергија

Table 3.5 Nominal battery parameters for sodium metal chloride (Zebra) batteries

Specific energy	100 Wh kg^{-1}
Energy density	150 Wh l^{-1}
Specific power	150 W kg^{-1}
Nominal cell voltage	~2 V average (2.5 V when fully charged)
Amphour efficiency	Very high
Internal resistance	Very low, but higher at low levels of charge
Commercially available	Available commercially, but very few suppliers
Operating temperature	300–350 °C
Self-discharge	When not in use energy must be continually used to keep the battery up to temperature, corresponding to a self-discharge of about 10% per day
Number of life cycles	>1000
Recharge time	8 h

Sodium metal chloride(ZEBRA) batteries

- Проблем – велика радна температура 320°
- Температура се одржава кућиштем од двоструког нерђајућег челика са 2-3 cm изолационог вакума између слојева
- Морају стално бити прикључене на извор напајања како би одржавале температуру што им је главна мана

Sodium metal chloride(ZEBRA) batteries

- Пример батерије 17.8 kW
- Троши око 100 W на одржавање топлоте и кад не ради, што на дневном нивоу износи 2.4 kW, што износи 13% енергије → велики индекс самопражњења

Lithium batteries – литијумске

- Ове батерије имају већу густину енергије у односу на све остале пуњиве батерије
- Цена ових батерија је доста велика, али бележи тенденцију пада
- The Lithium Polymer батерије
- The Lithium Ion батерије (Литијум јонске)
  - Јони литијума се крећу између аноде и катоде формирајући ел. струју
  - Основне компоненте ових батерија су анода, катода и електролит. Анода се прави од угљеника, катода је неки метални оксид, а електролит су соли литијума у растворeном стању
  - Најчешће коришћени материјал за аноду је графит, док се катода прави најчешће од LiCo оксида или LiFe тј. литијум фосфата
- У зависности од избора материјала, напон ћелије, капацитет, безбедност и животни век се могу драматично разликовати

Lithium batteries – литијумске

- Ове батерије су мањих димензија у односу на остале
- У почетку су се највише користиле за потрошачку електронику, међутим данас полако заузимају своје место и код примене у ел. возилима

Specific energy	140 Wh kg^{-1}
Energy density	250–620 Wh l^{-1}
Specific power	300–1500 W kg^{-1}
Nominal cell voltage	3.5 V
Amphour efficiency	Very good
Internal resistance	Very low
Commercially available	Larger LIBs have become the standard battery for electric road vehicles
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Very low, ~10% per month
Number of life cycles	>1000
Recharge time	2–3 h, but can be charged to 80% of their capacity in under 1 h

Lithium batteries – литијумске

- Приликом процеса пуњења неопходна је тачна контрола напона пуњења. Уколико је већи од дозвољеног може доћи до уништења батерија, а уколико је мањи, до неефикасног пуњења
- Због своје мале тежине погодне су за примену у ел. возилима
- Специфична енергија је око 3 пута већа од нпр. оловних батерија, што значи да могу имати већу аутономност
- Цена доста висока, мада у последње време осетан пад цене и примена у ел. возилима
- Пример примене:
  - Nissan Leaf, Mitsubishi MiEV, Tesla Roadster, Chevrolet Volt
  - Nissan Leaf – има батерију капацитета 24 kWh, док је специфична енергија ћелија 140 $Whkg^{-1}$.Предвиђа се да ће 2015. године то бити повећано на 200 $Whkg^{-1}$

Lithium batteries – литијумске

- Nissan Leaf – батерије

Metal Air Batteries

- Ове батерије се не могу пунити на једноставан начин, простом променом смера електричне струје
- Електроде које су од метала се троше и временом се морају заменити
- Поред овога и електролит се с времена на време мора заменити

The Aluminium Air батерије

- The Aluminium Air батерије – алуминијум реагује са кисеоником из ваздуха и водом и алуминијум хидроксида ослобађајући ел. енергију приликом тог процеса
- Алуминијум формира негативну електроду, дебљине око 1 cm. Временом она постаје све тања и тања

Aluminium Air Batteries

- Главни недостатак је јако мала специфична снага, нпр. батерија тежине 100 kg може дати свега 1000 W у једном тренутку, што је недовољно за ел. возила. Нпр. за 20 kW потребно је имати батерију масе 2000 kg, што је свакако недопустиво

Specific energy	225 Wh kg^{-1}
Energy density	195 Wh l^{-1}
Specific power	10 W kg^{-1}
Nominal cell voltage	1.4 V
Amphour efficiency	n/a
Internal resistance	Rather high, hence low power
Commercially available	Stationary systems only available
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Very high (>10% per day) normally, but the electrolyte can be pumped out, which makes it very low
Number of life cycles	1000 or more
Recharge time	10 min, while the fuel is replaced

Zinc Air Batteries

- Доста су сличне алуминијумским, само са главном разликом што су им карактеристике доста боље
- Специфична снага ових батерија је око 10 пута већа од алуминијумских
- Негативна електрода је у форми чврстог цинка
- Реакција је иста као код алуминијумских
- Могуће је да буде и реверзибилна, али у том случају је одликује јако мали број циклуса пражњење/пуњење
- Боља опција је замена електроде након што се потроши, електрода се враћа назад у фабрику на репарацију – проблем је непостојање одговарајуће инфраструктуре

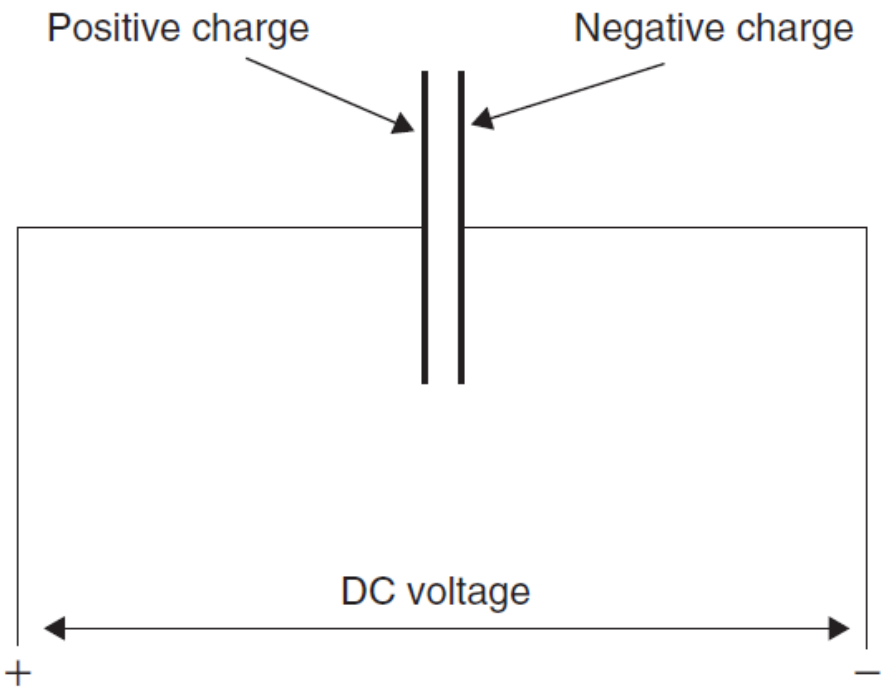
Zinc Air Batteries

- Имају мали индекс самопражњења што их чини погодне за примене где се то захтева
- Нису пуно заступљене на тржишту али се види њихов потенцијал, пре свега због огромне аутономности

Specific energy	230 Wh kg^{-1}
Energy density	270 Wh l^{-1}
Specific power	105 W kg^{-1}
Nominal cell voltage	1.2 V
Amphour efficiency	Not applicable
Internal resistance	Medium
Commercially available	Very few suppliers
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	High as electrolyte is left in cell
Number of life cycles	>2000
Recharge time	10 min, while the fuel is replaced

Суперкондензатори

- Суперкондензатору су кондензатори већег капацитета који се могу користити за складиштење енергије
- Кондензатори су елеметни који имају две проводне електроде које су одвојене одговарајућим диелектриком



Суперкондензатори

$$Q = C \times V$$

- Да би имали велику количину наелектрисања ускладиштену у кондензатору потребно је да капацитивност буде што је могуће већа. Енергија ускладиштена у кондензатору се може израчунати као :

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

- Капацитивност кондензатора се одређује помоћу релације:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

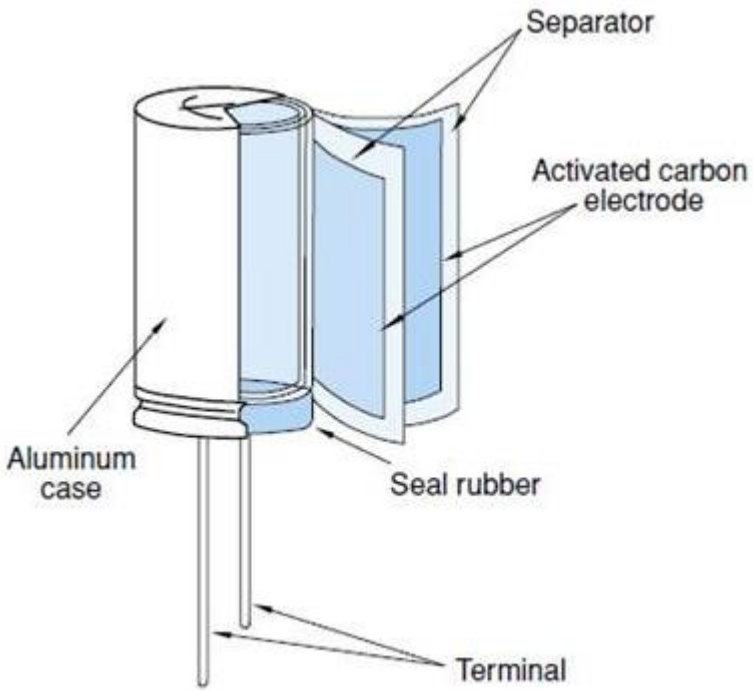
- Кључ данашњих суперкондензатора огромних капацитивности јесте јако мало растојање између електрода, као и велике површине електрода

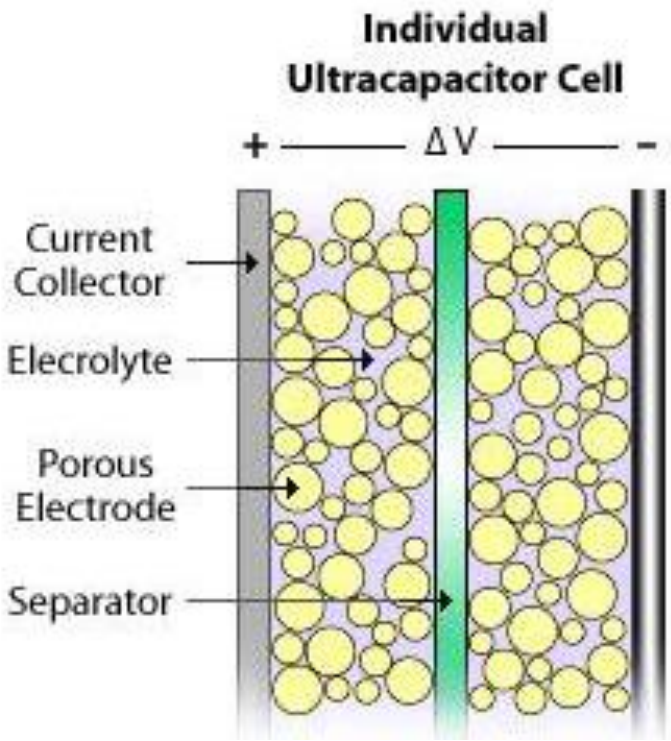
Суперкондензатори

- Предности суперкондензатора:
  - Велика густина енергије која се складишти
  - Мала еквивалентна унутрашња отпорност
  - Велика густина снаге
  - Могућ рад и при нижим температурама, чак и на - 40°
  - Брзо пуњење и пражњење

Суперкондензатори

- Мане суперкондензатора:
  - Мали напон по ћелији, свега 2,7 V. Како је напон у возилу знатно већи од тога неопходно је спајање на ред
  - Не може се користити у наизменичним, нити у високофреквентним колима
- Дизајн





Суперкондензатори

- Да би се добио већи напон ови кондензатори се морају везивати на ред. Ово повећава цену система и доводи до значајно сложеније технологије

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

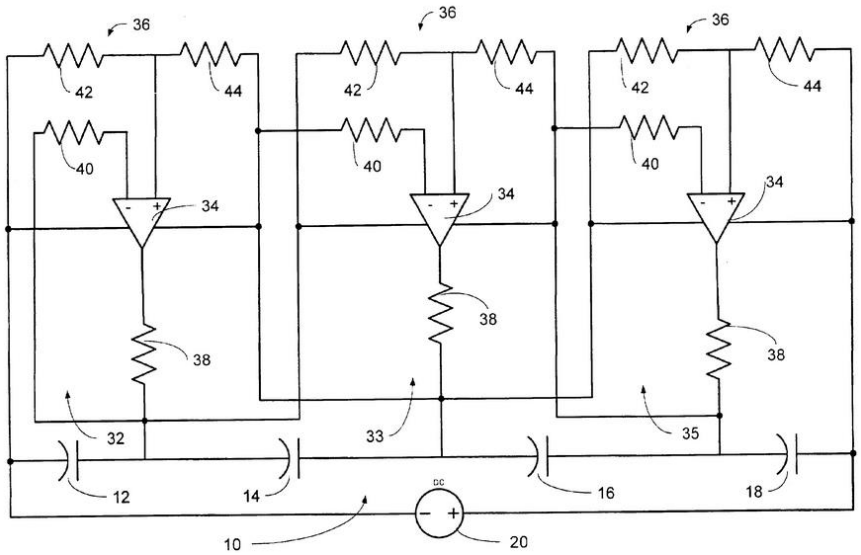
- Приликом везивања кондензатора на ред капацитивност опада, али енергија расте, зато што напон у изразу за енергију утиче са квадратом

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

- Други проблем који се појављује приликом повезивања кондензатора на ред јесте напон на сваком појединачном кондензатору. Очекивано је да сваки кондензатор има подједнако наелектрисање. Међутим, због несавршености материјала то неће бити случај

Суперкондензатори

- Као последица тога могуће је да се на неком кондензатору појави напон већи од дозвољених 3 V, што може довести до уништења кондензатора
- Као решење за ово јесте коришћење кола за изједначавање потенцијала/наелектрисања. То је систем који се поставља на пар кондензатора који стално надгледа напон суседних ћелија и врши прерасподелу наелектрисања у циљу изједначавања потенцијала



Суперкондензатори

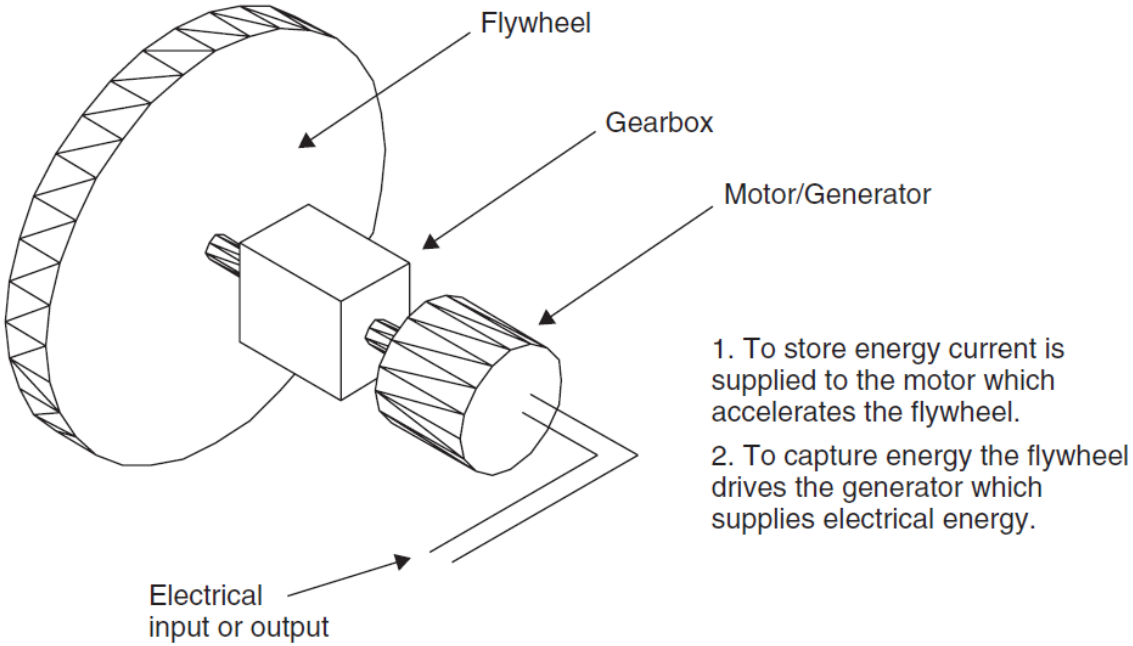
4. This is an actual series string of 18 1700-F ultracapacitors that have active balancing. A 94-F capacitor with a voltage rating of 48 V dc results.

Суперкондензатори

- Коло за изједначавање потенцијала поскупљује суперкондензаторе, али се мора користити
- То коло такође троши енегију, али је та потрошња сведена на минимум и скоро је занемарљива
- Користе се доста код аутобуса
  - Пример аутобуса који има суперкондензаторе може прећи око 5 километара без пуњења

Замајци

- Најпростији замајац – диск који се врти око своје осе. У њему је ускладиштена одређена количина кинетичке енергије. Када диск успорава кинетичка енергија се ослобађа
- Повезивањем ел.генератора директно са ротационим диском та менахничка енергија се претвара у електричну
- Претварач енергетске електронике је неопходан како би се енергија прилагодила употреби у ел. возилима



Замајци

- Замајац би се могао директно повезати са точковима преко квачила и одговарајуће мењачке кутије. Када би возило успоравало енергија се из замајца претвара у електричну (нпр. рекуперативно кочење), а када убрзава, енергија се складишти у замајцу
- Ускладиштена енергија у замајцу се може израчунати као:

$$E = 0.5 I \omega^2 \qquad \Delta E = 0.5 I (\omega_1^2 - \omega_2^2)$$

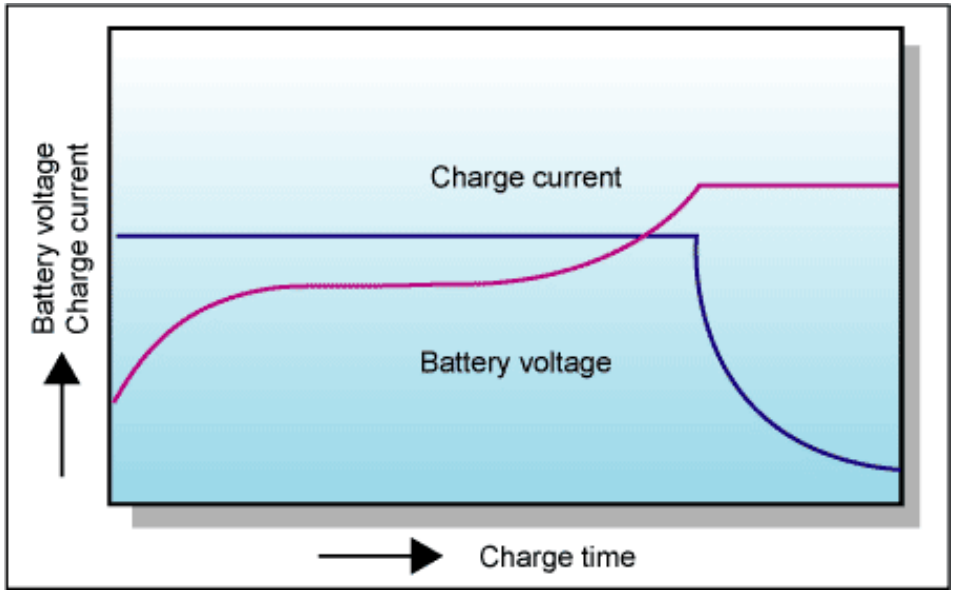
- Енергија која се може ускладиштити у замајцу одређена је механичким својствима материјала од кога је замајац направљен (од тога зависи максимална брзина која се може постићи)
- Предност замајаца јесте велика специфична снага, једноставно је извући енергију из њих
- Једноставне су конструкције и доста су поуздани
- Мана им је мала специфична енергија

Замајци

- Доста покушаја је направљено како би се повећала специфична енергија:
  - Коришћени су супер чврсти материјали како би могли да се обрћу већим брзинама
  - Замајци се врте у кућишту које је вакумирано или испуњено инертним гасом како би се смањили губици услед трења
  - Могу се користити и магнетни лежајеви како би се избегао било какав физички контакт
- Безбедностни ефекат – ризик од “експлозије”, ризик од излетања из лежишта
- Не може се користити као једини извор енергије
- Обично се користи код аутобуса и трамваја како би се поспешио процес регенеративног кочења

Пуњење батерија

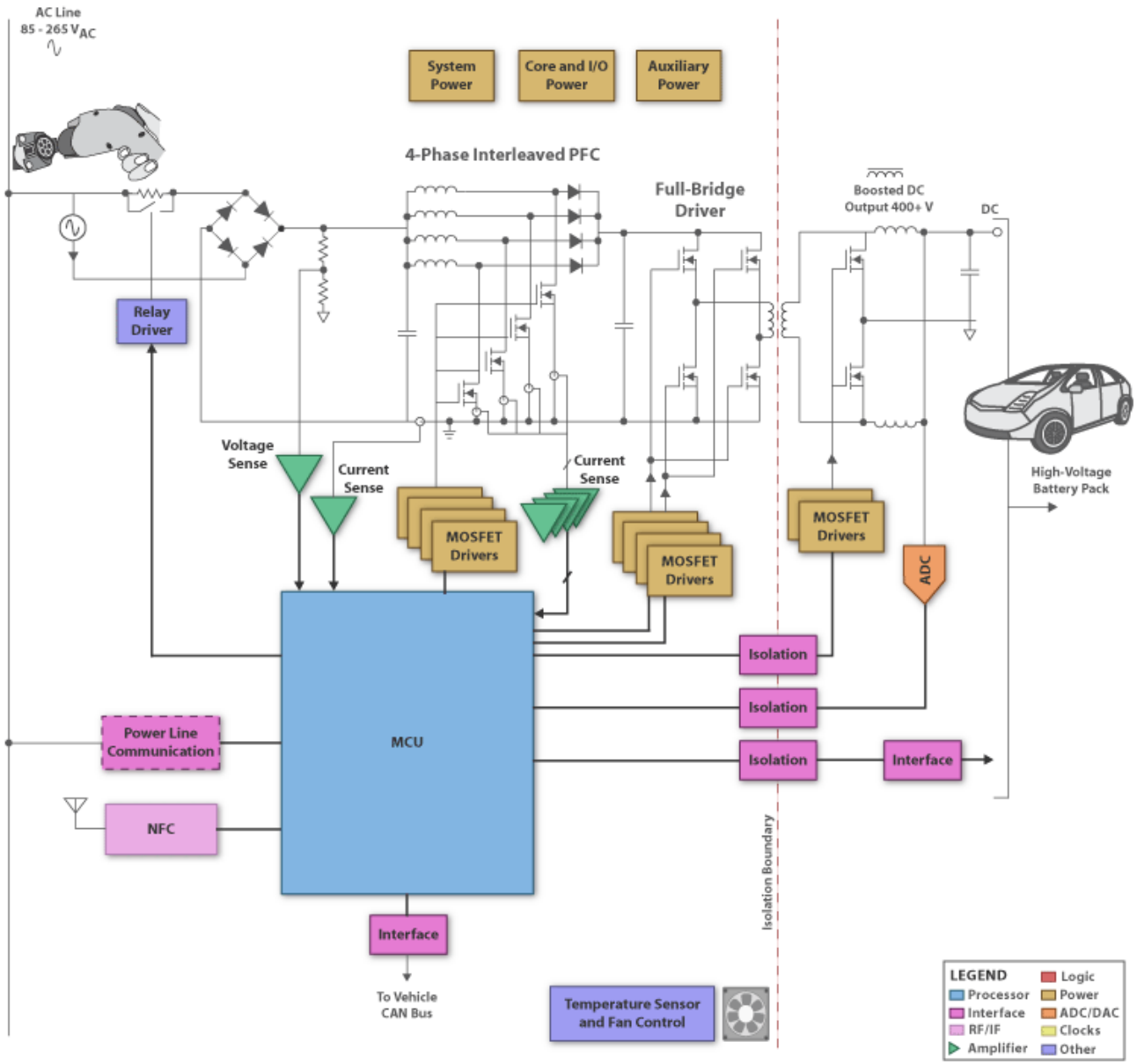
- Пуњач батерија - један од кључних елемената инфраструктуре за ел. аутомобиле
- Пуњење батерије се обавља у две фазе. У првој фази се батерија напуни на 90 – 95 % капацитета. У другој фази се врши процес током којег се електрохемијски процеси стабилишу
- У првој фази струја пуњења је константна, а у другој фази је напон константан



Подела пуњача

- Нормално пуњење
- Полу-брзо пуњење
- Брзо пуњење
- Брзо пуњење је добро са становишта времена потребно за пуњење, али мана је цена инфраструктуре, тешко је остварити финално пуњење.
- Амерички систем се разликује од европског, пре свега у напону мреже, што утиче на саме карактеристике пуњача
- Такође, у зависности од снаге треба разматрати да ли се пуњач качи на трофазну или монофазну мрежу
- Нормално пуњење (230V, 16 A) је најзаступљеније, јер свака кућа има такав прикључак
- Полубрзо пуњење (230V, 32 A)

Блок дијаграм пуњача



Избор батерије

- Поређење тренутно комерцијално доступних батерија

Battery	Specific energy ($Wh\,kg^{-1}$)	Energy density ($Wh\,l^{-1}$)	Specific power ($W\,kg^{-1}$)	Current cost
Lead acid	30	75	250	0.5
NiCad	50	80	150	1.5
NiMH	65	150	200	2.0
Zebra	100	150	150	2.0
Li ion	150	150	300	3.0
Zinc–air	230	270	105	?

The cost figure is an arbitrary unit for broad comparative purposes; all the other figures are also very much guidelines only. We have explained that all such performance figures depend on how the battery is used.

- Нпр. уколико се не захтева велика специфична енергија као што је нпр код возила за голф, или инвалидских колица, који се могу пунити преко ноћи оловне батерије су прави избор
- NiMH батерије су добар избор када се захтева већа раздаљина и боље карактеристике. Ове батерије се могу често пунити те су згодне за примену код хибридних аутомобила, где често постоји потреба за допуњавањем

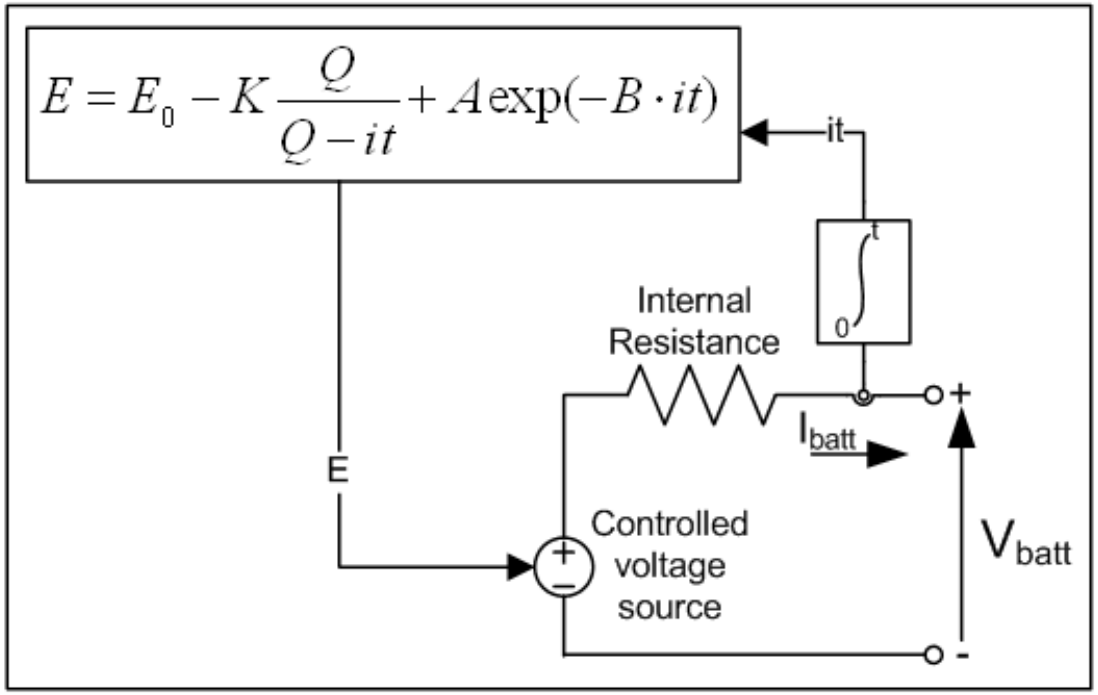
Избор батерије

- ZEBRA батерије нпр. нису згодне за ел. возила јер захтевају сталну високу темепературу. Уколико се возило не вози често то може да представља проблем.
- Li-ion батерије имају добру специфичну енергију, густину енергије и специфичну снагу те стога представљају добар избор за електирчна возила. Мана им је висока цена.

Батерије за хибридна ел. возила

- Код хибридних аутомобила потребно је да се батерија може брзо напунити
- То је за сада наметнуло примену NiMH батерија које се доста брзо и ефикасно пуне и празне
- Пример где се користе: Toyota Prius, Honda Insight
- У будућности ће се користити Li Ion (LIB) батерије
- Chevrolet Volt – користи Li ion батерије

Моделовање батерија



where,

E = No load voltage (V)

E_0 = Constant voltage (V)

K = Polarization voltage (V)

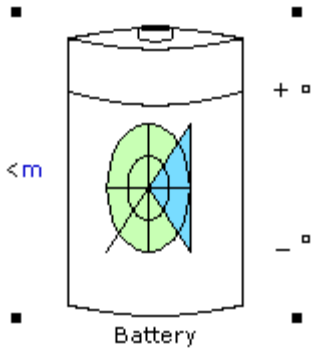
Q = Battery capacity (Ah)

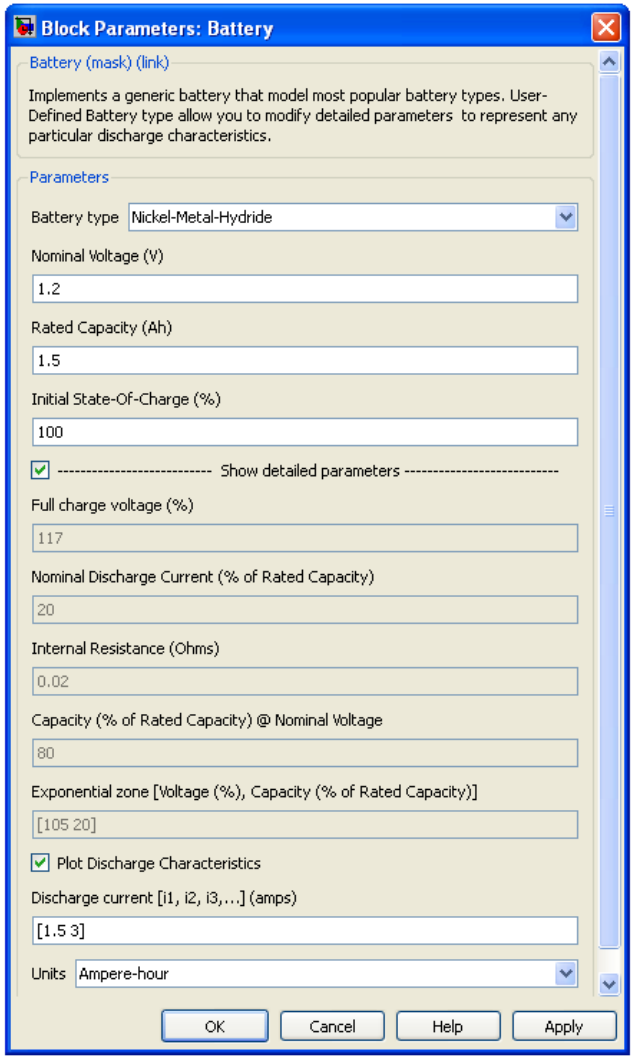
A = Exponential voltage (V)

B = Exponential capacity $(Ah)^{-1}$

Моделовање батерија

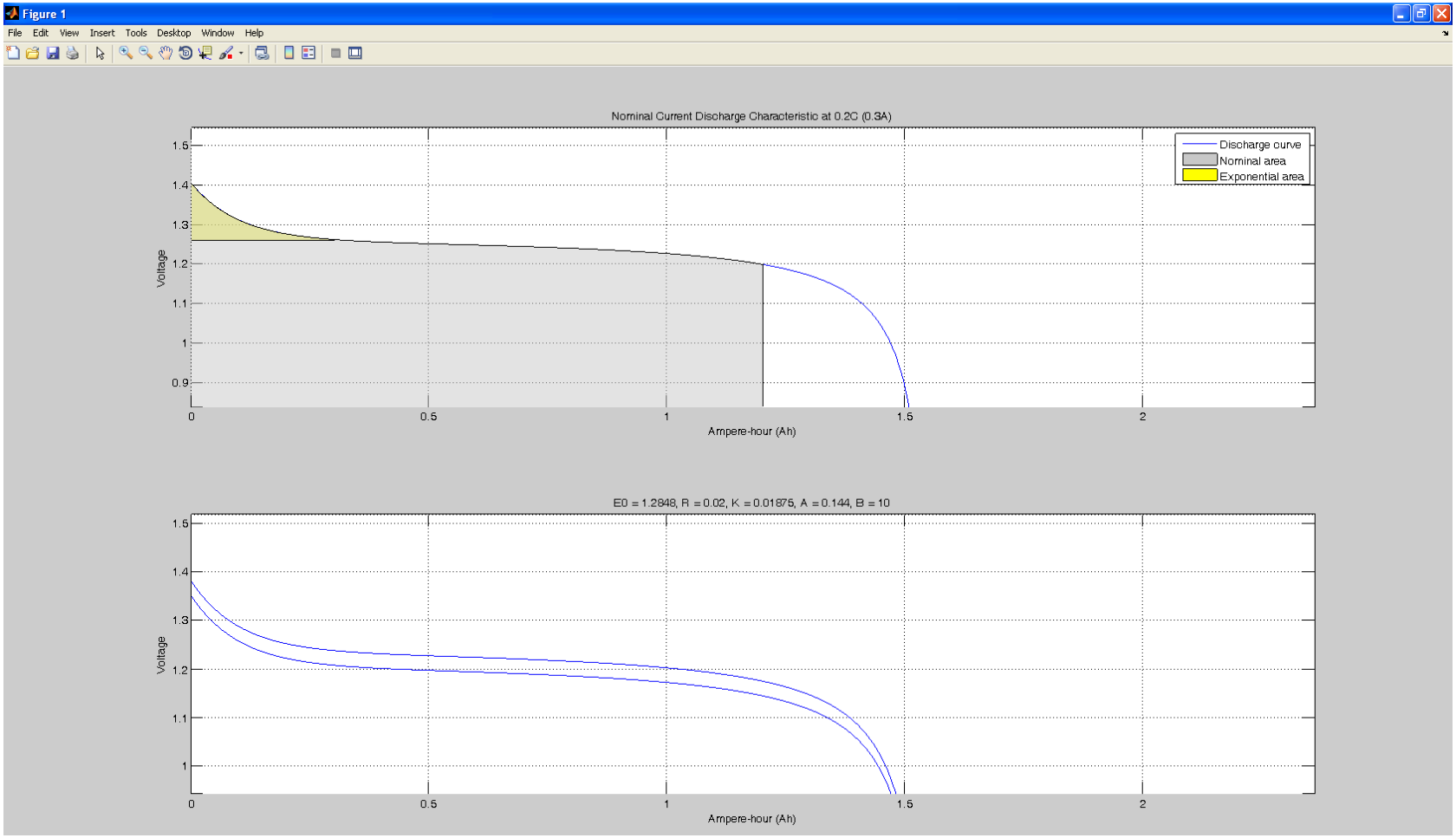
- Модел батерије у Sim Power Systems Toolbox -u





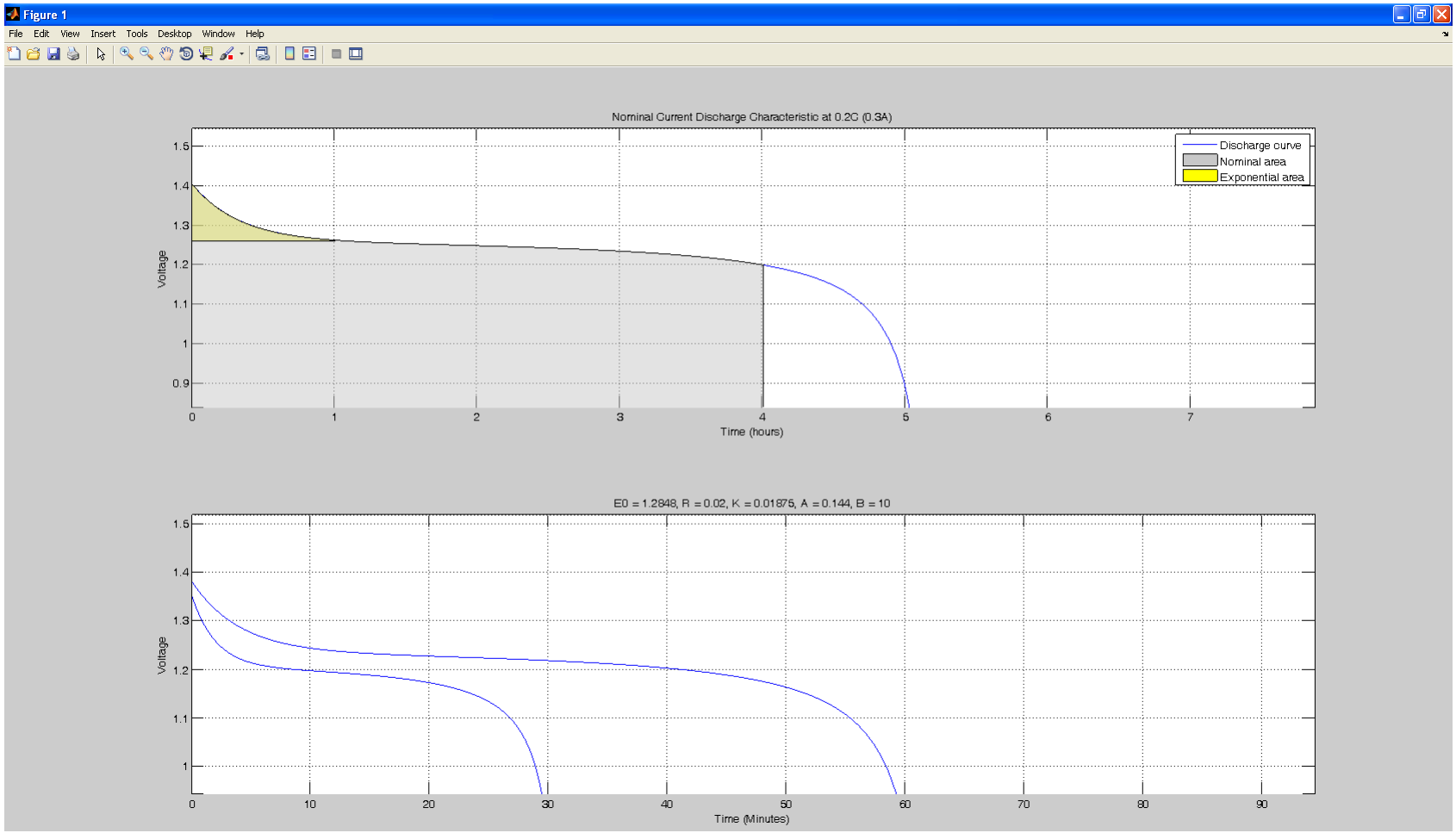
Моделовање батерија

- Модел батерије у Sim Power Systems Toolbox -u



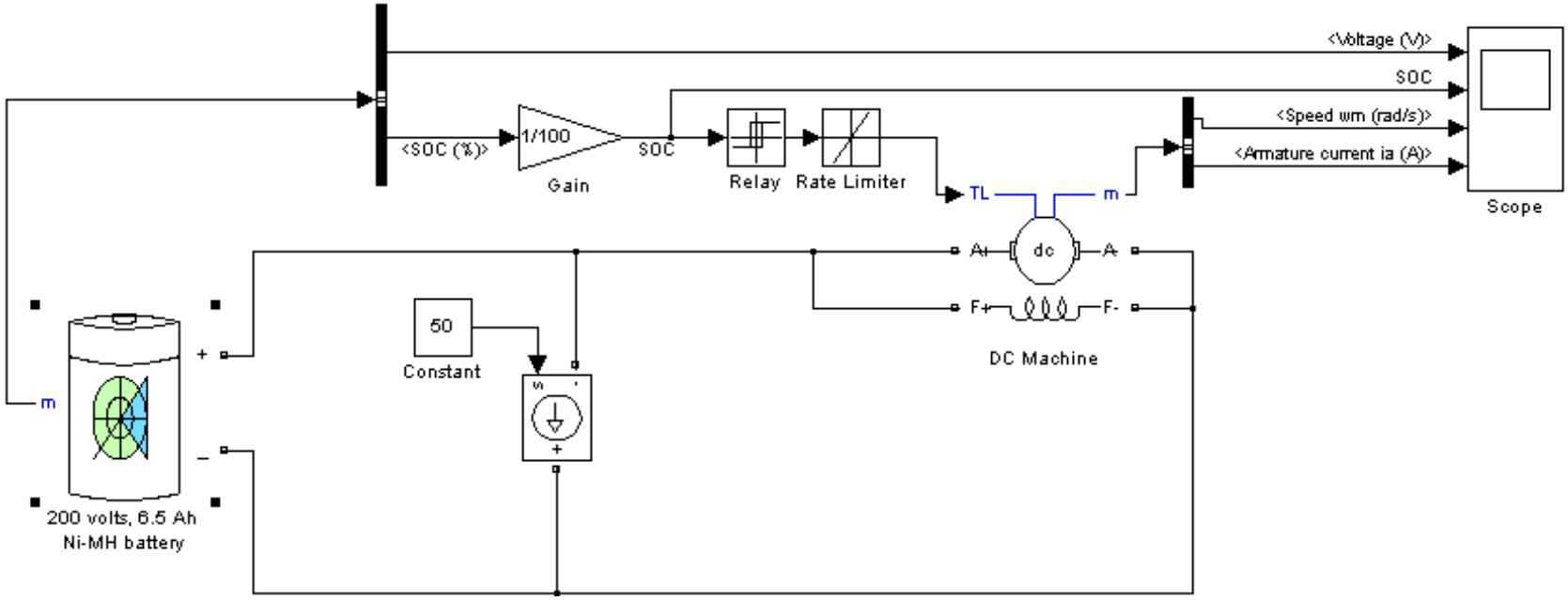
Моделовање батерија

- Модел батерије у Sim Power Systems Toolbox -u



Моделовање батерија

- Пример батерије за погон једносмерног мотора



Хибридна и електрична возила

Синхроне машине

Уводна разматрања

- Синхроне машине припадају групи наизменичних машина
- Принцип рада је различит у односу на асинхроне машине: ротор синхроних мотора се обрће брзином синхроног поља док ротор асинхроних мотора благо заостаје за синхроним пољем
- Као и код асинхроних машина обртно поље генеришу наизменичне струје кроз трофазни статорски намотај
- Статорско магнетно коло и намотај на статору су исти као код асинхроних машина
- Статорско обртно магнетно поље ротира брзином која је одређена угаоном учестаношћу (фреквенцијом) статорских струја, односно фреквенцијом напајања статорског намотаја
- Број пари магнетских полова за дату фреквенцију напајања такође одређује брзину обртања

Уводна разматрања

- Конструкција ротора синхроних машина се разликује у односу на асинхроне
- Ротор сихнроних машина може садржати побудни намотај или сталне магнете
- Ротор са побудним намотајем се напаја једносмерном струјом која ствара роторску магнетопобудну силу и роторски магнетни флукс
- Уместо побудног намотаја, ротор синхроних машина може садржати уграђене сталне магнете који стварају магнетни флукс ротора; тада на ротору не постоје намотаји
- Стога се може рећи да је ротор синхроних машина или електромагнет или стални магнет
- Положај роторског флукса једнозначно је одређен позицијом ротора

Уводна разматрања

- У нормалном раду, ротор се обрће синхроно са статорским пољем
- Електромагнетски момент које развија синхрона машина пропорционалан је векторском производу вектора статорског и роторског флукса
- Синхроно обртање ротора је разлог зашто ове машине носе назив синхроне машине

Принцип рада

- Као код асинхроних машина, и код синхроних машина кроз статорске намотаје протичу наизменичне струје
- Статорске струје стварају статорску магнетопобудну силу, $\boldsymbol{F}_S$, које се обрће брзином:

$$\Omega_e = \omega_e/p$$

- која се назива синхрона брзина
- Синхрона брзина је одређена угаоном учестаношћу статорских струја ω_e и бројем пари полова статорског намотаја p
- Статорска магнетопобудна сила ствара статорски флукс $\boldsymbol{\Phi}_S$ који зависи од њеног интезитета и отпора магнетског кола машине R_μ $\boldsymbol{\Phi}_S = \boldsymbol{F}_S/R_\mu$
- Флукс статора ротира истом брзином као и магнетопобудна сила статора

Принцип рада

- Ротор синхроних машина има уграђене сталне магнете или побудни намотај који се напаја једносмерном струјом
- У оба случаја роторски флукс $\boldsymbol{\Phi}_R$ има правац и смер одређен положајем ротора
- Роторски флукс ротира брзином ротора Ω_m
- Ако је $\Omega_m = \Omega_e$, вектори статорског флукса и роторског флукса ротирају истом брзином, не мењају свој међусобни релативни положај и одржава се угаони, фазни став између та два вектора константним
- Моменат и снага електромагнетске конверзије која тада наступа зависи од векторског производа та два вектора флукса
- Векторски производ зависан је од међусобног фазног става, угла између вектора флукса статора и ротора

Принцип рада

- Стога је електромагнетски момент синхроних машина сразмеран производу амплитуда вектора флукса статора и ротора, као и синусу угла између та два вектора
- Са константним амплитудама роторског и статорског флукса и константним међусобним положајем (углом између њих) и електромагнетски момент се одржава на константној вредности
- Рад синхроних машина захтева синхроно обртање статорског поља којег стварају статорске струје и роторског поља кога ствара побудни намотај или стални магнети

Статорски намотаји

- Статор сихнроних машина је исти као статор асинхроних машина
- Струјно коло на статоској страни има три одвојена дела који се називају статорски фазни намотаји или скраћено фазе статора
- Свака фаза (фазни намотај) се добија редним (серијским) везивањем већег броја навојака од бакарних проводника
- Навојци су распоређени дуж обима статора и смештени у одговарајуће жлебове
- Статорски жлебови су направљени са унутрашње стране статорског магнетног кола, према ваздушном зазору између статора и ротора
- Навојци одређене фазе су распоређени на синусоидалан начин дуж обима статора, што значи да постоји приближно синусоидална расподела густине проводника дуж обима статора (тежи се ка томе)

Статорски намотаји

- Идеална синусоидална расподела проводника дуж обима статора се не може постићи због ограниченог броја дискретно постављених жлебова
- Свака од три фазе има два прикључна краја
- На један крај сваке фазе се доводи трофазни напонски извор који напаја статорски трофазни намотај
- Статорске фазе могу бити спојене у звезду (када све три фазе имају по један заједнички крај, онај други на који се не доводи напајање) или тако да образују троугао чији се темени крајеви доводе на напајање
- Сваки фазни намотај кроз који протиче струја ствара своју магнетопобудну силу која је одређена бројем навојака фазног намотаја и струјом кроз тај фазни намотај
- Сваки фазни намотај са назименичном струјом ствара променљиву пулсирајућу магнетопобудну сили

Статорски намотаји

- Струје i_a, i_b и i_c у свакој појединачној фази статорског намотаја стварају магнетопобудне силе $\boldsymbol{F}_a, \boldsymbol{F}_b$, and $\boldsymbol{F}_c$
- Одговарајући вектори магнетопобудних сила су позиционирани дуж магнетских оса сваког фазног намотаја
- Магнетске осе фаза које образују двополни трофазни намотај су померене међусобно за $2\pi/3$
- Резултантна магнетопобудна сила статора $\boldsymbol{F}_S$ се добија векторским сабирањем три фазне магнетопобудне силе $\boldsymbol{F}_a, \boldsymbol{F}_b$, and $\boldsymbol{F}_c$

Обртно поље

- Магнетске осе статорских фаза као и њихових магнетопобудних сила $\boldsymbol{F}_a, \boldsymbol{F}_b, \text{and } \boldsymbol{F}_c$ су међусобно померене за $2\pi/(3p)$, где је p број пари магнетских полова машине
- Статорски намотај се може распоредити по обиму статора тако да образује више од два магнетска пола
- Обртно магнетско поље са два магнетска пола се успоставља наизменичним трофазним струјама кроз двополни статорски намотај
- Фазне струје су исте амплитуде I_m , исте угаоне учестаности ω_e , чије су почетне фазе (фазни ставови, углови) померене међусобно за $2\pi/3$

Обртно поље

- У наредним изразима за магнетопобудне силе статорских фаза је претпостављено да свака фаза има исти број навојака N_S :

$$F_a = N_s I_m \cos \omega_e t,$$

$$F_b = N_s I_m \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

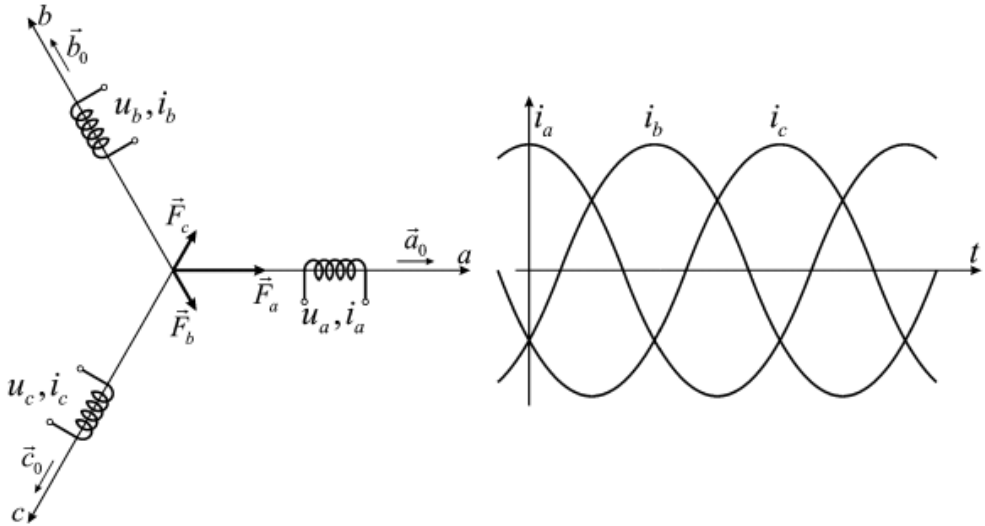
$$F_c = N_s I_m \cos\left(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}\right),$$

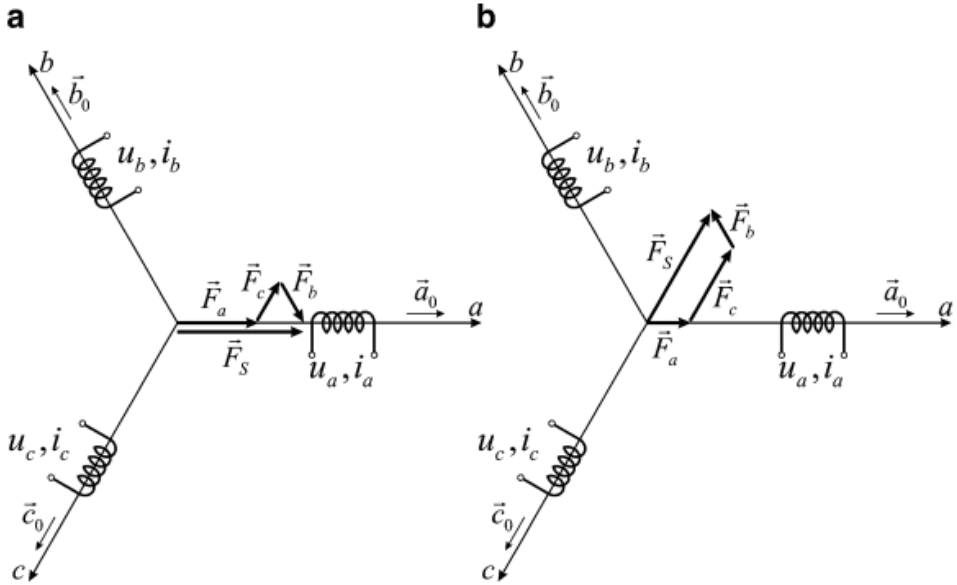
- Сумирањем магнетопобудних сила појединачних фаза добија се резултантна магнетопобудна сила статора $\boldsymbol{F}_S$, која се обрће синхроном брзином $\Omega_e = \omega_e/p$

$$\boldsymbol{F}_S = \boldsymbol{F}_a + \boldsymbol{F}_b + \boldsymbol{F}_c$$

$$\vec{F}_s = \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c = \frac{3}{2} N I_m \left[\vec{\alpha}_0 \cos \omega_e t + \vec{\beta}_0 \sin \omega_e t\right]$$

Обртно поље


b
$\vec{b}_0$
u_b, i_b
$\vec{F}_c$
$\vec{F}_a$
$\vec{F}_b$
$\vec{a}_0$
a
u_a, i_a
u_c, i_c
$\vec{c}_0$
c
i_a
i_b
i_c
t


a
b
$\vec{b}_0$
u_b, i_b
$\vec{F}_a$
$\vec{F}_c$
$\vec{F}_b$
$\vec{F}_S$
$\vec{a}_0$
a
u_a, i_a
u_c, i_c
$\vec{c}_0$
c

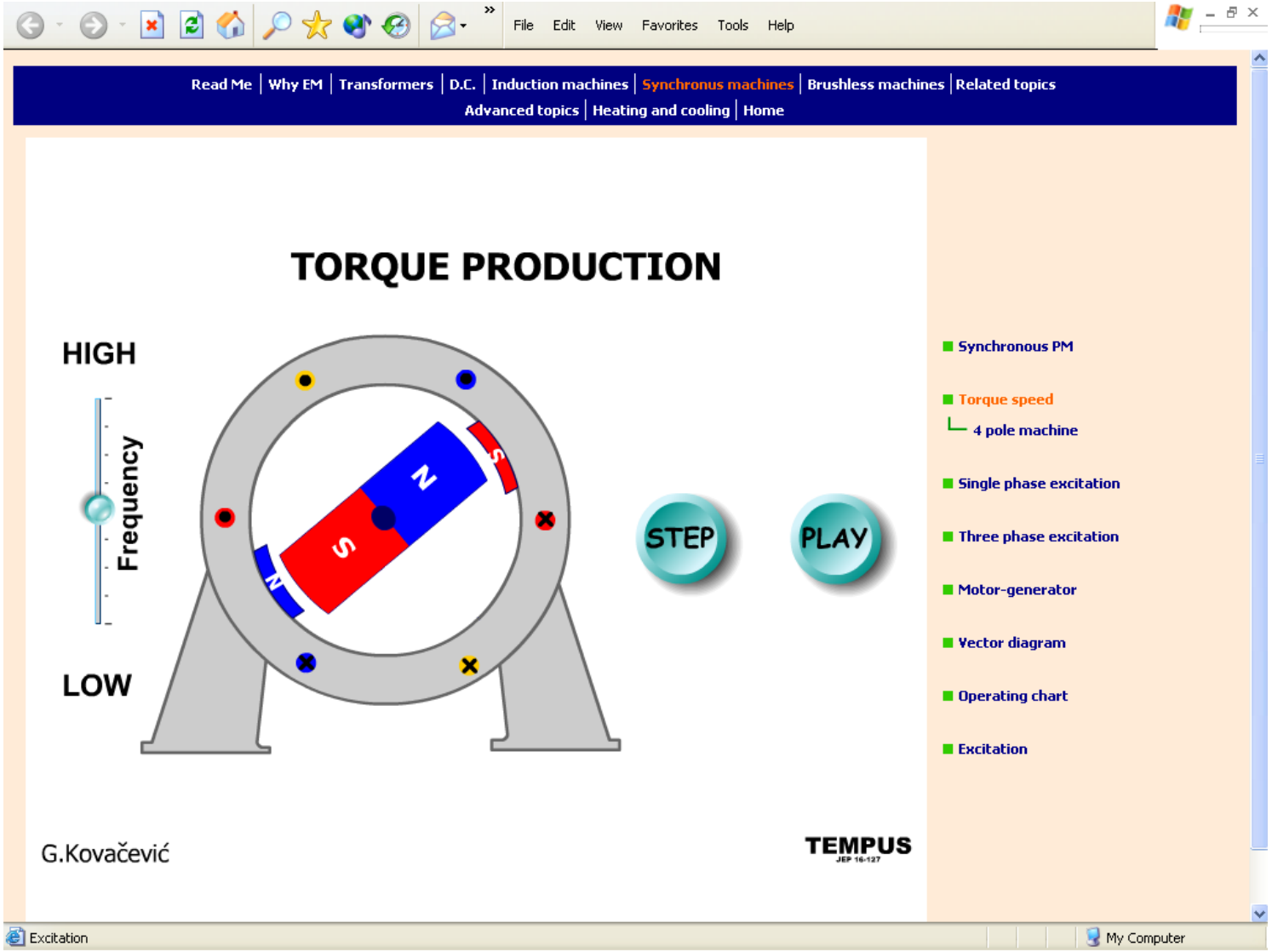
Обртно поље

- Обртна магнетопобудна сила статора $\boldsymbol{F}_S$ ствара магнетски флукс статора $\boldsymbol{\Phi}_S$.
- Један део статорског флукса обухвата проводнике статорског намотаја, али не пролази кроз ваздушни зазор и не долази до роторског магнетског кола; ова компонента флукса се назива расипни флукс и има утицај на пад напона на машини
- Преостали део магнетског флукса статора (већи део) пролази кроз ваздушни зазор и достиже роторско магнетско коло; ова компонента се назива заједнички флукс или флукс ваздушног зазора

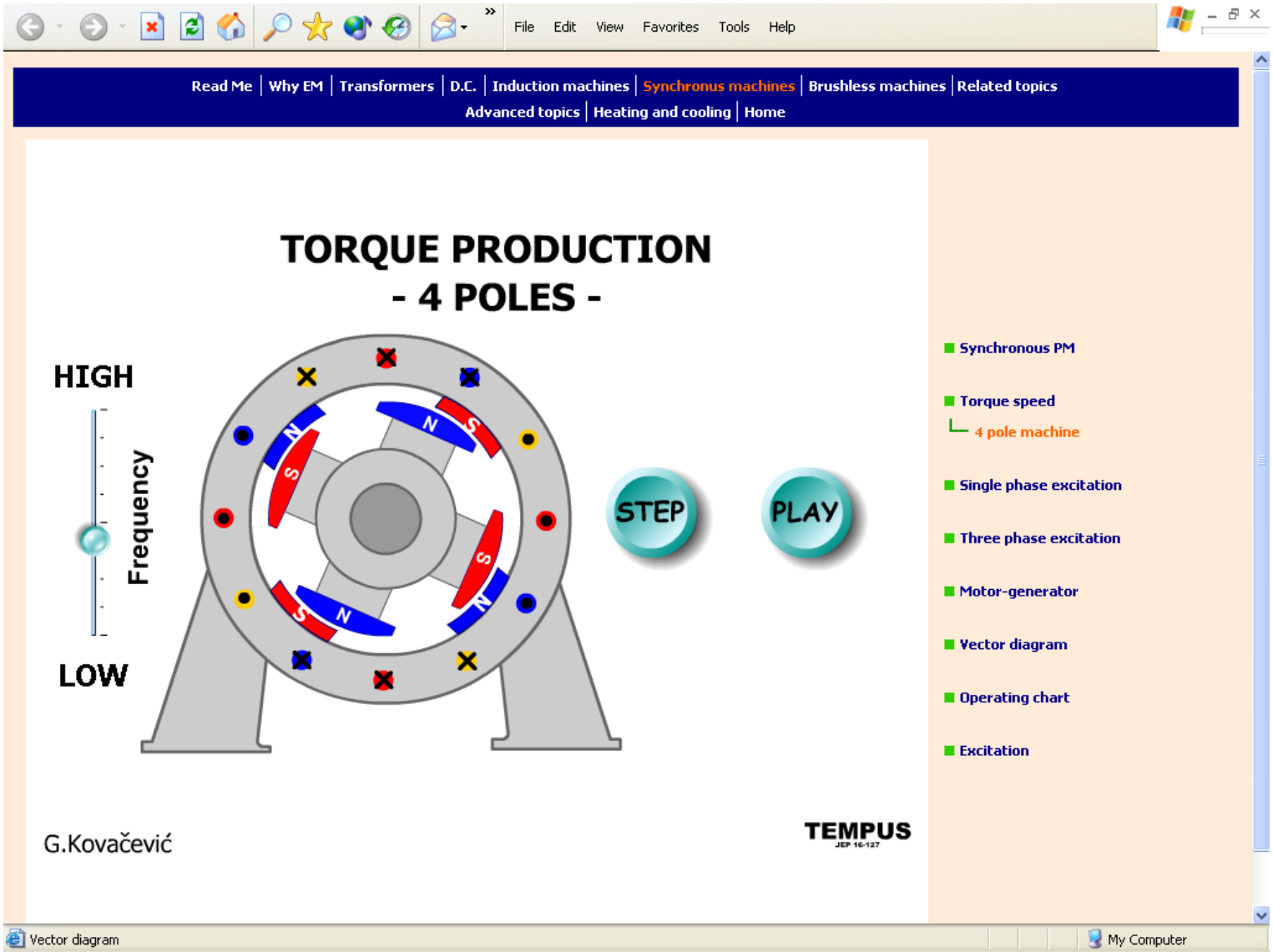
Генерисање момента

- Са перманентним магнетима који су уграђени у магнетско коло ротора, ротор генерише флукс који се креће заједно са ротором; слично је и са ротором са побудним намотајем
- Стога, роторски флукс има исти положај као што је положај самог ротора
- Истовремено, статорске струје кроз статорски намотај генеришу обртну магнетопобудну силу $\boldsymbol{F}_S$ и статорски флукс $\boldsymbol{\Phi}_S$
- Електромагнетске силе теже да доведу осе статорског и роторског флукса да се поклапају тако да су им магнетски полови супротстављени
- Када статорско поље ротира тако да статорски северни пол предњачи испред роторског јужног пола, тада постоји електромагнетски моменат који тежи да увећа брзину (убрза) ротора како би се пратило статорско поље

Генерисање момента

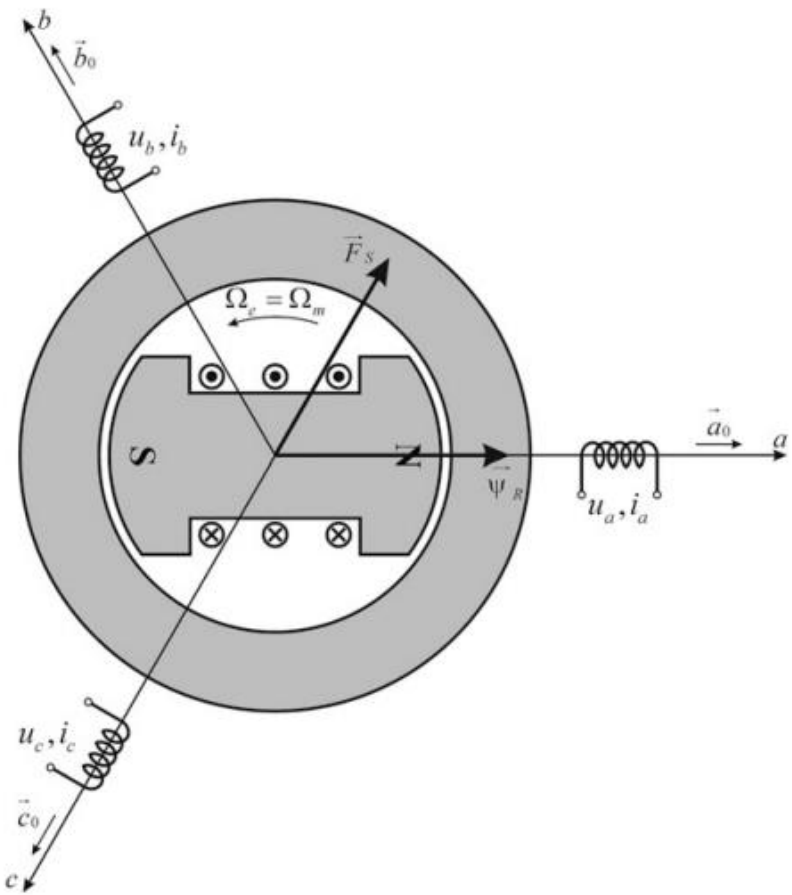


Генерисање момента



Генерисање момента

- Момент се може изразити као векторски производ између статорске магнетопобудне силе и роторског флукса $\boldsymbol{\Psi}_R$:



$$\vec{T}_{em} = k_t \vec{\Psi}_R \times \vec{F}_S.$$

Генерисање момента

- Ако поделимо вектор $\boldsymbol{F}_S$ са бројем навојака фазе N_S, добијамо вектор са правцем и смером вектора $\boldsymbol{F}_S$, а чија је амплитуда једнака статорској струји
- Зато се момент још може изразити као векторски производ роторског флукса $\boldsymbol{\Phi}_R$ и вектора статорске струје ис:

$$\boldsymbol{T}_{em} = k_t N_S \, \boldsymbol{\Phi}_R \times \boldsymbol{i}_S = k_t N_S \, |\boldsymbol{\Phi}_R||\boldsymbol{i}_S| \, \sin(\xi),$$

- Где ξ означава угао између осе вектора роторског флукса и вектора струје статора
- Одавде се види да је амплитуда струје статора која је потребна за остваривање жељене вредности момента, нижа ако је $\sin(\xi)$ већи, и да достиже свој минимум када су вектор струје статора и вектор роторског флукса ортогонални; тада су и губици у статорском намотају минимални

Генерисање момента

- Овај приступ (максимизирање *torque-per-Ampere* $T_{em}/|\boldsymbol{i}_S|$ вредности) се користи за контролисање момента синхроних мотора са перманентним магнетима код електричних возила
- Коришћењем струјних регулатора могу се успоставити жељене струје статора (амплитуде и фазни ставови) тако да је одговарајући струјни вектор ортогоналан на флукс ротора чију позицију треба одредити (сензор положаја или естимација)

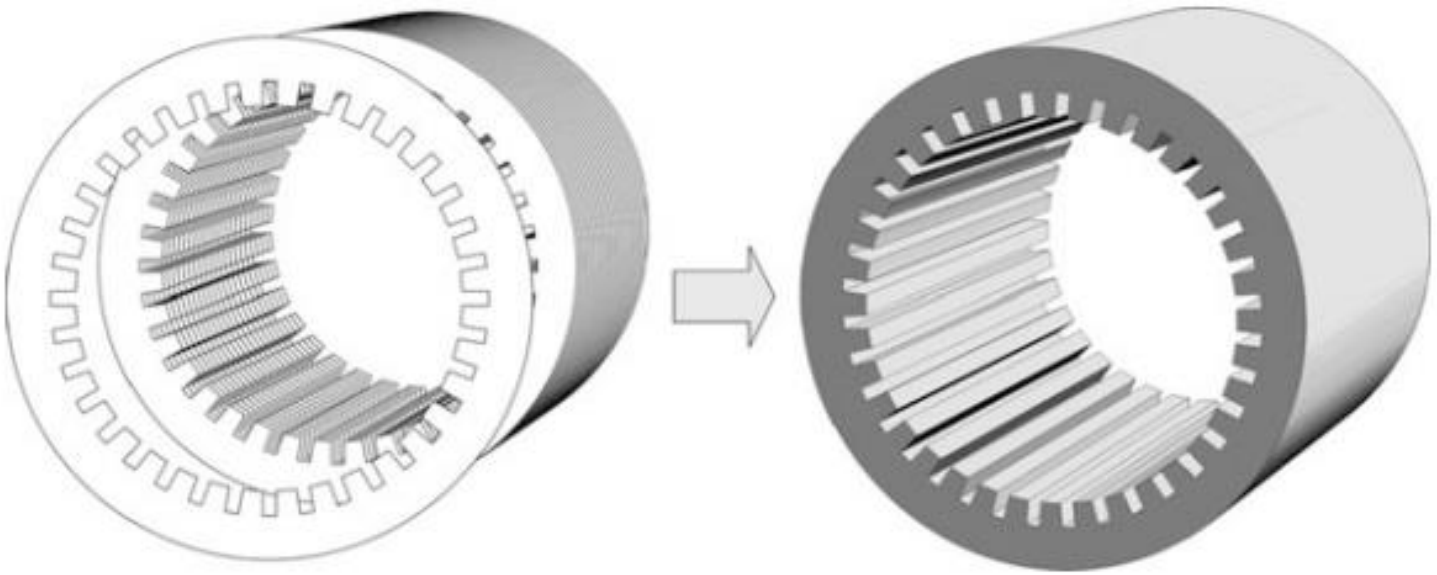
Конструкција синхроних машина

- Синхроне машине имају статор са трофазним намотајем и ротор са побудним намотајем или сталним магнетима
- Прикључци статорског намотаја се повезују на симетричан трофазни систем наизменичних напона и струја
- Статорске струје генеришу обртно поље у ваздушном зазору машине
- Синхроне машине могу бити направљене или у облику диска или цилиндра, могу имати на пример и спољни ротор, а постоје такође и линеарни мотори који стварају транслацију уместо обртања
- Синхроне машине као погонске машине у електричним возилима су обртне цилиндричне машине

Статорско магнетно коло

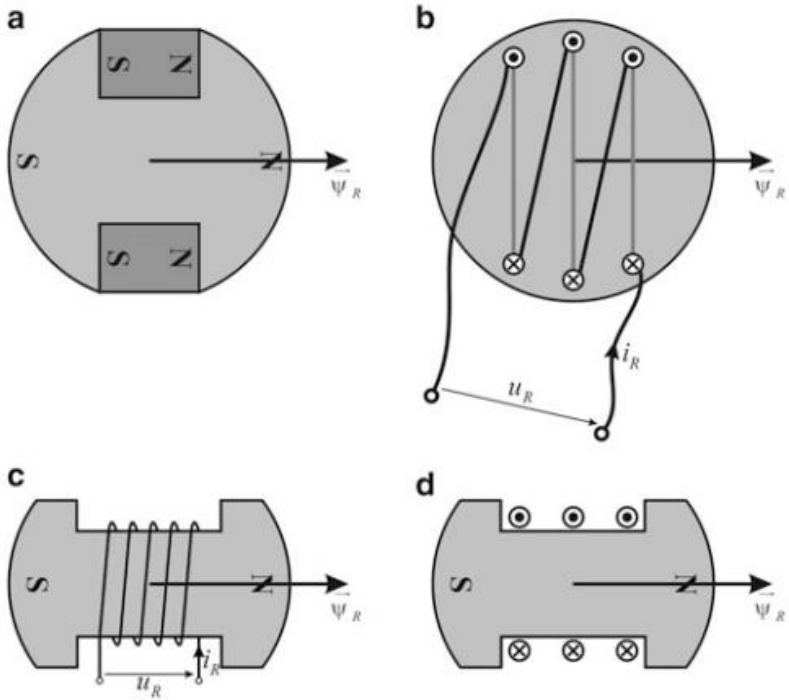
- Статор цилиндричних синхроних машина је шупљи цилиндар који је прилагођен облику ротора
- Главни делови статора су магнетско коло и струјна кола тј. фазни намотаји
- Магнетско коло је сачињено од феромагнетског материјала, најчешће легуре гвожђа, док су струјна кола начињена од изолованих бакарних проводника
- Како магнетско поље код синхроних машина ротира то постоји промена магнетске индукције у магнетском колу статора што узрокује губитке услед индукованих вртложних струја и услед хистерезиса у проводном феромагнетику
- Да би се смањили губици у магнетском колу статора , оно се израђује из танких лимова који се слажу један до другог (изоловани су)

Статорско магнетско коло



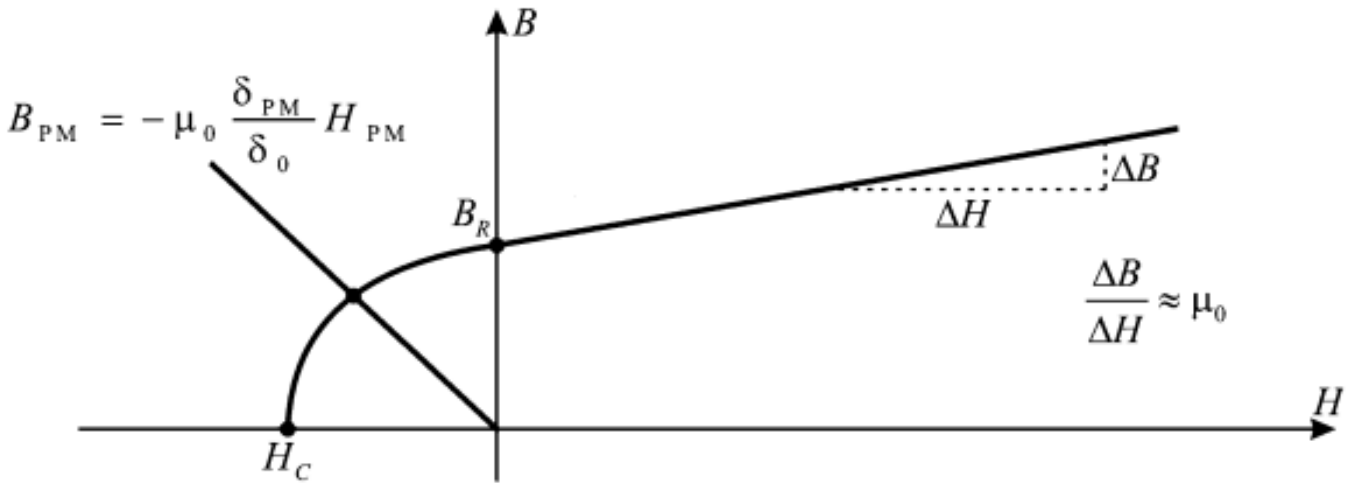
Конструкција ротора

- Ротор сихнроних машина са уграђеним сталним магнетима у магнетско кооло ротора дат је на слици А
- Перманентни магнети су феромагнетни материјали који су способни да обезбеде роторски флукс без спољно напајаног побудног намотаја (без спољне екситације)



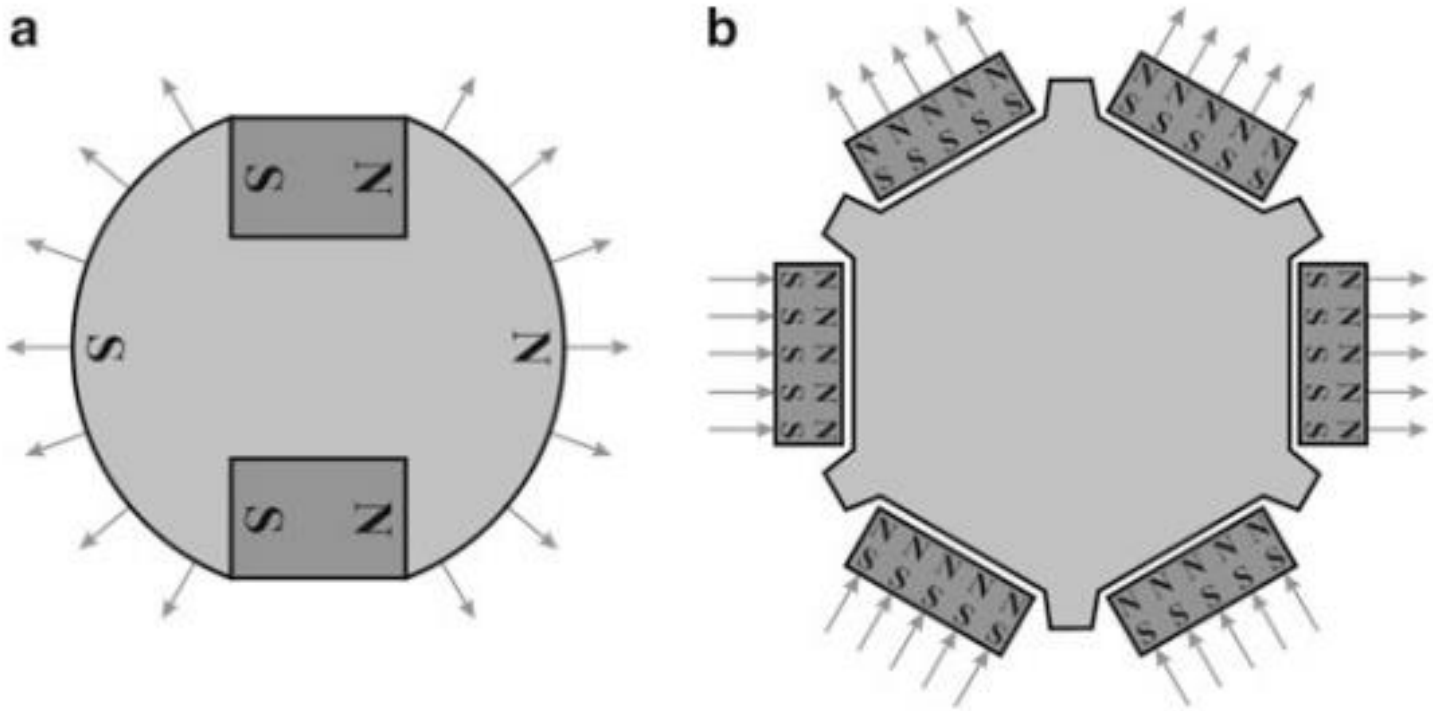
Конструкција ротора

- Карактеристика магнећења перманентних магнета има доста велику вредност реманентног магнетизма



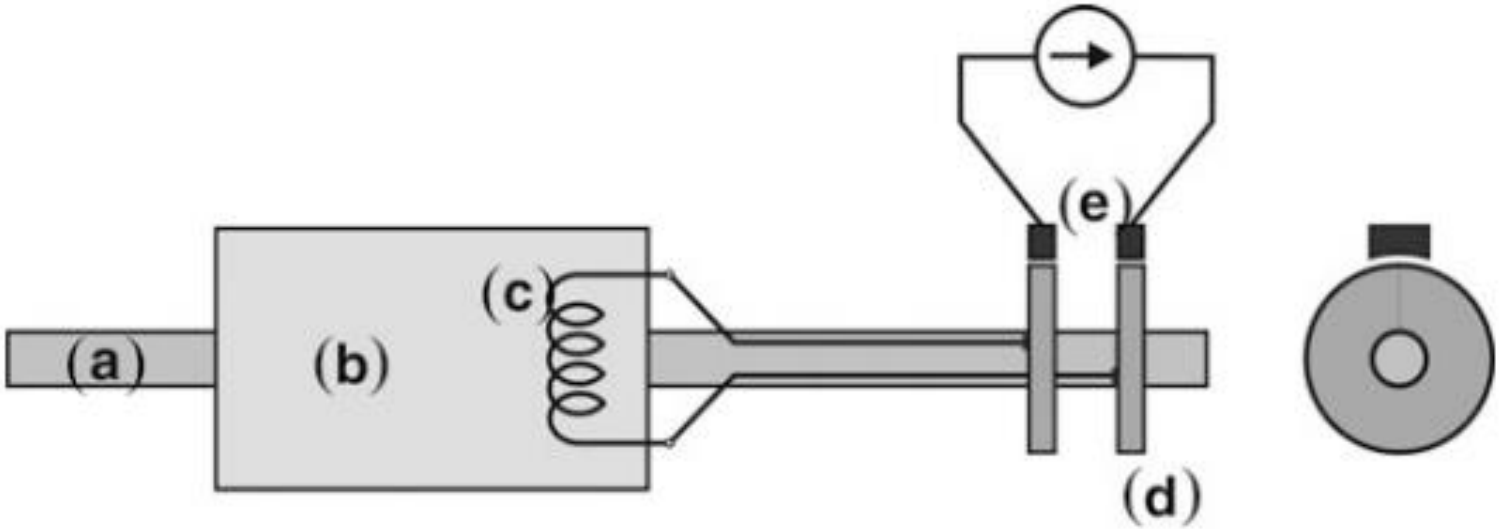
Конструкција ротора

- Ротори са уграђеним и спољним магнетима приказани су на датим сликама
- Различите карактеристике мотора у зависности од начина уградње сталних магнета



Конструкција ротора

- Ротор са побудним намотајем је приказан на слици
- Роторски намотај се напаја једносмерним извором преко четкица и клизних прстенова



Конструкција ротора

- Ротор са побудним намотајем који се напаја безконтактно

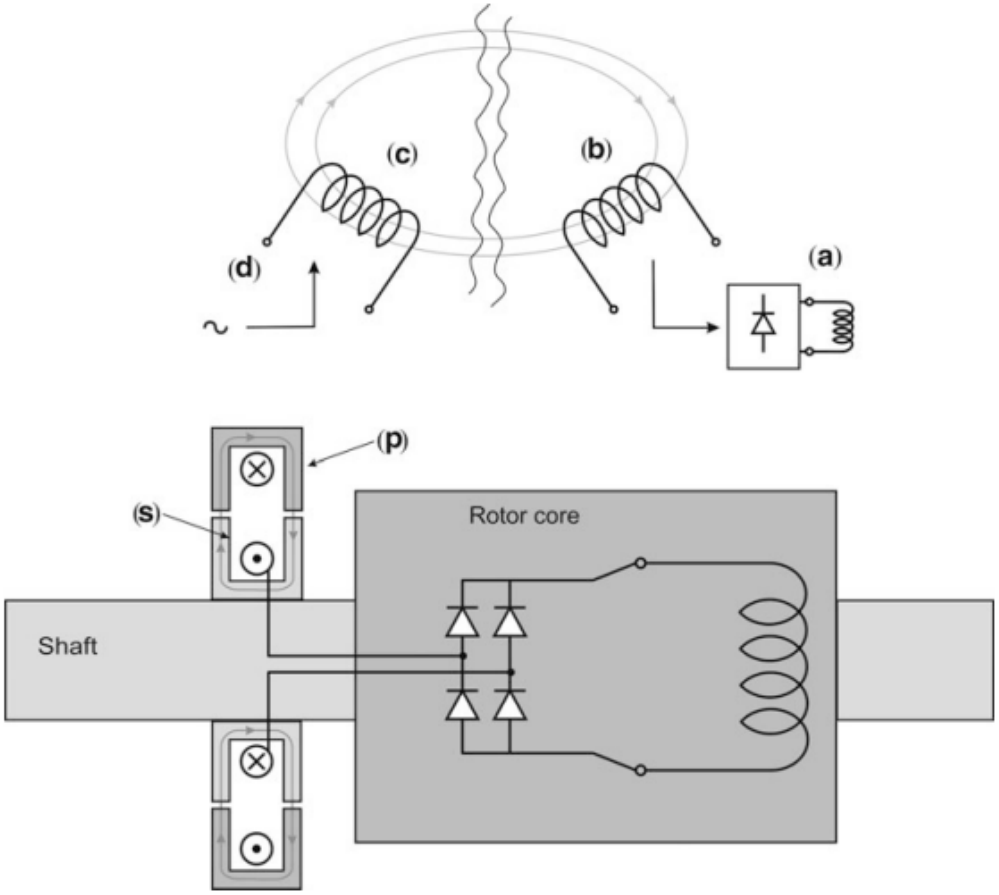
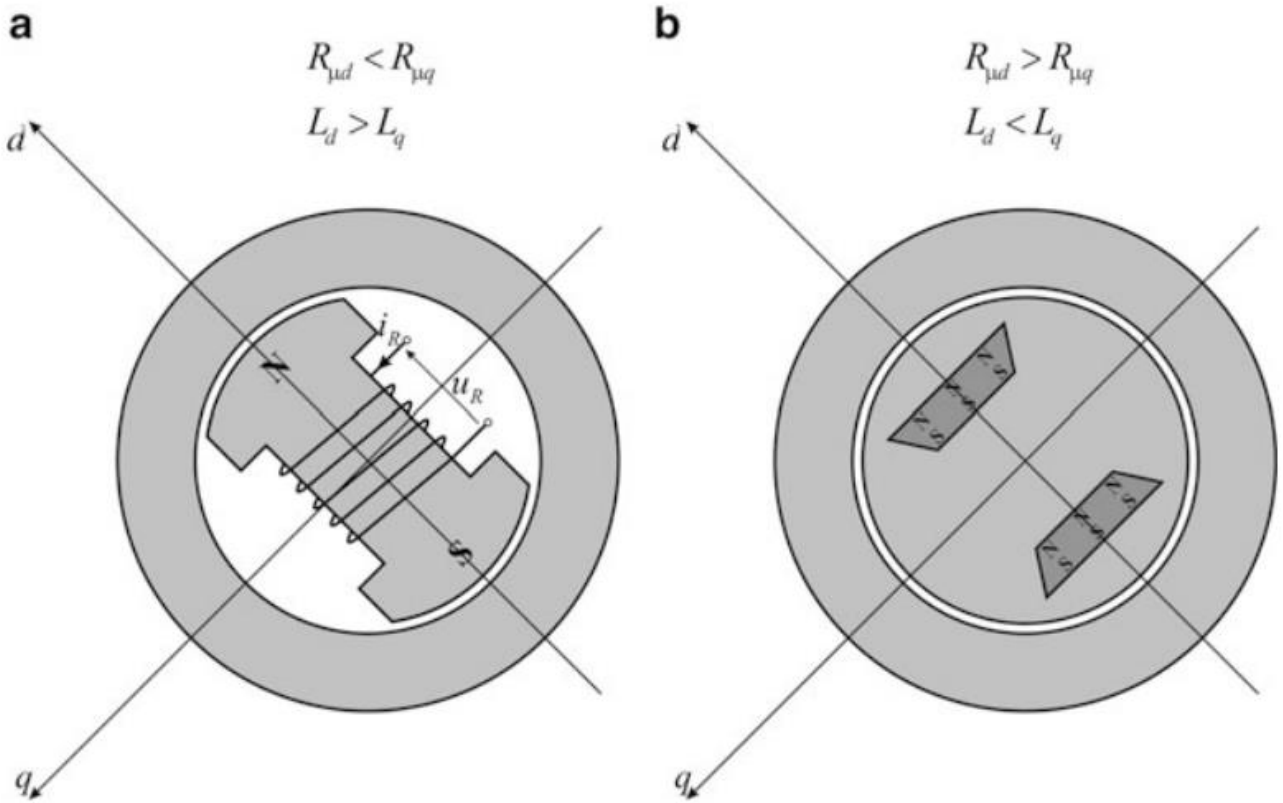


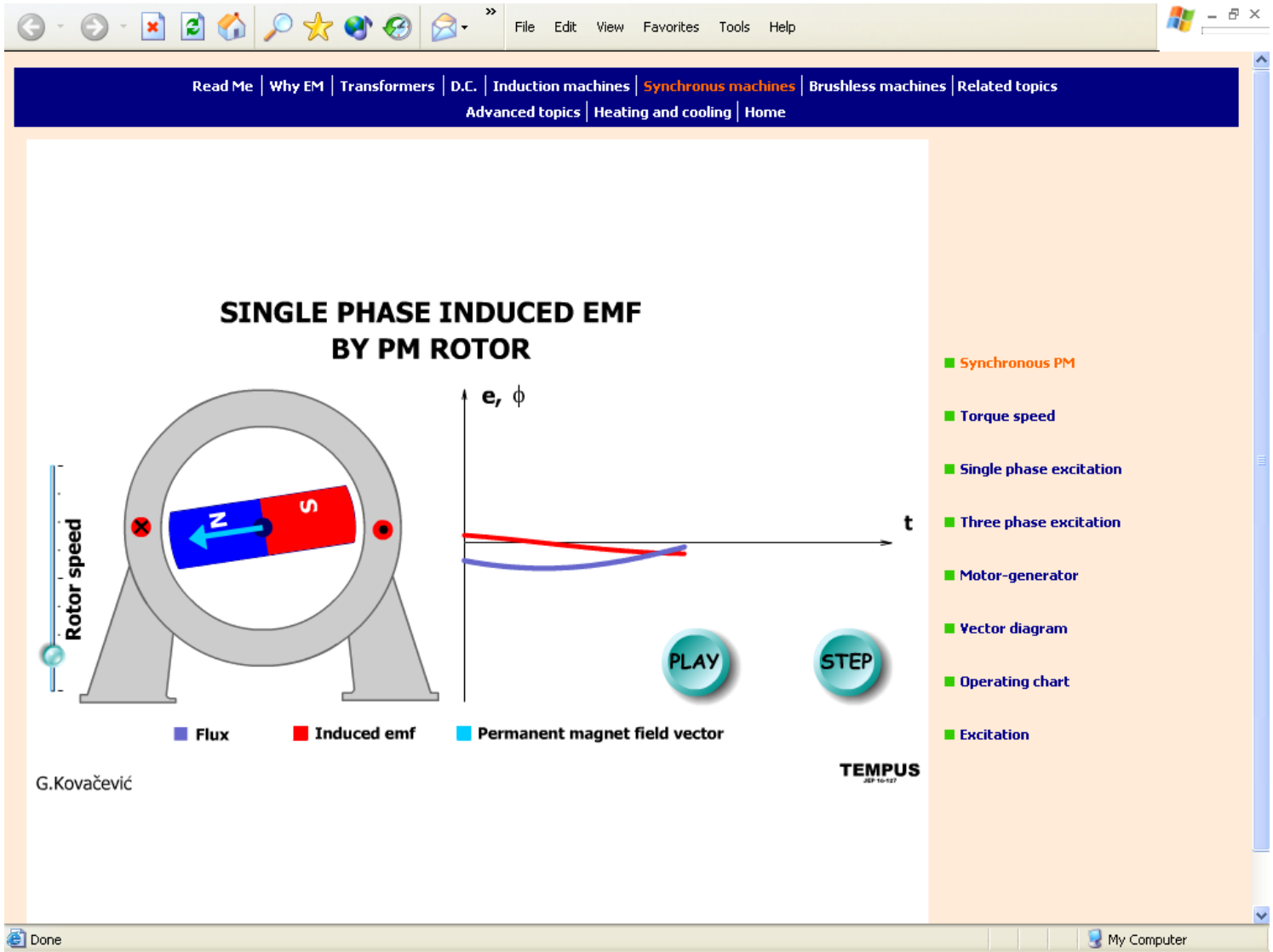
Fig. 18.8 Contactless excitation system with rotating transformer. (**a**) Diode rectifier on the rotor side. (**b**) Secondary winding. (**c**) Primary winding. (**d**) Terminals of the primary fed from the stator side. (**P**) Stator part of the magnetic circuit. (**S**) Rotor part of the magnetic circuit

Конструкција ротора

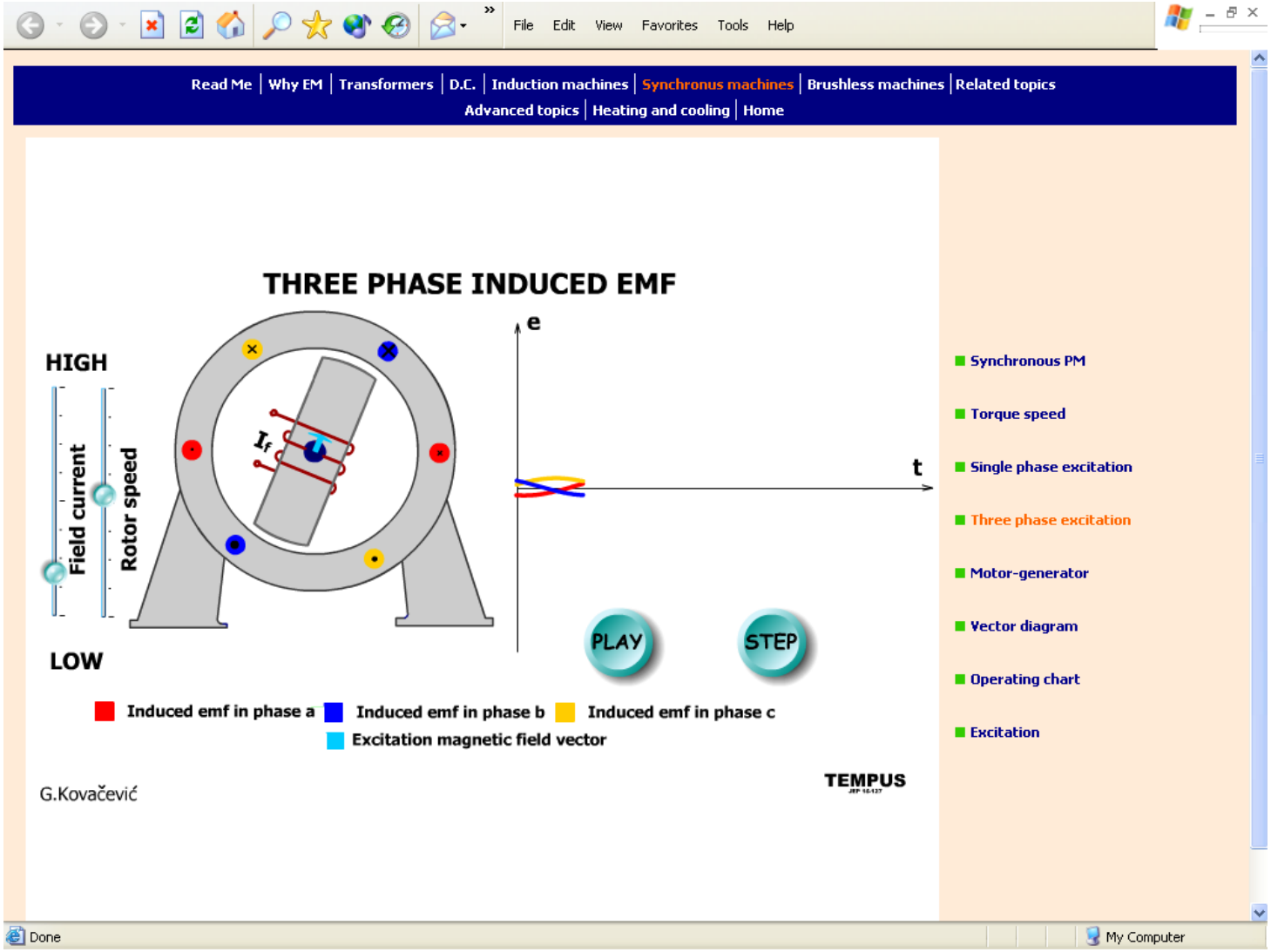
- Врсте ротора: ротор са цилиндричним и са истуреним магнетским половима
- На слици је приказан ротор са истуреним половима (са побудним намотајем и са уграђеним магнетима)



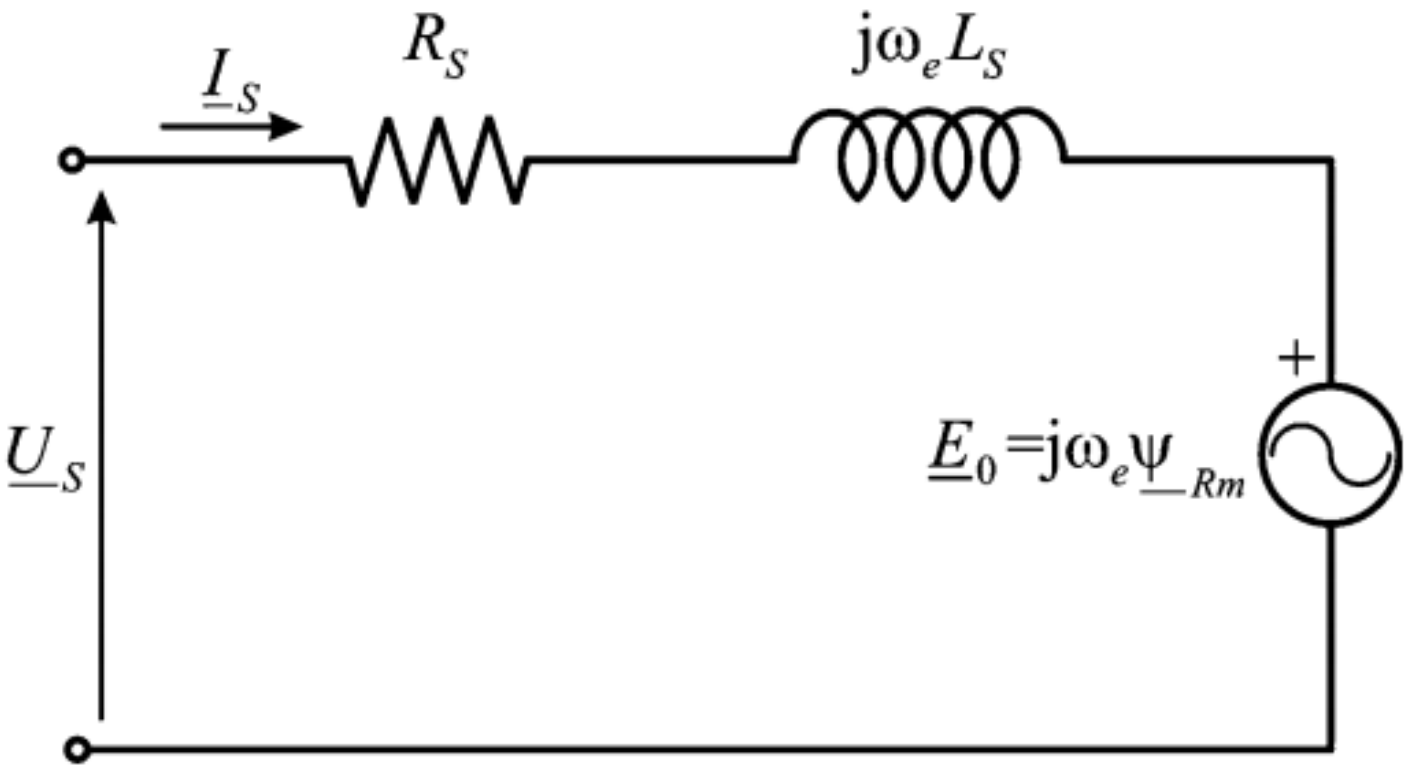
Индукована електромоторна сила у статорском намотају



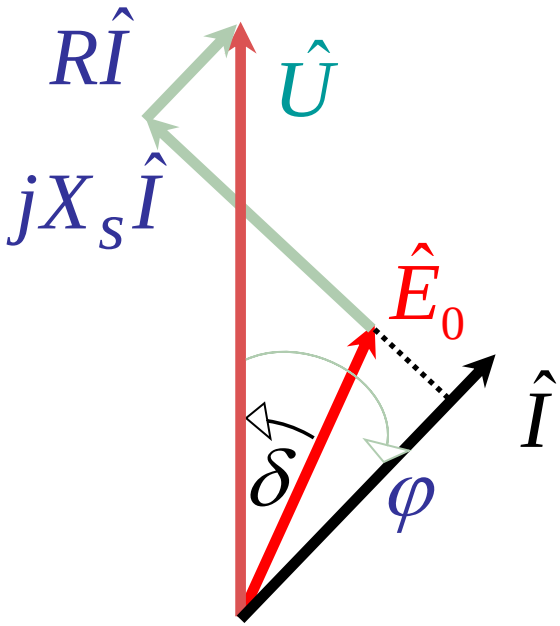
Индукована електромоторна сила у статорском намотају



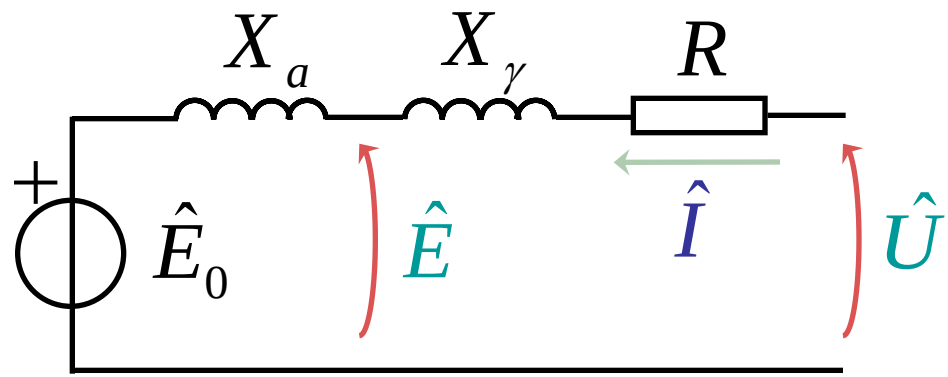
Еквивалентно коло за анализу стационарног стања



SINHRONA MAŠINA
Vektorski dijagram



$$\boxed{\hat{U} = \hat{E}_0 + R \cdot \hat{I} + jX_s \cdot \hat{I}}$$

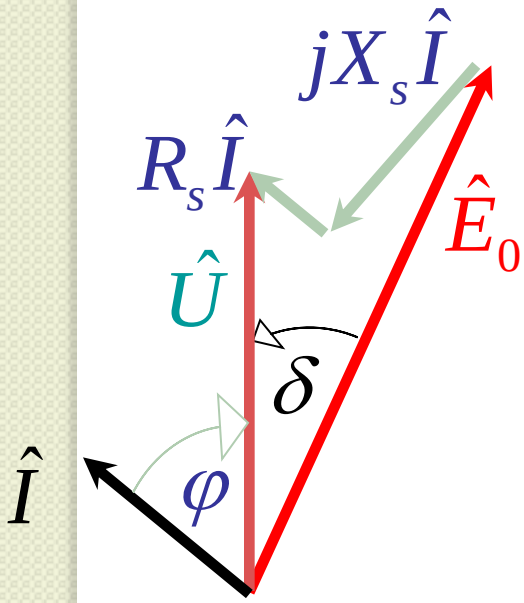


Slika 2.13

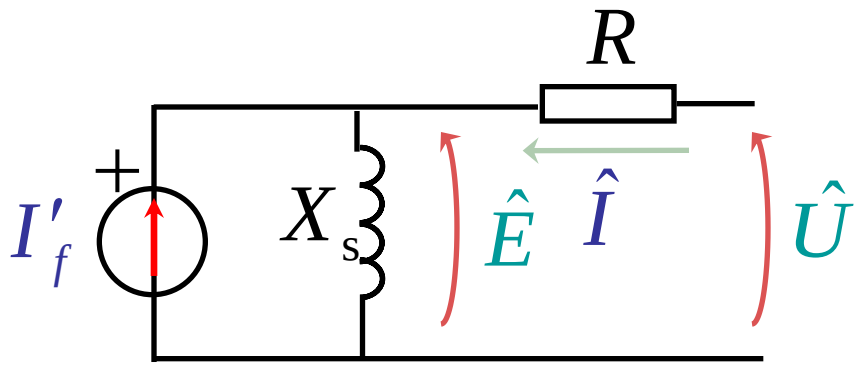
Vektorski dijagram potpobuđenog SMo, cosφ ind, Q se troši, Q>0.

SINHRONA MAŠINA
Vektorski dijagram

$$\boxed{\hat{U} = \hat{E}_0 + R \cdot \hat{I} + jX_s \cdot \hat{I}}$$



Indukovana EMS kasni za U

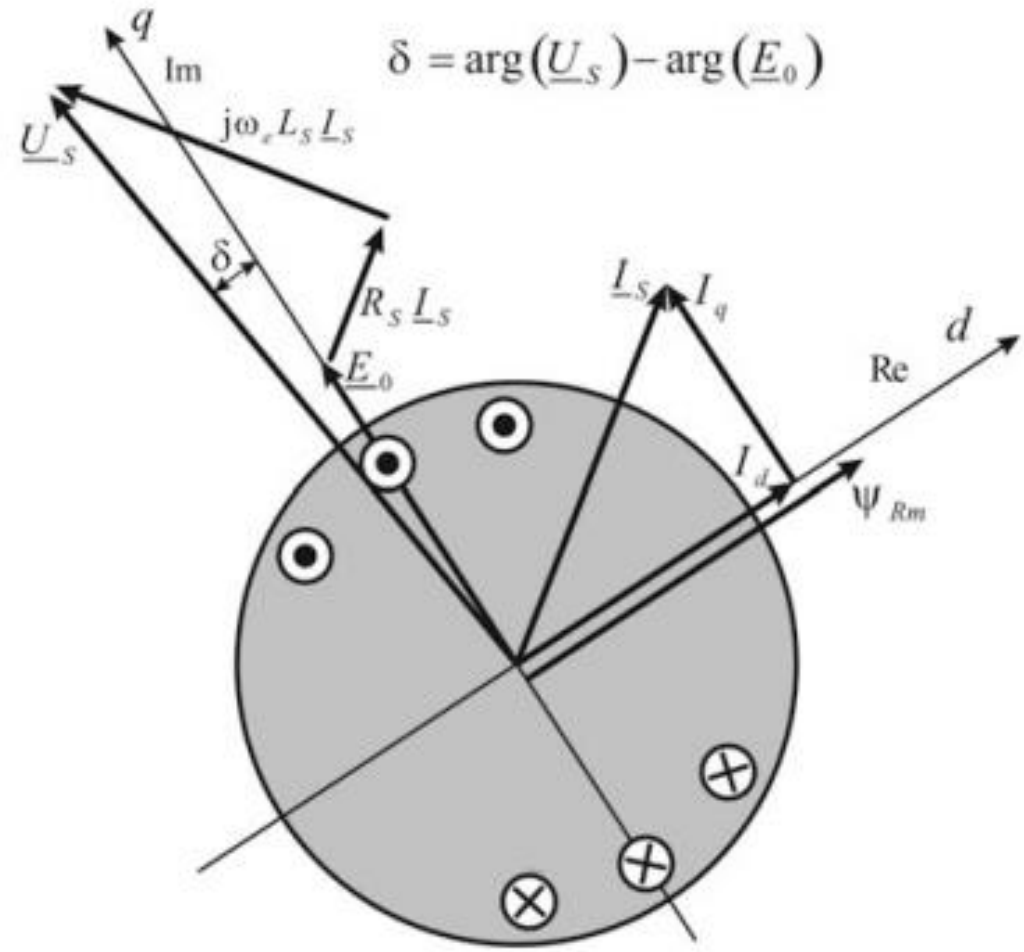


Slika 2.14

Vektorski dijagram nadpobuđenog SMo, cosφ cap, Q se proizvodi, Q<0.

Фазорски дијаграм синхроне машине

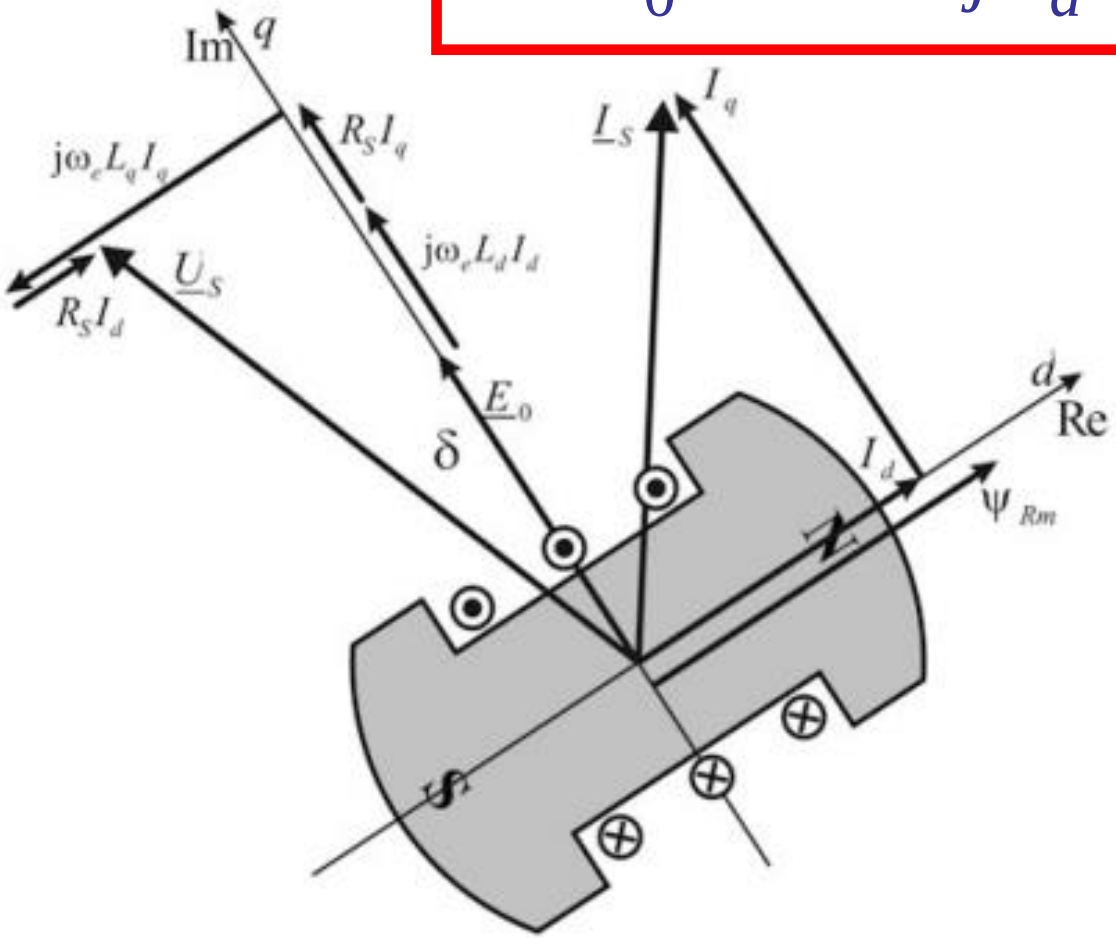
- Са цилиндричним ротором



Фазорски дијаграм синхроне машине

- Са истуреним половима (са уграђеним магнетима нпр.)

$$\hat{U} = \hat{E}_0 + R \cdot \hat{I} + jX_d \cdot I_d + jX_q \cdot I_q$$



Израз за момент у стационарном стању

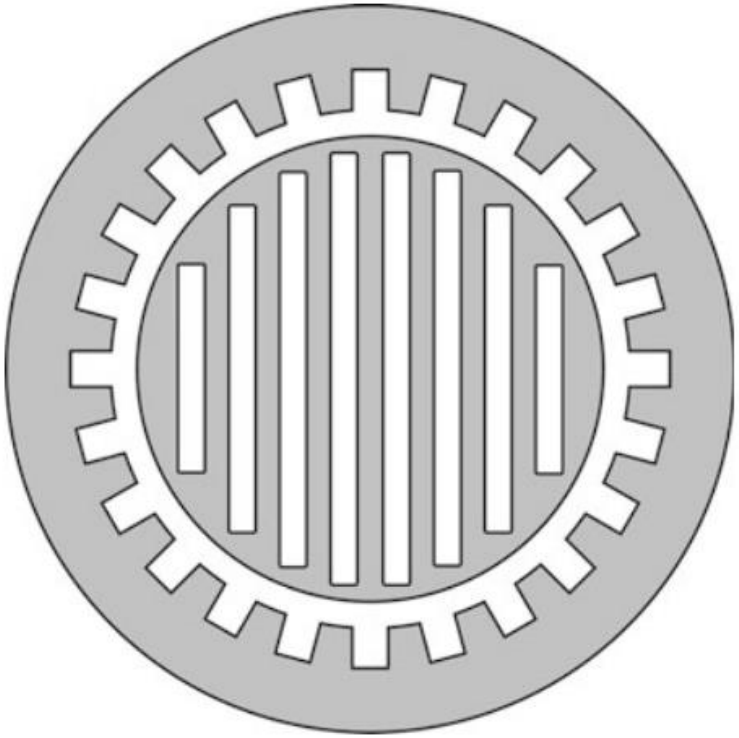
$$
\begin{aligned}
T_{em} &= \frac{P_e}{\Omega_e} \\
&= \frac{3p}{\omega_e}\left[-U_S\sin(\delta)\left(\frac{U_S\cos(\delta)-E_0}{X_d}\right)+U_S\cos(\delta)\left(\frac{U_S\sin(\delta)}{X_q}\right)\right] \\
&= \frac{3p}{\omega_e}\frac{U_S E_0\sin(\delta)}{X_d}+\frac{3p}{\omega_e}\frac{U_S^2}{2}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin(2\delta) = T_{EXC}+T_{REL}.
\end{aligned}
$$

$$
T_{EXC} = \frac{3p}{\omega_e}\frac{U_S E_0\sin(\delta)}{X_d}.
$$

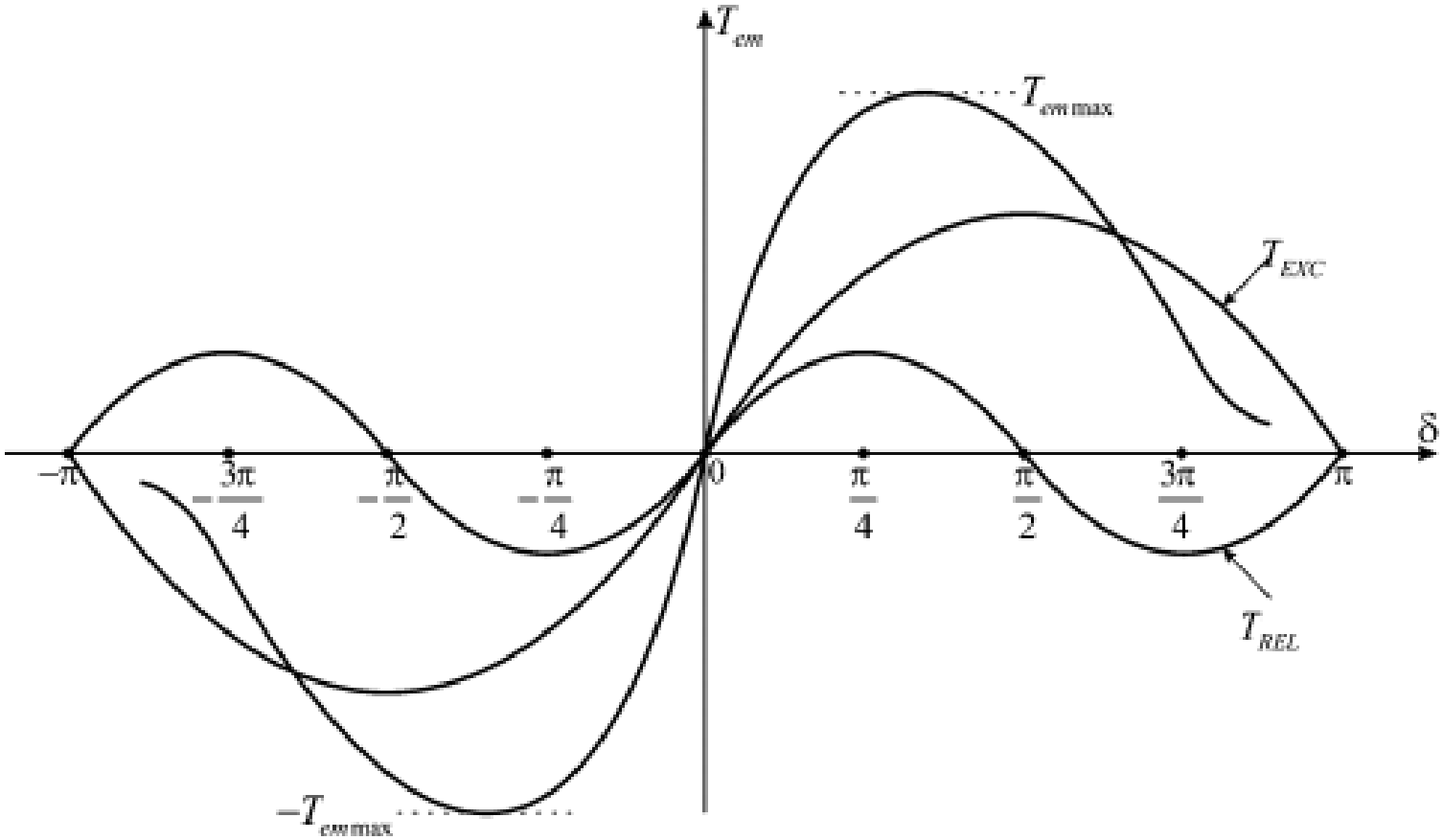
$$
T_{REL} = \frac{3p}{\omega_e}\frac{U_S^2}{2}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin(2\delta).
$$

Релуктантни мотор

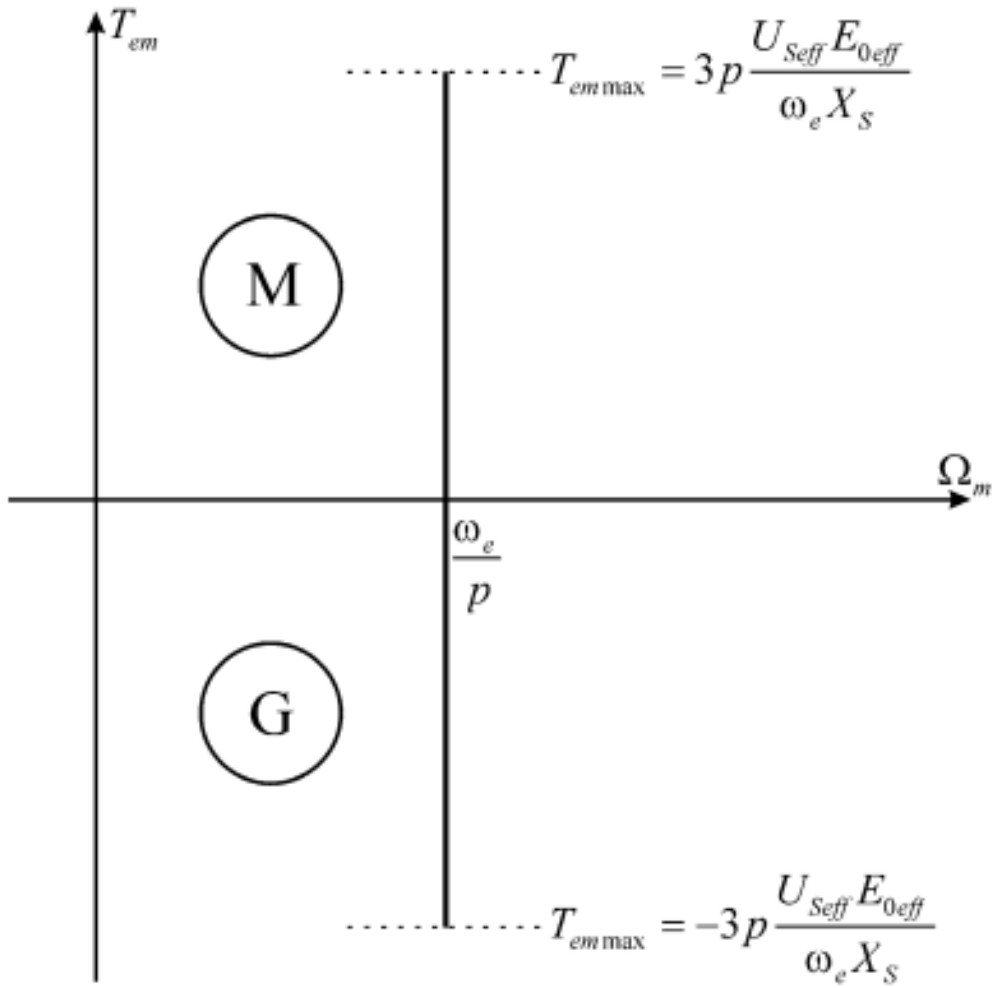
- Ротор релуктантне синхроне машине: на ротору не постоји побудни намотај нити стални магнети, већ је ротор израђен тако да се направи што већа разлика индуктивности у ортогоналним (dq) правцима, искоришћава се постојање релуктантног момента



Промена момента са углом оптерећења



Механичка карактеристика



Алтернатор