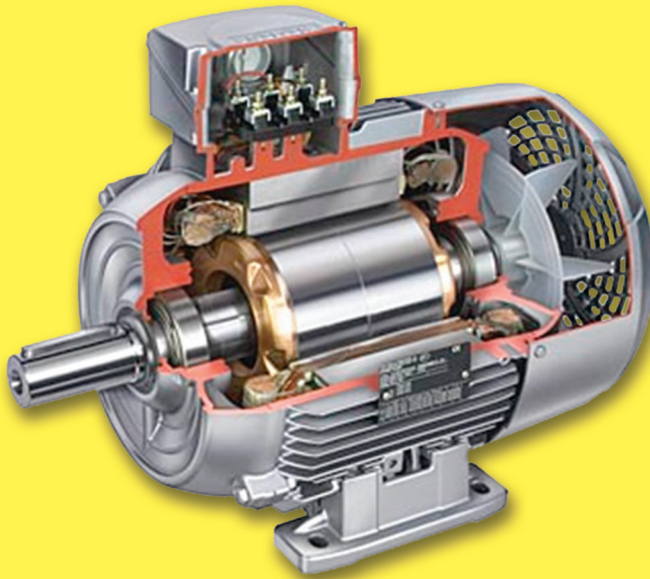


Универзитет у Београду

Др Томислав М. Стојић
Др Добрила М. Шкатарић

ЕЛЕКТРИЧНЕ МАШИНЕ ЗА СТУДЕНТЕ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА



Машински факултет
Београд, 2015.

Универзитет у Београду

др Томислав М. Стојић
др Добрила М. Шкатарић

ЕЛЕКТРИЧНЕ МАШИНЕ

ЗА СТУДЕНТЕ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Машински факултет
Београд 2015.

ЕЛЕКТРИЧНЕ МАШИНЕ

ЗА СТУДЕНТЕ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Прво издање

- Аутори:

Др Томислав М. Стојић, дипл. инж. ел.

доцент Машинског факултета у Београду

Др Добрила М. Шкатарић, дипл. инж. ел.

редовни професор Машинског факултета у Београду

- Рецензенти:

Др Предраг Осмокровић, дипл. инж. ел.

редовни професор Државног универзитета у Новом Пазару

Др Зоран Лазаревић, дипл. инж. ел.

редовни професор Електротехничког факултета у Београду

- Издавач:

Машински факултет Универзитета у Београду

Краљице Марије 16, 11120 Београд 35,

телефон: (011) 3370 350 и 3302 384, факс: (011) 3370 364

За издавача: Декан проф др Милорад Милованчевић

Главни и одговорни уредник: доц. др Владимир Буљак

Штампање одобрила Комисија за издавачку делатност: бр. 08/2015. Од 22.05.2015.

Машинског факултета Универзитета у Београду

- Штампа:

ПЛАНЕТА ПРИНТ

Тираж: 100 примерака

Аутори и Машински факултет Универзитета у Београду, Београд 2015.

Прештампавање и фотокопирање није дозвољено. Сва права задржавају издавач и аутори.

Садржај

Предговор	i
1 Магнетска кола	1
1.1 Основни концепт	1
1.2 Пермеабилност и засићење	4
1.3 Основни закони за магнетно коло	5
1.4 Магнећење наизменичном струјом и губици	6
1.5 Акумулисана енергија у магнетном пољу	9
1.6 Индуктивност	10
1.7 Магнетска кола са перманентним магнетима	11
1.8 Енергетски производ – мера квалитета сталних магнета	13
1.9 Решени примери и задаци	14
2 Трансформатори	25
2.1 Принцип рада	25
2.2 Губици у трансформатору – реални трансформатор	27
2.3 Испитивање трансформатора	30
2.4 Повезивање намотаја енергетских трансформатора	32
2.5 Аутотрансформатори	35
2.6 Мерни трансформатори	36
2.7 Хлађење енергетских трансформатора	37
2.8 Означавање и натписна плочица трансформатора	40
2.9 Решени примери и задаци	42
3 Електромеханички системи	52
3.1 Електромеханичко претварање енергије	52
3.2 Сила и момент силе	56
3.3 Динамика електромеханичког система	56
3.4 Електромеханичка аналогија	59
3.5 Решени примери и задаци	61

4	Машине за једносмерну струју	74
4.1	Принцип рада	74
4.2	Улога комутатора.....	76
4.3	Намотаји статора и ротора	77
4.4	Индукована електромоторна сила ротора	78
4.5	Обртни момент мотора.....	79
4.6	Брзина обртања мотора	80
4.7	Подела према начину побуђивања	81
4.8	Поље у зазору и реакција индукта	82
4.9	Комутација.....	84
4.10	Ефекат zasiћења на рад једносмерног генератора	86
4.11	Губици и коефицијент корисног дејства	87
4.12	Излазне карактеристике генератора и мотора.....	88
4.13	Динамика једносмерног мотора	90
4.14	Решени примери и задаци	91
5	Асинхроне машине	103
5.1	Конструкција и принцип рада асинхроне машине	103
5.2	Магнетомоторна сила статора	105
5.3	Обртно магнетно поље	107
5.4	Клизање и еквивалентно електрично коло	108
5.5	Израчунавања из еквивалентних кола	110
5.6	Апроксимативно еквивалентно коло мотора	111
5.7	Решени примери и задаци	113
6	Синхроне машине	131
6.1	Конструкција и типови синхроних машина	131
6.2	Генераторски и моторни режим рада.....	133
6.3	Генератор у празном ходу, кратком споју и напонска регулација.....	136
6.4	Угао снаге машине са цилиндричним ротором	137
6.5	Перформансе мотора са цилиндричним ротором	138
6.6	Синхроне машине са истакнутим половима	139
6.7	Прелазни режим синхроног генератора.....	141
6.8	Решени примери и задаци	144

7	Монофазне и машине са магнетима	159
7.1	Мали наизменични мотори	159
7.2	Анализа монофазног асинхроног мотора	159
7.3	Покретање монофазног асинхроног мотора.....	161
7.4	Маchine са сталним магнетима	163
7.4.1	Магнетни материјали	165
7.4.2	Једносмерне машине са сталним магнетима	169
7.4.3	Синхроне машине са сталним магнетима	170
7.5	Хистерезисни мотори	173
7.6	Решени примери и задаци	175
8	Додатак	185
8.1	Трофазни симетрични систем	185
8.2	Трофазно симетрично коло спрегнуто у звезду.....	188
8.3	Трофазно симетрично коло спрегнуто у троугао	190
8.4	Снага трофазног симетричног кола.....	192
8.5	Формирање обртног магнетног поља помоћу трофазног намотаја.....	194
8.6	Моментна карактеристика кавезног асинхроног мотора	195
	Литература	200

Предговор

Уџбеник Електричне машине за студенте Машинског факултета намењен је у првом реду студентима Машинског факултета у Београду, који слушају предавања из предмета Електричне машине. Може се користити као допунска литература на свим предметима на којима се проучавају друге врсте машина, уређаја и погона које као радну или као погонску користе неку електричну машину. Сходно томе, уџбеник могу користити и студенти других факултета, посебно техничких, за стицање основних теоријских и практичних знања из области примене електричних машина. У уџбенику су приказани основни теоријски појмови и концепти из области електричних машина са акцентом на практичној примени стеченог знања кроз бројне решене примере и задатке.

Предуслов за успешно праћење изложеног материјала је завршен основни курс из Електротехнике. Потребно је познавање основних метода решавања електричних кола временски константне (једносмерне) и наизменичне струје, са акцентом на фазорском приступу у решавању проблема из устаљеног простопериодичног режима у колима. Основни појмови и закони из електромагнетике и трофазног система наизменичних струја дефинисани су у уџбенику у мери и обиму потребном за праћење изложене материје. За потпуно и детаљно објашњење ових појмова читаоц се упућује на одговарајуће уџбенике из Електротехнике.

Концепција уџбеника, начин излагања материје и одабир карактеристичних примера из праксе настали су на основу предавања, рачунских и лабораторијских вежби из предмета Електротехника, Електротехника и електроника и Електричне машине које су аутори непрекидно, више од двадесет година, држали на Машинском факултету у Београду. Идеја је да се читалац упозна са основним, данас највише коришћеним врстама електричних машина и могућностима њихове примене у различитим областима технике. Теоријски концепт рада машина изложен је у обиму који је неопходан за правилно разумевање начина рада и извођење одговарајућих карактеристика. Тежиште је стављено на приказивању улазних и излазних карактеристика електричних машина које кориснику на једноставан, брз и прегледан начин приказују понашање машине у односу на окружење. У овом контексту, електрични генератори и мотори равноправно се третирају као уређаји који врше електромеханичку конверзију енергије, а конкретна улога машине зависи од тога коју врсту конверзије енергије обавља. Кроз решене примере и задатке читалац се оспособљава за разумевање и коришћење карактеристика машина у циљу правилног одабира и димензионисања конкретне машине за одређену апликацију.

Материја је изложена у осам поглавља, од којих је прво поглавље уводно, а последње, осмо поглавље је у форми додатка. У циљу концизног и сажетог излагања, у додатку је, на једном месту, приказана материја заједничка за друго, пето, шесто и седмо поглавље. На крају сваког поглавља, изузев додатка, налазе се решени нумерички примери и задаци који поступно и систематски, почев од једноставнијих према сложенијим, уводе читаоца у практичну примену уобичајено апстрактних теоријских релација и модела. Задаци су генерално подељени у две групе. Прву групу чине уводни задаци у којима се у циљу стицања "осећаја" вежба коришћење основних теоријских релација и модела везаних за конструкцију и функционисање машине. Другу групу чине сложенији задаци у којима се дата машина користи у конкретном радном окружењу, када је акценат стављен на њене улазно-излазне карактеристике и перформансе.

У првом, уводном, поглављу излаже се основни концепт магнетског кола. Магнетско или спрежно поље је посредник у електромеханичкој конверзији енергије која се одвија у електричним машинама. Најпре се излажу основни појмови и закони везани за магнетско поље, уводи појам и методи решавања магнетског кола, а затим разматрају карактеристике феромагнетских материјала од којих се данас израђују језгра електричних машина. Поглавље се завршава разматрањем магнетских кола са перманентним магнетима. Кроз решене примере увежбава се решавање магнетских кола директном применом основних закона или преко еквивалентног аналогног електричног кола.

Електрични трансформатори приказани су у другом поглављу. Полазећи од принципа рада заснованог на електромагнетног индукцији, изводи се модел идеалног трансформатора. Увођењем губитака добија се модел реалног трансформатора, чији се параметри одређују огледом празног хода и кратког споја. Наводе се начини повезивања намотаја трофазних енергетских трансформатора, сажето приказују аутотрансформатори и мерни трансформатори, а затим се пажња посвећује хлађењу и означавању енергетских трансформатора. Детаљно се анализира натписна плочица једног трофазног енергетског трансформатора. Кроз примере и задатке приказује се одређивање перформанси трансформатора.

У трећем поглављу разматра се концепт електромеханичког претварања енергије који се налази у основи рада обртних електричних машина које ће бити разматране у наредним поглављима. На примеру електромагнета са покретном котвом, најпре је приказан генералисани метод одређивања силе преко рада и прираштаја енергије поља, а затим су размотрени статика и динамика овог система. На крају поглавља наведена је електромеханичка аналогија. На решеним примерима показан је практичан прорачун електромагнета и његових перформанси.

Четврто поглавље посвећено је историјски најстаријим једносмерним машинама. Објашњен је принцип рада, анализирана улога и конструкција статора, ротора и комутатора. Изведене су релевантне релације за одређивање модела и електричних и механичких карактеристика генератора и мотора. За најчешће начине побуђивања приказане су и анализирани излазне ("корисничке") карактеристике. Кроз низ решених примера показано је одређивање електричних и механичких карактеристика мотора и генератора. Сложенији системи у којима су једносмерне машине спрегнуте са другим врстама машина приказани су у наредним поглављима.

Асинхроне машине приказане су у петом поглављу. Размотрен је принцип рада и конструкција статора и ротора. Приказан је и анализиран еквивалентни модел асинхроне машине. Детаљна анализа формирања обртног магнетног поља и извођење излазне карактеристике трофазног асинхроног мотора као најчешће коришћеног индустријског електричног мотора уопште налазе се у осмом поглављу – Додатку. Практично одређивање електричних и механичких параметара мотора при раду са различитим оптерећењима и условима напајања, као и компензација реактивне снаге приказани су у решеним примерима.

Шесто поглавље је посвећено синхроним машинама. Анализирани су синхрони генератори као данас доминантни извори електричне енергије, са конструкционим особинама и принципом рада. Размотрене су електричне и механичке карактеристике синхроног генератора и мотора. Анализиран је рад синхроне машине у режиму компензатора реактивне снаге. У задацима су детаљно анализирани фазорски дијаграми генератора и мотора у различитим радним режимима и са различитим врстама оптерећењима. У овом поглављу су и најсложенији задаци у којима је спрегнуто више различитих машина у циљу регулације и управљања излазним величинама. Овакве

сложене спреге се данас све мање користе, јер се регулација и управљање радом машина све више остварује коришћењем претварача енергетске електронике.

У седмом поглављу приказане су монофазне и машине са сталним магнетима као данас највише заступљени мотори малих снага. Најпре је анализиран монофазни асинхронни мотор као највише продавани електрични мотор уопште. Детаљно су приказане његове електричне и механичке карактеристике. Затим су размотрене машине са сталним магнетима као најједноставније и најјефтиније мале електричне машине данас. Дат је преглед основних особина савремених магнетних материјала који су драстично унапредили перформансе ових машина. Наведене теоријске поставке су проверене кроз решене примере.

Осмо поглавље је у форми додатка и садржи материју заједничку за друго, пето, шесто и седмо поглавље. Додатак започиње са приказом трофазног симетричног система, дефинисањем распореда фаза и начином њиховог добијања. Из основних особина овог система изводе се два економична начина повезивања потрошача, спрега у звезду и спрега у троугао, са детаљним разматрањем особина ових спрега. Затим следи разматрање снаге трофазног симетричног потрошача спрегнутог на трофазни симетрични систем. Овај део додатка је рекапитулација усвојених појмова из основног курса Електротехнике. Други део додатка садржи приказ формирања обртног магнетног поља помоћу трофазног намотаја и извођење механичке моментне карактеристике трофазног асинхроног мотора са кавезним ротором. Такође, размотрен је и генераторски режим рада овог мотора и компензација реактивне снаге.

У уџбенику су приказане типичне врсте "класичних" електричних машина. Обим и дубина теоријских разматрања су довољни да читаоцу дају чврст ослонац и солидну основу за праћење научне литературе из ове области. Свака обрађена област је пропраћена решеним примерима и задацима, који читаоца уводе у примену изложене теоријске концепције на решавање практичних проблема из домена примене машина. Посебно се водило рачуна да обим уџбеника буде прилагођен актуелном наставном фонду часова. Аутори су тежили да комплексну проблематику функционисања и примене електричних машина изложе на једноставан и читаоцу разумљив начин, а да при томе излагање задржи и научну коректност и практични приступ.

Аутори захваљују рецензентима, проф. др Предрагу Осмокровићу и проф. др Зорану Лазаревићу, на корисним сугестијама током рада на књизи.