



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

ELEKTROMECHANSKI PRETVORNIKI

Navodila za laboratorijske vaje - 2. del: enofazni asinhronski motorji, sinhronski generatorji in enosmerni stroji

doc. dr. Martin Petrun

Študijsko leto 2020/2021

Pričujoča navodila za laboratorijske vaje so namenjena študentom 2. letnika VS študijskega programa Elektrotehnika na [UM FERl](#), ki opravljajo predmet *Elektromehanski pretvorniki*. Obseg in vsebina laboratorijskih vaj se je pri tem predmetu oblikovala, izboljševala in prilagajala skozi pretekla desetletja skozi pridobljene pedagoške izkušnje ter želje pedagoških delavcev, razvoj stroke in razpoložljivo opremo v laboratoriju. Pri tem so sodelovali številni predhodni in sedanji sodelavci, ki so poskrbeli za evolucijo in dodali svoj kanček v skupni mozaik. Vsebinska pričujočih vaj je tako zasnovana na predhodnih navodilih avtorja Hadžiselimovič (2010), hkrati pa je temeljito prenovljena in prilagojena novo opremljenemu **Laboratoriju za električne stroje** (prostor G-031). Laboratorijske vaje se v prenovljenem laboratoriju izvajajo vzporedno na petih enakih merilnih mestih. Ta merilna mesta omogočajo, da študenti samostojno izvedejo vse preizkuse na najsodobnejši opremi in imajo na tak način najboljše pogoje za uspešen študij.

Laboratorijske vaje so obvezen del predmeta, pri katerem mora vsak študent izvesti praktične preizkuse v laboratoriju in nato izdelati poročila o opravljenih preizkusih. Ta navodila so zasnovana tako, da študentom omogočajo čim bolj **učinkovito**:

- 1) pripravo na laboratorijske vaje pred vstopom v laboratorij,
- 2) izvedbo preizkusov v laboratoriju ter
- 3) izdelavo poročil laboratorijskih vaj.

Ta dokument zajema drugo polovico snovi laboratorijskih vaj in zajema snov iz enofaznih asinhronskih strojev, sinhronskih strojev in komutatorskih strojev. Prva polovica vaj je zaradi lažje izvedbe zbrana v prvem delu, ki zajema snov iz transformatorjev in trifaznih asinhronskih strojev. Uporabljena vsebina in notacija je usklajena z zapiski predavanj avtorjev Ritonja in Zagradišnik (2013). Za vse študente, ki želijo svoje znanje razširiti z dodatno literaturo, pa so jim v knjižnici oz. skriptarnici na voljo še knjige v slovenskem jeziku avtorjev Zagradišnik (2007) in Miljavec in Jereb (2008) ter knjige v angleškem jeziku avtorjev Umans (2014) in Chapman (2012).

Ime in priimek:

Vpisna številka:

Pregledal:

Ocena poročil:

Datum zagovora LV:

Ocena zagovora LV:

Naslov: Elektromehanski pretvorniki, Navodila za laboratorijske vaje - 2. del:
enofazni asinhronski motorji, sinhronski generatorji in enosmerni stroji

Avtor: doc. dr. Martin Petrun
UM FERI
<mailto://martin.petrun@um.si>

**Strokovna
recenzija:** izr. prof. dr. Boštjan Polajžer

Izdajateljica: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (UM FERI)
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija
<https://feri.um.si>,
<mailto://feri@um.si>

**Grafične priloge
in oblikovanje:** doc. dr. Martin Petrun

Izdaja: Prva izdaja

Vrsta publikacije: e-publikacija

Dostopno na: <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=75964>

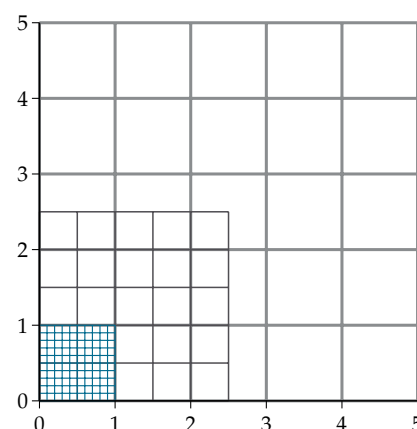
Izid: Maribor, marec 2020

Licenca: CC BY-NC-ND 4.0



Navodila za tiskanje dokumenta:

Dokument je zasnovan za dvostransko tiskanje. Natisnite dokument na papir velikosti A4 z nastavitvijo tiskalnika na **dejanska velikost**. Preden natisnete celoten dokument, preverite pravilnost nastavitvev tiskalnika. Pravilnost nastavitvev preverite tako, da najprej natisnete samo to stran (**izberete stran b**) in preverite dimenzije na desni sliki. Ustrezno prilagodite nastavitve tiskalnika, če dimenzije ne ustrezajo realnim dimenzijam v cm.



Kazalo

4	<i>Enofazni asinhronski motorji</i>	1
4.1	<i>Preizkus obremenitve enofaznega asinhronskega motorja</i>	1
5	<i>Sinhronski generatorji</i>	9
5.1	<i>Nadomestno vezje sinhronskega generatorja s cilindričnim rotorjem</i>	9
6	<i>Enosmerni stroji</i>	15
6.1	<i>Preizkus obremenitve enosmerne generatorjeve</i>	15
6.2	<i>Preizkus obremenitve enosmerne motorja s tujim vzbujanjem</i>	21
6.3	<i>Preizkus obremenitve enosmerne motorja s trajnimi magneti</i>	27

Literatura

Stephen J. Chapman. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, NY, fifth, international edition, 2012. ISBN 978-007-108617-2.

Miralem Hadžiselimović. *Električni in elektromehanski pretvorniki: navodila za laboratorijske vaje*. UM FERl, Maribor, 1. izdaja, 2010. ISBN 978-961-248-238-1.

Damijan Miljavec in Peter Jereb. *Električni stroji: temeljna znanja*. Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2. izdaja, 2008. ISBN 978-961-243-099-3.

Jožef Ritonja in Ivan Zagradišnik. *Električni in elektromehanski pretvorniki: zapiski predavanj*. UM FERl, Maribor, 2013. ISBN 978-961-248-377-7.

Stephen D. Umans. *Fitzgerald and Kingsley's Electric Machinery*. McGraw-Hill, New York, NY, seventh, international edition, 2014. ISBN 978-007-132646-9.

Ivan Zagradišnik. *Električni rotacijski stroji*. UM FERl, Maribor, 4. popravljena izdaja, 2007. ISBN 978-961-248-012-7.

Seznam splošnih oznak za nazivne vrednosti:

Oznaka	Enota	Opis
C	μC	nazivna kapacitivnost trajno vključenega kondenzatorja
$\cos \varphi_N$		nazivni faktor moči
f_N	Hz	nazivna frekvenca
$I_{v,\max}$	V	največji trajni vzbujaalni tok
I_N	A	nazivni tok
n_N	$\frac{1}{\text{min}}$	nazivni vrtljaji
P_N	W	nazivna mehanska moč
S_N	VA	nazivna navidezna moč
U_C	V	nazivna napetost trajno vključenega kondenzatorja
$U_{v,\max}$	V	največja dovoljena vzbujaalna napetost
U_N	V	nazivna napetost

4 Enofazni asinhronski motorji

4.1 Preizkus obremenitve enofaznega asinhronskega motorja

Cilji vaje:

Izvedite preizkus obremenitve enofaznega asinhronskega motorja:

- če motor obratuje brez pomožnega navitja s kondenzatorjem (aktivno samo glavno navitje).
- če motor obratuje z vključenim pomožnim navitjem in kondenzatorjem za trajno obratovanje.

Pred vstopom v laboratorij se dobro pripravite! Teoretično ozadje za pripravo na to vajo najdete na straneh 89-92 v zapiskih predavanj:

Jožef Ritonja in Ivan Zagradišnik. *Električni in elektromehanski pretvorniki: zapiski predavanj*. UM FERL, Maribor, 2013. ISBN 978-961-248-377-7

Uporabljene oznake:

Oznaka	Enota	Opis
η		izkoristek
ϑ_{ref}	$^{\circ}\text{C}$	referenčna temperatura (hladen stroj pred vsemi preizkusi)
ϑ_t	$^{\circ}\text{C}$	ocenjena temperatura segrelih navitij (segret stroj po opravljenem preizkusu)
Ω_m	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	mehanska kotna hitrost gredi stroja
$\cos \varphi$		faktor moči
I_s	A	statorski tok (efektivna fazna vrednost)
M	Nm	mehanski navor na gredi stroja
M_{pv}	Nm	preostala vrednost (offset) senzorja navora
M_x	Nm	izmerjena vrednost navora vključno s preostalo vrednostjo senzorja navora
n	$\frac{1}{\text{min}}$	mehanska hitrost vrtenja gredi stroja
n_{ref}	$\frac{1}{\text{min}}$	referenčna vrednost vrtiljajev aktivnega bremenskega pogona
P	W	mehanska moč stroja
P_s	W	skupna električna moč stroja
$R_{U12,\text{ref}}$	Ω	referenčna upornost navitij med sponkama U1 in U2 (hladen stroj)
$R_{U12,t}$	Ω	izmerjena upornost navitij med sponkama U1 in U2 (segret stroj)
U_s	V	statorska napetost (efektivna fazna vrednost)

Merjenec:

Merjenec je enofazni asihronski motor s kratkostično kletko SEIPEE (tip JMM 71B 4 B3)¹ z nazivnimi podatki:

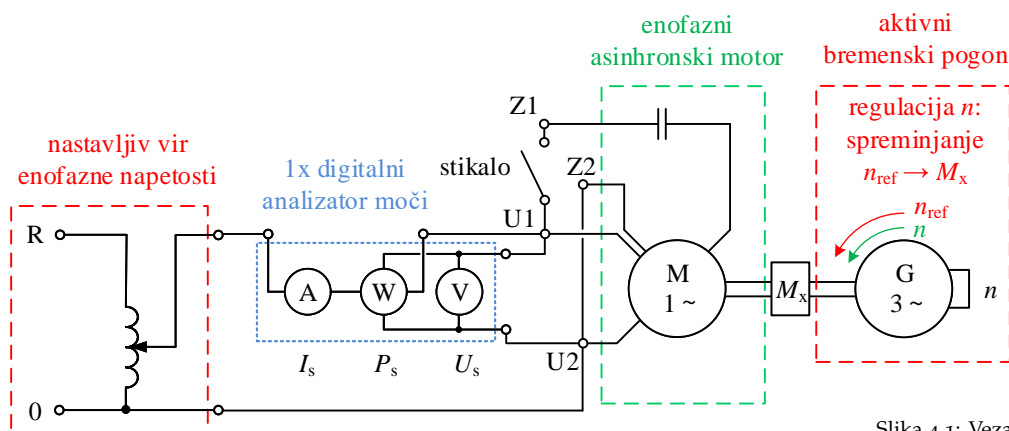
¹ Motor je zasnovan za obratovanje s trajno vključeno pomožno fazo in kondenzatorjem.

opis	oznaka	vrednost	enota
frekvenca	f_N	50	Hz
napetost	U_N	230	V
tok	I_N	2,07	A
mehaska moč	P_N	0,25	kW
vrtiljaji	n_N	1316	$\frac{1}{\text{min}}$
faktor moči	$\cos \varphi_N$	0,97	
kapacitivnost kond.	C	20	μF
napetost kondenzatorja	U_C	450	V

Tabela 4.1: Nazivni podatki

Potek meritev:

Pripravite eksperiment za preizkušanje obravnavanega merjenca v skladu s shematskim prikazom na sliki 4.1,



Slika 4.1: Vežalna shema

kjer uporabite merilno opremo in naprave predstavljene v tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Merilna oprema in naprave

oprema	model	specifikacije/opombe
napajalni vir	laboratorijska miza	nastavljivi vir enofazne napetosti; \sim AC 0 – 260 V, 6 A
V-, A-, W-meter	Metrix PX 120	digitalni analizator moči ^a
merilnik vrtljajev	inkrementalni enkoder Siemens 1XP8001-1	vrtljaje sistema izračuna frekvenčni pretvornik Siemens SINAMICS G120-IOP
merilnik navora	HBM T20 WN/10NM	območje: 10 Nm, 1 V/Nm, $M_{pv} = \text{_____}$ Nm
Ω -meter	EXTECH EX542	digitalni multimeter

^a Posamezen digitalni analizator moči omogoča merjenje toka, napetosti in moči v eni fazi. V obravnavanem primeru je potreben samo en digitalni analizator moči.

Izvedite preizkus v petih korakih:

- 1) Odklopite pomožno navitje s kondenzatorjem ter določite referenčno vrednost upornosti glavnega navitja $R_{U12,ref}$ in referenčno vrednost temperature motorja² ϑ_{ref} .
- 2) Izvedite preizkus obremenitve pri nazivni napetosti U_N in frekvenci f_N motorja z izključeno pomožno fazo. Povečujte mehansko breme v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 4.3, začeni z neobremenjenim stanjem motorja. Povečujte navor bremena³ posredno z uporabo hitrostne regulacije bremenskega pogona tako, da ustrezno znižujete referenčno vrednost hitrosti n_{ref} . **Bodite pozorni na nastavljeno obratovalno stanje motorja. Aktivni bremenski pogon ima znatno višjo nazivno moč, zato lahko brez težav prisili merjen motor v kritična obratovalna stanja⁴.** V vsaki merilni točki izmerite ustrezne količine v skladu s tabelo 4.3.
- 3) Takoj po končanem preizkusu izmerite upornost segretyh navitij $R_{U12,t}$ v obravnavanem motorju.

² Izmerite temperaturo okolice in predpostavite, da je motor že dovolj dolgo neaktiven v tem okolju in ima enako temperaturo kot okolica.

³ Upoštevajte tudi morebitno preostalo vrednost senzorja navora M_{pv} .

⁴ V takšnih obratovalnih stanjih izgube v stroju narastejo nad sprejemljive vrednosti, kar pozroči pregrevanje in posledično poškodovanje ali celo uničenje stroja.

- 4) Priključite pomožno navitje s kondenzatorjem in ponovite preizkus obremenitve. Izvedite preizkus pri nazivni napetosti U_N in frekvenci f_N motorja z izključeno pomožno fazo. Povečujte mehansko breme v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 4.4, začnši z neobremenjenim stanjem motorja. Povečujte navor bremena⁵ posredno z uporabo hitrostne regulacije bremenskega pogona tako, da ustrezno znižujete referenčno vrednost hitrosti n_{ref} . **Bodite zelo pozorni pri določitvi ustrezne smeri vrtenja bremenskega pogona glede na naravno smer vrtenja merjenega motorja⁶. Aktivni bremenski pogon ima znatno višjo nazivno moč, zato lahko brez težav prisili merjen motor v kritična obratovalna stanja⁷.** V vsaki merilni točki izmerite ustrezne količine v skladu s tabelo 4.4.

- 5) Takoj po končanem preizkusu izmerite upornost segrelih navitij $R_{U12,t}$ v obravnavanem motorju.

Potek izračunov:

Pri izvedbi meritev in izračunov bodite pozorni na morebitno preostalo vrednost M_{pv} uporabljenega senzorja navora. Dejanski navor M določimo z

$$M = M_x \mp M_{pv}, \quad (4.1)$$

pri čemer se predznak \mp določi glede na predznak preostale vrednosti in smer vrtenja eksperimentalnega sistema.

Med preizkusom obremenitve merjenec dovaja mehansko energijo bremenskemu pogonu. Izhodno moč merjenega motorja P lahko v našem primeru določimo po direktni metodi⁸ z

$$P = \Omega_m M = \frac{2\pi n}{60} M, \quad (4.2)$$

izkoristek η in faktor moči $\cos \varphi$ pa določimo z

$$\eta = \frac{P}{P_s} \quad (4.3)$$

in

$$\cos \varphi = \frac{P_s}{U_s I_s}, \quad (4.4)$$

Temperaturo merjenega motorja po opravljenih preizkusih lahko določimo na podlagi

$$R_{U12,t} = R_{U12,\text{ref}} \frac{235 + \vartheta_t}{235 + \vartheta_{\text{ref}}}. \quad (4.5)$$

⁵ Upoštevajte tudi morebitno preostalo vrednost senzorja navora M_{pv} .

⁶ V primeru regulacije hitrosti bremenskega pogona, se morata oba stroja vrteti v enako smer, kot je prikazano na sliki 4.1.

⁷ V takšnih obratovalnih stanjih izgube v stroju narastejo nad sprejemljive vrednosti, kar pozroči pregrevanje in posledično poškodovanje ali celo uničenje stroja.

⁸ Pojem *direktna metoda* pomeni, da vse potrebne količine za določitev moči določimo neposredno z ustreznimi meritvami. V primeru določitve mehanske moči P izmerimo tako vrtljaje n kot tudi navor M neposredno na gredi eksperimentalnega sistema.

Primeri izračunov:

Prikažite izračune⁹ za drugo merilno točko v tabeli 4.3:

⁹ Vedno najprej prikažite vstavljene vrednosti in šele nato izračunan rezultat z ustrezno enoto. Vrednosti zaokrožite na 3 pomembna mesta.

$P_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ W}$	$U_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$	$I_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ A}$
$n = \underline{\hspace{1cm}} \frac{1}{\text{min}}$	$M_{pv} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Nm}$	$M_x = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Nm}$
$R_{U12,ref} = \underline{\hspace{1cm}} \Omega$	$R_{U12,t} = \underline{\hspace{1cm}} \Omega$	$\vartheta_{ref} = \underline{\hspace{1cm}} ^\circ\text{C}$
$M = M_x \mp M_{pv} =$		
$P = \frac{2\pi n}{60} M =$		
$\cos \varphi = \frac{P_s}{U_s I_s} =$		
$\eta = \frac{P}{P_s} =$		
$\vartheta_t = (\vartheta_{ref} + 235) \frac{R_{U12,t}}{R_{U12,ref}} - 235 =$		

Prikažite izračune za drugo merilno točko v tabeli 4.4:

$P_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ W}$	$U_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$	$I_s = \underline{\hspace{1cm}} \text{ A}$
$n = \underline{\hspace{1cm}} \frac{1}{\text{min}}$	$M_{pv} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Nm}$	$M_x = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Nm}$
$R_{U12,ref} = \underline{\hspace{1cm}} \Omega$	$R_{U12,t} = \underline{\hspace{1cm}} \Omega$	$\vartheta_{ref} = \underline{\hspace{1cm}} ^\circ\text{C}$
$M = M_x \mp M_{pv} =$		
$P = \frac{2\pi n}{60} M =$		
$\cos \varphi = \frac{P_s}{U_s I_s} =$		
$\eta = \frac{P}{P_s} =$		
$\vartheta_t = (\vartheta_{ref} + 235) \frac{R_{U12,t}}{R_{U12,ref}} - 235 =$		

Rezultati meritev in izračunov:

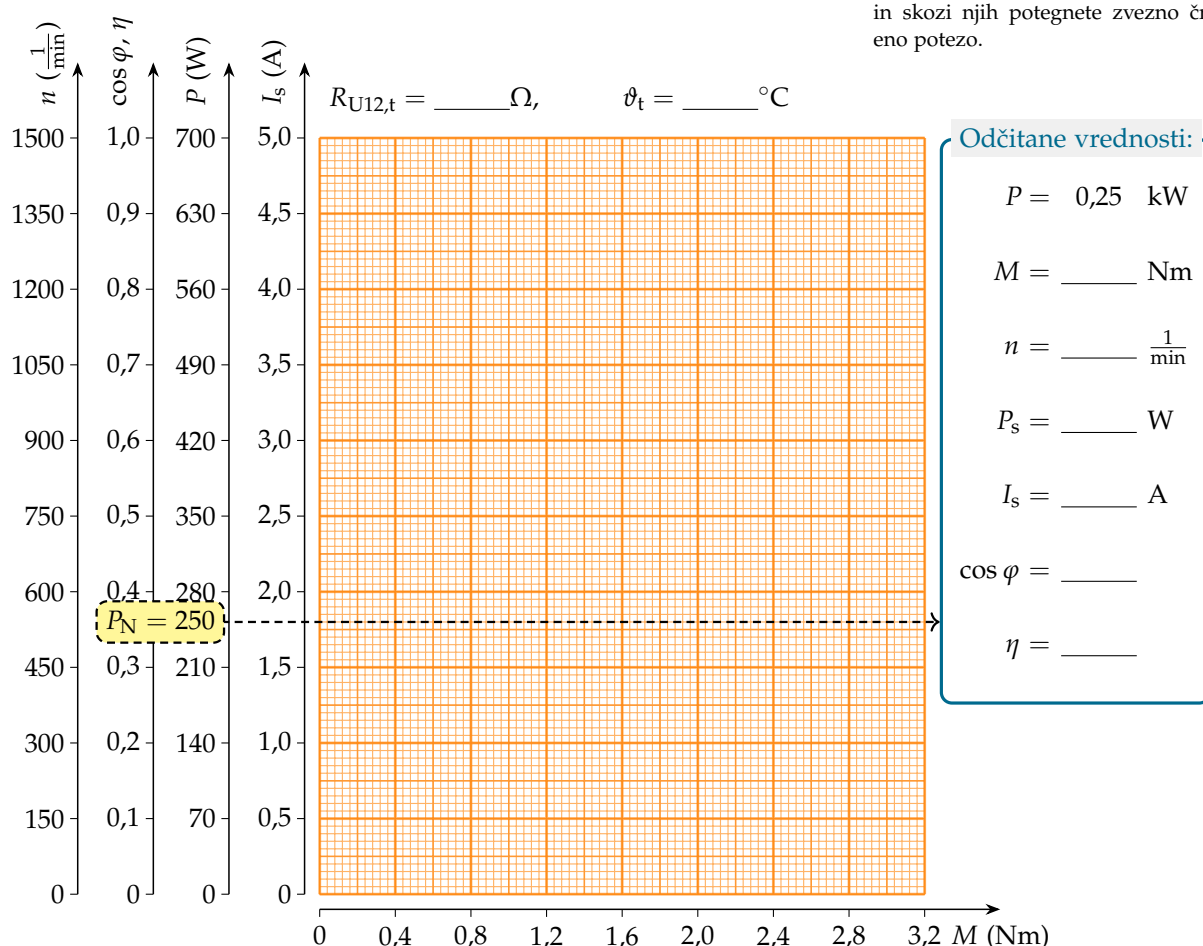
V tabelo 4.3 zapišite izmerjene in izračunane vrednosti v primeru obratovanja motorja brez pomožne faze.

Tabela 4.3: Izmerjene in izračunane vrednosti v primeru obratovanja motorja brez pomožne faze

št.	ref. vr.	izmerjene vrednosti				izračunane vrednosti			
	M (Nm)	M_x (Nm)	n ($\frac{1}{\text{min}}$)	I_s (A)	P_s (W)	M (Nm)	P (W)	η	$\cos \varphi$
1.	2,0								
2.	1,6								
3.	1,2								
4.	0,8								
5.	0,4								

Prikažite¹⁰ spreminjanje I_s , P_s , P , n , $\cos \varphi$ in η v odvisnosti od bremenskega navora M in določite vrednosti količin za nazivno mehansko moč $P = P_N = 0,25$ kW:

¹⁰ Nelinearne odvisnosti narišite z uporabo krivuljnikov, linearne pa z uporabo ravnila. Aproximacijo karakteristik izvedite tako, da upoštevate vse izmerjene točke kar se da uravnoteženo in skozi njih potegnute zvezno črto z eno potezo.



Slika 4.2: Grafična predstavitev dobljenih rezultatov in odčitane vrednosti za nazivno mehansko moč P_N v primeru delovanja brez pomožne faze.

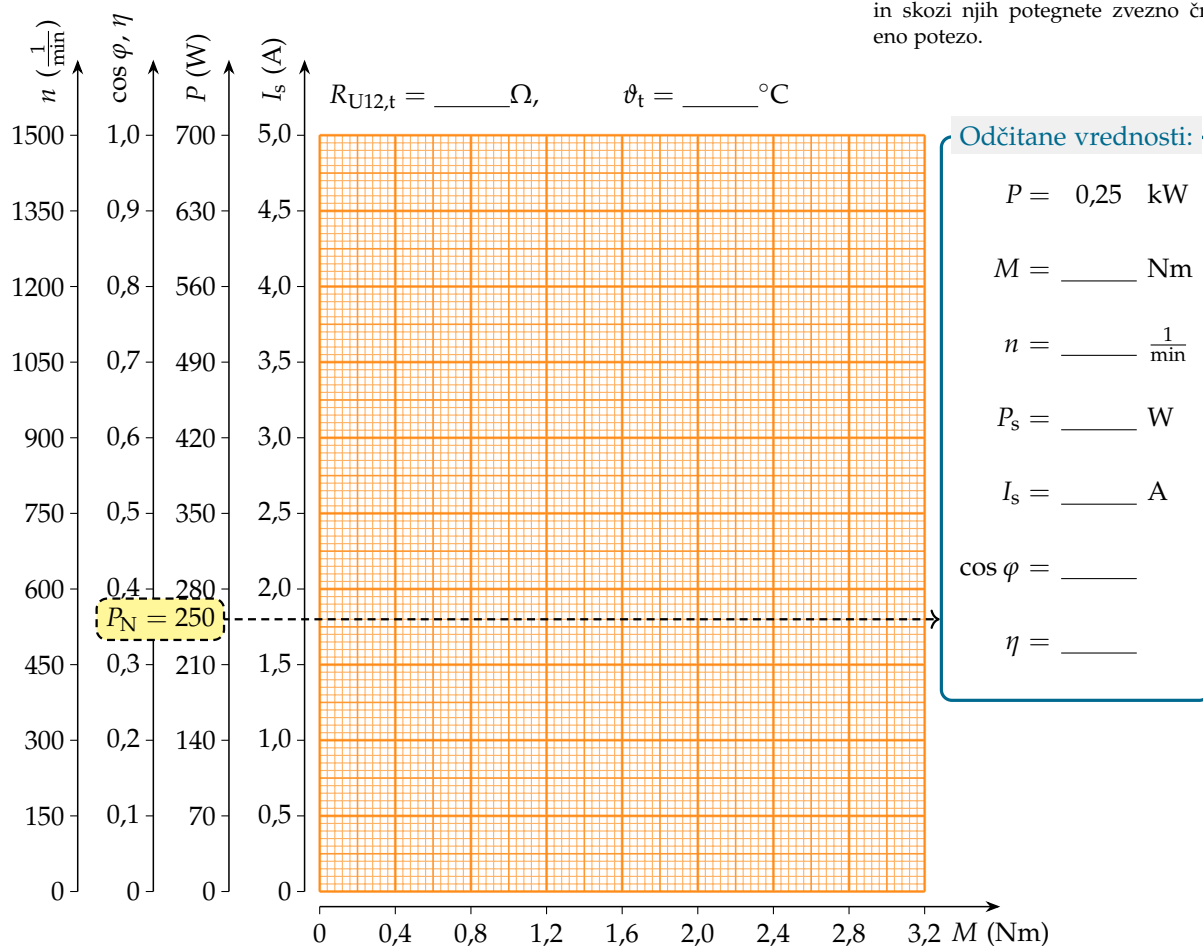
V tabelo 4.4 zapišite izmerjene in izračunane vrednosti v primeru obratovanja motorja s pomožno fazo.

Tabela 4.4: Izmerjene in izračunane vrednosti v primeru obratovanja motorja s pomožno fazo

št.	ref. vr.	izmerjene vrednosti				izračunane vrednosti			
	M (Nm)	M_x (Nm)	n ($\frac{1}{\text{min}}$)	I_s (A)	P_s (W)	M (Nm)	P (W)	η	$\cos \varphi$
1.	3,0								
2.	2,4								
3.	1,8								
4.	1,2								
5.	0,6								

Prikažite¹¹ spreminjanje I_s , P_s , P , n , $\cos \varphi$ in η v odvisnosti od bremenskega navora M in določite vrednosti količin za nazivno mehansko moč $P = P_N = 0,25$ kW:

¹¹ Nelinearne odvisnosti narišite z uporabo krivuljnikov, linearne pa z uporabo ravnila. Aproximacijo karakteristik izvedite tako, da upoštevate vse izmerjene točke kar se da uravnoteženo in skozi njih potegnute zvezno črto z eno potezo.



Slika 4.3: Grafična predstavitev dobljenih rezultatov in odčitane vrednosti za nazivno mehansko moč P_N v primeru delovanja s pomožno fazo.

Diskusija dobljenih rezultatov:

Za primer obratovanja motorja s trajno vključeno pomožno fazo primerjajte dobljene količine pri nazivni oddani moči P_N (odčitane vrednosti na sliki 4.3) z nazivnimi podatki, ki so deklarirani na ploščici motorja (vrednosti v tabeli 4.1). Pojasnite razloge za morebitna odstopanja.

Primerjajte dobljene rezultate preizkusov obremenitve v obeh primerih (slika 4.2 in slika 4.3) in razložite razlike.

Pojasnite izvor pulzacije navora enofaznega asinhronskega motorja. V katerem primeru je pulzacija navora najmanjša? Zakaj se pulzacija navora spreminja z obremenitvijo motorja?

Navedite in pojasnite prednosti in slabosti enofaznih asinhronskih motorjev v primerjavi s trifaznimi.

5 Sinhronski generatorji

5.1 Nadomestno vezje sinhronskega generatorja s cilindričnim rotorjem

Cilji vaje:

Izvedite preizkus prostega teka in preizkus kratkega stika sinhronskega generatorja s cilindričnim rotorjem in določite parametre nadomestnega vezja obravnavanega generatorja.

Pred vstopom v laboratorij se dobro pripravite! Teoretično ozadje za pripravo na to vajo najdete na straneh 104-105 in 114-116 v zapiskih predavanj:

Jožef Ritonja in Ivan Zagradišnik. *Električni in elektromehanski pretvorniki: zapiski predavanj*. UM FERL, Maribor, 2013. ISBN 978-961-248-377-7

Uporabljene oznake:

Oznaka	Enota	Opis
I_{v0}	A	enosmerni vzbujaalni tok karakteristike prostega teka (amplitudna vrednost)
I_k	A	statorski tok kratkega stika generatorja (efektivna fazna vrednost)
I	A	statorski tok (efektivna fazna vrednost)
I^*		normirana vrednost statorskega toka
I_v	A	enosmerni vzbujaalni tok (amplitudna vrednost)
$I_{v\delta}$	A	enosmerni vzbujaalni tok karakteristike zračne reže (amplitudna vrednost)
I_{vk}	A	enosmerni vzbujaalni tok karakteristike kratkega stika (amplitudna vrednost)
K_c		kratkostično razmerje generatorja
R_s^*		normirana upornost statorskih navitij
R_s	Ω	upornost statorskih navitij (fazna vrednost)
U	V	statorska napetost (efektivna medfazna vrednost)
U_0	V	statorska napetost prostega teka generatorja (efektivna medfazna vrednost)
U^*		normirana vrednost statorske napetosti
x_d		normirana nasičena sinhronska reaktanca
X_d	Ω	nasičena sinhronska reaktanca (fazna vrednost)
$x_{d,n}$		normirana nenasičena sinhronska reaktanca
$X_{d,n}$	Ω	nenasičena sinhronska reaktanca (fazna vrednost)
Z_{Nf}	Ω	bazna impedanca (nazivna fazna vrednost)

Merjenec:

Merjenec je trifazni sinhronski stroj s cilindričnim rotorjem¹² LD DIDACTIC (tip 73237) z nazivnimi podatki:

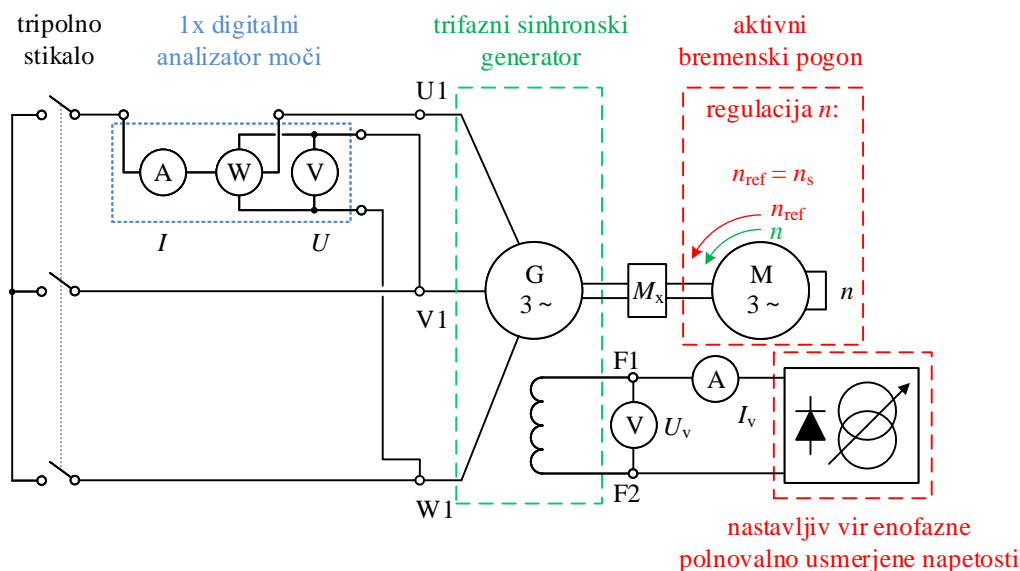
¹² Obravnavan sinhronski stroj ima na rotorju nameščeno vzbujaalno navitje in kratkostično kletko.

Tabela 5.1: Nazivni podatki

	opis	oznaka	vrednost	enota
	frekvenca	f_N	50	Hz
	napetost	U_N	Δ/Y 230/400	V
	tok	I_N	Δ/Y 0,62/0,36	A
	navidezna moč	S_N	0,25	kVA
	vrtiljaji	n_N	1500	$\frac{1}{\text{min}}$
	faktor moči	$\cos \varphi_N$	0,97	
	maks. vzbujaalna napetost	$U_{v,\max}$	150	V
	maks. vzbujaalni tok	$I_{v,\max}$	0,95	A

Potek meritev:

Pripravite eksperiment za preizkušanje obravnavanega merjenca v skladu s shematskim prikazom na sliki 5.1,



Slika 5.1: Vežalna shema

kjer uporabite merilno opremo in naprave predstavljene v tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Merilna oprema in naprave

oprema	model	specifikacije/opombe
napajalni vir	laboratorijska miza	nastavljen vir enofazne polnovalno usmerjene napetosti; \approx DC 0 – 320 V, 6 A
V-, A-, W-meter	Metrix PX 120	digitalni analizator moči ^a
voltmeter	Fluke 115	digitalni multimeter
ampermeter	Fluke 115	digitalni multimeter
merilnik vrtljajev	inkrementalni enkoder Siemens 1XP8001-1	vrtljaje sistema izračuna frekvenčni pretvornik Siemens SINAMICS G120-IOP
merilnik navora	HBM T20 WN/10NM	območje: 10 Nm, 1 V/Nm, $M_{pv} = \text{_____Nm}$
Ω -meter	EXTECH EX542	digitalni multimeter

^a Posamezen digitalni analizator moči omogoča merjenje toka, napetosti in moči v eni fazi. V obravnavanem primeru je potreben samo en digitalni analizator moči.

Izvedite preizkus v dveh korakih:

- 1) Izvedite preizkus prostega teka¹³ pri nazivni frekvenci generatorja f_N z ustrezno nastavitvijo referenčne hitrosti $n_{ref} = n_N$ bremenskega pogona. Povečujte vzbujalni tok I_v v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 5.3, začenši z nevzbujenim stanjem generatorja. V vsaki merilni točki izmerite napetost U_0 na sponkah generatorja.
- 2) Izvedite preizkus kratkega stika¹⁴ pri nazivni frekvenci generatorja f_N z ustrezno nastavitvijo referenčne hitrosti $n_{ref} = n_N$

¹³ S stikalom pred preizkusom odprite sponke statorskega navitja.

¹⁴ S stikalom pred preizkusom kratko sklenite sponke statorskega navitja.

bremenskega pogona. S povečevanjem vzbujačnega toka I_v posredno povečujete statorski tok I_k v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 5.4, začenši z nevzbujenim stanjem generatorja. V vsaki merilni točki izmerite vzbujačni tok I_v in statorski tok I_k .

Potek izračunov:

Za izračun normiranih vrednosti napetosti U^* in toka I^* iz izmerjenih vrednosti U in I uporabimo kot bazne vrednosti nazivne vrednosti generatorja, ki so prikazane v tabeli 5.1. Normirane vrednosti napetosti U^* v tem primeru izračunamo z

$$U^* = \frac{U_0}{U_N}, \quad (5.1)$$

normirane vrednosti toka I^* pa z

$$I^* = \frac{I_k}{I_N}. \quad (5.2)$$

Na osnovi izbranih baznih vrednosti napetosti in toka ter znane vezave statorskih navitij Y lahko izračunamo bazno vrednost fazne impedance Z_{Nf} z

$$Z_{Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}. \quad (5.3)$$

Normirane vrednosti nasičene in nenasičene sinhronske reaktance ($x_{d,n}$ in x_d) lahko izračunamo na podlagi določenih količin na sliki 5.2 z

$$x_{d,n} = \frac{I_{vk}}{I_{v\delta}} \quad (5.4)$$

in

$$x_d = \frac{I_{vk}}{I_{v0}}. \quad (5.5)$$

Nadalje lahko določimo tudi kratkostično razmerje K_c generatorja z

$$K_c = \frac{1}{x_d} = \frac{I_{v0}}{I_{vk}}. \quad (5.6)$$

Fazno vrednost sinhronskih reaktanc $X_{d,n}$ in X_d izračunamo z

$$X_{d,n} = x_{d,n}Z_{Nf} \quad (5.7)$$

in

$$X_d = x_dZ_{Nf}. \quad (5.8)$$

Na koncu izračunamo še normirano fazno vrednost upornosti statorskih navitij R_s^* z

$$R_s^* = \frac{R_s}{Z_{Nf}}. \quad (5.9)$$

Primer izračunov:

Prikažite izračune¹⁵ za tretjo merilno točko:

¹⁵ Vedno najprej prikažite vstavljene vrednosti in šele nato izračunan rezultat z ustrežno enoto. Vrednosti zaokrožite na 3 pomembna mesta.

$U_0 =$	V	$I_k =$	A
$U_N =$	V	$I_N =$	A
$U^* = \frac{U_0}{U_N} =$		$I^* = \frac{I_k}{I_N} =$	

Rezultati meritev in izračunov:

V tabelo 5.3 zapišite izmerjene in izračunane vrednosti v primeru prostega teka generatorja pri $n_{\text{ref}} = n_s = 1500 \frac{1}{\text{min}}$.

Tabela 5.3: Izmerjene in izračunane vrednosti v primeru prostega teka sinhronskega generatorja

	št. meritve										
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
I_v (A)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
U_0 (V)	0										
U^*	0										

V tabelo 5.4 zapišite izmerjene in izračunane vrednosti v primeru kratkega stika generatorja pri $n_{\text{ref}} = n_s = 1500 \frac{1}{\text{min}}$.

Tabela 5.4: Izmerjene in izračunane vrednosti v primeru kratkega stika sinhronskega generatorja

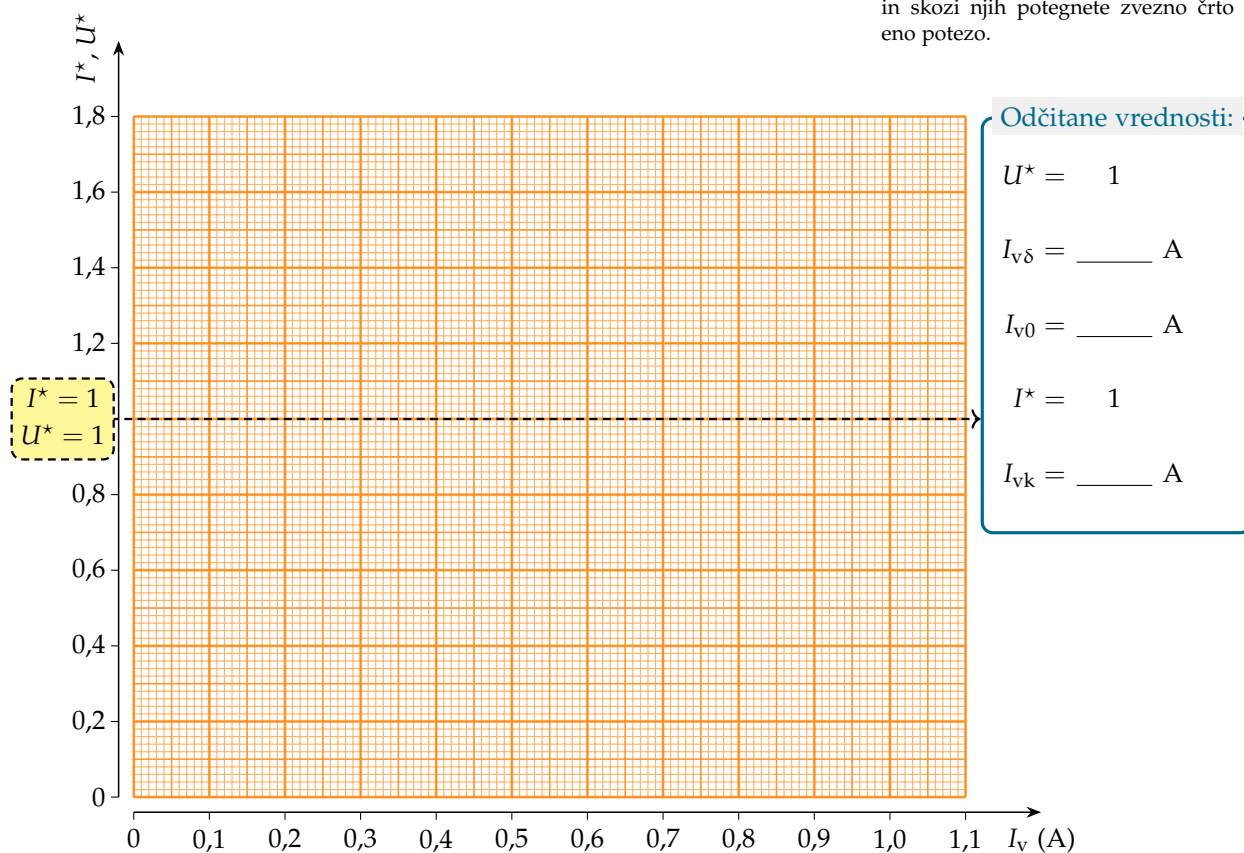
	ref. vr.	izmerjene vrednosti		izr. vr.
št.	I_k (A)	I_k (A)	I_v (A)	I^*
1.	0	0	0	0
2.	0,3			
3.	0,6			

Izračun parametrov nadomestnega vezja:

$I_{v\delta} =$	A	$I_{v0} =$	A	$I_{vk} =$	A	$R_s =$	Ω
$Z_{Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} =$		$K_c = \frac{I_{v0}}{I_{vk}} =$					
$x_{d,n} = \frac{I_{vk}}{I_{v\delta}} =$		$x_d = \frac{I_{vk}}{I_{v0}} =$					
$X_{d,n} = x_{d,n}Z_{Nf} =$		$X_d = x_dZ_{Nf} =$					
$R_s^* = \frac{R_s}{Z_{Nf}} =$							

Prikažite¹⁶ spreminjanje I^* in U^* v odvisnosti od vzbujačnega toka I_v in določite vrednosti vzbujačnih tokov $I_{v\delta}$, I_{v0} in I_{vk} za $I^* = U^* = 1$. Vse karakteristike narišite iz izhodišča koordinatnega sistema.

¹⁶ Nelinearne odvisnosti narišite z uporabo krivuljnikov, linearne pa z uporabo ravnila. Aproximacijo karakteristik izvedite tako, da upoštevate vse izmerjene točke kar se da uravnoteženo in skozi njih potegnute zvezno črto z eno potezo.



Slika 5.2: Grafična predstavitev dobljenih rezultatov in odčitane vrednosti za primer $I^* = U^* = 1$.

Diskusija dobljenih rezultatov:

Narišite popolno nadomestno vezje trifaznega sinhronskega stroja s cilidričnim rotorjem in ob vsakem parametru zapišite tudi njegovo vrednost:



Pojasnite razliko med nenasičeno in nasičeno sinhronsko reaktanco. Kako se X_d spreminja z nasičenjem stroja?

Katere reaktance so zajete v sinhronski reaktanci X_d ?

Primerjajte normirano vrednost upornosti statorskih navitij R_s^* z vrednostjo sinhronske reaktance x_d . Kateri parameter ima večji vpliv na delovanje stroja?

Zapišite enačbo za tok kratkega stika sinhronskega generatorja in na podlagi enačbe pojasnite zakaj in katerem območju ta tok ni odvisen od vrtiljev generatorja n .

6 Enosmerni stroji

6.1 Preizkus obremenitve enosmernih generatorjev

Cilji vaje:

Izmerite in primerjajte zunanje karakteristike enosmernega generatorja z različnimi izvedbami vzbujaanja:

- Paralelno vzbujaanje (samovzbujanje generatorja).
- Tuje vzbujaanje s konstantnim vzbujalnim tokom.
- Tuje vzbujaanje s spremenljivim vzbujalnim tokom (regulacija napetosti).

Pred vstopom v laboratorij se dobro pripravite! Teoretično ozadje za pripravo na to vajo najdete na straneh 137-142 in 150-154 v zapiskih predavanj:

Jožef Ritonja in Ivan Zagradišnik. *Električni in elektromehanski pretvorniki: zapiski predavanj*. UM FERL, Maribor, 2013. ISBN 978-961-248-377-7

Uporabljene oznake:

Oznaka	Enota	Opis
I_b	A	enosmerni bremenski tok (amplitudna vrednost)
I_v	A	enosmerni vzbujalni tok (amplitudna vrednost)
n	$\frac{1}{\text{min}}$	mehanska hitrost vrtenja gredi stroja
n_{ref}	$\frac{1}{\text{min}}$	referenčna vrednost vrtiljajev aktivnega bremenskega pogona
R_b	Ω	bremenska upornost
R_d	Ω	dodatna upornost v vzbujalnem tokokrogu
U_a	V	enosmerna napetost na rotorskih sponkah (amplitudna vrednost)

Merjenec:

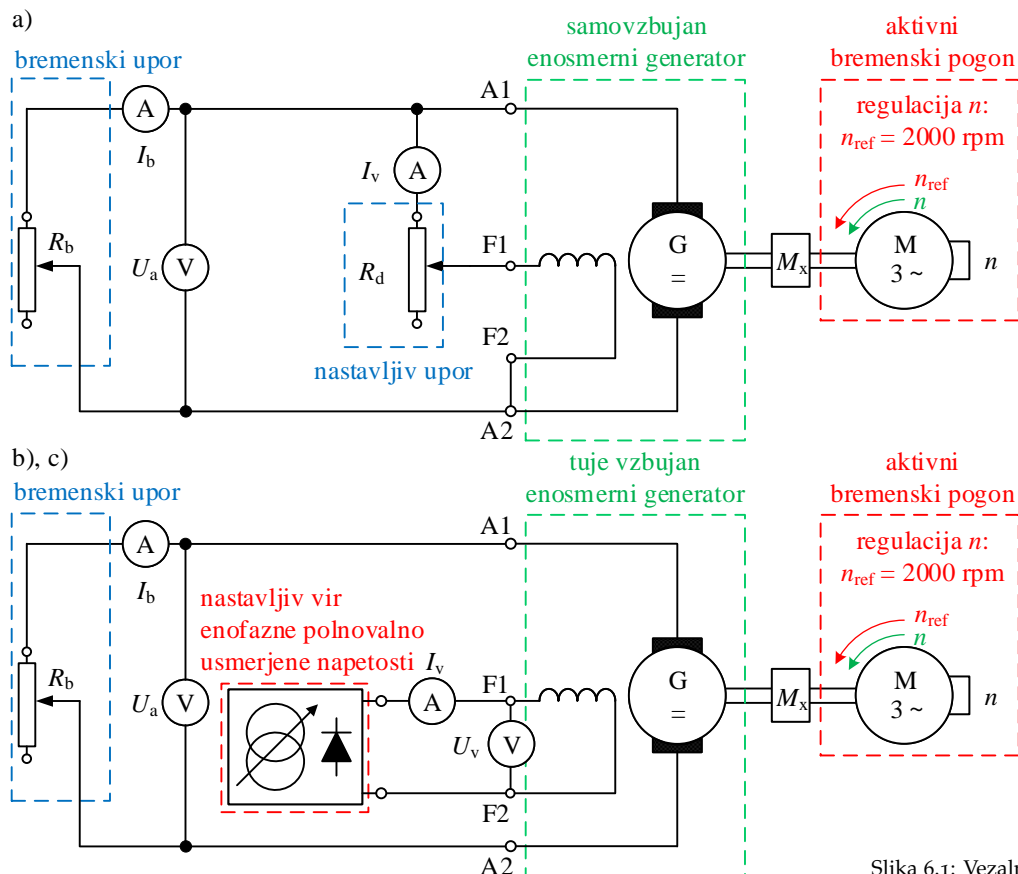
Merjenec je enosmerni komutatorski stroj BALDOR (tip CD3451) z nazivnimi podatki:

	opis	oznaka	vrednost	enota
	napetost	U_N	180	V
	tok	I_N	2,6	A
	mehanska moč	P_N	0,37	kW
	vrtiljaji	n_N	1750	$\frac{1}{\text{min}}$
	maks. vzbujalna napetost	$U_{v,\text{max}}$	100	V
	maks. vzbujalni tok	$I_{v,\text{max}}$	0,5	A

Tabela 6.1: Nazivni podatki

Potek meritev:

Pripravite eksperiment za preizkušanje obravnavanega merjenca v skladu s shematskim prikazom na sliki 6.1,



Slika 6.1: Vežalna shema

kjer uporabite merilno opremo in naprave predstavljene v tabeli 6.2.

Tabela 6.2: Merilna oprema in naprave

oprema	model	specifikacije/opombe
napajalni vir	laboratorijska miza	nastavljiv vir enofazne polnovalno usmerjene napetosti; \approx DC 0 – 320 V, 6 A
voltmeter	FLUKE 115	digitalni multimeter
ampermeter	FLUKE 115	digitalni multimeter
merilnik vrtljajev	inkrementalni enkoder Siemens 1XP8001-1	vrtljaje sistema izračuna frekvenčni pretvornik Siemens SINAMICS G120-IOP
drsni upor	IEV PRN 117	območje: 0 – 600 Ω , dopustni trajni tok: 0,5 A, spreminjanje R_d v vzbujalnem tokokrogu
drsni upor	METREL, PRN	območje: $3 \times (0 - 100) \Omega$, dopustni trajni tok: 1,8 A, dopustni kratkotrajni tok: 2,5 A/15 min, spreminjanje R_b v bremenskem tokokrogu

Izvedite vse tri različice preizkusa pri konstantnih vrtljajih gredi stroja $n_{\text{ref}} = n = 2000 \frac{1}{\text{min}}$. Izvedite preizkus v štirih korakih:

- 1) Najprej preverite pogoje za samovzbujanje generatorja. Električno nepriključen generator zaženite na $n_{\text{ref}} = n = 2000 \frac{1}{\text{min}}$ vrtljajev in izmerite inducirano napetost¹⁷ v rotorskem navitju.
- 2) Samovzbujanje generatorja omogočite tako, da povežete obravnavan enosmerni generator v skladu s shematskim prikazom¹⁸ na sliki 6.1 a). Nastavite hitrost vrtenja na $n_{\text{ref}} = 2000 \frac{1}{\text{min}}$ ter prilagodite drsni upor v vzbujalnem tokokrogu tako, da bo v prostem teku generatorja napetost na sponkah rotorskega navitja znašala $U_a = 180 \text{ V}$. Pod tako nastavljenimi pogoji s spreminjanjem bremenske upornosti R_b povečujte bremenski tok I_b v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 6.3. V vsaki merilni točki izmerite napetost U_a , bremenski tok I_b in vzbujalni tok I_v .
- 3) Povežite vzbujalno navitje stroja s tujim izvorom, kot je prikazano na sliki 6.1 b). Nastavite vrtljaje na $n_{\text{ref}} = 2000 \frac{1}{\text{min}}$ ter prilagodite vzbujalni tok I_v tako, da bo v prostem teku generatorja napetost na sponkah rotorskega navitja znašala $U_a = 180 \text{ V}$. Pod tako nastavljenimi pogoji s spreminjanjem bremenske upornosti R_b povečujte bremenski tok I_b v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 6.3. V vsaki merilni točki izmerite napetost U_a , bremenski tok I_b in vzbujalni tok I_v .
- 4) Ponovite preizkus iz prejšnje točke, vendar med preizkusom obremenitve v vsaki točki prilagodite vzbujalni tok I_v tako, da bo v vseh merilnih točkah napetost na sponkah rotorskega navitja znašala $U_a = 180 \text{ V}$. S spreminjanjem bremenske upornosti R_b povečujte bremenski tok I_b v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 6.3. V vsaki merilni točki izmerite napetost U_a , bremenski tok I_b in vzbujalni tok I_v .

¹⁷ Ta inducirana napetost je posledica remanentnega magnetnega polja v stroju.

¹⁸ Bodite pozorni, da vzbujalno navitje povežete na rotorsko navitje s pravilno polariteto in s tem omogočite proces samovzbujanja. V primeru, da napetost U_a po zagonu generatorja ne naraste, ustavite eksperiment, zamenjajte začetek in konec vzbujalnega navitja in ponovite preizkus.

Rezultati meritev:

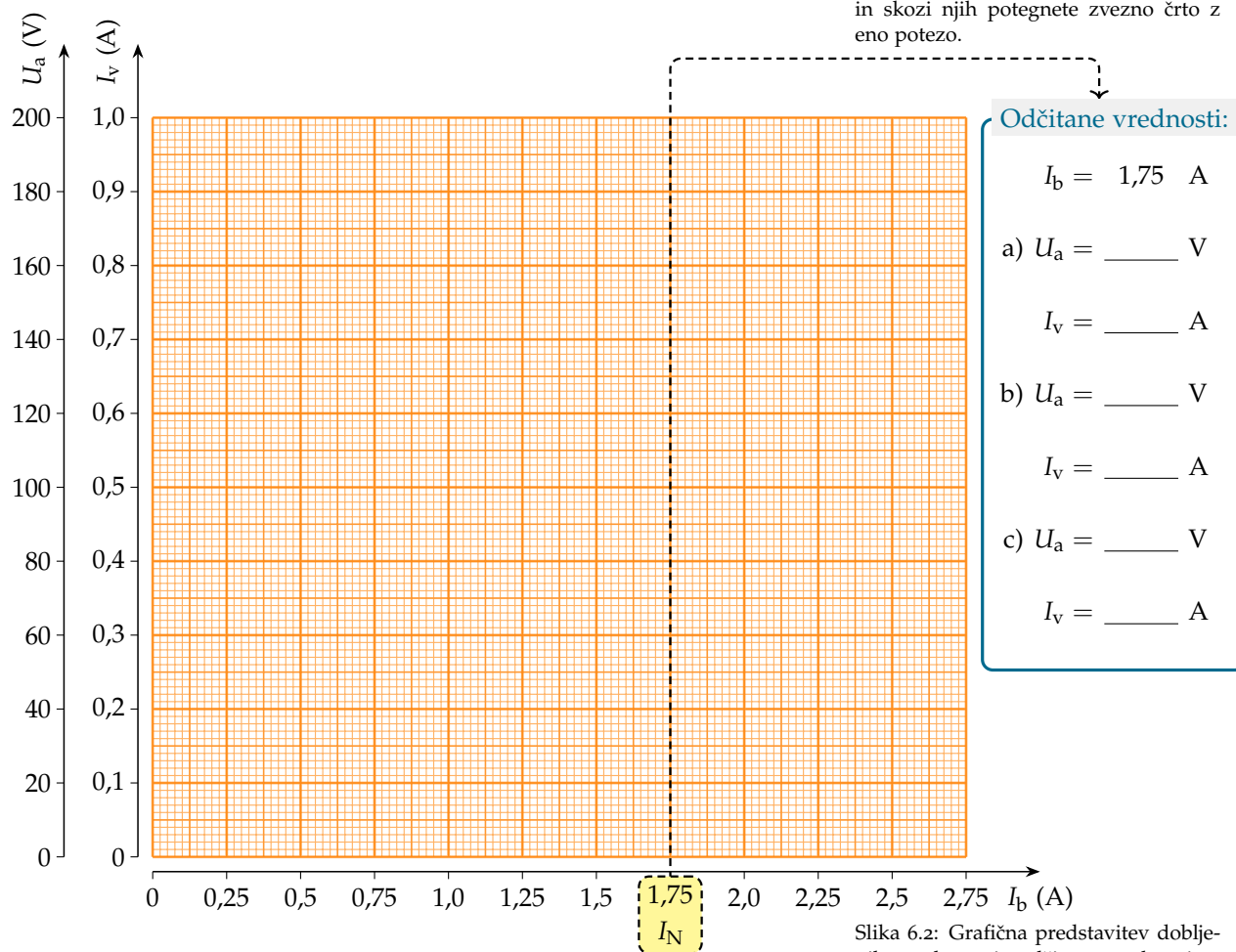
Zapišite izmerjene vrednosti v tabelo 6.3.

Tabela 6.3: Izmerjene vrednosti

št.	ref. vr.	a) samovzbujanje ($R_d = \text{const.}$)			b) tuje vzbujanje ($I_v = \text{--- A}$)		c) tuje vzbujanje ($U_a = \text{--- V}$)	
	$I_b \text{ (A)}$	$I_b \text{ (A)}$	$U_a \text{ (V)}$	$I_v \text{ (A)}$	$I_b \text{ (A)}$	$U_a \text{ (V)}$	$I_b \text{ (A)}$	$I_v \text{ (A)}$
1.	0	0			0		0	
2.	0,5							
3.	1,0							
4.	1,5							
5.	2,0							
6.	2,5							

Prikažite¹⁹ spreminjanje U_a in I_v v odvisnosti od bremenskega toka I_b za vse tri obravnavane primere in določite vrednosti količin za nazivni tok $I_b = I_N = 1,75$ A:

¹⁹ Nelinearne odvisnosti narišite z uporabo krivuljnikov, linearne pa z uporabo ravnila. Aproksimacijo karakteristik izvedite tako, da upoštevate vse izmerjene točke kar se da uravnoteženo in skozi njih potegnute zvezno črto z eno potezo.



Slika 6.2: Grafična predstavitev dobljenih rezultatov in odčitane vrednosti za nazivni bremenski tok I_N .

Diskusija dobljenih rezultatov:

Napišite in pojasnite vse pogoje, ki so potrebni za samovzbujanje enosmernega generatorja.

Primerjajte izmerjeni znunanji karakteristiki v primerih a) in b) in pojasnite zakaj napetost U_a pada z naraščanjem bremenskega toka I_b v posameznem primeru.

Pojasnite kaj je reakcija kotve in kakšne so njene posledice na delovanje enosmernega generatorja.

Opišite kako lahko dobimo napetost U_a , ki je v ustreznem območju neodvisna od obremenitve generatorja.

6.2 Preizkus obremenitve enosmernega motorja s tujim vzbujanjem

Cilji vaje:

Izvedite preizkus obremenitve enosmernega motorja s tujim vzbujanjem in določite vrednosti količin pri nazivni obremenitvi motorja P_N .

Pred vstopom v laboratorij se dobro pripravite! Teoretično ozadje za pripravo na to vajo najdete na straneh 154-155 v zapiskih predavanj:

Jožef Ritonja in Ivan Zagradišnik. *Električni in elektromehanski pretvorniki: zapiški predavanj*. UM FERL, Maribor, 2013. ISBN 978-961-248-377-7

Uporabljene oznake:

Oznaka	Enota	Opis
η		izkoristek
Ω_m	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	mehanska kotna hitrost gredi stroja
I_a	A	enosmerni tok skozi rotorsko navitje (amplitudna vrednost)
M	Nm	mehanski navor na gredi stroja
M_{pv}	Nm	preostala vrednost (offset) senzorja navora
M_x	Nm	izmerjena vrednost navora vključno s preostalo vrednostjo senzorja navora
n	$\frac{1}{\text{min}}$	mehanska hitrost vrtenja gredi stroja
P	W	mehanska moč
P_{el}	W	vhodna električna moč
M_{ref}	Nm	referenčna vrednost navora aktivnega bremenskega pogona
U_a	V	enosmerna napetost na rotorskih sponkah (amplitudna vrednost)
U_v	V	enosmerni vzbujalna napetost (amplitudna vrednost)

Merjenec:

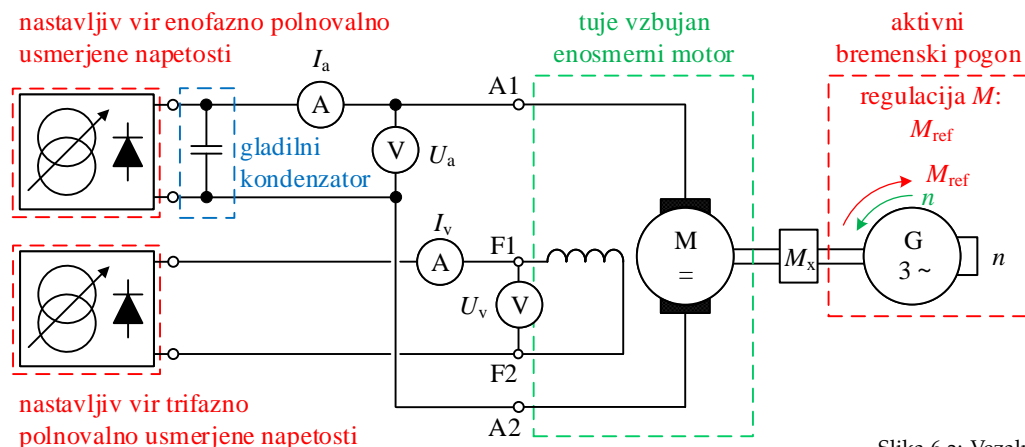
Merjenec je enosmerni komutatorski stroj BALDOR (tip CD3451) z nazivnimi podatki:

	opis	oznaka	vrednost	enota
	napetost	U_N	180	V
	tok	I_N	2,6	A
	mehanska moč	P_N	0,37	kW
	vrtljaji	n_N	1750	$\frac{1}{\text{min}}$
	maks. vzbujalna napetost	$U_{v,max}$	100	V
	maks. vzbujalni tok	$I_{v,max}$	0,5	A

Tabela 6.4: Nazivni podatki

Potek meritev:

Pripravite eksperiment za preizkušanje obravnavanega merjenca v skladu s shematskim prikazom na sliki 6.3,



Slika 6.3: Vežalna shema

kjer uporabite merilno opremo in naprave predstavljene v tabeli 6.5.

Tabela 6.5: Merilna oprema in naprave

oprema	model	specifikacije/opombe
napajalni vir	laboratorijska miza	nastavljiv vir enofazne polnovalno usmerjene napetosti, \approx DC 0 – 320 V, 6 A
napajalni vir	laboratorijska miza	nastavljiv vir trifazne polnovalno usmerjene napetosti, \approx DC 0 – 610 V, 12 A
voltmeter	FLUKE 115	digitalni multimeter
ampermeter	FLUKE 115	digitalni multimeter
merilnik vrtljajev	inkrementalni enkoder Siemens 1XP8001-1	vrtljaje sistema izračuna frekvenčni pretvornik Siemens SINAMICS G120-IOP
merilnik navora	HBM T20 WN/10NM	območje: 10 Nm, 1 V/Nm, $M_{pv} = \text{_____}$ Nm

Izvedite preizkus v štirih korakih:

- 1) Vključite aktivni bremenski pogon in nastavite referenčno vrednost navora na $M_{\text{ref}} = 0$.
- 2) Nato najprej vključite napetost U_v na vzbujalnem navitju in počasi nastavite vzbujalni tok I_v na nazivno vrednost. Med preizkusom se bo vzbujalni tok I_v zmanjševal zaradi segrevanja vzbujalnega navitja, zato kasneje v vsaki merilni točki popravite I_v na nazivno vrednost. **Bodite izredno pozorni, da je vzbujalno navitje med vsemi preizkusi zmeraj aktivno (t.j., skozi vzbujalno navitje teče tok I_v)²⁰.**

²⁰ Nenadno znižanje ali prekinitev vzbujalnega toka I_v povzroči močno pospeševanje enosmernega motorja, kar lahko povzroči uničenje stroja in je nevarno za okolico!

- 3) Vključite napetost na rotorskem navitju U_a . Počasi prilagodite U_a na nazivno vrednost in nato povečujte obremenitev motorja M_{ref} v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 6.6. **Bodite pozorni pri določitvi ustrezne smeri vrtenja bremenskega pogona glede na naravno smer vrtenja merjenega motorja²¹.** Med preizkusom sproti popravljajte rotorsko napetost na nazivno vrednost U_N . V vsaki merilni točki izmerite ustrezne količine v skladu s tabelo 6.6.
- 4) Po opravljenih meritvah najprej znižajte navor bremena M_{ref} (hkrati prilagajajte rotorsko napetost U_a na nazivno vrednost), nato znižajte U_a na 0 na konci izključite še vzbujalno napetost U_v .

²¹ V primeru regulacije navora bremenskega pogona, se morata oba stroja vrteti v nasprotno smer, kar je prikazano tudi na sliki 6.3.

Potek izračunov:

Pri izvedbi meritev in izračunov bodite pozorni na morebitno preostalo vrednost M_{pv} uporabljenega senzorja navora. Dejanski navor M določimo z

$$M = M_x \mp M_{\text{pv}}, \quad (6.1)$$

pri čemer se predznak \mp določi glede na predznak preostale vrednosti in smer vrtenja eksperimentalnega sistema.

Med preizkusom obremenitve merjenec dovaja mehansko energijo bremenskemu pogonu. Izhodno moč merjenega motorja P lahko v našem primeru določimo po direktni metodi²² z

$$P = \Omega_m M = \frac{2\pi n}{60} M. \quad (6.2)$$

Pri izračunu skupne vhodne električne moči motorja P_{el} moramo upoštevati tako rotorsko kot tudi vzbujalno navitje. P_{el} zato izračunamo z

$$P_{\text{el}} = U_a I_a + U_v I_v, \quad (6.3)$$

izkoristek η motorja pa določimo z

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{el}}}. \quad (6.4)$$

²² Pojem *direktna metoda* pomeni, da vse potrebne količine za določitev moči določimo neposredno z ustreznimi meritvami. V primeru določitve mehanske moči P izmerimo tako vrtljaje n kot tudi navor M neposredno na gredi eksperimentalnega sistema.

Primer izračunov:

Prikažite izračune²³ za tretjo merilno točko:

²³ Vedno najprej prikažite vstavljene vrednosti in šele nato izračunan rezultat z ustrezno enoto. Vrednosti zaokrožite na 3 pomembna mesta.

$U_a =$	_____ V	$M_{pv} =$	_____ Nm	$n =$	_____ $\frac{1}{\text{min}}$
$I_a =$	_____ A	$M_x =$	_____ Nm		
$M = M_x \mp M_{pv} =$					
$P = \frac{2\pi n}{60} M =$					
$P_{el} = U_a I_a + U_v I_v =$					
$\eta = \frac{P}{P_{el}} =$					

Rezultati meritev in izračunov:

Zapišite izmerjene vrednosti v tabelo 6.6.

Tabela 6.6: Izmerjene vrednosti

št.	ref. vr.	izmerjene vrednosti					
	M (Nm)	M_x (Nm)	n ($\frac{1}{\text{min}}$)	U_a (V)	I_a (A)	U_v (V)	I_v (A)
1.	0,5						
2.	1,0						
3.	1,5						
4.	2,0						
5.	2,5						
6.	3,0						
7.	3,5						

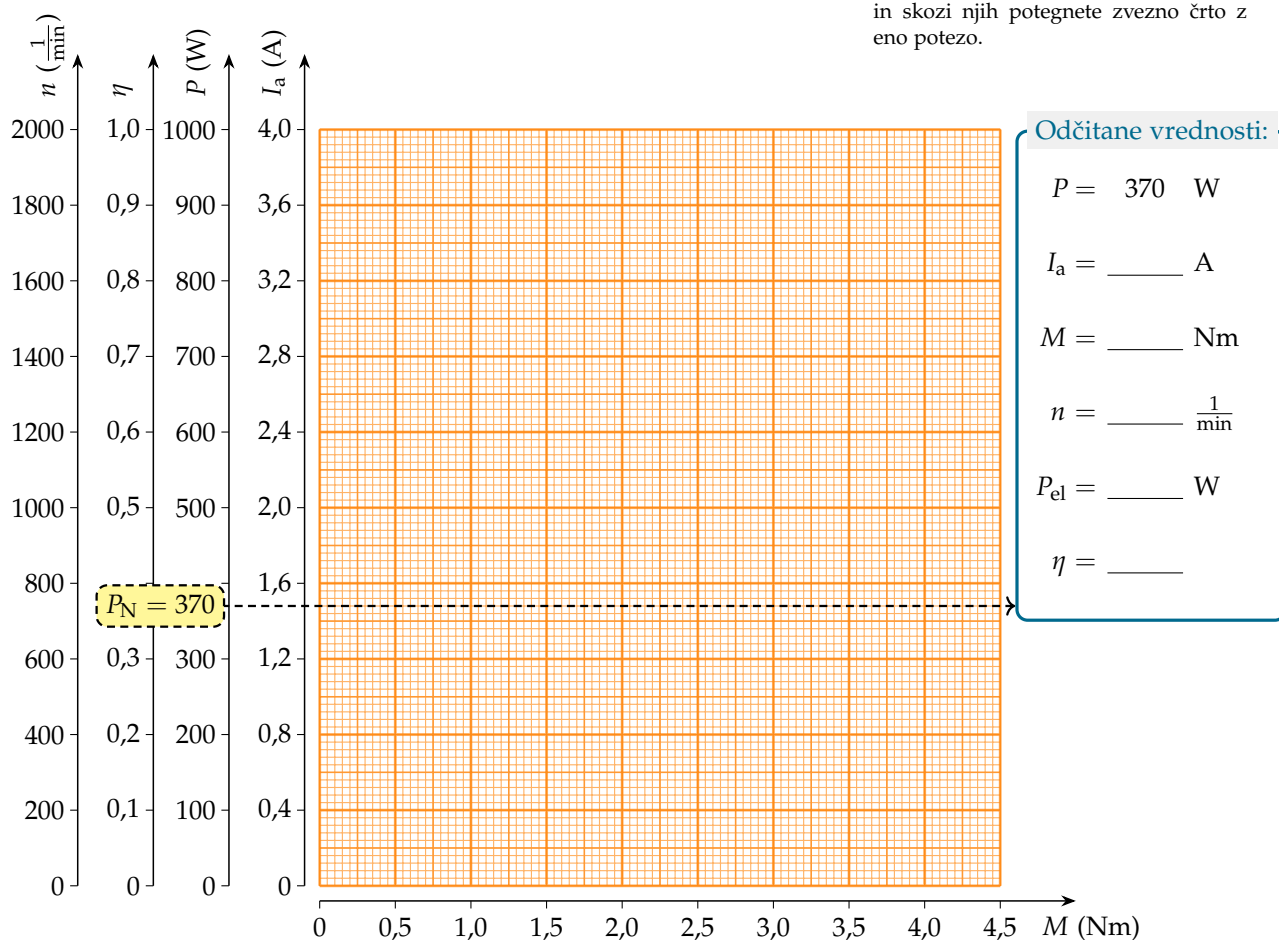
Zapišite izračunane vrednosti v tabelo 6.7.

izračunane vrednosti				
št.	M (Nm)	P (W)	P_{el} (W)	η
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				

Tabela 6.7: Izračunane vrednosti

Prikažite²⁴ spreminjanje I_a , P_{el} , P , n in η v odvisnosti od bremenkega navora M in določite vrednosti količin za nazivno mehansko moč $P = P_N = 370$ W:

²⁴ Nelinearne odvisnosti narišite z uporabo krivuljnikov, linearne pa z uporabo ravnila. Aproximacijo karakteristik izvedite tako, da upoštevate vse izmerjene točke kar se da uravnoteženo in skozi njih potegnute zvezno črto z eno potezo.



Slika 6.4: Grafična predstavitev dobljenih rezultatov in odčitane vrednosti za nazivno mehansko moč P_N .

Diskusija dobljenih rezultatov:

Napišite enačbo za vrtljaje n in pojasnite spreminjanje n v odvisnosti od obremenitve motorja M . Se vrtljaji spreminjajo linearno? Zakaj da oz. ne?

Pojasnite zakaj je bil v rotorskem tokokrogu potreben dodatni kondenzator za glajenje usmerjene napajalne napetosti, v vzbujalnem tokokrogu pa le-ta ni bil potreben.

Pojasnite kaj je reakcija kotve in kako vpliva na karakteristiko $n = f(M)$.

Pojasnite na kakšne načine lahko odpravimo negativne posledice reakcije kotve.

Pojasnite kako so vrtiljaji motorja n odvisni od vzbujalnega toka I_v . Zakaj je v primeru delovanja z visokimi vrtiljaji potrebno znižati vzbujalni tok I_v ? Kaj se zgodi, če med obratovanjem izklopimo vzbujanje?

6.3 Preizkus obremenitve enosmernega motorja s trajnimi magneti

Cilji vaje:

Izvedite preizkus prostega teka v generatorskem obratovanju in preizkus obremenitve v motorskem obratovanju enosmernega stroja s trajnimi magneti. Na podlagi preizkusov določite konstanto navora K_M in konstanto inducirane napetosti K_E obravnavanega stroja.

Pred vstopom v laboratorij se dobro pripravite! Teoretično ozadje za pripravo na to vajo najdete na straneh 154-155 v zapiskih predavanj:

Jožef Ritonja in Ivan Zagradišnik. *Električni in elektromehanski pretvorniki: zapisni predavanj*. UM FER, Maribor, 2013. ISBN 978-961-248-377-7

Uporabljene oznake:

Oznaka	Enota	Opis
η		izkoristek
Ω_m	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	mehanska kotna hitrost gredi stroja
E_a	V	enosmerna inducirana napetost v rotorskem navitju (amplitudna vrednost)
I_a	A	enosmerni tok skozi rotorsko navitje (amplitudna vrednost)
K_E	$\frac{\text{Vs}}{\text{rad}}$	konstanta inducirane napetosti
K_M	$\frac{\text{Nm}}{\text{A}}$	konstanta navora
M	Nm	mehanski navor na gredi stroja
M_{pv}	Nm	preostala vrednost (offset) senzorja navora
M_x	Nm	izmerjena vrednost navora vključno s preostalo vrednostjo senzorja navora
n	$\frac{1}{\text{min}}$	mehanska hitrost vrtenja gredi stroja
n_{ref}	$\frac{1}{\text{min}}$	referenčna vrednost vrtiljajev aktivnega bremenskega pogona
P	W	mehanska moč
P_{el}	W	vhodna električna moč
M_{ref}	Nm	referenčna vrednost navora aktivnega bremenskega pogona
U_a	V	enosmerna napetost na rotorskih sponkah (amplitudna vrednost)

Merjenec:

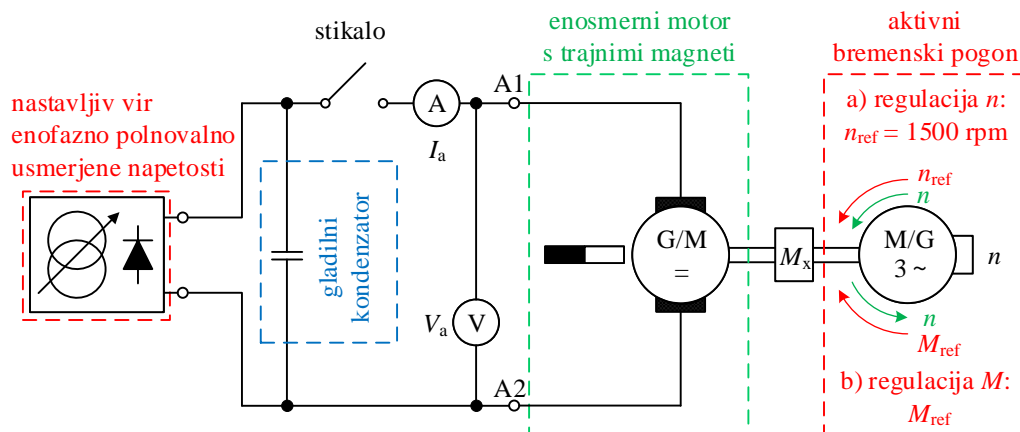
Merjenec je enosmerni komutatorski stroj HYDAC (tip 15 – 350) z nazivnimi podatki:

opis	oznaka	vrednost	enota
napetost	U_N	24	V
tok	I_N	12	A
mehanska moč	P_N	0,2	kW

Tabela 6.8: Nazivni podatki

Potek meritev:

Pripravite eksperiment za preizkušanje obravnavanega merjenca v skladu s shematskim prikazom na sliki 6.5,



Slika 6.5: Vežalna shema

kjer uporabite merilno opremo in naprave predstavljene v tabeli 6.9.

Tabela 6.9: Merilna oprema in naprave

oprema	model	specifikacije/opombe
napajalni vir	laboratorijska miza	nastavljiv vir enofazne polnovalno usmerjene napetosti, \approx DC 0 – 40 V, 20 A
voltmeter	FLUKE 115	digitalni multimeter
ampermeter	FLUKE 115	digitalni multimeter
merilnik vrtljajev	inkrementalni enkoder Siemens 1XP8001-1	vrtljaje sistema izračuna frekvenčni pretvornik Siemens SINAMICS G120-IOP
merilnik navora	HBM T20 WN/10NM	območje: 10 Nm, 1 V/Nm, $M_{pv} = \underline{\hspace{1cm}}$ Nm

Izvedite preizkus v dveh korakih:

- 1) Izvedite preizkus prostega teka v generatorskem obratovanju²⁵ pri $n_{ref} = 1500 \frac{1}{min}$ in izmerite inducirano napetost E_a .
- 2) Izvedite preizkus obremenitve pri nazivni napetosti U_N v motorskem obratovanju²⁶. Povečujte navor bremena²⁷ neposredno z uporabo navorne regulacije bremenskega pogona tako, da ustrezno zvišujete referenčno vrednost M_{ref} v skladu z referenčnimi vrednostmi v tabeli 6.10. **Bodite pozorni pri določitvi ustrezne smeri vrtenja bremenskega pogona glede na naravno smer vrtenja merjenega motorja²⁸.** V vsaki merilni točki izmerite ustrezne količine v skladu s tabelo 6.10.

²⁵ Pred preizkusom s stikalom odklopite rotorski tokokrog kot je prikazano na sliki 6.5

²⁶ Pred preizkusom s stikalom priključite rotorski tokokrog na nastavljiv vir napetosti, kot je prikazano na sliki 6.5

²⁷ Upoštevajte tudi morebitno preostalo vrednost senzorja navora M_{pv} .

²⁸ V primeru regulacije navora bremenskega pogona, se morata oba stroja vrteti v nasprotno smer, kar je prikazano tudi na sliki 6.5.

Potek izračunov:

Pri izvedbi meritev in izračunov bodite pozorni na morebitno preostalo vrednost M_{pv} uporabljenega senzorja navora. Dejanski navor M določimo z

$$M = M_x \mp M_{pv}, \quad (6.5)$$

pri čemer se predznak \mp določi glede na predznak preostale vrednosti in smer vrtenja eksperimentalnega sistema.

Med preizkusom obremenitve merjenec dovaja mehansko energijo bremenskemu pogonu. Izhodno moč merjenega motorja P lahko v našem primeru določimo po direktni metodi²⁹ z

$$P = \Omega_m M = \frac{2\pi n}{60} M. \quad (6.6)$$

Skupno vhodno električno moč P_{el} izračunamo z

$$P_{el} = U_a I_a, \quad (6.7)$$

izkoristek η motorja pa določimo z

$$\eta = \frac{P}{P_{el}}. \quad (6.8)$$

Konstanto inducirane napetosti K_E lahko določimo z

$$K_E = \frac{E_a}{\Omega_m} = \frac{60E_a}{2\pi n}, \quad (6.9)$$

kjer je E_a inducirana napetost pri n vrtljajih v prostem teku generatorskega obratovanja. Navorno konstanto K_M lahko ocenimo z

$$K_M = \frac{M}{I_a}, \quad (6.10)$$

kjer je I_b rotorski tok in M navor na gredi stroja v motorskem obratovanju.

Primer izračunov:

Prikažite izračune³⁰ za tretjo merilno točko:

²⁹ Pojem *direktna metoda* pomeni, da vse potrebne količine za določitev moči določimo neposredno z ustreznimi meritvami. V primeru določitve mehanske moči P izmerimo tako vrtljaje n kot tudi navor M neposredno na gredi eksperimentalnega sistema.

³⁰ Vedno najprej prikažite vstavljene vrednosti in šele nato izračunan rezultat z ustrezno enoto. Vrednosti zaokrožite na 3 pomembna mesta.

$U_a =$ _____ V	$M_{pv} =$ _____ Nm	$n =$ _____ $\frac{1}{\text{min}}$
$I_a =$ _____ A	$M_x =$ _____ Nm	
$M = M_x \mp M_{pv} =$		
$P = \frac{2\pi n}{60} M =$		
$P_{el} = U_a I_a =$		
$\eta = \frac{P}{P_{el}} =$		

Rezultati meritev in izračunov:

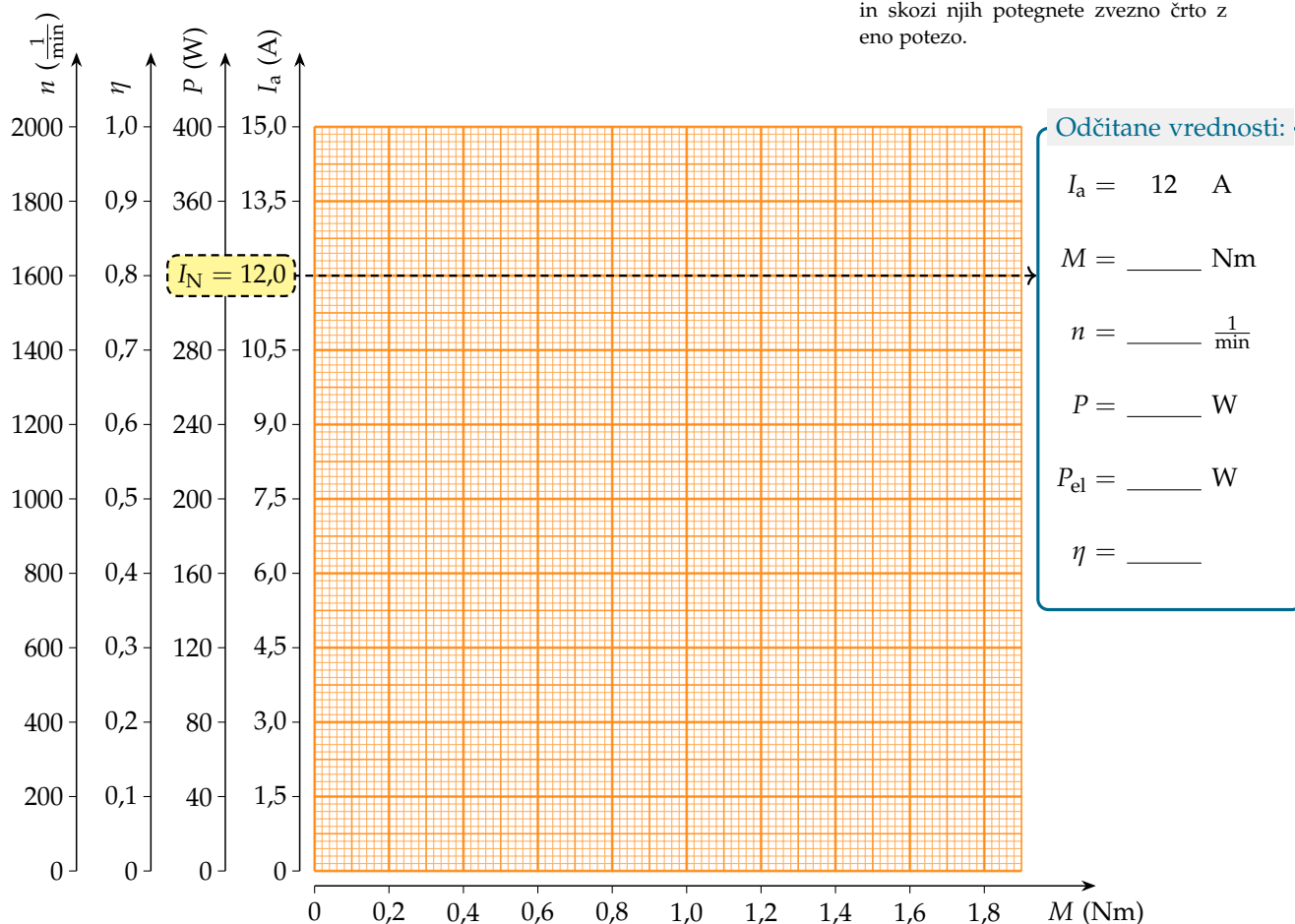
Zapišite izmerjene in izračunane vrednosti v tabelo 6.10.

Tabela 6.10:
Izmerjene in izračunane vrednosti

št.	ref. vr.	izmerjene vrednosti				izračunane vrednosti			
	M (Nm)	M_x (Nm)	n ($\frac{1}{\text{min}}$)	I_a (A)	U_a (V)	M (Nm)	P_{el} (W)	P (W)	η
1.	0,6								
2.	0,9								
3.	1,2								
4.	1,5								
5.	1,8								

Prikažite³¹ spreminjanje I_a , P_{el} , P , n in η v odvisnosti od bremenkega navora M in določite vrednosti količin za nazivni rotorski tok $I_a = I_N = 12$ A:

³¹ Nelinearne odvisnosti narišite z uporabo krivuljnikov, linearne pa z uporabo ravnila. Aproximacijo karakteristik izvedite tako, da upoštevate vse izmerjene točke kar se da uravnoteženo in skozi njih potegnute zvezno črto z eno potezo.

Slika 6.6: Grafična predstavitev dobljenih rezultatov in odčitane vrednosti za nazivni rotorski tok I_N .

Izračun parametrov stroja:

Na osnovi izvedenih preizkusov določite konstanti K_E in K_M :

Preizkus prostega teka v generatorskem obratovanju (izmerjena vrednost E_a v merilni točki)

$n = 1500 \text{ rpm}$	$E_a = \text{ } \text{V}$
$K_E = \frac{E_a 60}{2\pi n} =$	

Preizkus obremenitve v motorskem obratovanju (vrednost navora M je določena za nazivno delovno točko na sliki 6.6):

$I_a = 12 \text{ A}$	$M = \text{ } \text{Nm}$
$K_M = \frac{M}{I_a} =$	

Diskusija dobljenih rezultatov:

Primerjajte vrednosti konstant K_E in K_M ter pojasnite razliko.

Pojasnite prednosti in slabosti enosmernih motorjev s trajnimi magneti.

Razložite zakaj v normalnem obratovalnem stanju reakcija kotve nima vpliva na delovanje enosmernega motorja s trajnimi magneti.

Pojasnite kaj se lahko zgodi, če tok I_a kratkotrajno preseže dovoljene vrednosti?
