

Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet



Alaulddin Adel Hamoodi Albla

Električne mašine u vazduhoplovstvu - Nadgledanje zagrevanja u toku rada bez davača temperature

-Doktorska disertacija -

U Beogradu, 2018.

University of Belgrade
School of Electrical Engineering



Alaulddin Adel Hamoodi Albla

Electrical machines in aviation – Online temperature monitoring without thermal sensors

-Doctoral dissertation-

Belgrade, 2018.

Mentor:

Dr Zoran Lazarević, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

Dr Predrag Pejović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Žarko Janda, viši naučni saradnik
Elektrotehnički institut Nikola Tesla

Datum odbrane: _____

Naslov disertacije: Električne mašine u vazduhoplovstvu - Nadgledanje zagrevanja u toku rada bez davača temperature

REZIME

Biće predstavljena nova metoda za kontinualno merenje temperature statorskog namotaja asinhronne mašine. Metoda se zasniva na merenju otpornosti namotaja statora tako što se jednosmerna struja test signala injektira u zvezdište motora bez prekida njegovog rada. Ceo namotaj statora se koristi kao senzor bez dodatnih termičkih senzora pri čemu je potrebno meriti samo jednosmerni napon i struju. U svakoj fazi se injektiraju gotovo jednake struje čime se gotovo eliminiše uticaj obrtnog momenta koji je inherentan savremenim metodama baziranim na injektiranju signala. Rezultati merenja dobijeni korišćenjem predložene metode upoređuju se sa rezultatima dobijenim korišćenjem standardne metode zasnovane na otpornosti i direktnim merenjima dobijenih pomoću termodavača ugrađenih u namotaje. Metoda daje odlične rezultate pri različitim nivoima opterećenja i promenjivim uslovima hlađenja čime se dokazuje tačnost i robusnost predloženog metoda.

Metode opisane u dosadašnjoj literaturi ne pružaju rešenje za precizno praćenje temperature namotaja statora kod asinhronih motora male i srednje snage bez ometanja normalnog rada mašine. U ovom radu predložena je nova metoda za kontinualno merenje temperature asinhronog motora bez prekida normalnog rada. Metoda se zasniva na merenju otpornosti namotaja i ne zahteva postavljanje senzora temperature u namotaje. Jednosmerni test signal se injektira u namotaje statora tako da ne izaziva nikakve negativne efekte na obrtni moment motora. Odlične performanse se postižu u različitim uslovima rada i uslovima hlađenja. Štaviše, metoda je pogodna prema važećim standardima, koji podrazumevaju upotrebu metode otpornosti za mašine nominalne snage ispod 200 kW.

Predložena metoda se zasniva na merenju otpornosti statora bez prekida rada mašine. Mala DC struja se injektira u zvezdište motora. Ovo se može postići povezivanjem jednosmernog napona između zvezdišta i neutralne tačke napajanja. Da bi se ograničili neželjeni tripli harmonici i nulta komponenta naizmenične struje, stvara se izvor jednosmerne struje, dodavanjem velikog otpora na red sa izvorom napona, čime se obezbeđuje konstantna DC struja.

U radu je predložena i eksperimentalno verifikovana nova metoda za merenje temperature namotaja statora mrežno napajanih asinhronih mašina. Standardna metoda za merenje srednje

temperature namotaja zasnovana na merenju otpornosti unapređena je omogućavanjem kontinualnog merenja otpornosti statora namotaja, bez potrebe za prekidom rada mašine. Jedna od važnijih prednosti predložene metode je to što je uticaj na obrtni moment motora minimiziran. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da je vrlo precizna procena srednje temperature postignuta u različitim režimima rada, kao i pri promenljivim uslovima hlađenja.

Ključne reči: asinhroni motor; merenje otpornosti statora; injektiranje signala; nadgledanje temperature; vazduhoplovstvo

Naučna oblast: Energetika

Uža naučna oblast: Energetski pretvarači i pogoni

UDK broj: 621.3

Dissertation title: Electrical machines in aviation – Online temperature monitoring without thermal sensors

SUMMARY

This thesis proposes a novel method for continuous temperature measurement of the stator winding of an induction machine. The method is based on measuring stator winding resistance by injecting a DC current test signal into the motor neutral point without interrupting its normal operation. The entire stator winding is used as a sensor without additional thermal sensors, while DC voltage and current need to be measured solely. Virtually equal currents are injected in each phase thereby minimizing the influence on the motor torque inherent to contemporary signal injection-based methods. The measurement results obtained using the proposed method are compared to results obtained using the standard resistance-based method and direct measurements obtained from thermocouples embedded in the windings. An excellent match is achieved under various loading levels and variable cooling conditions, thus proving the accuracy and robustness of the proposed method.

Methods described in literature up to date do not provide a solution for accurately monitoring stator winding temperature in small- and medium-sized induction motors without disrupting normal machine operation or applying complex filtering procedures. In this paper, a new method for continuous stator winding temperature assessment of a grid connected induction motor without interruption of normal operation is proposed. The method is based on measuring the winding resistance and does not require installation of temperature sensors into the windings. A DC test signal is injected into the stator winding in such a way that it causes no adverse effects on the motor torque. Excellent performance is achieved under different operating modes and cooling conditions. Moreover, the method is suitable according to current standards, which assume the use of the resistance method for machines with a rated output below 200 kW.

A small DC current is injected into the neutral point of the motor. This can be achieved by connecting a DC voltage source between the neutral point and the neutral of the supply. In order to limit undesirable triplen harmonic and zero-sequence AC currents, a DC current source is created, by adding a large resistance in series with the voltage source, thus providing a constant DC current value.

A new method for measurement of stator winding temperature of grid connected induction machines has been proposed and experimentally verified. The standard resistance-based method for

average winding temperature measurement has been improved by continually measuring the stator winding resistance, without the requirement for normal machine operation interruption. One of the important benefits of the proposed method is that the influence on the motor torque has been minimized. Experimental runs have proven that very accurate estimation of average temperature is achieved under different duty types and under variable cooling conditions.

Keywords: induction motor; stator resistance measurement; signal injection; temperature monitoring; aviation

Research area: Power engineering

Research sub-area: Power converters and drives

UDC number: 621.3

Spisak slika	ix
Spisak tabela	x
1 I DEO	1
1.1 Uvodna objašnjenja u vezi električnih mašina u vazduhoplovstvu	1
1.2 Prvi rezultati analize stanja razvoja i primene električnih mašina u vazduhoplovstvu	3
1.2.1 Uvod	3
1.2.2 Klasifikacija električnih mašina mikromašina u avionima	4
1.2.3 Osnovni tehničko - ekonomski zahtevi koji se postavljaju pred električne mikromašine	4
1.2.4 Elektromotori [33–39]	5
1.2.5 Električni generatori [40-43]	6
1.2.6 Pretvarači električne energije [44-47]	7
1.3 Delimičan pregled metoda ispitivanja rotacionih mikromašina	7
1.3.1 Testiranje motora	7
1.3.2 Čeono odstupanje	8
1.3.3 Radijalno odstupanje	8
1.3.4 Odstupanje vratila	9
1.3.5 Moment inercije	10
1.3.6 Otpor	11
1.3.7 Induktivnost	11
1.3.8 Frikcioni moment i polazna struja [41, 43]	12
1.3.9 Struja, rotacioni gubici, naponi i brzina u praznom hodu	13
1.3.10 Struja demagnetizacije [41-44]	14
1.3.11 Konstanta momenta	15
1.3.12 Naponska konstanta	16
1.3.13 Električna vremenska konstanta	17
1.3.14 Mehanička vremenska konstanta	19
1.3.15 Pulsacija momenta	20
1.3.16 Konstanta regulacije brzine [76-78]	21
1.3.17 Step en korisnog dejstva	22
1.3.18 Frekventni odziv	22
1.3.19 Toplotna otpornost [86]	22
1.3.20 Toplotna vremenska konstanta [86]	24
2 II DEO	27
2.1 Trofazne asinhronne električne mašine	27
2.1.1 Taktičko-tehnički zahtevi	27
2.1.2 Uticaj promene napona mreže na rad asinhronih motora	27
2.1.3 Zavisnost energetskih pokazatelja od brzine obrtanja [45,46,47,48]	28
2.1.4 Uticaj temperature na karakteristike asinhronih motora [82-84]	28
2.1.5 Uticaj promene učestanosti [82,83,84]	28
2.1.6 Poređenje motora za 400 Hz i standardnih motora za 50 Hz [75, 80]	29
2.2 Kondenzatorski motori	30
2.2.1 Uvod	30
2.2.2 Simetričan režim rada	31

2.3	Motori sa malom inercijom	34
2.3.1	Uvod	34
2.3.2	Konstrukcija i princip rada	35
2.3.3	Prednosti i nedostaci	35
2.4	Specifične karakteristike mikromotora za jednosmernu struju	36
2.4.1	Dinamički režim rada motora za jednosmernu struju	36
2.4.2	Konstante za kontra-ems i za momenat	38
2.4.3	Inercija	39
2.4.4	Otporni momenat motora	41
2.4.5	Konstante električnog kola	42
2.5	Karakteristike servomotora	42
2.5.1	Teorijsko početno ubrzanje [49, 54, 58]	43
2.5.2	Mehanička vremenska konstanta	43
2.5.3	Amortizaciona konstanta	44
2.5.4	Prelazna (tranzitna) snaga	46
2.6	Ispitivanje motora malih snaga	47
2.6.1	Strujni izvori	47
2.6.2	Merenje električnih veličina	47
2.6.3	Merenje momenta	51
2.6.4	Merenje brzine obrtanja	55
2.7	Opis uređaja za ispitivanje malih snaga – system MAGTROL	56
2.7.1	Primena	56
2.7.2	Opis uređaja	56
2.7.3	Merenje momenta	57
2.7.4	Merenje brzine	57
2.7.5	Merenje polaznog momenta	58
2.7.6	Prikaz realizovanih kočnica za opterećenje i merenje momenta [87]	58
3	III DEO	60
3.1	Metode merenja statorskog momenta malih elektromotora	60
3.1.1	Merenje pomoću poluge i tegova [87]	60
3.1.2	Kočnica sa trakom i dva dinamometra	61
3.1.3	Kočnica sa trakom, jednim dinamometrom i tegom	63
3.1.4	Histeresisna kočnica (sistem MAGTROL)	64
3.2	Metode odvojenih (pojedinačnih) gubitaka	64
3.2.1	Ispitivanje motora za jednosmernu struju po metodi odvojenih gubitaka	65
3.2.2	Ispitivanje trofaznog asinhronog motora po metodi odvojenih gubitaka (pri opterećenju)	67
3.2.3	Ispitivanje trofaznog asinhronog motora po metodi odvojenih gubitaka (pomoću ekvivalentne šeme)	70
3.3	Određivanje polaznih karakteristika	73
3.3.1	Merenje polaznog momenta	73
3.3.2	Merenje polazne struje	73
4	IV deo	75
4.1	Opis predložene metode	75

4.2	Eksperimentalni rezultati	77
4.3	Diskusija i zaključci	81
4.4	Prilog A	82
4.5	Prilog B.....	82
4.6	Prilog C.....	84
4.7	Prilog D	85
	Literatura	87
	Biografija.....	91
	Prilog – Python program za komunikaciju sa mernim instrumentima	92
	Прилог 1.	95
	Прилог 2.	96
	Прилог 3.	97

Spisak slika

Sl. 1.1	Shema za ispitivanje čeonog odstupanja.....	8
Sl. 1.2	Shema za ispitivanje radijalnog odstupanja [36, 38]	9
Sl. 1.3	Shema za ispitivanje odstupanja vratila	9
Sl. 1.4	Uređaj za merenje inercije [52, 53]	10
Sl. 1.5	Alternativni metod za merenje momenta inercije	11
Sl. 1.6	Merenje induktivnosti impedansnim mostom	12
Sl. 1.7	Merenje frikcionog momenta metodom mernog sata	12
Sl. 1.8	Shema za merenje nominalne struje potrebne za savlađivanje trenja	13
Sl. 1.9	Merenje struje i brzine u praznom hodu	14
Sl. 1.10	Test za određivanje struje demagnetizacije	15
Sl. 1.11	Minimizacija grešaka kod određivanja konstante k_T	15
Sl. 1.12	Shema za ispitivanje stepena iskorišćenja snage motora	16
Sl. 1.13	Shema veza za ispitivanje kontra ems i konstante momenta	17
Sl. 1.14	Merenje električne vremenske konstante	18
Sl. 1.15	Shema za ispitivanje električne vremenske konstante	19
Sl. 1.16	Shema za ispitivanje pulsacije momenta	21
Sl. 1.17	Kriva brzina-moment pri nominalnom naponu	22
Sl. 1.18	Umetanje termistora u namotaj rotora za ispitivanje termičkog otpora	23
Sl. 1.19	Shema za ispitivanje termičkog otpora [86]	24
Sl. 1.20	Kriva porasta temperature namotaja rotora tokom vremena	24
Sl. 1.21	Shema za ispitivanje vremenske konstante zagrevanja	25
Sl. 1.22	Kolo koje se koristi za ispitivanje vremenske konstante zagrevanja	25
Sl. 1.23	Zapis pisača sa trakom	26
Sl. 2.1	Shema uključanja i mehaničke karakteristike kondenzatorskih asinhronih motora	31
Sl. 2.2	Mehanička karakteristika motora sa šupljim rotorom	35
Sl. 2.3	Dinamčki režim rada – prelaz sa jedne na drugu mehaničku karakteristiku	37
Sl. 2.4	Mehanička karakteristika motora	44
Sl. 2.5	Sheme jednovremenog merjenja struje, napona i snage	47
Sl. 2.6	Merenje snage pomoću osciloskopa	49
Sl. 2.7	Merenje snage pomoću promenljivog kondenzatora	49
Sl. 2.8	Primer ekstrapolacije krive hlađenja	51
Sl. 2.9	Mehaničke karakteristike kočnica	52
Sl. 2.10	(a) idealna i (b) stvarna karakteristika frikcione kočnice	53
Sl. 2.11	Princip merjenja brzine obrtanja	57
Sl. 2.12	Kočnica sa trakom i dva tega	58
Sl. 2.13	Kočnice sa trakom i dinamometrom	59
Sl. 3.1	Shema ispitivanja sa ventilatorskom kočnicom	60
Sl. 3.2	Shema ispitivanja sa dva dinamometra	62
Sl. 3.3	Shema ispitivanja sa jednim dinamometrom i tegom	63

Sl. 3.4	Shema veza za ispitivanje motora pri opterećenju po metodi odvojenih gubitaka	65
Sl. 3.5	Shema veza za ispitivanje trofaznog asinhronog motora pri opterećenju po metodi odvojenih gubitaka	68
Sl. 3.6	Shema veza za ispitivanje u praznom hodu	70
Sl. 3.7	Shema veza za ispitivanje pri ukočenom rotoru	71
Sl. 4.1	Shema veza predložene metode	76
Sl. 4.2	Eksperimentalna postavka: 1 – asinhroni motor; 2 – kočnica sa magnetnim prahom; 3, 4 – ispravljač i redni otpornik koji čine izvor jednosmerne struje; 5 – termoparovi za merenje temperature ambijenta; 6 – SR630 Thermocouple Monitor; 7 – HP 34401A multimetri; 8 – PC računar sa softverom za prikupljanje mernih podataka	77
Sl. 4.3	Vrednosti temperature izmerene primenom predložene metode i ETD metode pri konstantnom opterećenju u konstantnim uslovima hlađenja	78
Sl. 4.4	Vrednosti temperature izmerene primenom predložene metode i ETD metode u intermitentnom režimu	79
Sl. 4.5	Vrednosti temperature izmerene primenom predložene metode i ETD metode pri konstantnom opterećenju i promenljivim uslovima hlađenja	80
Sl. 4.6	DC ekvivalentno kolo mernog sistema	84

Spisak tabela

Tabela 2.1	Mehaničke karakteristike motora	40
Tabela 2.2	Početne vrednosti ubrzanja motora i mehaničke vremenske konstante	43
Tabela 2.3	Nominalne snage i odgovarajuće prelazne snage.....	46
Tabela 4.1	Vrednosti temperature u ustaljenom stanju dobijene primenom predložene metode i metode sa ugrađenim termodavačima	78
Tabela 4.2	Merne nesigurnosti pojedinačnih merenja i kombinovana merna nesigurnost predložene metode	83
Tabela 4.3	Predviđene greške u merenju temperature usled nejednakosti faznih otpornosti i nenulte otpornosti napojnih vodova.....	85

1 IDEO

1.1 Uvodna objašnjenja u vezi električnih mašina u vazduhoplovstvu

Električne mašine u avijaciji imaju dve uloge: one su izvršni energetske organi koji pokreću određene mehanizme ili su informacioni organi koji svojim kretanjem prenose određene informacije u okviru automatskih sistema. Radi se o dinamičkim napravama sa svim elementima koji karakterišu kretanje (brzina, ubrzanje, momenti kretanja, inercija i dr.).

Literaturni podaci o ulogama pojedinih električnih mašina u vazduhoplovstvu, a naročito o ulogama malih, mikro-motora, nisu obimni. Još su skromniji podaci o osobinama tih mašina i njihovim konstrukcionim specifičnostima. Naročito je veliki nedostatak stručnih podataka u vezi sa metodama ispitivanja mikromašina, kao i sa opremom koja se za tu svrhu koristi i pored brojne literature i naučnih članaka koji su prikupljeni i prikazani u referencama [60,61,...,87]

Ceneći opravdanim da se iz tako skromne stručne literature izvuku potrebne informacije sopstvenim snagama, kao i da se na osnovu literaturnih i svih drugih izvora stvori sopstvena stručna i naučna osnova za proučavanje električnih mikromašina u vazduhoplovstvu, pristupilo se izradi ove doktorske teze. Ako se kroz njenu izradu dođe do sopstvenih saznanja o vrstama i osobinama pojedinih električnih mašina u avionima, o njihovim ulogama, o propisima kojima treba da udovolje, kao i o načinima njihovog ispitivanja i naučnim doprinosima, onda se može ceniti da je doktorska teza dala očekivane rezultate. Ako se uz to stvore skromni laboratorijski uslovi za sopstveno izvođenje praktičnih ispitivanja na mikromašinama, onda će i sopstvena istraživanja dobiti, bar početnu, osnovu. Istovremeno će se sagledati i pravci daljih aktivnosti, pomoću kojih treba da se premosti stručna razlika između domaćih i stranih inženjera koji rade u ovoj oblasti.

Asinhroni motori se koriste u različitim granama industrije. Zbog toga je neophodno sprečiti njihov kvar zbog velikih troškova i finansijskih gubitaka usled neočekivanih kvarova. Iscrpan pregled najčešćih grešaka i metoda zaštite za asinhronne motore dat je u [1]. Po rečima autora, kvarovi asinhronne mašine najčešće se mogu pripisati termičkom uništenju izolacije statora, uzrokovanim preopterećenjem, uništenjem hlađenja ili porastu temperature ambijenta.

Termička zaštita mašine mora da obezbedi kompromis između dva suprotstavljena zahteva. S jedne strane, nivo izolacije ne sme se postaviti tako da izazove nepotrebno reagovanje, dok s druge strane, ne sme se podesiti tako da omogući trajan rad pri temperaturama koje prelaze graničnu temperaturu date klase izolacije. Najjednostavniji način primene termičke zaštite bio bi direktno merenje temperature u kritičnim delovima mašine pomoću senzora ugrađenih u namotaje mašine. Međutim, ovaj pristup se retko koristi u sistemima sa srednjim i malim snagama zbog značajnog finansijskog uticaja u ovim aplikacijama.

U prethodnim decenijama razvijen je veliki broj pristupa za termičku zaštitu asinhronih mašina pogodnih za niske troškove. Ovi pristupi se grubo svrstavaju u tri grupe [1]: metode zasnovane na termičkom modelu mašine, metode zasnovane na proceni električnih parametara mašine i hibridne metode, na osnovu kombinovanja termičkog i električnog modela.

Pregled metoda zasnovanih na termičkom modelu dat je u [2]. Tradicionalni releji termičke zaštite sa jednom vremenskom konstantom često su nepouzdana pri intermitentnom opterećenju ili promenama u uslovima hlađenja. Nove generacije releja su zasnovane na mikroprocesorima i pružaju mogućnosti za implementaciju termičkog modela velikog reda (termičkih mreža), kao što je opisano u [3, 4]. Drugi napredni pristupi termičkog modelovanja, kao što su metoda konačnih elemenata (FEA – *Finite Elements Method*) i metode bazirane na mehanici fluida (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) uglavnom su ograničeni na fazu projektovanja mašine zbog visokih računarskih zahteva. Primena FEA za poboljšanje tačnosti termičkog modela opisana je u [5, 6]. Smetnje u vezi sa svim metodama zasnovanim na termičkom modelu su teškoće u određivanju termičkih parametara i podešavanja modela pod promenljivim uslovima hlađenja. Razvoj složenih termičkih modela zahteva ili poznavanje parametara konstrukcije mašine [7] ili podataka o merenju temperature u različitim delovima mašine pod različitim uslovima opterećenja [8]. Ove informacije često nisu dostupne, naročito za mašine koje su već u upotrebi. U [9,10] su predloženi redukovani termički modeli koji omogućavaju proces izračunavanja termičkih parametara i koji su pogodniji za implementaciju u realnom vremenu. U adaptaciji pristupa zasnovanog na termičkom modelu, koji uzima u obzir varijacije u uslovima hlađenja, uveden je u [11]. Ovakav pristup zahteva merenje brzine motora i temperature na nekoliko dostupnih tačaka mašine.

Metode zasnovane na proceni električnih parametara se oslanjaju na izračunavanje otpora rotora ili statora kako bi se procenila prosečna temperatura odgovarajućeg namotaja. Glavna prednost nad pristupom baziranim na termičkom modelu je neosetljivost na varijacije u uslovima hlađenja i nedostatak zahteva za dodatnim temperaturnim senzorima. Ove metode mogu biti podeljene u dve grupe: metode zasnovane na električnom modelu mašine i metode zasnovane na injektiranju signala. Prva grupa koristi merne priključke napona i struje u kombinaciji sa električnim modelom mašine za izračunavanje otpora statora i rotora [12, 13]. Iako su pogodni zbog svoje neinvazivne prirode i malo zahteva za dodatnom opremom, takve metode su osetljive na razliku između pretpostavljenih i stvarnih parametara mašine [14]. Procena otpornosti zasnovana na injekciji signala daje tačniju procenu, ali zahteva dodatne izvore i mernu opremu. Većina predloženih metoda se zasniva na injektiranju DC struje u faze motora [15-18]. Metode injektiranja DC struje dovode do neželjenih oscilacija obrtnog momenta [19]. U nekim skorašnjim publikacijama opisana je primena impulsno širinski modulisanog (PWM) signala za procenu otpornosti statora i rotora [20,21]. Ove metode se primenjuju samo na mašine sa invertorima i zahtevaju značajnu računarsku snagu za njihovu implementaciju.

U poslednje vreme su razvijene hibridne metode koje koriste pristup baziran na kombinaciji termičkog i električnog modela [22,23]. Ove metode su robusne na varijacije parametara motora. Međutim, i dalje su prisutni problemi netačnosti pri veoma niskom opterećenju i pri cikličnom opterećenju sa periodima odmora, kao i problem precizne identifikacije termičkih parametara.

1.2 Prvi rezultati analize stanja razvoja i primene električnih mašina u vazduhoplovstvu

1.2.1 Uvod

Prvi avioni su imali sistem naizmjenične struje učestanosti 500 do 1200 Hz, zato što je za potrebe radiotelegrafije bila potrebna naizmjenična struja, koja je takođe mogla da služi i za osvetljenje i grejanje.

Početak dvadesetih godina u avijaciji se prelazi na sistem jednosmerne struje u kombinaciji akumulatorske baterije i vetrogeneratora jednosmerne struje, male snage (oko 40 W) i napona do 6 V. Sa povećanjem broja potrošača snaga i napon se povećavaju do 1000 W, 24 V. U električnu opremu tada spadaju: generatori, akumulatori, sistem paljenja motora, osvetljenje, grejanje i kontrolno-merna aparatura. Elektromotorni pogon je postepeno uveden za startovanje avionskog motora, za pokretanje benzinskih i uljnih pumpi, ventilatora i za pokretanje stajnog trapa najpre elektrohidrauličkim, a zatim elektromotornim pogonom.

Pred rat se ponovo uvodi sistem naizmjenične struje, jednofazni i trofazni, međufaznog napona 208 V i stabilne učestanosti 400 Hz. Tada počinje i značajna etapa u razvoju električne šeme na avionima; nastaje široka primena električnih mehanizama za pogon trapa, stabilizatora, štitova za ateriranje i za upravljanje radiatora, trimera, brzine kompresora i dr. Naglo raste i ukupna snaga potrošača tako da 1940. god. iznosi već oko 30 kW.

Instalisana snaga generatora četvoromotornih aviona prelazi 1000kW, a broj svih električnih mašina je iznad 200, sa 50 različitih tipova, od čega 30 generatora i pretvarača različitih snaga. S obzirom da su dostignute visine nadzvučnih aviona od 70 km pri $M > 5$, dalji razvoj električne opreme na avionu, u vezi sa povišenjem tehničkog nivoa moraće da bude usmeren u rešavanju sledećih zadataka:

- Dalje povećanje sigurnosti (verovatnoće pouzdanog rada za dat period vremena), visokosti i vitalnosti celokupne električne opreme.
- Smanjenje specifične mase i gabarita i povećanje energetske efikasnosti (μ i $\cos(\Phi)$) električnih mašina, aparata, pribora i druge opreme.
- Razrada mogućnosti daljeg povećanja visinskih brzinskih karakteristika električne opreme.
- Kompleksna automatizacija i električna mehanizacija upravljanja na avionima.
- Razrada optimalnih sistema proizvodnje naizmjenične i jednosmerne struje.
- Razrada novih tipova avionskih generatora, transformatora, motora, pretvarača, regulatora itd.
- Povećanje tačnosti i stabilnosti regulacije napona i učestanosti.
- Izručivanje prelaznih, nesimetričnih i opasnih režima kod avijacionih električnih mašina i usavršavanje načina zaštite.
- Poboljšanje bezopasnog rada na avionu.
- Razvoj teorije avijacionih električnih mašina i usavršavanje metoda projektovanja uključujući mogućnosti automatskog projektovanja.
- Poboljšanje kvaliteta električne energije.

1.2.2 Klasifikacija električnih mašina mikromašina u avionima

U opštem razvoju tehnike izdvajaju se značajne posebne oblasti kao što su: elektrotehnika, automatika, informatika i dr. Prateći razvoj ovih oblasti uočava se razvoj pojedinih grana, ali i njihova sve veća međusobna povezanost. Kompleksna mehanizacija i automatizacija proizvodnih procesa, razvoj robotike, uz primenu mikroprocesora i mikrorračunara, izrada letilica raznih vrsta obeležavaju poslednje dve decenije.

Jednu nit u tom velikom razvoju predstavlja i opšti razvoj električnih mašina. Male, tzv. mikromašine nisu vidljive, one se ugrađuju u kompleksne uređaje, one se podrazumevaju. Tek kada se uoči da u automatskim sistemima upravljanja u industrijskim robotima, računarskoj tehnici, žiroskopskim uređajima, pa i u domaćim aparatima, male električne mašine i mikromašine igraju nezamenljivu ulogu, tada se može uočiti i potreba proučavanja ovih specijalnih naprava. To je od posebnog značaja u avijaciji, gde je tendencija primene poslednjih rezultata svih nauka najizraženija. S obzirom da su mašine u neposrednoj vezi sa kretanjem, a da je kretanje cilj svih automatskih sistema lako se zaključuje da su električne mašine element od osnovnog značaja za te sisteme. Dve naročito značajne osobine su pouzdanost u radu i mala težina po jedinici snage. Najveći broj električnih mašina u avionima ima malu snagu (od dela vata do nekoliko desetina vata).

Izvestan broj mašina je nešto veće snage, do nekoliko kilovata.

Klasifikacija je moguća prema raznovrsnim kriterijumima.

-Prema nameni i prema oblasti primene može se vršiti podela na:

- Mikromašine opšte namene, kao što su sinhronne i asinhronne mašine i mikromašine za jednosmernu struju koje pokreću pojedinačne ili grupne naprave.
- Mikromašine automatskih uređaja koji se dele na četiri grupe:
 - energetske mikromašine koje pretvaraju električnu energiju u mehaničku;
 - informacijske mikromašine koje pretvaraju vrednosti ugla, ugaone brzine, ugaonog ubrzanja u odgovarajući električni signal;
 - žiroskopske mikromašine koje predstavljaju sastavne delove žiroskopskih uređaja i instrumenata;
 - pretvaračke mikromašine koje, u ulozi pretvarača, menjaju vrstu, amplitude i učestanost napona, ili rade kao pojačavači snage.

1.2.3 Osnovni tehničko - ekonomski zahtevi koji se postavljaju pred električne mikromašine

Postoje dve vrste takvih zahteva.

Prva vrsta obuhvata opšte zahteve koje mikromašina treba da ispuni nezavisno od namene, načina rada i konstrukcije. Za mikromašine opšte namene to su:

- visok stepen iskorišćenja i sačinilac snage
- trajnost rada - veliki radni vek
- niske cene
- pogodnost za popravke

Za mikromašine automatskih uređaja važniji su sledeći zahtevi:

- velika tačnost prenošenja ulaznog signala
- stabilnost izlaznih karakteristika
- velika brzina odziva
- velika pouzdanost u radu

Druga vrsta zahteva postavlja se u vezi sa namenom mikromašine i sa uslovima njihove potrebe:

- najmanje dimenzije i masa za primenu u avionima
- izdržljivost na vibracije i udare za primenu u avionima
- izdržljivost za temperaturske i radiacione uticaje
- bešumnost u radu
- smanjeno emitovanje radiosmetnji.

1.2.4 Elektromotori [33–39]

U oblasti elektrifikacije aviona primećuje se tendencija povećanja broja i snage elektromotora naizmenečne struje i specijalnih električnih mašina. Klasifikacija avionskih elektromotora je slična kao i kod normalnih motora. Oni se dele prema vrsti struje, prema snazi, režimu rada, mehaničkim i brzinskim karakteristikama, smeru obrtanja, principu rada, konstrukcionom izvođenju i sistemu hlađenja.

Prema vrsti struje:

- Motori naizmenečne struje (jednofazni, dvofazni i trofazni);
- Motori jednosmerne struje;
- Univerzalni motori.

Prema snazi:

- Mikromotori, čija je snaga od 1 W;
- Mali motori, čija je snaga od 20 W;
- Srednji motori, čija je snaga od 20 do 1000 W;
- Veliki motori, čija je snaga veća od 1000 W.

Prema režimu rada:

- Za trajni režim;
- Za kratkotrajni režim;
- Za intermitentni režim.

Prema mehaničkim karakteristikama:

- Sa mekom karakteristikom;
- Sa krutom karakteristikom;
- Sa apsolutno krutom karakteristikom;

Prema brzinskim karakteristikama:

- Sa kontinualnim regulisanjem;
- Sa stepenastim regulisanjem;
- Bez regulisanja.

Prema smeru obrtanja:

- Reverzibilni;
- Nereverzibilni.

Prema principu rada:

- Asinhroni kavezni, sa prstenovima, sa šupljim rotorom i sa feromagnetnim rotorom;
- Sinhroni elektromagnetni, reaktivni, sa stalnim magnetima i histerezisni;
- Jednosmerni elektromagneti i sa stalnim magnetima.

Prema konstrukcijskom izvođenju:

- Sa unutrašnjim rotorom;
- Sa spoljašnjim rotorom.

Prema sistemu hlađenja:

- Zatvoreni sa prirodnim hlađenjem;
- Zatvoreni sa ventilacijom;
- Zaštićeni sa ventilacijom.

Većina avionskih mehanizama predviđena je za intermitentni rad, od kojih se opet najviše može uvrstiti u režim 20 s rada i 60 s pauze; 60 s rada i 10 min pauze i 10 min rada i 10 min pauze.

Osnovne osobine asinhronih motora su jednostavnost i pouzdanost konstrukcije, mala specifična masa i zapremina, krutost mehaničke karakteristike i složenost regulisanja brzine.

1.2.5 Električni generatori [40-43]

Kao osnovni izvor električne energije koriste se na avionima električni generatori.

U sistemima jednosmerne struje upotrebljavaju se generatori jednosmerne struje. Zahvaljujući razvoju poluprovodničke tehnike, a posebno silicijumskih dioda i tiristora velikih snaga i u sistemima jednosmerne struje danas je moguća upotreba sigurnijih generatora naizmjenične struje sinhronog tipa tzv. alternatora s ugrađenim ispravljačima. U mešovitom sistemu snabdevanja električnom energijom koriste se elektromagnetni generatori sa neposrednim pogonom od glavnog motora.

U sistemima naizmjenične struje konstantne učestanosti primenjuju se sinhroni generatori sa pobudnom mašinom na istom vratilu i sa pogonom od glavnog motora posredstvom regulatora brzine.

Radi dobijanja naizmjenične struje stabilne učestanosti u sistemima jednosmerne struje i u mešovitim sistemima mogu se primeniti elektromašinski pretvarači sa elektromagnetnom pobudom ili sa stalnim magnetima.

Osnovni generatori sa pogonom od glavnog motora predviđeni su za posebne uslove rada, sa prirubnicom, u zaštićenom izvođenju, sa elastičnom pogonskom spojnicom. Uslovi rada generatora su relativno teški, postavljeni zahtevi su stroži u pogledu većine njihovih parametara i specifična snaga veća.

Povećanje specifične snage (VA/kg) se postiže na račun smanjenja veka trajanja, poboljšanja hlađenja i upotrebom kvalitetnijih aktivnih i konstrukcionih materijala.

1.2.6 Pretvarači električne energije [44-47]

Energetski pretvarači spadaju u sekundarne izvore energije. Njihova uloga je pretvaranje primarne električne energije iz jednog oblika u drugi.

U sistemima jednosmerne struje koriste se elektromašinski i statički pretvarači:

- Jednosmerne struje nižeg napona u jednosmernu struju višeg napona;
- Jednosmerne struje u naizmjeničnu jednofaznu ili trofaznu struju stabilnog napona i učestanosti;

U sistemima naizmjenične struje primenjuju se elektromašinski i statički pretvarači:

- Naizmjenične struje jednog napona u naizmjeničnu struju drugog napona iste učestanosti (transformatori) ;
- Naizmjenične struje u naizmjeničnu više učestanosti (umnožitelji) ;
- Naizmjenične struje promenljive učestanosti u naizmjeničnu struju stabilnog napona i učestanosti (pretvarači učestanosti) ;
- Naizmjenične struje u jednosmernu (ispravljači i regulisani ispravljači) ;

Snaga ovih pretvarača može da dostigne desetinu KVA. Zbog složenosti kola i nedovoljne sigurnosti, paralelan rad pretvarača, izuzev ispravljača, nije našao primenu na avionima.

1.3 Delimičan pregled metoda ispitivanja rotacionih mikromašina

1.3.1 Testiranje motora

Ovaj odeljak govori kako proizvođač motora ispituje njegove parametre. Osnovna znanja iz ovr oblasti prikazana su u [34, 35, ..., 48, ..., 55].

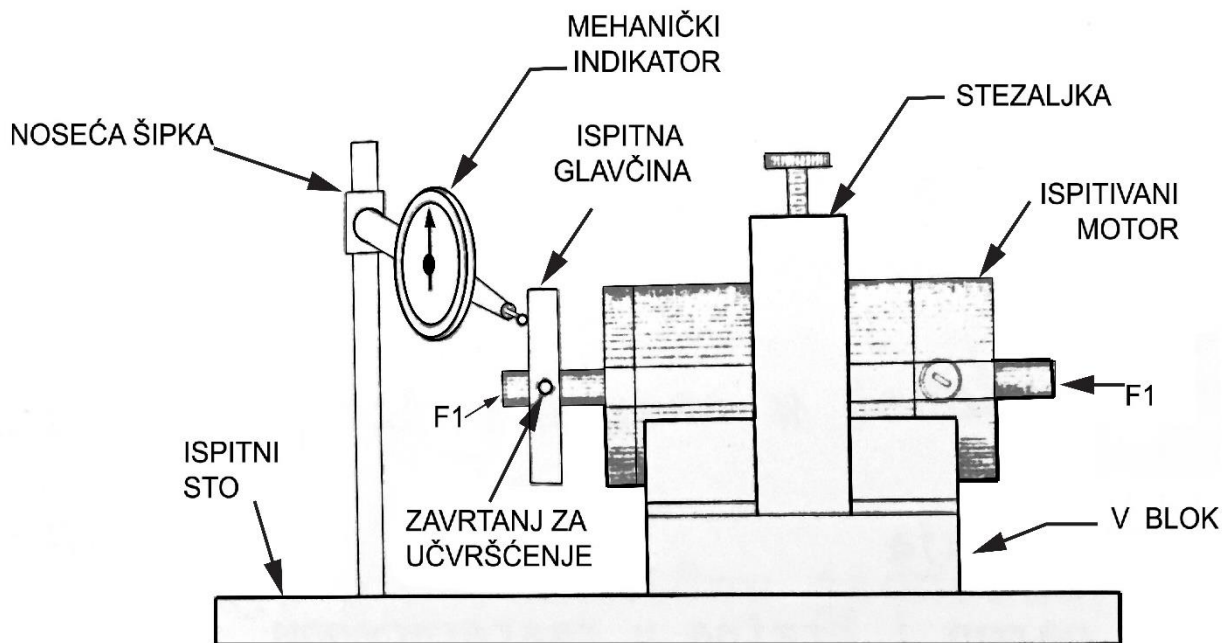
Opisani su sledeći testovi:

- Čeono odstupanje
- Radijalno odstupanje
- Moment inercije
- Otpor
- Induktivnost
- Frikcioni moment i polazna struja
- Struja, rotacioni gubici, napon i brzina u rasterećenom stanju
- Struja demagnetizacije
- Konstanta momenta
- Naponska konstanta
- Električna vremenska konstanta
- Mehanička vremenska konstanta
- Pulsacija momenta
- Konstanta regulacije brzine
- Stepenn korisnog dejstva

- Frekventni odziv
- Toplotna otpornost
- Toplotna vremenska konstanta
- Impedansa vazdušne struje

1.3.2 Čeono odstupanje

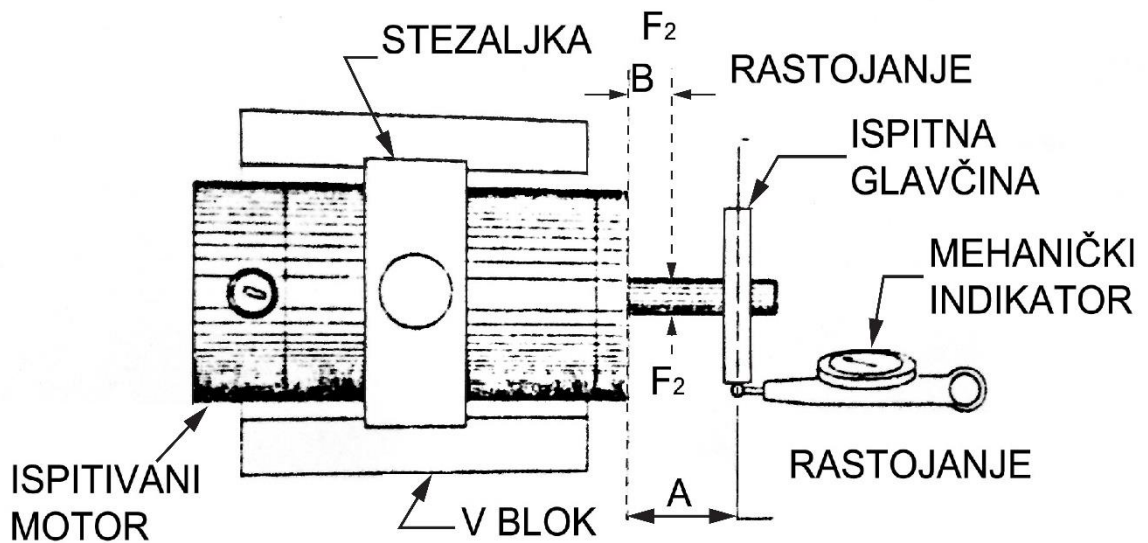
Pomeranje vratila motora u aksijalnom pravcu, izazvano dejstvom aksijalne sile na bilo koji kraj vratila motora, naziva se čeonim odstupanjem. Za merenje čeonog odstupanja, postavlja se glavčina na vratilo motora, motor se pričvršćuje za ispitni sto, a vrh indikatora se postavlja tako da dodiruje glavčinu. Ako se prethodno određenom silom deluje na jedan kraj vratila, npr. F_1 na Sl. 1.1, tada će se na indikatoru zapaziti odstupanje. Indikator direktno pokazuje čeono odstupanje.



Sl. 1.1 Shema za ispitivanje čeonog odstupanja

1.3.3 Radijalno odstupanje

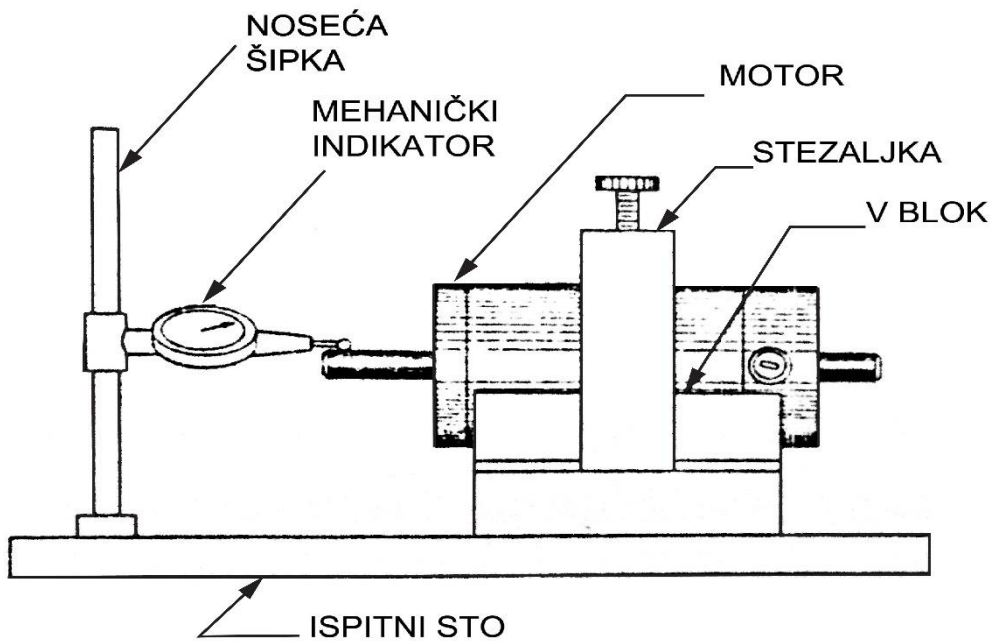
Veličina odstupanja vratila motora pod dejstvom radijalne sile i u radijalnom pravcu naziva se radijalnim odstupanjem. Veličina radijalnog odstupanja se određuje postavljanjem glavčine na vratilo motora na specifičnom rastojanju od ovesne površine, utvrđivanjem motora na ispitnom stolu i postavljanjem vrha indikatora na glavčinu. Prethodno određenom silom kao sto je F_2 na Sl. 1.2 deluje se na specifičnom rastojanju od ovesne površine prvo u jednom pa zatim u drugom pravcu. Ukupno izmereno odstupanje je radijalno odstupanje.



Sl. 1.2 Shema za ispitivanje radijalnog odstupanja [36, 38]

1.3.4 Odstupanje vratila

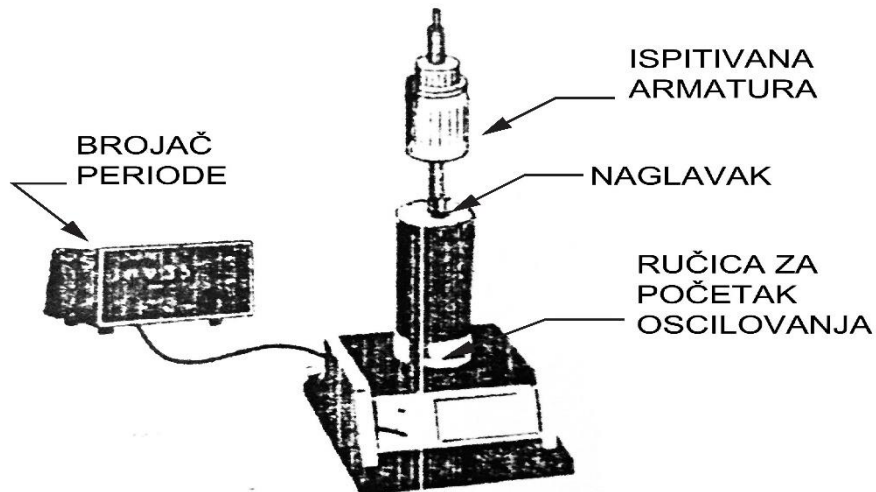
Motor koji se obrće može manifestovati ekscentrične karakteristike. Veličina vobulacije naziva se odstupanjem vratila. Za merenje odstupanja postavlja se vrh indikatora na vratilo motora na specifičnom rastojanju od ovesne površine, vidi Sl. 1.3. Vratilo se obrne za jedan obrt, a odstupanje se izmeri na indikatoru koji direktno pokazuje odstupanje vratila.



Sl. 1.3 Shema za ispitivanje odstupanja vratila

1.3.5 Moment inercije

Inercija je neodvojiva osobina tela koja onemogućava bilo kakvu promenu njegovog stanja. Mera ove osobine je moment inercije. Postoje dva načina za merenje momenta inercije. Prvi obuhvata jedan inercioni merni uređaj, dok drugi metod koristi tehniku torzionog klatna. Oba metoda dovode u odnos moment inercije, preko matematičke proporcionalnosti i kvadrata perioda oscilacija. Jedan inercioni merni uređaj kakav je prikazan na Sl. 1.4 daće, brzo i tačno, željeni rezultat.



Sl. 1.4 Uređaj za merenje inercije [52, 53]

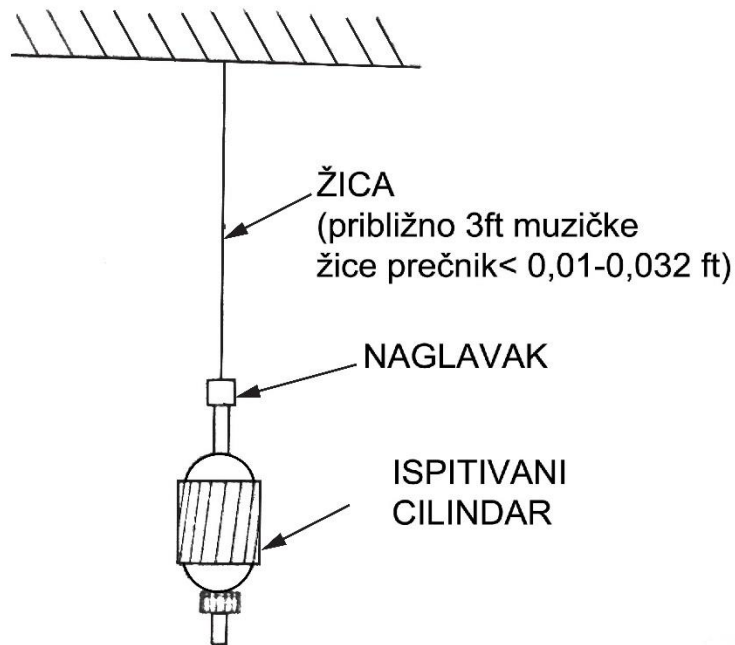
Prvo, pričvrstiti naglavak na vratilo, zatim ih postaviti na ispitni sto, zakrenuti ručicu za oscilacije i pročitati period oscilacije. Izvući armaturu iz naglavka i pročitati period oscilacija samo za naglavak. Moment inercije J se može izračunati iz:

$$J = C |t_1^2 - t_2^2| \quad (1.1)$$

gde su:

- C - kalibrisana konstanta instrumenta;
- t_1 - period oscilacija armature i naglavka;
- t_2 - period oscilacija samo naglavka.

Drugi period merenja zahteva samo naglavak i glavni cilindar poznatih momenata inercije i približno iste veličine kao armature koja se ispituje. Pričvrstiti naglavak za armaturu koja se ispituje i spojiti kako je prikazano na Sl. 1.5. Zakrenuti armaturu za pola kruga i pustiti je da slobodno osciluje uz evidentiranje vremena trajanja 20 oscilacija. Pričvrstiti naglavak za glavni cilindar i ponoviti gornji postupak. Moment inercije armature koja se ispituje se može izračunati iz:



Sl. 1.5 Alternativni metod za merenje momenta inercije

$$J = J_1 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - J_2 \quad (1.2)$$

gde su:

J_1 - moment inercije glavnog cilindra;

J_2 - moment inercije naglavka;

t_1 - trajanje 20 oscilacija glavnog cilindra i naglavka;

t_2 - trajanje 20 oscilacija armature koja se ispituje i naglavka.

1.3.6 Otpor

U ovom postupku motor koji se testira se pokreće, a otpor četkica, komutatora i armaturnih navoja se meri dinamički. Vrednosti otpora se specificiraju pri 25°C, međutim, očitavanje bi trebalo izvesti brzo da bi se izbegli efekti grejanja; struja treba da bude oko $\frac{1}{4}$ od nominalne.

Napajanje se vrši preko terminala motora koji se ispituje, dok se on pokreće sa motorom male brzine, kako je prikazano u [47, 52].

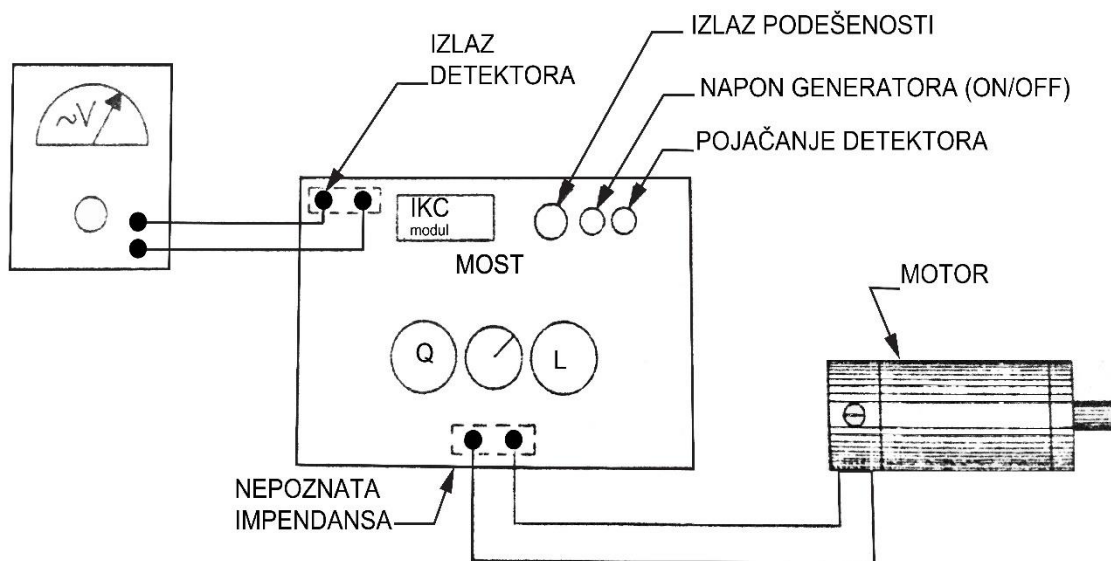
Struja se podešava na prethodno određenom nivou, pa se meri napon. Otpor se računa iz:

$$R = \frac{U}{I_a} \quad (1.3)$$

1.3.7 Induktivnost

Kod merenja induktivnosti, motor koji se ispituje se vezuje na impedansni most kako je prikazano na Sl. 1.6. Q i L postavke se alternativno podešavaju za minimalno pokazivanje voltmetra. Kada dostigne minimalno očitavanje, L postavka pokazuje induktivnost motora. Ponoviti gornji postupak za tri druga

položaja vratila sa pomeranjem od 90^0 i odrediti srednju vrednost od četiri očitavanja za određivanje induktivnosti motora L_a .

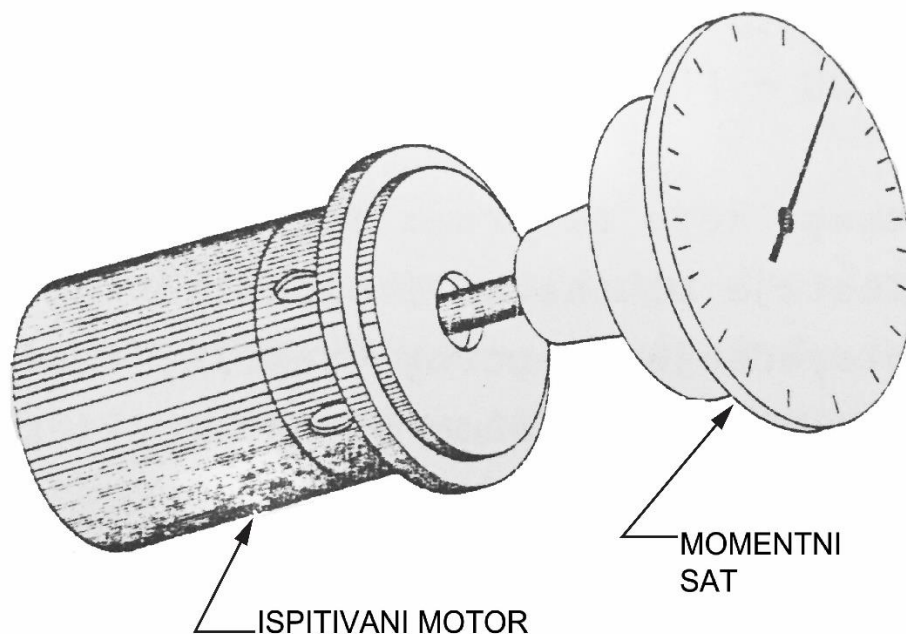


Sl. 1.6 Merenje induktivnosti impedansnim mostom

1.3.8 Frikcioni moment i polazna struja [41, 43]

Kada struja bude dovoljna da savlada moment izazvan statičkim trenjem, počće motor da se okreće. Minimalna struja se zove startnom strujom, a statičko trenje frikcionim momentom.

Frikcioni moment se može meriti na dva načina. Prvi koristi momentni sat, dok drugi obuhvata merenje struje i napona. Kod korišćenja momentnog sata, pričvrstiti sat za vratilo motora, kako je prikazano na Sl. 1.7, i početi sa laganim obrtanjem momentnog sata. Momenat koji pokazuje sat predstavlja frikcioni moment. Ponoviti ovaj postupak u tri druga položaja sa pomeranjem od 90^0 u smeru i suprotno rotaciji kazaljki na satu. Najveće očitavanje je maksimalni frikcioni moment T_f .

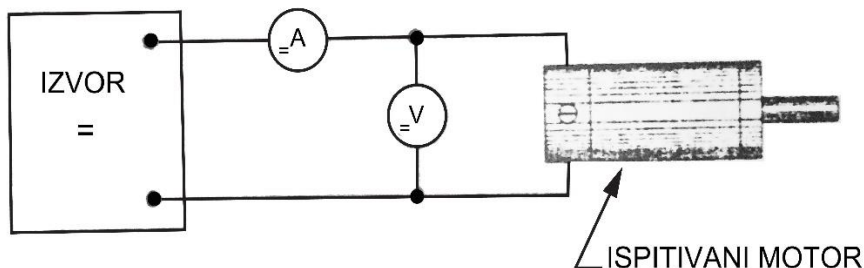


Sl. 1.7 Merenje frikcionog momenta metodom mernog sata

Drugi metod je zasnovan na merenju polazne struje kao indikatora startnog momenta. Za merenje minimalne struje potrebne za početak obrtanja testirani motor se povezuje prema Sl. 1.8. Napon se polako povećava tek da se vratilo obrće. Ova vrednost struje je polazna struja I_{as} .

Frikcioni moment se može sračunati korišćenjem vrednosti polazne struje koja je upravo izmerena i formule:

$$T_f = k_T I_{as} \quad (1.4)$$

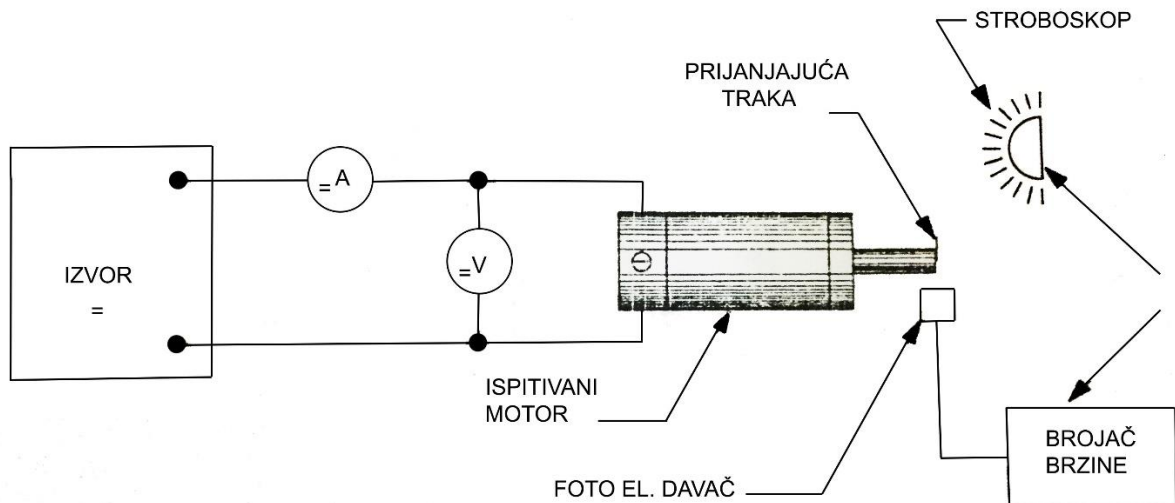


Sl. 1.8 Shema za merenje nominalne struje potrebne za savlađivanje trenja

1.3.9 Struja, rotacioni gubici, naponi i brzina u praznom hodu

Celokupna ulazna snaga koja se preda motoru ne pretvara se u mehaničku snagu. Postoje mehanički i električni gubici. Ako se motor obrće bez opterećenja njegovog vratila, vući će malu struju. To je struja u praznom hodu I_{a0} i posledica je rotacionih gubitaka. Pregled gubitaka i metode za njihovo određivanje su obrađeni u literaturi [38, ..., 55]

Motor povezan kao na Sl. 1.9 se izlaže prethodno određenom naponu. Izmerena struja se naziva struja rasterećenog stanja I_{a0} a brzina motora brzina rasterećenog stanja, n_0 . Pravi se grafikon za rotacione gubitke. Napon se podešava da odgovara brzini motora od 500 o/min do maksimalne dozvoljene bezbedne brzine, u skokovima od 500 o/min; za to vreme se evidentiraju struja i napon. Ukoliko se žele gubici u jedinicama $[OZ - in/krpm]$, crtaje se vrednosti $K_{TI_{a0}}$ u odnosu na brzinu. Ako se žele gubici u jedinicama $[W/krpm]$ crtaju se proizvodi I_{a0} i ulaznog napona V u odnosu na brzinu. Nagib linije daće rotacioni gubitak u odgovarajućim jedinicama.



Sl. 1.9 Merenje struje i brzine u praznom hodu

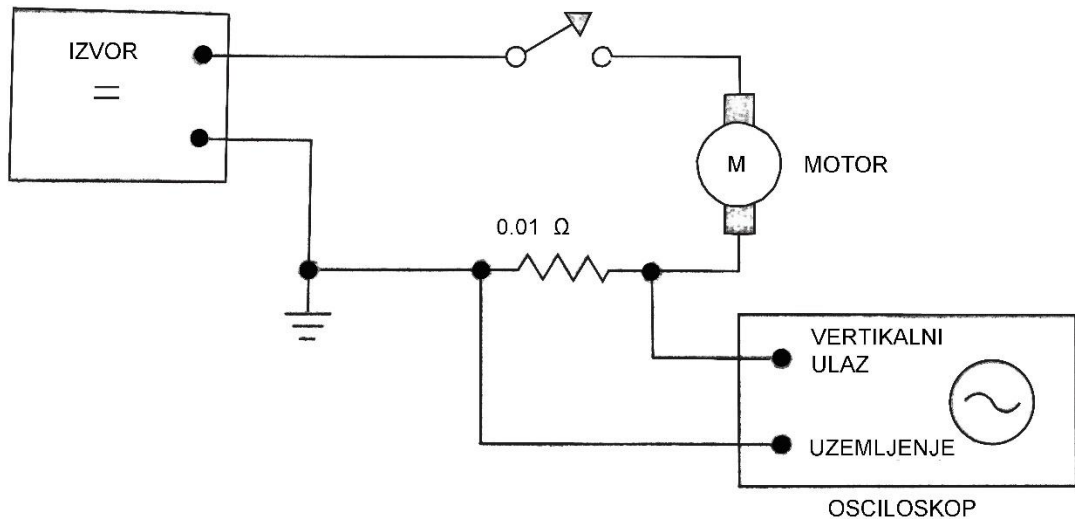
1.3.10 Struja demagnetizacije [41-44]

Kada se motor izloži dejstvu jakog strujnog impulsa, magneti se mogu demagnetisati. Ovo rezultira smanjeno K_T i zahteva veću struju za stvaranje istog momenta nego pre demagnetizacije. Motor koji se ispituje je ustvari demagnetisan da bi se dobila struja demagnetizacije.

Postupak je sledeći:

- Zapisati napon potreban za brzinu motora od 1000 o/min
- Uključiti motor u ispitnu šemu datu na Sl. 1.10, fiksirati njegovo vratilo, dati kratkotrajni naponski odskok i meriti struju.

Gornji postupak se ponavlja, uvek sa povećanjem veličine naponskog odskoka iz drugog testa, sve dok napon iz testa jedan za održavanje 1000o/min ne bude manji za 2%. Struja koja prouzrokuje 2%-nu promenu je struja demagnetizacije.

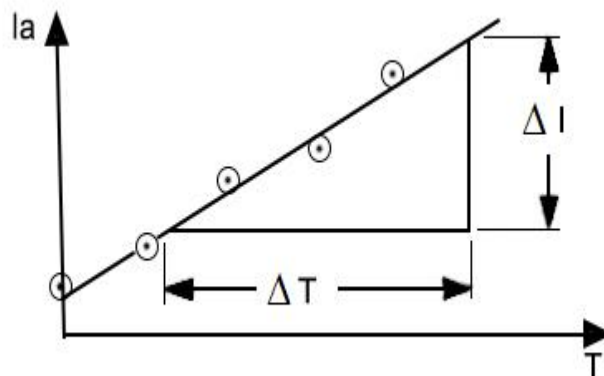


Sl. 1.10 Test za određivanje struje demagnetizacije

1.3.11 Konstanta momenta

Merenje konstantne momenta motora, K_T , zahteva dinamometar ili pokazni instrument momenta [38, 53]. Ovaj ispitni metod bazira se na šemi prikazanoj na Sl. 1.12. Održavati motor na konstantom broju obrtaja i za to vreme podešavati opterećenje dinamometra do nominalne snage motora. Rezultati merenja se mogu nacrtati, kako je prikazano na Sl. 1.11, a ustanovljeni prosečni nagib će dati:

$$K_T = \frac{\Delta T}{\Delta I} \quad (1.5)$$



Sl. 1.11 Minimizacija grešaka kod određivanja konstante k_T

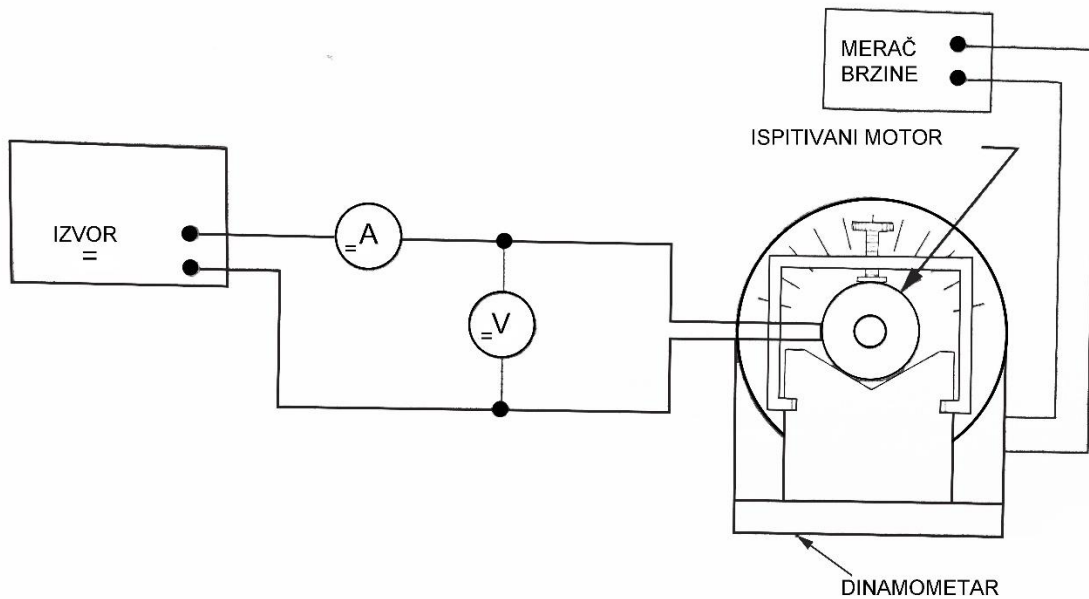
Drugi način određivanja K_T je da se izračuna vrednost bazirana na merenju naponske konstante K_E . Konstanta momenta se uvek odnosi prema naponskoj konstanti na sledeći način:

$$K_T = K_E \left[\frac{Nm}{A}; \frac{V}{rad\ s^{-1}} \right]$$

$$K_T = 9.5493 * 10^{-3} K_E \left[\frac{Nm}{A}; \frac{V}{krpm} \right] \quad (1.6)$$

$$K_T = 1.3524 * K_E \left[\frac{OZin}{A}; \frac{V}{krpm} \right]$$

Lakoća sa kojom se može izvesti ovo merenje čini ga veoma pogodnim prijemnim ispitivanjem u proizvodnji.



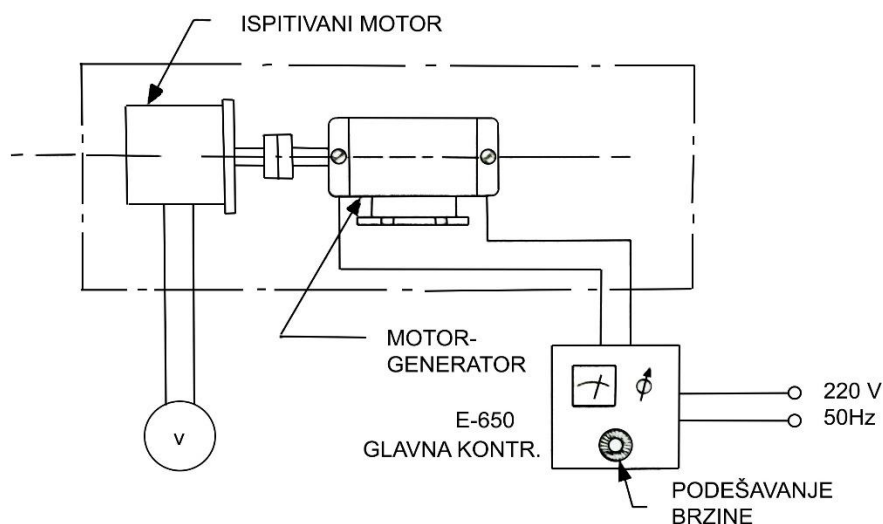
Sl. 1.12 Shema za ispitivanje stepena iskorišćenja snage motora

1.3.12 Naponska konstanta

Naponska konstanta, K_E , može da se ispita kada motor radi kao generator pa se meri napon E_g i odgovarajuća brzina obrtanja motora n . Naponska konstanta se tada dobija iz sledeće relacije:

$$K_E = \frac{E_g}{n} \left[\frac{V}{krpm}; \frac{V}{krpm} \right] \quad (1.7)$$

Uobičajena shema je prikazana na Sl. 13.



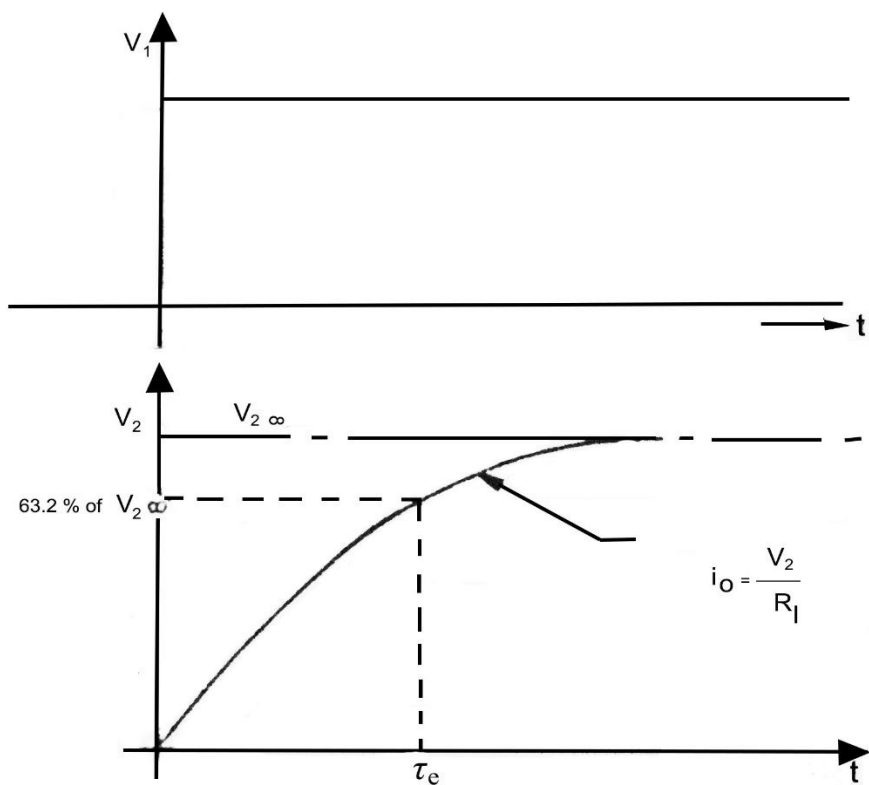
Sl. 1.13 Shema veza za ispitivanje kontra ems i konstante momenta

1.3.13 Električna vremenska konstanta

Električna vremenska konstanta motora se može proračunati prema [57-59] iz izmerenih vrednosti induktivnosti motora, L_a , i otpora armature, R , kako sledi:

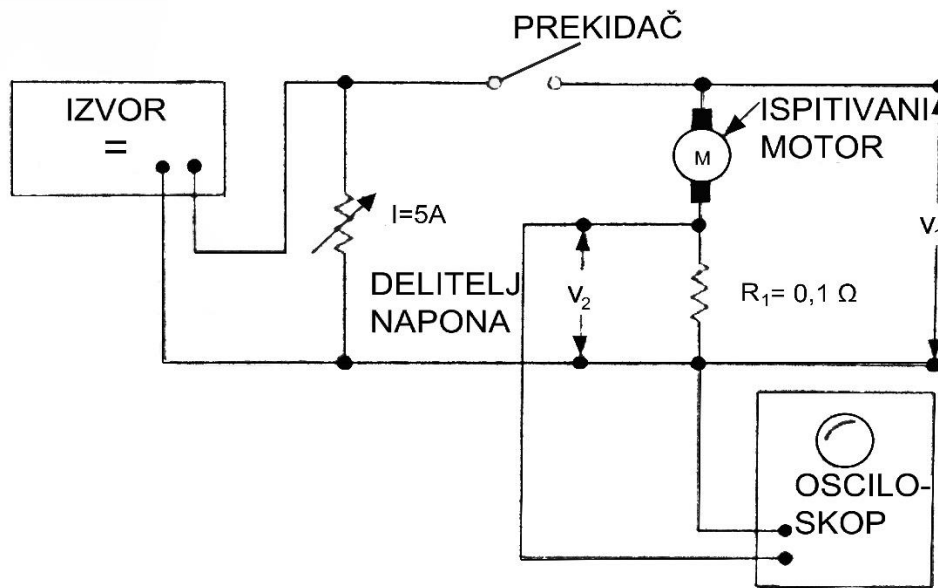
$$\tau_e = \frac{L_a}{R} [s; H, \Omega] \quad (1.8)$$

Kod jednog alternativnog metoda, koji koristi direktno merenje, armatura motora se izlaže odskoku ulaznog napona, pri fiksiranom vratilu, pa se eksponencijalni porast struje motora meri na osciloskopu. Vreme potrebno da struja poraste na 63.2% od njene konačne vrednosti je jednako vremenskoj konstanti τ_e , na Sl. 1.14.



Sl. 1.14 Merenje električne vremenske konstante

Motor je povezan kao na Sl. 1.15, proizvodi se odskočni ulazni napon, pa se struja kroz rezistor male vrednosti ($R_1 < 0.1R$, gde je R otpor armature) prati na induktoru u obliku napona V_2 . Meri se vreme potrebno da struja postigne 63.2% svoje konačne vrednosti, i pa se tako određuje vrednost τ_e .



Sl. 1.15 Shema za ispitivanje električne vremenske konstante

Impedansa motora sa pokretnim kalemom je:

$$Z(s) = R + \frac{sL_a R_L}{sL_a + R_L} \quad (1.10)$$

gde je R_L jedan dodatni otpor paralelan sa L_a koji proizvodi induktivni član koji nije sasvim upravan na R . Paralelni otpor, R_L , je veoma veliki za rotore od gvozdеног jezgra zbog koga je aproksimacija serijske kombinacije otpor-induktivnost valjana.

1.3.14 Mehanička vremenska konstanta

Mehanička vremenska konstanta, τ_m , može se meriti na više načina [57-59]. Ako se motor izloži odskoku napona, vreme potrebno da motor postigne 63.2% njegove konačne brzine je mehanička vremenska konstanta.

Motori sa pokretnim kalemom obično imaju $\tau_e < 0.1\tau_m$, i ovakvo merenje je moguće ako je obezbeđen tahometar za merenje brzine.

Mehanička vremenska konstanta može biti takođe merena praćenjem mehaničke prekidne frekvencije, f_b , kod ispitivanja frekventnog odziva. Može se izvesti iz izmerene prekidne frekvencije kako sledi:

$$\tau_m = \frac{1}{2\pi f_b} \quad (1.11)$$

U slučajevima gde je električna vremenska konstanta istog reda kao mehanička vremenska konstanta, merenje je malo složenije i izvan obima ovog razmatranja. Međutim, mehanička vremenska

konstanta može biti izračunata iz poznatih vrednosti momenta inercije, otpora armature i konstante momenta, pa je:

$$\tau_m = \frac{JR}{K_E K_T} \quad (1.12)$$

1.3.15 Pulsacija momenta

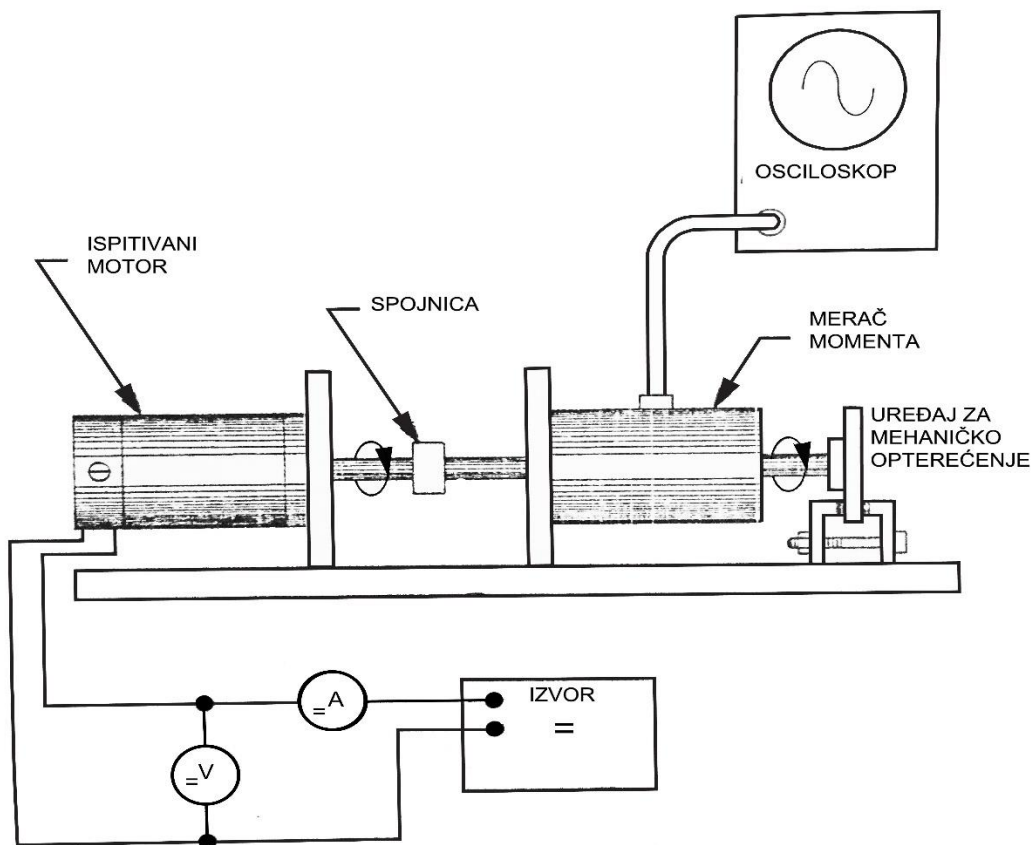
Izlazni moment jednosmernog motora pri malim brzinama je naizgled konstantan, ali pri tačnijem ispitivanju on ima ustvari cikličnu komponentu kako je prikazano u [72-78]. Ovo ciklično dejstvo se odnosi na pulsacije momenta i izazvano je prekidnim dejstvom komutatora (ponekad momentom reluktanse armature).

Mada je pulsacija momenta mali procenat od nominalnog izlaznog momenta, i u mnogim primenama može biti neznatna, ponekad ona može biti kritična i zbog toga je neophodno poznavati način ispitivanja pulsacije momenta.

Povezivanjem ispitnog motora na aparaturu, kako je prikazano na Sl. 1.16, može se izmeriti pulsacija momenta ukoliko je moment inercije mernog uređaja mnogo manji od momenta inercije motora.

Procenat pulsacije momenta može se izračunati kao:

$$T_r = \frac{\text{dvostruka amplituda pulsacije momenta}}{\text{prosečni izlazni moment}} 100\% \quad (1.13)$$



Sl. 1.16 Shema za ispitivanje pulsacije momenta

1.3.16 Konstanta regulacije brzine [76-78]

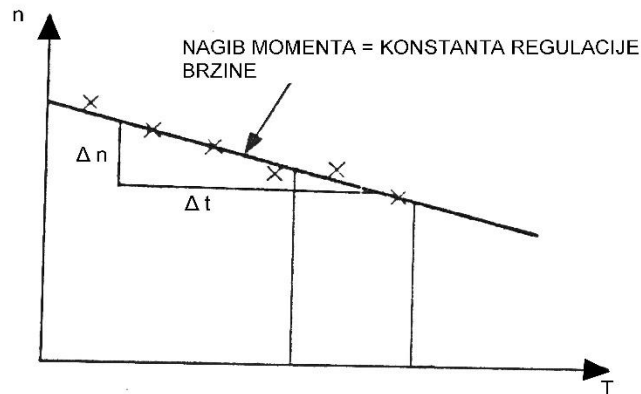
Ispitivani motor radi pri nominalnom naponu od praznog hoda do 1.5 puta maksimalnog trajnog momenta i za to vreme se zapisuje brzina i moment. Očitavanje se mora vršiti brzo da bi se izbeglo pregrevanje. Podaci formiraju krivu brzina-moment kako je predstavljeno na Sl. 1.17.

Konstanta regulacije brzine je nagib linije i može se odrediti iz:

$$R_m = \frac{\Delta n}{\Delta T} \quad (1.14)$$

Vrednost se takođe može izračunati koristeći forumulu:

$$R_m = \frac{R}{K_E K_T} \quad (1.15)$$



Sl. 1.17 Kriva brzina-moment pri nominalnom naponu

1.3.17 Stepen korisnog dejstva

Motor je priključen na ispitnu aparaturu kao što je opisano u [81, 82]. Brzina n i izlazni moment T , pri kojima će stepen iskorišćenja biti ispitivan, treba da potpuno odgovaraju stvarnim uslovima pod kojima će motor raditi. Mere se ulazni napon V i struja I_a . Stepen iskorišćenja se može izračunati iz:

$$\eta = 1.0472 * 10^4 \frac{T_0 n}{V I_a} [\%; Nm, krpm, V, A] \quad (1.16)$$

ili

$$\eta = 73.948 * \frac{T_0 n}{V I_a} [\%; OZ - in, krpm, V, A] \quad (1.17)$$

1.3.18 Frekventni odziv

Određivanje frekventnog odziva motor-generatora i tačaka rezonantnih frekvencija može se izvršiti prostom ispitnom šemom prikazanom u [86].

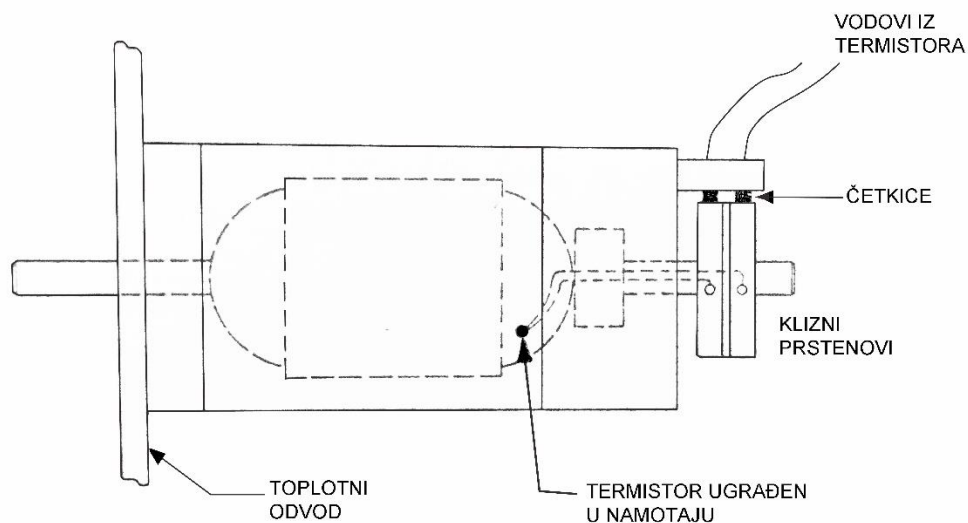
Prikazani pojačavač je Electro-Craft-ov Motomatic Control System Laboratory pojačavač, i to pojačavač sa odzivom od 5 Hz do 10 kHz. Uređaj MCLS je pogodan u tome što ima podesivo pojačanje i ograničavajući izlazni stepen struje koji obezbeđuje od preopterećenja motora ili pojačavača [86].

Test se izvodi tako što se prvo uspostavi odgovarajući referentni nivo pri maloj frekvenciji. Tada se ispituje interesantni frekventni opseg i zapisuju suštinske tačke.

1.3.19 Toplotna otpornost [86]

Merenje toplotne otpornosti motora vrši proizvođač, obično nije moguće da kupac rastavi motor i izvrši promene u cilju obavljanja ispitivanja. Može biti od interesa za čitaoca da razume kako se izvode termalna ispitivanja u Electro-Craft Corporation, pa ćemo ukratko opisati testove.

Mali kalibrisani termistor se ubacuje u očekivanu “toplu tačku” kako je prikazano na Sl. 1.18. U većini slučajeva, izlazni vodovi termistora se izvode preko kliznih prstenova tako da se može izvršiti dinamičko testiranje.



Sl. 1.18 Umetanje termistora u namotaj rotora za ispitivanje termičkog otpora

Motor radi sa nivoom snage koji odgovara uslovima eksploatacije, Sl. 1.19. Kada motor postigne termičku ravnotežu, zapisati ulazni napon V , ulaznu struju I_a , brzinu motora n , moment T_0 , temperaturu armature θ_a , i temperaturu ambijenta θ_A . Termalni otpor se izračunava iz:

$$R_{th} = \frac{\theta_a - \theta_A}{P_L} \quad (1.18)$$

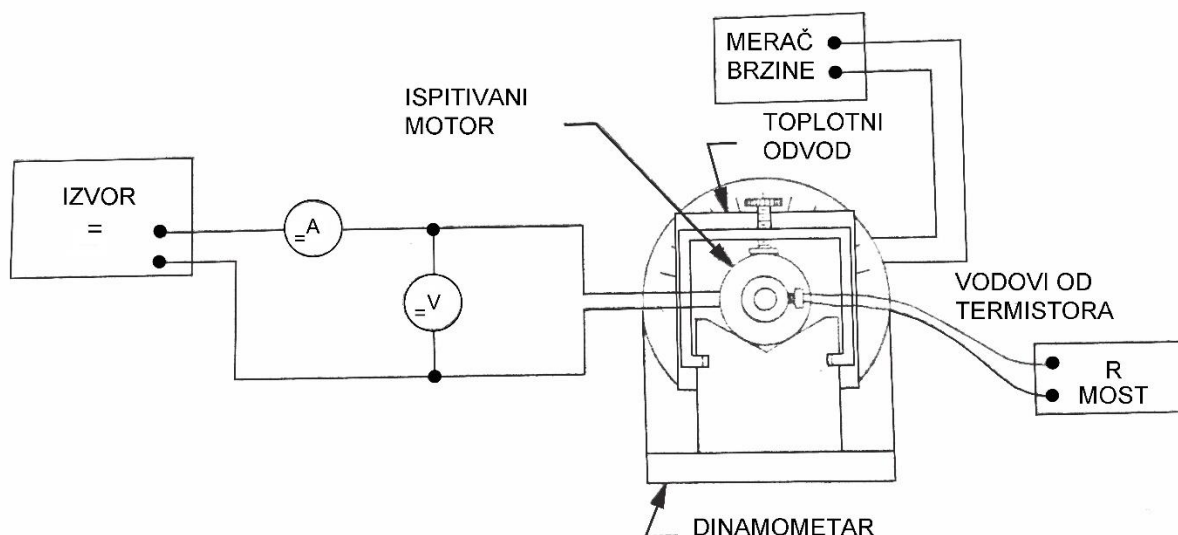
gde su gubici snage dati:

$$P_L = P_i - P_0 \quad (1.19)$$

$$P_L = VI_a - 104.72T_0n [W; V, A, Nm, krpm] \quad (1.20)$$

ili

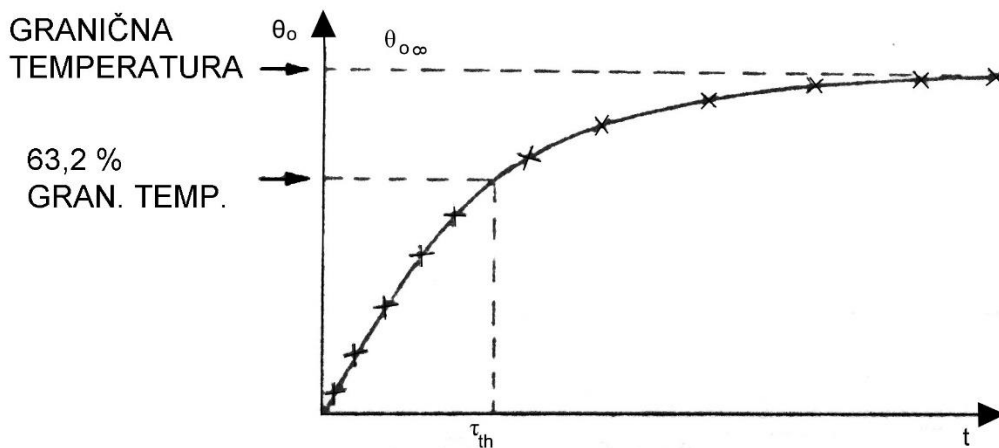
$$P_L = VI_a - 0.73948T_0n [W; V, A, OZ - m, krpm] \quad (1.21)$$



Sl. 1.19 Shema za ispitivanje termičkog otpora [86]

1.3.20 Toplotna vremenska konstanta [86]

Toplotna vremenska konstanta je vreme potrebno da temperatura dostigne 63.2% od njene konačne vrednosti, τ_{th} na Sl. 1.20.

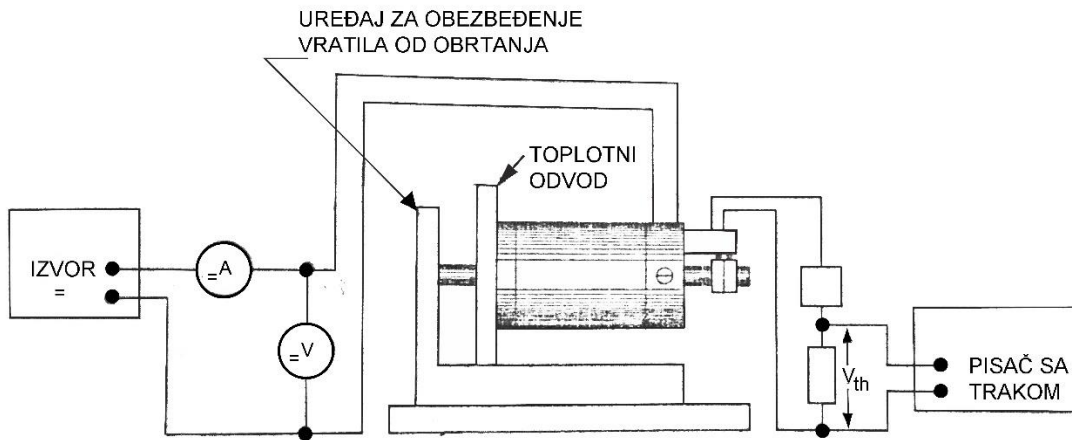


Sl. 1.20 Kriva porasta temperature namotaja rotora tokom vremena

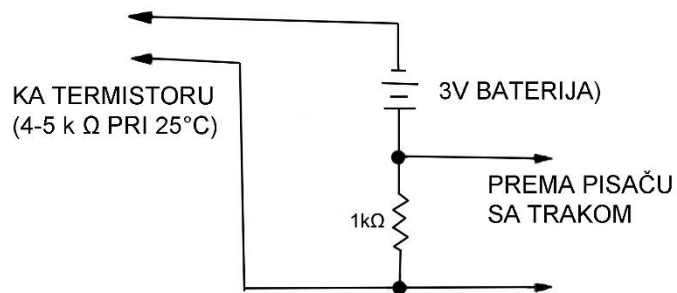
Za merenje toplotne vremenske konstante koristi se termistorski aranžman potreban kod ispitivanja termalnog otpora, motor je povezan prema Sl. 1.21 i Sl. 1.23. Motor se pobuđuje sa odskočnom funkcijom snage koja se održava konstantnom za vreme trajanja ispitivanja. Pisač meri porast temperature armature i nakon postizanja toplotne ravnoteže pojaviće se grafik kao na Sl. 1.23. Toplotna

vremenska konstanta armature se može odrediti merenjem zapisa prema Sl. 1.23. Mora se razmatrati termistorska kalibraciona karakteristika u šemi veze, Sl. 1.22.

Ovaj primer je baziran na jednostrukoj termičkoj vremenskoj konstanti u cilju uprošćenja.

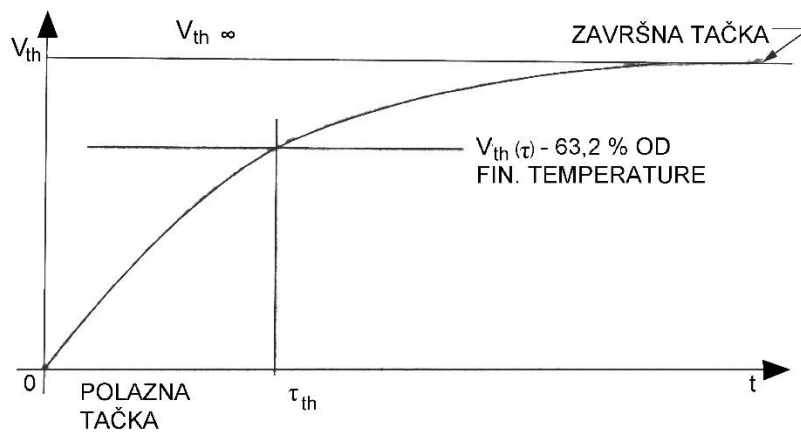


Sl. 1.21 Shema za ispitivanje vremenske konstante zagrevanja



NAPOMENA: Otpornik 1 k Ω se koristi kao izvor naponskog signala za pisač sa trakom kao i sredstvo za ograničenje struje u termistoru da bi se izbeglo pregrevanje.

Sl. 1.22 Kolo koje se koristi za ispitivanje vremenske konstante zagrevanja



Sl. 1.23 Zapis pisača sa trakom

2 II DEO

2.1 Trofazne asinhronne električne mašine

2.1.1 Taktičko-tehnički zahtevi

Asinhroni motori treba da odgovaraju zahtevima u avijacionim električnim mašinama u pogledu temperature okolnog vazduha, visokosti, veka trajanja, mehaničke izdržljivosti, minimalne težine, sigurnosti itd.

Motori opšte primene treba da imaju sledeće karakteristične veličine:

Parametar	Trajni rad	Intermitentni rad
Odnos polaznog momenta	1.6	3.0
Odnos maksimalnog momenta	2.0	3.0
Odnos polazne struje	5	5
Najčešće nominalno klizanje	10%	15%
Koeficijent dobrote puštanja u $\text{rad} \frac{m_K}{i_K}$	0.4	0.6

Motori treba da zadovoljavajuće rade pri promeni napona od $\pm 10\%$ i učestanosti $\pm 5\%$. Istovremeno odstupanje napona i učestanosti ne treba da bude veće od $\pm 10\%$. Nepovoljno je ako se napon snizi pri povišenju učestanosti. Za temperaturu, ako nije posebno dogovoreno, uzima se od -50% do $+60\%$.

Tipične mehaničke karakteristike asinhronih motora na osnovu zahtevanih uslova prikazane su u [52-55, 58].

Odnos polaznog momenta je određen uslovima rada mehanizma, tj. najvećim otpornim momentom pokretanja pri nepovoljnim atmosferskim uslovima.

Odnos maksimalnog momenta određuje prepteretljivost motora, pa i sigurnost rada pri preopterećenjima. Dozvoljeni odnos polazne struje je ograničen snagom električnog sistema aviona i dozvoljenim toplotnim opterećenjem namota statora i rotora pri puštanju u rad.

Nominalno klizanje treba da bude malo zbog manjih gubitaka u rotoru i veće nominalne brzine obrtanja, pa i nominalne snage motora.

2.1.2 Uticaj promene napona mreže na rad asinhronih motora

Pri promeni napona menja se stepen zasićenja što dovodi do promene struje magnećenja koja se povećava naglo sa povećanjem napona dok se reaktansa rasipanja smanjuje. Obično se uticaj zasićenja zanemaruje pa se uzima da struja raste sa prvim, a momenat sa drugim stepenom povišenja napona. U stvarnosti struja raste brže od prvog stepena, a momenat brže od drugog stepena povišenja napona zbog povećanja struje magnećenja i smanjenja reaktanse rasipanja. Prikaz približnih zavisnosti za relativne vrednosti struja (i) i momenta (m) u funkciji relativne promene napona je:

$$\begin{aligned} i &\approx u^{1.03}; m \approx u^{2.14}, \text{ za } s < s_m; \\ i &\approx u^{1.09}; m \approx u^{2.38}, \text{ za } s > s_m, \end{aligned} \quad (2)$$

gde je: $i = \frac{I}{I_n}$, $m = \frac{M}{M_n}$, $u = \frac{U}{U_n}$.

Zavisnost polaznog momenta avijacionih asinhronih motora od napona data je u [74-78].

2.1.3 Zavisnost energetskih pokazatelja od brzine obrtanja [45,46,47,48]

U avijaciji je usvojena učestanost 400 Hz, pri kojoj se imaju povoljni težinski i energetski pokazatelji električnog sistema. Za tu učestanost optimalna brzina je pri dvopolnom izvođenju električnih mašina:

$$n_s = \frac{60f}{p} = 2400 \frac{ob}{min} \quad (2.1)$$

Međutim, elektromotori se obično konstruišu sa

$$2p = 8, 6, \text{ i } 4 \text{ pola} \quad (2.2)$$

pa su odgovarajuće sinhronne brzine

$$n_s = 6000, 8000 \text{ i } 12000 \frac{ob}{min} \quad (2.3)$$

Napon pri naizmeničnom napajanju može, za razliku od jednosmernog, da bude povišen do 200 V, pa se u trofaznom sistemu koristi 200/115 V a, u jednofaznom 110 V.

2.1.4 Uticaj temperature na karakteristike asinhronih motora [82-84]

Električni uređaji na avionu mogu da rade u širokoj oblasti temperature od -60° do $+250^{\circ}\text{C}$. Sagrađene su električne mašine za rad i pri višim temperaturama. Promena otpora namota od bakra zavisno od promene temperature -60° do $+250^{\circ}\text{C}$ je

$$\frac{235+250}{235-60} = 2.77 \quad (2.4)$$

Temperatura namota utiče na polazne i radne karakteristike asinhronog motora. Usled porasta temperature raste aktivni otpor, dok induktivni otpor ostaje isti. Sniženje temperature namota statora dovodi uvek do povećanja polazne struje i polaznog momenta kao i maksimalnog momenta.

Sniženjem temperature rotora povećava se polazna struja, a smanjuje polazni momenat i kritično klizanje, dok maksimalni momenat ostaje isti. Povišenje deluje u suprotnom smislu.

2.1.5 Uticaj promene učestanosti [82,83,84]

Zavisnost momenta od učestanosti je kompleksna u smislu režima koji se posmatra. Ako je reč o polaznom momentu (M_k)

$$M_k \cong \frac{q}{\Omega_s} \frac{U^2}{(R_1 + R_2)^2 + X_k^2} R_2 \quad (2.5)$$

pretpostavljajući da je $(R_1 + R_2)^2 \ll X_k^2$, dobija se

$$M_k \approx \frac{q}{\Omega_s} \frac{U^2}{X_k^2} R_2 \sim \frac{U^2}{f^3} \quad (2.6)$$

tj. da je momenat obrnuto srazmeran sa trećim stepenom učestanosti.

Maksimalni momenat motora

$$M_m \approx \frac{q}{\Omega_s} \frac{U^2}{2X_k} \sim \frac{U^2}{f^2} \quad (2.7)$$

obrnuto je srazmeran kvadratu učestanosti. Ako je odnos U/f stalan, motor ima praktično konstantan maksimalan momenat.

U radnoj oblasti, tj. na linearnom delu karakteristike

$$M \cong \frac{q}{\Omega_s} \frac{U^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_k^2} \frac{R_2}{s} \approx \frac{q}{\Omega_s} \frac{U^2}{R_2} s \sim \frac{U^2}{f} \quad (2.8)$$

momenat je obrnuto srazmeran prvom stepenu učestanosti, što znači da se pri istom klizanju i nižoj učestanosti može dobiti veći momenat i obratno, u linearnom odnosu. Pri stalnom momentu opterećenja odnos klizanja i učestanosti je konstantan.

Opšti zaključak je da niže učestanosti povoljno deluju na momenat asinhronog motora.

2.1.6 Poređenje motora za 400 Hz i standardnih motora za 50 Hz [75, 80]

Ako bi želeli da upotrebimo standardnu mašinu predviđenju za 50 Hz i 120 V u instalaciji od 400 Hz, moguće su tri varijante:

- Za napon 120 V,
- Za napon 960 V,
- Za napon 120 V, ali sa premotanim statorom.

U prvoj varijanti fluks u mašini se smanji 8 puta tako da je ona neracionalno upotrebljena. U drugoj varijanti fluks ostaje isti, a takođe i maksimalni momenat, mašina ima mali polazni momenat, ali veću snagu nego pri normalnim uslovima. Treća varijanta predstavlja najbolje rešenje ako se namot promeni na odgovarajući način: broj navojaka se smanji 8 puta, a presek provodnika poveća 8 puta. Magnetopobudne sile ostaju iste i mašina zadržava isti fluks.

Polazeći od osnovne jednačine iz kojih proizilaze osnovne dimenzije mašine, možemo videti uticaj prelaska sa mašina za 50 Hz na mašine za 400 Hz.

$$d^2 l = \frac{P_{em}}{\Omega_s B_m A \cos \varphi} \quad (2.9)$$

gde je:

d – unutrašnji prečnik,

l – dužina,

P_{em} – elektromagnetna snaga,

$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$ (ugaona brzina),

$A = \frac{qNI}{\pi d}$ (gustina amperprovodnika statora),

B_m – indukcija zazora.

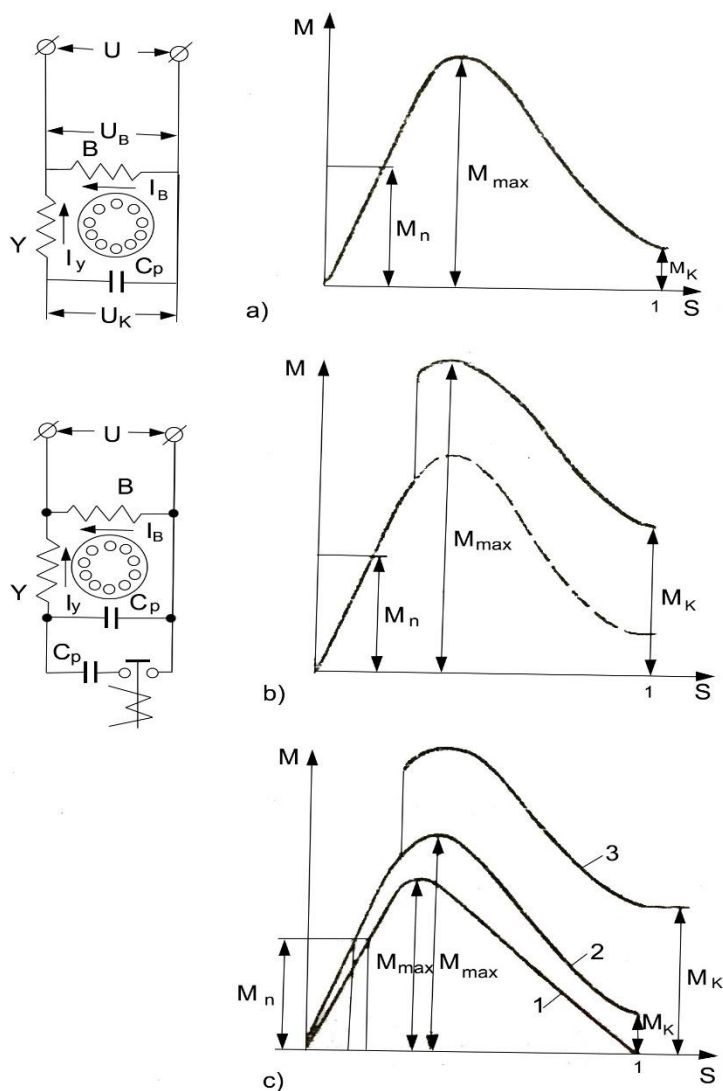
Pri praktično jednakim vrednostima relativnih i maksimalnih i polaznih momenata prelaz na 400 Hz dovodi do sledećih rezultata:

- Brzina se poveća oko 8 puta, periferna brzina samo oko 3.7 puta, a klizanje ostaje praktično isto
- Električno opterećenje se poveća oko 3 puta, od čega A samo za 11% , a gustina struje 2.7 puta. Očigledno je da za mašine iste snage koeficijent iskorišćenja AB_m ne može da se mnogo poveća bez uštrba na preopteretljivost (m_m) i na $\cos \varphi$.
- Magnetno opterećenje ostaje praktično bez promene. Relativni gubici u gvožđu porastu 15 puta, a ukupni samo 1.5 puta zbog smanjenja mase gvožđa.
- Aktivni otpor namota statora smanjio se 4 puta, a otpor rotora oko 1.7 puta.
- Reaktansa kratkog spoja smanjila se 2.1 puta, a aktivna komponenta 2.6 puta, dok se relativna vrednost reaktanse kratkog spoja povećala za samo 25%.
- Toplotni gubici u namotu statora su se smanjili, a u rotoru su se povećali. Ukupni gubici su isti.
- Toplotno opterećenje se povećalo 3 puta, ali porast temperature ostaje praktično isti zbog poboljšanih uslova hlađenja pri većoj brzini.
- Energetski pokazatelj $\eta \cos \varphi$ porastao je za 11.5 % pri čemu je η ostalo isto, a $\cos \varphi$ se povećao zbog smanjenja magnetnog opterećenja.
- Gabarit se smanjio po zapremini za 7.5 puta, a po masi 8 puta. Tako za istu snagu mašine za 400 Hz imaju 8 puta manju masu od mašina za 50 Hz.

2.2 Kondenzatorski motori

2.2.1 Uvod

Jednofazni asinhroni motori se po pravilu u avijaciji koriste kao kondenzatorski, a to će reći sa stalno uključenom pomoćnom fazom (Sl. 2.1 a).



Sl. 2.1 Shema uključenja i mehaničke karakteristike kondenzatorskih asinhronih motora

Na Sl.2.b prikazana je varijanta sa dva kondenzatora koja ima povišeni momenat, a na Sl. 2.1c su upoređene karakteristike jednofaznog motora (1), kondenzatorskog sa jednim (2) i kondenzatorskog sa dva (3) kondenzatora. Motori sa dva kondenzatora primenjuju se kada se traži veliki polazni momenat.

Kondenzator za puštanje je predviđen za kratkotrajan rad i treba da se isključe automatski, obično kada brzina dostigne 60-70% pune vrednosti. Polazni momenat može da se poveća i iznad 300% od nominalnog. Dimenzije i težine kondenzatora za puštanje su znatno manji od radnih kondenzatora.

2.2.2 Simetričan režim rada

Potrebno je odabrati kondenzator da struje u glavnoj i pomoćnoj fazi budu vremenski pomerene za 90° a, tada namoti, prostorno pomereni za 90° , stvaraju simetrično kružno obrtno polje. Mašina radi kao dvofazna.

Upotrebljavamo sledeće oznake:

- N_B, U_B, I_B, φ_B – broj navojaka, napon, struja i fazni ugao, glavne faze.
- N_Y, U_Y, I_Y, φ_Y – isto, samo pomoćne faze.
- Koeficijent transformacije

$$k = \frac{K_B N_B}{K_Y N_Y} \quad (2.10)$$

gde su K_B i K_Y - koeficijenti namota glavne i pomoćne faze. Obično je $K_B = K_Y$ pa se ima kao kod transformatora:

$$U_B I_B = U_Y I_Y \quad (2.11)$$

Da bi se ostvarilo kružno polje, magnetopobudne sile namota moraju da budu iste i pomerene za 90° :

$$jF_B = F_Y \text{ ili } jI_B N_B = I_Y N_Y \quad (2.12)$$

$$jI_B = \frac{I_Y}{k} = I_Y' \quad (2.13)$$

gde je I_Y' - svedena struja pomoćne faze, pomerena za 90° . Dalje treba da bude:

$$jU_B = U_Y' = kU_Y \quad (2.14)$$

gde je $k = \frac{N_B}{N_Y}$.

Svedene vrednosti otpora faze Y su jednake otporima faze B:

$$Z_Y' = k^2 Z_Y = Z_B \quad (2.15)$$

Kada se konstruiše uprošćeni fazorski dijagram kondenzatorskog motora [46] za $k < 1$, dobijaju se sledeći izrazi za struje:

$$I = \sqrt{I_B^2 + I_Y^2} = I_B \sqrt{1 + k^2} = \frac{I_Y}{k} \sqrt{1 + k^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{I_B}{I} = \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} \quad (2.17)$$

$$\frac{I_Y}{I} = \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \quad (2.18)$$

Aktivne snage pri simetričnom režimu su jednake:

$$U_B I_B \cos \varphi_B = U_Y I_Y \cos \varphi_Y \quad (2.19)$$

pa je i

$$\varphi_B = \varphi_Y = \varphi_1 \quad (2.20)$$

$$k = \frac{U_B}{U_Y} = \operatorname{ctg} \varphi_1 \quad (2.21)$$

a napon na krajevima kondenzatora:

$$U_k = \sqrt{U_B^2 + U_Y^2} = U_Y \sqrt{1 + k^2} = \frac{U_B}{k} \sqrt{1 + k^2} \quad (2.22)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \quad (2.23)$$

Utrošena snaga (P_1) jednaka je zbiru faznih snaga:

$$P_1 = P_B + P_Y = 2U I_B \cos \varphi_1 \quad (2.24)$$

$$\text{a sačinilac snage } \cos \varphi = \frac{2 \cos \varphi_1}{\sqrt{1+k^2}} = \sin 2\varphi_1 = \frac{2k}{1+k^2}.$$

Vidi se da $\cos \varphi$ zavisi od koeficijenta transformacije k . Proračunska snaga (S_p):

$$S_p = S_B + S_Y = P_1 \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \quad (2.25)$$

a odnos

$$\frac{S_p}{S} = \frac{2}{\sqrt{1+k^2}} \quad \text{ili} \quad \frac{S_p}{P} = \frac{\sqrt{1+k^2}}{k\eta} \quad (2.26)$$

Vidi se da proračunata snaga ne mora da bude jednaka prividnoj snazi kondenzatorskog motora $S=UI$.

Snaga kondenzatora je:

$$S_k = U_K I_Y = U_Y I_Y \sqrt{1 + k^2} = S \quad (2.27)$$

dakle jednaka prividnoj snazi ako je kapacitet S_p izabran tako da je polje kružno i režim simetričan. Zaključak je da se proračunska snaga smanjuje ako se k povećava, tako da se dobije

$$S_p < S \quad (2.28)$$

i da sačinilac znage ima optimalnu vrednost $k=1$.

Kapacitet radnog kondenzatora se dobija iz sistema jednačina:

$$U_k = \frac{I_C}{C_p \omega} = \frac{I_Y}{2\pi f C_p} \quad (2.29)$$

$$I_Y = I \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \quad (2.30)$$

$$U_k = U \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \quad (2.31)$$

$$C_p = \frac{I_Y}{U_k} \frac{1}{2\pi f} \quad (2.32)$$

ili

$$C_p = \frac{P^* 10^6}{4\pi U^2 f \eta} k [\mu F] \quad (2.33)$$

Dakle, kapacitet radnog kondenzatora opada sa kvadratom napona i prvim stepenom učestanosti i koeficijenta k .

Pri projektovanju kondenzatorskih motora rešavaju se dva osnovna zadatka: određivanje koeficijenta k s obzirom na zadate energetske parametre, optimalne dimenzije mašine i vrednost radnog kondenzatora i određivanje polaznog kondenzatora s obzirom na uslove puštanja u rad motora.

2.3 Motori sa malom inercijom

2.3.1 Uvod

Široka primena u avijaciji izvršnih asinhronih motora sa malom inercijom, koji rade u režimu puštanja i reversa, za servosisteme, automatsku regulaciju i računare [78, 80, 81, 84]. Osim toga, raširila se oblast primene tahometarskih generatora asinhronog tipa sa malom inercijom rotora. Mašine ovog tipa obično se grade kao dvofazne, za učestanost od 50 do 1200 Hz, snage od dela W do nekoliko desetina W. Sniženje momenta inercije rotora (J) postiže se izborom većih odnosa $\lambda = \frac{1}{d}$ (do 2 i više) i odgovarajućih otpora rotora. Tako se može vreme zaletanja smanjiti i 3 puta u odnosu na normalne konstrukcije, dok se gubici i klizanje povećavaju, što nije bitno, jer izvršni motori retko rade u normalno radnom režimu pune brzine.

Radi još većeg povećanja dobrote izvršnog motora, definisane odnosom M/J , oni se grade sa šupljim rotorom u obliku čaše od aluminijuma, bakra ili srebra ili tankog gvođenog cilindra pokrivenog srebrnim ili bakarnim slojem. Radi dobijanja znatnog sniženja J , potrebno je da debljina čaše bude manja od 5% prečnika rotora (d).

2.3.2 Konstrukcija i princip rada

Namot statora se sastoji iz dve faze prostorno pomerene za 90° . Pobudni namot (B) napaja se iz mreže konstantnog napona, a upravljački namot (Y) se napaja strujom iste učestanosti od upravljačkog sistema. Faza napajanja upravljačkog namota može se podešavati pri regulisanju. Radi dobijanja kružnog polja, struje u namotima B i Y treba da budu pomerene u vremenu 90° . Fazni pomeraj obično se ostvaruje pomoću kondenzatora u pobudnom namotu ili dvofaznim napajanjem. U prvom slučaju pomeraj između struja od 90° ima se samo u trenutku puštanja pošto je kod intermitentnog rada važno imati kružno polje pri nepomičnom rotoru, dok je u drugom slučaju taj pomeraj uvek 90° . "Namot" rotora je u obliku tankog aluminijumskog cilindra postavljenog između nepomičnih jezgara magnetnog kola. Nemagnetni cilindar pričvršćen je na vratilo motora.

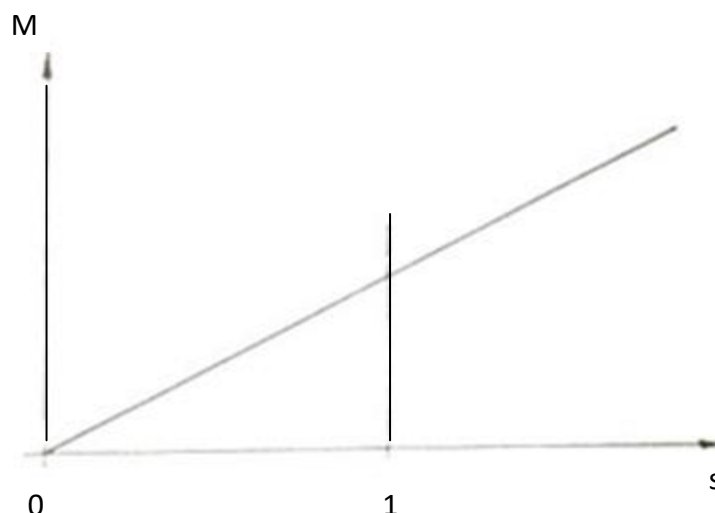
Regulisanje brzine obrtanja vrši se promenom vrednosti faze napona upravljačkog namota za 180° . Magnetno kolo je načinjeno od paketa limova. Zazor se sastoji od tri dela i znatno je veći od zazora normalnih asinhronih motora. Zato je $\cos \varphi$ mali, a proračunska snaga i struja relativno veliki. Čistoća aluminijuma je veća od 99%. Cilindar se izrađuje štampanjem, izvlačenjem ili rezanjem, a njegova debljina je 0.15 do 0.40 mm za mašine od 0.15 do 100 W, pa do 0.8 mm za veće snage. Bočni zid cilindra obično ima debljinu 0.8 do 1.5 mm. Cilindar je obično duži od aktivne dužine mašine. U principu može biti izrađen i od bakra, ali se tada povećava momenat inercije. Jezgro statora ima dva dela, jedan unutar, a drugi preko rotorskog cilindra. Kućište motora je od aluminijumske legure.

2.3.3 Prednosti i nedostaci

Prednosti ovih motora u odnosu na normalne asinhronne motore su:

- Pravolinijska mehanička karakteristika $M=f(s)$ pri $U_V=\text{const}$ zato što je omski otpor rotora (R_2) veliki, pa i kritično klizanje:

$$M \cong \frac{q}{\Omega_s} \frac{U^2}{R_2} s, s_M = \frac{R_2}{X_k} = 4 \div 6 \quad (2.34)$$



Sl. 2.2 Mehanička karakteristika motora sa šupljim rotorom

- Mali momenat inercije zbog šupljeg, tankog i lakog rotora dovodi do sniženja vremena zaletanja i reversa.
- Veliki polazni momenat i mala polazna struja zbog velikog otpora rotora. Koeficijent dobrote puštanja, m_k/i_k , je veliki.
- Mala elektromehanička vremenska konstanta i kao posledica povećana brzina delovanja i stabilnost servosistema i drugih sistema automatskog upravljanja. Mala elektromehanička vremenska konstanta je posledica velikog polaznog momenta i malog momenta inercije.
- Široka oblast kontinualnog regulisanja brzine. Odnos $\frac{\eta_{max}}{\eta_{min}}$ dostiže 200 pomoću promene inverznog polja u širokim granicama.
- Ravnomeran i bešuman rad i pri niskim naponima upravljačkog namota zbog nepostojanja zubaca na rotoru i jednostranog magnetnog privlačenja (nemagnetni rotor).
- Odsustvo samohoda, tj. sposobnost samokočenja motora pri isključenju upravljačkog napona kao posledica velikog kritičnog klizanja, pošto je u radnoj oblasti direktan momenat manji od inverznog

Prednosti u odnosu na izvršne motore za jednosmernu struju su:

- Nemaju klizni kontakt, pa je manje trenje, a manje su i radiometrične, parametri su praktično konstantni, sigurnija je eksploatacija i povećana "visokost".
- Mogućnost primene prostih pojačavača naizmenične struje za napajanje upravljačkih namota; nepotrebni usmerači.

Nedostaci motora sa šupljim rotorom su:

- Mali $\cos \varphi$ zbog velikih zazora (0.45 do 1.2 mm).
- Mali stepen iskorišćenja pošto motori rade pri velikim klizanjima.
- Relativno veliki gabariti i težina velikog zazora i velikog kritičnog klizanja.

2.4 Specifične karakteristike mikromotora za jednosmernu struju

Osim karakterističnih podataka koji se odnose na standardne motore kao što su: nominalni moment, polazni moment, utrošena struja itd, projektantima automatskih sistema u koje ulaze mikromotori, potrebni su i posebni, specifični podaci o mikromotorima koji se odnose na njihove prelazne režime rada. Ti specifični podaci mogu se definisati i objasniti na primeru motora jednosmerne struje čiji se rad reguliše prvenstveno promenom ulaznog napona. Pretpostavlja se da je pobuda motora nezavisna i konstantna ili da se radi o motorima sa permanentnim magnetima.

2.4.1 Dinamički režim rada motora za jednosmernu struju

Osnovnu mehaničku karakteristiku motora, prema [83,84,85], predstavlja relacija

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R}{C_E C_M \Phi^2} M_m \quad (2.35)$$

Vidi se da je zavisnost brzine od momenta linearna ukoliko su ostali parametri konstantni. Umesto brzine obrtanja n [o/min], može se u izraz uvesti ugaona brzina $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ [rad/s]. Na Sl. 2.3 prikazane su dve statičke mehaničke karakteristike koje se odnose na dve vrednosti ulaznog napona U_1 i U_2 , pri čemu je $U_2 > U_1$. Radne tačke A i B su određene parametrima $U_1, M_{m1}\Omega_1$, odnosno $U_2, M_{m2}\Omega_2$.

Dinamički režim rada je prelazni režim u kome se nalazi motor kada prelazi sa jedne radne tačke (A) na drugu (B). Njega opisuju dve opšte jednačine:

$$M_m = M + J \frac{d\Omega}{dt} \text{ - mehanička} \quad (2.36)$$

$$U = E + Ri + L \frac{di}{dt} \text{ - električna} \quad (2.37)$$

gde su:

M_m - unutrašnji elektromagnetni moment motora

M - otporni moment na osovini

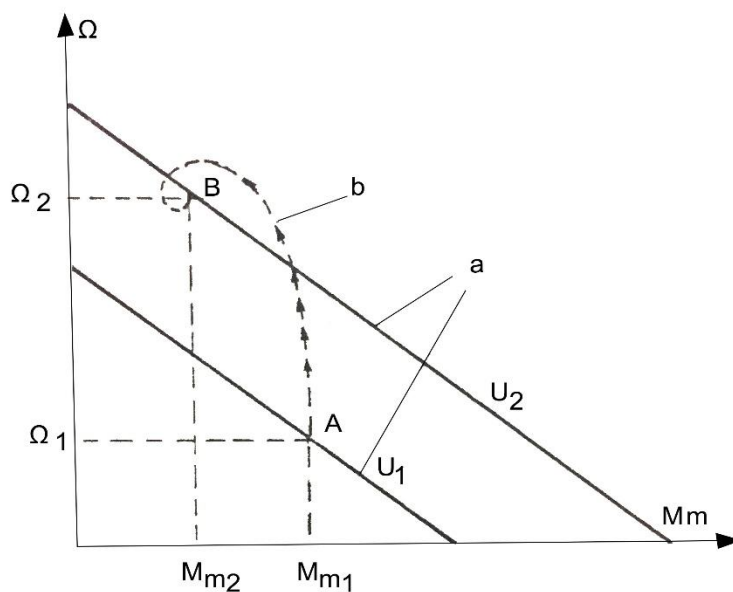
E - kontra ems usled obrtanja mašine

$RiL \frac{di}{dt}$ - padovi napona u kolu indukta.

U stacionarnom režimu rada je $\frac{d\Omega}{dt} = 0$ i $\frac{di}{dt} = 0$, pa gornje jednačine postaju:

$$M_m = M \quad (2.38)$$

$$U = E + Ri \quad (2.39)$$



Sl. 2.3 Dinamički režim rada – prelaz sa jedne na drugu mehaničku karakteristiku

Rešavanjem ovih jednačina dobija se dinamička mehanička karakteristika, kriva b, na Sl.2.3. Da bi se došlo do rešenja treba utvrditi dodatne podatke koji nisu bili neophodni pri definisanju stacionarnog režima rada. To su konkretno:

- Veze između kontra-ems i ugaone brzine, kao i između momenta M_m i utrošene struje I .
- Momenat inercije rotora J .
- Vrednost pojedinih delova ukupnog otpornog momenta, pošto neki od njih mogu da zavise od brzine koja se u prelaznom režimu menja.
- Vrednost konstanti R i L u kolu motora

2.4.2 Konstante za kontra-ems i za momenat

Ems indukovana u namotu indukta mašine jednosmerne struje određuje se prema obrascu

$$E = \frac{p}{a} \frac{n}{60} N \Phi \quad (2.40)$$

u kome p predstavlja broj pari polova, a broj pari paralelnih grana u namotu, N broj prostih provodnika u namotu, a Φ fluks po polu. Ako se brzina obrtanja n [o/min] izrazi kao ugaona brzina

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} [\text{rad/s}] \quad (2.41)$$

gornji izraz postaje

$$E = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N \Phi \Omega \quad (2.42)$$

odnosno

$$E = k_v \Omega \quad (2.43)$$

Unutrašnji elektromagnetni momenat M_m koji predstavlja zbir korisnog momenta M na osovini i momenta trenja usled obrtanja:

$$M_m = \frac{EI}{\Omega} \quad (2.44)$$

$$M_m = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N \Phi I \quad (2.45)$$

odnosno

$$M_m = k_m I \quad (2.46)$$

Na osnovu gornjeg izvođenja vidi se da konstanta kotra-ems i konstanta momenta imaju iste vrednosti ukoliko se koriste jedinice iz koherentnog MKSA ili CGS sistema.

2.4.3 Inercija

Mehanički momenat inercije rotora, skraćeno "inercija", protivi se promeni brzine motora. Za isti iznos raspoloživog momenta ugaono ubrzanje $\frac{d\Omega}{dt}$ biće utoliko veće ukoliko je inercija J rotora manja. Raspoloživi momenat ubrzanja je razlika između elektromagnetnog momenta M_m koji deluje na rotor motora i svih otpornih momenata $\sum M$, uključujući i korisni momenat M koji se preko osovine prenosi na radnu mašinu:

$$M_m - \sum M = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.47)$$

Inercija je značajan podatak o mikromotoru koji često treba da menja radno stanje. Brzina promene režima rada ima veliki značaj u automatici, a označava se kao brzina reagovanja.

Poznato je da inercija obrtnog tela u odnosu na osu obrtanja predstavlja zbir proizvoda elementarnih masa tog tela i kvadrata odgovarajućih poluprečnika krugova kojima te elementarne mase kruže.

$$J = \int r^2 dm \quad (2.48)$$

ili

$$J = \sum_1^n mr^2 \quad (2.49)$$

Za homogeni cilindar ukupne mase m i spoljnog poluprečnika R nalazi se

$$J = \frac{mR^2}{2} \quad (2.50)$$

Iz ovog obrasca proizilazi:

$$J = m\rho^2 \quad (2.51)$$

gde je:

$$\rho = \frac{R}{\sqrt{2}} = 0.707R \quad (2.52)$$

Poznato je takođe da dimenzije motora zavise od vrednosti njegovog obrtnog momenta. Kod slično konstruisanih mašina momenat raste sa porastom linearnih dimenzija teorijski prema izrazu

$$M_m = l^4 \quad (2.53)$$

a praktično prema izrazu

$$M_m = l^3 \quad (2.54)$$

Kako je inercija srazmerna kvadratu prečnika i masi koja raste sa kubom linearnih dimenzija, biće

$$J = l^5 \quad (2.55)$$

Tako se zaključuje da sa porastom linearnih dimenzija inercija motora raste brže od momenta. Dva puta veći motor ima npr. četiri puta veću mehaničku inerciju.

Industrijski motori koji se koriste u servomehanizmima definišu se prema momentu koji mogu da razviju pri brzinama od 0 do 3000 o/min. U tabeli 2.1 označena nominalna snaga takvih motora odgovara brzini 3000 o/min. Navedene su i vrednosti inercije koje može da ima rotor motora. Granice tih vrednosti su dosta široke, jer ne zavise samo od dimenzija rotora i odnosa njegove dužine prema prečniku, već i od konstrukcije, tj. od načina kako se suzbija reakcija indukta, od načina hlađenja itd. Ovi motori uvek imaju linearnu mehaničku karakteristiku, čak do 5-struke vrednosti nominalne struje.

Tabela 2.1 Mehaničke karakteristike motora

Nominalna snaga pri 3000 o/min	Nominalni moment M_n (Nm)	Inercija rotora J (kg m ²)
90	0.28	$(1.5...4.5) \cdot 10^{-4}$
185	0.59	$(0.4...1.2) \cdot 10^{-4}$
370	1.48	$(1.0...2.8) \cdot 10^{-4}$
750	2.38	$(2.3...6.5) \cdot 10^{-4}$
1500	4.77	$(0.6...1.5) \cdot 10^{-4}$
3000	9.55	$(1.6...3.8) \cdot 10^{-4}$

Sa ciljem da se dobije velika brzina reagovanja, konstruišu se motori sa izuzetno malom inercijom: motori "Minertia" sa izduženim rotorom, motor "Servalco" sa pločastim rotorom bez gvožđa, motori "Incredyne".

Odnos dužine i prečnika rotora kod motora tipa "Minertia" može biti i veći od 2.5. Namot indukta leži zalepljen na površini rotora, tj. nalazi se u samom vazdušnom zazoru između gvožđa statora i gvožđa rotora. Njegova inercija je 5 do 10 puta manja nego što je inercija industrijskih motora iste snage i brzine.

Rotor motora "Servalco" ima na osovini tanku obrtnu ploču od izolacionog materijala sa radijalno štampanim provodnicima na obe strane. Ploča se obrće u vazдушnom zazoru i ima izuzetno malu mehaničku inerciju.

Još manja inercija se može postići sa motorima tipa "Incredyne" u kojima se kroz cilindrični magnetni zazor obrće samo namot lončastog oblika pričvršćen na osovini.

Postupak proračunskog određivanja momenta inercije složenog obrtnog tela sastoji se u određivanju zbira pojedinih momenata inercije koji se odnose na sastavne proste cilindre, sračunate po obrascu $J = \frac{mR^2}{2}$. Momenat inercije jednog prostog indukta sa kolektorom može se približno odrediti po istom obrascu uzimajući specifičnu masu 8 kg/dm^3 , a za proračunsku dužinu uzimamo dužinu gvođenog paketa limova rotora uvećanu za 10%. Tako rotor motora čiji je prečnik $D=8 \text{ cm}$, dužina $l=12 \text{ cm}$ ima momenat inercije oko:

$$J = \frac{mR^2}{2} = \frac{1.1 \cdot 8\pi \cdot 0.4^2 \cdot 0.04^2 \cdot 1.2}{2} = 4.25 \text{ kgm}^2 \quad (2.56)$$

Eksperimentalno određivanje momenta inercije J jednog rotora vrši se upoređivanjem perioda oscilovanja T tog rotora okačenog o tanku žicu i periode oscilovanja T_0 tela poznate inercije J_0 okačenog na istu žicu:

$$J = J_0 \left(\frac{T'}{T_0} \right)^2 \quad (2.57)$$

Tačnost merenja je veća ukoliko su vrednosti J_0 i J bliske i ako perioda T nije suviše kratka, tj. ako je bar oko 1 s.

2.4.4 Otporni momenat motora

Od ukupnog elektromagnetnog momenta M_m motora, jedan deo se nekorisno troši na savlađivanje unutrašnjih trenja. Trenjima odgovaraju gubici:

- gubici snage na trenje četkica i gubici snage u ležištima koji su srazmerni brzini obrtanja;
- gubici snage u gvožđu kao i gubici snage usled ventilacije koji su srazmerni kvadratu brzine obrtanja

Na osnovu toga može se pretpostaviti da prvim odgovara konstantan momenat "suvog trenja" M_a , a drugima momenat trenja srazmeran brzini obrtanja, tzv. "momenat viskozno trenja" M_b koji odgovara obrtanju tela u viskoznoj sredini. Prvi se meri u $[Nm]$, a drugi u $\left[\frac{Nm}{\text{rad/s}} \right]$.

Momenat M_a i momenat M_b se mogu razdvojiti ako se utvrde ukupni gubici snage na trenje koji postoje pri dvema različitim brzinama. Gubici se utvrđuju pomoću dinamometra koji pri različitim brzinama prenosi snagu ispitivanom motoru ili metodom ispitivanja motora kada radi na prazno.

Ako pri ugaonoj brzini Ω_1 gubici na trenje iznose P_{f1} , a P_{f2} pri brzini Ω_2 , onda se na osnovu jednačina:

$$P_{f1} = M_a \Omega_1 + M_b \Omega_1^2 \quad (2.58)$$

$$P_{f2} = M_a \Omega_2 + M_b \Omega_2^2 \quad (2.59)$$

a pod pretpostavkom da je $\Omega_2 = 2\Omega_1$, našlo

$$M_a = \frac{4P_{f1} - P_{f2}}{2\Omega_1} \quad (2.60)$$

i

$$M_b = \frac{P_{f2} - 2P_{f1}}{2\Omega_1^2} \quad (2.61)$$

2.4.5 Konstante električnog kola

U jednačini za električno kolo motora, $U = E + Ri + L \frac{di}{dt}$, javljaju se kao parametri otpor motora R i njegova induktivnost L. Eksperimentalno određivanje ovih parametara se vrši pri ukočenom rotoru, kada je kontra-ems $E=0$ i pri sniženom naponu koji obezbeđuje približno nominalnu struju.

Otpor R se meri pomoću jednosmerne struje, pa obuhvata pored otpora indukta i otpore namota pomoćnih polova i kompenzacionog namota, ako postoje, pa i otpor na kontaktu četkica koji zavisi od struje, ali se može uzeti i da je konstantan.

Induktivnost se određuje posle merenja impedance motora, Z, sa naizmeničnom strujom pri $f=50$ Hz.

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f} [H] \quad (2.62)$$

Električna vremenska konstanta, τ_e , svakog električnog kola, pa i kola motora, predstavlja vreme koje protekne od trenutka uključenja struje do trenutka kada struja (jednosmerna) dostigne 63.2% od svoje pune vrednosti. To vreme iznosi:

$$\tau_e = \frac{L}{R} [s] \quad (2.63)$$

Podatak o električnoj vremenskoj konstanti motora potreban je pri proučavanju prelaznog režima rada. Tada se vodi računa da se momenat motora, proporcionalan struji, takođe ne uspostavlja trenutno, nego sa kašnjenjem koje zavisi od vremenske konstante τ_e .

2.5 Karakteristike servomotora

Specifične karakteristike servomotora su:

- Teorijsko ubrzanje pri polasku
- Mehanička vremenska konstanta
- Amortizaciona konstanta
- Snaga prelaznog perioda

2.5.1 Teorijsko početno ubrzanje [49, 54, 58]

U trenutku uključenja neopterećenog motora mehanička jednačina, $M_m = M + J \frac{d\Omega}{dt}$, se transformiše u izraz:

$$A = \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)_{\Omega=0} = \frac{M_{pol}}{J} \quad (2.64)$$

koji predstavlja tzv. teorijsko početno ugaono ubrzanje, M_{pol} je polazni momenat koji, kod većih motora, mora da se ograničava prema polaznoj struji. Ograničavanjem najveće vrednosti struje pri polasku sprečava se pregrevanje namota motora ili uređaja preko koga se vrši napajanje motora.

Za odnos $I_p:I_n$ (polazna struja:nominalna struja) = 5 standardni industrijski motori imaju sledeća realna početna ubrzanja:

Tabela 2.2 Početne vrednosti ubrzanja motora i mehaničke vremenske konstante		
$P_n(W)$ pri $n=3000$ o/min	A realno ($rad/s^2 \times 1000$)	T_{meh} (ms)
90	3.0...8.0	45...115
185	2.4...6.5	55...140
370	2.1...5.3	65...160
750	1.8...4.8	70...180
1500	1.6...3.75	90...200
3000	1.25...3.0	110...260

Prema navedenim podacima može se zaključiti da vrednost početnog ubrzanja pada sa porastom snage motora. To je saglasno zaključku da mehanička inercija raste brže od momenta. Specijalni motori imaju znatno veća početna ubrzanja.

2.5.2 Mehanička vremenska konstanta

Mehanička vremenska konstanta, τ_{meh} , je vreme koje protekne od trenutka neopterećenog motora do postizanja 63.2% od brzine praznog hoda. Pri tome se pretpostavlja da je momenat varirao linearno sa brzinom od $M_m=M_{pol}$ za $\Omega = 0$ do $M_m = 0$ za $\Omega = \Omega_0$ prema Sl. 2.4 i da je mehanička karakteristika

$$\frac{M_{pol}-M_m}{\Omega} = \frac{M_{pol}}{\Omega_0} \quad (2.65)$$

odnosno

$$\frac{M_m}{M_{pol}} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_0} \quad (2.66)$$

Rešenje mehaničke diferencijalne jednačine pod ovim uslovima je

$$\Omega = \Omega_0 \left(1 - e^{-\frac{M_{pol} t}{J \Omega_0}} \right) \quad (2.67)$$

odakle za mehaničku vremensku konstantu imamo

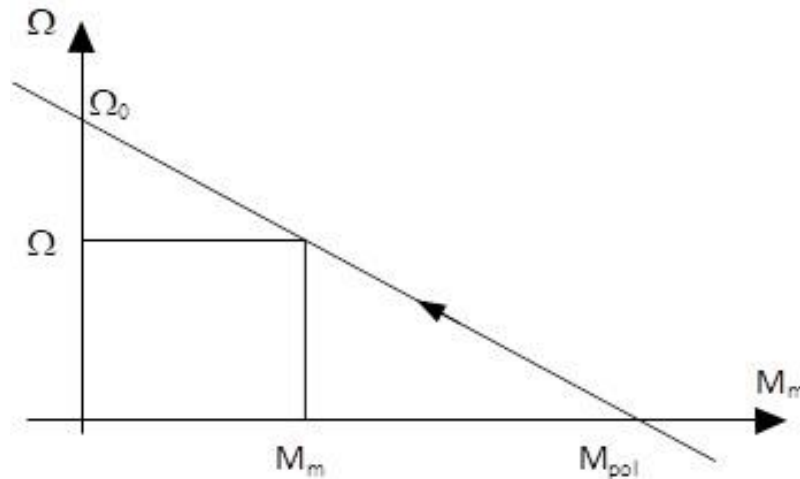
$$\tau_{meh} = \frac{J \Omega_0}{M_{pol}} = \frac{\Omega_0}{A} \quad (2.68)$$

ili

$$\tau_{meh} = \frac{2\pi n_0}{60 A} \quad (2.69)$$

Mehaničke vremenske konstante standardnih industrijskih motora za jednosmernu struju navedene su u tabeli 5.2 i za njih važi da je polazna struja bila ograničena na $5I_n$.

Specijalni motori imaju znatno manje mehaničke vremenske konstante.



Sl. 2.4 Mehanička karakteristika motora

2.5.3 Amortizaciona konstanta

Polazeći od opšte mehaničke diferencijalne jednačine:

$$M_m = M + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.70)$$

i od izraza

$$M_m = M_{pol} \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_0}\right) \quad (2.71)$$

nalazi se posle zamene, uz pretpostavku da se radi o praznom hodu kada je otporni moment $M=0$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_{pol} - M_{pol} \frac{\Omega}{\Omega_0} \quad (2.72)$$

odnosno

$$M_{pol} = J \frac{d\Omega}{dt} + M_{pol} \frac{\Omega}{\Omega_0} \quad (2.73)$$

Poslednji izraz pokazuje da se polazni momenat motora M_{pol} troši na savlađivanje otpornog dinamičkog momenta

$$M_J = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.74)$$

i momenta viskozno trenja predstavljenog drugim članom u izrazu. Taj drugi član se označava kao proizvod amortizacione konstante D i ugaone brzine

$$D\Omega = \frac{M_{pol}}{\Omega_0} \Omega \quad (2.75)$$

pošto je

$$D = \frac{M_{pol}}{\Omega_0} \quad (2.76)$$

amortizaciona konstanta se izražava u $\left[\frac{Nm}{rad/s}\right]$. Ona predstavlja nagib mehaničke karakteristike $M(n)$.

Uticaj amortizacione konstante na ponašanje motora pri promenama brzine može se uočiti po uticaju koji ima na mehaničku vremensku konstantu.

$$\tau_{meh} = \frac{J\Omega_0}{M_{pol}} = \frac{J}{D} \quad (2.77)$$

Vidi se da amortizaciona konstanta ima suprotan uticaj od uticaja momenta inercije. Ona smanjuje vremensku konstantu. Motor sa većom amortizacionom konstantom reaguje brže na električne promene.

2.5.4 Prelazna (tranzitna) snaga

Pošto proizvod momenta i ugaone brzine motora predstavlja njegovu snagu, proizvod momenta i ubrzanja predstavljaće promenu snage. Kao prelazna snaga označava se proizvod polaznog momenta i početnog ubrzanja:

$$P_J = M_{pol}A = \frac{M_{pol}^2}{J} \quad (2.78)$$

Prelazna snaga, P_s , odnosno promena početne snage, izražava se u W/s.

Tako će industrijski motor čija je nominalna snaga $P_n = 750$ W, a brzina $n = 3000$ o/min moći u uslovima ograničenja struje na $5I_n$ da da prelaznu snagu:

$$P_s = M_{pol}A = 5 \frac{P_n}{2\pi n} 60A = 47750 \text{ W/s} \quad (2.79)$$

To ne znači da će motor posle jedne sekunde da daje oko 50 kW, nego podatak služi za poređenje sa drugim motorima. Za razliku od podataka o početnom ubrzanju A koje opada sa porastom dimenzija motora, podatak o prelaznoj snazi P_s izgleda pogodniji za ocenjivanje servo-motora, jer raste sa njegovim dimenzijama. Prema napred navedenim podacima sa industrijskim motorima, čija je struja ograničena na vrednost $5I_n$, mogu se postići vrednosti prelazne snage P_s koje su navedene u sledećoj tablici:

Tabela 2.3 Nominalne snage i odgovarajuće prelazne snage	
P_n (W) pri $n=3000$ o/min	P_s (kW/s)
90	4.2...11.5
185	7...19
370	12.4...31
750	21.5...57.3
1500	38...90
3000	60...143

Korisno je uočiti da se podatak o prelaznoj snazi P_s za motor sa reduktorom odnosi kako na osovinu motora, tako i za osovinu reduktora. Odnos $M_{pol}/J = A$ ima veću vrednost na osovini motora, a manju na osovini reduktora, srazmerno odnosu redukcije. Odnos prelazne snage sa drugim parametrima je:

$$P_s = \frac{M_{pol}\Omega_0}{\tau_{meh}} \text{ ili } P_s = \frac{RI_{pol}^2}{\tau_{meh}} \frac{k_m^2}{k_m k_v} \approx \frac{RI_{pol}^2}{\tau_{meh}} \quad (2.80)$$

2.6 Ispitivanje motora malih snaga

Neprocenjiva je uloga ispitivanja u razvoju, konstrukciji i primeni motora malih snaga. Ispitivanja se vrše i pri reviziji i dijagnostici motora u servisnoj službi radi otkrivanja eventualnih kvarova, po izvršenim poprvkama i radi utvrđivanja da li motor odgovara svojoj ulozi za koju je namenjen. O samom ispitivanju karakteristika malih motora može se pronaći u literaturi [67, 72, 80].

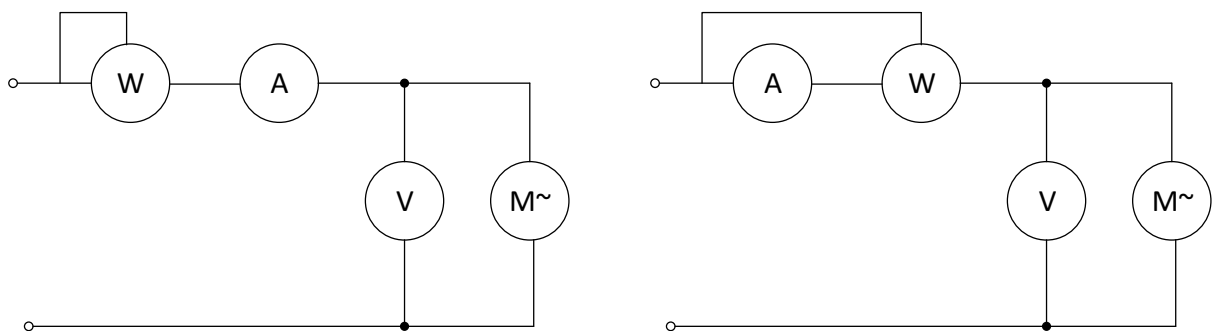
2.6.1 Strujni izvori

Da bi se ispitivanja u laboratoriji mogla obaviti, neophodni su različiti električni izvori regulisanog napona. Ako je u pitanju naizmenični napon za 50 Hz, pogodan je autotransformator. Konstruisani su sa torusnim jezgrom i jednoslojnim namotom po kome se kreće klizni kontakt kojim se dotiče svaki navojak, tako da se dobija praktično kontinualna regulacija. Sam kontakt se sastoji od ugljene četkice čime se i ograničava struja u kratkospojenom navojku. Za izvore jednosmernog napona mogu se koristiti motor-generatorske grupe ili autotransformatori sa ispravljačima u bloku, odnosno izvori stabilisanog jednosmernog napona. Motor-generatorske grupe koristi se i za naizmenične napone za učestanosti različite od 50 Hz.

2.6.2 Merenje električnih veličina

Pri ispitivanju mikromašina potrebno je istovremeno merenje struje, napona i snage. Takva merenja su skupčana sa neizbežnim greškama usled sopstvene potrošnje instrumenata. Greške su utoliko primetnije, ukoliko je merena veličina pri ispitivanju mikromašina, naročito u slučaju naizmenične struje, bliža pragu osetljivosti instrumenta.

U jednofaznim merenjima postoji 18 varijanata priključenja ampermetra, voltmetra i vatmetra. Prednost se daje dvema od njih (Sl. 2.5) kod kojih je greška pri merenju snage posledica pada napona u otporu ampermetra i struje u kolima vatmetra, a napon se meri na krajevima samog motora pri čemu se smatra da ampermetar meri struju motora, jer je potrošnja voltmetra veoma mala. Sopstvena potrošnja voltmetra može se izmeriti istim vatmetrom ako se isključi ispitivani motor.



Sl. 2.5 Sheme jednovremenog merenja struje, napona i snage

Ako je napon 110 V, a pad napona u ampermetru i vatmetru oko 2 V, greška na snazi je oko 1.5% što se smatra prihvatljivim. Za napone više od 110 V i struje opterećenja koje odgovaraju nižem opsegu merenja ampermetra i vatmetra, greške na snazi će biti manje i obratno. Za šeme na Sl. 2.5 potrošnja u strujnom kolu biće:

$$(R_A + R_W)I^2 \quad (2.81)$$

gde je

I - struja

R_A - otpor ampermetra i

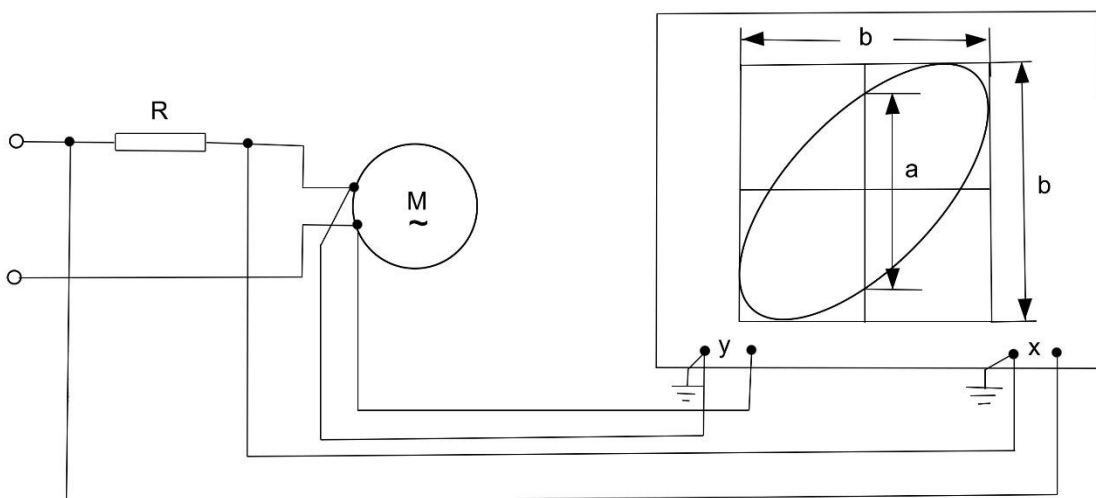
R_W - otpor strujnog kola vatmetra.

U slučaju trofaznog merenja instrumenti se uključuju na isti način: voltmetar na krajeve ispitivane mašine, a naponsko kolo vatmetra na krajeve mreže. Često se koristi samo jedan vatmetar sa faznim ubacačem. Radi otklanjanja nesimetrije pri preciznim merenjima, ponekad se upotrebljavaju dodatne impedanse u fazama bez uključenih ampermetara i strujnih kola vatmetara. Pri delovanju faznog ubacača dodatne impedanse treba takođe prebaciti u one faze u kojima se ne meri struja i snaga.

Pri merenju struje do 1 A preporučuje se upotreba instrumenata sa ispravljačima, jer je njihova potrošnja znatno manja od ostalih. Osim toga, takvi instrumenti imaju više opsega pa mogu da služe za razne režime rada mašine. Za struje iznad 1 A mogu se upotrebiti standardni ampermetri, elektromagnetni i elektrodinamički, čiji je opseg 2.5-5 A ili 5-10 A. Pad napona u njima pri punoj struji ne treba da je veći od 0.5 do 0.7 V.

Napon treba meriti takvim voltmetrima kod kojih se može zanemariti sopstvena potrošnja. Takvom uslovu odgovaraju elektronski i ispravljački voltmetri. Ispravljački voltmetri su tačniji, a elektronski imaju manju potrošnju. Sve više se koriste digitalni voltmetri, visoke tačnosti i male potrošnje.

Za merenje snage biraju se instrumenti male potrošnje i male fazne greške, za $\cos \varphi = 0.2$ do 1. Poželjno je koristiti vatmetar sa više mernih opsega za struju i napon da bi se upotrebio pri raznim režimima rada. Za struje iznad 0.5 A preporučuje se elektrodinamički vatmetar, a za manje struje koriste se specijalni vatmetri: elektrodinamički za mali $\cos \varphi$ i elektronski. Za merenje snage mašina naizmenične struje od nekoliko W može se upotrebiti i osciloskop kojim se snaga meri pomoću Lisažuovih figura, na osnovu vrednosti $\sin \varphi$. Na jedan par priključaka dovede se napon srazmeran struji opterećenja, a na drugi par napon motora (Sl. 2.6).

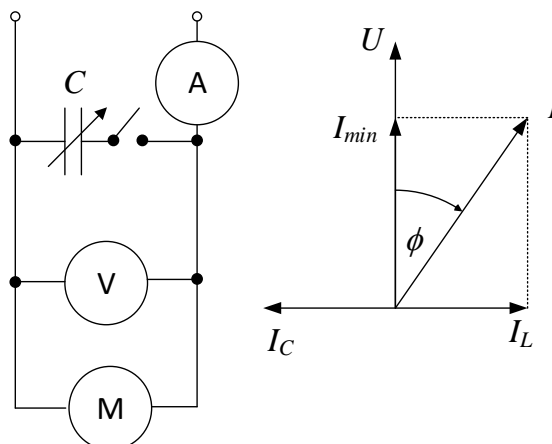


Sl. 2.6 Merenje snage pomoću osciloskopa

Za sinusne napone i struje figura ima oblik elipse na osnovu koje se odredi:

$$\sin \varphi = \frac{a}{b} \quad (2.82)$$

Postupak je da se veličina b odredi po vertikali, bez priključaka X, a zatim, ne menjajući pojačanje po ordinati, se priključi X i odredi dimenzija a . Merenje aktivne snage može da se izvrši pomoću promenljivog kondenzatora (Sl. 2.7).



Sl. 2.7 Merenje snage pomoću promenljivog kondenzatora

Ideja se sastoji na kompenzaciji induktivne struje pomoću kondenzatora. Minimalna struja koju pri tome pokaže ampermetar biće čisto aktivna struja:

$$I_{min} = I \cos \varphi \quad (2.83)$$

a odgovarajuća snaga:

$$P = UI_{min} \quad (2.84)$$

U nizu slučajeva pri ispitivanju mikromašina traži se ne samo merenje napona i struje, već i snimanje trenutnih vrednosti napona i struje. U tom cilju koristi se elektronski osciloskop, Blondelov oscilograf ili pisač Y-t.

Pri ispitivanju asinhronih i sinhronih kondenzatorskih motora od interesa je procena karaktera polja u mašini pomoću osciloskopa. Radi toga na vertikalne i horizontalne priključke osciloskopa treba dovesti struje glavne i pomoćne faze, odnosno napone srazmerne tim strujama. Pošto se ispituju mašine čije su ose namota pomerene za 90° el. kružno polje se stvara pri jednakosti magnetopobudnih sila glavne i pomoćne faze:

$$K_B N_B I_B = K_Y N_Y I_Y \quad (2.85)$$

odnosno

$$I_B = kI_Y \quad (2.86)$$

gde je $k = \frac{K_Y N_Y}{K_B N_B}$ i faznom pomeraju struja za ugao 90° el. U tom slučaju pojačanje po osama razlikuje se za k-puta, a na ekranu se dobija krug. Ako $\frac{I_B}{I_Y} \neq k$ ili ako ugao faznog pomeraja nije 90° na ekranu se pojavi elipsa. Step en eliptičnosti polja može se odrediti prema odnosu njegovih osa.

Otpornosti namota mere se po jednoj od dve metode:

- pomoću mosta za jednosmernu struju
- po U/I metodi, jednosmernom strujom.

Otpori se mere neposredno na krajevima namota, a kod komutatorskih mašina na kriškama komutatora na kojima naležu odgovarajuće četkice.

Vrednost struje pri merenju otpora treba da bude najviše tolika da adijabatski porast temperature pri merenju ne bude veći od 1° . Za bakar adijabatski porast temperature je:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta^2}{195} \Delta t \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.87)$$

$$\Delta\theta = \frac{\Delta^2}{195} \text{ [}^\circ\text{C/s]} \quad (2.88)$$

za gustinu struje $\Delta \text{ [A/mm}^2\text{]}$. Ako je nepoznat presek provodnika, vrednost struje pri merenju otpora ne treba da bude veća od 0.15 do 0.20 od nominalne struje namota, a trajanje merenja ne duže od 1 min.

Ako je otpor voltmetra priključenog neposredno na namot (R_V) prema otporu namota (R) manji od 100 puta, uvodi se popravka:

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} \quad (2.88)$$

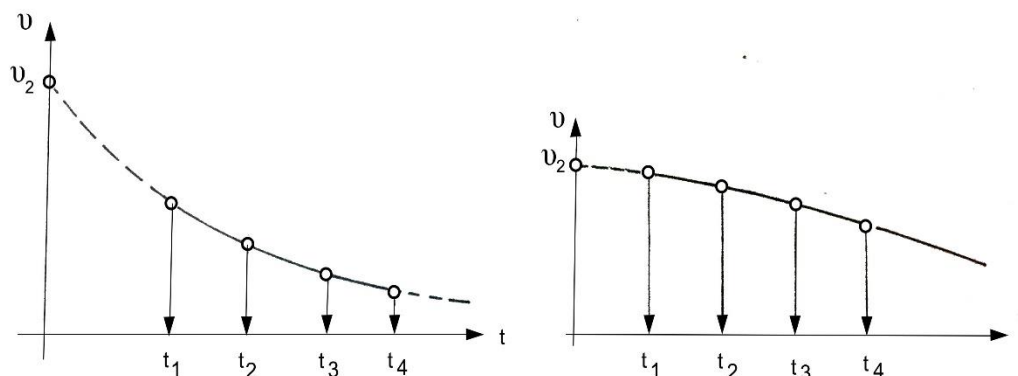
Otpori namota mogu se danas meriti i pomoću elektronskih digitalnih ommetara. Propisi predviđaju da se porast temperature zagrejanog namota određuje promenom optora prema relaciji, za bakarne namote

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1} \quad (2.89)$$

gde su R_1, R_2, ϑ_1 poznate, a računa se temperatura ϑ_2 .

Pre ispitivanja izmeri se otpor hladne mašine R_1 koja ima temperaturu okoline ϑ_1 , izmerenu termometrom. Preporučuju se dva do tri uzastopna merenja otpora hladnog namota od kojih se izračuna

srednja vrednost. Zatim se mašina opteretiti pri nominalnom naponu i predviđenom radnom režimu koji se održava do postizanja ustaljenog porasta temperature ili do kraja predviđenog radnog ciklusa, pa se izmeri otpor zagrejanog namota R_2 . Poželjno je taj otpor meriti pod opterećenjem. Ako to nije izvodljivo, treba ga izmeriti što pre po isključenju i zaustavljanju mašine, najviše do 3 s. Ako nije moguće u tom roku izvršiti merenje otpora, snima se kriva hlađenja $\vartheta = f(t)$ čijom ekstrapolacijom dobijamo temperaturu pre isključenja. (Sl. 2.8)



Sl. 2.8 Primer ekstrapolacije krive hlađenja

Istovremeno pri tome treba vršiti merenje otpora i proteklog vremena od trenutka isključenja, kroz svakih 10-15 s. Obično se izvrši bar 5 takvih merenja.

Temperature namota treba meriti ne samo u okviru oglada zagrevanja, već i prilikom određivanja radnih i drugih karakteristika, s obzirom na činjenicu da je kod mikromašina uticaj otpora na njihove karakteristike veoma veliki.

2.6.3 Merenje momenta

Radne karakteristike električnih mikromašina snimaju se metodom opterećenja mašine sa istovremenim merenjem momenta i brzine obrtanja. Tačnost određivanja stepena iskorišćenja (η) i korisne snage (P) zavisi od tačnosti merenja momenta (M) i brzine obrtanja (n). Metoda indirektnog određivanja radnih karakteristika nije celishodna za razliku od velikih mašina, gde se preporučuje indirektna metoda određivanja stepena iskorišćenja, pa i drugih karakteristika umesto direktne metode.

Merači momenta (momentometri) treba da zadovoljavaju sledeće zahteve: mala greška u širokom opsegu merenja pri brzinama 0-40000 o/min; mala inercija u svim uslovima rada; stabilno opterećenje po momentu pri raznim temperaturama okoline; kriva momentnog opterećenja bez harmoničkih komponenti.

Kao osnova direktnih merenja momenata služi jednačina

$$M = M_0 + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.90)$$

gde je :

M - Obrtni momenat mašine

M_0 - spoljašnji momenat opterećenja

$J \frac{d\Omega}{dt}$ - dinamički momenat srazmeran energiji obrtnih masa.

Analiza jednačine pokazuje da se merenje momenta može ostvariti jednom od direktnih metoda:

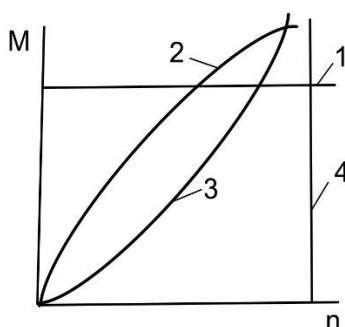
- statičkom metodom $M = M_0 = const$
- dinamičkom metodom $M = M_0 + \frac{d\Omega}{dt}$, gde $M_0 = const$ ili može da bude $M_0 = 0$
- sumarnom metodom, merenjem momenta statora

Zavisno od slučaja koristimo se različitim momentometrima:

- za laboratorijska ispitivanja preciznim uređajima klase 0.2 do 0.5;
- za kontrolna ispitivanja jednostavnim uređajima za brza merenja klase 1-2.5;
- za specijalna ispitivanja, pouzdanim uređajima koji mogu da rade u uslovima visokog vakuuma, povišenih vibracija i temperatura agresivne sredine.

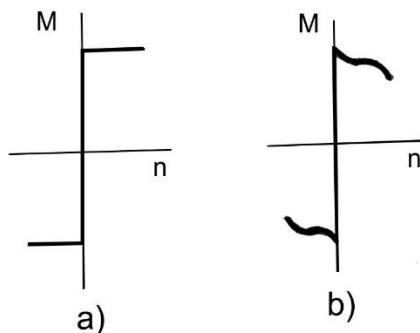
Najveći značaj ima mehanička karakteristika momentometra $M=f(n)$. Na Sl. 2.9 su prikazane mehaničke karakteristike različitih kočnica:

1. Frikcione
2. Dinamičke
3. Hidrodinamičke i aerodinamičke
4. Sinhronne



Sl. 2.9 Mehaničke karakteristike kočnica

Po konstrukciji su najjednostavnije frikционе kočnice. Momenat kočenja u njima se ostvaruje na račun sila trenja, a njihova idealna karakteristika prikazana je na Sl. 2.10 (a). Stvarne karakteristike zavise od brzine obrtanja, temperature, stanja dodirnih površina, specifičnog pritiska itd. Karakteristika ovih kočnica obično opada sa brzinom (Sl. 2.10 (b)).



Sl. 2.10 (a) idealna i (b) stvarna karakteristika frikционе kočnice

Eksperimentalno je utvrđeno da najveći uticaj na koeficijent trenja igra temperatura radne površine. Pod uticajem promenljive temperature menjaju se mehanička svojstva materijala po dubini što dovodi do nestabilnog rada.

Frikcione kočnice upotrebljavaju se obično za mašine snage do 10 W i brzine obrtanja do 3000 o/min. U [34-36] prikazane su razne konstrukcije ovih kočnica. Momenat opterećenja kočnice sa trakom (a) je

$$M = (F - Q)gr \text{ [Nm]} \quad (2.91)$$

gde je:

F - pokazivanje dinamometra

Q - masa tega

g=9.81

r - poluprečnik u metrima

Kod Pronijeve kočnice (b) momenat je

$$M = Qgl \text{ [Nm]} \quad (2.92)$$

a kod kočnice (c) upotrebljava se isti izraz kao za kočnicu sa trakom (a).

Pri ispitivanju veka trajanja motora primenjuje se kočnica u obliku doboša ispunjenog sačmom (d). Promenom prečnika doboša i količine sačme reguliše se momenat opterećenja.

$$M = Qgl \text{ [Nm]} \quad (2.93)$$

Posebnu konstrukciju frikcionih kočnica predstavljaju elektromagnetne kočnice sa feromagnetnim prahom čiji je princip zasnovan na delovanju metalnog praha postavljenog u magnetnom polju međuprostora statora i rotora same kočnice. Takve kočnice su pogodne za opterećenje sporohodnih mašina. Frikcione kočnice imaju i druge nedostatke: pojava relaksacionih oscilacija (neravnomernost trenja koja se ponavlja u vremenu), nejednoznačnost karakteristika opterećenja, mali vek trajanja zbog

potrošnje, problem odvođenja toplote i dr. pa se danas istiskuju elektrodinamičkim, elektromagnetnim i drugim kočnicama. Za snage do 10 W ipak se koriste frikzione kočnice sa klatnom.

Elektrodinamičke kočnice opisane su u [67, 72]. Ispitivani motor opterećen je elektrodinamičkom kočnicom koju obično predstavlja elektrodinamometar koji radi kao generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom i regulisanjem u širokom opsegu. Stator elektrodinamometra se uravnotežava pomoću poluge i tegova okačenih na kuku, a ravnotežni položaj se određuje prema strelici (1).

Momenat opterećenja je

$$M = Qgl \text{ [Nm]} \quad (2.94)$$

gde je

Q - masa tegova

g=9.81

l - dužina poluge od ose obrtanja.

Ponekad je potrebno upotrebiti korekcionu masu (q):

$$M = (Q + q)gl \text{ [Nm]} \quad (2.95)$$

koja odgovara momentu trenja elektrodinamometra, a zavisi od brzine obrtanja.

Široka primena elektromagnetnih kočnica posledica je njihove proste izrade i jednostavne upotrebe. U [87] su opisane razne vrste elektromagnetnih kočnica:

- a) Elektromagnetna kočnica sa cilindričnim rotorom indukcionog tipa. Nepomičan stator (1) i rotor (2) su izrađeni od malougljeničnog gvožđa. U srednjem delu kočnice postavljen je pobudni namot (3) za jednosmernu struju. Na rotoru su pravougaoni zupci. Svi zupci rotora levo od pobudnog namota imaju jednu magnetnu polarnost (N), a desno drugu (S). Pri obrtanju rotora dolazi do periodične promene fluksa koji teče kroz posmatrane delove statora, pa se na njihovim površinama javljaju vihorne struje. Pošto se pri tome fluks ne menja po smeru, već samo po vrednosti, potrebno je da promene fluksa budu što veće.
- b) Kočnica sa feromagnetnim rotorom u obliku diska. Pri obrtanju rotora u nepomičnom polju u njemu se javljaju vihorne struje. Ova konstrukcija kao i prethodna ima nedostatke u velikom momentu inercije i silama privlačenja između statora i rotora.
- c) Elektromagnetne kočnice sa rotorom od magnetnog materijala nemaju nedostatak u pogledu sila privlačenja između rotora i statora.
- d) Kočnice sa stalnim magnetima

Novijim konstrukcijama elektromagnetne kočnice kojom je moguće snimiti karakteristiku momenta i u njenom nestabilnom delu, a koja ima relativno širok merni opseg.

2.6.4 Merenje brzine obrtanja

Za merenje brzine obrtanja mikromašina mogu se upotrebiti razne vrste tahometara ili tahometarskih generatora:

- magnetni,
- ferodinamički,
- centrifugalni,
- hidraulični,
- pneumatički,
- frikcioni,
- vibracioni,
- stroboskopski,
- indukcioni,
- fotoelektrični,
- kapacitivni,
- ostali.

Stroboskopski tahometri se sastoje od impulsne lampe, reflektora, transformatora i regulatora učestanosti sa skalom označenom u o/min. Pomoću stroboskopa može se meriti i klizanje asinhrona mašine, ugao momenta asinhrona mašine, linearna brzina kretanja i učestanost vibracija.

Pri merenju brzine obrtanja podešava se da perioda impulsa bude jednaka trajanju jednog obrta, pa je:

$$n = 60f = \frac{60}{T} \left[\frac{ob}{min} \right] \quad (2.96)$$

a posmatrani rotor pri tome miruje. Obično su klase 1. Imaju više opsega brzina, npr. 200-2000 ili 2000-2000 o/min. Postoje stroboskopi koji mere i znatno veće brzine obrtanja, npr. 150000 o/min. Ako su brzine obrtanja manje od najnižih na skali dobija se umesto npr. jedne obeležene crte na stroboskopskom krugu:

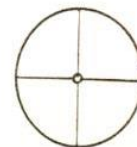
dve za $n/2$



tri za $n/3$



četiri za $n/4$



Samo jedna crta se javlja pri brzini $n = 60f$, a i pri $2n$, $3n$ itd. pa se tako mogu meriti i veće brzine iznad opsega stroboskopske skale.

Skretanje kazaljke fototahometra odgovara merenoj brzini obrtanja, omogućava brza merenja. Merni blok sadrži izvor napajanja, merni pribor i pretvarač učestanosti napona, potreban za priključak na oscilograf ili pisač. Grade se uređaji npr. klase 2.5 za merenje brzine obrtanja od 500-18000 o/min, pri

jednom paru crno-belih isečaka. Povećanjem broja parova isečaka na stroboskopskom krugu mogu se meriti i manje brzine obrtanja. Osnovna prednost ovih tahometara je prosta konstrukcija i mogućnost beskontaktnog merenja brzine obrtanja mikromašine. Merenje srednje brzine obrtanja sa povišenom tačnošću može se obaviti upotrebom fotodavača i digitalnog hercmetra.

Pri ispitivanju mašina malih snaga u ustaljenom režimu rada upotrebljava se često integralni tahometar, koji ne vrši приметно opterećenje vratila ispitivane mašine, a obezbeđuje visoku tačnost merenja (klasa 0.1-0.5). Kvarcni tahometar koji može da bude još tačniji, sa induktivnom detekcijom i digitalnim pokazivačem. Najveća greška ovog tahometra je $\pm 1 \text{ }^{ob}/_{min}$. Upotrebljava se za brzine od 50 do 19990 ob/min, sa 5 cifara.

Brzina obrtanja motora u ustaljenom ili prelaznom režimu može se meriti pomoću tahometarskih generatora, od kojih se najviše koriste asinhroni i jednosmerni, u konstrukciji sa šupljim rotorom. Tahometarski generator je spojen sa ispitivanom mašinom i uključen na pribor za registrovanje $n=f(t)$ (osciloskop, oscilograf, pisač) ili voltmetar. Tačnost merenja brzine zavisi od tačnosti generatora i pribora za registrovanje odnosno merenje brzine.

2.7 Opis uređaja za ispitivanje malih snaga – system MAGTROL

2.7.1 Primena

Upotrebljava se za precizna merenja momenta i brzine obrtanja elektromotora, vazdušnih turbina, hidrauličkih motora i zupčastih reduktora. Moguće je ispitivanje u ustaljenim i prelaznim režimima, merenje momenta i brzine obrtanja, dobijanje mehaničke karakteristike (pomoću X-Y pisača) i merenje polaznog i maksimalnog momenta.

2.7.2 Opis uređaja

Uređaj predstavlja jednu vrstu elektrodinamometra koji meri momenat ispitivanog motora. Kočenje se obavlja u samom uređaju snagom histerezisnih gubitaka, a momenat opterećenja se reguliše pobudnom jednosmernom strujom pomoću potenciometra.

Na klasičnim konstrukcijama momenat se merio direktno na pokretnoj skali kočnice u ustaljenom radnom režimu. Savremene kočnice imaju analogne električne izlaze i za momenat i za brzinu obrtanja koji se mogu upotrebiti za očitavanje na digitalnim instrumentima koji pokazuju momenat, brzinu obrtanja i mehaničku snagu.

Konstrukcija dinamometra sa histerezisnim gubicima, zajedno sa regulatorom pobudne struje, odnosno momenta i uređaja za merenje snage, momenta i brzine opisani su u tehničkoj dokumentaciji kompanije MAGTROL. Taj merni sistem sadrži frekventni brojač za pretvaranje signala brzine i analogno-digitalni konvertor za momenat. Množenjem momenta i brzine dobija se mehanička snaga.

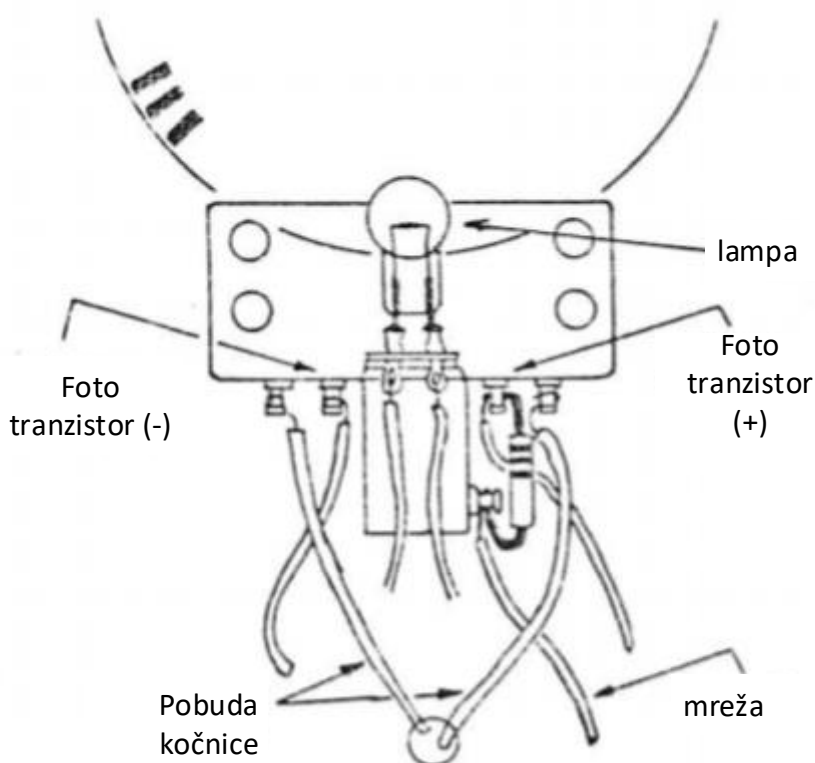
2.7.3 Merenje momenta

Nema četkica i kliznih prstenova kao kod rotorskog merenja momenta. Moment opterećenja zavisi samo od pobudne struje bez obzira na brzinu obrtanja, što nije slučaj kod kočnica sa vihornim strujama. Moment se meri na statoru kočnice pomoću mernih otpornih traha vezanih u Vitstonov most[87].

Na krajeve A i C priključeno je napajanje jednosmernim naponom od 7 V. Izlazni napon se dobija sa druge dijagonale (B, D), a njegova vrednost je oko 25 mV za punu skalu. Kao izlazni signal uzima se količnik izlaznog napona (u mV) i ulaznog napona (u V), a on je srazmeran merenom momentu. Otpor svake grane mosta je normiran na 350 Ω. Izlazni signal se pojačava i dovodi na digitalni voltmetar ili pisač. Klasa tačnosti pri merenju momenta je 0.25%, a opseg merenja kočnica od 40 kgcm do 200 kgcm.

2.7.4 Merenje brzine

Brzina se meri na principu presecanja svetlosnog zraka koji prodire kroz proreze na disku (Sl. 2.11) u kombinaciji sa fototranzistorom. Disk je od plastičnog materijala. Koriste se različiti diskovi sa 3, 5, 6, 30 i 60 proreza po obimu (obrtu).



Sl. 2.11 Princip merenja brzine obrtanja

Fotoćelija menja otpor u skladu sa modulacijom svetlosti koja pada na nju, a sa otporom se menja napon na njenim krajevima. Izlazni talas je približno pravougaonog oblika pri niskim, a postaje testerast pri visokim učestanostima. Gornja granica učestanosti je oko 150 kHz. Tačnost merene brzine je $\pm 1 \text{ ob}/\text{min}$. Brzina se čita na digitalnom instrumentu sa 5 cifara ili se dovodi na X-Y čitač.

2.7.5 Merenje polaznog momenta

Polazni momenat može da se meri direktno. Na spojnicu motora pričvrsti se jedna laka poluga od tvrdog drveta ili aluminijuma, pomoću dva metalna zavrtnja. Dužina poluge zavisi od snage motora, obično oko 30 cm odgovara za manje snage.

Postavljanje sprave za merenje na jednu ili drugu stranu zavisi od smera delovanja momenta (obrtanja). Poluga pri merenju treba da ostane približno horizontalna (ugao manji od $10-15^{\circ}$). Ako se meri tegovima treba uračunati i težinu tase.

Merenje se vrši pri punom naponu na krajevima motora što brže, jer se motor greje. Ako je motor sa komutatorom treba momenat izmeriti dva puta sa pomerajem rotora za jednu krišku komutatora. Merenje prikazano na sl.1 odnosi se na motor snage 10 W, 22 V, a njegov polazni momenat ima vrednost

$$M_k = mgl = 0.052 * 9.81 * 0.13 = 0.0663 Nm \quad (2.97)$$

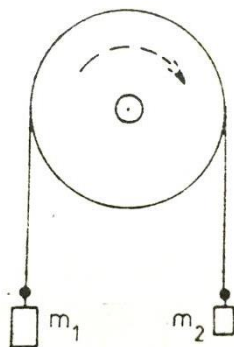
ili

$$M_k = 6.63 Ncm \quad (2.98)$$

Ako se koriste sistemi za merenje momenta TELDIX ili MAGTROL, polazni momenat motora meri se direktno pri ukočenom rotoru.

2.7.6 Prikaz realizovanih kočnica za opterećenje i merenje momenta [87]

Kočnice sa trakom su pogodne za male snage (bolje od frikcione). Preko jednog točka sa žlebovima prebaci se jedna ili više traka, odnosno užadi, tako da obuhvataju ugao od 180° , a na krajevima se obese tegovi masa m_1 i m_2 .



Sl. 2.12 Kočnica sa trakom i dva tega

Momenat opterećenja biće

$$M = (m_1 - m_2)gr \quad (2.99)$$

a odgovarajuća snaga

$$P = M\Omega = (m_1 - m_2)gl \frac{2\pi n}{60} \quad (2.100)$$

gde su

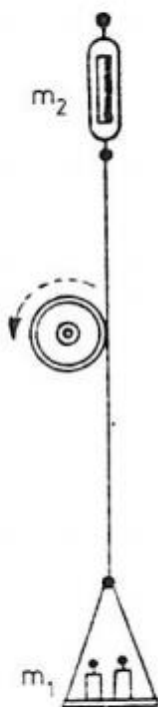
$g=9.81$

r - poluprečnik u m

n - brzina u ob/min.

Za snage iznad 180 W može se upotrebiti direktno merenje brzine pomoću tahometra prislonjenog na osovinu, a za manje snage preporučuje se stroboskopska ili impulsna metoda merenja.

Jedna varijanta metode sa trakom prikazana je na Sl. 2.13.



Sl. 2.13 Kočnice sa trakom i dinamometrom

Kočnica sa vihornim strujama (elektromagnetna kočnica) smatra se prototipom električnih kočnica. Metalni disk fiksiran za vratilo motora koji se ispituje, obrće se u polju jednog ili više elektromagneta. Ovi su pričvršćeni na jedan krak poluge koja se dovodi pri radu u ravnotežu i tako izmeri momenat opterećenja. Momenat opterećenja se reguliše pobudnom strujom elektromagneta. Protivteg služi za uravnoteženje u mirovanju. Momenat se računa klasičnim izrazom [87]

$$M = mgl \quad (2.101)$$

a snaga

$$P = M\Omega = mgl \frac{2\pi n}{60} \quad (2.102)$$

3 III DEO

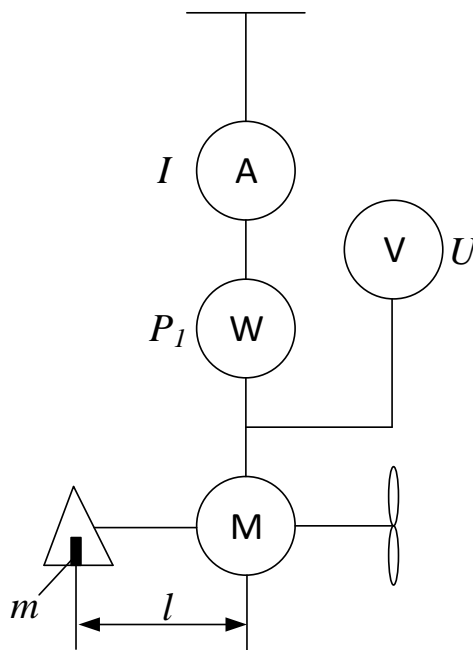
3.1 Metode merenja statorskog momenta malih elektromotora

3.1.1 Merenje pomoću poluge i tegova [87]

Primenjuje se na motore bilo koje vrste. Za opterećenje može da služi bilo koja kočnica: vazдушna, sa vihornim strujama, sa trakom, frikciona ili neka druga. Cilj ispitivanja je određivanje radnih karakteristika motora. Metoda je praktična, a konstrukcija relativno jednostavna i može se realizovati u laboratorijskoj radionici.

Pri napajanju jednosmernom strujom vatmetar je nepotreban. Brzina obrtanja se meri pomoću stroboskopskog tahometra. Na Sl. 3.1 je prikazana ventilatorska kočnica. Promena opterećenja se vrši upotrebom krilaca različitih veličina. Napon se pri ispitivanju održava na nominalnoj vrednosti pomoću autotransformatora ili potenciometra.

U slučaju trofaznih motora mere se, najbolje pomoću faznog ubacača, dve snage, dva međufazna napona i dve struje.



Sl. 3.1 Shema ispitivanja sa ventilatorskom kočnicom

Pri datom opterećenju izmere se sledeće veličine koje se mogu upisati u odgovarajuću tabelu:

U	I	P ₁	m	N
V	A	W	kg	ob/min

Obrtni moment jednak je:

$$M = mgl \text{ [Nm]} \quad (3.1)$$

m -[kg] $g=9.81$ l – [m] (ovde $l=0.5$ m)

ili $M = ml$ [kgm].

Korisna snaga je:

$$P = M\Omega = mgl \frac{2\pi n}{60} = 0.51mn \text{ [W]} \quad (3.2)$$

Ako je napajanje pomoću jednosmerne struje, utrošena snaga:

$$P_1 = UI \text{ [W]} \quad (3.3)$$

Stepen iskorišćenja motora je:

$$\eta = \frac{P}{P_1} 100[\%] \quad (3.4)$$

Ako je napajanje pomoću naizmjenične struje, sačinilac snage je:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} \quad (3.5)$$

gde je S utrošena prividna snaga:

$$S = UI \quad (3.6)$$

za jednofazni ili

$$S = \sqrt{3}UI \quad (3.7)$$

za trofazni motor. Konačno se formira sledeća tablica u koju se unesu i mereni i izračunati podaci:

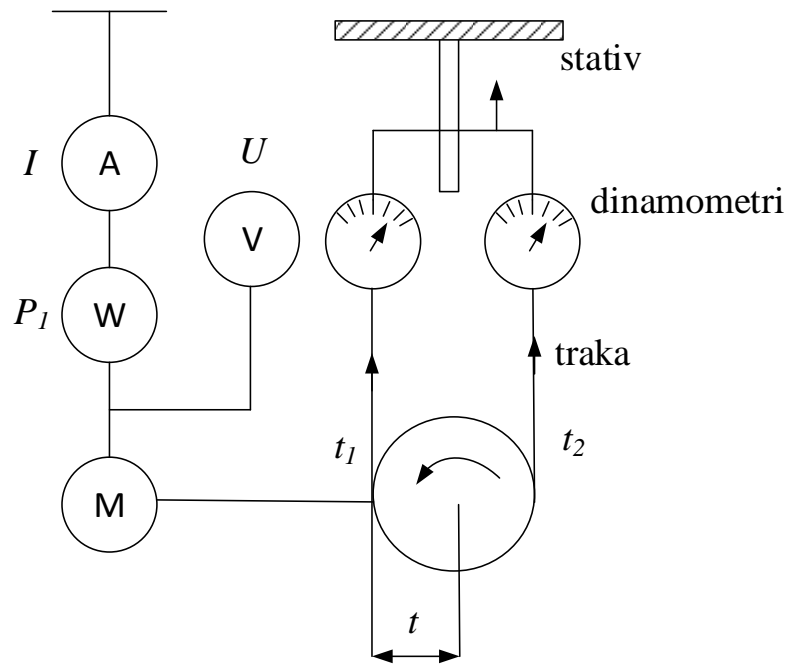
U	I	P_1	P	η	$\cos \varphi$	M	N
V	A	W	W	%	-	Nm	ob/min

a na osnovu nje nacrtaju se radne karakteristike motora u funkciji momenta, korisne snage ili struje.

3.1.2 Kočnica sa trakom i dva dinamometra

Primenjuje se za motore malih snaga, bez obzira na vrstu. Cilj ispitivanja je određivanje radnih karakteristika u ustaljenom režimu. Metoda je jednostavna, a konstrukcija se može izraditi u laboratorijskoj radionici. Potrebno je imati dva dovoljno precizna dinamometra do 1kg, frikcioni točak i stativ pomoću koga se može zatezanjem trake regulisati opterećenje motora. Treba voditi računa da ne dođe do mehaničkog opterećenja vratila i pogonskog ležišta na savijanje.

Promena opterećenja vrši se jačim ili slabijim zatezanjem trake. Kada rotor stoji $f_1=f_2$.



Sl. 3.2 Shema ispitivanja sa dva dinamometra

Pri obrtanju zaviso od smeru $f_1 < f_2$ ili $f_1 > f_2$, usled sile trenja frikcionog točka i trake. Brzina se meri pomoću stroboskopskog tahometra ili reduktora brzine, malog trenja.

Pri datom opterećenju izmere se sledeće veličine koje se upisuju u odgovarajuću tablicu:

U	I	P_1	P	η	$\cos \varphi$	M	n
V	A	W	W	%	-	Nm	ob/min

Obrtni momenat je:

$$M = (f_1 - f_2)gr \text{ [Nm]} \quad (3.8)$$

$$f_1 > f_2, f_1 \text{ [kg]}, f_2 \text{ [kg]} \quad g = 9.81, r \text{ [m]} \quad (3.9)$$

ili

$$M = (f_1 - f_2)r \text{ [kgm]} \quad (3.10)$$

Korisna snaga je:

$$P = M\Omega = M = (f_1 - f_2)gr \frac{2\pi n}{60} = 0.0257(f_1 - f_2)n \text{ [W]} \quad (3.11)$$

Utrošena snaga je:

$$P_1 = UI \quad \text{za jednosmernu struju}$$

$$P_1 = k_W \alpha \quad \text{za jednofazno napajanje}$$

$$P_1 = k_W (\alpha_1 + \alpha_2) \quad \text{za trofazno napajanje,}$$

pri čemu je k_W - konstanta vatmetra.
Sačinilac snage i stepen iskorišćenja biće:

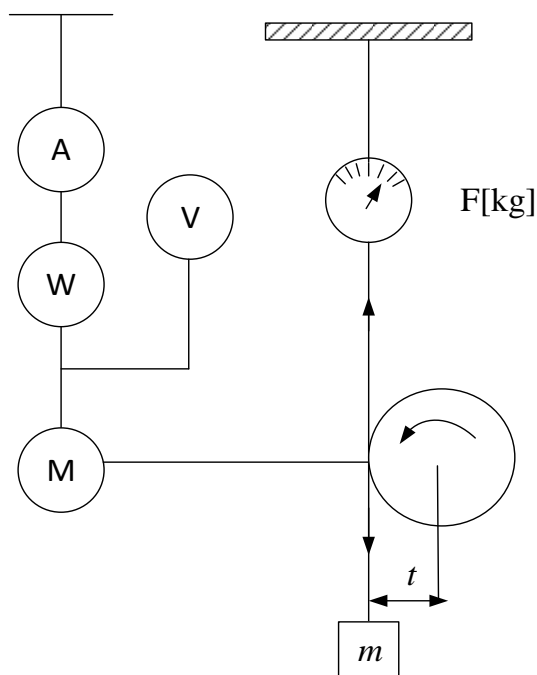
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S}, \quad \eta = \frac{P}{P_1} 100[\%] \quad (3.12)$$

Na kraju se formira tablica
i nacrtaju radne karakteristike u funkciji odabrane veličine (M, I ili P).

U	I	P_1	P	η	$\cos \varphi$	M	n
V	A	W	W	%	-	Nm	ob/min

3.1.3 Kočnica sa trakom, jednim dinamometrom i tegom

Ovo je varijanta prethodne metode koja se obično koristi za motore najmanjih snaga. Umesto dva, upotrebljava se jedan dinamometar u kombinaciji sa tegom relativno male mase, a umesto trake od kepera koristi se tanka pamučna traka ili uzica. Opterećenje se reguliše ili promenom mase tega ili promenom broja navojaka uzice oko frikcionog točka.



Sl. 3.3 Shema ispitivanja sa jednim dinamometrom i tegom

Ovde je obrtni momenat:

$$M = (f - m)gr \text{ [Nm]} \quad (3.13)$$

ili

$$M = (f - m)r \text{ [kgm]} \quad (3.14)$$

itd. ($r=2.5 \cdot 10^{-2}$ m). Rezultati ispitivanja se unose u tablicu:

U	I	P ₁	P	η	$\cos \varphi$	M	n
V	A	W	W	%	-	Nm	ob/min

na osnovu koje se nacrtaju radne karakteristike motora

3.1.4 Histerezisna kočnica (sistem MAGTROL)

Kočnica sa histerezisnim gubicima služi za ispitivanje motora malih snaga, a konstruisana je tako da se moment opterećenja koji se reguliše jednosmernom pobudnom strujom kočnice, može direktno meriti pomoću poluge, obrtne skale ili analognim putem preko njemu srazmernog jednosmernog napona. Ovaj poslednji način primenjen kod savremenih konstrukcija američke firme MAGTROL, pogodan je, jer se moment može čitati na digitalnom ili nekom drugom instrumentu, registrovati na pisaču ili uneti u računarski sistem pri merenju kako ustaljenih stanja, tako i prelaznih režima.

Sistem MAGTROL sadrži i impulsni merač brzine koji kao izlaznu veličinu daje napon koji se čita na digitalnom instrumentu, registruje na pisaču ili unosi u računar za obradu podataka.

Moment opterećenja histerezisne kočnice, isti kao i kod frikcione, nezavisan je od brzine obrtanja, dok je snaga srazmerna sa brzinom što pruža mogućnosti opterećenja ispitivanih motora i pri malim brzinama obrtanja, pa i merenja polaznih momenata.

Inače, postupak ispitivanja je isti kao kod ostalih prethodno opisanih kočnica, s tom razlikom što se moment direktno meri i što se pri analognom izlazu mogu snimiti opterećenja u prelaznim režimima.

Rezultati ispitivanja se unose u uobičajenu tablicu:

U	I	P ₁	P	η	$\cos \varphi$	M	n
V	A	W	W	%	-	Nm	ob/min

i na osnovu nje nacrtaju se radne karakteristike motora u funkciji odabrane veličine (M, I ili P).

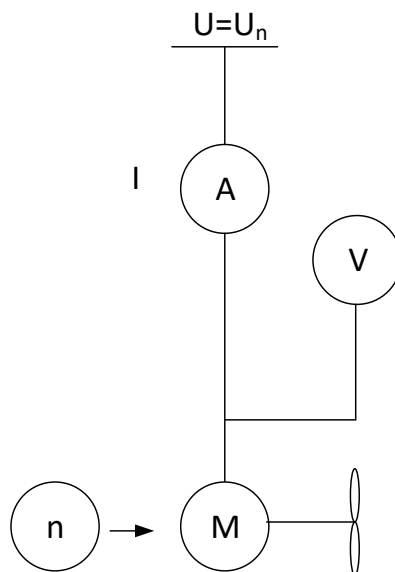
3.2 Metode odvojenih (pojedinačnih) gubitaka

Služe prvenstveno za određivanje stepena iskorišćenja električne mašine, motora i generatora, a mogu se upotrebiti sa dovoljnom tačnošću i za dobijanje radnih karakteristika ispitivanih mašina. Preporučuje se da se pored ispitivanja u praznom hodu, u cilju primene ovih metoda izvrši i ispitivanje pri opterećenju. Ove metode se koriste kada nije moguće meriti moment opterećenja motora po jednom od ranije opisanih postupaka. Princip ovih metoda se sastoji u merenju ili pretpostavljanju utrošene snage mašine, a po odbitku gubitaka se dobija korisna snaga i ostale veličine pri raznim opterećenjima.

3.2.1 Ispitivanje motora za jednosmernu struju po metodi odvojenih gubitaka

Mali motor za jednosmernu struju sa stalnim magnetima, priključen na konstantan nominalan napon, ispita se u praznom hodu i jednom opterećenju, nominalnom ili njemu bliskom. Za opterećenje je najbolje upotrebiti vazдушnu kočnicu odgovarajuće veličine. Pri ispitivanju treba meriti samo struju i brzinu obrtanja. Osim toga, potrebno je znati ili pretpostaviti pad napona na komutatoru, ΔU . Svi ostali podaci i karakteristike motora dobijaju se računskim putem. Može se preporučiti programiranje računskog postupka na računaru tako da se radne karakteristike motora od praznog hoda do kratkog spoja dobijaju u grafičkom obliku.

Data je shema ispitivanja:



Sl. 3.4 Shema veza za ispitivanje motora pri opterećenju po metodi odvojenih gubitaka

Za izvor jednosmernog napona služi akumulatorska baterija u kombinaciji sa potenciometrom ili regulacioni transformator sa ispravljačem.

Brzinu treba precizno meriti stroboskopskim ili nekim drugim impulsnim sistemom.

$\Delta U \approx const$, zavisi od vrste četkica, može se usvojiti ili odrediti merenjem otpora pri ukočenom rotoru. Ispitivanjem u praznom hodu dobije se I_0 i n_0 , a pri opterećenju I_1 i n_1 . Ako se otpor indukta meri pri ukočenom rotoru, dobijeni rezultati se prikazu na dijagramu i ekstrapolacijom do ordinate dobije se pad napona na komutatoru, ΔU . Elektromotorna sila u praznom hodu je:

$$E_0 = U - R_a I_0 - \Delta U \sim n_0 \quad (3.15)$$

a pri opterećenju:

$$E_1 = U - R_a I_1 - \Delta U \sim n_1 \quad (3.16)$$

Otpor indukta R_a se dobije iz odnosa:

$$\frac{U - R_a I_1 - \Delta U}{U - R_a I_0 - \Delta U} = \frac{n_1}{n_0} \quad (3.17)$$

Gubici usled obrtanja u praznom hodu su:

$$(P_{fe} + P_f)_0 = UI_0 - R_a I_0^2 - \Delta UI_0 \quad (3.18)$$

Ovi gubici neće ostati isti pri opterećenju, jer zavise od brzine obrtanja. Pretpostavićemo da je ta zavisnost linearna, mada to nije potpuno korektno. To se isto odnosi na uticaj reakcije indukta koji je donekle uračunat preko otpora indukta, R_a . Pretpostavljamo dalje opterećenje motora izraženo strujom I_2 . Gubici u bakru pri toj struji su $R_a I_2^2$. Brzina obrtanja pri tom opterećenju će biti srazmerna elektromotornoj sili:

$$E_2 = U - R_a I_2 - \Delta U \quad (3.19)$$

tj.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (3.20)$$

a gubici usled obrtanja srazmerni brzini n_2

$$P_{Fe} + P_f = (P_{fe} + P_f)_0 \frac{n_2}{n_1} \quad (3.21)$$

Dakle, ukupni gubici pri struji I_2 biće:

$$P_\gamma = P_{Fe} + P_f + R_a I_2^2 + \Delta UI_2 \quad (3.22)$$

Utrošena snaga je:

$$P_1 = UI_2 \quad (3.23)$$

a korisna snaga:

$$P = P_1 - P_\gamma \quad (3.24)$$

Stepen iskorišćenja biće:

$$\eta = \frac{P}{P_1} 100[\%] \quad (3.25)$$

a korisni momenat:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{60P}{2\pi n_2} \quad (3.26)$$

Račun se dalje ponavlja sa strujom I_3, I_4 , itd.

Polazna struja se može izmeriti pri ukočenom rotoru ili izračunati:

$$I_k = \frac{U - \Delta U}{R_a} \quad (3.27)$$

a polazni momenat odredi srazmerno toj struji:

$$M_k = M \frac{I_k}{I_2} \quad (3.28)$$

Rezultati ispitivanja i proračuna mogu se prikazati u obliku tablice:

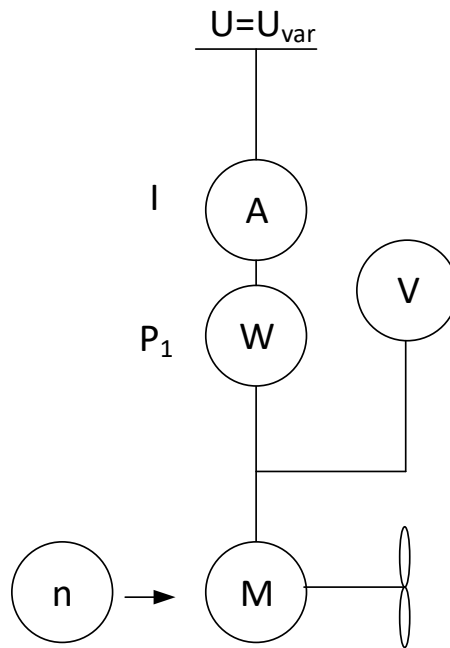
I	P_1	P	M	n	η
A	W	W	Nm	ob/min	%

na osnovu koje se nacrtaju karakteristike motora u funkciji I,M ili P.

3.2.2 Ispitivanje trofaznog asinhronog motora po metodi odvojenih gubitaka (pri opterećenju)

Po pravilu se asinhroni motori ispituju po metodi odvojenih gubitaka, u opterećenom stanju. Posebno se odrede gubici u praznom hodu, gubici u namotu statora se izračunaju iz $3RI^2$, a gubici u rotoru iz izmerenog klizanja i snage obrtnog polja.

Shema ispitivanja je data na slici Sl. 3.5.



Sl. 3.5 Shema veza za ispitivanje trofaznog asinhronog motora pri opterećenju po metodi odvojenih gubitaka

Napon napajanja se podešava pomoću trofaznog autotransformatora. Snaga se meri po Aronovoj sprezi pomoću faznog ubacača, kao i struje i međufazni naponi. Brzina se meri pomoću preciznog stroboskopskog tahometra ili ako su klizanja dovoljno mala (do 5%) po stroboskopskoj metodi.

Najpre se izvrši ispitivanje motora u praznom hodu pri raznim naponima od $1.3U_n$ do nižih vrednosti sve dok klizanje ne počne upadljivo da raste. Kao rezultat ovog ispitivanja dobiju se dijagrami struje i snage u zavisnosti od napona:

- Karakteristika struje praznog hoda na osnovu koje se izračuna njena relativna vrednost

$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} 100[\%] \quad (3.29)$$

i koeficijent zasićenja k_z prema kojima se stiče uvid o stepenu zasićenja magnetnog kola motora [87];

- Karakteristika gubitaka praznog hoda pomoću koje se dobijaju mehanički gubici (P_f) ekstrapolacijom krive gubitaka do ordinate i gubici u gvožđu statora pri nominalnom naponu (P_{Fe}). Na kraju oglada praznog hoda neophodno je izmeriti otpor po fazi statora R_0 na osnovu koga se dobijaju gubici usled obrtanja:

$$P_{Fe} + P_f = P_0 - 3R_0 I_0^2 \quad (3.30)$$

Potom se motor optereti nekom kočnicom. Za svako opterećenje mere se sledeće veličine, sve pri nominalnom naponu napajanja:

I_1	P_1	n	s
A	W	ob/min	-

Gubici pri datom opterećenju su:

$$P_\gamma = P_f + P_{Fe} + 3R_1 I_1^2 + P_{Cu2} \quad (3.31)$$

$P_f + P_{Fe}$ - određeni iz oglada praznog hoda;

$3R_1 I_1^2$ - izračunaju se iz izmerene struje I_1 i otpora po fazi statora zagrejanog namota koji se izmeri na kraju oglada opterećenja, najbolje po U/I metodi;

P_{Cu2} - su gubici u rotoru, a računaju se iz klizanja i elektromagnetne snage pri datom opterećenju:

$$P_{Cu2} = sP_{em} = s(P_1 - P_{Fe} - 3R_1 I_1^2) \quad (3.32)$$

Korisna snaga je dakle:

$$P = P_1 - P_\gamma \quad (3.33)$$

stepen iskorišćenja:

$$\eta = \frac{P}{P_1} 100[\%] \quad (3.34)$$

a korisni momenat:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{60P}{2\pi n} \quad (3.35)$$

Konačno, sačinilac snage je:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI} \quad (3.36)$$

Rezultati se unose u tablicu:

I_1	P_1	P	η	$\cos \varphi$	M	n	s
A	W	W	%	-	nm	ob/min	-

i prikazuju na dijagramu u funkciji I, M ili P. Ovo ispitivanje se vrši na motorima predviđenim za trajni pogon. Može se kombinovati i sa ispitivanjem zagrevanja motora u trajnom radu pri konstantnom opterećenju.

3.2.3 Ispitivanje trofaznog asinhronog motora po metodi odvojenih gubitaka (pomoću ekvivalentne šeme)

Ekvivalentno kolo trofaznog asinhronog motora može se upotrebiti ako su njeni parametri poznati, da se za dato klizanje, s , koje karakteriše opterećenje motora, izračunaju struje statora i rotora i pomoću njih gubici u bakru statora i rotora:

$$3R_1 I_1^2 \quad \text{i} \quad 3R_2 I_2^2$$

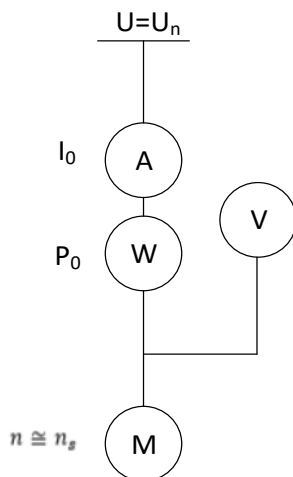
Pošto su gubici usled obrtanja, $P_f + P_{Fe}$, poznati iz ispitivanja u praznom hodu, imaju se dakle svi potrebni gubici pri datom, odnosno usvojenom klizanju, s [87].

Ispitivanje u praznom hodu vrši se na isti način kao u prethodnom slučaju, ali samo pri nominalnom naponu (Sl. 3.6). Pored gubitaka pri nominalnom naponu, potrebno je odrediti aktivnu i reaktivnu komponentu struje praznog hoda (I_0):

$$I_p = I_0 \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U} [A] \quad (3.37)$$

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_p^2} [A] \quad (3.38)$$

Kod malih motora $I_p \approx 0$, a $I_m \approx I_0$, pa je gornji račun skoro nepotreban.



Sl. 3.6 Shema veza za ispitivanje u praznom hodu

Ispitivanje u kratkom spoju se vrši pri ukočenom rotoru, prema Sl. 3.7. Napon motora se podese pomoću regulacionog transformatora na vrednost pri kojoj se ima nominalna struja statora. Impedansa motora je:

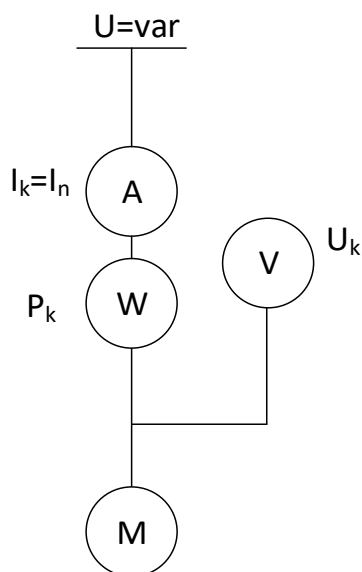
$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_k} [\Omega] \quad (3.39)$$

ekvivalentna otpornost:

$$R_k = \frac{P_k}{3I_k^2} = R_1 + R_2 [\Omega] \quad (3.40)$$

a ekvivalentna reaktansa:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} [\Omega] \quad (3.41)$$



Sl. 3.7 Shema veza za ispitivanje pri ukočenom rotoru

Pošto se posle oglada u kratkom spoju izmeri otpornost po fazi statora R_1 , otpornost rotora svedena na stator biće dakle:

$$R_2 = R_k - R_1 [\Omega] \quad (3.42)$$

Tako da su svi potrebni parametri ekvivalentne šeme određeni.

Proračun struja I_1 i I_2 pri klizanju s :

Aktivna komponenta struje rotora, tj. struje opterećenja motora je:

$$I_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U(R_1 + \frac{R_2}{s})}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + X_k^2} \quad (3.43)$$

a reaktivna komponenta:

$$I_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{UX_k}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + X_k^2} \quad (3.44)$$

aktivna komponenta struje statora biće : $I_p + I_A$

a njena reaktivna komponenta: $I_m + I_R$

Konačno se izračunaju struje statora i rotora:

$$I_1 = \sqrt{(I_p + I_A)^2 + (I_m + I_R)^2} [A] \quad (3.45)$$

$$I_2 = \sqrt{I_A^2 + I_R^2} [A] \quad (3.46)$$

Sačinilac snage je:

$$\cos \varphi = \frac{I_p + I_A}{I_1} \quad (3.47)$$

Utrošena snaga je:

$$P_1 = \sqrt{3}U(I_p + I_A) [W] \quad (3.48)$$

Ukupni gubici su:

$$P_\gamma = P_f + P_{Fe} + 3R_1 I_1^2 + 3R_2 I_2^2 [W] \quad (3.49)$$

Korisna snaga motora pri klizanju s je:

$$P = P_1 - P_\gamma [W] \quad (3.50)$$

Stepen iskorišćenja je:

$$\eta = \frac{P}{P_1} 100 [\%] \quad (3.51)$$

Brzina obrtanja je:

$$n = (1 - s)n_s \left[\frac{ob}{min} \right] \quad (3.52)$$

gde je n_s - sinhrona brzina obrtanja motora.

Korisni momenat je:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{60P}{2\pi n} [Nm] \quad (3.53)$$

Isti postupak se zatim ponavlja za druge vrednosti klizanja i tako dobije niz podataka koji se slože u tablicu:

I_1	P_1	P	η	$\cos \varphi$	M	n	S
A	W	W	%	-	nm	ob/min	-

a zatim prikažu u obliku dijagrama u funkciji struje I_1 , momenta M ili korisne snage P, po potrebi.

3.3 Određivanje polaznih karakteristika

Ova ispitivanja vrše se na elektromotorima namenjenim za kratkotrajni rad. Takvi motori služe za pogon mehanizama sa ograničenim kretanjem. Njihove radne karakteristike su nebitne, jer oni nikad ne rade u trajnom, ustaljenom režimu. Veoma su iskorišćeni u elektromagnetnom pogledu, tj. imaju jako veliku indukciju i gustinu struje, a glavna osobina im je što veći polazni momenat. Upotrebljavaju se u veoma kratkom, vremenski ograničenom radu, pri dužem uključanju jako se zagreju i pregorevaju, o čemu treba voditi računa prilikom ispitivanja. Najvažnija ispitivanja koja se vrše na njima su merenje polaznog momenta i struje uključanja.

3.3.1 Merenje polaznog momenta

Polazni momenat se meri direktno pri nominalnom naponu pomoću poluge i tega ili dinamometra. Napon se podesi na nominalnu vrednost pri otvorenom prekidaču i po uključanju prekidača brzo izmeri masa (m) kojom se uravnotežava poluga dužine (l) ili sila dinamometra. Pri tim uslovima polazni momenat je:

$$M_k = mgl [Nm] \quad (3.54)$$

ili

$$M_k = ml [kgm] \quad (3.55)$$

3.3.2 Merenje polazne struje

Trajna struja kratkog spoja (I_k) pročita se pri merenju na ampermetru. Ako se želi da se registruje udarna struja uključanja motora, upotrebljava se šant i osciloskop ili pisač sa memorijom.

Zbog nesimetrije, kod malih motora polazni momenat i struja zavise od ugaonog položaja rotora, pa se preporučuje više uzastopnih merenja pri raznim položajima koja treba vršiti u dovoljnim vremenskim intervalima da bi se motor mogao ohladiti na temperaturu okoline. Poznato je da polazni

momenat zavisi od temperature motora i veći je pri višoj temperaturi. Pored merenja pri nominalnom naponu preporučuje se merenje pri drugim vrednostima napona, npr. 0.5 i 0.75 U_n .

4 IV deo

4.1 Opis predložene metode

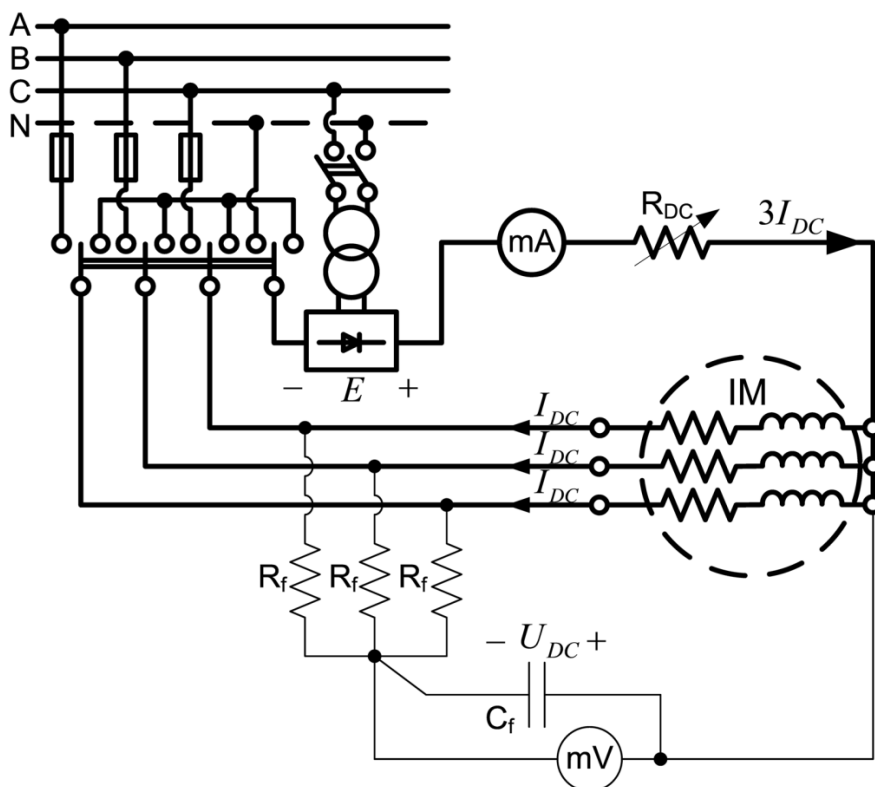
Biće predstavljena nova metoda za kontinualno merenje temperature statorskog namotaja asinhronne mašine[88]. Metoda se zasniva na merenju otpornosti namotaja statora tako što se jednosmerna struja test signala injektira u zvezdište motora bez prekida njegovog rada. Ceo namotaj statora se koristi kao senzor bez dodatnih termičkih senzora pri čemu je potrebno meriti samo jednosmerni napon i struju. U svakoj fazi se injektiraju gotovo jednake struje čime se gotovo eliminiše uticaj obrtnog momenta koji je inherentan savremenim metodama baziranim na injektiranju signala. Rezultati merenja dobijeni korišćenjem predložene metode upoređuju se sa rezultatima dobijenim korišćenjem standardne metode zasnovane na otpornosti i direktnim merenjima dobijenih pomoću termodavača ugrađenih u namotaje. Metoda daje odlične rezultate pri različitim nivoima opterećenja i promenjivim uslovima hlađenja čime se dokazuje tačnost i robusnost predloženog metoda.

Metode opisane u dosadašnjoj literaturi ne pružaju rešenje za precizno praćenje temperature namotaja statora kod asinhronih motora male i srednje snage bez ometanja normalnog rada mašine. U ovom radu predložena je nova metoda za kontinualno merenje temperature asinhronog motora bez prekida normalnog rada. Metoda se zasniva na merenju otpornosti namotaja i ne zahteva postavljanje senzora temperature u namotaje. Jednosmerni test signal se injektira u namotaje statora tako da ne izaziva nikakve negativne efekte na obrtni moment motora. Odlične performanse se postižu u različitim uslovima rada i uslovima hlađenja. Štaviše, metoda je pogodna prema važećim standardima koji podrazumevaju upotrebu metode otpornosti za mašine nominalne snage ispod 200 kW [24].

Predložena metoda se zasniva na merenju otpornosti statora bez prekida rada mašine. Ekvivalentni prikaz mernog sistema dat je na Sl. 4.1. Mala DC struja se injektira u zvezdište motora. Ovo se može postići povezivanjem jednosmernog napona između zvezdišta i neutralne tačke napajanja. Da bi se ograničili neželjeni tripli harmonici i nulta komponenta naizmenične struje, stvara se izvor jednosmerne struje, dodavanjem velikog otpora na red sa izvorom napona čime se obezbeđuje konstantna DC struja. Da bi se omogućilo injektiranje struje u intervalima kada motor nije priključen na napajanje, krajevi motora moraju biti kratkospojeni nakon isključivanja iz napajanja. Komponenta DC napona namotaja se meri između zvezdišta mašine i veštačkog zvezdišta, stvorenog povezivanjem tri jednaka otpornika na krajeve mašine. Dodaje se kondenzator između veštačke neutralne tačke i neutralne tačke mašine kako bi se filtrirali tripli harmonici i nulta komponenta naizmeničnog napona. Ovakva veza RC filtra olakšava filtriranje u odnosu na vezivanje RC filtra u jednoj fazi, jer: 1. Amplituda tripli harmonika i nultih komponenti znatno je niža u odnosu na osnovni harmonik i 2. Trostruki harmonici se lakše filtriraju od harmonika prvog reda zbog njihove veće frekvencije. Nakon merenja jednosmerne komponente napona i struje, vrednost otpora namotaja se jednostavno izračunava prema sledećoj formuli:

$$R_1 = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}, \quad (4.1)$$

gde je R_1 ekvivalentni otpor statora po fazi. U [25] je pokazano da jednosmerna impedansa asinhronog motora za nulti redosled zaista iznosi R_1 , kako je navedeno u (1).



Sl. 4.1 Shema veza predložene metode

Da bi se postiglo precizno merenje, vrednost jednosmerne struje treba izabrati tako da se obezbedi dovoljan pad napona, ali istovremeno ne bi trebalo uzrokovati značajno povećanje temperature namotaja. U dodatku A detaljno su ispitani termički efekti injektirane DC struje. Kada se dobije vrednost otpora na nepoznatoj temperaturi, porast temperature se izračunava kao u [24]:

$$\theta_h = \vartheta_h - \vartheta_a = \frac{R_1(\vartheta_h)}{R_1(\vartheta_c)} \cdot (k + \vartheta_c) - k - \vartheta_a, \quad (4.2)$$

gde su ϑ_c i $R_1(\vartheta_c)$ vrednosti temperature i otpornosti u hladnom stanju, ϑ_h i $R_1(\vartheta_h)$ su vrednosti temperature i otpornosti u zagrejanom stanju, θ_h je odgovarajući porast temperature u zagrejanom stanju, ϑ_a je temperatura ambijenta, a K je konstanta koja zavisi od materijala provodnika ($K=235$ za bakar). Otpornost hladnog stanja se meri kada je motor isključen sa napajanja tokom dugog vremenskog perioda, tako da su njegovi namotaji tada na poznatoj temperaturi ϑ_c koja je jednaka temperaturi okoline u trenutku merenja. Otpornost u zagrejanom stanju se meri tokom rada motora.

Osnovna pretpostavka u prethodnim razmatranjima je bila da su otpornosti namotaja međusobno jednake. Iako je to uopšten slučaj, može doći do izvesnog odstupanja između otpornosti faznih namotaja. Detaljno ispitivanje sistematske greške izazvane ovim odstupanjem dato je u dodatku C.

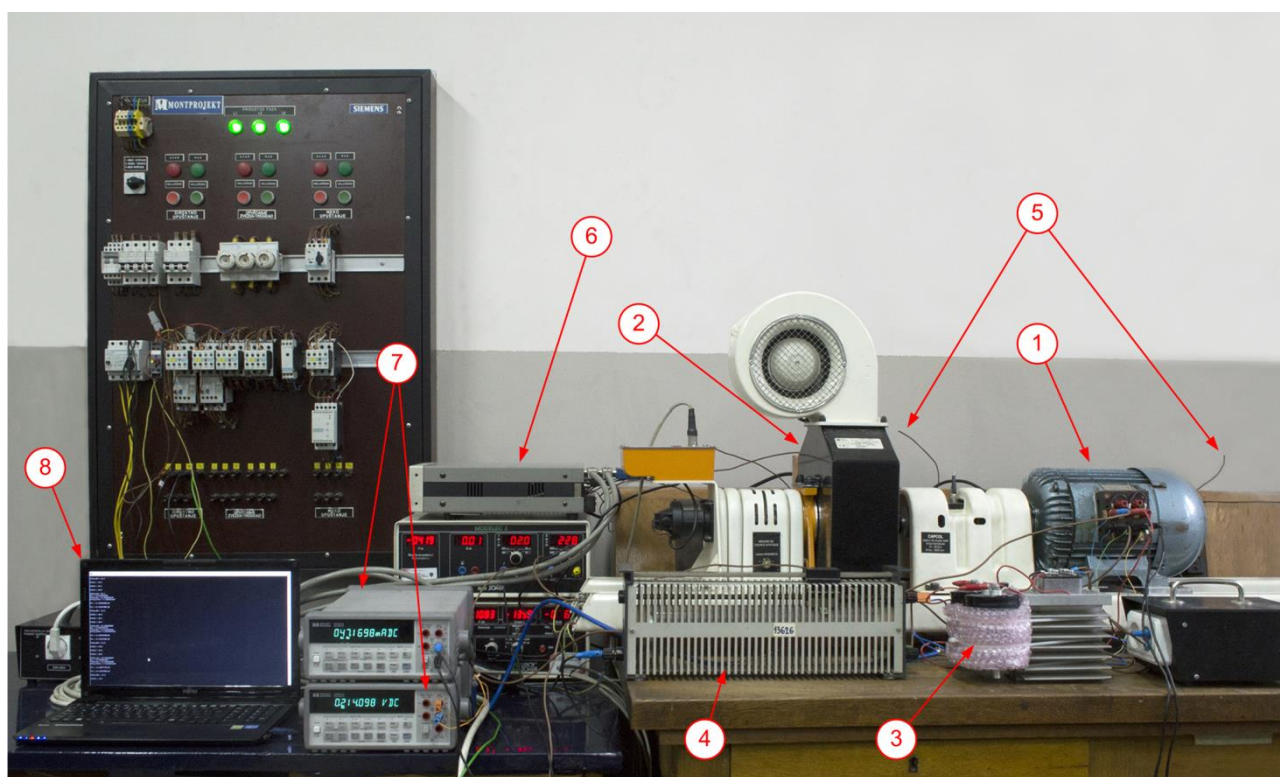
Uobičajena je pretpostavka da nulte komponente struje ne doprinose stvaranju obrtnog momenta u asinhronim mašinama [25]. Međutim, prema rezultatima datim u [26], određeni kočioni moment će se generisati u kavezu asinhronog motora kada se uzajamno jednake jednosmerne struje injektiraju u fazne

namotaje. Autori su pokazali da je ovaj momenat kočnja nizak pri brzinama bliskim sinhronoj, čak i kada su te struje jednake nominalnoj. Kao što je već navedeno, injektirana DC struja će biti vrlo niska u odnosu na nominalnu struju motora, tako da kočioni momenat može biti praktično zanemaren.

U nekim ranijim istraživanjima u vezi sa merenjem temperature korišćenjem injektiranja DC signala u namotaje mašine pokazano je prisustvo značajnog pulsacionog momenta [17, 19, 27]. Uzrok tome je činjenica da su DC struje injektirane na takav način da je to rezultiralo generisanjem osnovnog prostornog harmonika magnetopobudne sile/fluksa u međugvožđu mašine. Prednost predloženog načina je to što pretpostavlja injektiranje jednakih struja u svakoj fazi, čime se ne formira osnovni prostorni harmonik mps, pa stoga neće biti generisan pulsacioni moment. Ovo će biti detaljnije objašnjeno u dodatku D.

4.2 Eksperimentalni rezultati

Fotografija laboratorijske postavke sistema za nadgledanje temperature data je na Sl. 4.2. Ispitivani motor je 400 V, 2.2 kW, četvoropolni asinhroni motor sa kaveznim rotorom zatvorene konstrukcije sa forsiranim vazдушnim hlađenjem (TEFC – *Totally Enclosed Fan Cooled*). Mehaničko opterećenje se ostvaruje pomoću kočnice sa magnetnim prahom. Izvor jednosmerne struje sastoji se od jednofaznog diodnog mosta sa kojim je na red povezan otpornik otpornosti 1 k Ω . Merenje DC struje i napona vrši se pomoću dva digitalna multimera visoke klase tačnosti. Unutrašnji otpor multimera za merenje DC napona je dovoljno visok (1 G Ω) da se može pretpostaviti da ne unosi grešku u merenje napona.



Sl. 4.2 Eksperimentalna postavka: 1 – asinhroni motor; 2 – kočnica sa magnetnim prahom; 3, 4 – ispravljač i redni otpornik koji čine izvor jednosmerne struje; 5 – termoparovi za merenje temperature ambijenta; 6 – SR630 Thermocouple Monitor; 7 – HP 34401A multimetri; 8 – PC računar sa softverom za prikupljanje mernih podataka

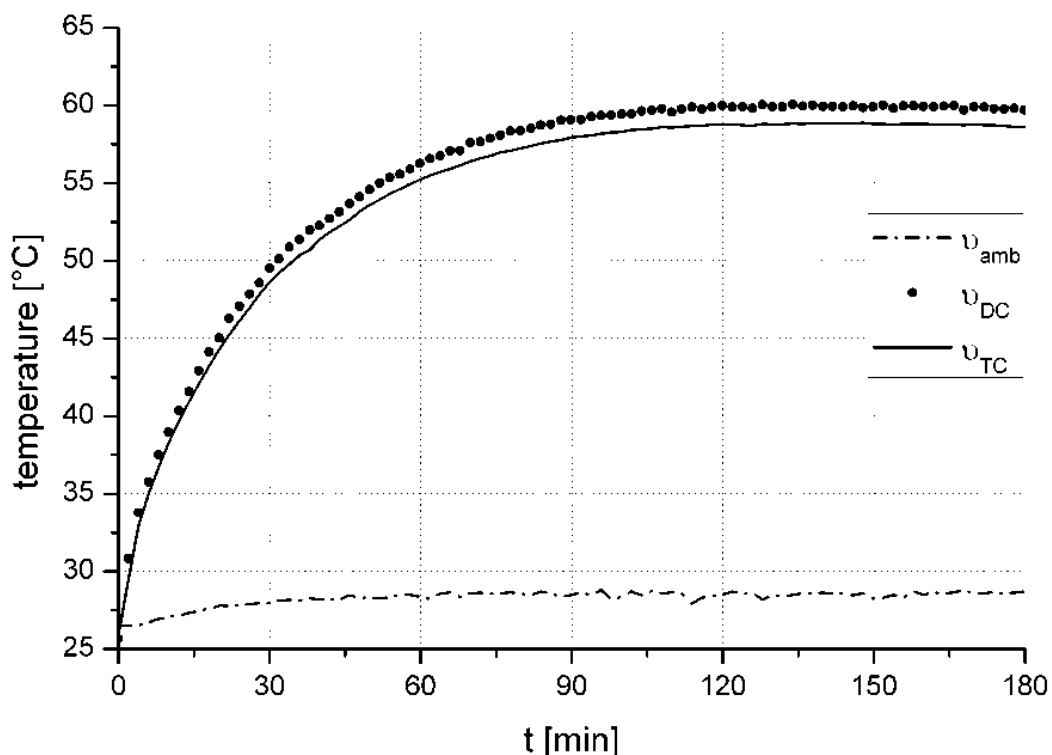
Tabela 4.1

Vrednosti temperature u ustaljenom stanju dobijene primenom predložene metode i metode sa ugrađenim termodavačima

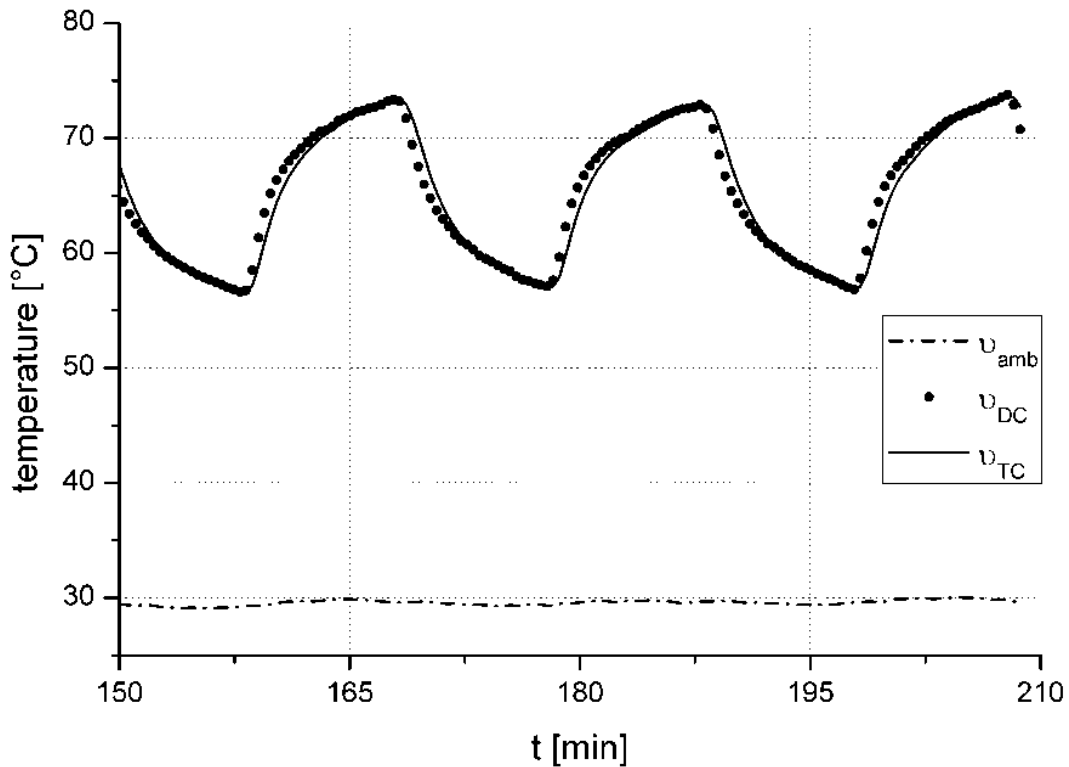
Opterećenje [%]	ETD metoda [°C]	predložena metoda [°C]
90	61.8	64.2
65	29.8	31.0
45	15.4	16.0
20	8.9	9.2

Parametri RC filtra su tako podešeni da vremenska konstanta filtra iznosi 50 ms. Zaostajanje u merenju napona je zanemarljivo ako se uzme u obzir da će najbrži termički tranzijenti imati vremensku konstantu reda nekoliko minuta [11]. Merenje temperature se obavlja pomoću tri termopara T tipa (Cu-Cu+Ni) koji su smešteni u namotajima mašine, dva u bočnim vezama, a treći u žlebu. Pokazano je u [28] da takvo pozicioniranje senzora daje dobru procenu prosečne temperature namotaja. Svrha ovakvog direktnog merenja je samo da se potvrdi tačnost predložene metode. Tri termopara T tipa su raspoređeni oko mašine za potrebe merenja temperature ambijenta. Svi termoparovi su povezani na 16-kanalni SR630 Thermocouple Monitor. Monitor i multimeri su međusobno povezani pomoću IEEE-488 porta, a povezivanje na računar se vrši preko IEEE-488/USB adaptera. Komunikacija između računara i instrumenata je ostvarena uz pomoć programa razvijenog u Python okruženju.

Predloženi metod je testiran pri konstantnom opterećenju i intermitentnom radu. Takođe, tačnost ove metode je testirana pri promenljivim uslovima hlađenja. Rezultati dobijeni korišćenjem predložene



Sl. 4.3 Vrednosti temperature izmerene primenom predložene metode i ETD metode pri konstantnom opterećenju u konstantnim uslovima hlađenja

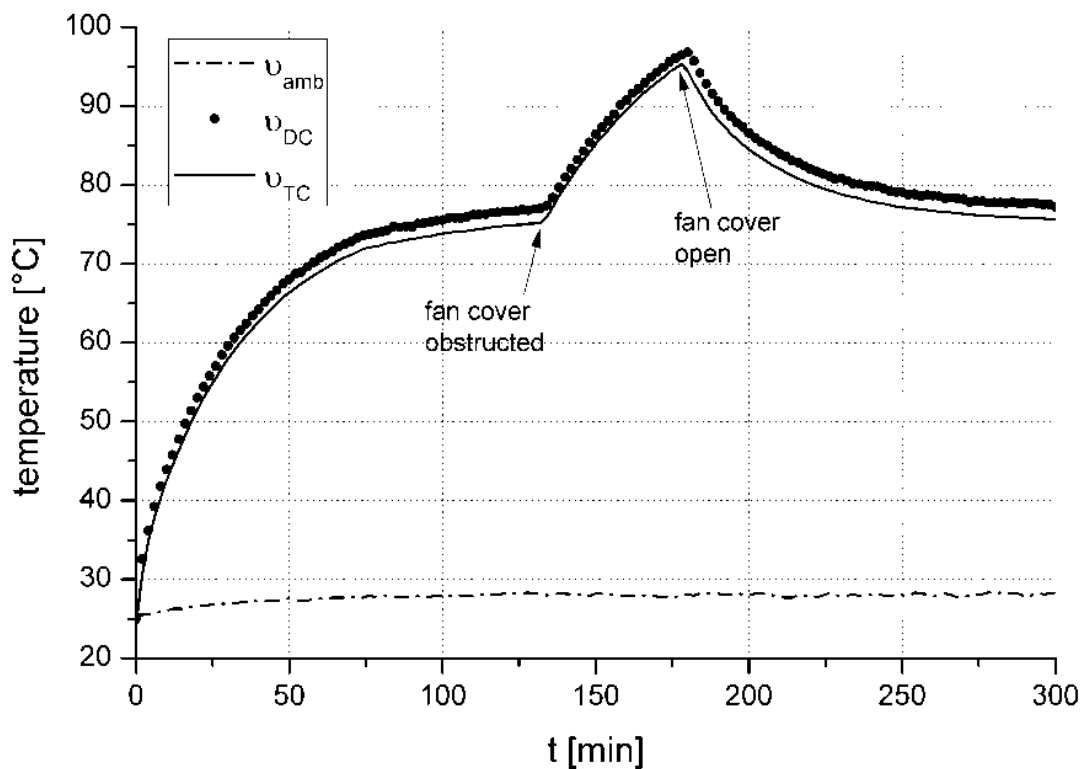


Sl. 4.4 Vrednosti temperature izmerene primenom predložene metode i ETD metode u intermitentnom režimu

metode potvrđeni su upoređivanjem sa merenjima dobijenim pomoću standardne metode i metode ugrađenog davača temperature (ETD – Embedded Temperature Detector)[24].

Sl. 4.3 prikazuje rezultate dobijene pri trajnom radu i opterećenju od 90% nominalnog opterećenja. Indeksi TC označavaju prosečno očitavanje termoparova, dok indeks DC označava srednju temperaturu dobijenu pomoću predloženog metoda. Vrednosti porasta temperature u ustaljenom stanju, dobijene korišćenjem predložene metode i vrednosti dobijene očitavanjem termoparova pod različitim opterećenjima su prikazani u Tabeli 4.1, gde se može uočiti veoma dobro podudaranje u svim slučajevima. Takođe se može primetiti da se odstupanje u Tabeli 1 povećava pri povećanju opterećenja mašine. Ovo se dešava iz razloga što termoparovi nisu idealno postavljeni na krajevima namotaja da bi se izmerila maksimalna temperatura. Drugi razlog za blago nepoklapanje rezultata je to što se prosečna temperatura dobijena pomoću ugrađenog temperaturnog davača izračunava kao prosta aritmetička sredina očitavanja termoparova, bez uzimanja u obzir dužine namotaja u žlebovima i u bočnim vezama. Merenja dobijena standardnom metodom odstupaju za maksimalno 0.5°C od merenja predloženom metodom u svim slučajevima, pa zato nisu prikazana u tabeli. Takvo poklapanje je i očekivano, s obzirom na to da su oba pristupa bazirana na određivanju srednje temperature namotaja na osnovu merenja otpornosti.

Na Sl. 4.4 su prikazani rezultati pri intermitentnom radu, pri čemu je u jednom ciklusu rada motor opterećen tokom 10 minuta, a tokom drugih 10 minuta je isključen sa napajanja i zaustavljen. Za razliku od trajnog rada, uslovi hlađenja su promenljivi, jer nema prinudne ventilacije tokom mirovanja motora. Razlika između dva očitavanja nikada ne prelazi $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Očigledno je da predložena metoda i dalje daje



Sl. 4.5 Vrednosti temperature izmerene primenom predložene metode i ETD metode pri konstantnom opterećenju i promenljivim uslovima hlađenja

tačne procene temperature, čak i tokom mirovanja mašine, iz razloga što se injektiranje signala vrši čak i kada je motor isključen sa mreže, kao što je ranije navedeno.

Rezultati dobijeni pri promenljivim uslovima hlađenja su prikazani na Sl. 4.5. U ovom slučaju motor radi pod stalnim opterećenjem, posle čega je poklopac ventilatora zatvoren parčetom kartona. Uslovi hlađenja su pogoršani u intervalu od $t=130$ do $t=180$ minuta, kao što je prikazano na slici. Na kraju ovog intervala, normalni uslovi hlađenja su ponovo uspostavljeni, i motor nastavlja da radi u normalnom režimu. Tokom celog testa, obrtni moment je konstantan i iznosi 80% nominalnog obrtnog momenta. Predložena metoda ponovo daje dobre procene temperature namotaja pri pogoršanim uslovima hlađenja, uz razlike ne veće od 3°C u odnosu na srednju temperaturu ugrađenih termodavača.

Još jednom treba naglasiti da srednja temperatura dobijena metodom ugrađenih termodavača nije sasvim jednaka stvarnoj prosečnoj temperaturi namotaja. Ovo objašnjava blagu neusklađenost između rezultata predložene metode i ETD metode u svim prikazanim slučajevima, jer je predložena metoda zasnovana na otpornosti i stoga pruža tačniju procenu srednje temperature namotaja. Čak, iako bi termički senzori bili idealno postavljeni, i iako bi dužine namotaja u žlebovima i bočnim vezama bile uzete u obzir, i dalje bi postojalo određeno odstupanje pri promenljivim uslovima hlađenja zbog promenljive raspodele temperature duž namotaja. Kao što se može uočiti sa Sl. 4.4, razlika u temperaturama pri merenjima u gore pomenutim metodama menja znak kada je motor isključen sa mreže i miruje. Ovo se može pripisati promeni raspodele temperature duž namotaja tokom procesa hlađenja. Slično tome, na slici 5 se može uočiti smanjenje razlike između temperature dobijene pomoću dve metode tokom intervala sa pogoršanim uslovima hlađenja. Može se pretpostaviti da je raspodela

temperature pri pogoršanim uslovima hlađenja takva da srednja vrednost očitavanja temperaturnog detektora tačnije odražava stvarnu srednju temperaturu namotaja u odnosu na slučaj sa normalnim uslovima hlađenja.

U cilju ispitivanja praktične primenljivosti predložene metode, potrebna je analiza merne nesigurnosti predložene metode i metode sa ugrađenim termodavačima. Ova analiza je izložena u Dodatku B.

4.3 Diskusija i zaključci

Standardne procedure, odnosno metode za merenje porasta temperature namotaja električnih mašina, a posebno asinhronih mašina koje se napajaju iz električnih distributivnih mreža zasnovane su na merenju srednje temperature koja se određuje na osnovu izmerene otpornosti namotaja kada je mašina isključena sa mreže. Ovaj nedostatak se može prevazići projektovanjem novih postupaka koji omogućavaju kontinualno merenje otpornosti namotaja bez potrebe za prekidom rada, odnosno isključenjem mašine sa mreže.

U ovoj doktorskoj tezi je predstavljena nova metoda za kontinualno merenje temperature statorskog namotaja asinhronih mašina. Metoda se zasniva na merenju otpornosti namotaja statora tako što se jednosmerni test signal struje injektira u zvezdište motora bez prekida njegovog rada. Na taj način se ceo namotaj statora koristi kao otpornički senzor (bez dodatnih termičkih senzora), pri čemu je potrebno meriti samo jednosmernu komponentu napona i struje motora. Kada se uporede karakteristike nove metode u odnosu na neke postupke predložene u literaturi, može se zaključiti sledeće. U odnosu na grupu postupaka koji su zasnovani na injektiranju, prednost predložene metode je u tome što je uticaj jednosmerne komponente struje na obrtni moment motora minimizovan samim postupkom injektiranja jednosmernog test signala u sve tri faze.

U cilju verifikacije primenljivosti predložene metode izvršeni su eksperimenti pri različitim radnim režimima i promenljivim uslovima hlađenja. Eksperimenti su pokazali da je dobijena srednja vrednost temperature namotaja u poređenju sa konvencionalnim metoda i ugrađenim detektorima lokalnih temperatura u granicama merne nesigurnosti.

Koristeći prednosti nove metode praktično je realizovana generalizovana metoda za ispitivanje karakteristika mašina bez ugradnje dodatnih davača za merenje temperature. Time su stvoreni uslovi da se na jednostavan način izvrši generalizacija metode i za prelazna stanja.

Buduća istraživanja na ovom polju biće usmerena ka korišćenju izmerene srednje vrednosti temperature namotaja statora (dobijene primenom ovde razrađene metode) na razvoj robusne metode za procenu temperature rotora i drugih delova motora u slučajevima promene opterećenja i uslovima hlađenja. Ovi rezultati bi mogli biti iskorišćeni u svrhu realizacije poboljšane termičke zaštite, jer se bi se

robusnost u određivanju temperatura kritičnih mesta značajno povećala u odnosu na dosadašnje postupke koji nisu uvažavali promene uslova hlađenja ili su zahtevali ugradnju dodatnih senzora.

4.4 Prilog A

Da bi se utvrdilo da korišćena metoda nema značajnog uticaja na temperaturu namotaja, treba proučiti toplotni uticaj superponirane DC struje. Trenutna vrednost DC je podešena na $3I_{DC} \approx 100$ mA u svim slučajevima, tj. $I_{DC} \approx 33$ mA (po fazi). Odnos ukupnih gubitaka namotaja statora izazvanih DC strujom i gubitaka pri nominalnoj struji jednak je:

$$\frac{P_{Cu,DC}}{P_{Cu,n}} \approx \frac{I_{DC}^2}{I_n^2} = 0.0002. \quad (4.3)$$

S obzirom na to da su gubici izazvani DC strujom oko 0.02% gubitaka pri nominalnoj struji, čini se opravdanim zanemarivanje dodatnog povećanja temperature uzrokovane injektiranjem DC struje.

Međutim, statičko polje proizvedeno DC strujama statora namotaja indukuje struje u kavezu rotora i izaziva određene gubitke u magnetnom kolu rotora. Prema tome, prethodna pojednostavljena analiza može biti donekle optimistična, tako da je potrebno eksperimentalno ispitati termičke efekte injektirane DC struje. U tom cilju, mašina koja se testira je isključena sa napajanja, pri čemu su samo injektirane DC struje prisutne u namotajima. Kako bi uslovi hlađenja i ukupni gubici uzrokovani injektiranjem DC struje bili isti kao i pri normalnim radnim uslovima, neophodno je da se mašina obrće brzinom koja je bliska nominalnoj. Kako bi se to postiglo, druga mašina sa istim brojem polova mehanički je spojena sa mašinom koja se testira i priključena na mrežni napon. Na taj način ostaju samo gubici izazvani injektiranom DC strujom i gubici usled trenja i ventilacije. Gubici usled trenja i ventilacije se mogu zanemariti u pogledu njihovog termičkog efekta na namotaj statora. Korišćenjem motora pri nominalnom broju obrtaja na propisani način, sa injektiranom strujom koja je podešena na $3I_{DC} = 100$ mA, porast temperature nakon tri sata (dovoljno da se postigne ustaljeno termičko stanje pri normalnim uslovima hlađenja), dostigne $1,3$ °C, što je zanemarljivo sa praktične tačke gledišta. Ovaj efekat se može dodatno smanjiti injektiranjem DC struje samo u diskretnim trenucima.

4.5 Prilog B

Nesigurnost ETD metode zavisi od pojedinačnih nesigurnosti termodavača i SR630 Thermocouple Reader-a. Kada se koriste termoparovi tipa T, nesigurnost instrumenta je jednaka $u_{instr} = 0.5$ °C, dok je standardna nesigurnost termopara tipa T jednaka $u_{TC} = 0.8$ °C [29]. Neizvesnost ETD metode onda iznosi:

$$u_{ETD} = u_{instr} + u_{TC} = 1.3$$
 °C (4.4)

Tabela 4.2 Merne nesigurnosti pojedinačnih merenja i kombinovana merna nesigurnost predložene metode

X	value	range	$ \partial\theta_h/\partial x $	u_x	u_{DC}
θ_c	25.9°C	/	1.273	1.3°C	1.7°C
R_{1c}	12.74 Ω	100 Ω	26.07°C/ Ω	5 m Ω	
R_{1h}	16.22 Ω^*	100 Ω	20.48°C/ Ω	7 m Ω	

*maksimalna izmerena vrednost

Kao što se vidi iz (2), srednja temperatura namotaja θ_h dobijena primenom predložene metode je indirektno izmerena veličina koja zavisi od nekoliko direktno ili indirektno izmerenih veličina: temperature hladnog stanja θ_c , otpornosti hladnog stanja $R_{1c} \equiv R_1(\theta_c)$ i otpornosti za vruće stanje $R_{1h} \equiv R_1(\theta_h)$. Kombinovana neizvesnost merenja predloženog postupka dobijena je kao [30]:

$$u_{DC} = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathcal{G}_h}{\partial \mathcal{G}_c} u_{\mathcal{G}_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{G}_h}{\partial R_{1c}} u_{R_{1c}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{G}_h}{\partial R_{1h}} u_{R_{1h}}\right)^2}, \quad (4.5)$$

gde su u_{θ_c} , $u_{R_{1c}}$ i $u_{R_{1h}}$ nesigurnosti odgovarajućih merenja, i:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}_h}{\partial \mathcal{G}_c} &= \frac{R_{1h}}{R_{1c}} \\ \frac{\partial \mathcal{G}_h}{\partial R_{1c}} &= -\frac{R_{1h}}{R_{1c}^2} (235 + \mathcal{G}_c) \\ \frac{\partial \mathcal{G}_h}{\partial R_{1h}} &= \frac{1}{R_{1c}} (235 + \mathcal{G}_c) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Temperatura namotaja hladnog stanja se dobija metodom ETD. Zbog toga je odgovarajuća merna nesigurnost jednaka $u_{\theta_c} = u_{ETD} = 1.3^\circ\text{C}$.

Otpornost u hladnom stanju se meri pomoću HP 34401A multimera u ommetarskom modu. Nesigurnost merenja otpornosti za hladno stanje se zatim izračunava prema [31] za izabrani opseg i izmerenu vrednost i data je u tabeli 4.2.

Otpornost toplog namotaja se računa prema (1). Vrednosti DC napona i struje se mere koristeći dva identična multimetra HP 34401A. Prema [31], nesigurnosti merenja napona i struje za izabrane opsege (1 V, 100 mA) i maksimalne zabeležene vrednosti (0,6 V, 100 mA) su jednake $u_U = 25\mu\text{V}$ and $u_I = 35\mu\text{A}$, respektivno. Nesigurnost merenja otpornosti u toplom stanju data je kao kombinovana nesigurnost ova dva merenja:

$$u_{R_{1h}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{1h}}{\partial U_{DC}} u_U\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{1h}}{\partial I_{DC}} u_I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{DC}} u_U\right)^2 + \left(\frac{-U_{DC}}{I_{DC}^2} u_I\right)^2} \approx 7\text{ m}\Omega \quad (4.7)$$

Nesigurnost predložene metode izračunava se iz (5) i prikazana je u Tabeli 2. Rezultati iz Tabele 2 jasno ukazuju na to da najveći uticaj na neizvesnost predložene metode ima najveća neizvesnost temperature hladnog stanja. Stoga, u_{DC} se može dodatno smanjiti poboljšanjem tačnosti ovog merenja.

Konačno, važno je napomenuti da izračunata neizvesnost važi i za merenja dobijena primenom standardne metode.

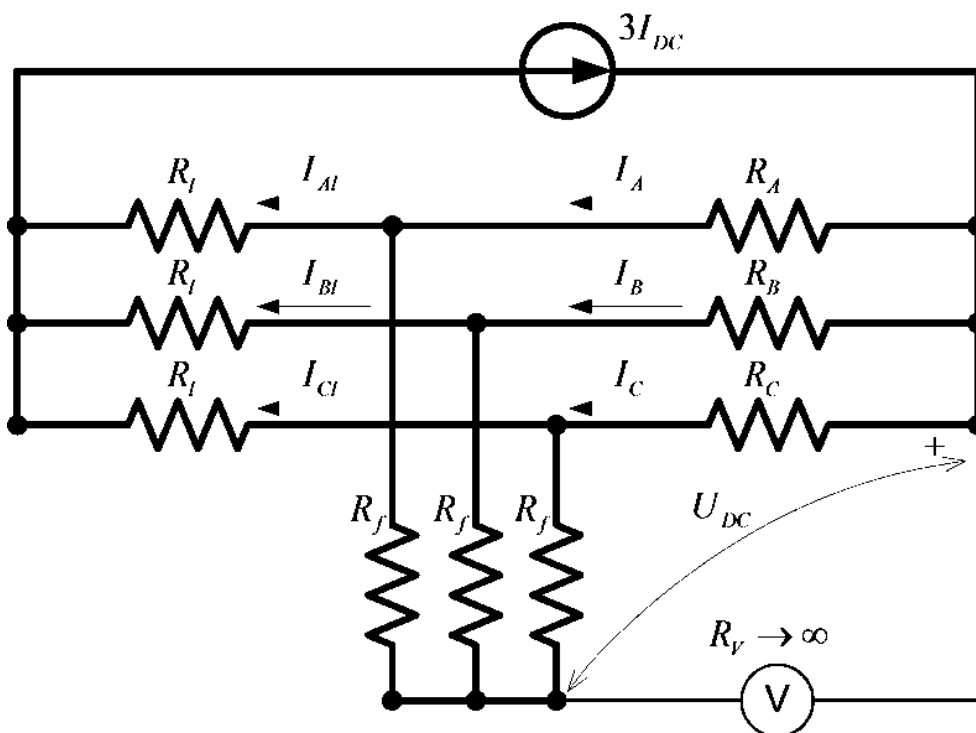
4.6 Prilog C

U praktičnim slučajevima, fazne otpornosti namotaja statora mogu biti međusobno nejednake iz različitih razloga. U takvim slučajevima, raspodela injektiranih DC struja po fazama neće biti ravnomerna. Neophodno je ispitati tačnost predložene metode u tom slučaju. U tu svrhu, treba razmatrati DC ekvivalentno kolo dato na Sl. 4.6. U ovom kolu, R_l označava otpor, R_f označava otpor filtera, a R_A , R_B and R_C su odgovarajuće otpornosti na faznih namotaja. Da bi se proučio uticaj razlike između otpornosti namotaja, analizira se sledeći slučaj:

$$R_A^c = R_l, R_B^c = R_l + \Delta R, R_C^c = R_l - \Delta R, \quad (4.8)$$

gde superskript "c" označava otpornost u hladnom stanju. Pod uslovom da je povećanje temperature isto u sve tri faze, otpornosti u zagrejanom stanju će biti jednake:

$$R_A^h = k_g R_l \quad (4.9)$$



Sl. 4.6 DC ekvivalentno kolo mernog sistema

$$R_B^h = k_g (R_l + \Delta R) \quad (4.10)$$

$$R_C^h = k_g (R_l - \Delta R) \quad (4.11)$$

gde je $k_{\theta} = (235 + \vartheta_h) / (235 + \vartheta_c)$.

Jednačine kola su rešene za $R_1 = 12.5 \Omega$, $R_f = 470 \text{ k}\Omega$, $\vartheta_h = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_c = 120^\circ\text{C}$, i promenljive vrednosti ΔR i R_l . Treba imati u vidu da R_1 i R_f odgovaraju stvarnim eksperimentalnim vrednostima. Greška merenja temperature, tj. razlika između vrednosti dobijene pomoću (2) i stvarne srednje temperature namotaja, dobija se za različite vrednosti ΔR i R_l , izračunate greške u merenju temperature su date u Tabeli 4.3. Očigledno je da neusklađenost između otpornosti namotaja dovodi do većih grešaka u merenju kada se povećava otpor napojnih provodnika. Međutim, čak i sa nerazumno velikom neusklađenošću od 20% R_1 i veoma velikom otpornošću linijskih provodnika od $6 \Omega/\text{fazi}$ (što odgovara bakarnom provodniku preseka 2.5 mm^2 i dužine 800 m), greška ne prelazi 2°C . Prema tome, može se smatrati da su merenja temperature dobijena korišćenjem predložene metode vrlo precizna procena prosečne temperature

Tabela 4.3 Predviđene greške u merenju temperature usled nejednakosti faznih otpornosti i nenulte otpornosti napojnih vodova

$R_l[\Omega]$ $\Delta R/R_1 [\%]$	1	2	3	4	5	6
3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
6	0.05	0.09	0.13	0.16	0.19	0.22
9	0.11	0.20	0.29	0.36	0.43	0.50
12	0.19	0.36	0.50	0.65	0.78	0.89
15	0.30	0.57	0.81	1.03	1.23	1.41

namotaja.

4.7 Prilog D

Tangencijalni pritisak deluje na površine statora i rotora prema Maksvelovoj teoriji tenzora [32]:

$$\sigma_t(\theta) = \mu_0 H_t(\theta) H_r(\theta), \quad (4.12)$$

gde je θ električni ugao, a H_t i H_r su tangencijalna i radijalna komponenta jačine magnetskog polja u međugvožđu. U posmatranom slučaju, u namotajima statora istovremeno postoje simetrične trofazne naizmernične struje i međusobno jednake jednosmerne struje. Pulsacije obrtnog momenta bi se mogle javiti kao posledica interakcije između stacionarnog polja nastalog usled injektiranja jednosmerne struje i osnovnog harmonika obrtnog polja proizvedenog uravnoteženim trofaznim strujama. Kako bi se utvrdilo da li je pulsacioni moment prisutan ili ne, analizira se interakcija između ove dve komponente. Prema analogiji sa izrazom za mps nultog redosleda datom u [33], raspodela mps koju generišu međusobno jednake jednosmerne struje u faznim namotajima data je izrazom:

$$F_{DC}(\theta) = \hat{F}_{DC} \cos 3\theta, \quad (4.13)$$

tj. injektirane jednosmerne struje proizvode u prostoru magnetsko polje koje ima trostruko veći broj polova od onog za koji je mašina namotana. Odgovarajuća vrednost tangencijalne komponente jačine polja na površini statora data je sa:

$$H_t^{DC}(\theta) = \frac{dF_{DC}(\theta)}{rd\theta} = -\hat{H}_t \sin 3\theta, \quad (4.14)$$

gde je r unutrašnji prečnik statora mašine, a \hat{H}_t je amplituda tangencijalne komponente jačine magnetskog polja. Radijalna komponenta obrtnog polja koje stvaraju simetrične trofazne struje data je izrazom:

$$H_r^{3f}(\theta) = \hat{H}_r \sin(\theta - \varphi), \quad (4.15)$$

gde je \hat{H}_r amplituda jačine radijalne komponente magnetskog polja, a φ vremenski promenljiva faza. Tangencijalni pritisak na ugaonoj poziciji θ nastao usled interakcije ove dve komponente magnetskog polja je jednak:

$$\sigma_t(\theta) = \frac{\mu_0 \hat{H}_r \hat{H}_t}{2} [\cos(4\theta - \varphi) - \cos(2\theta + \varphi)] \quad (4.16)$$

Obrtni moment nastao usled interakcije polja proizvedenog injektiranim DC strujama i osnovnog harmonika obrtnog polja dobija se integracijom tangencijalnog pritiska duž unutrašnjeg obima statora:

$$T_{ripple}(\theta) = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \sigma_t(\theta) r l d\theta = 0. \quad (4.17)$$

Stoga, neće biti komponente pulsirajućeg obrtnog momenta kao posledice ubrizgavanja DC struje u zvezdište mašine. Ovaj zaključak važi za proizvoljne vrednosti faznog pomeranja ϕ , tj. u bilo kom trenutku. Izraz (17) se odnosi na dvopolne mašine, ali isti zaključak važi za proizvoljan broj polova. Trebalo bi napomenuti da je prethodna analiza izvršena uz pretpostavku sinusoidalne raspodele gustine struje na površini statora i rotora, uz zanemarenje viših harmonika polja nastalih usled diskretne raspodele provodnika i varijacija širine međugvožđa usled ožlebljenosti.

Literatura

- [1] Zhang P, Du Y, Habetler TG, Lu B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011;47:34-46.
- [2] Venkataraman B, Godsey B, Premerlani W, Shulman E, Thaku M, Midence R. Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection. *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers* 2005. p. 127-44.
- [3] Boglietti A, Cavagnino A, Popescu M, Staton D. Thermal Model and Analysis of Wound-Rotor Induction Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013;49:2078-85.
- [4] Boglietti A, Cavagnino A, Staton D, Shanel M, Mueller M, Mejuto C. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56:871-82.
- [5] Alberti L, Bianchi N. A coupled thermal-electromagnetic analysis for a rapid and accurate prediction of IM performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55:3575-82.
- [6] Sarkar D, Naskar AK. Computation of thermal condition in an induction motor during reactor starting. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013;44:938-48.
- [7] Jankowski TA, Prenger FC, Hill DD, Bryan SRO, Sheth KK, Brookbank EB, et al. Development and Validation of a Thermal Model for Electric Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010;57:4043-54.
- [8] Moreno JF, Hidalgo FP, Martinez MD. Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2001;148:393-7.
- [9] Gao Z, Colby RS, Habetler TG, Harley RG. A model reduction perspective on thermal models for induction machine overload relays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55:3525-34.
- [10] Zhang P, Du Y, Habetler TG. A transfer-function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010;46:1919-26.
- [11] Zhang H. Online Thermal Monitoring Models for Induction Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30:1279-87.
- [12] Beguenane R, Benbouzid MEH. Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999;14:566-70.
- [13] Sdid MSN, Benbouzid MEH. H-G diagram based rotor parameters identification for induction motors thermal monitoring. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2000;15:14-8.
- [14] Sang-Bin L, Habetler TG, Harley RG, Gritter DJ. An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator winding temperature monitoring. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2002;17:7-15.
- [15] Matic PR, Gecic MA, Lekic DM, Marčetić DP. Thermal Protection of Vector-Controlled IM Drive Based on DC Current Injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62:2082-9.
- [16] Cheng S, Du Y, Restrepo JA, Zhang P, Habetler TG. A nonintrusive thermal monitoring method for induction motors fed by closed-loop inverter drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012;27:4122-31.
- [17] Zhang P, Du Y, Lu B, Habetler TG. A DC signal injection-based thermal protection scheme for soft-starter-connected induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009;45:1351-8.
- [18] Wu Y, Gao H. Induction-motor stator and rotor winding temperature estimation using signal injection method. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2006;42:1038-44.
- [19] Zhang P, Du Y, Habetler TG, Lu B. Magnetic effects of DC signal injection on induction motors for thermal evaluation of stator windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58:1479-89.

- [20] Popov NZ, Vukosavic SN. Estimator of the Rotor Temperature of Induction Machine Based on Terminal Voltages and Currents. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017;32:155-63.
- [21] Cho KR, Seok JK. Induction motor rotor temperature estimation based on a high-frequency model of a rotor bar. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009;45:1267-75.
- [22] Gao Z, Habetler TG, Harley RG, Colby RS. A Sensorless Adaptive Stator Winding Temperature Estimator for Mains-Fed Induction Machines With Continuous-Operation Periodic Duty Cycles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2008;44:1533-42.
- [23] Kral C, Habetler TG, Harley RG, Pirker F, Pascoli G, Oberguggenberger H, et al. Rotor temperature estimation of squirrel-cage induction motors by means of a combined scheme of parameter estimation and a thermal equivalent model. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2004;40:1049-57.
- [24] International Electrotechnical Commission. Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance, Determination of Winding Temperature. 2004.
- [25] Krause P, Wasynczuk O, Sudhoff SD, Pekarek S. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. 3rd ed: Wiley-IEEE Press; 2013.
- [26] Grantham C. Zero-sequence dynamic braking and parameter determination. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*. 1983;130:392-8.
- [27] Sang-Bin L, Habetler TG. An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003;39:685-94.
- [28] Lazarevic Z, Radosavljevic R, Osmokrovic P. A novel approach for temperature estimation in squirrel-cage induction motor without sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1999;48:753-7.
- [29] Stanford Research Systems Inc. Model SR630 16 Channel Thermocouple Reader, 2009.
- [30] Gupta SV. *Measurement Uncertainties - Physical Parameters and Calibration of Instruments*. New York: Springer-Verlag; 2012.
- [31] Hewlett-Packard Company. HP 34401A Multimeter - Service Guide, 1996.
- [32] Pyrhonen J, Jokinen T, Hrabovcova V. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, Ltd; 2008. p. 33-6.
- [33] Bottiglieri G, Consoli A, Scarcella G, Scelba G. Zero-sequence Flux and Voltage of Induction Motors Supplied with Low- and High-frequency Currents. 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference 2007. p. 1201-7.
- [34] Armenskij E.V., Falk G.B.: *Električeskie mikromašini*, Izd. „Visšaja škola“, Moskva, 1985.
- [35] Astanov i dr.: *Ispitanija električeskih mikromašin*, Izd. „Visšaja škola“, Moskva, 1984. 220 str.
- [36] Atamaljan E.T.: *Pribori i metodi izmerenja električeskih veličin*. Izd. „Visšaja škola“, Moskva, 1982.
- [37] Balagurov V.A. i dr.: *Električeskie mašini s postojanimi magitami*. Izd. „Energija“, Moskva, 1964.
- [38] Balagurov V.A.: *Projektirovanie specialjnih električeskih mašin peremenago toka*. Izd. „Visšaja škola“, Moskva, 1982.
- [39] Balagurov V.A., Taltev F.F.: *Aviacionije generatori peremanago toka kombinirovanogo vozbuždenija*. Izd. „Mašinstroenije“, Moskva, 1972.
- [40] Bojko V.F., Titov N.P.: *Električeskie mikromašini*. Izd. SZZPI, Lenjingrad, 1970.
- [41] J. Henry-Baudot: *Les machines électriques en automatique appliqué*. Bibliotheque de l'automaticien, Dunod, edit: Paris, 1967.

- [42] Bergštejn S. G.: Impulsnoje upravljenje skorostiju vrašćenija elektrodvogatelja. Izd. „Energija“, Moskva, 1964.
- [43] Bertinov A.I.: Električeskije mašini aviacionoj avtomatiki. Izd. „Oborongiy“, Moskva, 1961.
- [44] Berinov A.I.: Specialjnije električeskije mašini. Izdat. „Energoizdat“, Moskva, 1982.
- [45] Beyaert R.: Les petits moteurs electriques, edit. Dunot, Paris, 1958.
- [46] Bruskin D.E., Zohorovič A.E., Hvostov V.S.: Električeskije mašini I mikromašini. Izd. “Visšaja škola”, Moskva, 1971.
- [47] Bruskin D.E. i dr.: Električeskije mašini č.1 i č.2. Izdat. “Visšaja škola”, Moskva, 1979.
- [48] Bruskin D.E.: Elektrooborudovanije samoletov. Izd. “Gosenergoizdat”, Moskva, 1956.
- [49] Davis A.: Electromechanical components for servomechanisms. Mc Graw-Hill-Editors, New York, 1970.
- [50] Diskretnij elektroprivod s šagovimi dvigateljama, pod redakcijej M.G. Čilikina. Izd. „Energija“, Moskva, 1971.
- [51] Ermolin N.P., Žerihin I.P.: Nadežnost električeskijih mašin. Izd. „Energija“, Moskva, 1976.
- [52] Ermolin N.P.: Električeskije mašini maloj moščnosti. Izdat. „Visšaja škola“, Moskva, 1967.
- [53] Elektrotehničeskij spravočnik, pod redakcijej I.N. Orlova. Izd. „Energija“, Moskva, 1981.
- [54] Ivanov-Smolenskij A.V.: Električeskije mašini. Izd. “Energija”, Moskva, 1980.
- [55] Jufer M.: Electromecanique. Edit. “Dunod”, Paris, 1983.
- [56] Kaasik P.J. i dr.: Rasčet upravljajemij korotkozamknutih mikrovdigatelej. Izd. “Energija”, Lenjingrad, 1972.
- [57] Kazanskij V.M., Osnovič L.D.: Maloinercionije mašini avtomatičeskijih sistem. Izd. “Visšaja škola”, Moskva, 1979.
- [58] Kacman M.M. i Juferov F.M.: Električeskije mašini avtomatičeskijih sistem. Izd. “Visšaja škola”, Moskva, 1979.
- [59] Kreuth H.P.: Small Electric Machines. Bulletin SEV/ASE, 1987, 23, p. 1390...1395.
- [60] Kulebakin V.S. i dr.: Proizvodstvo, preobrazovanije i raspredelenije električeskijoj energiji na samoletah. Izd. Gos. Oboronoj promišlenost, Moskva, 1956.
- [61] Lacroux G.: Les moteurs a courant continu dans les servo-mecanismes. L'Electricien, 4/5-1970, Paris.
- [62] Lacroux G. > Le moteur a reluctance. L'Electricien, tome XCV, Paris, 1967.
- [63] Lopuhina E.M. i Samihina G.S.: Asinhronije mikromašini s polim rotorom. Izd. “Energija”, Moskva, 1967.
- [64] Naslin P.: Technologie et calcul pratique des systems asservis. Dunod editeur-Paris.
- [65] Osin i dr.: S Sinhronije mikrovdigateli s postojanimi magnitami. Izd. “Energija”, Moskva, 1976, 232 str.
- [66] Ovčiničkov I.E., Lebedev N.I.: Bezkontaktnije dvigateli postojanogo toka avtomatičeskijih ustrojstv. Izdat. “Nauka”, Moskva, 1966.
- [67] Petrovič M.: Električne mapine I postrojenja. Izd. “Naučna knjiga”, Beograd, 1986.
- [68] Petrovič m. I Vukić Dj.: Regulisanje brzine I analiza harmonica asinhronog motora sa obostranim napajanjem. Publikacije Elektrotehničkog fakulteta, Serija Elektroenergetika, Beograd, 1984.
- [69] Polovko A.M.: Osnovi teoriji nadežnosti. Izd. “Nauka”, Moskva, 1964.

- [70] Rotmirov V.A., Ivobotenko B.A.: Šagovije dvigateli. Izd. "Gosenergoizdat", Moskva, 1959.
- [71] Svečarnik D.V.: Distancionije predači. Izd. "Energija", Moskva, 1966.
- [72] Veinott C.: Fractional horsepower electric motors. Izd. Mc Graw-Hill book company, 1948, 1954 (francusko izdanje).
- [73] Voldek A.I.: Električeskije mašini. Izd. "Energija", Moskva, 1966.
- [74] Hruščev V.V.: Električeskije mikromašini avtomatučeskijh ustrojstv. Izd. „Energija“, Moskva, 1976.
- [75] Hruščev V.V.: Električeskije mikromašini. Izd. „Energija“, Moskva, 1969.
- [76] Hruščev V.V.: Električeskije mikromašini sistem avtomatiki. Izd. „Energoatomizdat“, Lenjingrad, 1985.
- [77] Šarov V.S.: Sverhvisokoskorostnije asinhronije dvigateli. Izdat. "Gosenergoizdat", Moskva, 1963.
- [78] Juferov F.M.: Elektročeskije mašini avtomatičeskijh ustrojstv. Izd. "Visšaja škola", Moskva, 1976, 416 str.
- [79] Černišev V.O.: Povorotnije transformatori I ih primenenije v vičislitelnih I avtomatičeskijh ustrojstvah. Izd. "Energija", Moskva, 1965.
- [80] Wawre N.> Evolution des moteurs electriques pour la robotique modern. Bulletin SEV/ASE 75 (1984) 12, pp 673...675.
- [81] Čečet Ju. S.: Električeskije mikromašini avtomatičeskijh ustrojstv. Izd. „Eneegija“, Moskva, 1964.
- [82] Zavališin D.A. i dr.: Električeskije mašini maloj moščnosti. Izd. „Energija“, Moskva, 1963.
- [83] Kreuth H.P.: Stationare und dynamische Betriebsdaten von Schrittmotoren. VDI-Berichte 482 (1983), s. 91...96.
- [84] Pospelov L.I.: Konstrukcija aviacionijh električeskijh mašin, Moskva, 1982.
- [85] Ahrend W.R., Savant C.J.: Servomechanism Practice Callifornia, 1960.
- [86] Electro-Craft Corporation, USA, DC Motors Speed Controls Servo Systems – An Engineering Handbook, Pergamon Press, New York, 1997.
- [87] Miloš Petrović, Ispitivanje električnih mašina, Akademska Misao, Beograd, 2000.
- [88] Alaulddin A. H. Albla, Bogdan Brkovic, Milos Jecmenica, Zoran Lazarevic, Online Temperature Monitoring of a Grid Connected Induction Motor, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 93, pp. 276-282, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.007>

Biografija

Diplomirani inženjer ALAULDDIN ADEL HAMOODI ALBLA rođen je 08. januar 1963. godine u Nineve, grad Mosul, Iraq. Osnovnu i srednju tehničku školu završio je u Mosul-u 1975. i 1981. godine.

Na Vojnoj akademiji u Rajlovcu je diplomirao je 1985. godine - smer Elektronska oprema i instrumenti. U Beogradu je 1985. godine upisao dodatne dvogodišnje studije na ETF-u za priznavanje petogodišnjih studija na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Diplomirao je 14. januara 1988. godine. Po ekvivalentiranju petogodišnjih studija, sa zvanjem Master inženjera elektrotehnike i računarstva, upisao je Doktorske studije 2012. godine na Energetskom odseku, Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, smer Energetski pretvarači i pogoni. Sve ispite je položio 2014. godine i pristupio izradi doktorske teze.

Od 2008. pa sve do dolaska u Srbiju 2012. godine radio je na Al-RAFIDAIN University collage u Bagdadu kao Researcher i Prof. Assistant.

Rad vezan za doktorsku disertaciju objavljen je u međunarodnom časopisu *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*.

- Alaulddin A. H. Albla, Bogdan Brkovic, Milos Jecmenica, Zoran Lazarevic, "Online Temperature Monitoring of a Grid Connected Induction Motor", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 93, pp. 276-282, 2017.

ISSN: 0142-0615, IF: 3.289, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.007>

Prilog – Python program za komunikaciju sa mernim instrumentima

```
import visa
import xlwt
import time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import datetime
import os

#####
# Inicijalizacija:
rm = visa.ResourceManager()
rm.list_resources()
volt_meas = rm.open_resource('GPIB0::1::INSTR')
print(volt_meas.query('*IDN?'))
volt_meas.write('*rst')
volt_meas.write('*cls')
volt_meas.write('trig:source bus')
volt_meas.write('conf:volt:dc')

curr_meas = rm.open_resource('GPIB0::2::INSTR')
print(curr_meas.query('*IDN?'))
curr_meas.write('*rst')
curr_meas.write('*cls')
curr_meas.write('trig:source bus')
curr_meas.write('conf:current:dc 100MA')

theta_meas = rm.open_resource('GPIB0::5::INSTR')
#theta_meas.write('*rst')
#theta_meas.write('bclr')
theta_meas.write('ttyp 1, T')
theta_meas.write('ttyp 2, T')
theta_meas.write('ttyp 3, T')
theta_meas.write('ttyp 4, T')

# Fajl za unos podataka:
# Trenutni datum i vreme:
current_dt = datetime.datetime.now()
godina = current_dt.year
mesec = current_dt.month
dan = current_dt.day
sat = current_dt.hour
minut = current_dt.minute
current_dt = str(godina)+'_'+str(mesec)+'_'+str(dan)+' '+str(sat)+'h'+str(minut)+'min'

# Filepath:
rel_path = 'Merenja\Merenja '+current_dt
script_dir = os.path.dirname(__file__) #<-- absolute dir the script is in
abs_path = os.path.join(script_dir, rel_path)

f = open(abs_path, 'w')
f.write('Vreme [s];')
f.write('Vdc [V];')
f.write('Idc [A];')
f.write('theta_amb [degC];')
f.write('theta1 [degC];')
f.write('theta2 [degC];')
f.write('theta3 [degC];')
```



```

f.write('theta_avg [degC];')
f.write('theta_est [degC];')
f.write('delta_theta [degC]\n')

# Inicijalizacija nizova:
i=0
vreme = list()
temp_est = list()
temp_avg = list()

# Inicijalizacija crtanja:
#fig = plt.figure()
# draw and show it
#fig.canvas.draw()
#plt.show(block=False)
#plt.title("Measured and estimated temperatures",fontsize=20)
#plt.xlabel("time [sec]", fontsize=20)
#plt.ylabel("Temperatures [degC]", fontsize=20)
#plt.grid(True)
#plt.ion()

# Inicijalizacija vremena:
beggining_of_time = time.time()

#Ocitavanje instrumenata:
while time.time()-beggining_of_time<3600*4:
    t_begin = time.time()-beggining_of_time
    t_end = t_begin + 8
    volt_meas.write('read?')
    #print(volt_meas.query('*IDN?'))
    napon = volt_meas.read()
    print('Vdc = ' + napon)
    time.sleep(0.3)
    curr_meas.write('read?')
    #print(curr_meas.query('*IDN?'))
    struja = curr_meas.read()
    print('Idc = ' + struja)
    theta_meas.write('meas? 4')
    #print(theta_meas.query('CH?'))
    theta_amb = theta_meas.read()
    print('theta_amb = ' + theta_amb)
    theta_meas.write('meas? 1')
    theta1 = theta_meas.read()
    print('theta1 = ' + theta1)
    theta_meas.write('meas? 2')
    theta2 = theta_meas.read()
    print('theta2 = ' + theta2)
    theta_meas.write('meas? 3')
    theta3 = theta_meas.read()
    print('theta3 = ' + theta3)

    time.sleep(0.5)

    theta_avg = (float(theta1)+float(theta2)+float(theta3))/3
    theta_avg_str = str(theta_avg)
    print('theta_avg = ' + theta_avg_str)

Rdc = float(napon)/float(struja)*3
theta_est = Rdc/12.74*260.87-235 # Rdc = 12.74 ohm i theta = 25.87 degC -
izmereno pomocu injektiranja na pocetku, u hladnom stanju

```

```

theta_est_str = str(theta_est)
print('Rdc = ' + str(Rdc))
print('theta_est = ' + theta_est_str)

delta_theta = theta_est-theta_avg
delta_theta_str = str(delta_theta)
print('delta_theta = ' + delta_theta_str + '\n')

napon = napon.rstrip()
struja = struja.rstrip()
theta1 = theta1.rstrip()
theta2 = theta2.rstrip()
theta3 = theta3.rstrip()
theta_amb = theta_amb.rstrip()

theta_avg_str = theta_avg_str.rstrip()
theta_est_str = theta_est_str.rstrip()
delta_theta_str = delta_theta_str.rstrip()

merenja_sva =
napon+';'+struja+';'+theta_amb+';'+theta1+';'+theta2+';'+theta3+';'+theta_avg_str+
';'+theta_est_str+';'+delta_theta_str+'\n'
time_str = str(t_begin)+'; '
f.write(time_str)
f.write(merenja_sva)

# Crtanje dijagrama:
vreme.append(round(t_begin))
temp_est.append(theta_est)
temp_avg.append(theta_avg)

if i<=1000:
    i+=1
    xlower = 0
else:
    vreme.pop(0)
    temp_est.pop(0)
    temp_avg.pop(0)
    xlower = round(t_begin)-10*60

xupper = round(t_begin)
ylower = theta_est-10
yupper = theta_est+10

# Crtanje dijagrama u realnom vremenu:
#plt.axis([xlower, xupper, ylower, yupper])
#plt.ion()
#line1, = plt.plot(vreme,temp_est,'b',markersize=1)
#line2, = plt.plot(vreme,temp_avg,'r',markersize=1)
#plt.legend([line2, line1], ['Merena', 'Estimirana'])
#plt.draw()
#plt.pause(0.1)

while time.time()-beggining_of_time < t_end:
    a = 1 #Cisto onako da se vrtilo nesto

#####

```

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Alaulddin Adel Hamoodi Albla

Број индекса: 2012/5073

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Електричне машине у ваздухопловству - Надгледање загревања у току рада без давача температуре

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација ни у целини, ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 06.07.2018



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Alaulddin Adel Hamoodi Albla

Број индекса: 2012/5073

Студијски програм: Енергетски претварачи и погони

Наслов рада: Електричне машине у ваздухопловству - Надгледање загревања у току рада без давача температуре

Ментор: др Зоран Лазаревић, редовни професор

Потписан Alaulddin Adel Hamoodi Albla

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 06. 07. 2018



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Електричне машине у ваздухопловству - Надгледање загревања у току рада без давача температуре

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално(CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада(CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада(CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима(CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 06.07.2018



1. **Ауторство.**Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умнож авање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прераду.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прераду. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.