

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Dejan Tinta

**Odkrivanje napak v sistemih s kompleksno
dinamiko: primer končne kontrole kakovosti
sesalnih enot**

Magistrsko delo

Mentorica: doc. dr. Aneta Stefanovska

Ljubljana, junij 2004

Zahvala

Mentorici doc. dr. Aneti Stefanovski se zahvaljujem za strokovno pomoč in kritične pripombe pri nastajanju tega dela.

Posebno zahvalo pa sem dolžan svojemu institutskemu mentorju doc. dr. Daniju Juričiču, ki je v času mojega podiplomskega študija aktivno spremljal moje delo in mi nesebično pomagal z dragocenimi nasveti.

Iskrena zahvala gre tudi dr. Janku Petrovčiču za njegovo nepogrešljivo strokovno pomoč in koristne nasvete predvsem pri eksperimentalnem delu.

Najlepša hvala prof. dr. Stanku Strmčniku, ki me je sprejel na Odsek za sisteme in vodenje Instituta Jožef Stefan in s tem omogočil moje raziskovalno delo.

Za izkazano pomoč se zahvaljujem še vsem ostalim sodelavcem, ki so kakorkoli pripomogli k nastanku tega dela.

Zahvala velja tudi podjetju Domel d.d. iz Železnikov, katero je omogočilo raziskave, ki so predmet pričujočega dela, in Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport Republike Slovenije, ki je v okviru programa P2-0001 finančno podprlo moj podiplomski študij.

Ne nazadnje se toplo zahvaljujem svojim staršem za vsestransko podporo.

Iskrena hvala vsem, ki so mi stali ob strani na moji študijski poti.

Povzetek

Temeljita avtomatska končna kontrola izdelkov ima pomembno vlogo pri zagotavljanju kakovosti v sodobni proizvodnji. Ostra konkurenca na trgu sesalnih enot sili proizvajalce k uvajanju sistemov za hitro, zanesljivo in objektivno ocenjevanje parametrov kakovosti vsake proizvedene enote na koncu proizvodne linije. Z namenom, da bi ugodili tem zahtevam, je bil zgrajen prototip diagnostičnega sistema za preizkušanje kvalitete sesalnih enot. Jedro sistema tvorijo štirje moduli za generiranje značilk, ki temeljijo na analizi vibracij, analizi komutacije, analizi hrupa in matematičnem modelu enote. Generirane značilke predstavljajo vhod v odločitveni modul, ki na osnovi mehkega sklepanja poda končno diagnozo. Širok nabor uporabljenih algoritmov zagotavlja zanesljivost, natančnost in občutljivost diagnostičnega sistema. Predstavljeni sistem omogoča odkrivanje slabih sesalnih enot in lokalizacijo izvorov napak.

V tem delu sta podrobneje opisana dva izmed omenjenih modulov za generiranje značilk in sicer modul za analizo vibracij ter modul za analizo komutacije. Analiza vibracij je standarden pristop pri spremljanju delovanja rotacijskih strojev. V primeru sesalnih enot obstajajo trije razlogi za uporabo analize vibracij. Povečane vibracije pomenijo večjo obrabo ležajev. Drugič, vibracije sesalne enote povzročajo nezaželen hrup sesalnika. In tretjič, v signalu vibracij so vsebovane informacije o nekaterih lastnostih sesalnih enot. V pričujočem delu so raziskani glavni viri vibracij pri sesalnih enotah. Predstavljeni so tudi rezultati meritev vibracij s pomočjo laserskega merilnika pri preletu laserskega žarka vzdolž ohišja sesalne enote.

Kvaliteta komutacije bistveno vpliva na življenjsko dobo sesalnih enot. Zaradi prekinjanja toka na kolektorju se inducirajo visoke napetosti, ki povzročijo iskrenje med kolektorjem in ščetkami. Povečano iskrenje pa rezultira v hitrejši obrabi ščetk. Modul za analizo komutacije temelji na ovrednotenju visokofrekvenčnih napetostnih motenj, katere se inducirajo zaradi iskrenja.

V delu so predstavljeni izsledki študije, ki je bila opravljena na približno sto sesalnih enotah. Obravnavana modula omogočata detekcijo sesalnih enot z neuravnoteženimi vrtečimi se deli in tistih s povečanim iskrenjem. Omenjeni izsledki bodo uporabljeni pri implementaciji testnega sistema na proizvodno linijo.

Abstract

In-depth and automatic quality end-tests in modern manufacturing represent an important means for the assurance of top quality and flawless products. Tough competition on the market of vacuum cleaner motors is increasing the need for fast, reliable and objective quality assessment of every single unit at the end of the assembly cycle. As a step towards meeting these objectives, a prototype version of the diagnostic system for quality tests of vacuum cleaner motors has been designed. The core of the system contains four modules for features extraction that employ: vibration analysis, analysis of commutation, sound analysis and check of parity relations. The symptoms resulting therefrom are processed by an approximate reasoning module. Such a comprehensive set of algorithms ensures the reliability, precision and in particular sensitivity of the diagnostic system. The system enables detection of faulty motors and the localisation of fault origins.

In the thesis two feature extraction modules are elaborated in detail, i.e. the module based on vibration analysis and the module for analysis of commutation. Vibration analysis is a standard tool in monitoring of the rotary machines. In our case, there are three reasons for employing vibration analysis. First, increased motor's vibrations expedite wear of motor bearings. Second, vibrations result in undesired noise. And third, vibration signal carries information on certain motor's properties. In the present work the main vibration sources in vacuum cleaner motors are revealed. Particular measurement procedure, which allows scanning the vibrations profile along the motor housing by using laser vibrometer, is also reported.

Commutation quality substantially impacts motor lifetime. The commuted collector current induces high voltage peaks, which generate sparking between collector and brushes. Increased sparking causes increased wear of brushes. The module for commutation analysis is based on the evaluation of induced high-frequency voltage disturbances due to sparking.

The experimental study was done on about one hundred vacuum cleaner motors. The presented modules are able to reveal motors with unbalances and motors with increased sparking. The achieved results are going to be implemented in a test system that will be installed in the assembly line.

Kazalo

1. Uvod	1
2. Sesalna enota	4
2.1 Opis sesalne enote družine 462	4
2.1.1 Sesalna enota tipa 462.3.451	5
2.2 Napake pri sesalnih enotah družine 462.....	7
3. Prototip sistema za odkrivanje napak na sesalnih enotah	8
3.1 Eksperimentalno okolje.....	8
3.1.1 Pozicionirni mehanizem laserskega merilnika vibracij	12
3.2 Struktura diagnostičnega sistema	14
4. Modul za analizo vibracij	16
4.1 Obdelava signala vibracij	16
4.2 Izvori vibracij pri sesalni enoti.....	17
4.2.1 Širjenje vibracij po sesalni enoti.....	19
4.2.2 Drugi izvori vibracij pri sesalni enoti	22
4.3 Vpetje oziroma postavitve sesalne enote	23
4.3.1 Horizontalen položaj na kovinskem podstavku obdanem s peno.....	23
4.3.2 Vertikalen položaj sesalne enote na podstavku iz poliuretanske pene	26
4.4 Merilne točke vibracij pri sesalni enoti	27
4.5 Vpliv zaslonke na vibracije	28
4.6 Vpliv temperature na vibracije sesalnih enot	28
4.7 Meritve vibracij sesalnih enot s pomočjo premikajočega se laserskega merilnika vibracij.....	30
4.8 Zveza med vibracijami in življenjsko dobo sesalnih enot.....	33
5. Modul za analizo komutacije	35
5.1 Pomen vrednotenja kvalitete komutacije in obstoječe rešitve	35

5.2	Komutacija pri univerzalnih elektromotorjih.....	37
5.2.1	Komutacija pri sesalnih enotah.....	40
5.3	Analiza kvalitete komutacije.....	42
5.3.1	Uporaba standardne metode za merjenje nivoja elektromagnetnih motenj	42
5.3.2	Merjenje in analiza napajalnega toka, napetosti na priključnih sponkah in napetosti na ščetkah.....	45
5.3.3	Naprava za merjenje intenzitete iskrenja.....	52
5.3.3.1	Formulacija značilke za intenziteto iskrenja.....	56
5.4	Ovrednotenje naprave za merjenje intenzitete iskrenja in izbrane značilke	60
5.4.1	Vpliv časa merjenja na vrednost značilke intenzitete iskrenja	61
5.4.2	Ponovljivost meritev intenzitete iskrenja	61
5.4.3	Vpliv temperature na meritve intenzitete iskrenja.....	62
5.4.4	Primer klasifikacije sesalnih enot glede na intenziteto iskrenja.....	63
6.	Zaključek	64
	Literatura	66
	Dodatek A	69

1. Uvod

Sesalna enota je sopomenka za elektromotor z zračno turbino, ki služi sesanju zraka pri gospodinjskih sesalnikih. Podjetje Domel Železniki je po velikosti eden izmed vodilnih evropski proizvajalec sesalnih enot, s katerimi oskrbuje zahtevne kupce, kot so Electrolux, Rowenta, AEG, Kärcher itd. Le-ti postopoma silijo proizvajalce k nenehnemu izboljševanju kakovosti in zanesljivosti sesalnih enot. Trendi na trgu praktično gredo v smeri zagotavljanja 100-odstotne brezhibnosti enot, s čimer bi se zmanjšali stroški servisiranja sesalnikov. Po drugi strani pa ostra konkurenca v tej branži od proizvajalcev terja stalno zniževanje stroškov proizvodnje. Tem zahtevam se lahko ugotovi z uvedbo učinkovitega sistema zagotavljanja kakovosti končnih izdelkov.



Slika 1.1: Sesalna enota družine 462

V Domelu je proces izdelave sesalnih enot družine 462 (Slika 1.1), ki so predmet obravnave v tem delu, sorazmerno visoko avtomatiziran. Zagotavljanje kakovosti teh izdelkov je v osnovi organizirano na treh nivojih.

Med samo proizvodnjo se izvajajo nekateri standardni, avtomatski testi na posameznih sklopih (npr. testiranje ovojnega stika na statorskih in rotorskih navitjih, testiranje stika med rotorskimi navitji in lamelami kolektorja itd.). Ti testi omogočajo odkrivanje nepravilnosti le na nivoju sestavnih delov. Nekatere napake, ki se pojavijo pri montaži, pa je mogoče odkriti šele na končnem izdelku. Zato je temeljita končna kontrola sesalnih enot zelo pomembna. Končni test trenutno vključuje avtomatsko

merjenje osnovne karakteristike enot (toka, električne moči in podtlaka), visokonapetostni preizkus, ročno merjenje vibracij, kontrolo hrupa ter vizualni pregled.

Drugi nivo procesa zagotavljanja kakovosti predstavlja obsežen pregled naključno izbranih vzorcev izmenske proizvodnje. V primeru odkritja določene napake na enem izmed vzorcev je potrebna ponovna kontrola te napake na vseh sesalnih enotah izmene.

Na tretjem nivoju se na nekaj sesalnih enotah iz vsake serije, katerih velikost se giblje med 2000 in 40000 enot, opravi test življenjske dobe.

Tak način zagotavljanja kakovosti pa zahteva veliko ročnega dela in posledično tudi stroškov. Zmanjšanje le-teh pa lahko dosežemo z uvedbo sistema za temeljito avtomatsko testiranje končnih izdelkov, ki bi bil zmožen poleg odkrivanja slabih sesalnih enot določiti tudi vrsto oziroma izvor napake. Tak sistem bi obenem predstavljal pomembno podporo operaterjem pri odločanju o potrebnih ukrepih na proizvodni liniji.

S sistemi za avtomatsko kontrolo kvalitete elektromotorjev so se v preteklosti že ukvarjali nekateri avtorji. Odkrivanje napak na rotacijskih strojih na splošno v svojih delih obravnavajo Edwards in sodelavci (1998), Randall (2002) ter Nandi in Toliyat (1999). Zelo učinkovita je izvedba, ki na podlagi analize toka odkriva različne električne in mehanske napake (Gühmann in Filbert, 1991 ter Yang in Penman, 2000). Žal pa ta rešitev v našem primeru ni uporabna, saj serijska vezava rotorskih in statorskih navitji pri univerzalnih motorjih povzroča dušenje hitrih sprememb toka, v katerih se odražajo omenjene napake. Vetter in sodelavci (1994) problem diagnosticiranja sesalnih enot na koncu proizvodne linije rešujejo s pomočjo analize vibracij in matematičnega modela. Matematični model kot generator značilk za potrebe odkrivanja napak na elektromotorjih uporabljajo tudi Albas in sodelavci (2000). Na trgu pa obstajajo tudi nekateri komercialni diagnostični sistemi. Schenck (2004) ponuja sistem, ki temelji na analizi vibracij in matematičnem modelu, medtem ko se Vogelsang & Benning (2004) poslužuje analize vibracij in kvalitete komutacije. Ti sistemi so sicer uporabni za različne vrste elektromotorjev, vendar pa je na ta račun omejena sama kvaliteta diagnosticiranja.

Prototip sistema za avtomatsko odkrivanje napak na sesalnih enotah, ki je predstavljen v pričujočem delu, temelji na uporabi različnih diagnostičnih algoritmov oziroma metod. Glede na njihov tip in vrsto signalov, ki jih obdelujejo, so omenjene metode razvrščene v štiri module za generiranje značilk, kateri tvorijo jedro sistema. Ti so modul za analizo vibracij, analizo komutacije, analizo hrupa in matematični model. Niz generiranih značilk predstavlja vhod v odločitveni modul, ki s pomočjo sklepanja na osnovi mehke logike ugotavlja lokacijo morebitne napake. Bistvo predlaganega pristopa k odkrivanju napak na sesalnih enotah je v tem, da vsako napako, ki se lahko pojavi, skušamo detektirati neposredno, to je z meritvijo in ustrezno obdelavo signala, v katerem se posamezna napaka oziroma njeni simptomi direktno odražajo. To sicer

zahteva širok nabor merilne opreme, vendar pa po drugi strani zagotavlja večjo zanesljivost, občutljivost in diagnostično natančnost sistema. Na ta način so izpolnjeni pogoji, da se vse slabe sesalne enote izločijo iz dobave kupcem.

V tem delu bosta podrobneje obravnavana sinteza in delovanje dveh izmed omenjenih modulov za generiranje značilk in sicer modula za analizo vibracij ter modula za analizo komutacije. Prvi temelji na obdelavi signala vibracij in je primeren za ugotavljanje nekaterih mehanskih lastnosti sesalnih enot. Osnovo modula za analizo komutacije pa predstavlja naprava za merjenje intenzitete iskrenja.

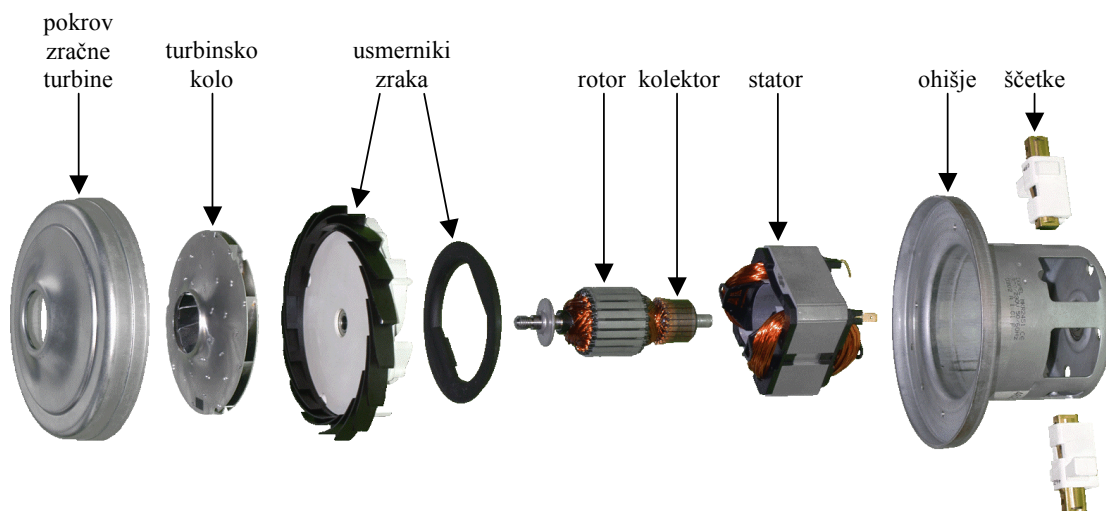
Poleg uvodnega pričujoča naloga obsega še pet poglavij. V drugem je opisana sesalna enota družine 462 proizvajalca Domel. Tretje poglavje nas seznanja s prototipom sistema za avtomatsko odkrivanje napak na sesalnih enotah. V njem sta predstavljena eksperimentalno okolje in struktura diagnostičnega sistema. Četrto poglavje je namenjeno analizi vibracij sesalnih enot. Pojasnjeni so izvori vibracij in njihovo širjenje po enoti. Nadalje so definirani merilni pogoji, ki zagotavljajo verodostojnost meritev. Prikazani so tudi rezultati meritev vibracij med preletom laserskega merilnika vzdolž sesalne enote in rezultati meritev, ki so se na enotah izvajale tekom trajnostnega testa. Peto poglavje obravnava analizo komutacije. Poleg razlage le-te so v njem najprej našteje že obstoječe rešitve za njeno vrednotenje. Sledi predstavitev sinteze naprave za merjenje intenzitete iskrenja. Nazadnje sta podana še formulacija zanačilke intenzitete iskrenja in njeno ovrednotenje. V zaključnem šestem poglavju so povzeti glavni rezultati tega dela in predlagane smernice za nadaljnje delo. Seznamu uporabljene literature sledi dodatek, v katerem so pojasnjene lastnosti spektralne analize, ki jih je priporočljivo upoštevati pri obdelavi signalov.

2. Sesalna enota

Sesalna enota je izraz za sklop univerzalnega elektromotorja in zračne turbine, ki ustvarja vlek zraka pri gospodinjskih sesalnikih.

2.1 Opis sesalne enote družine 462

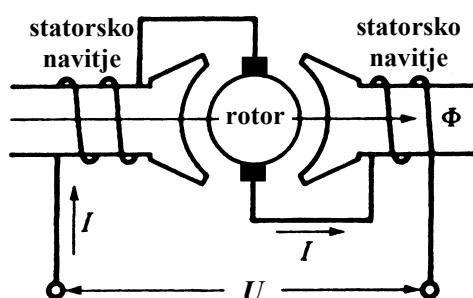
Sesalna enota iz družine 462 proizvajalca Domel je namenjena vgradnji v sesalnike za suho sesanje. Njeni glavni sestavni deli so prikazani na sliki 2.1. Zračno turbino enote sestavljajo turbinsko kolo, pokrov turbine in usmerniki zraka. Elektromotor pa sestoji iz rotorja, na katerem je nameščen tudi kolektor, statorja, ščetk in ohišja. Rotor je na ohišje vpet z dvema krogličnima ležajema.



Slika 2.1: Sestavni deli sesalne enote

Turbinsko kolo z devetimi lopaticami, ki je pritrjeno na os motorja, služi sesanju zraka skozi odprtino na pokrovu turbine. Ta zračni tok se nato izkoristi tudi za hlajenje motorja, zato je s pomočjo usmernikov usmerjen skozi režo med rotorjem in statorjem,

tako da čim boljše odnaša toploto, ki zaradi izgub nastaja predvsem na rotorju, statorju in kolektorju.



Slika 2.2: Električna shema univerzalnega elektromotorja

Elektromotor sesalne enote je enofazni komutatorski motor v serijski vezavi, katerega električno shemo vidimo na sliki 2.2. Zgradba in princip delovanja tega motorja sta enaka kot pri enosmernem elektromotorju. Magnetilni tok I skozi statorski navitji ustvari vzbujalno magnetno polje Φ . Taisti tok I teče kot bremenski tok tudi skozi rotorska navitja, saj so le-ta prek ščetk in kolektorja serijsko vezana s statorskima navitjema. Na ta način je doseženo, da sta magnetilni in bremenski tok v fazi, kar zagotavlja največji vrtilni moment motorja. Sklop ščetke-kolektor ima funkcijo mehanskega stikala, ki preklaplja med rotorskimi navitji, tako da bremenski tok kljub vrtenju rotorja teče po rotorskih navitjih vedno v ustrezni smeri. S tem je zagotovljeno, da vse elektromagnetne sile, ki delujejo na rotorska navitja v vzbujalnem magnetnem polju, povzročajo moment v isti smeri. Obravnavani elektromotor se odlikuje z velikim zagonskim vrtilnim momentom, medtem ko so njegove slabosti povezane predvsem s komutacijo, pri kateri prihaja do obrabe ščetk in kolektorja. Ker ga je mogoče priključiti tako na izmenično kot na enosmerno napetost, mu pravimo tudi univerzalni elektromotor (Zagradišnik in Slemnik, 2001; Jereb, 1975).

2.1.1 Sesalna enota tipa 462.3.451

Znotraj družine 462 obstajajo različni tipi sesalnih enot, ki pa se med sabo bistveno ne razlikujejo. V tem podpoglavju so za primer podrobneje predstavljene lastnosti sesalne enote tipa 462.3.451. Njene nazivne vrednosti so podane v tabeli 2.1. Največje zagotovljene vrednosti, ki jih ta enota lahko doseže in so pomembne pri vrednotenju njene zmogljivosti oziroma učinkovitosti, pa lahko razberemo iz tabele 2.2. Zračna moč je koristen del vhodne moči, ki ga sesalna enota porablja izključno za doseganje svojega namena, to je za sesanje zraka. Definirana je kot produkt podtlaka, ki ga enota ustvari, in pretoka zraka. Izkoristek je določen z razmerjem zračne moči in vhodne moči, ki je enaka produktu napajalne napetosti in električnega toka. Torej, izkoristek nam pove,

kolikšen delež vhodne moči, ki jo enota troši, se koristno porabi. Razlika omenjenih moči predstavlja izgube sesalne enote. Zato je prav izkoristek eden važnejših parametrov sesalnih enot.

Tabela 2.1: Nazivne vrednosti sesalne enote tipa 462.3.451

Napajalna napetost [V]	Frekvenca napajalne napetosti [Hz]	Vhodna moč [W]	Masa [kg]
230	50	1400	1.54

Tabela 2.2: Največje zagotovljene vrednosti pri sesalni enoti tipa 462.3.451

Podtlak [kPa]	Pretok zraka [dm ³ /s]	Zračna moč [W]	Izkoristek [%]
≥ 29.0	≥ 45	≥ 500	≥ 38

V tabeli 2.3 je prikazana karakteristika obravnavane sesalne enote posneta med obratovanjem enote pri nazivni napajalni napetosti (230 V) in različnih obremenitvah. Obremenitev sesalne enote določa velikost odprtine, skozi katero enota sesa zrak. Odprtina na pokrovu turbine ima premer $\phi = 40$ mm. Le-ta se lahko poljubno zmanjša s pomočjo posameznih zaslonk z izvrtanimi luknjami različnih premerov, ki jih na pokrov turbine prisesa zračni tok. Z zmanjšanjem odprtine se zmanjša tudi obremenitev. Posledica je večja hitrost vrtenja sesalne enote. Zaradi tega se na rotorskih navitjih inducira višja napetost, kar povzroči zmanjšanje električnega toka in s tem tudi vhodne moči. Nadalje je iz tabele 2.3 razvidno, da z manjšanjem zaslonke podtlak narašča, medtem ko pretok zraka pada. Zračna moč dotične sesalne enote doseže največjo vrednost pri zaslonki z odprtino premera $\phi = 19$ mm, izkoristek pa pri zaslonki z odprtino premera $\phi = 16$ mm.

Tabela 2.3: Karakteristika sesalne enote tipa 462.3.451

Napajalna napetost [V]	Zaslonka [mm]	Tok [A]	Vhodna moč [W]	Hitrost vrtenja [min ⁻¹]	Podtlak [kPa]	Pretok zraka [dm ³ /s]	Zračna moč [W]	Izkoristek [%]
230	40	6.90	1547	33883	2.2	45.0	98	6.3
230	30	6.70	1504	34356	6.4	43.0	276	18.3
230	23	6.38	1434	35513	13.5	36.0	485	33.8
230	19	6.04	1361	36734	18.9	28.7	541	39.8
230	16	5.68	1276	38312	23.0	22.2	511	40.0
230	13	5.21	1173	40356	26.1	15.5	405	34.5
230	10	4.72	1065	42619	28.6	9.6	275	25.8
230	6.5	4.31	974	44837	29.7	4.2	125	12.8
230	0	4.01	905	47610	31.3	0	0	0.0

2.2 Napake pri sesalnih enotah družine 462

Kljub precej visoki stopnji avtomatiziranosti proizvodne linije sesalnih enotah družine 462 pa pri proizvodni prihaja do napak. Napake, ki se najpogosteje pojavljajo na končnih izdelkih, so podane v tabeli 2.4. Te napake lahko posredno ali neposredno vplivajo na življenjsko dobo sesalnih enot, v nekaterih primerih pa so le moteče za uporabnika (npr. hrup). Glede na njihov vpliv na delovanje sesalne enote oziroma celotnega sesalnika je določena tudi prioriteta pri njihovi detekciji. Najbolj kritične napake so neuravnoteženost vrtečih se delov enote, napake, ki povzročijo poslabšanje kvalitete komutacije, in napake v zvezi z ležaji.

Tabela 2.4: Napake na sesalnih enotah družine 462 in njihovi simptomi

Napake	Simptomi						
	Podrsavanje turbine (hrup)	Vibriranje rotorja	Vibriranje turbine	Hrup ležaja	Hrup pri izteku	Povečano iskrenje	Zaznavno vizualno
Poškodba na turbini	x		x				
Nezbalansiran rotor		x	x				
Aksialna zračnost ležaja					x		
Slabo zlepljen ležaj				x			
Nepravilna lega ležaja				x	x		
Poškodba na ležajih				x	x		
Poškodovan kolektor						x	
Počene ščetke						x	x
Zatikanje ščetke v vodilu						x	
Nepravilna lega ščetk						x	
Slab stik kolektor-ščetka						x	
Slabi električni spoji						x	
Poškodba na ohišju							x
Zarjaveli deli							x
Brez žiga							x

V tabeli 2.4 so navedeni tudi simptomi, v katerih se našteje napake lahko odražajo. S stališča avtomatske detekcije napak opazimo, da so nekatere merljive (zaznavne) neposredno (npr. nezbalansiran rotor), o navzočnosti drugih pa lahko sklepamo le preko posrednih meritev (npr. slab stik kolektor-ščetka).

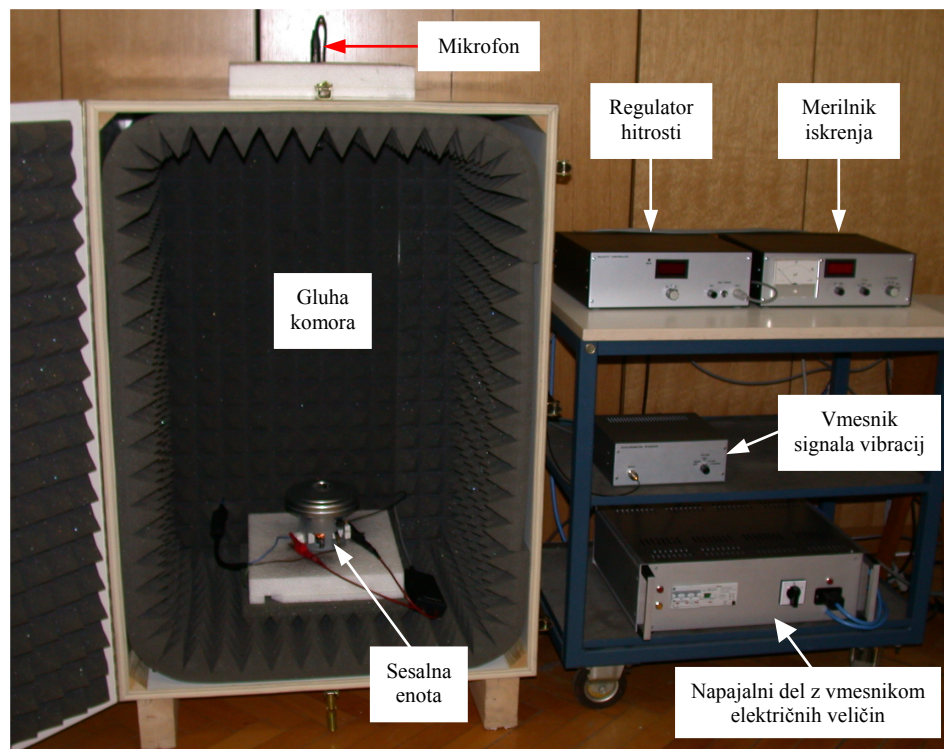
3. Prototip sistema za odkrivanje napak na sesalnih enotah

Z namenom realizacije sistema za avtomatsko odkrivanje napak na sesalnih enotah na koncu proizvodne linije je bil izdelan in preizkušen njegov prototip. Le-ta temelji na zajemu in analizi več signalov, v katerih se posamezne napake oziroma njihovi simptomi odražajo neposredno. S tem so zagotovljeni pogoji za dobro zanesljivost, občutljivost in diagnostično natančnost sistema.

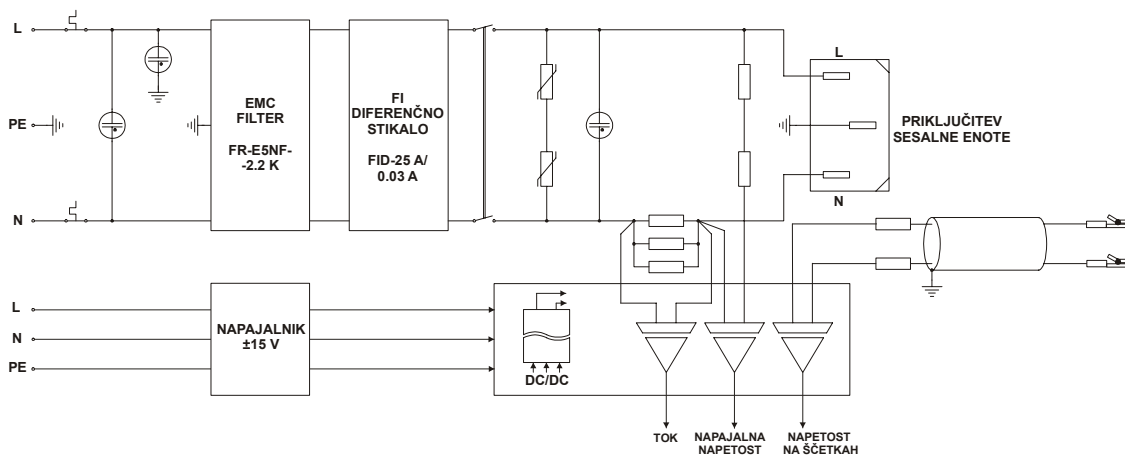
3.1 Eksperimentalno okolje

Eksperimentalno okolje, katerega glavni sestavni deli so prikazani na sliki 3.1, je namenjeno avtomatskemu izvajanju meritev na sesalni enoti za potrebe diagnosticiranja (Petrovčič in sodelavci, 2002a). Poleg tega je uporabno za izvedbo različnih poskusov, ki jih je bilo potrebno opraviti v fazi sinteze diagnostičnega sistema. Omogoča merjenje šestih fizikalnih veličin in sicer toka, napajalne napetosti, napetosti na ščetkah, vibracij, hrupa, hitrosti vrtenja sesalne enote, ter regulacijo slednje po izbranem časovnem profilu.

Blokovna shema napajalnega dela in vmesnika električnih veličin je prikazana na sliki 3.2. Napajalna napetost močnostnega dela je speljana preko filtra, ki izloči motnje iz napajalnega omrežja, in varovalnega stikala do priključnih sponk sesalne enote. Vmesnik električnih veličin, ki ima ločeno napajanje, služi zajemanju toka, napajalne napetosti in napetosti na ščetkah. Tok se meri posredno preko padca napetosti na precizijskih uporih. Napajalna napetost in napetost na ščetkah pa se zajemata direktno s priključnih sponk oziroma ščetk sesalne enote. Vsi trije signali so prilagojeni na napetostni nivo ± 10 V in s pomočjo izolacijskih ojačevalnikov galvansko ločeni od močnostnega dela.



Slika 3.1: Eksperimentalno okolje

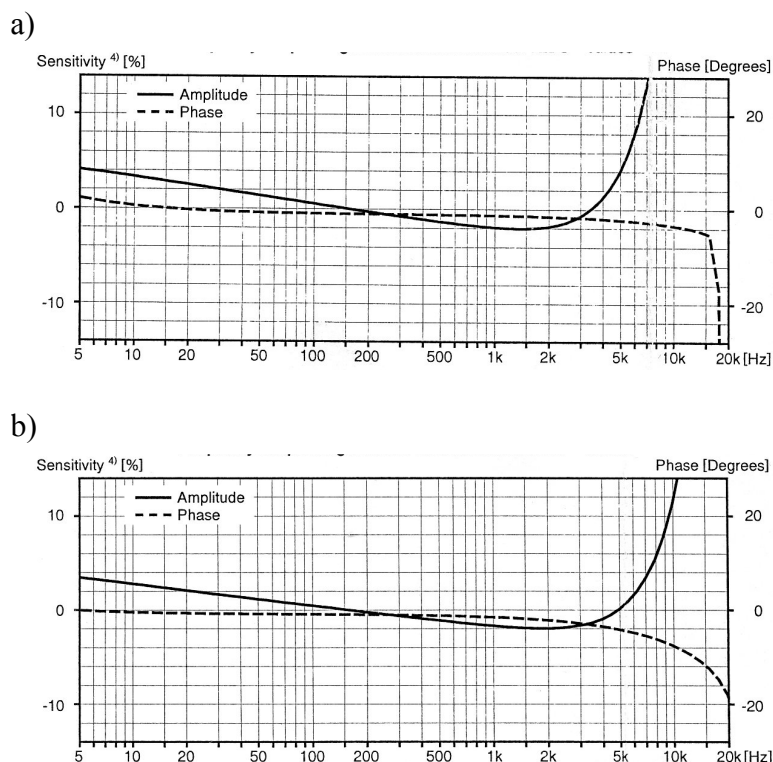


Slika 3.2: Blokova shema napajalnega dela z vmesnikom električnih veličin

Napetost na ščetkah se zajema tudi z merilnikom iskrejnja. Le-ta jo ustrezno obdela, tako da na njegovem izhodu dobimo signal, ki ustreza intenziteti iskrejnja med ščetkami in kolektorjem. Zgradba in princip delovanja merilnika sta podrobneje opisana v pod poglavju 5.3.3.

Vibracije sesalne enote se merijo s piezoelektričnim senzorjem, ki ga na ohišje enote pritrdimo s pomočjo magneta. Uporabljata se dva tipa piezoelektričnih senzorjev proizvajalca Brüel & Kjær: 4507 z zgornjo frekvenčno mejo 6 kHz in 4508 z zgornjo

frekvenčno mejo 8 kHz. Njuni frekvenčni karakteristiki sta prikazani na sliki 3.3. Izhod teh senzorjev je proporcionalen pospešku vibracij, saj se piezoelektrik odziva na silo, ki je enaka produktu merjenega pospeška in seizmične mase v senzorju. Občutljivost senzorja tipa 4507 je 10.10 mV/ms^{-2} , tipa 4508 pa 10.06 mV/ms^{-2} .

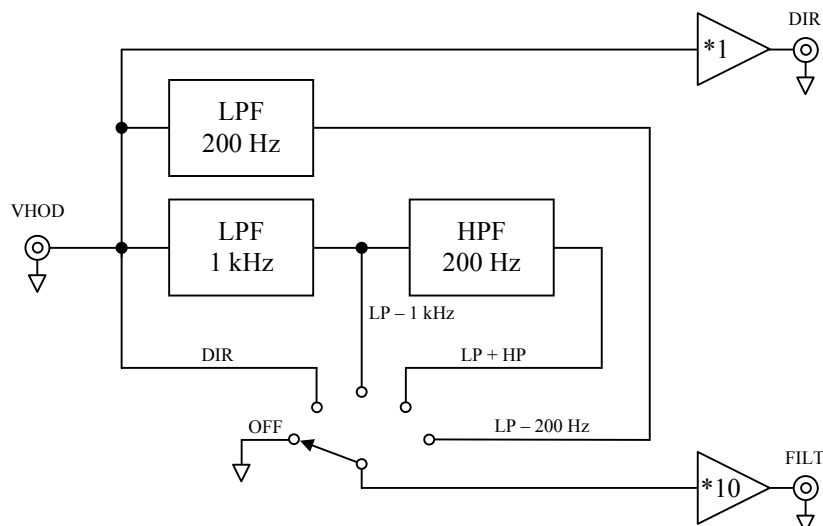


Slika 3.3: Frekvenčni karakteristiki piezoelektričnih senzorjev vibracij: a) tip 4507, b) tip 4508; (vir: uporabniški priročnik Brüel & Kjær)

Vmesnik signala vibracij služi napajanju uporabljenega senzorja ter dodatno omogoča analogno filtriranje zajetega signala. Na voljo imamo sistem treh Besselovih filtrov četrtega reda in sicer nizkopasovnega z mejno frekvenco 1 kHz, nizkopasovnega z mejno frekvenco 200 Hz ter visokopasovnega z mejno frekvenco 200 Hz (Slika 3.4). Glede na omogočene povezave med naštetimi filtri je učinek omenjenega sistema ekvivalenten učinku enega izmed naslednjih treh filtrov:

- nizkopasovnega z mejno frekvenco 1 kHz,
- pasovno propustnega z mejnima frekvencama 200 Hz in 1 kHz ali
- nizkopasovnega z mejno frekvenco 200 Hz.

Pri tem naj opozorimo, da so filtrirani signali na izhodu sistema ojačeni za faktor 10.



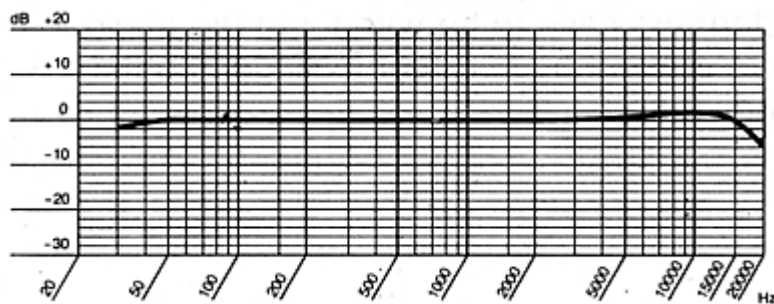
Slika 3.4: Sistem filtrov v vmesniku signala vibracij

Za merjenje hrupa je uporabljen kapacitivni mikrofonski tip C 391B firme AKG s kapsulo tipa CK 91 (Slika 3.5). Ojačenje napajalno/izhodnega modula SE 300B je linearno. Karakteristične lastnosti mikrofona so naslednje:

- frekvenčno območje: od 20 do 20000 Hz (Slika 3.6),
- občutljivost: 10 mV/Pa.



Slika 3.5: Mikrofonski tip C 391B



Slika 3.6: Frekvenčna karakteristika mikrofona; (vir: uporabniški priročnik AKG)

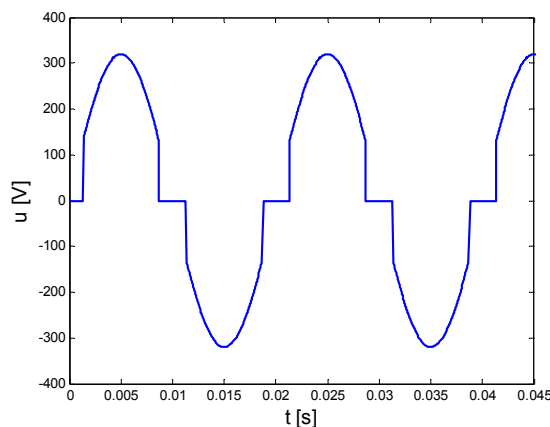
Izhodni signal mikrofona se ojači z mikrofonskim predojačevalnikom za 10, 20, 30, 40 ali 50 dB.

Da bi čim bolj izločili motnje iz okolice, se hrup meri v gluhi komori. To je škatla, katere notranjost je obdana s stožčasto peno, ki dobro absorbira zvok in tako preprečuje njegovo odbijanje. Njene dimenzije so izbrane tako, da v njej ne prihaja do resonance zvoka. Gluha komora torej preprečuje stojno valovanje zraka, hkrati pa duši motilni

hrup iz okolice. Tako je zagotovljeno, da do mikrofona prihaja le hrup direktno s sesalne enote.

Merilnik vrtljajev, ki je vgrajen v podstavek, na katerega je položena sesalna enota, s pomočjo infrardečega senzorja zaznava pobarvano črno liso na osi enote. Njegov izhodni signal je niz pravokotnih impulzov z nizkim nivojem -0.5 V in visokim nivojem $+0.5$ V, ki se pojavljajo enkrat na obrat. Izhod tega merilnika predstavlja tudi povratno zvezo za regulator hitrosti.

Regulator hitrosti omogoča obratovanje sesalne enote pri poljubni hitrosti vrtenja, kar se je izkazalo za potrebno pri nekaterih poskusih. Realiziran je s pomočjo tiristorjev, ki sinusno napajalno napetost preoblikujejo tako, da jo postavijo na 0V, ko le-ta pade pod določen prag (Slika 3.7). Tako lahko s spreminjanjem omenjenega praga nadziramo električno moč, ki je dovedena sesalni enoti, in s tem tudi njeno hitrost vrtenja.



Slika 3.7: Sekanje sinusne napajalne napetosti

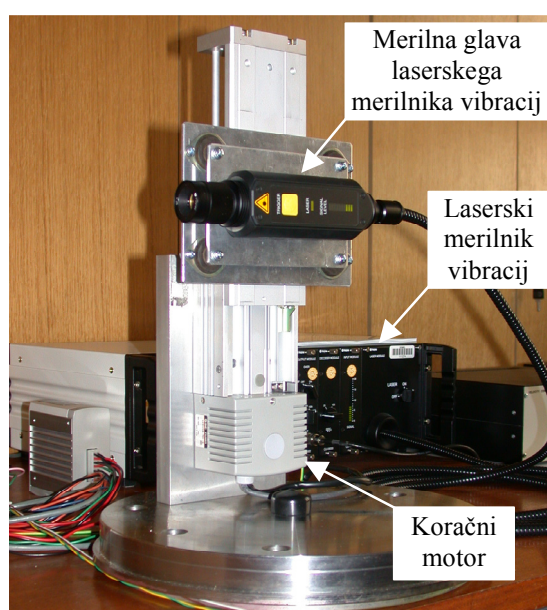
Vsi merjeni signali se vzorčijo s pomočjo kartice NI 6035E, ki je vgrajena v osebni računalnik. En njen izhod pa je uporabljen za generiranje reference regulatorja hitrosti. Omenjena kartica zmora zajemati podatke s hitrostjo 200 kS/s. Ima osem 16-bitnih analognih diferencialnih vhodov in dva 12-bitna analogna izhoda. Območja vhodov in izhodov so ± 10 V. Delovanje kartice se nadzira s programskim paketom LabVIEW.

3.1.1 Pozicionirni mehanizem laserskega merilnika vibracij

Da bi ugodili zahtevam po avtomatskem merjenju vibracij v dveh merilnih točkah na sesalni enoti je bil konstruiran pozicionirni mehanizem, ki omogoča linearno, vertikalno premikanje merilne glave laserskega merilnika vibracij (Slika 3.8). Za izvedbo je bil uporabljen linearni sistem podjetja SMC, tip LXSH2SA-75, skupaj s krmilnikom / močnostno stopnjo tipa LC6D-220AD-Q. Omenjeni sistem sestavljajo koračni motor,

navojno vreteno in paralelni vodili. Prednost pozicioniranja s pomočjo koračnega motorja je v tem, da ne potrebujemo dodatne meritve pozicije.

Merilna glava laserskega merilnika vibracij je na pozicionirni mehanizem pritrjena preko gumijastih blažilnikov, ki dušijo prenos vibracij pozicionirnega mehanizma na merilno glavo. Omenjene vibracije bi sicer motilno vplivale na same meritve, po drugi strani pa bi lahko poškodovale merilno glavo. Pri tem je potrebno omeniti, da koračni motor povzroča vibracije pozicionirnega mehanizma predvsem v vertikalni smeri, medtem ko laserski merilnik vibracij izvaja meritve v horizontalni smeri. Zato je vpliv vibracij pozicionirnega mehanizma na rezultate meritev minimalen (Petrovčič in sodelavci, 2004).



Slika 3.8: Pozicionirni mehanizem laserskega merilnika vibracij

Pri meritvah smo uporabljali laserski merilnik vibracij podjetja Polytec z naslednjo konfiguracijo:

- osnovni modul: CLV-1000,
- dekodirni modul: CLV-M030,
- vhodni modul: CLV-M200,
- izhodni modul: CLV-M002 in
- merilna glava: CLV-700.

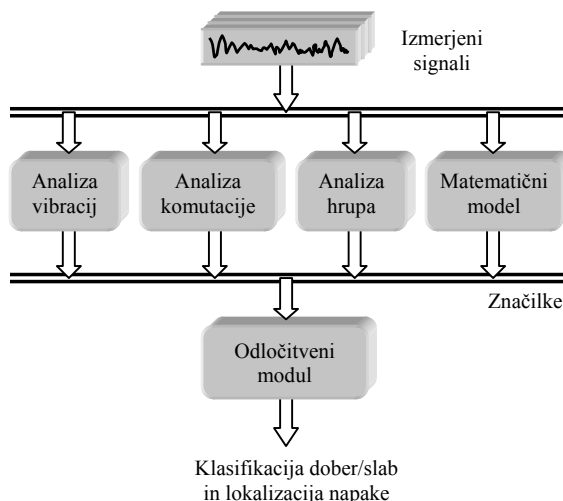
Ta konfiguracija omogoča merjenje vibracij z amplitudo do 1250 mm/s in to v frekvenčnem območju do 250 kHz.

Ob tem naj opozorimo, da je rezultat merjenja vibracij s pomočjo laserskega merilnika hitrost vibracij in ne pospešek, kot je to v primeru uporabe piezoelektričnega

senzorja. Vzrok temu je sam fizikalni princip delovanja laserskega merilnika, ki temelji na Dopplerjevemu efektu in zato zaznava hitrost.

3.2 Struktura diagnostičnega sistema

Odkrivanje napak na sesalnih enotah temelji na kratkotrajnem zagonu enote in analizi šestih izmerjenih veličin: toka, napajalne napetosti, napetosti na ščetkah, vibracij, hrupa in hitrosti vrtenja. Glede na različne uporabljene pristope analiza poteka v štirih ločenih modulih za generiranje značilk, ki bazirajo na analizi vibracij, analizi komutacije, analizi hrupa in matematičnem modelu (Slika 3.9). Generirane značilke predstavljajo vhod v odločitveni modul, ki poda končno diagnozo.



Slika 3.9: Modularna zgradba sistema za odkrivanje napak na sesalnih enotah

Modul za analizo vibracij temelji na vrednotenju karakterističnih komponent v signalu vibracij. Njegova glavna naloga je odkrivanje neuravnoteženosti vrtečih se delov sesalne enote.

Modul za analizo komutacije meri nivo visokofrekvenčnih motenj, ki se inducirajo zaradi prekinjanja toka pri komutaciji. Poslabšana komutacija se praviloma kaže skozi povečano iskrenje, le-to pa se odrazi v zvišanju nivoja induciranih motenj.

Modul za analizo hrupa uporablja različne postopke obdelave signalov, ki omogočajo zaznavanje in vrednotenje različnih tipičnih vzorcev, kateri se v signalu zvoka pojavijo kot posledica določenih napak (okvara ležajev, drgnjenje med rotirajočimi in statičnimi deli). Da bi se izognili dominantni aerodinamični komponenti, ki jo pri nazivni hitrosti vrtenja povzroča turbinsko kolo, se nekatere meritve zvoka

opravijo pri nižjih vrtljajih, kjer prevladujeta mehanski in elektromagnetni hrup (Benko in ostali, 2003).

Semi-fizikalni model služi za izračun bilance električne in mehanske moči pri sesalni enoti. Primeren je predvsem za zaznavanje napak v električnem delu enote in napak, zaradi katerih se izrazito poveča mehanska obremenitev (Rakar, 2003).

Odločitveni modul ugotavlja lokacijo morebitne napake iz nabora generiranih značilk. Pri tem se uporablja postopek mehkega sklepanja, konkretno model prenosa zaupanja (ang. Transferable Belief Model - TBM) (Rakar in Juričič, 2002), ki generira seznam najverjetnejših napak. Posebnost postopka je njegova sposobnost samoocenjevanja stopnje zaupanja v diagnostične rezultate.

Vse računske operacije v naštetih modulih diagnostičnega sistema so realizirane v programskem okolju MATLAB.

V nadaljevanju bosta podrobneje predstavljena sinteza in delovanje le prvih dveh izmed omenjenih modulov za generiranje značilk in sicer modula za analizo vibracij ter modula za analizo komutacije.

4. Modul za analizo vibracij

Težnje po čim boljših izkoristkih sesalnih enot in čim nižjih materialnih stroških proizvodnje silijo proizvajalce h konstruiranju in izdelovanju enot z zelo velikimi nazivnimi hitrostmi vrtenja ter k optimizaciji mas vgrajenih materialov. Oba ukrepa pa sta neugodna s stališča vibracij enot. Zaradi večjih hitrosti vrtenja se namreč povečajo nekatere sile, ki povzročajo vibracije, manjša masa, predvsem ohišji, pa ima za posledico slabše dušenje teh vibracij. Povečan nivo vibracij pomeni večjo obremenitev ležajev in nekaterih drugih sestavnih delov sesalne enote, kar lahko privede do bistvenega skrajšanja njene življenjske dobe. Zato je kontrola nivoja vibracij bistvenega pomena. Drug razlog za omejevanje nivoja vibracij sesalnih enot je hrup. Povečane vibracije sesalne enote namreč povzročajo tresenje velikih površin ohišja sesalnika, v katerega je le-ta vgrajena. Posledica tega pa je nastanek nezaželenega hrupa, ki je moteč za uporabnike. Tretji razlog za merjenje vibracij je ta, da so v signalu vibracij vsebovane informacije o določenih potencialnih napakah na sesalnih enotah. Tako lahko diagnostika nekaterih napak sesalnih enot temelji na ustrezni analizi tega signala.

Za vrednotenje vibracij na elektromotorjih obstaja standard IEC 34-14. V njem so definirane zahteve za merilno opremo, merjena veličina, merilne točke, način vpetja merjenca med izvajanjem meritev in mejne vrednosti izmerjene veličine. Vendar pa ta standard velja le za večje elektromotorje z manjšimi hitrostmi vrtenja (do 3600 vrtljajev na minuto), zato je za sesalne enote neustrezen.

4.1 Obdelava signala vibracij

Iz časovnih posnetkov vibracij sesalne enote le težko sklepamo o njenih lastnostih. Zato je potrebno izmerjeni signal vibracij ustrezno obdelati, tako da iz njega lahko izluščimo čim več informacij. Klasičen pristop, ki se uporablja pri obdelavi signalov, je Fourierjeva transformacija. Le-ta nam signal iz časovnega prostora preslika v frekvenčni prostor, v katerem so razvidne amplitude posameznih frekvenčnih

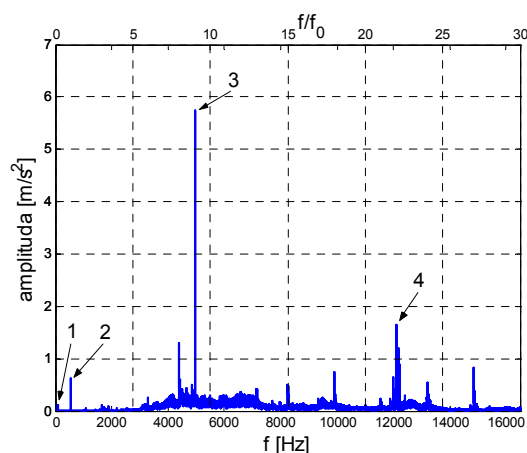
komponent signalu. V primeru signala vibracij sesalne enote se v omenjenih komponentah odražajo določene lastnosti enote.

Glede na lastnosti spektralne analize, ki so predstavljene v dodatku A, frekvenčne spektre signalov vibracij računamo kot povprečje več spektrov, katere dobimo z DFT časovnih izsekov posameznega obravnavanega signala. Omenjeni izseki so izbrani tako, da se medsebojno prekrivajo za dve tretjini, in so uteženi s Hanningovim oknom. Velikost posamezne frekvenčne komponente, ki nas zanima, pa se določi kot integral spektra na določenem frekvenčnem področju v okolici te komponente.

Velikost karakterističnih frekvenčnih komponent lahko ocenimo tudi z določanjem RMS (koren povprečja kvadratov, ang. root mean square) vrednosti signala vibracij, filtriranega z ustreznim filtrom. Pri tem se uporabljajo različni digitalni filtri, kateri so realizirani s pomočjo osebnega računalnika, ali analogni filter, ki je opisan v podpoglavju 3.1.

4.2 Izvori vibracij pri sesalni enoti

V frekvenčnih spektrih signala vibracij vseh sesalnih enot se pri nazivnem obratovanju pojavljajo določene značilne frekvenčne komponente, v katerih se odražajo posamezni izvori vibracij. Le-te so označene na sliki 4.1, kjer je na spodnjo abscisno os nanosena frekvenca v Hz, zgornja abscisna os pa je normirana s frekvenco vrtenja enote ($f_0 = 550$ Hz).

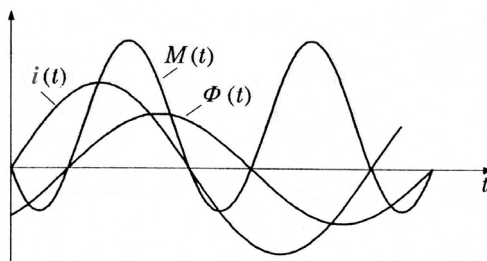


Slika 4.1: Primer frekvenčnega spektra signala vibracij za dobro sesalno enoto. Pomembne komponente v spektru so posledica: 1 – nihajočega navora elektromotorja, 2 – neuravnoteženosti vrtečih se delov, 3 – sunkov zraka turbinskega kolesa in 4 – poskakovanja ščetk po lamelah kolektorja.

Prva izmed omenjenih komponent je pri frekvenci 100 Hz. Ta je predvsem posledica spremenljivega navora elektromotorja (1), ki zaradi izmenične napajalne napetosti niha s frekvenco 100 Hz (Slika 4.2) (Zagradišnik in Slemnik, 2001).

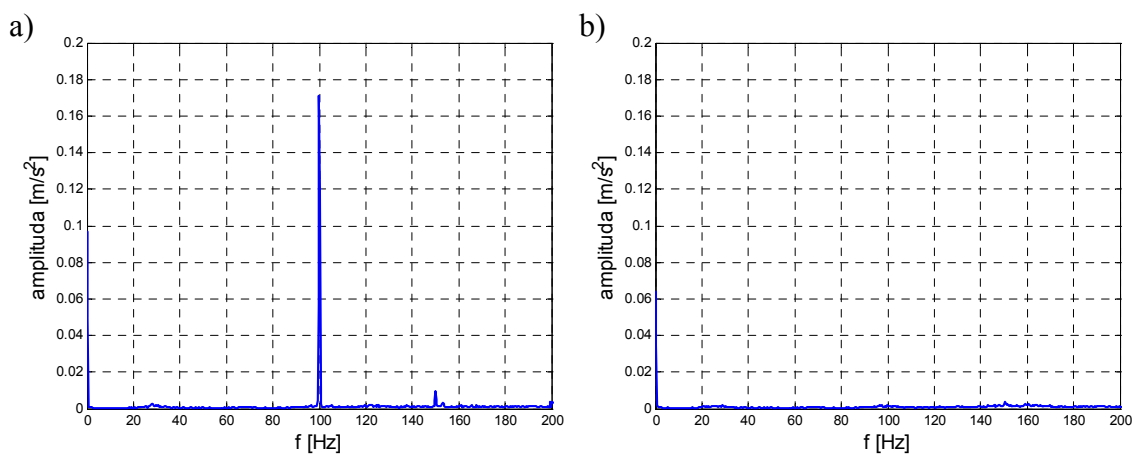
$$\begin{aligned}
 M(t) &= k_m \Phi(t)i(t) \\
 &= \frac{k_m}{2} \hat{\Phi} \hat{I} (\cos \varphi' - \cos(2\omega t - \varphi'))
 \end{aligned} \quad (1)$$

V enačbi 1 je z $M(t)$ označen navor, s k_m konstrukcijska konstanta navora, s $\hat{\Phi}$ amplituda magnetnega fluksa, z \hat{I} amplituda toka, s φ' fazni premik med $\Phi(t)$ in $i(t)$, ω pa je frekvenca napajalne napetosti.



Slika 4.2: Moment univerzalnega elektromotorja pri izmeničnem napajanju

Manjši delež pa h komponenti pri 100 Hz prispeva tudi magnetostrikcija, ki povzroča širjenje in krčenje materiala v izmeničnem vzbujalnem magnetnem polju motorja. To komponento oziroma njena vzroka bi lahko izločili s priključitvijo sesalne enote na enosmerno napajalno napetost (Slika 4.3).



Slika 4.3: Frekvenčni spekter signala vibracij sesalne enote pri: a) izmeničnem napajanju in b) enosmernem napajanju

Najbolj izrazita frekvenčna komponenta se pojavi pri devetkratniku frekvence vrtenja sesalne enote (Slika 4.1). Ta je posledica sunkov zraka, ki jih povzroča turbinsko kolo s svojimi devetimi lopaticami. Zaradi velike hitrosti vrtenja sesalne enote so ti sunki zraka tako močni, da omenjena komponenta prevladuje v signalu vibracij. Zato je neponovljivost amplitude prav te komponente glavni vzrok za neponovljivost meritev signala vibracij. Ker pa je ta komponenta posledica same konstrukcije sesalne enote in neizogibnega sesanja zraka, nanjo ne moremo vplivati. V spektrih vibracij je izrazit še dvakratnik obravnavane komponente (to je frekvenčna komponenta pri osemnajstkratniku frekvence vrtenja), pri nekaterih sesalnih enotah pa tudi njen trikratnik.

Frekvenčna komponenta pri dvaindvajsetkratniku frekvence vrtenja sesalne enote (Slika 4.1) je posledica drsenja ščetk po dvaindvajsetih lamelah kolektorja (Slika 4.4). Ker so le-te med sabo izolirane, ščetke ob vsakem prehodu na novo lamelo rahlo odskočijo in tako povzročajo vibracije.



Slika 4.4: Drsenje ščetke po lamelah kolektorja

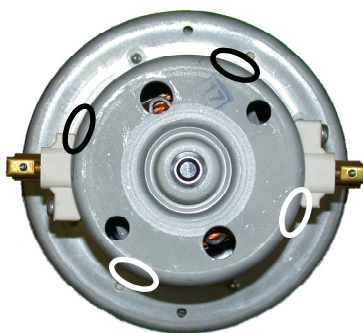
S stališča klasifikacije sesalnih enot je v spektru vibracij (Slika 4.1) najpomembnejša komponenta pri frekvenci vrtenja enote ($f_0 = 550$ Hz). V njej se odražajo vse neuravnoteženosti vrtečih se delov sesalne enote. Med delovanjem enote se namreč zaradi omenjenih neuravnoteženosti pojavijo centrifugalne sile, ki povzročajo vibracije vrtečih se delov. Le-te pa se preko ležajev prenašajo na preostale sestavne dele enote. Zaradi velike nazivne hitrosti vrtenja pridejo do izraza že zelo majhne neuravnoteženosti. Povečana amplituda te komponente je lahko posledica neuspešnega balansiranja, napak pri montaži ali slabše kakovosti nekaterih sestavnih delov. Zato predstavlja osnovo za izločanje enot na podlagi vibracij. Poleg te se pri nekaterih sesalnih enotah pojavi še komponenta pri dvakratniku frekvence vrtenja, ki pa je amplitudno precej manjša.

4.2.1 Širjenje vibracij po sesalni enoti

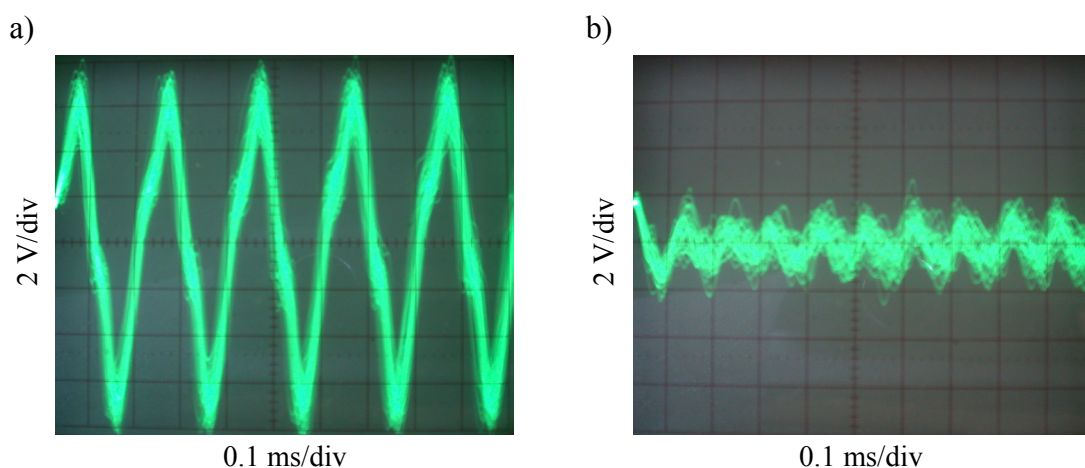
S sprotnim opazovanjem signala vibracij na osciloskopu in njegove RMS vrednosti v različnih točkah po ohišju sesalne enote, smo prišli do naslednjih ugotovitev. K signalu vibracij ne prispeva samo tresenje celotne sesalne enote, ampak tudi valovanja njenega ohišja. Nekatera od teh valovanj so potujoča, druga pa stacionarna. Zlasti potujoča so

zelo moteča, saj povzročajo neponovljivost meritev vibracij. Na srečo so njihove amplitude manjše.

Stacionarna valovanja pa imajo svoje stojne točke in vrhove, katerih položaj je pri različnih sesalnih enotah različen, poleg tega pa je odvisen tudi od hitrosti vrtenja. Pri vseh enotah pa se neglede na hitrost vrtenja pojavijo štiri stojne točke, in to tam, kjer je ohišje pritrjeno na paket statorja (Slika 4.5). Na sliki 4.6 sta prikazana primera posnetkov signala vibracij v vrhu valovanja (Slika 4.6a) in v stojni točki (Slika 4.6b), ki ju vidimo na osciloskopu. Razlika v amplitudah signala je očitna, saj v vrhovih dobimo kar do štirikrat večje vrednosti. Iz frekvenčne vsebine signala pa lahko razberemo, da k valovanju ohišja največ prispeva komponenta pri devetkratniku frekvence vrtenja sesalne enote. Le-to vzbudijo sunki zraka, ki jih s svojimi devetimi lopaticami povzroča turbinsko kolo. Glavni delež vibracij pri sesalnih enotah (deveta harmonska komponenta frekvence vrtenja) se torej iz turbinskega dela kot valovanje širi po celotni enoti.

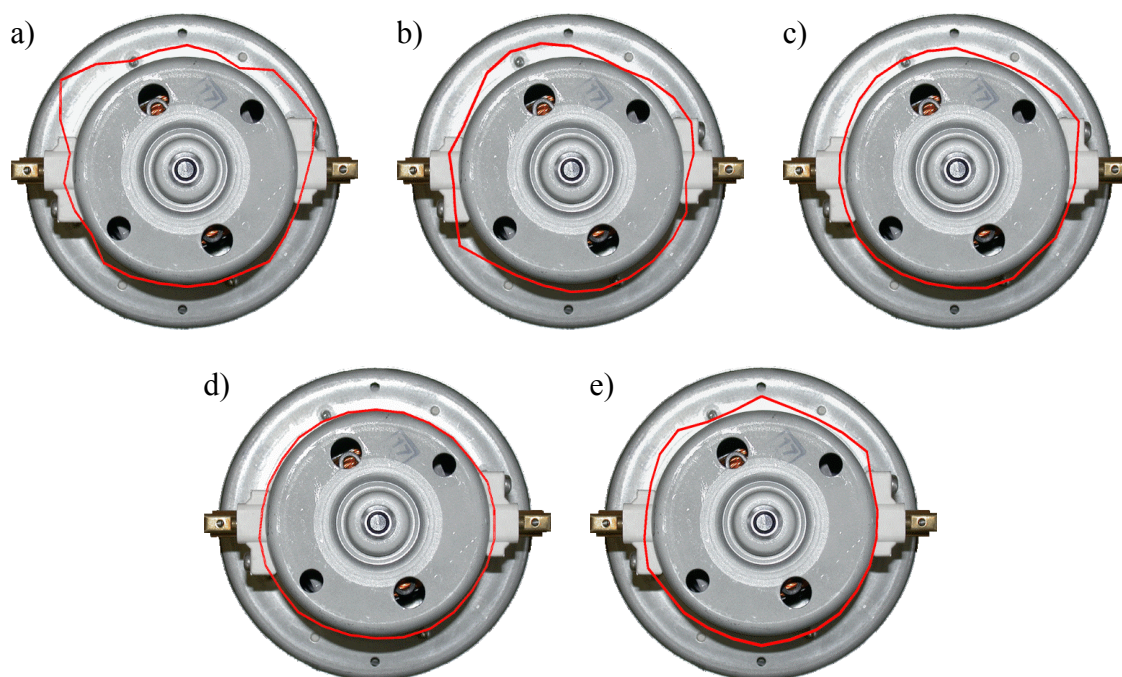


Slika 4.5: Stojne točke pri valovanju ohišja sesalne enote



Slika 4.6: Signal vibracij: a) v vrhu valovanja, b) v stojni točki

Trditve iz prejšnjega odstavka so bile potrjene z različnimi poskusi, pri katerih smo merili RMS vrednost signala vibracij po obodu ohišja sesalne enote, kjer je le-to pritrjeno na paket statorja. Rezultate teh poskusov, ki so bili opravljeni pod različnimi pogoji, ponazarjajo krivulje na obodih sesalnih enot na sliki 4.7.



Slika 4.7: RMS vrednosti signala vibracij po obodu sesalne enote: a) normalno obratovanje, b) pri hitrosti vrtenja 450 Hz, c) z zaslonko $\phi = 16$ mm, d) brez pokrova turbine, e) s pasovno propustnim filtrom signala vibracij okrog frekvence 550 Hz

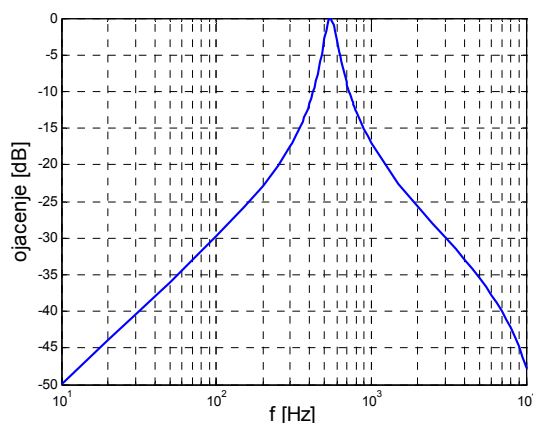
Krivulja na sliki 4.7a predstavlja RMS vrednosti signala vibracij na sesalni enoti pri normalnem načinu obratovanja (hitrost vrtenja 550 Hz, brez zaslonke oziroma $\phi = 40$ mm). Vidimo, da je razlika v velikosti signala v stojnih točkah in vrhovih kar precejšnja.

Meritev, ki je prikazana na sliki 4.7b, je bila opravljena pri nižji hitrosti vrtenja (450 Hz). Pri takšnem načinu obratovanja so sunki zraka turbinskega kolesa šibkejši in zato je tudi nivo signala vibracij manjši. Poleg tega pa se nekoliko spremeni tudi položaj stojnih točk in vrhov valovanj ohišja, saj se pri drugačni vzbujalni frekvenci vzbudijo druga valovanja.

Pri meritvi za sliko 4.7c je bila na odprtino v pokrovu turbine položena zaslonka s premerom $\phi = 16$ mm. S tem se je zmanjšal pretok zraka skozi sesalno enoto in posledično tudi sunki zraka turbinskega kolesa, kar se je odrazilo na precej zmanjšanem nivoju vibracij.

Pri naslednjem poskusu smo meritve izvedli na sesalni enoti, kateri smo predhodno odstranili pokrov turbine in tako popolnoma eliminirali vpliv sunkov zraka turbinskega kolesa. Dobljeni rezultati, ki so predstavljeni na sliki 4.7d, kažejo na precejšnje zmanjšanje valovanja ohišja. V tem primeru k vibracijam največ prispeva tresenje celotne sesalne enote, ki je po pričakovanju enakomerno po celem njenem obodu.

Zadnji poskus je bil enak prvemu (normalno obratovanje sesalne enote), le da smo signal vibracij filtrirali s pasovno propustnim filtrom zvonaste oblike s centrom pri frekvenci vrtenja sesalne enote (Slika 4.8). Ker deveta harmonska komponenta frekvence vrtenja v signalu vibracij tako močno prevladuje, je uporabljeni filter ni popolnoma izločil. Zato so na sliki 4.7e še vedno vidne nekatere stojne točke in vrhovi valovanja ohišja.



Slika 4.8: Frekvenčna karakteristika pasovno propustnega filtra vibracij

4.2.2 Drugi izvori vibracij pri sesalni enoti

Drugi viri vibracij, ki pridejo do izraza pri specifičnih režimih delovanja sesalne enote, so še:

- Različne resonančne frekvence, ki se vzbudijo med zagonom in ustavljanjem sesalne enote. Te se precej razlikujejo od enote do enote. Doslej ni bilo ugotovljene nobene povezave med temi izvori vibracij in kakovostjo sesalnih enot.
- Nihanje rotorja v aksialni smeri med ustavljanjem sesalne enote, ki se pojavi pri enotah z zračnostjo v ležajih. To je sicer napaka, ki jo je potrebno odkriti, vendar se bo za njeno detekcijo uporabljala preprostejša metoda, ki ne temelji na

obdelavi signala vibracij. Zato podrobnejša analiza tega izvora vibracij ni bila opravljena.

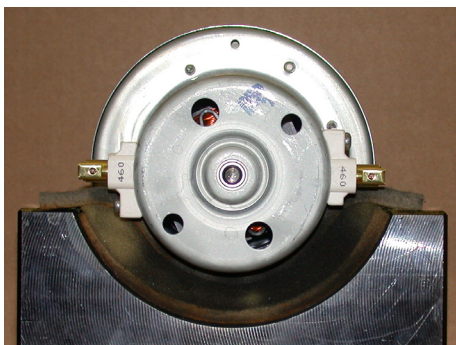
- Okvara ležaja. Tresljaje, ki jih povzroča okvarjen ležaj, lahko zaznamo pri nižjih hitrostih vrtenja sesalne enote (~35 Hz). Vendar pa je informacija o stanju ležaja v signalu vibracij precej popačena, saj zaradi konstrukcije enote vibracij ni možno izmeriti direktno na ležaju samem. Zato se za detekcijo te napake kot primernejša izkaže metoda na osnovi analize hrupa.
- Nihanje ščetk v tangencialni smeri pri ustavljanju sesalne enote. Zaradi nepravilnosti v stiku ščetka-kolektor ali nepravilne lege ščetk v njenem vodilu, se včasih zgodi, da ščetka pri zaustavljanju enote zaniha. To povzroča nezaželene vibracije celotne sesalne enote, zato je potrebno takšne enote detektirati. Težava je v tem, da se tangencialno nihanje ščetk pojavlja pri različnih hitrostih vrtenja, poleg tega pa lahko zaradi obrabe ščetk po določenem času obratovanja izgine.

4.3 Vpetje oziroma postavitve sesalne enote

Pri merjenju vibracij je za zajem verodostojnega signala zelo pomemben način vpetja sesalne enote oziroma ustrezna postavitve na primerno podlago. V idealnem primeru bi morala sesalna enota prosto lebdeči v zraku. S tem bi se izognili dušenju predvsem nizkofrekvenčnih komponent vibracij in vplivom resonančnih frekvenc prijemala. Pri dejanskih meritvah pa mora biti sesalna enota na nek način vpeta. Zato ne moremo govoriti o merjenju vibracij same sesalne enote, temveč le o merjenju vibracij sistema, ki ga predstavljata enota in njeno vpetje. V ta namen so bile preučene prednosti in slabosti različnih načinov vpetja.

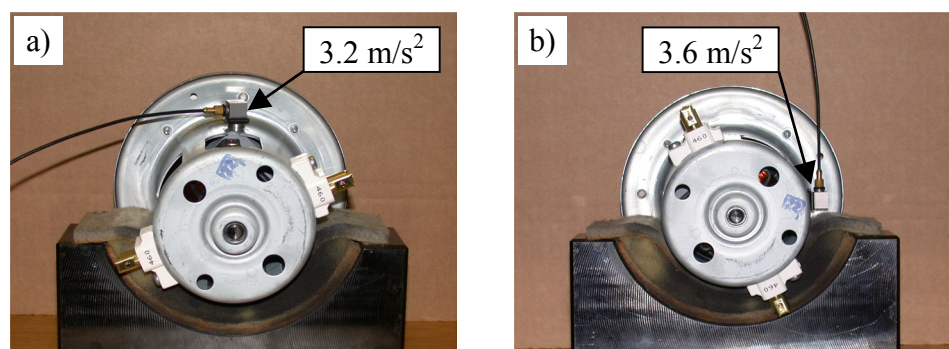
4.3.1 Horizontalen položaj na kovinskem podstavku obdanem s peno

Na sliki 4.9 je prikazana horizontalna postavitve sesalne enote na kovinski podstavek obdan s peno.



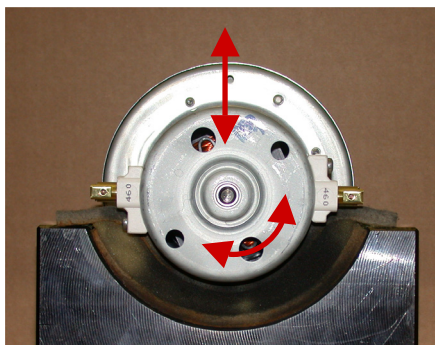
Slika 4.9: Horizontalen položaj sesalne enote na kovinskem podstavku

Takšna postavitev ima kar dve slabosti. Prva je dušenje nizkofrekvenčnih komponent vibracij v vertikalni smeri. Nizkofrekvenčne vibracije namreč predstavljajo večje premike sesalne enote, katere pa trda podlaga močno zaduši. Ta trditev je bila potrjena s preprostim poskusom, pri katerem smo na dva načina izmerili RMS vrednost signala vibracij filtriranega z nizkopasovnim filtrom z mejno frekvenco 1 kHz. Prvič smo vibracije sesalne enote pri normalnem načinu obratovanja izmerili v vertikalni smeri, kot je prikazano na sliki 4.10a. RMS vrednost signala je znašala 3.2 m/s^2 . Nato smo sesalno enoto zasukali za 90° , pri čemer smo pazili, da se položaj senzorja vibracij na sesalni enoti ni spremenil. Ponovno smo izmerili vibracije, tokrat, kot je prikazano na sliki 4.10b, v horizontalni smeri, in dobili vrednost 3.6 m/s^2 . Povečanje signala vibracij v horizontalni smeri v primerjavi z vertikalno smerjo kaže na dušenje vibracij v vertikalni smeri.



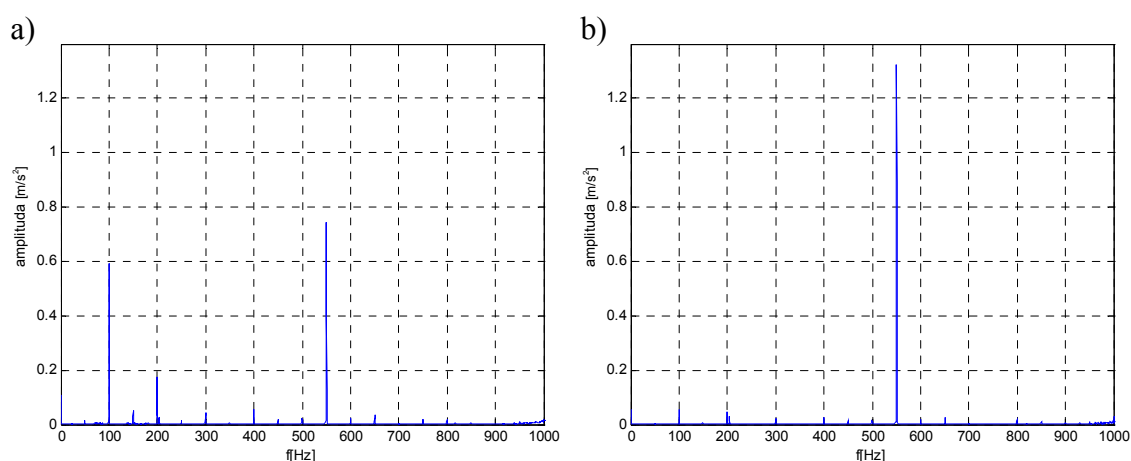
Slika 4.10: Merjenje vibracij: a) v vertikalni smeri, b) v horizontalni smeri

Drugo slabost horizontalne postavitve sesalne enote predstavlja vpliv nihajočega momenta enote na vibracije v vertikalni smeri. Nihajoč moment sesalne enote, ki deluje v tangencialni smeri, povzroča sukanje enote okrog njene osi. Le-to pa se zaradi stika s podlago prenese v vertikalne pomike, kot je prikazano na sliki 4.11.



Slika 4.11: Vpliv nihajočega momenta na vibracije v vertikalni smeri

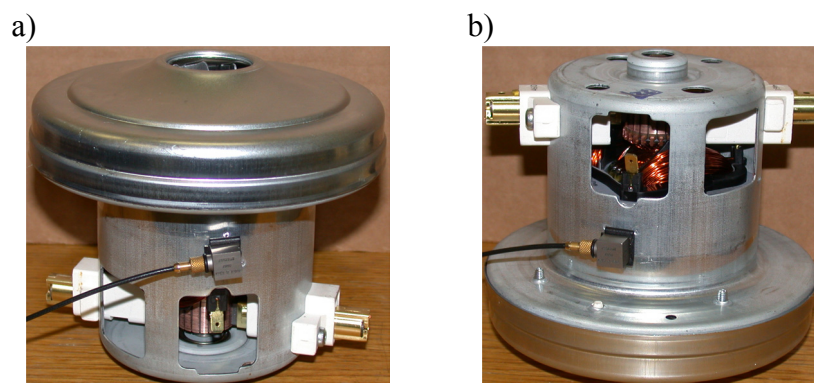
Prejšnjo trditev potrjuje poskus, pri katerem smo na dva načina izmerili signal vibracij na sredini sesalne enote. Signal je bil filtriran z nizkopasovnim filtrom z mejno frekvenco 1 kHz. Prvič smo vibracije merili v vertikalni smeri na horizontalno postavljeni sesalni enoti. Drugič pa smo sesalno enoto postavili v vertikalni položaj, tako da je bila turbina obrnjena navzgor, in pri enakem položaju senzorja na enoti kot v prvem primeru izmerili vibracije v horizontalni smeri. Frekvenčna spektra izmerjenih signalov vibracij sta prikazana na sliki 4.12. Pri vertikalnem položaju sesalne enote (Slika 4.12b) opazimo očitno zmanjšanje frekvenčne komponente pri 100 Hz zaradi nihajočega navora, saj se pri takšni postavitvi enote sunki navora ne morejo prenašati v horizontalno smer. Komponenta pri frekvenci vrtenja sesalne enote (550 Hz) je pri horizontalnem položaju enote (Slika 4.12a) manjša zaradi že omenjenega dušenja nizkofrekvenčnih komponent vibracij.



Slika 4.12: Vpliv nihajočega momenta in dušenje nizkofrekvenčnih komponent vibracij: a) horizontalen položaj, b) vertikalni položaj sesalne enote

4.3.2 Vertikalen položaj sesalne enote na podstavku iz poliuretanske pene

Težave, ki se pojavljajo pri horizontalnem položaju sesalne enote (dušenje nizkofrekvenčnih komponent vibracij, vpliv nihajočega momenta), lahko odpravimo z vertikalno postavitvijo sesalne enote, ki je prikazana na sliki 4.13.



Slika 4.13: Vertikalen položaj sesalne enote: a) s turbino obrnjeno navzgor, b) s turbino obrnjeno navzdol

Pri vertikalni postavitvi sesalne enote imamo dve možnosti kako obrniti enoto in sicer s turbino navzgor (Slika 4.13a) ali s turbino na podlago (Slika 4.13b). Katera je boljša, smo ugotovili z opazovanjem ponovljivosti meritev RMS vrednosti signala vibracij filtriranega z nizkopasovnim filtrom z mejno frekvenco 1 kHz na sredini sesalne enote. Pri postavitvi s turbino navzgor je raztros meritev (standardna deviacija) 0.038 m/s^2 , pri postavitvi s turbino na podlago pa 0.135 m/s^2 . Torej primernejša je postavitve s turbino navzgor. Vzrok za slabšo ponovljivost meritev vibracij pri postavitvi s turbino na podlago je sledeč. Vpliv sunkov zraka, ki, kot je bilo razloženo v podpoglavju 4.2, povzroča neponovljivost signala vibracij, je večji na turbinski del sesalne enote. Poleg tega pa je pokrov turbine iz tanjše pločevine. Zato se pri postavitvi sesalne enote na pokrov turbine vibracije zaradi sunkov zraka bolj prenašajo po celotni enoti.

Slabost vertikalne postavitve sesalne enote s turbino navzgor pa je povečanje komponente vibracij pri osnovni frekvenci vrtenja (550 Hz) na turbinskem delu sesalne enote. Omenjena komponenta vibracij je posledica neuravnoveženosti rotirajočih delov sesalne enote, ki povzročata tresenje celotne enote. Pri vertikalni postavitvi sesalne enote s turbino navzgor pa je onemogočeno tresenje zadnjega dela enote v radialni smeri, ker je le-ta prislonjen na podlago. Pod takšnimi pogoji pa centrifugalne sile zaradi neuravnoveženosti rotirajočih delov povzročajo večje opletanje turbinskega dela, ki ni nikamor vpet.

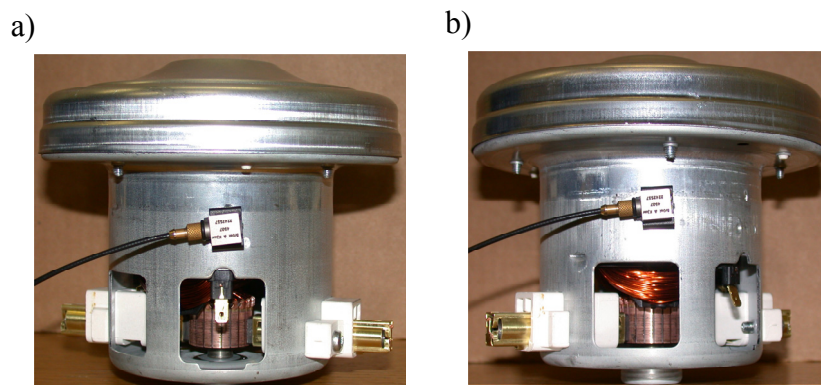
Pri izbiri podlage pa je potrebno paziti, da le-ta nima kakšnih izrazitih resonančnih frekvenc, ki bi vplivale na meritev. Poleg tega je dobro, če je podlaga mehkejša, tako da čim manj duši nizkofrekvenčne komponente vibracij.

Ob vsem tem pa se moramo zavedati, da je sesalna enota pri uporabi vgrajena v ohišje sesalnika in da le-to določa "nazivne" pogoje obratovanja. Zato je pomembno zagotoviti, da pri teh pogojih nivo vibracij ne preseže predpisane meje.

4.4 Merilne točke vibracij pri sesalni enoti

Pri merjenju vibracij je za zajem kvalitetnega in informativnega signala, ki ga potrebujemo za analizo kakovosti sesalne enote, zelo pomembna tudi pozicija merilnih točk na enoti. Zajeti signal mora biti čim manj popačen z motilnimi komponentami vibracij sesalne enote in mora vsebovati komponente, iz katerih lahko sklepamo na njene lastnosti.

V podpoglavju 4.2.1 je bilo povedano, da vibracije na ohišju sesalne enote sestojijo iz tresenja celotne sesalne enote in valovanja njenega ohišja. Koristne informacije o stanju enote so vsebovane le v vibracijah zaradi tresenja celotne enote, medtem ko valovanje ohišja zaradi neponovljivosti predstavlja motnjo, ki jo je potrebno čimbolje eliminirati. Glede na lastnosti valovanja ohišja opisane v podpoglavju 4.2.1 lahko to dosežemo že z ustrežno izbiro merilnih točk. Valovanje ohišja namreč ima na mestih, kjer je ohišje pritrjeno na paket statorja, stojne točke. Z izbiro merilne točke na enem izmed teh mest se izognemo vplivu valovanja ohišja na merjeni signal vibracij, kar se odraža v boljši ponovljivosti meritev. To potrjujejo tudi rezultati poskusa, pri katerem smo opazovali raztros RMS vrednosti signala vibracij filtriranega s pasovno propustnim filtrom z mejnima frekvencama 200 Hz in 1 kHz. Pri postavitvi senzorja na stik med ohišjem in paketom statorja (Slika 4.14a) je raztros 0.0114 m/s^2 , pri postavitvi v točko na ohišju, ki je najbolj oddaljena od paketa statorja, (Slika 4.14b) pa 0.0287 m/s^2 .



Slika 4.14: Pozicija merilnih točk: a) na stiku med ohišjem in paketom statorja, b) na mestu, ki je najbolj oddaljeno od paketa statorja

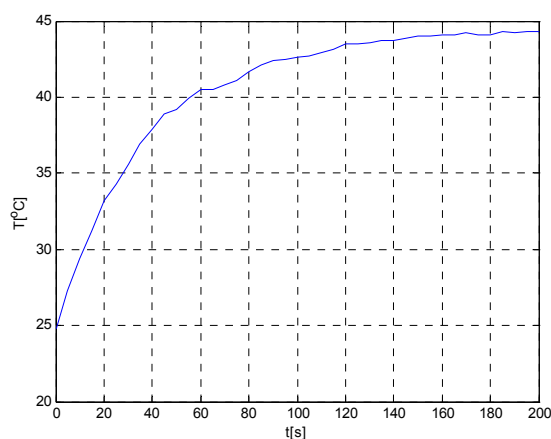
Pri merjenju vibracij turbinskega dela sesalne enote v radialni smeri se je izkazalo, da ne obstaja neka pozicija merilne točke, ki bi imela določene prednosti oziroma slabosti pred ostalimi. Zato pri teh meritvah lahko merilno točko izberemo na poljubnem mestu na obodu turbine.

4.5 Vpliv zaslone na vibracije

Z zaslonko spreminjamo velikost odprtine na pokrovu turbine, skozi katero sesalna enota sesa zrak. Pri manjši odprtini se pretok zraka zmanjša, kar pomeni manjšo obremenitev motorja in zato večjo hitrost vrtenja. Tako se na primer sesalna enota pri popolnoma odprti zaslonki, ko je premer odprtine na pokrovu turbine $\phi = 40$ mm, vrti s hitrostjo 550 Hz, pri zaslonki s premerom $\phi = 16$ mm pa s hitrostjo okrog 610 Hz. Posledica večje hitrosti vrtenja sesalne enote je povečanje centrifugalnih sil zaradi neuravnoteženosti rotirajočih se delov enote, kar rezultira v povečanem nivoju vibracij. S tem pa se tudi poveča resolucija meritev neuravnoteženosti.

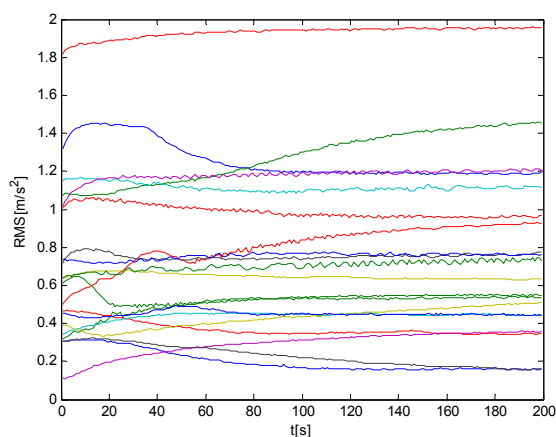
4.6 Vpliv temperature na vibracije sesalnih enot

Sesalna enota se med delovanjem segreva zaradi toplotnih izgub, ki so predvsem posledica magnetenja rotorskega in statorskega paketa. Pri odprti zaslonki ($\phi = 40$ mm), ko je hlajenje največje, se temperatura njenega ohišja na stiku s paketom statorja po ca. 150 s obratovanja dvigne s sobne temperature na približno 44 °C (Slika 4.15). Ob tem je potrebno poudariti, da se različni sestavni deli enote segrejejo na različne temperature.



Slika 4.15: Naraščanje temperature na ohišju sesalne enote po njenem zagonu

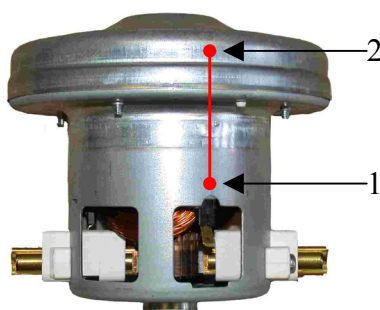
Z naraščanjem temperature se posamezni sestavni deli različno raztezajo, kar povzroča spreminjanje nekaterih lastnosti sesalne enote. To se odraža tudi na vibracijah. Na sliki 4.16 so prikazani rezultati poskusa, pri katerem smo opazovali RMS vrednost signala vibracij med segrevanjem sesalne enote. Signal je bil zajet na stiku med ohišjem in paketom statorja ter filtriran s pasovno propustnim filtrom z mejnima frekvencama 200 Hz in 1 kHz. Meritve so bile opravljene na desetih dobrih sesalnih enotah in desetih sesalnih enotah s povečanimi vibracijami. Vidimo, da nivo vibracij pri nekaterih sesalnih enotah s temperaturo narašča, pri drugih pa pada. Torej ne obstaja neka logična povezava med temperaturo in vibracijami sesalne enote. Zato je za doseganje čimboljše ponovljivosti meritev najbolje, da meritve vibracij opravljamo na toplih sesalnih enotah.



Slika 4.16: Vpliv segrevanja na vibracije sesalne enote

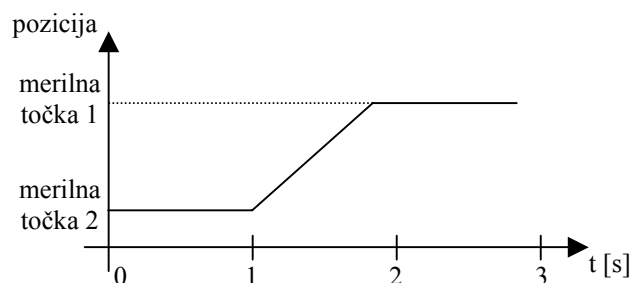
4.7 Meritve vibracij sesalnih enot s pomočjo premikajočega se laserskega merilnika vibracij

Meritve vibracij sesalnih enot s pomočjo laserskega merilnika vibracij, ki ga je mogoče premikati v vertikalni smeri z mehanizmom za pozicioniranje, opisanim v podpoglavju 3.1.1, se je izkazala kot najučinkovitejša rešitev zahteve po avtomatskem merjenju vibracij na proizvodni liniji v dveh merilnih točkah na enoti in sicer na stiku med ohišjem in statorskim paketom ter turbinskem delu sesalne enote (točki 1 in 2 na sliki 4.17). Poleg tega nam omenjeni merilni sistem omogoča izvedbo meritev vibracij pri preletu laserskega žarka iz ene izbrane točke v drugo. S tem dobimo dodatne informacije, kako se nivo vibracij spreminja vzdolž sesalne enote.



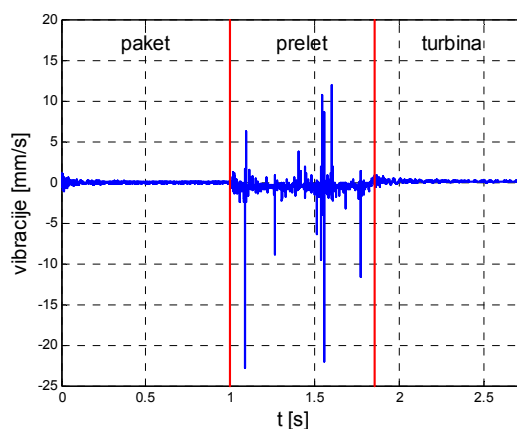
Slika 4.17: Merilne točke na sesalni enoti

Vpliv samega pozicionirnega mehanizma in neravnin profila sesalne enote med merilnima točkama na rezultat meritev vibracij smo ocenili z meritvijo na nedelujoči (mirujoči) enoti. Pri poskusu smo žarek laserskega merilnika najprej za 1 s usmerili na stik med ohišjem in paketom statorja (merilna točka 1). Sledila je meritev med preletom iz točke 1 v točko 2, ki je trajala cca 850 ms. Nazadnje smo še 1 s merili vibracije na turbini (merilna točka 2). Opisani časovni potek pozicije laserskega merilnika med poskusom je razviden s slike 4.18.



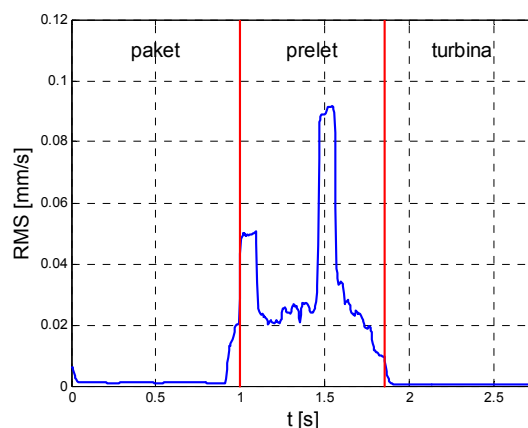
Slika 4.18: Časovni potek pozicije laserskega merilnika

Merjeni signal vibracij je bil filtriran z nizkopasovnim filtrom z mejno frekvenco 20 kHz in vzorčen s frekvenco 50 kHz. Njegov časovni potek je prikazan na sliki 4.19, kjer navpični črti ločujeta prej predstavljene faze meritve. Vidimo, da se pri preletu laserskega žarka iz prve merilne točke v drugo v signalu vibracij pojavijo ostri impulzi. Le-ti so posledica neravnin (robov) profila sesalne enote, preko katerih potuje žarek, in zato predstavljajo motnjo v meritvi.



Slika 4.19: Signal vibracij pri nedelujoči sesalni enoti

Izkaže pa se, da po filtriranju signala s filtrom, ki izloči komponento pri frekvenci vrtenja sesalne enote, omenjena motnja postane zanemarljiva. Na sliki 4.20 je prikazan časovni potek RMS vrednosti signala vibracij s slike 4.19 filtriranega z Butterworthovim pasovno propustnim filtrom četrtega reda z mejnima frekvencama 450 in 550 Hz. RMS vrednosti so izračunane na časovnih izsekih dolžine 100 ms, ki si vzdolž signala sledijo vsake 4 ms. Opazimo, da je nivo motenj manjši od 0.1 mm/s. Kot bomo videli kasneje, je to najmanj petkrat manj od nivoja vibracij, ki jih ima dobra sesalna enota med obratovanjem.

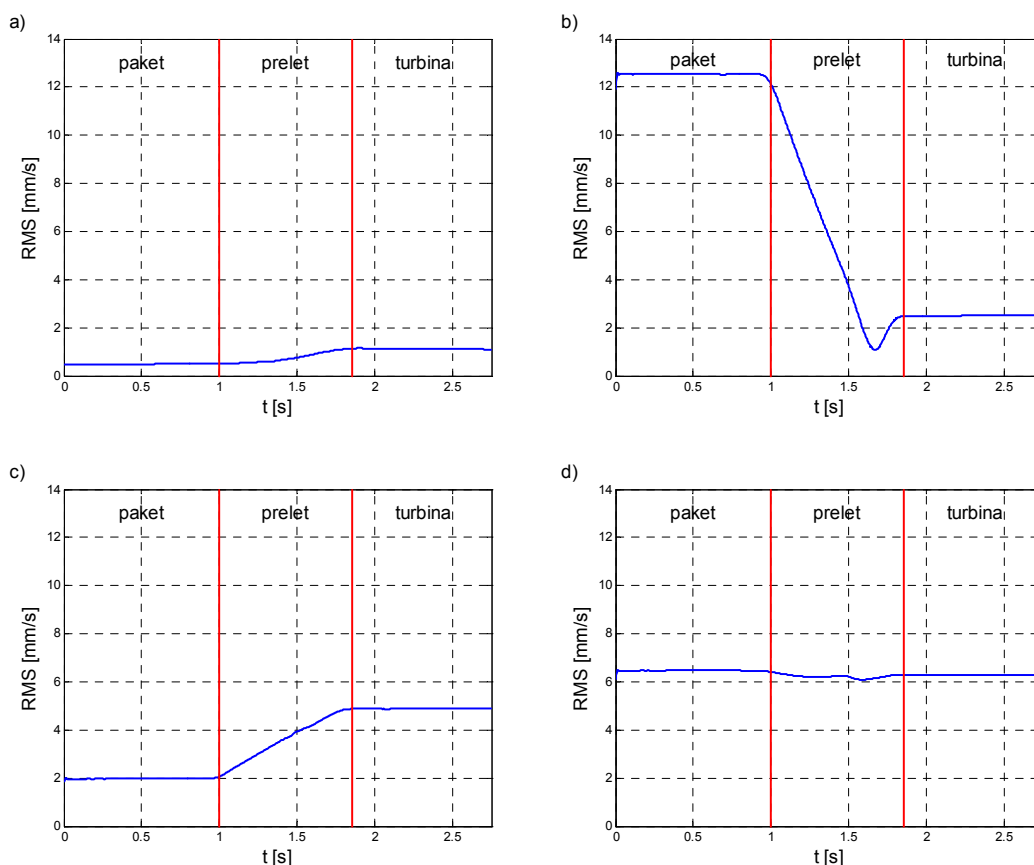


Slika 4.20: RMS vrednost signala vibracij pri nedelujoči sesalni enoti

Naj na tem mestu še omenimo, da se pri predstavljenem načinu merjenja vibracij kljub spremembam razdalje med merjencem in laserskim merilnikom, do katerih prihaja zaradi neravnega profila sesalne enote, ne pojavijo težave z zagotavljanjem zadostnega nivoja odbitega laserskega žarka z ohišja enote, ki je potreben za pravilno delovanje merilnika.

Na sliki 4.21 so prikazane RMS vrednosti signalov vibracij izmerjenih na štirih sesalnih enotah med obratovanjem in sicer na dobri enoti (Slika 4.21a), enoti z nebalansiranim rotorjem (Slika 4.21b), z nebalansiranim turbinskim kolesom (Slika 4.21c) ter enoti z nebalansiranim rotorjem in turbinskim kolesom (Slika 4.21d). Meritve in obdelava signalov so bili izvedeni na enak način kot v že predstavljenem primeru nedelujoče sesalne enote. Hitrost vrtenja sesalnih enot je bila 500 Hz. Z grafom je jasno razvidno, na katerih delih posameznih sesalnih enot so vibracije zaradi neuravnoteženosti izrazitejše. Glede na to lahko sklepamo, ali vibracije izvirajo iz neuravnoteženosti rotorja ali turbinskega kolesa.

Nivo vibracij (RMS), izmerjen med preletom laserskega žarka iz merilne točke 1 v merilno točko 2, se pri nekaterih sesalnih enotah spreminja "linearno" (npr. slika 4.21c), pri drugih pa na tej poti doseže nek minimum (npr. slika 4.21b). Iz tega poteka je mogoče sklepati o faznem zamiku med neuravnoteženostjo rotorja in turbinskega kolesa. V prvem primeru zgornji (turbina) in spodnji del enote nihata sofazno. V drugem primeru pa omenjena dela nihata s faznim zamikom. Zato se med obema merilnima točkama pojavi voz, v katerem je nivo vibracij minimalen.

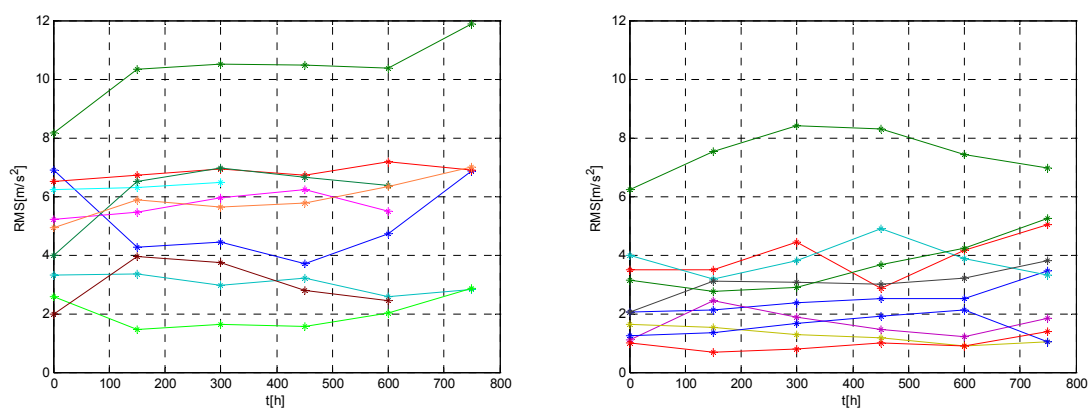


Slika 4.21: RMS vrednosti signalov vibracij pri: a) dobri sesalni enoti, b) enoti z nebalansiranim rotorjem, c) enoti z nebalansiranim turbinskim kolesom, d) enoti z nebalansiranim rotorjem in turbinskim kolesom

4.8 Zveza med vibracijami in življenjsko dobo sesalnih enot

S spremljanjem vibracij sesalnih enot tekom trajnostnega testa smo želeli ugotoviti, kakšen je vpliv vibracij na življenjsko dobo in ali se napake oziroma pomanjkljivosti, ki so vzrok za predčasno odpoved, pred prenehanjem delovanja odražajo v vibracijah.

Poskus je bil opravljen na dvajsetih dobrih sesalnih enotah. Pred in med trajnostnim testom v razmkih po 150 ur delovanja smo merili RMS vrednosti signala vibracij filtriranega s pasovno propustnim filtrom z mejnima frekvencama 200 Hz in 1 kHz. Signal je bil zajet na stiku med ohišjem in paketom statorja.



Slika 4.22: Rezultati meritev vibracij na dvajsetih dobrih sesalnih enotah med trajnostnim testom

Rezultati meritev vibracij na sesalnih enotah med trajnostnim testom so prikazani na sliki 4.22. Vidimo, da se nivoji vibracij posameznih enot tekom testa bistveno ne spreminjajo. Na splošno ni opaziti nekega značilnega gradienta. Tudi pri enotah, ki so predčasno odpovedale, pred prenehanjem delovanja ni significantnih sprememb, ki bi lahko kazale na določene slabosti konkretne enote ali predčasno odpoved.

5. Modul za analizo komutacije

Sklop ščetke-kolektor pri univerzalnih elektromotorjih predstavlja mehansko stikalo, ki preklaplja med lamelami kolektorja, na katere so priključena rotorska navitja. Na ta način je doseženo, da kljub vrtenju rotorja tok po rotorskih navitjih vedno teče v ustrezno smer, kar zagotavlja konstantno smer momenta in s tem pravilno delovanje motorja. Omenjeni proces preklapljanja imenujemo komutacija. Že od izuma kolektorskega motorja v drugi polovici devetnajstega stoletja pa je znano, da prav komutacija predstavlja najšibkejšo točko pri teh motorjih.

5.1 Pomen vrednotenja kvalitete komutacije in obstoječe rešitve

Zaradi elektromagnetnih pojavov pri komutaciji prihaja do iskrenja med lamelami kolektorja in ščerkami. Le-to pa ima kar nekaj predvsem negativnih posledic, ki bistveno vplivajo na lastnosti univerzalnih elektromotorjev. Zaradi iskrenja se na ščerkah pojavijo inducirane visokofrekvenčne napetostne motnje, ki jih motor oddaja v napajalno omrežje in ga tako "onesnažuje". Poleg tega povečano iskrenje pomeni hitrejšo obrabo ščerk in s tem krajšo življenjsko dobo motorja. Po drugi strani pa lahko tudi prešibko iskrenje predstavlja slabost. Pri iskrenju namreč zgorevajo prašni delci, ki nastanejo zaradi mehanske obrabe ščerk (trenja med lamelami kolektorja in ščerkami). Na ta način je zagotovljeno stalno čiščenje kolektorja. V primeru nezadostnega iskrenja ali celo njegove odsotnosti se ti prašni delci začnejo nabirati v režah med lamelami kolektorja. S tem se zmanjša izolacija med lamelami, kar povzroči poslabšano delovanje motorja ali celo njegovo odpoved.

Torej, lahko rečemo, da ima kvaliteta komutacije, od katere je odvisna intenziteta iskrenja, bistven vpliv na življenjsko dobo univerzalnih elektromotorjev. Zato je objektivno ovrednotenje kvalitete komutacije zelo pomembno tako pri nadzoru omenjenih motorjev med obratovanjem, kot pri končni kontroli novih motorjev na proizvodni liniji. Z analizo kvalitete komutacije se je predvsem v devetdesetih letih

prejšnjega stoletja ukvarjalo kar nekaj avtorjev. Pri tem so se posluževali različnih pristopov, ki so jih tudi patentirali.

Za nadzor nad iskrenjem v smislu napovedovanja odpovedi ali preventivnega vzdrževanja se predvsem pri večjih strojih v obratovanju intenziteta iskrenja meri posredno preko merjenja svetlobnega toka, ki ga povzroča iskrenje. Na tem pristopu temeljijo rešitve, ki jih v svojih patentnih dokumentih predlagajo Shiozaki (1985), Shiozaki in sodelavci (1986), Nagase in sodelavci (1986) ter Yamada (1997). Prednost optičnega merjenja je v brezkontaktni meritvi, slabost pa v občutljivosti na spreminjajočo se svetlobo iz okolja, ki lahko moti meritve. Naštete patentirane rešitve se tako nanašajo predvsem na postopke izločanja optičnih vplivov okolice in sicer s sinhronizacijo optičnega signala s hitrostjo vrtenja in z uporabo usmerjenih optičnih vlaken. Te metode so zaradi potrebe po nameščanju optičnega sistema manj primerne ali celo neprimerne za končno kontrolo pri velikoserijski proizvodnji malih elektromotorjev.

Zaradi električno povzročenega iskrenja v okolici kolektorja nastajajo radiofrekvenčne (RF) motnje. To omogoča, da se intenziteta iskrenja lahko meri tudi posredno preko merjenja nivoja emisije RF polja, ki ga motor oddaja. Rešitev, ki se ponuja, je postavitve merilne antene v bližino kolektorja in merjenje nivoja RF signala, ki ga sprejmemo na anteni. Takšno metodo v svojih patentih zagovarjajo številni avtorji: Michiguchi in Ideumi (1981), Obara in Miyashita (1981), Teraguchi (1981), Watanabe (1983, 1986), Miyashita (1985), Michiguchi in Tanisaka (1986) ter Ouchi in sodelavci (1987). Osnovna prednost te metode je v brezkontaktni meritvi. Glavna slabost pa je v običajno visokem nivoju RF motenj iz okolice. Izvajanje meritev RF emisije elektromotorjev v elektromagnetno izolirani komori ni primerno za potrebe kontrole pri serijski proizvodnji. Navedeni izumi tako predstavljajo predvsem rešitve, ki na druge načine zmanjšujejo vplive zunanjih motilnih polj na meritve intenzitete iskrenja. Le-ti temeljijo na kombinaciji s pomožnimi meritvami, na postavitvi in obliki antene, kar pa zopet bistveno zmanjša njihovo praktično uporabnost za serijsko preizkušanje elektromotorjev na proizvodni liniji.

Tawara in sodelavci (1985a) ter Nagano in sodelavci (1989) rešujejo problem ovrednotenja kvalitete komutacije z uporabo pomožnih ščetk. To je pri velikih strojih (predvsem enosmernih generatorjih) morda upravičeno, pri manjših elektromotorjih pa je takšna rešitev neprimerna, saj bi pomenila občutno zvišanje proizvodnih stroškov.

Toyoda in sodelavci (1980), Tanisaka in sodelavci (1982) ter Watanabe (1983) za meritve nivoja motenj, ki jih povzroča iskrenje, uporabljajo magnetni sklop, katerega sestavljata napajalni vod za motor in njemu paralelni vod. Med njima prehaja motilni signal po principu visokofrekvenčnega tokovnega transformatorja. Tak način odvzema je še posebej ustrezen pri motorjih večjih moči. Osnovna pomanjkljivost te metode pa je, da so v meritve vključene tudi motnje iz napajalnega omrežja. Zato je slednje potrebno predhodno izločiti s pomočjo močnostnih filtrov. Izkaže pa se tudi, da je nivo

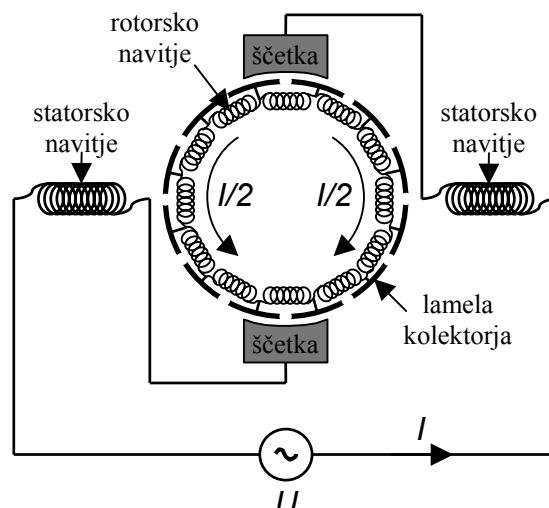
tako zajetega signala pri serijsko vezanih motorjih zelo nizek, saj statorska navitja delujejo kot učinkovita dušilka za motnje, ki nastajajo na ščetkah. V rešitvi, ki jo podajajo Tawara in sodelavci (1985b), je zajem motilnega signala izveden napetostno in sicer paralelno s statorskim navitjem. V tem primeru statorsko navitje zaradi svoje induktivnosti dvigne nivo motenj pri višjih frekvencah, kar rezultira v ugodnejšem nivoju signala. Zopet pa tudi ta rešitev ni imuna proti motnjam iz napajalnega omrežja.

Rešitev, ki jo v svojem patentu predlagajo Tawara in sodelavci (1985c), ima zelo ugoden zajem signala neposredno na ščetkah elektromotorja. Toda za zajem uporablja izolacijski ojačevalnik, ki nima dovolj velike pasovne širine, da bi zajel glavnino motilnega signala električne iskre. Zato gre v tej rešitvi predvsem za detekcijo tokovne spremembe, ki nastane pri komutaciji. Ta pa ni odvisna samo od intenzitete isker, temveč predvsem od trenutnega toka skozi motor. Avtorji predlagajo še kombiniranje opisanega zajema s pomožno meritvijo, npr. z merjenjem svetlobnega toka isker ali z merjenjem vibracij ščetke.

Metoda za ovrednotenje kvalitete komutacije oziroma intenzitete iskrenja univerzalnih elektromotorjev, predstavljena v tem delu, temelji na merjenju RF motenj, ki jih povzroča iskrenje (Petrovič in sodelavci, 2002b). Po tej metodi je zajem signala izveden neposredno pri izvoru omenjenih motenj, to je na ščetkah elektromotorja. S tem je zagotovljen ugoden nivo signala in hkrati zelo učinkovito zadušen vpliv motenj iz napajalnega omrežja. Zaradi njene enostavne uporabe je primerna tudi za končno kontrolo pri velikoserijski proizvodnji elektromotorjev.

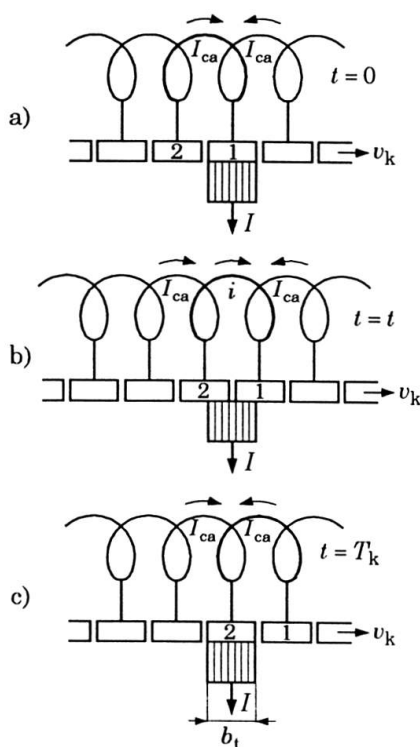
5.2 Komutacija pri univerzalnih elektromotorjih

Univerzalni elektromotor je elektromehanski pretvornik, ki ga lahko priključimo tako na izmenično kot na enosmerno napetost. To omogoča njegov princip delovanja, ki je razviden iz električne sheme na sliki 5.1. Serijska vezava statorskih in rotorskih navitji zagotavlja največji vrtilni moment, saj pri takšni vezavi teče isti tok skozi statorska in rotorska navitja in je zato bremenski tok v fazi z magnetilnim. Tok skozi navitja rotorja teče po dveh paralelnih vejah in sicer po vsaki veji ena polovica. Tok skozi navitja ene veje teče v nasprotni smeri kot skozi navitja druge veje. S tem je zagotovljeno, da elektromagnetne sile, ki delujejo na rotorska navitja, povzročajo moment v pravi smeri. Zaradi vrtenja rotorja pa rotorska navitja prehajajo iz ene veje v drugo, kar pomeni, da mora tok v njih spreminjati smer. Torej lahko rečemo, da je komutacija spreminjanje smeri toka v komutirajoči tuljavi (Zagradišnik in Slemnik, 2001; Jereb, 1975).

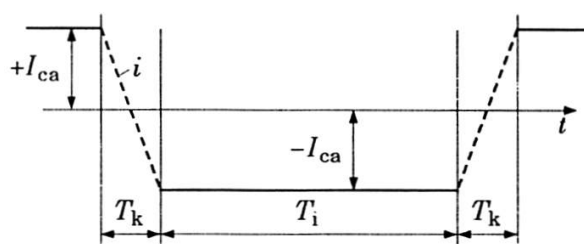


Slika 5.1: Električna shema univerzalnega elektromotorja

Kaj se pri komutaciji dejansko dogaja, je razvidno s slike 5.2. Opazujemo navitje, ki je priključeno na lameli kolektorja označeni z 1 in 2. Najprej (Slika 5.2a) se to navitje nahaja v levi paralelni veji. Skozenj teče tok $I_{ca} = I/2$ v desno smer, ki nadaljuje pot preko lamele 1 in ščetke pod njo. V naslednjem koraku (Slika 5.2b), ko se rotor zavrti za določen kot, ščetka spoji lameli 1 in 2 in opazovano navitje je v kratkem stiku. Kot je razvidno s slike 5.3, v času komutacije T_k , to je času, ko je komutirajoče navitje kratko vezano preko dveh sosednjih lamel in ščetke, tok skozi omenjeno navitje spremeni smer. Po končani komutaciji (Slika 5.2c) se opazovano navitje nahaja v desni paralelni veji in skozenj teče tok I_{ca} v levo smer, ki nadaljuje pot preko lamele 2 in ščetke. Torej pri komutaciji gre za vklapljanje in izklapljanje induktivnega tokokroga, v katerem se spreminja smer toka. Naj na tem mestu še dodamo, da mora v času komutacije komutirajoče navitje ležati v magnetno nevtralni coni. S tem dosežemo, da na njem ni inducirane napetosti, ki bi vplivala na potek spreminjanja smeri toka.

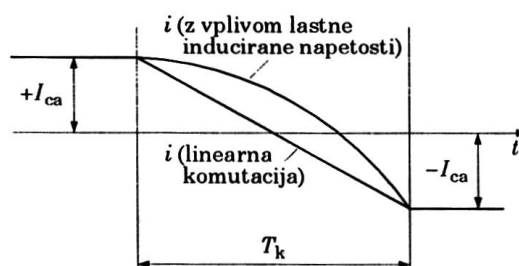


Slika 5.2: Potek komutacije



Slika 5.3: Časovni potek toka v komutirajočem navitju

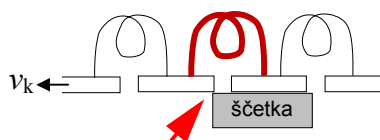
Na kvaliteto komutacije bistveno vpliva potek spreminjanja smeri toka v komutirajočem navitju. V idealnem primeru bi se tok spreminjal linearno (Slika 5.4). Vendar je zaradi lastne inducirane napetosti $e_t = -L \frac{di}{dt}$, ki nasprotuje spreminjanju toka v navitju, to spreminjanje na začetku počasnejše, proti koncu komutacijskega časa, ko lamela komutatorja že zapušča ščetko, pa hitrejše (Slika 5.4). Včasih pa se lahko zgodi, da tok še ne popolnoma spremeni smeri, ko čas komutacije že poteče oziroma lamela že zapusti ščetko. V tem primeru se zaradi prekinitve induktivnega tokokroga in s tem nenadne spremembe toka v njem inducira visoka napetost, ki povzroči preskok iskre med odhajajočo lamelo in robom ščetke. Iskra ponovno vzpostavi kratek stik, tako da se obračanje smeri toka lahko izvede do konca.



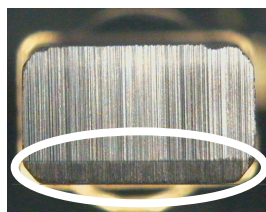
Slika 5.4: Spreminjanje smeri toka v komutirajočem navitju

Zaradi zelo majhnih stičnih površin med odhajajočimi lamelami in ščetko pa se na robu ščetke pojavlja tudi zelo visoka tokovna gostota, ki povzroča lokalna žarenja ščetkinega materiala.

Da prihaja do iskrenja le na tistem robu ščetke, kjer jo lamele zapuščajo (Slika 5.5), potrjuje tudi slika 5.6, s katere je razvidno, da je na površini ščetke, po kateri drsi kolektor, zaradi iskrenja ožgan le omenjeni rob.



Slika 5.5: Mesto pojava iskre

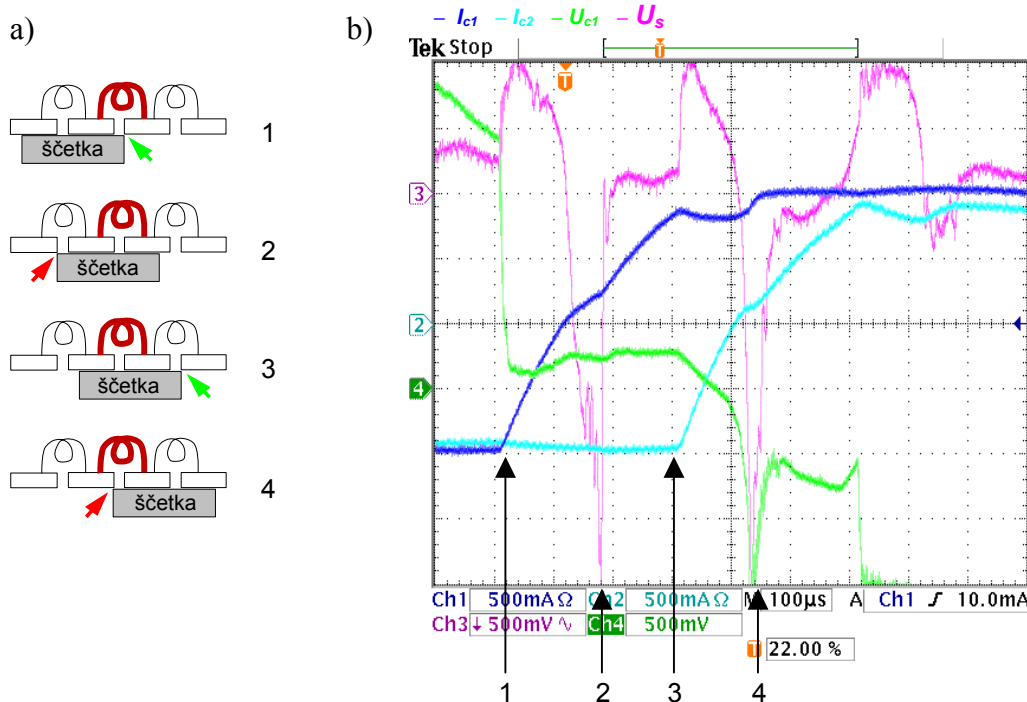


Slika 5.6: Ožgan rob na površini ščetke, po kateri drsi kolektor

5.2.1 Komutacija pri sesalnih enotah

V tem podglavju so predstavljene dejanske razmere na komutirajočem navitju v univerzalnem elektromotorju sesalne enote. Pri omenjenem elektromotorju je razmerje med širino ščetke in širino lamele 1.7 (Slika 5.7a). To pomeni, da sta v določenih časovnih intervalih z eno ščetko kratko vezani dve navitji hkrati. Torej se komutacija v nekem navitju začne, še preden se le-ta v sosednjem navitju pod isto ščetko zaključí.

Meritve so bile opravljene na posebno prirejani sesalni enoti (Rejec in sodelavci, 2002), ki je omogočala zajem naslednjih električnih veličin: tokova v dveh rotorskih navitjih, napetost na enem rotorskem navitju in napetost na ščetki. Zaradi konstrukcijskih sprememb so se meritve lahko izvajale le pri nižjih hitrostih vrtenja (~ 160 Hz).



Slika 5.7: Dejanske razmere na komutirajočem navitju pri sesalni enoti: a) posamezni tipični koraki komutacije, b) časovni poteki nekaterih veličin: I_{c1} – tok v srednjem navitju, I_{c2} – tok v desnem navitju, U_{c1} – napetost na srednjem navitju in U_s – napetost na ščetki

Na grafu slike 5.7b so prikazani časovni poteki izmerjenih signalov. V prvem koraku, ko ščetka kratko sklene opazovano navitje (rdeče navitje na sliki 5.7a), napetost na njem pade U_{c1} , tok skozenj I_{c1} pa začne spreminjati smer. V tem času napetost na ščetki U_s rahlo naraste. V naslednjem koraku ena lamela predhodnega navitja zapusti ščetko in s tem nenadoma prekine induktivni tokokrog. Zato se na tem navitju inducira napetost, ki se kot velika negativna špica odrazi tudi na napetosti na ščetkah U_s . V tretjem koraku ščetka kratko sklene desno navitje na sliki 5.7a. Podobno kot v srednjem navitju v prvem koraku se sedaj v desnem navitju začne spreminjati smer toka I_{c2} , napetost na ščetki U_s pa rahlo naraste. V zadnjem koraku ena lamela srednjega navitja zapusti ščetko. Zaradi nenadne prekinitve induktivnega tokokroga se na navitju inducira napetostna špica (U_{c1}). Ta špica se odrazi tudi na napetosti na ščetki U_s .

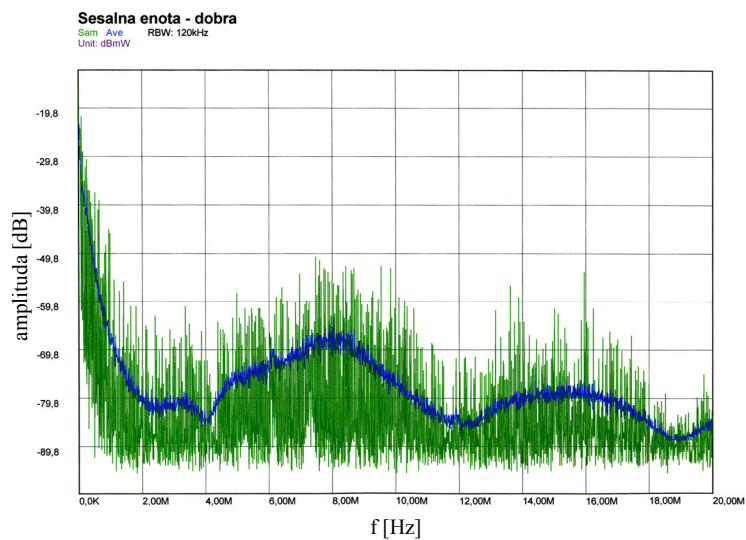
5.3 Analiza kvalitete komutacije

Pri univerzalnih elektromotorjih se kvaliteta komutacije odraža tudi v intenziteti iskrenja med kolektorjem in ščetkami. Le-to pa povzroča induciranje visokofrekvenčnih električnih motenj na ščetkah, ki jih motor preko priključnih sponk oddaja v napajalno omrežje. Torej bi z ovrednotenjem teh motenj lahko sklepali na kvaliteto komutacije.

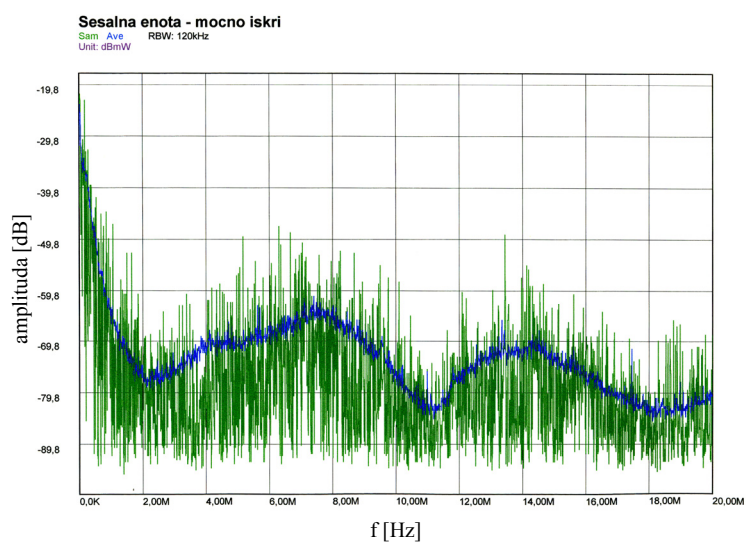
5.3.1 Uporaba standardne metode za merjenje nivoja elektromagnetnih motenj

Glede na povezavo med električnim iskrenjem in generacijo elektromagnetnih motenj je smiselno, da za posredno merjenje intenzitete isker uporabimo eno izmed standardnih metod merjenja nivoja elektromagnetnih motenj (CISPR 16). Zaradi enostavnosti implementacije pride v poštev le merjenje v frekvenčnem pasu od 0.15 do 30 MHz s pomočjo filterskega sklopa za simulacijo električnega omrežja LISN (Line Impedance Stabilization Network). Kot pove že samo ime, omenjena naprava, preko katere napajamo testiranec, simulira idealno električno omrežje. Poleg tega pa na njenem izhodu dobimo motnje v predpisanem frekvenčnem področju, ki jih testiranec oddaja v omrežje.

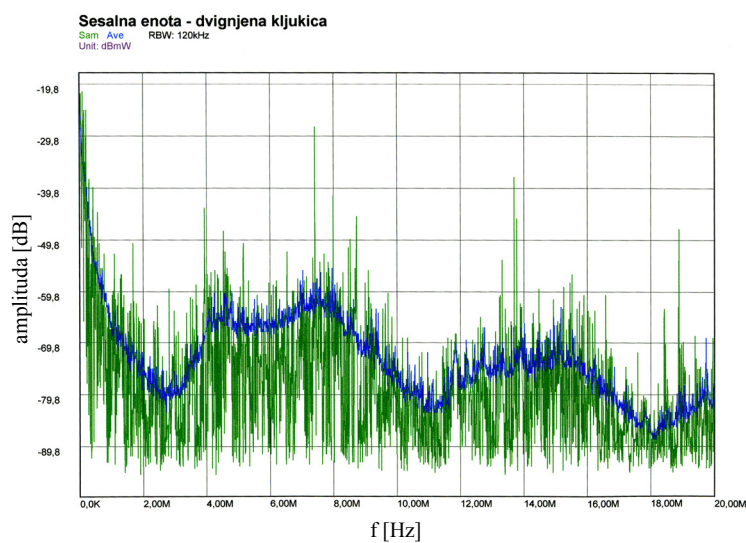
Pri merjenju nivoja visokofrekvenčnih motenj sesalnih enot je bil uporabljen filterski sklop za simulacijo električnega omrežja Hameg HM6050-2. Frekvenčne spektre motenj sesalnih enot z različnimi stopnjami intenzitete iskrenja smo opazovali s pomočjo spektralnega analizatorja Hameg HM5014. Na slikah od 5.8 do 5.10 so po vrsti prikazani spektri motenj za dobro enoto, enoto, ki močno iskri in enoto z dvignjeno kljukico kolektorja. Dvignjena kljukica kolektorja pomeni prekinitev stika med eno lamelo kolektorja in rotorskim navitjem, kar rezultira v nepravilnem delovanju enote in posledično v močno povečanem iskrenju. Intenziteta iskrenja obravnavanih enot je bila ocenjena vizualno. Na omenjenih slikah so z zeleno barvo narisani trenutni spektri, z modro pa srednje vrednosti.



Slika 5.8: Frekvenčni spekter motenj dobre sesalne enote



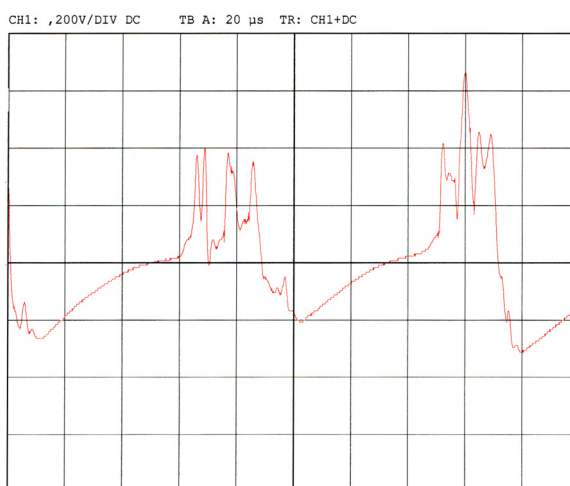
Slika 5.9: Frekvenčni spekter motenj sesalne enote, ki močno iskri



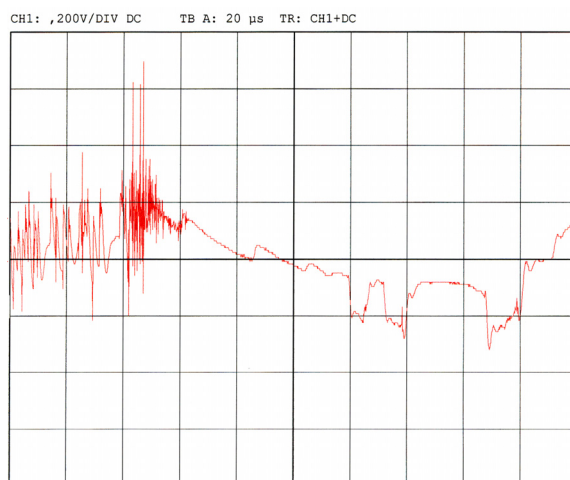
Slika 5.10: Frekvenčni spekter motenj sesalne enote z dvignjeno kljukico kolektorja

Vrhova, ki sta korelirana z intenziteto iskrenja, se v spektrih na slikah od 5.8 do 5.10 nahajata pri frekvencah približno 8 MHz in 15 MHz. Slednji je za cca 10 dB nižji od prvega. Pri primerjavi srednjih vrednosti RF spektrov vidimo, da nivo v okolici frekvence 8 MHz narašča z naraščanjem intenzitete iskrenja. Razlika v nivojih spektra znaša približno 10 dB pri primerjavi med dobro in slabo enoto.

Sliki 5.11 in 5.12 prikazujeta osciloskopska posnetka signalov motenj iz naprave LISN za dobro sesalno enoto in enoto z močno povečanim iskrenjem. Pri enoti, ki močno iskri, je v signalu jasno viden izbruh visokofrekvenčnih komponent, katere se pojavijo kot posledica velikih isker. Torej lahko rečemo, da je informacija o intenziteti iskrenja vsebovana v visokofrekvenčnem delu spektra motenj, ki jih povzročajo iskre. Zato je pri verodostojni oceni kvalitete komutacije potrebno upoštevati efekte iskrenja tudi v visokofrekvenčnem področju.



Slika 5.11: Osciloskopski posnetek signala iz naprave LISN za dobro sesalno enoto



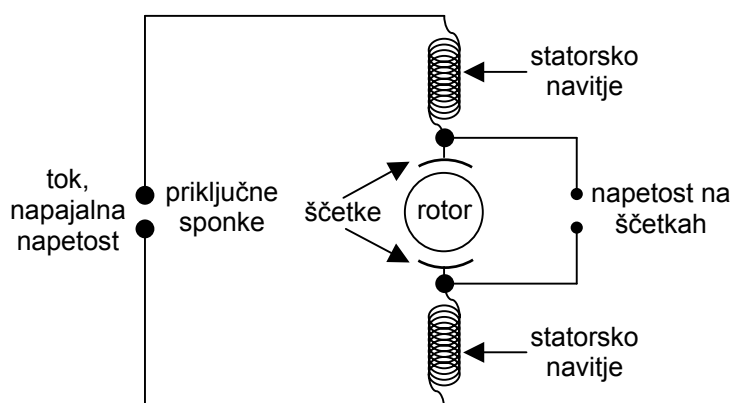
Slika 5.12: Osciloskopski posnetek signala iz naprave LISN za sesalno enoto, ki močno iskri

Čeprav je uporabljena metoda za merjenje nivoja motenj električnih naprav standardizirana, pa v nasprotju s pričakovanji za potrebe vrednotenja intenzitete iskrenja univerzalnih elektromotorjev ne da dovolj natančnih in ponovljivih rezultatov, na podlagi katerih bi te motorje lahko razvrščali. Vzrok temu sta statorski navitji, ki s svojima induktivnostima močno zavirata širjenje visokofrekvenčnih motenj od kolektorja, kjer le-te nastajajo, na napajalno stran motorja. To je s stališča potrebe po zmanjševanju emisije električnih motenj v omrežje sicer koristno, s stališča posrednega merjenja intenzitete iskrenja pa sta induktivnosti statorskih navitij neugodni. Kljub vsemu del motilnega signala, ki nastaja pri komutaciji, prehaja na napajalno stran motorja tudi preko stresanih kapacitivnosti statorskih navitij.

5.3.2 Merjenje in analiza napajalnega toka, napetosti na priključnih sponkah in napetosti na ščetkah

Ideja je bila, da bi z analizo časovnih posnetkov nekaterih enostavno merljivih veličin na univerzalnem elektromotorju, to je napajalnega toka, napetosti na priključnih sponkah ali napetosti na ščetkah, prišli do značilk, ki bi kazale na kvaliteto komutacije oziroma intenziteto iskrenja. Pri tem smo upoštevali koncept, da značilke temeljijo na ovrednotenju motenj, ki jih v omenjenih signalih povzroča iskrenje.

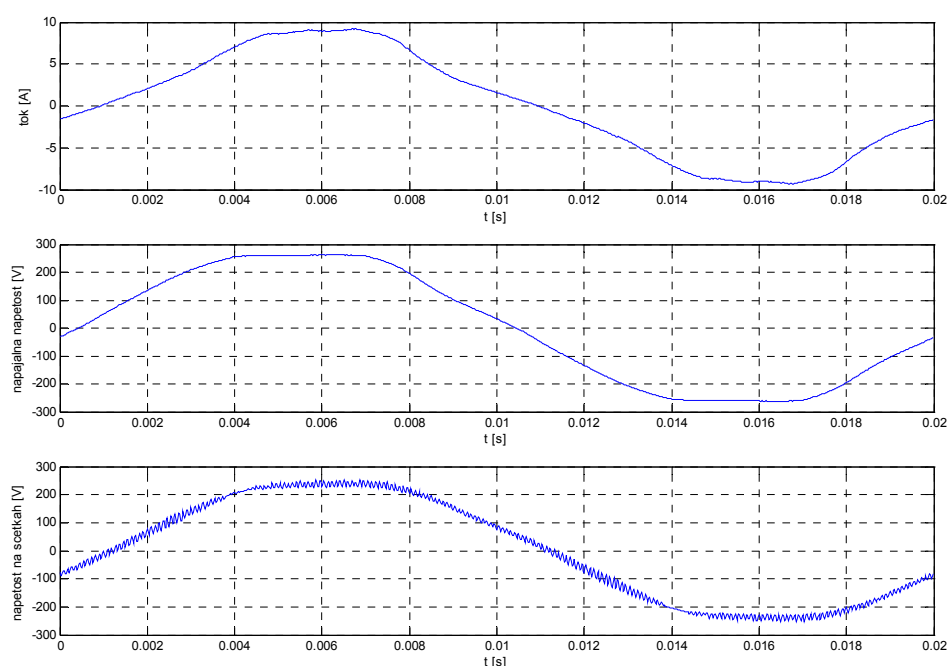
Za potrebe analize smo na štirih sesalnih enotah z različno stopnjo intenzitete iskrenja posneli tri signale in sicer napajalni tok in napajalno napetost na priključnih sponkah ter napetost na ščetkah. Odjemna mesta omenjenih signalov so prikazana na shemi slike 5.13. Ustrezno prilagojene signale smo zajeli s pomočjo osebnega računalnika z vgrajeno kartico za zajem podatkov NI 6035E. Frekvenca vzorčenja je bila 50 kHz, čas merjenja pa 10 s.



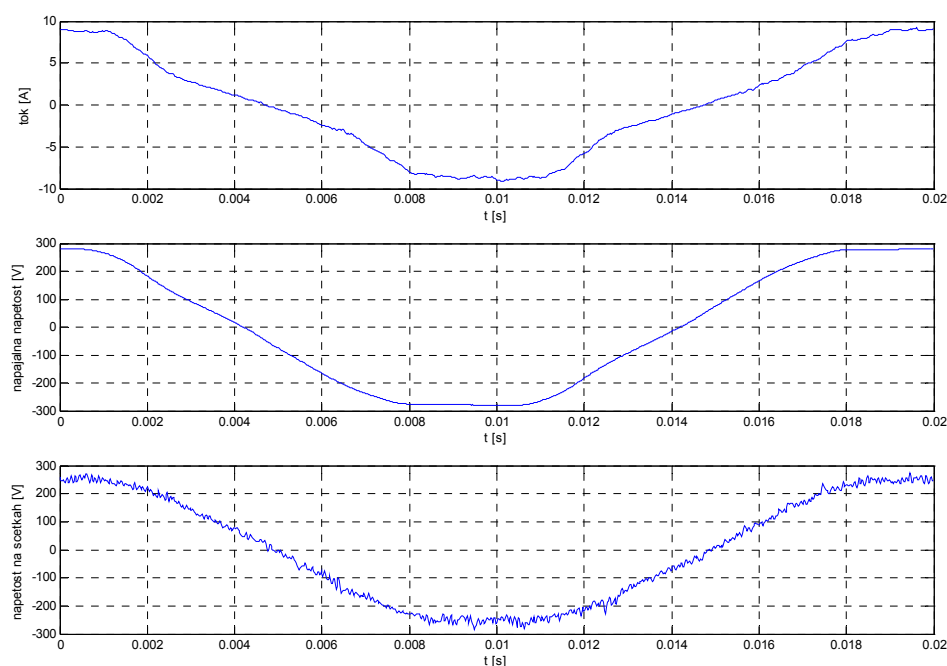
Slika 5.13: Odjemna mesta za tok, napajalno napetost in napetost na ščetkah

Na slikah 5.14 in 5.15 so prikazani izseki časovnih posnetkov treh merjenih veličin za dobro sesalno enoto (Slika 5.14) in enoto z močno povečanim iskrenjem (Slika 5.15). Pri obeh enotah opazimo, da sta krivulji toka in napajalne napetosti precej bolj gladki od krivulje napetosti na ščetkah. Slednja namreč vsebuje napetostne impulze, ki se inducirajo pri komutaciji. Kot je bilo povedano že v podpoglavju 5.3.1, omenjene impulze z visokofrekvenčno vsebino statorski navitji močno zadržita, zato le-ti na priključnih sponkah motorja (v napajalni napetosti in toku) komaj pridejo do izraza. Pri primerjavi med dobro sesalno enoto in enoto z močno povečanim iskrenjem opazimo, da so impulzi v napetosti na ščetkah pri enoti, ki močno iskri, bolj neenakomerni. Pri enoti z močno povečanim iskrenjem je tudi vpliv impulzov na tok izrazitejši, medtem ko so razlike med napajalnima napetostima minimalne. Frekvenca pojavljanja obravnavanih impulzov je 11 kHz, čemur ustreza produkt števila lamel kolektorja (22 lamel) in hitrosti vrtenja sesalnih enot ($f_0 = 500$ Hz). Torej so ti impulzi posledica prekinjanja rotorskega toka na kolektorju.

Naj na tem mestu še poudarimo, da je bila hitrost vrtenja oziroma napajalna napetost sesalnih enot nastavljena s pomočjo nastavljivega ločilnega transformatorja, ki v "sinusno" omrežno napajalno napetost ne vnaša dodatnih motenj.

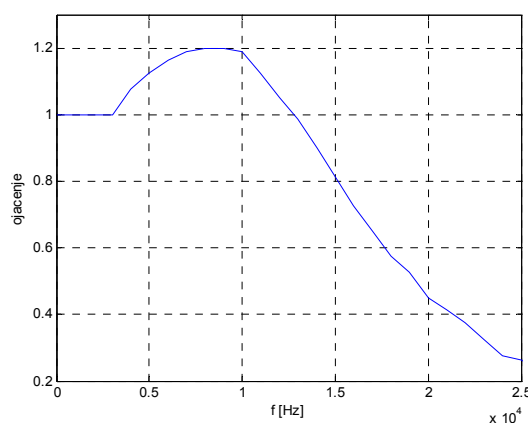


Slika 5.14: Tok, napajalna napetost in napetost na ščetkah pri dobri sesalni enoti



Slika 5.15: Tok, napajalna napetost in napetost na ščetkah pri sesalni enoti, ki močno iskri

Z namenom, da bi ovrednotili obravnavane impulze, smo časovne posnetke tokov, napajalnih napetosti in napetosti na ščetkah najprej pretvorili v frekvenčni prostor. Frekvenčne spektre smo izračunali s povprečenjem sedmih spektrov, ki smo jih dobili z diskretno Fourierjevo transformacijo odsekov časovnih signalov, uteženih s Hanningovimi okni. Izgubi podatkov zaradi utežitve le-teh smo se izognili tako, da smo zaporedne odseke signalov v časovnem prostoru med seboj prekrivali za dve tretjini. Izbrana resolucija v frekvenčnem prostoru, ki določa potreben čas opazovanja signala v časovnem prostoru, je bila 0.3 Hz. Podrobnejša razlaga določanja frekvenčnih spektrov je podana v dodatku A. Nazadnje smo v tako dobljenih spektrih še kompenzirali nizkopasovno propustno karakteristiko galvansko izoliranega ojačevalnika (Slika 5.16), preko katerega so signali vodeni do sistema za zajemanje.



Slika 5.16: Frekvenčna karakteristika galvansko izoliranega ojačevalnika

Frekvenčni spektri napajalnega toka, napajalne napetosti in napetosti na ščetkah pri dobri sesalni enoti so po naštetem vrstnem redu prikazani na slikah 5.17, 5.18 in 5.19. Spodnje skale na abscisnih oseh grafov so podane v Hz, zgornje pa so normirane s frekvenco vrtenja sesalne enote f_0 zato, da so lepše vidne frekvenčne komponente spektrov, ki se pojavljajo pri večkratnikih frekvence vrtenja sesalne enote. Na vsaki izmed omenjenih slik so narisani trije grafi, ki poudarjajo različna zanimiva frekvenčna področja.

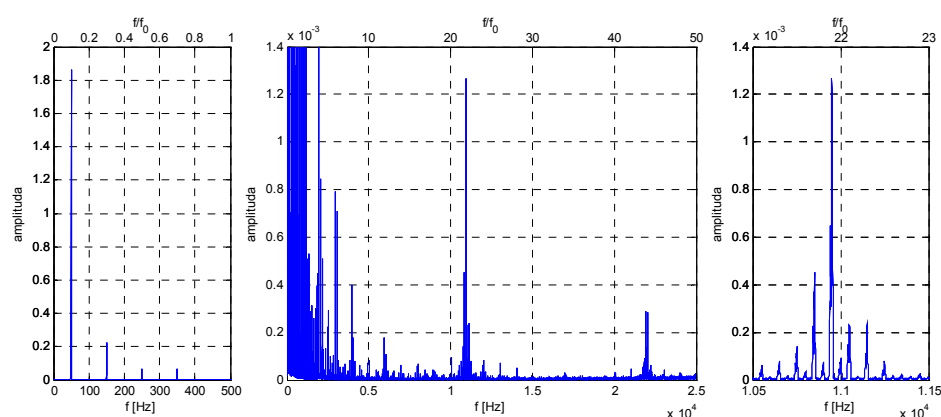
Z grafov na levi lahko razberemo, da pri vseh treh obravnavanih veličinah močno prevladuje frekvenčna komponenta pri 50 Hz, predvsem v toku pa je izrazitih tudi nekaj njenih višjih harmonikov. Omenjena komponenta je razumljivo posledica izmeničnega napajanja.

S stališča analize kvalitete komutacije oziroma intenzitete iskrenja je pomembnejša frekvenčna komponenta pri 22-kratniku frekvence vrtenja sesalne enote, pa tudi njen drugi harmonik, to je frekvenčna komponenta pri 44-kratniku frekvence vrtenja. Ta komponenta ($22 \cdot f_0$) je posledica že prej omenjenih impulzov, ki v obravnavanih signalih nastajajo pri komutaciji. Posamezni impulzi se namreč pojavijo vsakokrat, ko ena izmed dvaindvajsetih lamel kolektorja zapusti ščetko, torej ob vsakem zaključku komutacijskega cikla v posameznem rotorskem navitju. Omenjeni komponenti sta razvidni s sredinskih grafov na slikah 5.17, 5.18 in 5.19.

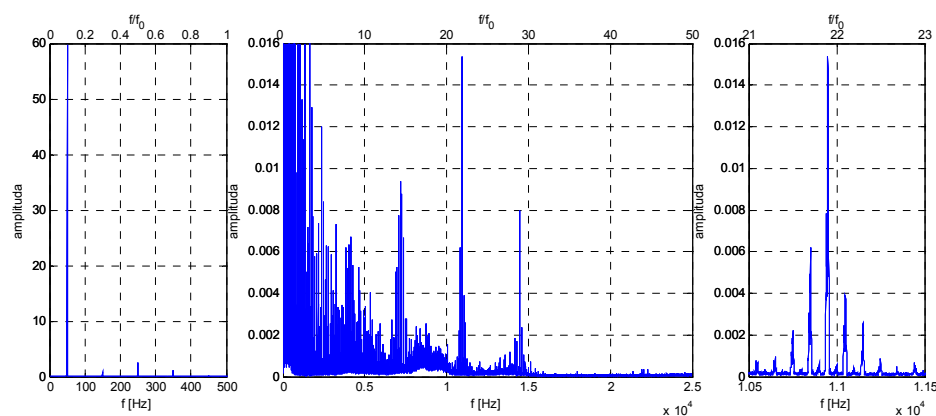
Na desnih grafih istih slik pa je podrobneje prikazana komponenta pri 22-kratniku frekvence vrtenja. Vidimo, da je le-ta amplitudno modulirana s signalom frekvence 50 Hz. Tudi ta pojav je posledica izmenične napajalne napetosti. Namreč, ko je na priključnih sponkah sesalne enote napetost 0 V, izginejo tudi vsi efekti komutacije.

Razmerje med frekvenčno komponento pri 50 Hz in komponento pri 22-kratniku frekvence vrtenja je pri toku in napajalni napetosti za najmanj faktor 10 večje kot pri napetosti na ščetkah. Pri primerjavi absolutnih vrednosti pa lahko ugotovimo, da je

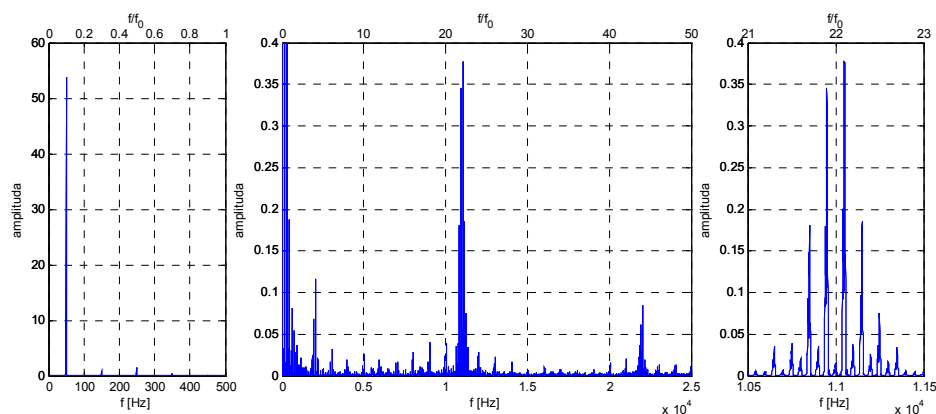
komponenta pri 22-kratniku frekvence vrtenja v napajalni napetosti približno 25-krat manjša kot v napetosti na ščetkah. Vzrok temu sta statorski navitji, ki, kot je že bilo omenjeno, s svojima induktivnostima dušita višjefrekvenčne komponente pri prehodu s kolektorja na napajalno stran motorja. Poleg tega sta frekvenčna spektra veličin merjenih na priključnih sponkah sesalne enote, to je toka in napajalne napetosti, lahko popačena zaradi morebitnih motenj iz napajalnega omrežja. Da bi se te motnje pojavile tudi v napetosti na ščetkah, pa ponovno preprečujeta statorski navitji s svojima induktivnostima.



Slika 5.17: Frekvenčni spekter napajalnega toka (različna frekvenčna področja)



Slika 5.18: Frekvenčni spekter napajalne napetosti (različna frekvenčna področja)

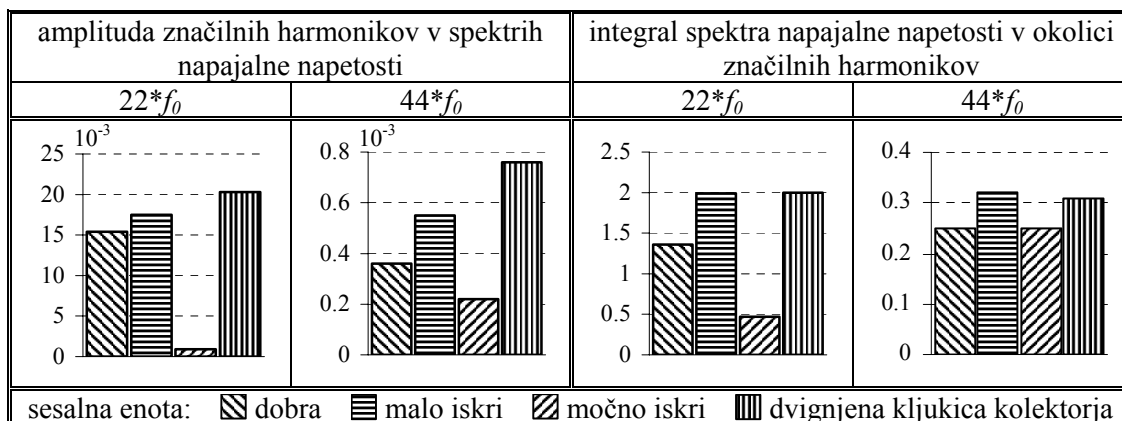


Slika 5.19: Frekvenčni spekter napetosti na ščetkah (različna frekvenčna področja)

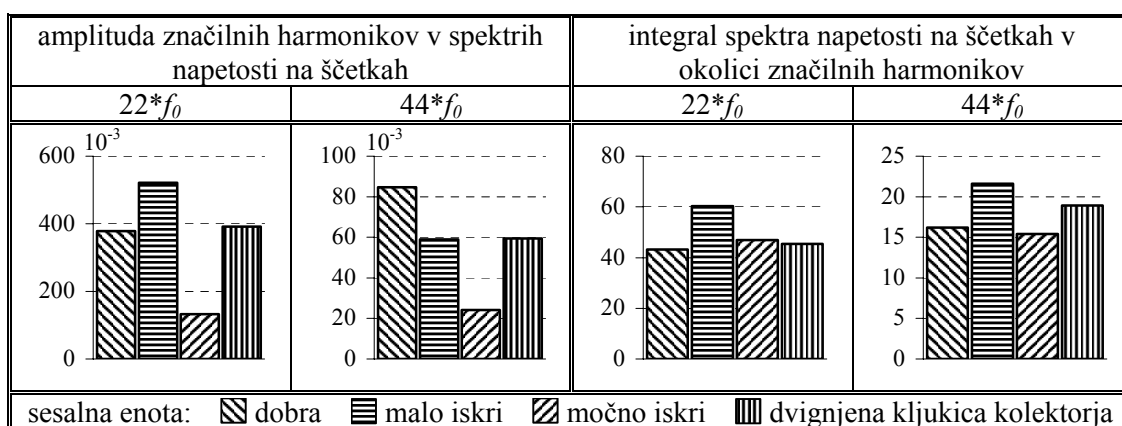
Vrednosti nekaterih značilk, ki za potrebe ocenjevanja intenzitete iskrenja vrednotijo frekvenčne spektre napajalnega toka, napajalne napetosti in napetosti na ščetkah, so po naštetem vrstnem redu prikazane na slikah 5.20, 5.21 in 5.22. Te značilke so amplitudi karakterističnih frekvenčnih komponent ($22*f_0$ in $44*f_0$) ter integral frekvenčnega spektra v okolici karakterističnih harmonikov ($22*f_0 \pm 500$ Hz in $44*f_0 \pm 500$ Hz). Vse značilke so izračunane za štiri sesalne enote z različno stopnjo intenzitete iskrenja.

amplituda značilnih harmonikov v spektrih toka		integral spektra toka v okolici značilnih harmonikov	
$22*f_0$	$44*f_0$	$22*f_0$	$44*f_0$
sesalna enota: dobra malo iskri močno iskri dvignjena kljukica kolektorja			

Slika 5.20: Vrednotenje frekvenčnih spektrov napajalnih tokov za potrebe ocene intenzitete iskrenja



Slika 5.21: Vrednotenje frekvenčnih spektrov napajalnih napetosti za potrebe ocene intenzitete iskrenja



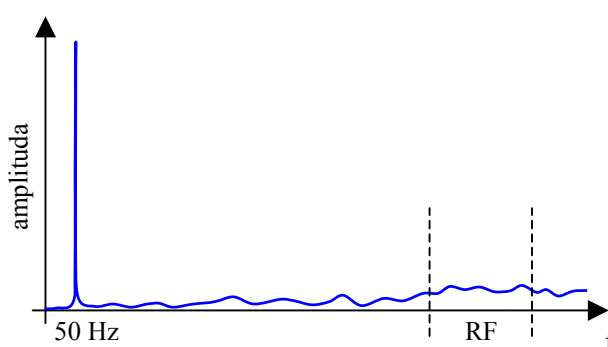
Slika 5.22: Vrednotenje frekvenčnih spektrov napetosti na ščetkah za potrebe ocene intenzitete iskrenja

S slik 5.20, 5.21 in 5.22 lahko razberemo, da nobena izmed izbranih značilk ni korelirana z dejansko stopnjo intenzitete iskrenja sesalnih enot. To nas privede do pomembnega sklepa: *Značilke, ki temeljijo na obdelavi signalov toka, napajalne napetosti ali napetosti na ščetkah v nizkofrekvenčnem področju, so neprimerne za oceno kvalitete komutacije.* Karakteristični harmoniki v nizkofrekvenčnem področju ($22*f_0$, $44*f_0$) nam namreč dajejo le informacijo o prisotnosti efektov komutacije, medtem ko se kvaliteta komutacije oziroma intenziteta iskrenja odraža v visokofrekvenčni (megaherčni) vsebini teh efektov (podpoglavje 5.3.1).

5.3.3 Naprava za merjenje intenzitete iskrenja

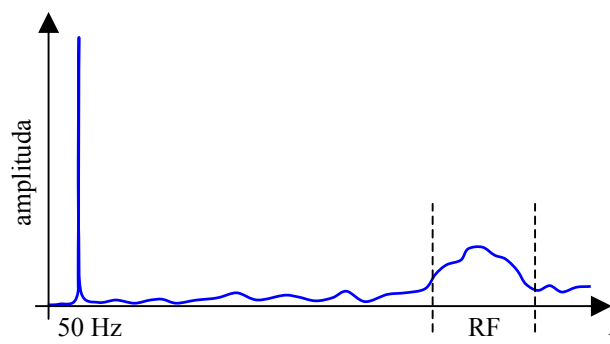
Načrtovanje naprave za merjenje intenzitete iskrenja je temeljilo na izsledkih analiz, ki so predstavljene v podpoglavjih 5.3.1 in 5.3.2. Glavne ugotovitve, ki omogočajo uspešen razvoj takšne naprave, so na kratko povzete v nadaljevanju.

Frekvenčni spekter napetosti na priključnih sponkah univerzalnega elektromotorja (Slika 5.23) je okarakteriziran z izrazito komponento pri 50 Hz, katera je posledica izmeničnega napajanja, in rahlim povečanjem amplitud v RF področju. Vzrok slednjemu so visokofrekvenčne motenje, ki se na kolektorju in ščetkah inducirajo zaradi komutacije. Nivo omenjenih motenj je na priključnih sponkah zelo nizek zaradi dušenja, ki ga povzročata statorski navitji s svojima induktivnostima. Pri ostalih frekvencah oziroma v ostalih frekvenčnih področjih spektra ni zaznati amplitud, ki bi bile korelirane z intenziteto iskrenja. Poleg tega je potrebno omeniti, da je napetost na priključnih sponkah lahko tudi popačena z morebitnimi motnjami iz napajalnega omrežja. Le-te pa bi vplivale na meritev intenzitete iskrenja na podlagi vrednotenja visokofrekvenčnih motenj, ki se v obravnavani napetosti pojavijo zaradi komutacije.



Slika 5.23: Shematski prikaz frekvenčnega spektra napetosti na priključnih sponkah univerzalnega elektromotorja

Frekvenčni spekter napetosti na ščetkah je shematsko prikazan na sliki 5.24. Tudi v tem je zaradi izmeničnega napajanja prisotna izrazita komponenta pri frekvenci 50 Hz. Amplitude v RF področju pa so precej višje kot v primeru napetosti na priključnih sponkah, saj RF motenj v napetosti na ščetkah, ki jih povzroča komutacija, statorski navitji s svojima induktivnostima ne dušita. Po drugi strani pa omenjeni navitji učinkovito preprečujeta širjenje visokofrekvenčnih motenj iz napajalnega omrežja na ščetke, kar je ugodno s stališča ocenjevanja intenzitete iskrenja na podlagi vrednotenja visokofrekvenčnih efektov komutacije.



Slika 5.24: Shematski prikaz frekvenčnega spektra napetosti na ščetkah

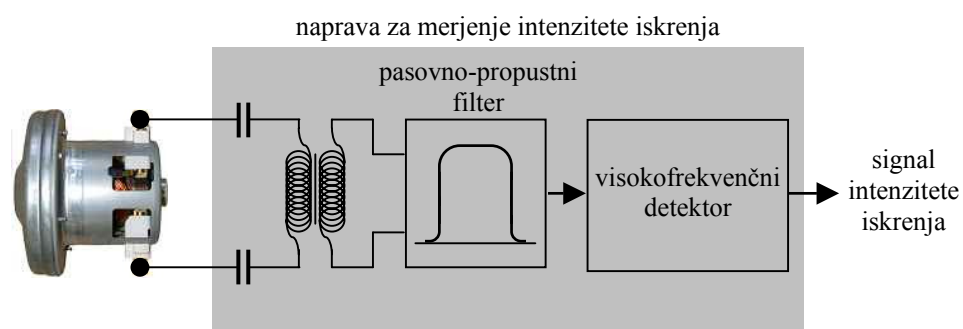
Glede na predstavljene rezultate analiz električnih veličin na univerzalnem elektromotorju lahko rečemo, da je največ koristnih informacij, ki kažejo na kvaliteto komutacije, vsebovanih v visokofrekvenčnem delu signala napetosti na ščetkah. Zato je najbolj smiselno, da vrednotenje kvalitete komutacije oziroma intenzitete iskrenja temelji na ustrezni obdelavi prav tega signala. Na podlagi omenjenega koncepta je bila izdelana naprava za merjenje intenzitete iskrenja, ki je prikazana na sliki 5.25.



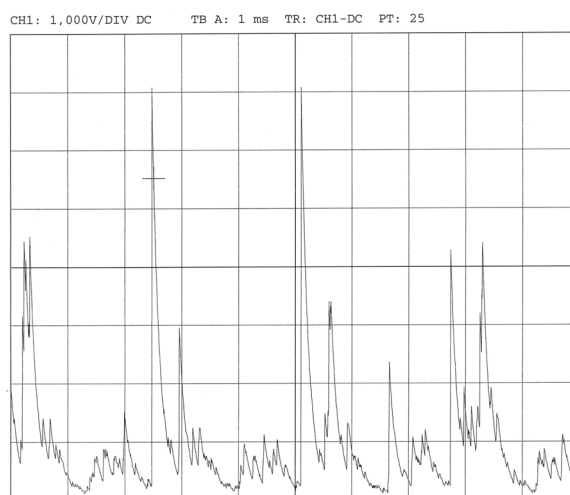
Slika 5.25: Naprava za merjenje intenzitete iskrenja

Kot je razvidno iz osnovne blokovne sheme na sliki 5.26, se naprava priklopi na ščetke elektromotorja. S tem je zagotovljen neposreden zajem visokofrekvenčnih motenj, ki se na kolektorju in ščetkah inducirajo zaradi komutacije, hkrati pa se izognemo vplivu motenj iz napajalnega omrežja, saj jih močno zadržita statorski navitji. Zajeti napetostni signal gre najprej preko dveh kondenzatorjev, ki v bistvu predstavljata visokopropusten filter. Le-ta izloči nekoristne nizkofrekvenčne komponente signala, to je osnovno frekvenco napajalnega izvora (50 Hz) ter osnovno frekvenco komutacije (hitrost vrtenja * število lamel kolektorja) in njenih prvih nekaj harmonskih komponent, ki za meritev intenzitete iskrenja niso relevantne. Sledi visokofrekvenčni izolacijski transformator s prenosnim razmerjem 1:1. Njegova naloga je galvanska ločitev merilne naprave od testiranega elektromotorja, ki je priklopljen na napajalni izvor. Nato signal

nadaljuje pot preko pasovno prepustnega filtra s centrom prepustnega pasu pri frekvenci 10 MHz in pasovno širino 2 MHz, ki prepušča le tisti del frekvenčnega spektra, ki je karakterističen za iskrenje na kolektorju. Tako obdelan signal gre na visokofrekvenčni detektor, ki izloči visokofrekvenčno komponento in ohrani le ovojnico signala. Rezultirajoči signal na izhodu je signal intenzitete iskrenja, katerega osciloskopski posnetek je prikazan na sliki 5.27. To je signal impulzne oblike, v katerem impulzi sovpadajo s pojavljanjem isker, ko posamezne lamele kolektorja zapuščajo ščetke. Amplitude teh impulzov pa so proporcionalne intenziteti isker med kolektorjem in ščetkami.



Slika 5.26: Blokovna shema naprave za merjenje intenzitete iskrenja

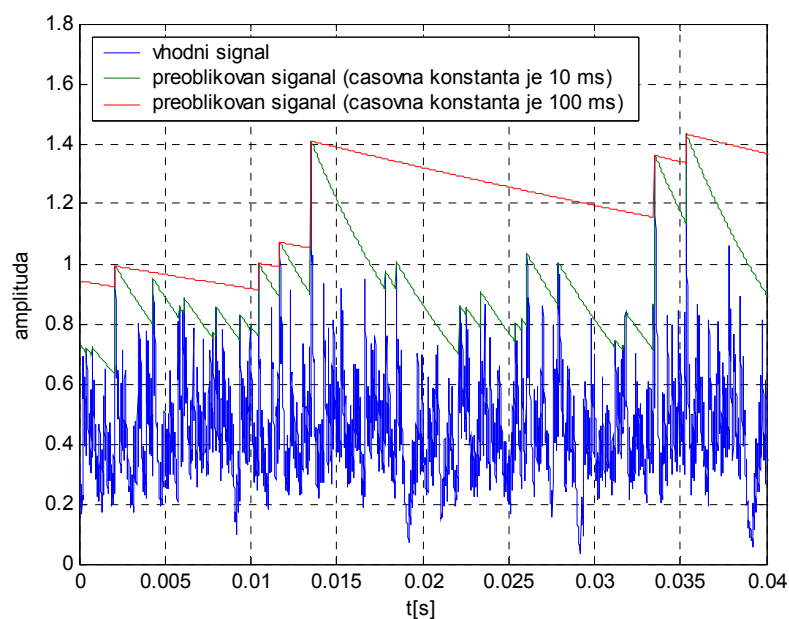


Slika 5.27: Osciloskopski posnetek signala intenzitete iskrenja

Obravnavana naprava omogoča še nadaljnjo analogno obdelavo signala intenzitete iskrenja in prikaz nekaterih številčnih rezultatov meritev v analogni in digitalni obliki. Ena možnost je določitev povprečne vrednosti signala intenzitete iskrenja. Le-to dobimo s filtriranjem signala intenzitete iskrenja z nizkopropustnim filtrom. Mejna frekvenca omenjenega filtra je nastavljiva na 1, 3, 10, 30, 100 oziroma 300 Hz. Toda ta pristop ne

daje najboljše ocene intenzitete iskrenja. Visoki impulzi v signalu intenzitete iskrenja, v katerih se odražajo velike in zato škodljive iskre, se namreč pojavljajo redko in so tudi zelo ozki. Zaradi tega zelo malo prispevajo k povprečni vrednosti signala intenzitete iskrenja. Posledica je slaba ločljivost obravnavanega načina vrednotenja intenzitete iskrenja in občutljivost na intenziteto tistih isker, ki so sicer v dopustnih mejah. Vse to pa otežuje zanesljivo ločevanje med dobrimi elektromotorji in elektromotorji s povečanim iskrenjem.

Druga možnost, ki odpravlja nekatere pomanjkljivosti prejšnje, je predhodna predelava signala intenzitete iskrenja s tako imenovanim "quasi peak" (QP) detektorjem in šele nato določanje povprečne vrednosti rezultirajočega signala. QP detektor je izraz za sistem, ki je namenjen vrednotenju redkih in predvsem ozkih impulzov v signalih. Deluje tako, da izhod najprej izenači z amplitudo impulza v vhodnem signalu, nato pa izhodni signal eksponentno zmanjšuje z določeno časovno konstanto, dokler se na vhodu ne pojavi nov impulz, ki ima amplitudo višjo od takratne vrednosti na izhodu. Tedaj izhod zavzame vrednost amplitude novega impulza in ponovno začne eksponentno padati. Opisani postopek se nato ponavlja preko celega vhodnega signala. Pri obravnavani napravi za merjenje intenzitete iskrenja lahko izbiramo med tremi časovnimi konstantami in sicer 10, 100 ali 1000 ms. Na sliki 5.28 sta prikazana rezultata preoblikovanj signala s QP detektorjem pri aplikaciji dveh različnih časovnih konstant (10 in 100 ms). Vidimo, da QP detektor "razširi" in na ta način bolj poudari večje impulze, kar povzroči dvig nivoja celotnega signala. Manjši impulzi pri tem nimajo nobenega vpliva na izhodni signal. Stopnjo "razširitve" impulzov določa časovna konstanta. Z večanjem le-te se povečuje tudi vpliv največjih impulzov na izhodni signal. Vendar pa s tem izgubljammo informacije o dejanski trenutni stopnji intenzitete iskrenja, ki se ne odraža le v največjih impulzih, temveč tudi v nekoliko manjših. Povprečenje izhodnega signala QP detektorja je izvedeno z enakim nizkopropustnim filtrom kot v prejšnjem primeru. Pravkar opisani način obdelave signala intenzitete iskrenja zagotavlja dobro ločljivost pri ocenjevanju intenzitete iskrenja. Sama ocena intenzitete iskrenja pa verodostojno odraža dejansko stanje elektromotorja.



Slika 5.28: Preoblikovanje signala intenzitete iskrenja s QP detektorjem z različnima časovnima konstantama

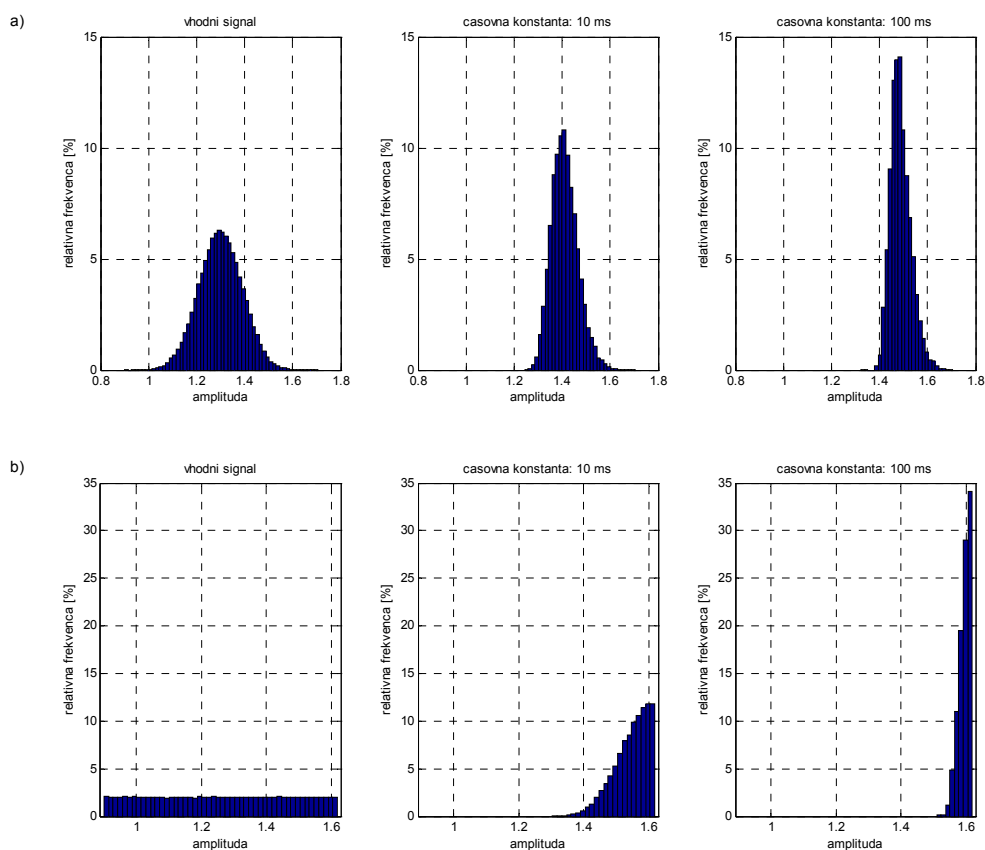
S slike 5.28 je tudi razvidno, da se v vhodnem signalu, to je signalu intenzitete iskrenja, periodično pojavljajo minimalne vrednosti signala. Njihova perioda je 10 ms, kar ustreza frekvenci 100 Hz. Vzrok temu pojavu je izmenična napajalna napetost (50 Hz), saj, ko je le-ta enaka 0 V, je razumljivo, da izgine tudi iskrenje med kolektorjem in ščetkami.

5.3.3.1 Formulacija značilke za intenziteto iskrenja

Informacije o intenziteti posameznih isker med lamelami kolektorja in ščetkami so vsebovane v amplitudah impulzov signala intenzitete iskrenja. Zato je smiselno, da pri ocenjevanju intenzitete iskrenja univerzalnih elektromotorjev upoštevamo le te amplitude in ne celotnega signala intenzitete iskrenja. Osnovo za določitev značilke intenzitete iskrenja tako predstavlja porazdelitev omenjenih amplitud.

Najprej si pogledajmo, kako na porazdelitev amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja vplivata predelava tega signala s QP detektorjem in frekvenca vzorčenja. Vpliv QP detektorja na obliko histogramov amplitud impulzov dveh simuliranih signalov intenzitete iskrenja je razviden s slike 5.29. V prvem primeru (Slika 5.29a) so amplitude impulzov simuliranega signala intenzitete iskrenja, ki predstavlja vhod v QP detektor, porazdeljene normalno (levi histogram na sliki 5.29a). Po predelavi signala s QP detektorjem se histogram amplitud impulzov premakne v desno, to je proti večjim

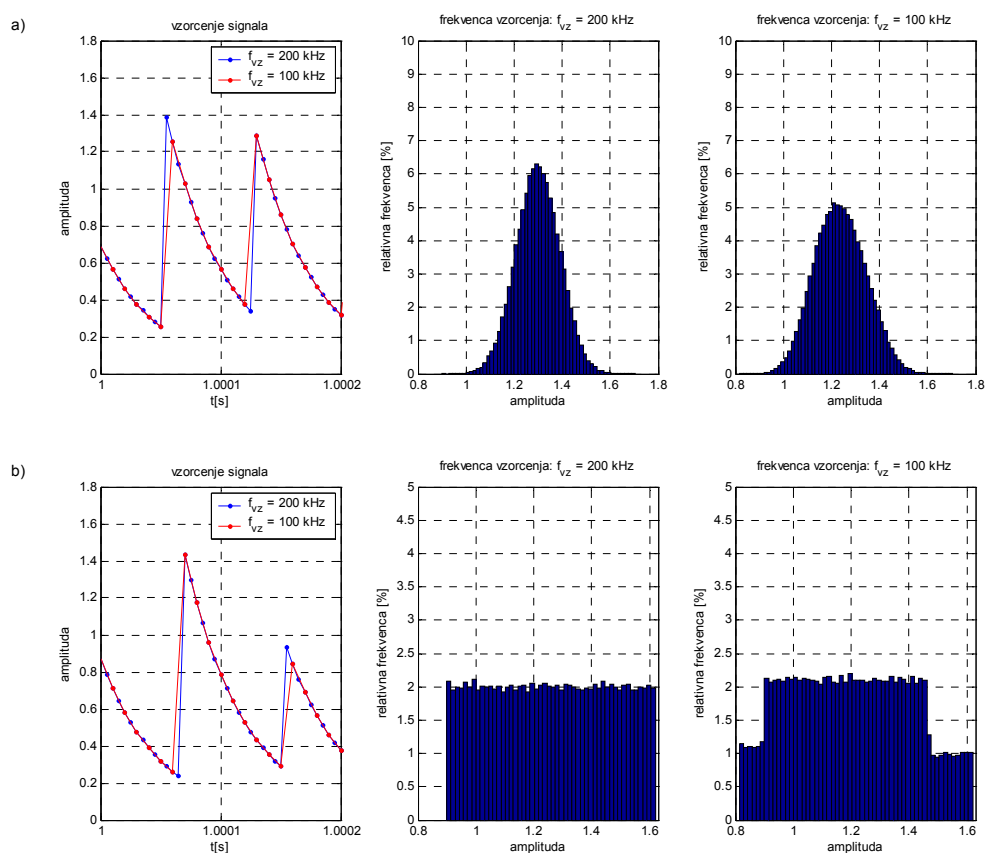
vrednostim. Pri tem večja časovna konstanta QP detektorja povzroči večji premik (srednji in desni histogram na sliki 5.29a). Relativna frekvenca na ordinatnih oseh histogramov pomeni razmerje med številom amplitud impulzov v določenem območju in številom vseh impulzov v signalu. Do podobnih ugotovitev pridemo tudi pri proučevanju simuliranega signala intenzitete iskrenja z enakomerno porazdelitvijo amplitud impulzov (Slika 5.29b), pri čemer je v tem primeru premik histograma proti večjim vrednostim še bolj izrazit. Dobljeni rezultati so pričakovani, saj je že sam princip delovanja QP detektorja takšen, da v izhodnem signalu ohrani le impulze z večjimi amplitudami, medtem ko tiste z manjšimi ignorira.



Slika 5.29: Vpliv QP detektorja na porazdelitev amplitud impulzov v simuliranem signalu intenzitete iskrenja: a) pri normalni porazdelitvi amplitud, b) pri enakomerni porazdelitvi amplitud

Na sliki 5.30 je prikazan vpliv frekvence vzorčenja na obliko histogramov amplitud impulzov dveh simuliranih signalov intenzitete iskrenja. Prvi izmed teh signalov (Slika 5.30a) ima normalno porazdelitev amplitud impulzov, drugi (Slika 5.30b) pa enakomerno. S časovnih posnetkov vzorčenih signalov na levi strani omenjenih slik je razvidno, da v obeh primerih zaradi zelo majhne širine impulzov namesto nekaterih vrhov teh impulzov pri nižji frekvenci vzorčenja zajamemo nekoliko nižje vrednosti. V

histogramih amplitud impulzov se to odraža kot njuna razširitev na nove, manjše vrednosti in njun premik v levo, to je proti manjšim vrednostim.

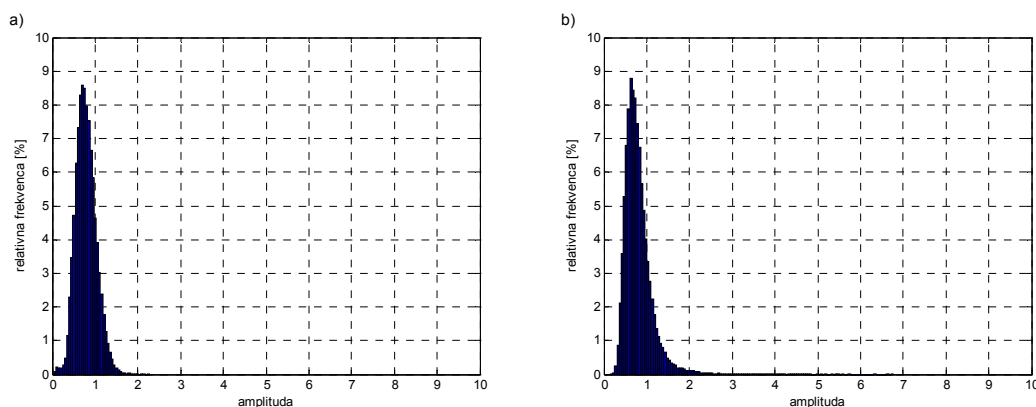


Slika 5.30: Vpliv frekvence vzorčenja na porazdelitev amplitud impulzov v simuliranem signalu intenzitete iskrenja: a) pri normalni porazdelitvi amplitud, b) pri enakomerni porazdelitvi amplitud

Iz predstavljenih rezultatov simulacijskih poskusov lahko sklepamo, da pri ugotavljanju verodostojne porazdelitve amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja omenjenih impulzov ne smemo predhodno "razširiti" s pomočjo QP detektorja, saj s tem izgubimo informacije o manjših impulzih. Prav zaradi ozkosti obravnavanih impulzov pa je potrebno signal intenzitete iskrenja vzorčiti s čim višjo frekvenco vzorčenja.

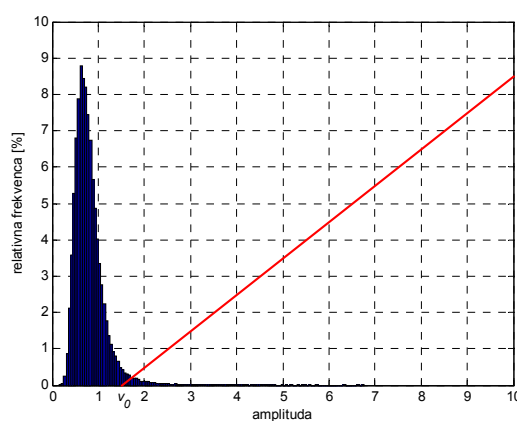
Na sliki 5.31 sta prikazana histograma amplitud impulzov realnih signalov intenzitete iskrenja za dobro sesalno enoto in enoto s povečanim iskrenjem. Frekvenca vzorčenja omenjenih signalov je bila 200 kHz. Pri obeh enotah ima večina impulzov manjše amplitude, to je do cca 1.5. Le-ti so posledica manjših, neškodljivih isker, ki se pojavljajo pri normalni komutaciji. Z meritvami na še več drugih sesalnih enotah je bilo ugotovljeno, da se obravnavani histogrami v omenjenem področju manjših amplitud pri posameznih enotah lahko razlikujejo po obliki, vendar pa se iz teh oblik na da sklepati na kvaliteto komutacije. Bistvena razlika med histogramom dobre sesalne enote (Slika

5.31a) in enote s povečanim iskrenjem (Slika 5.31b), ki omogoča njuno ločevanje v smislu intenzitete iskrenja, je prisotnost impulzov z amplitudami nad cca 2.5 pri enoti s povečanim iskrenjem. Le-ti se pojavijo zaradi velikih isker med kolektorjem in ščetkami oziroma poslabšane komutacije. S slike 5.31b je še razvidno, da je teh impulzov relativno malo.



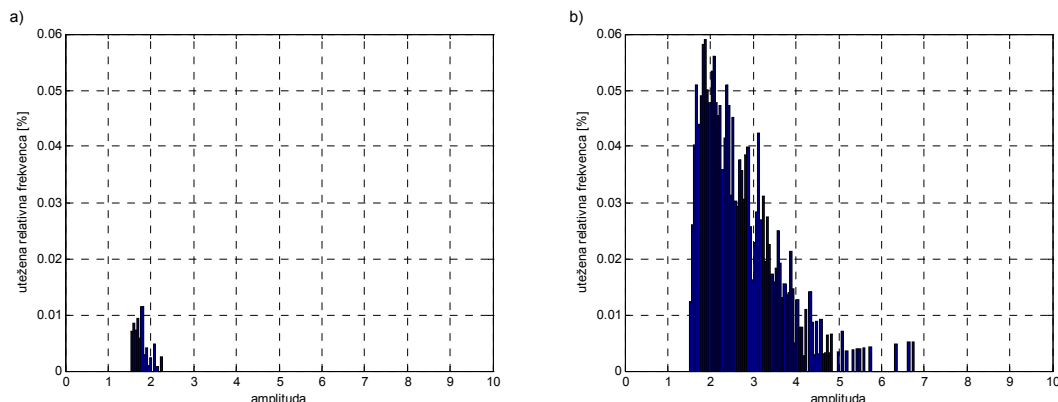
Slika 5.31: Histogram amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja: a) za dobro sesalno enoto, b) za sesalno enoto s povečanim iskrenjem

Pri formulaciji značilke intenzitete iskrenja oziroma kvalitete komutacije je potrebno upoštevati, da so iskre z večjo intenziteto bolj škodljive. Zato je le-te smiselno bolj poudariti, tako da več prispevajo k vednosti značilke. To smo naredili z utežitvijo histograma amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja z linearno funkcijo, kot je prikazano na sliki 5.32.



Slika 5.32: Utežitev histograma amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja z linearno funkcijo

Rezultat utežitve histogramov s slike 5.31 je prikazan na sliki 5.33. Razlika med uteženim histogramom za dobro sesalno enoto (Slika 5.33a) in enoto s povečanim iskrenjem (Slika 5.33b) je očitna.



Slika 5.33: Utežen histogram amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja: a) za dobro sesalno enoto, b) za sesalno enoto s povečanim iskrenjem

Značilko intenzitete iskrenja s smo definirali kot površino uteženega histograma impulzov signala intenzitete iskrenja:

$$s = \int_{v_0}^{\infty} h(v) \cdot (v - v_0) dv, \quad (5.1)$$

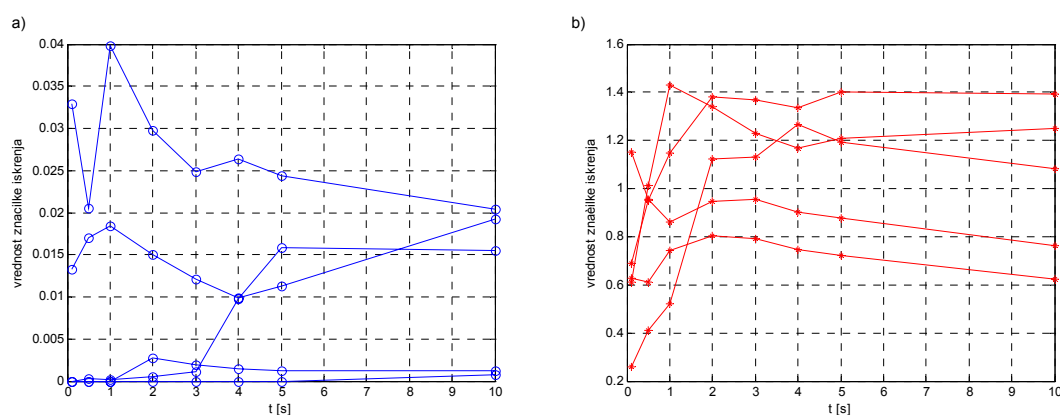
kjer h predstavlja relativno frekvenco v histogramu amplitud impulzov signala intenzitete iskrenja, z v je označena amplituda in $v_0 = 1.5$. Vrednost v_0 je bila določena empirično.

5.4 Ovrednotenje naprave za merjenje intenzitete iskrenja in izbrane značilke

Z namenom ovrednotenja naprave za merjenje intenzitete iskrenja in izbrane značilke so bile na sesalnih enotah z različno stopnjo intenzitete iskrenja opravljene nekatere meritve. Rezultati le-teh in izhajajoče ugotovitve o lastnostih uporabljene metode za ocenjevanje intenzitete iskrenja so podani v naslednjih štirih podpoglavjih.

5.4.1 Vpliv časa merjenja na vrednost značilke intenzitete iskrenja

Na sliki 5.34 je prikazano, kako čas merjenja signala intenzitete iskrenja vpliva na vrednost značilke intenzitete iskrenja in sicer pri petih dobrih sesalnih enotah (Slika 5.34a) ter petih enotah s povečanim iskrenjem (Slika 5.34b). Gledano absolutno se vrednosti posameznih značilk s krajšanjem signala intenzitete iskrenja zlasti pri enotah s povečanim iskrenjem vedno bolj spreminjajo. To je posledica same narave iskrenja, ki se pojavlja v obliki občasnih izbruhov in je zato zelo neenakomerno. Zaradi teh lastnosti iskrenja moramo signal intenzitete iskrenja meriti vsaj 1 s. S tem dobimo neko povprečno oceno intenzitete iskrenja, ki omogoča zanesljivo ločevanje med dobrimi sesalnimi enotami in tistimi s povečanim iskrenjem.

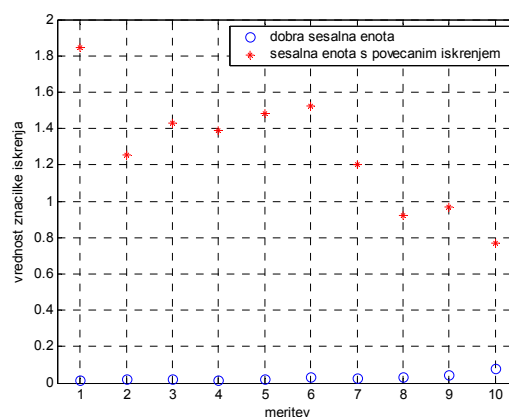


Slika 5.34: Vpliv dolžine signala intenzitete iskrenja na vrednost značilke: a) pri dobrih sesalnih enotah, b) pri sesalnih enotah s povečanim iskrenjem

5.4.2 Ponovljivost meritev intenzitete iskrenja

Z grafa na sliki 5.35 je razvidna ponovljivost meritev intenzitete iskrenja pri dobri sesalni enoti (krogci) in enoti s povečanim iskrenjem (zvezdice). Na vsaki enoti je bila intenziteta iskrenja izmerjena desetkrat. Raztros meritev (standardna deviacija / območje vrednosti značilke) je pri dobri sesalni enoti 2 %, pri enoti s povečanim iskrenjem pa kar 17 %. Slednji je posledica neenakomernosti signala intenzitete iskrenja in omejenega časa opazovanja tega signala.

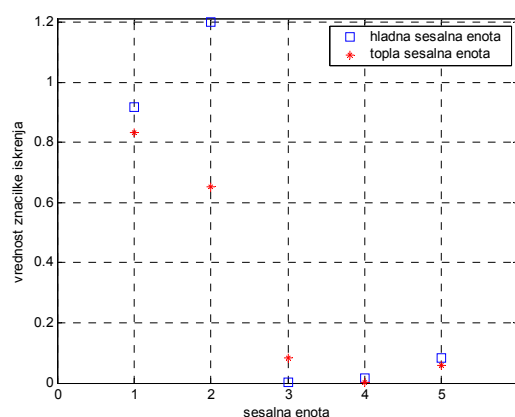
Kljub tako velikemu raztrosu pa je zanesljivo ločevanje med dobro enoto in tisto s povečanim iskrenjem še vedno mogoče, saj se povprečni vrednosti značilk intenzitete iskrenja obeh sesalnih enot dovolj razlikujeta med seboj. To pomeni, da ima predlagana metoda ustrezno ločljivost.



Slika 5.35: Ponovljivost meritev intenzitete iskrenja

5.4.3 Vpliv temperature na meritve intenzitete iskrenja

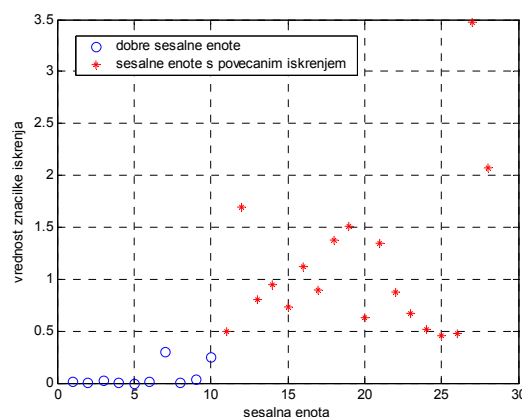
Kako na meritev intenzitete iskrenja vpliva temperatura sesalne enote lahko razberemo s slike 5.36. Meritve so bile opravljene na petih enotah in sicer dveh s povečanim iskrenjem (1, 2) ter treh dobrih (3, 4, 5). Najprej smo intenziteto iskrenja izmerili na sesalnih enotah, ki so imele sobno temperaturo, to je takoj po njihovem zagonu (vrednosti na sliki označene s kvadrati). Nato smo meritve ponovili po cca 2 min delovanja sesalnih enot, ko se je temperatura na njihovih ohišjih ustalila (vrednosti na sliki označene z zvezdicami). Pri tem je potrebno povedati, da temperatura kolektorja takoj po zagonu enote zelo hitro naraste, med obratovanjem pa je le-ta precej višja od temperature ohišja (doseže namreč več kot 100 °C). Iz rezultatov meritev lahko sklepamo, da temperatura v posameznih primerih različno vpliva na intenziteto iskrenja. Slednja se zaradi zvišanja temperature v nekaterih primerih zmanjša, v nekaterih pa poveča. Pri tem naj omenimo, da zlasti pri enotah s povečanim iskrenjem lahko prihaja do razlik v izmerjenih vrednostih posamezne značilke tudi zaradi same neponovljivosti meritev. Bistveno pa je, da vpliv temperature ne moti klasifikacije sesalnih enot na dobre in tiste s povečanim iskrenjem.



Slika 5.36: Vpliv temperature na meritve iskrenja

5.4.4 Primer klasifikacije sesalnih enot glede na intenziteto iskrenja

Rezultati klasifikacije sesalnih enot s pomočjo naprave za merjenje intenzitete iskrenja in izbrane značilke so prikazani na sliki 5.37. Opravljena je bila na 28 sesalnih enotah in sicer 10 dobrih (vrednosti na sliki označene s krogi) in 18 enotah s povečanim iskrenjem (vrednosti na sliki označene z zvezdicami). Vidimo, da predlagana metoda merjenja intenzitete iskrenja omogoča zanesljivo razvrščanje sesalnih enot, saj se zaradi njene dobre ločljivosti da vrednosti značilke iz obeh skupin enot jasno ločiti med seboj. Do približevanja nekaterih izmerjenih vrednosti značilke k mejni vrednosti med obema skupinama enot prihaja zaradi neponovljivosti meritev, katere vzroki so že bili razloženi.



Slika 5.37: Klasifikacija sesalnih enot glede na intenziteto iskrenja

6. Zaključek

Težnja proizvajalcev sesalnih enot je vzpostavitev zanesljivega procesa zagotavljanja kakovosti končnih izdelkov, ki je sposoben odkriti sleherno slabo enoto in jo izločiti iz dobave kupcem. V ta namen je bil izdelan prototip sistema za avtomatsko odkrivanje napak na sesalnih enotah, ki temelji na zajemu več signalov in njihovi obdelavi z različnimi algoritmi za sintezo značilk. Širok nabor meritev in algoritmov za njihovo obdelavo zagotavlja dobro občutljivost in diagnostično natančnost sistema. Kvantifikacija nekaterih kriterijev kvalitete, ki so bili podvrženi subjektivni oceni, pa omogoča njihovo objektivno vrednotenje (npr. intenzitete iskrenja).

V tem delu sta bila obravnavana dva izmed štirih modulov za generiranje značilk, kateri tvorijo jedro diagnostičnega sistema. To sta modul za analizo vibracij in modul za analizo komutacije.

Z analizo vibracij sesalnih enot so bili odkriti njihovi glavni izvori in načini njihovega širjenja po enotah. Na teh spoznanjih je temeljilo določanje najprimernejših merilnih pogojev za izvajanje testiranj. Predstavljeno je bilo merjenje vibracij s pomočjo pozicionirnega mehanizma glave laserskega merilnika, ki rešuje problem avtomatskega merjenja vibracij v dveh merilnih točkah na sesalni enoti. Nazadnje pa so bili prikazani še rezultati meritev, ki so se na enotah izvajale tekom trajnostnega testa.

Odrpto vprašanje oziroma predmet nadaljnjih raziskav v okviru analize vibracij ostaja pojasnitev morebitnih drugih izvorov vibracij in načinov njihovega širjenja po sesalni enoti. Pri reševanju tega problema naj bi se uporabile metode za analizo nelinearnih dinamičnih sistemov. Nove ugotovitve bi predstavljale koristen vir informacij za konstruktorje sesalnih enot.

Analiza komutacije univerzalnih elektromotorjev, ki je bila podana v tem delu, predstavlja osnovo za sintezo naprave za merjenje intenzitete iskrenja in določitev ustrezne značilke. S poskusi na več sesalnih enotah je bilo potrjeno, da nam omenjena naprava in izbrana značilka dasta verodostojno oceno intenzitete iskrenja oziroma kvalitete komutacije, ki zagotavlja zanesljivo ločevanje med dobrimi enotami in tistimi s povečanim iskrenjem. Zaradi enostavnosti aplikacije je predlagana metoda merjenja

intenzitete iskrenja primerna tako za nadzor elektromotorjev med obratovanjem, kot za končno kontrolo novih motorjev na proizvodni liniji.

Pri nekaterih univerzalnih elektromotorjih pa zaradi njihove konstrukcije dostop do napetosti na ščetkah ni mogoč oziroma je le-ta zelo otežkočen. Zato se kot nadaljnje delo kaže ustrezna prireditev predlagane metode, tako da bi bila uporabna tudi v teh specifičnih primerih. Preliminarne raziskave so pokazale, da lahko pridemo do zadovoljivih rezultatov tudi z obdelavo signala napetosti na priključnih sponkah elektromotorja. Pri tem je potrebno elektromotor priključiti preko naprave LISN, ki izloči motnje iz napajalnega omrežja. Izhod omenjene naprave pa vodimo na prirejeni visokofrekvenčni detektor z dodatnim ojačenjem, saj je zaradi dušenja statorskih navitji nivo visokofrekvenčnega signala na priključnih sponkah zelo nizek. Vendar pa se je izkazalo, da je pri takšnem načinu merjenja izmerjeni signal intenzitete iskrenja odvisen od povezave ohišja elektromotorja z ozemljitvenim vodom. Zato bo potrebno nekoliko spremeniti napravo LISN, tako da bo omogočala diferenčni način odvzema signala, ki bo po predvidevanjih manj občutljiv na prisotnost ozemljitve.

Ob ponovnem pogledu na tabelo 2.4, v kateri so našteje napake, ki se pojavljajo na sesalnih enotah, povzemimo katere napake sta zmožna detektirati modula opisana v nalogi. Modul za analizo vibracij omogoča odkrivanje enot z neuravnoteženim rotorjem in enot s tistimi poškodbami turbine, ki povzročajo povečan nivo vibracij na turbinskem delu enote. Modul za analizo komutacije pa nam sugerira na napake, ki se odražajo v povečanem iskrenju.

Končni cilj dela predstavljenega v tej nalogi pa je implementacija diagnostičnega sistema oziroma vsaj nekaterih njegovih modulov na proizvodni liniji. S tem bi omogočili zmanjšanje stroškov procesa zagotavljanja kakovosti, povečanje njegove zanesljivosti in nenazadnje tudi dvig zaupanja kupcev.

Literatura

- Albas, E., Durakbasa, T., & Eroglu, D. (2000). Application of a New Fault Detection Technology for Quality Improvement of Appliance Motors. www.artesis.com/Products/Mqm/iatc_2000_artesis_paper.pdf.
- Benko, U., Petrovčič, J., Juričič, Đ., Tavčar, J., & Rejec, J. (2003). An approach to fault diagnosis of vacuum cleaner motors based on sound analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v tisku.
- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. 2nd edition, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- Edwards, S., Lees, A.W., & Friswell, M.I. (1998). Fault diagnosis of rotating machinery. *Shock and Vibration Digest*, **30**, 1, 4-13.
- Gühmann, C., & Filbert, D. (1991). Fault diagnosis of electric low-power motors by analyzing the current signal. *Prepr. IFAC Symp. Safeprocess*, Baden-Baden, **1**, 67-72.
- Jereb, P. (1975). *Osnove električnih strojev*. Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 238-287.
- Kaiser, G. (1994). *A Friendly Guide to Wavelets*. 1st edition, Birkhäuser, Boston.
- Michiguchi, Y., & Ideumi, S. (1981). Spark detector for rotary electric machine current collector. Patent št. JP56148125.
- Michiguchi, Y., & Tanisaka, S. (1986). Spark monitor device for current collectors. Patent št. US4577151.
- Miyashita, I. (1985). Spark detecting device in current collector. Patent št. JP60152252.
- Nagano, S. in sodelavci (1989). Collector ring spark monitor for rotary electric machine. Patent št. JP1160315.
- Nagase, K. in sodelavci (1986). Commutation spark detector. Patent št. JP61170255.

- Nandi, S., & Toliyat, H.A. (1999). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines - A Review. *Proc. IEEE-IEMDC Conference*, Seattle, WA.
- Obara, S., & Miyashita, I. (1981). Spark detector for current collector. Patent št. JP56147382.
- Oppenheim, A.V., & Schafer R.W. (1999). *Discrete-time signal processing*. 2nd edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 771-772.
- Ouchi, S. in sodelavci (1987). Spark monitor for collector. Patent št. JP62118731.
- Petrovčič, J., Juričić, Đ., Rakar, A., & Tinta, D. (2002a). Sistem za končno kontrolo kvalitete elektromotorjev: 1. delno poročilo. IJS delovno poročilo št. 8513.
- Petrovčič, J., Juričić, Đ., & Tinta, D. (2002b). Detektorski sklop in naprava za merjenje intenzitete iskrenja kolektorskih motorjev. Patent št. P-200200297.
- Petrovčič, J., Juričić, Đ., Tinta, D., & Musizza, B. (2004). Funkcionalna verifikacija merilnih celic za končno kontrolo sesalnih enot. IJS delovno poročilo št. 8920.
- Rakar, A. (2003). Model-based fault detection of vacuum cleaner motors. *European Control Conference ECC 2003*, Cambridge.
- Rakar, A., & Juričić, Đ. (2002). Diagnostic reasoning under conflicting data: the application of the transferable belief model. *Journal of Process Control*, **12**, 55-67.
- Randall, R.B. (1987). *Frequency analysis*. 3rd edition, Brüel & Kjaer, Copenhagen, 153-176.
- Randall, R.B. (2002). State of the art in monitoring rotating machinery. *Proceedings of ISMA 2002*, **4**, 1457-1477.
- Rejec, J., Benedičič, B., Pavlovčič, F., & Nastran, J. (2002). Vpliv kondenzatorjev na komutacijo univerzalnih elektromotorjev. *Zbornik enajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2002*, Portorož, **A**, 433-436.
- Schenck (2004). Testing and Diagnostic Systems for Vacuum Cleaner Blower. <http://www.Schenck.net>.
- Shiozaki, J. (1985). Commutation spark detector of DC machine. Patent št. JP60059940.
- Shiozaki, J. in sodelavci (1986). Commutation spark monitoring apparatus for rotary electric machine. Patent št. JP61004440.
- Tanisaka, S. in sodelavci (1982). Spark detector for current collector. Patent št. JP57189072.
- Tawara, K. in sodelavci (1985a). Rectifying spark monitor. Patent št. JP60226739.

- Tawara, K. in sodelavci (1985b). Rectified state detector of commutator machine. Patent št. JP60022495.
- Tawara, K. in sodelavci (1985c). Commutation spark monitor. Patent št. JP60210152.
- Teraguchi, K. (1981). Spark monitoring device for current collector. Patent št. JP56081063.
- Toyoda, T. in sodelavci (1980). Method and device for rectification spark detection of direct current motor. Patent št. JP55062374.
- Vetter, T., Weber, H., & Grossehelweg, J. (1994), Vollautomatische Fehlerdiagnose in der Serienfretigung von Elektromotoren. *VDI-Tagung: "Überwachung und Fehlerdiagnose"*, Darmstadt.
- Vogelsang & Benning (2004). Prozessdatentechnik. <http://www.vogelsangbenning.de/index0.html>.
- Watanabe, T. (1983). Spark supervisory device for current collector. Patent št. JP58015452.
- Watanabe, T. (1986). Spark monitor of current collector. Patent št. JP61009139.
- Yamada, K. (1997). Commutation spark tendency controller. Patent št. JP9140101.
- Yang, D.M., & Penman, J. (2000). Intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring. *Proceedings of COMADEM 2000*, Houston, 461-470.
- Zagradišnik, I., & Slemnik, B. (2001). *Električni rotacijski stroji*. Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 246-313.

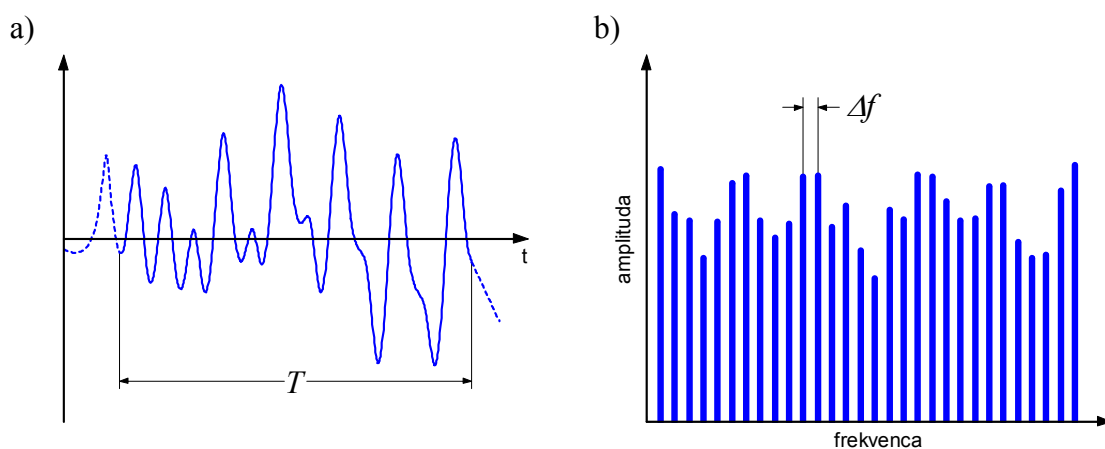
Dodatek A

Lastnosti spektralne analize

Pri določanju frekvenčnih spektrov realnih signalov s pomočjo diskretne Fourierjeve transformacije (DFT) se moramo zavedati nekaterih njenih lastnosti, ki vplivajo na verodostojnost rezultata. Potemtakem je tudi smiselno, da že pri samem izračunu uporabimo nekatere računske postopke, ki zmanjšajo nezaželen vpliv omenjenih lastnosti (Randall, 1987).

Pri računanju DFT realnega signala imamo na voljo le določen časovni izsek tega signala, katerega dolžino T pogojuje čas opazovanja oziroma meritve. Omenjena dolžina signala v časovnem prostoru pa določa prirastek frekvence med dvema zaporednima vzorcema v frekvenčnem prostoru Δf (Slika 1):

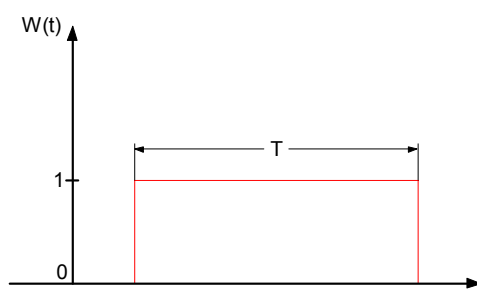
$$\Delta f = 1/T. \quad (1)$$



Slika 1: a) dolžina signala T , b) frekvenčna resolucija Δf

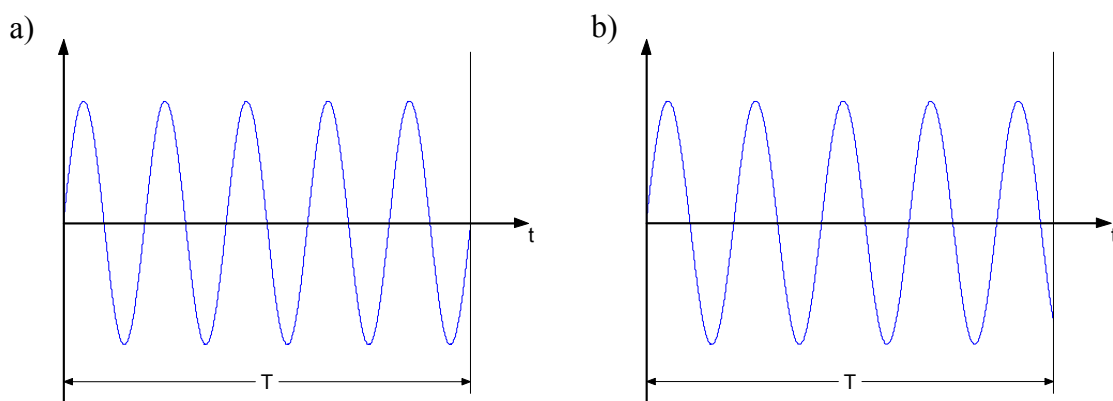
Omejitev dolžine signala pomeni isto kot, da bi signal v časovnem prostoru utežili s pravokotnim oknom višine 1 in dolžine T (Slika 2):

$$w(t) = \begin{cases} 1; & 0 \leq t \leq T \\ 0; & \text{sicer} \end{cases} \quad (2)$$



Slika 2: Pravokotno okno

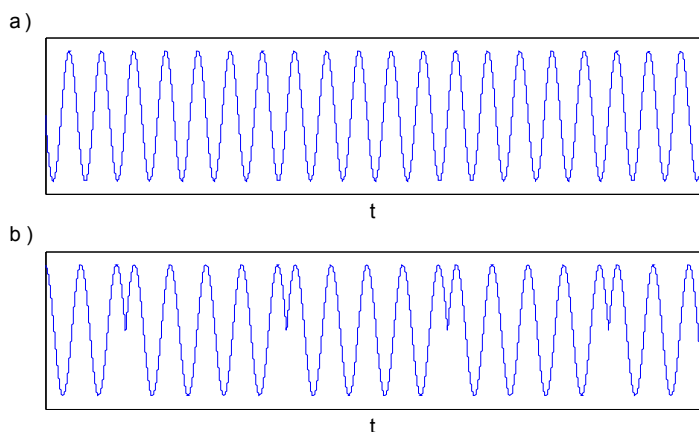
Pri tem je dolžina okna T lahko večkratnik periode posamezne frekvenčne komponente signala (Slika 3a) ali pa tudi ne (Slika 3b). V praksi imamo največkrat opravka s slednjim primerom, saj ponavadi ne poznamo frekvenčne vsebine obravnavanega signala, na podlagi katere bi lahko prilagodili dolžino okna.



Slika 3: Sinusni signal: a) dolžina okna je večkratnik periode signala, b) dolžina okna ni večkratnik periode signala

DFT je po definiciji uporabna le za frekvenčno analizo periodičnih signalov, pri čemer mora biti dolžina okna enaka periodi signala ali njenemu večkratniku. Rezultat DFT je namreč frekvenčni spekter signala, katerega dobimo z nizanjem časovnega izseka, ki je uporabljen za izračun. Kaj to pomeni, je za primer sinusnega signala prikazano na sliki 4. Če se dolžina časovnega izseka (okna) ujema z večkratnikom periode obravnavanega signala, je niz časovnih izsekov enak obravnavanemu signalu

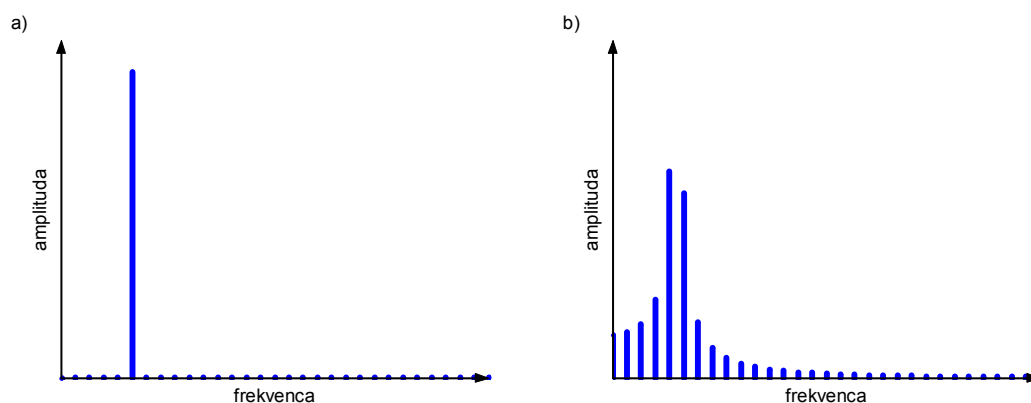
(Slika 4a). V nasprotnem primeru pa to ne velja več (Slika 4b) in zato tudi rezultat DFT ni korekten. S stališča frekvenčne analize so najbolj kritične nezveznosti odvoda, ki nastanejo pri nizanju izsekov, saj se zaradi njih v spektru pojavijo visokofrekvenčne komponente.



Slika 4: Niz časovnih izsekov sinusnega signala: a) dolžina okna je večkratnik periode signala, b) dolžina okna ni večkratnik periode signala

Kako ujemanje oziroma neujemanje dolžine okna z večkratnikom periode signala vpliva na rezultat DFT, je za primer sinusnega signala razvidno s slike 5. Če je dolžina okna večkratnik periode signala, v spektru dobimo le komponento pri frekvenci obravnavanega signala (Slika 5a), kar tudi ustreza dejanskemu stanju.

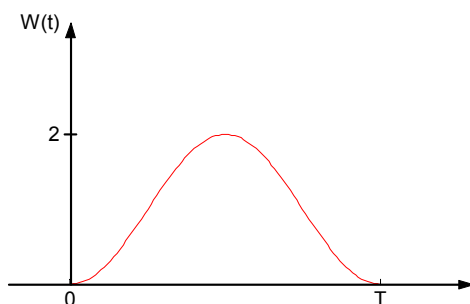
Z DFT signala s slike 3b, pri katerem se izbrana dolžina okna ne ujema z večkratnikom periode signala, pa dobimo spekter, ki je prikazan na sliki 5b. Pri tem je potrebno povedati, da je oblika tega spektra odvisna od razlike med dolžino okna in najbližjim večkratnikom periode signala. Neglede na to pa je zanj značilno, da se v njem pojavi več frekvenčnih komponent, katerim z oddaljevanjem od frekvence obravnavanega signala amplituda pada. Efekt je enak, kot da bi se energija signala porazdelila z dejanske na sosednje frekvenčne komponente v spektru (ang. leakage).



Slika 5: Frekvenčni spekter sinusnega signala izračunan z DFT: a) dolžina okna je večkratnik periode signala, b) dolžina okna ni večkratnik periode signala

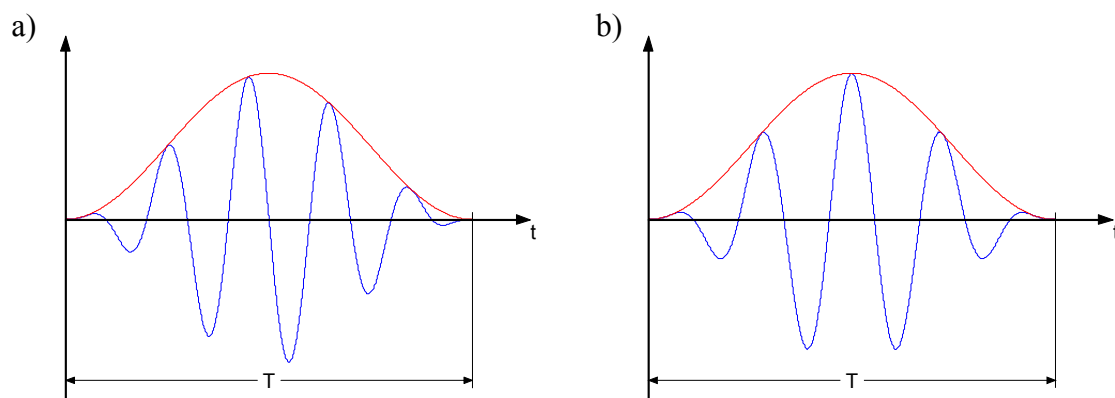
Pravkar opisano popačenje spektra zaradi neujemanja dolžine okna z večkratnikom periode signala lahko zmanjšamo z uporabo kakšnega drugega okna namesto pravokotnega. Najpogosteje se poslužujemo Hanningovega okna (Slika 6). Le-tega tvori ena perioda kosinusnega signala, ki je dvignjena, tako da ima minimalno vrednost 0:

$$W(t) = \begin{cases} 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t; & 0 \leq t \leq T \\ 0; & \text{sicer} \end{cases} \quad (3)$$

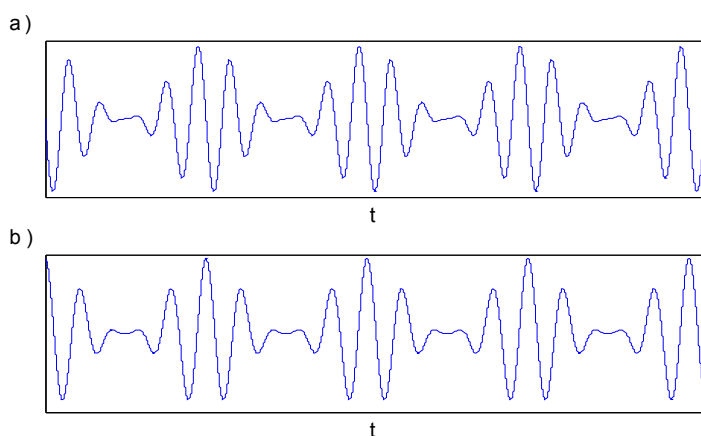


Slika 6: Hanningovo okno

Na sliki 7 sta prikazana signala s slike 3 utežena s Hanningovim oknom. Ta utežitev gladko potlači signal na začetku in koncu okna na vrednost 0. S tem se izognemo nezveznostim odvodov, ki bi sicer nastale pri nizanju časovnega izseka, katerega dolžina ni večkratnik periode signala (Slika 8b). Cena za to pa je nepotrebno preoblikovanje tudi niza izsekov, katerih dolžina se ujema z večkratnikom periode signala (Slika 8a).

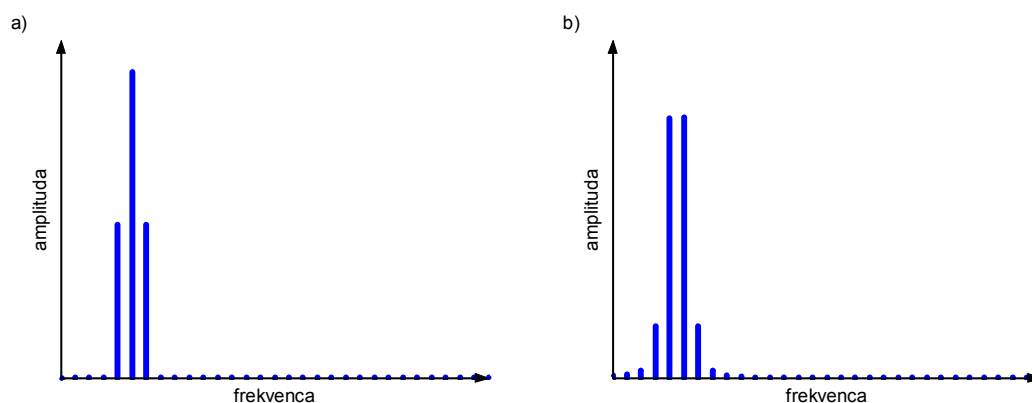


Slika 7: Utežitve sinusnega signala s Hanningovim oknom: a) dolžina okna je večkratnik periode signala, b) dolžina okna ni večkratnik periode signala



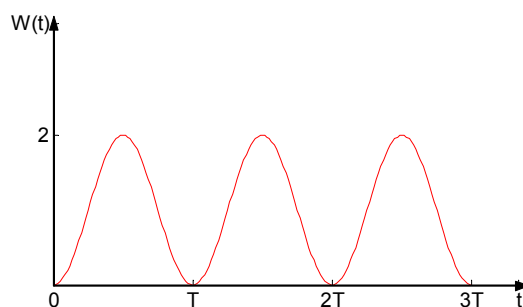
Slika 8: Niz časovnih izsekov sinusnega signala uteženih s Hanningovim oknom: a) dolžina okna je večkratnik periode signala, b) dolžina okna ni večkratnik periode signala

Rezultati DFT sinusnega signala uteženega s Hanningovim oknom so prikazani na sliki 9. V primeru ujemanja dolžine okna z večkratnikom periode signala se zaradi utežitve spekter (Slika 9a) nekoliko popači glede na tistega s slike 5a. Poleg komponente pri dejanski frekvenci signala se namreč pojavijo še nekatere sosednje komponente, ki pa imajo manjše amplitude. Pri neujemanju dolžine okna z večkratnikom periode signala pa je dobljeni spekter (Slika 9b) precej bolj podoben dejanskemu spektru obravnavanega signala, kot pa tisti, ki ga dobimo, če uporabimo pravokotno okno (Slika 5b).



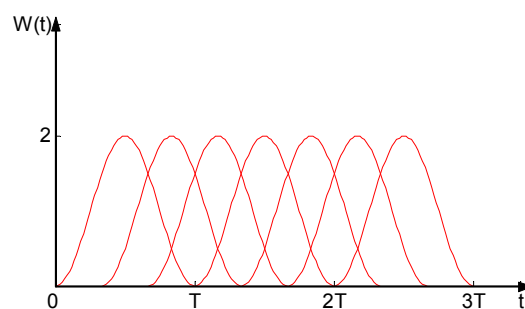
Slika 9: Rezultat DFT sinusnega signala uteženega s Hanningovim oknom: a) dolžina okna je večkratnik periode signala, b) dolžina okna ni večkratnik periode signala

Rezultat določanja frekvenčnih spektrov realnih signalov s pomočjo DFT lahko izboljšamo s povprečenjem več spektrov, ki jih izračunamo na različnih časovnih izsekih obravnavanega signala. Na ta način namreč izločimo šumne komponente naključnega izvora. V primeru, ko so omenjeni časovni izseki posnetka signala, ki ga imamo na voljo, dobljeni z uporabo Hanningovih oken, ki si sledijo eno za drugim (Slika 10), pride do izgube podatkov oziroma informacij, ker je signal na začetku in koncu posameznega izseka potlačen. Torej določeni deli signala manj prispevajo k povprečju.

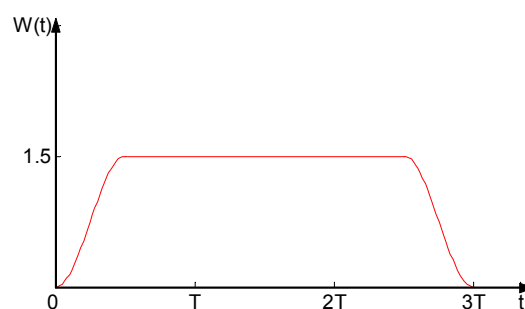


Slika 10: Zaporedje Hanningovih oken

Pravkar opisanemu pojavu se lahko izognemo z dvotretjinskim medsebojnim prekrivanjem zaporednih izsekov signala v časovnem prostoru (Slika 11). S stališča izgube podatkov to pomeni isto, kot da bi signal utežili z oknom, ki je prikazano na sliki 12. Le-to zagotavlja enakovredno zastopanost večjega dela signala.

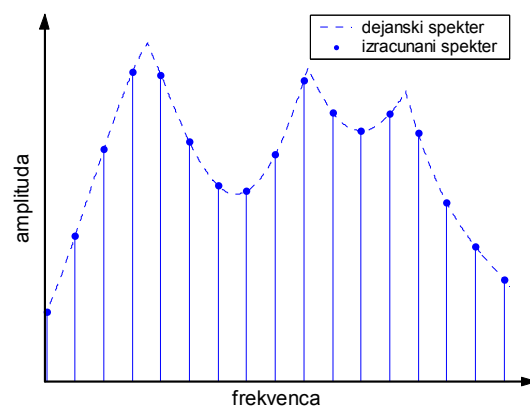


Slika 11: Dvotretjinsko prekrivanje Hanningovih oken



Slika 12: Učinek dvotretjinskega prekrivanja Hanningovih oken

Zaradi diskretizacije v frekvenčnem prostoru pride do tako imenovanega ograjnega efekta (Slika 13). Z DFT namreč dobimo vrednosti frekvenčnega spektra signala le v določenih ekvidistantnih točkah. O poteku spektra med omenjenimi točkami pa nimamo nobenih informacij. Zato v primeru neujemanja frekvence, pri kateri računamo DFT, in frekvence, pri kateri dejansko obstaja določena značilna komponenta, ne dobimo amplitude omenjene komponente, temveč nekoliko nižjo vrednost. Poleg tega pa ne moremo ugotoviti točne frekvence te komponente. Nezaželenim posledicam ograjnega efekta se do določene mere lahko izognemo s povečanjem resolucije v frekvenčnem prostoru, kar pa zahteva daljši čas opazovanja signala v časovnem prostoru. Druga rešitev je uporaba ostalih metod za oceno spektra, kot so valčna transformacija (Kaiser, 1994; Daubechies, 1992), ARMA (ang. Auto-Regressive Moving Average) (Oppenheim in Schafer, 1999) in podobne.



Slika 13: Ograjni efekt

Izjava

Izjavljam, da sem magistrsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorice doc. dr. Anete Stefanovske. Izkazano pomoč ostalih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Ljubljana, 2004

Dejan Tinta