

# Uporaba diskretne Fouriereve transformacije pri detekciji zlomljenih rotorskih palic v asinhronskem motorju

Klemen Drobnič, Vanja Ambrožič, Rastko Fišer

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: klemen.drobnic@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Spektralna analiza statorskega toka je uveljavljena tehnika detektiranja zlomljenih rotorskih palic v asinhronskem motorju. Na podlagi fizikalnega mehanizma širjenja specifične frekvenčne motnje v statorskem toku so predstavljeni osnovni kriteriji za detekcijo zlomljenih rotorskih palic, tj. leva in desna komponenta. Opisane so splošne omejitve spektralne analize (spektralno prekrivanje, spektralno prepuščanje, ograjni učinek) ter predlagane ustrezne rešitve. V nadaljevanju je navedenih nekaj specifičnih okoliščin (vpliv nasičenja, oscilirajočega bremena, dvojne kletke), ki bistveno vplivajo na kakovost detekcije poškodbe. Predstavljene so rešitve, bodisi z nadgradnjo spektralne analize bodisi s popolnoma drugačno metodo.

**Ključne besede:** asinhronski motor, zlomljene rotorske palice, diskretna Fouriereva transformacija, diagnostika

## Application of the Discrete Fourier Transform and Detection of Broken Rotor Bars in the Induction Motor

Broken rotor bars have been traditionally detected by using spectral analysis of the stator current usually known as Motor Current Signature Analysis (MCSA). In this paper, we describe series of physical interactions between the electrical and mechanical quantities that lead to the typical frequency spectrum of a faulty induction machine. A list of the MCSA limitations tending to confine the use of MCSA to the steady state and full load operation is given and a short review of the diagnostic methods used to cope with the limitations is presented.

## 1 UVOD

Pravočasna detekcija napak v industrijskih pogonih prinaša številne pozitivne učinke. Pomemben vidik v zahtevnih motorskih aplikacijah je poleg varnosti tudi zanesljivost obratovanja. Z ustreznim diagnostičnim sistemom pravočasno zaznamo poškodbe v zgodnji fazi, kar nam omogoča načrtovane remontne posege brez nenadnih izpadov, s čimer se zmanjšajo tako stroški rednega vzdrževanja kot nepredvideni izpadi dohodkov zaradi neobratovanja.

Detekcija je smiselna v primerih, ko je razvoj poškodbe postopen, tj. s časovno konstanto dneva ali več, saj takrat lahko ukrepamo s primernim posegom. Grobo lahko tehnike zaznavanja napake razdelimo v tri skupine: na podlagi modela, signala ali podatkovne zbirke [1]. Ne glede na vrsto diagnostike vsi postopki temeljijo na ustreznem izboru in obdelavi signalov. Diagnostika na podlagi modela stroja se opira na predhodno analizo delovanja poškodovanega stroja. S simulacijami predvidimo lastnosti signalov, ki jih nato

uporabimo kot referenčne vrednosti pri opazovanju dejanskega pogona. Odstopanje dejanskih vrednosti je znak prisotnosti poškodbe. Diagnostika na podlagi signalov išče lastnosti signalov, ki so (na podlagi predhodnih raziskav) značilni za določen tip poškodbe. S pravilno izbiro obdelave ciljnega signala izločimo vplive šuma, konstrukcijskih lastnosti in obratovalnih pogojev. Detekcija na podlagi podatkovne zbirke temelji na procesiranju množice signalov stroja, ki jih nato klasificiramo ter uvrstimo v bazo. S tehnikami razpoznavanja vzorcev ali umetne inteligence nato izvajamo proces odločanja za konkretni stroj. Elektromotorski pogoni so izpostavljeni različnim tipom poškodb:

- statorske poškodbe (medovojni kratki stiki, poškodbe glav navitij, preboj na magnetno jedro),
- električne rotorske poškodbe (zlom rotorskih palic – ZRP oz. kratkostičnega obroča za stroje s kratkostično kletko; za stroje z navitim rotorjem je seznam poškodb enak statorskemu),
- mehanske rotorske poškodbe (ležajni elementi, dinamična in statična ekscentričnost) in
- napaka na pretvorniškem sistemu močnostnih stikal.

Pogostnost določene poškodbe je odvisna od moči, napetostnega razreda in tipa stroja. Pri nizkonapetostnih strojih majhnih moči prevladujejo mehanske poškodbe, medtem ko navitja niso posebej prizadeta. Takšni stroji uporabljajo kotalne ležajne elemente, katerih zanesljivost je močno odvisna od kakovosti vzdrževanja. S povečevanjem moči in napajalne

napetosti se poveča tako dielektrična (stator) kot mehanska (rotor) obremenitev navitij, kar se kaže v povečevanju števila tako rotorskih kot statorskih poškodb. Večji stroji uporabljajo drsne ležajne elemente s konstantnim mazanjem, kar znatno povečuje njihovo življenjsko dobo [2]. Glavni vzroki za ZRP so velike mehanske obremenitve zaradi dinamičnega obratovanja (zagoni, reverziranja), bremena s pulzirajočim momentom (kompresorji, črpalke) ter okvare v proizvodnem procesu [3].

## 2 FIZIKALNO OZADJE ZRP

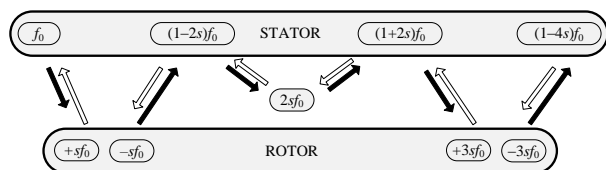
### 2.1 Nastanek okvare

Konstrukcija asinhronskega motorja (AM) temelji na poudarjeni simetriji tako statorskega kot rotorskega dela, kar zagotavlja enakomerno porazdelitev in delovanje elektromagnetnih sil. V takšnih razmerah (zdravo stanje) so fazni tokovi in napetosti enaki, saj so impedančni parametri stroja fazno simetrični in neodvisni od trenutnega rotorskega zasuka. Statorski tok  $I$  v (idealnem) AM vsebuje zgolj osnovno harmonsko komponento pri  $f_0$ , ki je enaka frekvenci napajalne napetosti, medtem ko je rotorski tok omejen na komponento pri  $sf_0$ , kjer je  $s$  slip stroja.

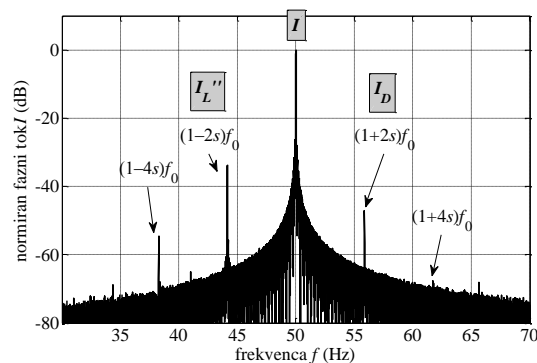
AM je kljub svoji robustnosti izpostavljen vrsti poškodb, pri čemer ima vsaka izmed njih (zlomljene rotorske palice, ekscentričnost, statorski medovojni stiki) karakteristični frekvenčni podpis. Z nastopom ZRP se simetrija stroja poruši. Zaradi rotorske nesimetrije nastane negativno magnetno vrtilno polje, ki v rotorski tok vnese komponento pri  $-sf_0$ , ta pa v statorskem toku inducira komponento pri  $(1-2s)f_0$  z amplitudo  $I_L$ .

Komponenta  $I_L$  je osnovna manifestacija ZRP v statorskem toku in je vzrok oscilacije navora in hitrosti z  $2sf_0$ , ki sta hkrati vir novih interakcij (slika 1). Nastaneta namreč dve novi tokovni komponenti v statorskem toku. Kot reakcija na osnovno komponento nastane dodatna leva komponenta  $I_L'$  pri  $(1-2s)f_0$ , ob njej pa tudi desna komponenta  $I_D$  pri  $(1+2s)f_0$ . Komponenti  $I_L$  in  $I_L'$  zasedata isto frekvenčno lego  $(1-2s)f_0$ , toda sta v protifazi. Zato se njuni amplitudi odštejeta in v spektru dobimo na mestu  $(1-2s)f_0$  tokovno komponento  $I_L'' = I_L + I_L'$  (slika 2).

Desna komponenta  $I_D$  je vir verige novih interakcij, saj povzroči pojav  $\pm 3sf_0$  v rotorskem toku (slika 1). Analogno z ravnokar opisanim sosledjem dogodkov komponenta  $\pm 3sf_0$  povzroči nastanek komponent



Slika 1: Širjenje motnje v statorskem toku zaradi rotorske asimetrije. Črno obarvane puščice označujejo smer širjenja motnje, bele pa povraten učinek dušenja (reakcija).



Slika 2: Spekter statorskega toka AM z 2 ZRP

$(1\pm 4s)f_0$  v statorskem toku. Mehanizem nastajanja komponent lahko posplošimo tudi na druge višjiharmonске frekvence, kar nas pripelje do splošnega izraza za frekvenčne komponente v statorskem toku  $(1\pm ks)f_0$ , kjer je  $k = 1, 2, 3, \dots$  (slika 1 in 2).

### 2.2 Značilne spektralne komponente

Frekvenčna analiza statorskega toka je najpogosteje uporabljan način detekcije ZRP in jo v literaturi poznamo kot Motor Current Signature Analysis (MCSA) [4]. Zadostuje, da iz celotne verige frekvenčnih komponent zaznamo le obe dominantni frekvenčni komponenti  $(1\pm 2s)f_0$ . Imenujemo ju tudi stranski komponenti, saj sta enako oddaljeni od osnovne komponente, ki je pogojena z napajalno frekvenco. Njena lega v frekvenčnem spektru je odvisna od trenutne obremenitve oz. trenutnega slipa.

Na podlagi modelov je bila raziskana zveza med velikostjo komponent  $I_L''$  in  $I_D$  ter stopnjo poškodbe. Razmerje med njuno vsoto in osnovno komponento je približno enako razmerju med številom (zaporedno) zlomljenih palic  $N_{ZRP}$  in skupnim številom palic  $N_s$  [5].

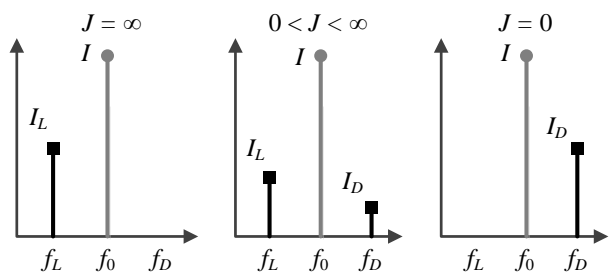
$$\frac{I_L}{I} = \frac{I_L'' + I_D}{I} \approx \frac{N_{ZRP}}{N_s} \quad (1)$$

Ocena (1) je veljavna, če zanemarimo magnetilni tok, prispevek rotorskega obroča k skupni upornosti ter reaktanco palic. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da se (1) dobro ujema z meritvami pri velikih strojih [6].

Vztrajnostni moment  $J$  pogonskega sistema vpliva na velikost posameznih komponent  $I_L''$  in  $I_D$ , toda njuna vsota  $I_L'' + I_D$  je neodvisna od  $J$  in je enaka (prvotni) levi komponenti  $I_L$  pri  $(1-2s)f_0$  v primeru neskončnega vztrajnostnega momenta (slika 3).

Implementacija MCSA v realen pogon zahteva:

- zajemanje statorskega toka (tokovni transformator, kjer zadostuje že ena sama faza),
- spektralna analiza (spektralni analizator ali računalniški/mikrokrmilniški sistem) in
- razločevanje zdravega in poškodovanega stanja.



Slika 3: Neodvisnost vsote leve in desne komponente od vztrajnostnega momenta  $J$

V praksi je najpogosteje izbrana vrednost za alarm  $-45$  dB razlike med glavno in (eno izmed) stransko komponento oziroma ko stranska komponenta doseže  $0,5$  % amplitude osnovne komponente [7].

### 3 OMEJITVE SPEKTRALNE ANALIZE

#### 3.1 Diskretna Fourierova transformacija

Diskretna Fourierova transformacija (DFT) je matematična operacija, ki iz vhodnega vektorja

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}[0], \mathbf{x}[1], \dots, \mathbf{x}[N-1])$$

dolžine  $N$  izračuna izhodni vektor  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}[0], \mathbf{X}[1], \dots, \mathbf{X}[N-1])$$

na podlagi predpisa

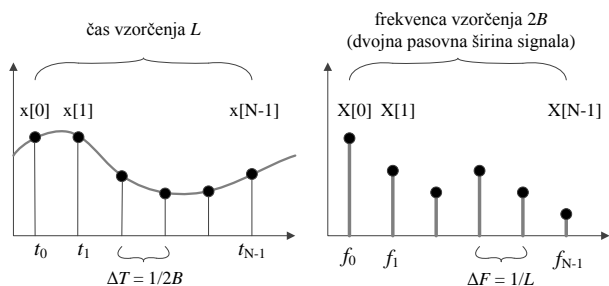
$$\mathbf{X}[m] = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}[n] \cdot e^{-2\pi j m n / N}, \quad (2)$$

pri čemer je  $m = 0, 1, \dots, N-1$ .

Vzorčna frekvenca  $f_s = 2B$  in število vzorcev  $N$  določata ločljivost  $\Delta F$  v frekvenčnem prostoru (slika 4)

$$\Delta F = \frac{2B}{N} = \frac{2B}{2BL} = \frac{1}{L} \quad (3)$$

Hitri Fourierov transform (FFT) je učinkovit računalniški algoritem, ki rešuje praktični problem



Slika 4: Diskretna Fourierova transformacija: časovni (levo) in frekvenčni (desno) prostor

izračuna DFT.

#### 3.2 Splošne omejitve

##### 3.2.1 Spektralno prekrivanje

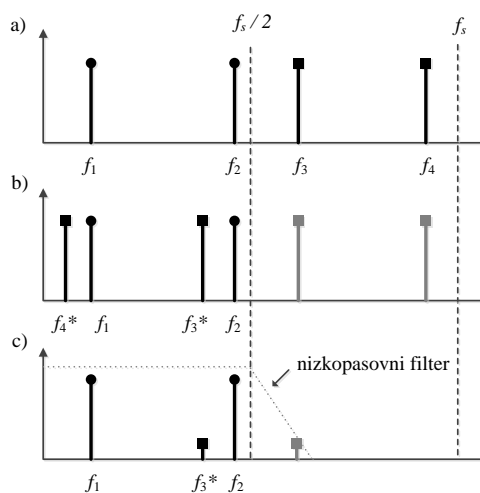
Če vzorčna frekvenca  $f_s$  ni vsaj dvakrat večja od pasovne širine signala  $B$ , je posledica spektralno prekrivanje. Na sliki 5a je prikazan spekter originalnega signala ter označena  $f_s$ , s katero vzorčimo signal. Spektralni komponenti  $f_3$  in  $f_4$  segata čez vrednost  $f_s/2$ , zato sta napačno rekonstruirani (slika 5b), saj ju najdemo v nizkofrekvenčnem območju. Splošni rešitvi sta dve: povečanje vzorčne frekvence, tako da velja  $f_s > 2B$ , ali predhodno nizko-pasovno filtriranje signala, ki omeji njegovo pasovno širino na  $f_s/2$  (slika 5c).

V močnostni elektrotehniki je zanimiva predvsem analiza signalov z osnovno komponento  $50$  Hz in frekvenčnim spektrom do  $5000$  Hz, ki izvira iz delovanja močnostnih stikal.

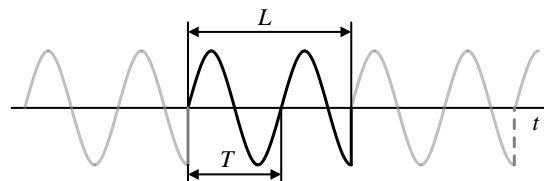
##### 3.2.2 Spektralno prepuščanje

Po definiciji DFT predpostavlja, da je opazovani signal periodičen (torej definiran od  $-\infty$  do  $+\infty$ ) s konstantno periodo  $T$ . Ker pa je vzorčni čas  $L$  omejen na neko končno vrednost, predpostavka neskončno dolgega opazovanja ne more biti zadovoljena. Izkaže se, da je uporaba DFT upravičena, če zagotovimo celoštevilsko številsko razmerje med  $L$  in  $T$ . Če  $L$  ni enak večkratniku osnovne periode  $T$ , se namreč v signal vsilijo ali nezvezni prehodi ali prekrivanja (slika 6). Posledično je rezultat DFT napačen.

Za ilustracijo si oglejmo uporabo DFT nad signaloma



Slika 5: Spektralno prekrivanje je posledica prenizke vzorčne frekvence  $f_s$ : a) originalni signal, b) vzorčeni signal, c) vzorčeni signal s predhodnim filtriranjem



Slika 6: Spektralno prepuščanje

frekvence  $f_1 = 50$  Hz ( $T_1 = 20$  ms) in  $f_2 = 50,5$  Hz ( $T_2 = 19,8$  ms). Analizo opravimo dvakrat, in sicer pri enaki vzorčni frekvenci  $f_s$ , toda različnem času vzorčenja  $L$  (tabela 1).

Tabela 1: Parametri DFT analize

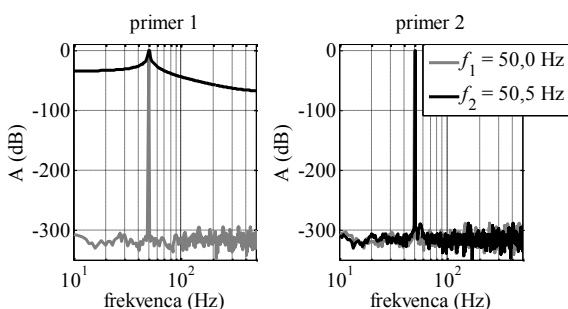
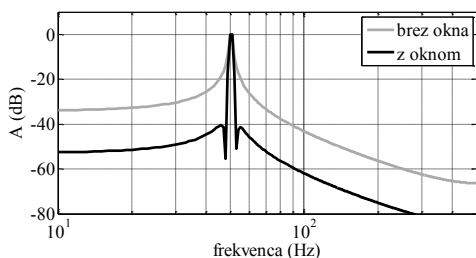
	primer 1	primer 2
Število vzorcev $N$	1024	2048
Vzorčna frekvenca $f_s$ [vz/s]	1024	1024
Čas vzorčenja $L = N / f_s$ [s]	1	2

Slika 7 prikazuje spektra signalov z različnima časoma vzorčenja (primera 1 in 2). V primeru 2 zagotovimo, da je  $L$  večkratnik periode  $T_2$ , medtem ko v primeru 1 to ne velja. DFT vrne v primeru 1 popačen frekvenčni spekter za signal  $f_2 = 50,5$  Hz, medtem ko je v primeru 2 spekter istega signala pravilno ugotovljen.

Tudi v praksi se lotimo problema spektralnega repuščanja največkrat tako, da podaljšamo čas zajemanja  $L$ , katerega vrednost naj teži k večkratniku osnovne periode  $T$ . Tako se harmonsko popačenje zaradi (morebitne) nezveznosti oz. prekrivanja na mejah koncentrira v območju nizkih frekvenc. Zato je njihov vpliv v visokofrekvenčnem območju zmanjšan.

Razlog tiči v tem, da se osnovni harmonik signala premakne v desno smer spektra, medtem ko se harmonsko popačenje zaradi nezveznosti na mejah koncentrira v območju nizkih frekvenc. Obenem se poveča frekvenčna ločljivost  $\Delta F = 1/L$ . Končni čas zajemanja  $L$  ima vedno za posledico končno frekvenčno ločljivost  $\Delta F$ . Podaljševanje  $L$  poveča ločljivost pripadajočega frekvenčnega spektra.

Druga rešitev je uporaba oken (slika 8), s katerimi zajetim vzorcem dodamo različne uteži ter tako

Slika 7: Spekter signalov  $f_1$  in  $f_2$  pri različnem času vzorčenju  $L$ Slika 8: Spekter signala s  $f_2 = 50,5$  Hz z uporabo Hanningovega okna (parametri zajema so enaki primeru 1 iz tabele 1)

ublažimo nezveznosti na mejah. Njihova prednost je, da se izboljša  $\Delta F$ , a na račun zmanjšane amplitude signalov v frekvenčnem prostoru.

### 3.2.3 Ograjni učinek

Pri detekciji ZRP je ciljna frekvenčna komponenta  $f_{ZRP}$  odvisna od sinhronske frekvence  $f_0$  in trenutne obremenitve, podane s  $\text{slipom } s$

$$f_{ZRP} = (1 \pm 2ks)f_1, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

Zaradi diskretizacije v frekvenčnem prostoru DFT izračuna vrednosti spektra zgolj pri ekvidistančnih frekvencah, ki so celoštevilski večkratniki osnovne frekvence ( $1/L$ ). Zato vedno obstaja možnost, da nam  $f_{ZRP}$  ostane zakrita, tj. ciljna komponenta je zaradi kvantizacijskega učinka skrita med dvema komponentama. Z drugimi besedami to pomeni, da ne moremo zagotoviti frekvence  $f_{ZRP}$  v spektru. Pojav imenujemo ograjni učinek. V takšnem primeru se energija „nevidnih“ komponent prelije v tiste harmonike, ki so sicer vidni v spektru. Posledično bo prišlo do napake tako v frekvenci kot amplitudi spektralnih komponent (slika 9). V [8] najdemo algoritme, ki na podlagi vidnih harmonikov aproksimirajo ciljne/resnične komponente.

Na sliki 9 zgoraj je spekter izvornega signala, ki vsebuje komponente pri 49,83 Hz, 49,85 Hz in 49,87 Hz. Signal vzorčimo (tabela 2) ter uporabimo DFT. Dobljeni spekter prikazuje slika 8 spodaj. Ker je spekter diskreten z ločljivostjo  $\Delta F = 0,1$  Hz, zgornje tri komponente ne morejo biti predstavljene z natančno eno komponento. Nasprotno, vsaki izvorni komponenti ustreza skupek več komponent z relativnim vrhom pri tisti diskretni frekvenci, ki je najbližja izvorni komponenti.

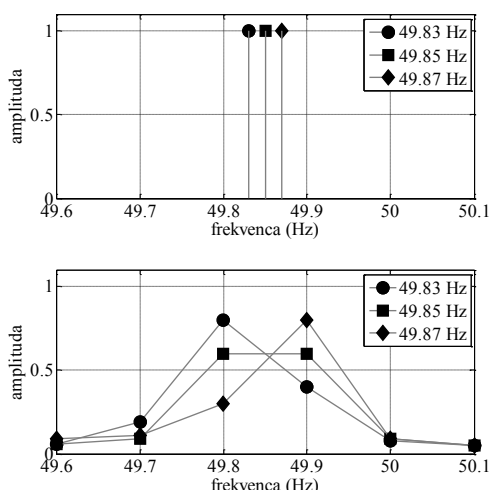
Tabela 2: Parametri vzorčenja

Število vzorcev $N$	10240
Vzorčna frekvenca $f_s$ [vz/s]	1024
Čas vzorčenja $L = N / f_s$ [s]	10
Ločljivost [Hz]	0,1

Posledice ograjnega učinka omejimo s povečevanjem ločljivosti  $\Delta F$ , kar zahteva daljši čas zajemanja  $L$ . Obenem je povečana  $\Delta F$  zelo dobrodošla pri specifičnih pogojih (nizka obremenitev, stroj velikih moči).  $f_{ZRP}$  je namreč v neposredni okolici  $f_0$ , zato je ločljivost bistvena za njuno razločitev.

Tabela 3: Povzetek rešitev pri uporabi DFT

Problem	Rešitev
Spektralno prekrivanje	povečanje vzorčne frekvence, predhodno nizkopasovno filtriranje
Spektralno repuščanje	podaljšanje časa zajemanja $L$ , uporaba oken
Ograjni učinek	podaljšanje časa zajemanja $L$



Slika 9: Ograjni učinek: originalni (zgoraj) in rekonstruirani (spodaj) signal

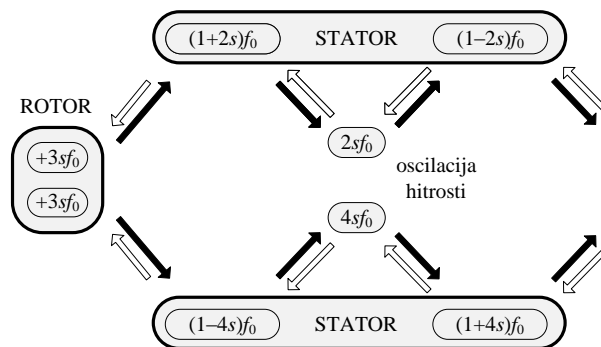
### 3.3 Specifične omejitve pri detekciji zlomljenih palic

MCSA je primerna metoda za detekcijo ZRP, a je treba biti ob njeni aplikaciji pozoren na specifične omejitve. Osnovna zahteva za uspešno aplikacijo MCSA je zadostna obremenitev stroja. Pri majhnem bremenu je rotorski tok namreč premajhen, da bi povzročil dovolj izrazite stranske komponente v statorskem toku. Spektralna analiza je problematična tudi pri pogonih z oscilirajočim bremenom, če je frekvenca teh oscilacij blizu značilni mehanski frekvenci  $2sf_0$ . Pri strojih, kjer so nasičenje ali prečni tokovi izraziti, namreč spektralna analiza toka ne zagotavlja enoumne detekcije poškodbe. Prav tako osnovni mehanizem MCSA odstopa pri posebnih konstrukcijah (rotor z dvojno kratkostično kletko). Detekcija napake je otežena oziroma nemogoča pri pogonih, ki delujejo v tranzientnem obratovanju in/ali so napajani z izmeničnim presmernikom [1].

Ob predpostavki, da opazovani pogon ni izpostavljen zgoraj naštetim omejitvam, lahko z gotovostjo trdimo, da frekvenčni komponenti  $I_L$  in  $I_D$  pri  $(1 \pm 2s)f_0$  izvirata izključno iz električne nesimetrije v rotorju ter posledičnih oscilacij v hitrosti. MCSA je najprimernejša metoda za detekcijo ZRP, če izvajamo diagnostiko na pogonu, ki deluje v stacionarnem režimu in je nazivno obremenjen.

#### 3.3.1 Vpliv nasičenja

Nasičenje v rotorskem paketu vzbudi 3. harmonsko komponento fluksa v zračni reži, ki se manifestira kot  $(1+2s)f_0$  v statorskem toku [9]. Ta komponenta je neodvisna od prisotnosti ZRP, a sovpada z desno komponento, ki jo povzročijo zlomljene palice, zato je v tokovnem spektru na mestu  $(1+2s)f_0$  pravzaprav njuna vsota (slika 10).



Slika 10: Širjenje motnje v statorskem toku zaradi nasičenja v rotorju

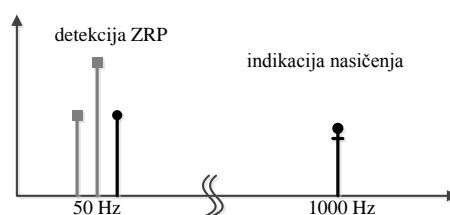
Preden se odločimo, da povečana  $(1+2s)f_0$  nakazuje ZRP, se je treba prepričati, da je stopnja nasičenja zanemarljiva. Metoda za razločevanje vpliva nasičenja in ZRP temelji na vrednosti neke druge frekvenčne komponente  $f_{nas}$ , ki pa je lastna zgolj nasičenju (5) ( $P$  – število polovih parov). Nastane kot posledica modulacije med rotorskimi tori in tretjim harmonikom, povzročeni zaradi nasičenja. Če je  $f_{nas}$  zanemarljiva, lahko sklepamo, da je desna komponenta zgolj posledica ZRP (slika 11).

$$f_{nas} = \left[ \frac{N_{ZRP}}{P} (1-s) \pm 3 \right] f_0 \quad (5)$$

Tudi nasičenje samo je pomemben vzrok naglega razvoja poškodbe. ZRP povzroči redistribucijo tokov v sosednjih palicah. Tok v sosednji palici, ki leži v smeri vrtenja rotorja, se močno poveča. V palici, ki leži na drugi strani, pa se tok celo zmanjša. Lokalno nasičenje železa zamegli efekt ZRP ter povzroči povečane izgube v železu (pregrevanje). Prizadeta območja so ravno ob palicah, ki prevzamejo dodatno breme toka (pregrevanje) zaradi izpada sosednje palice. To pojasni večjo verjetnost, da se bo na tem mestu napaka razvijala naprej [10].

#### 3.3.2 Vpliv oscilirajočega bremena

Na velikost tipičnih frekvenčnih komponent vplivajo tudi obratovalni pogoji. Oscilirajoča bremena reagirajo s statorskim tokom in njegovimi višjeharmonskimi komponentami ter povzročijo nov niz modulacij, npr.  $f \neq f_{osc}$ . Če je mehanska frekvenca oscilacije  $f_{osc} \approx 2sf_0$ , potem se ta nova komponenta prišteva h komponenti, ki



Slika 11: Metoda za razločevanje vpliva nasičenja in ZRP

je neposredna posledica zlomljenih palic. S spektralno analizo statorskega toka torej ne moremo ločevati teh dveh fenomenov.

Eden izmed načinov razločevanja je analiza spektra trenutne moči [11]. Trenutna moč  $S$  je definirana kot produkt vektorja statorske napetosti  $u_s$  in kompleksno konjugirane vrednosti statorskega toka  $i_s$ ,

$$\mathbf{S} = \mathbf{u}_s \mathbf{i}_s^* = U e^{j(\omega t + \varphi)} [I e^{-j\omega t} + \mathbf{i}_L^* + \mathbf{i}_D^*]. \quad (6)$$

Medtem ko je napetost omejena na osnovni harmonik, tok vsebuje tudi dve stranski komponenti  $i_L^*$  in  $i_D^*$ , katerih izvor je treba določiti.

Trenutno moč lahko razdelimo na njen konstantni  $S_{\text{=}}$  in oscilirajoči  $S_{\text{.}}$  del. Kriterij za ločevanje je prevladujoči karakter oscilirajoče komponente trenutne moči  $S_{\text{.}}$ .

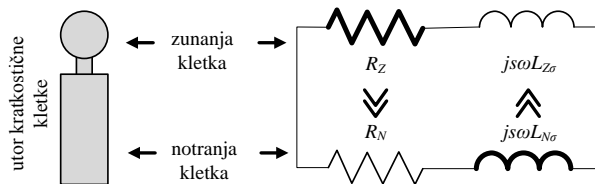
Tabela 4: Kriterij za razločitev dveh vrst poškodb

$\text{Re}[\mathbf{S}_{\text{.}}] \ll \text{Im}[\mathbf{S}_{\text{.}}]$	zlomljene rotorske palice
$\text{Im}[\mathbf{S}_{\text{.}}] \ll \text{Re}[\mathbf{S}_{\text{.}}]$	podaljšan čas zajemanja $L$

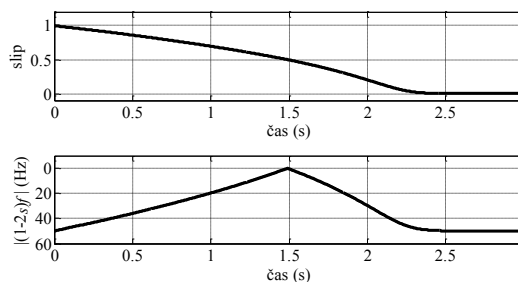
### 3.3.3 Vpliv dvojne kratkostične kletke

Rotorji z dvojno kratkostično kletko so namenjeni uporabi v aplikacijah, kjer je potreben velik zagonski moment. Konstrukcijo kratkostične kletke (slika 12) sestavljata zunanja kletka z relativno visoko upornostjo (aktivna med zagonom) in notranja kletka z nizko upornostjo (stacionarno obratovanje). Med zagonom je zunanja kletka izpostavljena velikemu toku, ki toplotno in mehansko obremeni material. Ker so zagonski časi ponavadi dolgi, rotorski paket pa ima omejene možnosti hlajenja, je material v zunanji kletki še toliko bolj nagnjen k poškodbi. V stacionarnem stanju glavina toka teče po (nepoškodovani) notranji kletki, kar onemogoča uporabo detekcije na podlagi izraženosti stranskih komponent.

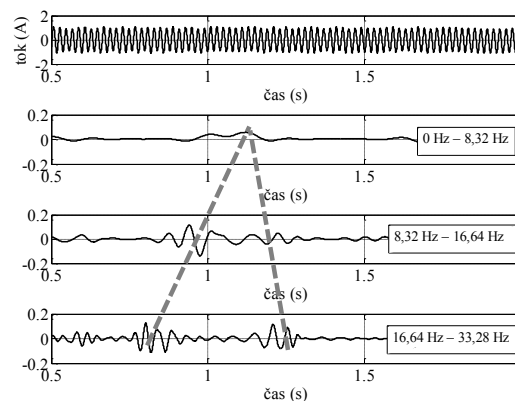
ZRP v zunanji kletki lahko torej detektiramo zgolj med zagonskim pojavom, saj takrat skozi teče tok. DFT tukaj odpove, saj je zagon neperiodičen pojav. Rešitev ponuja diskretna valčna transformacija (DWT). Z DWT lahko frekvenčno vsebino signala tudi časovno opredelimo v t. i. časovno-frekvenčnem prostoru. Statorski fazni tok je posnet med zagonom ter nato razstavljen na vnaprej določeno število dekompozicijskih nivojev. Posamezen dekompozicijski nivo vsebuje le točno določen frekvenčni obseg izvornega signala. Nato sledimo frekvenčni komponenti  $|f_{ZRP}|$  med zagonskim prehodnim pojavom. Slip  $s$  se namreč z začetne vrednosti 1 približuje 0, ob tem pa karakteristična frekvenca napake  $|f_{ZRP}|$  potuje prek različnih dekompozicijskih nivojev in pri tem opiše obliko grške črke  $\lambda$  (slika 13), kar skušamo zaznati in primerno ovrednotiti. Na sliki 14 vidimo praktičen primer dekompozicije zagonskega statorskega toka. Zanima nas tisti del prehodnega pojava, ko so vrednosti karakteristične frekvence v okolici  $|f_{ZRP}| = 0$  (ob



Slika 12: Razmere v AM z dvojno kratkostično kletko



Slika 13: Slip (zgoraj) in karakteristična frekvenca  $|f_{ZRP}|$  med zagonskim prehodnim pojavom.  $|f_{ZRP}|$  opiše značilen vzorec oblike  $\lambda$



Slika 14: Valčna analiza statorskega toka AM med zagonom (vzorec  $\lambda$ )

$t = 1,2$  s). Oscilacije v različnih pasovnih širinah lahko smiselno povežemo v vzorec  $\lambda$ . Pri nepoškodovanem AM tega vzorca ni mogoče najti.

## 4 SKLEP

MCSA je najpogosteje uporabljena diagnostična metoda v industrijski praksi. Privlačnost metode je v njeni neinvazivni naravi – vgradnja tokovnih sond je preprosta in stroškovno zanemarljiva, obenem pa MCSA ne prekinja normalnega delovnega cikla.

Kljub temu ima osnovna izvedba MCSA nekaj pomenljivih omejitev. Delovni režim pogona (npr. oscilirajoče breme, stopnja nasičenja) povzroča superponiranje določenih frekvenčnih komponent na mestih, ki jih MCSA povezuje izključno s prisotnostjo napake. Z uporabo dodatnih razločevalnih metod lahko zagotovimo zanesljivo informacijo o stanju v pogonu.

## LITERATURA

- [1] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, 2008.
- [2] P. J. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding, *Condition monitoring of electrical machines*. Stevenage, UK: IET, 2008.
- [3] K. Drobnič, M. Nemeč, D. Makuc, R. Fišer, and V. Ambrožič, "Pseudo-salient model of induction machine with broken rotor bars," in *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 213–220.
- [4] D. Matić, Ž. Kanović, F. Kulić, D. Reljić, Đ. Oros, and V. Vasić, "Induction Motor Broken Bar Detection for a Thermal Power-Plant Application . A Case Study," *Elektrotehniški vestnik*, vol. 80, no. 1–2, pp. 45–49, 2013.
- [5] F. Filippetti, M. Martelli, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE*, 1992, pp. 92–99.
- [6] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, R. Passaglia, M. Saottini, G. Tontini, M. Giovannini, and A. Rossi, "On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 4, pp. 1045–1053, 2002.
- [7] D. Angelosante, A. Ukil, and A. Andenna, "Toward embedded broken rotor bars detection in induction machines," in *Industrial Technology (ICIT), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 920–925.
- [8] D. B. Durocher and G. R. Feldmeier, "Predictive versus preventive maintenance," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 10, no. 5, pp. 12–21, 2004.
- [9] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and G. B. Kliman, "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis," in *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, 2000, vol. 1, pp. 484–491 vol.1.
- [10] J. Sprooten and J.-C. Maun, "Influence of Saturation Level on the Effect of Broken Bars in Induction Motors Using Fundamental Electromagnetic Laws and Finite Element Simulations," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3, pp. 557–564, 2009.
- [11] C. H. De Angelo, G. R. Bossio, and G. O. García, "Discriminating broken rotor bar from oscillating load effects using the instantaneous active and reactive powers," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 4, p. 281, 2010.

**Klemen Drobnič** je diplomiral leta 2007 in doktoriral leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo diagnostiko napak v elektromotorskih pogonih in napredne regulacijske metode v močnostni elektrotehniko.

**Vanja Ambrožič** je diplomiral leta 1986 in doktoriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo močnostno elektroniko in regulirane elektromotorske pogone.

**Rastko Fišer** je diplomiral leta 1984 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo modeliranje rotacijskih in linearnih električnih motorjev, načrtovanje elektromotorskih pogonov ter nove pristope na področju nadzora stanja, detekcije okvar in diagnostike električnih strojev.