

Strategija omejevanja sile togega naseda pogonov družine AMV/E 65X in AMVE 685

Vojko Kosec
Danfoss Trata d. o. o., Jožeta Jame 16, 1210 Ljubljana – Šentvid
vojko.kosec@danfoss.com

Hard stop force limiting strategy of the electromotor drives AMV/E 65X and AMVE 685 family

The company Danfoss Trata d.o.o. has developed the electromotor drives AMV/E 65X family, which applies electronics developed together with the Department of Systems and Control from Josef Stefan Institute. The same electronics should be used also in our next generation of heavy duty electromotor drives AMVE 685. This new range of drives should operate at nominal loads of 5000 N and at nominal speed of 2,7 s/mm. It also shares the same platform with the older range of AMV/E 65X. The nominal load for this older range is 2000 N at 2 s/mm. The experiences we have got during the manufacturing of the drives AMV/E 65X family, should be implemented also at the new drives AMVE 685 family and reduce the overload at hard stop from 50% to close to 25%.

Kratek pregled prispevka

Podjetje Danfoss Trata d.o.o. je razvilo družino elektromotornih pogonov AMV/E 65X, ki za delovanje uporablja elektroniko, ki smo jo razvili skupaj z Odsekom za sisteme in vodenje Instituta Jožef Stefan. Isto elektroniko nameravamo uporabiti za krmiljenje naslednje generacije pogonov AMVE 685. Ta nova družina pogonov naj bi delovala pri nominalni obremenitvi 5000 N, ter nominalni hitrosti 2,7 s/mm. Hkrati pa si deli osnovo z starejšo družino AMV/E 65X. Nominalna obremenitev za to obstoječo družino je 2000 N pri 2 s/mm. Izkušnje, ki smo jih pridobili pri proizvodnji družine pogonov AMV/E 65X nameravamo prenesti na novo družino pogonov AMVE 685 in zmanjšati preobremenitev pri togem nasedu iz 50% na približno 25%.

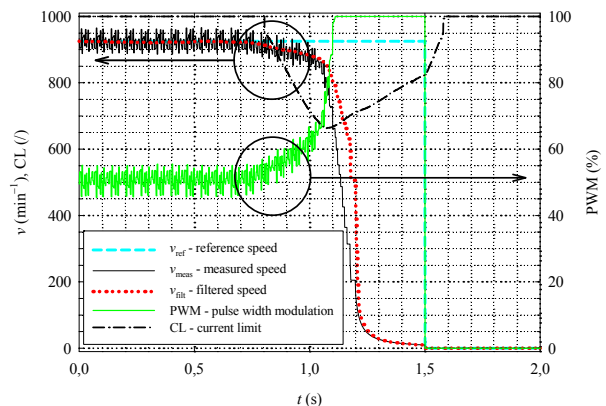
1 Uvod

Podjetje Danfoss Trata d.o.o. je razvilo družino elektromotornih pogonov AMV/E 65X, ki za delovanje uporablja elektroniko, ki smo jo razvili skupaj z Odsekom za sisteme in vodenje Instituta Jožef Stefan. Razvoj elektronike je temeljil na dosedanjih izkušnjah in rešitvah, ki smo jih pridobili pri razvoju uspešne serije inteligentnih pogonov, ki se uporabljajo pri ogrevanju, prezračevanju in pripravi zraka (HVAC). Vendar se je ob serijski proizvodnji te generacije pogonov pokazalo, da izklopne sile lahko tudi do 100% presega nominalno silo. Na tako velik raztros izklopnih sil predvsem vplivajo velika tolerančna polja sestavnih delov, ki se jih na enostaven in predvsem cenen način ne da ustrezno zmanjšati. Zato smo že pri snovanju pogonov družine AMV/E 65X predvideli nekatere ukrepe, ki so pomagali zmanjšati razliko med izklopnimi silami in nominalno obremenitvijo na približno 50%, kljub temu, da kvalitete sestavnih delov nismo izboljšali. Vendar pa bi pri najnovejših najmočnejših pogonih pomenilo enako relativno odstopanje absolutno večji presežek, kot je nominalna obremenitev družine AMV/E 65X. Tudi zagotavljanje povečane nosilnosti predstavlja izziv. Večje izklopne sile predstavljajo tudi povečano tveganje za predčasno odpoved katerega od sestavnih delov pogona, kot tudi naše proizvodne opreme. Tudi vpliv na ceno celotnega pogona je zaznaven. Zato je pomembno, da najdemo izboljššan način krmiljenja elektronsko komutiranega enosmernega motorja, okrajšano BLDC.

2 Razčlenjevanje delovanja trenutnega algoritma izklopa ob dosegu kritične obremenitve

Na Odseku za sisteme in vodenje (IJS) so razvili algoritem, ki zmanjšuje preobremenitev pri togem nasedu povzročene zaradi vztrajnosti pogona. Pri okoliščinah, ki se pojavljajo v realnih pogojih uporabe je učinkovit vsaj v 95% izklopov. Temelji na zaznavanju hitrosti porasta toka, ki je povzročen s porastom obremenitve. Posledično se izvede časovno odvisno zmanjšanje vrednosti omejitve toka (CL), ki kompenzira povečanje obremenitev zaradi

vztrajnosti [1]. Tipičen odziv v končni legi je prikazan na sliki 1 [1].

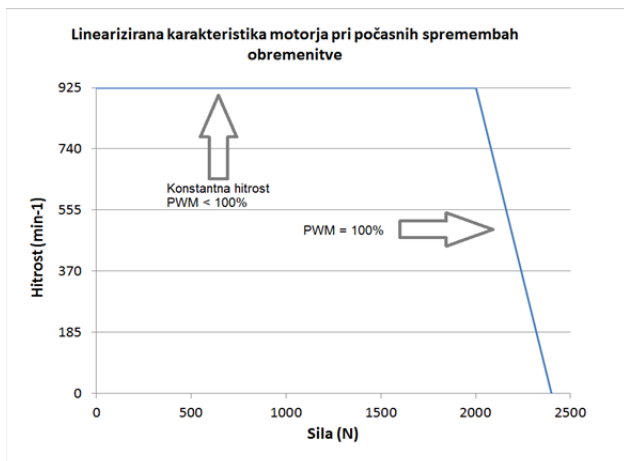


Slika 1: Zelena (v_{ref}), merjena (v_{meas}), filtrirana hitrost (v_{filt}) in PWM razmerje, ter omejitev toka CL kot funkcija časa t pri pogojih zaustavitve v končni legi.

Vendar pa omenjena metoda ne učinkuje vedno enako.

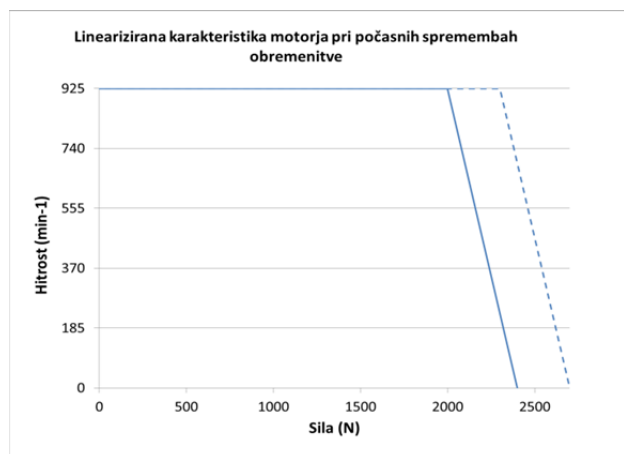
- Na sliki je možno opaziti, da je vrednost omejitve toka CL ob izklopu še vedno kompenzirana in ni enaka nastavljeni vrednosti CL. Možno je predvideti, da ob različnih dinamikah odziva togega naseda dobimo tudi različne izklopne sile.
- Vpliv ima tudi velikost obremenitve pred trkom, ki dvigne velikost PWM razmerja. (PWM = širinsko pulzna modulacija napajalne napetosti). V skrajnem primeru je tok dovolj blizu vrednosti omejitve toka že pred zaustavitvijo in takrat ni možno zaznati enakega porasta toka in v tem primeru vztrajnosti ne moremo pravilno kompenzirati.

Glavna težava pa nastopi, saj nastavljam omejitev toka tako, da je pogon sposoben prenašati nominalne obremenitve pri nominalni hitrosti pogona. Tu povežemo vrednost omejitve toka z nominalno silo pri nominalni hitrosti. Velikost izklopne sile v končni legi pa postane odvisna veličina. Odvisna je od spremembe hitrosti, ki jo doživi pogon ob zaustavitvi motorja. (Slika 2). Na sliki 2 je prikazana odvisnost regulirane hitrost vrtenja BLDC motorja od obremenitve pri konstantni vrednosti omejitve toka. Vendar velja samo za počasne spremembe obremenitve.



Slika 2: Posplošena karakteristika motorja.

Ni pa to edina odvisnost, kajti na izklopne sile vpliva cela množica drugih pogojev. Velikost izklopne sile je odvisna še od izbora merilnega položaja, pogojev obremenjevanja pred in med meritvijo, smeri gibanja, ponovitve, vrednosti omejitve toka in tudi procesa, s katerim nastavljam omejitev toka. Omejitev toka nastavljam tako, da je znotraj celotnega hoda nominalna hitrost zagotovljena v obe smeri. Vsi omenjeni pogoji razen same vrednosti omejitve toka so izrazito večplastni in bi jih lahko še naprej drobili. Ne smemo niti pozabiti na znaten vpliv stanja sestavnih delov. Zato se dogaja, da se izklopna sila merjena v testnem položaju poveča (Slika 3).



Slika 3: Vpliv proizvodnih pogojev na višino izklopne sile.

2.1 Izvajanje meritev na motorju

Zaradi boljšega razumevanja delovanja krmiljenja ob izklopu smo izvedli nekaj meritev

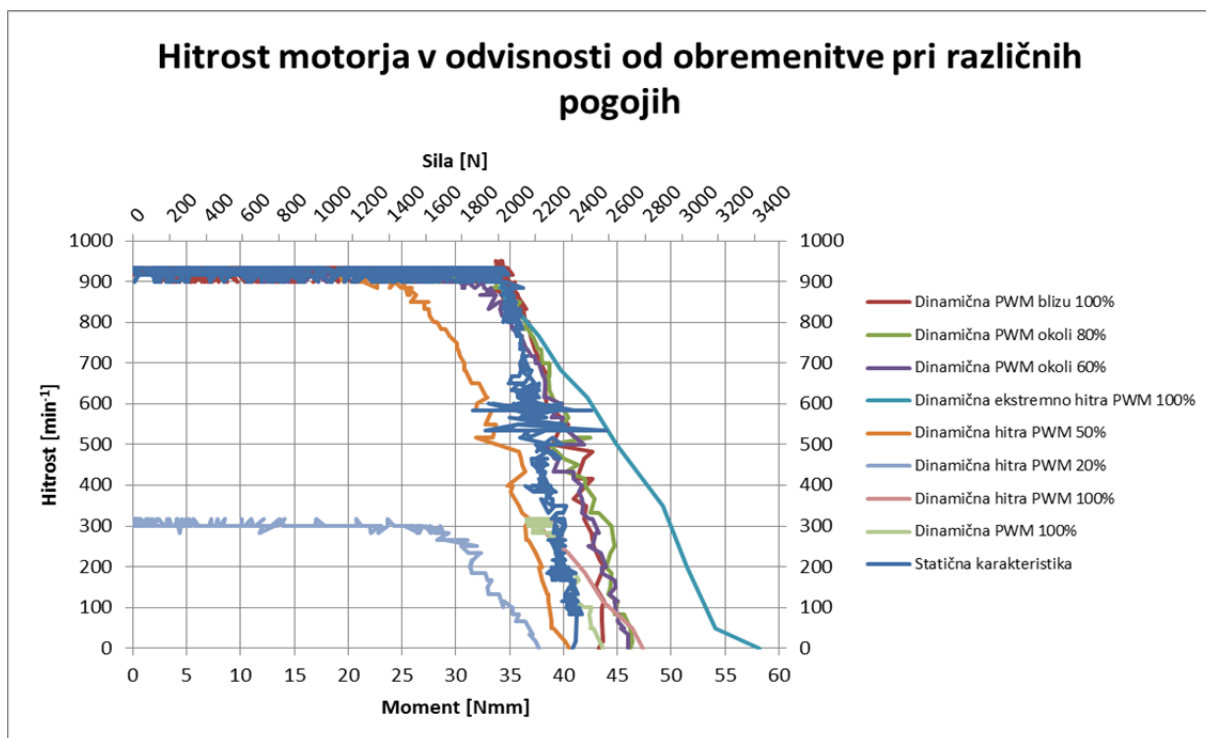
na samostojnem BLDC motorju v laboratorijskih pogojih. Pri tem smo uporabili sledečo opremo:

- Histerezna zavora: Magtrol HB-3M-2
- Merilnik momenta: ETH Messtechnik DRFL-0,02-w (20 Nmm, 10 V)
- Tokovni vir: GW Instek PSM-3004
- Programska oprema: ValueMaster ver.2.41 (ETH Messtechnik)

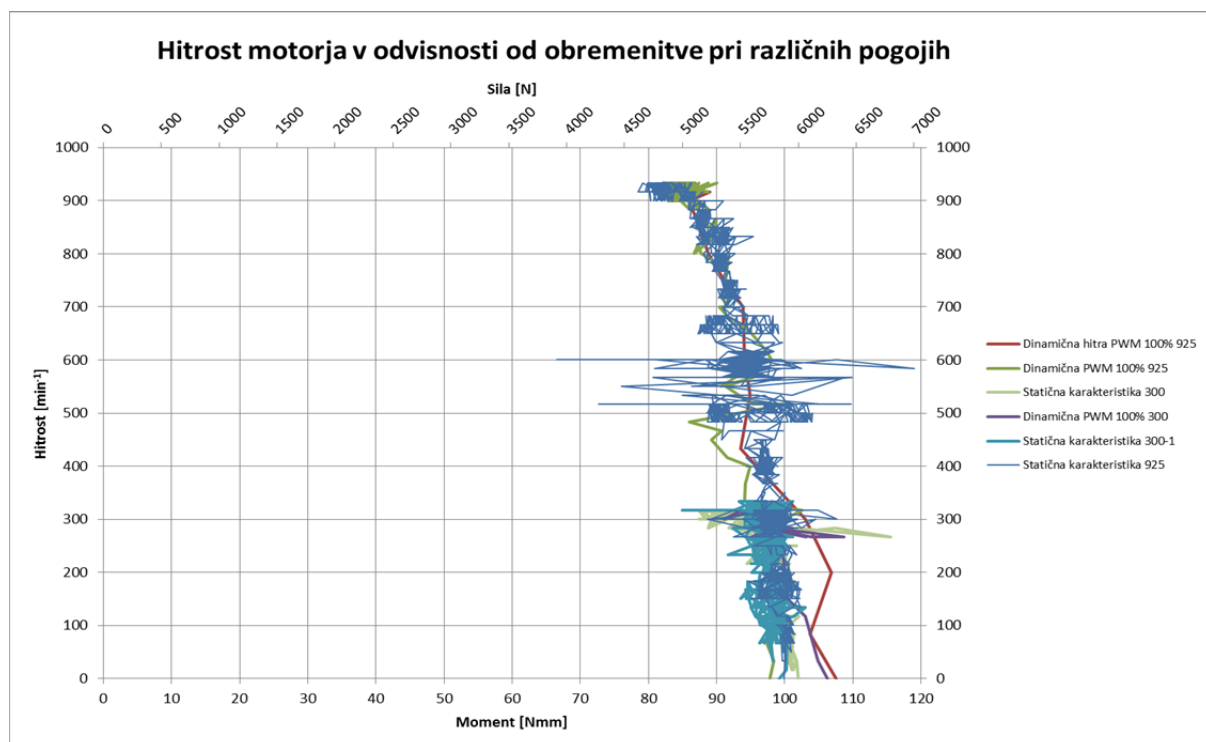
Rezultati meritev so prikazani na Sliki 4 in 5. Moment 0 Nmm na grafu je usklajen s tipičnim delovanjem pogona brez zunanje obremenitve.

2.2 Komentar meritev motorja nastavljenega za nominalno obremenitev 2000 N

- Najprej je potrebno vedeti, da je pri tipični nastavitvi CL motor v neobremenjenem pogonu potrebno voziti s PWM = 50% pri hitrosti 925 min^{-1} in PWM = 20% pri hitrosti 300 min^{-1} . Poleg tega velja pri PWM = 100%, da je takrat tok skozi motor enak vrednosti, ki jo določa vezje za omejitev toka.
- Iz statične izklopne karakteristike je razvidno, da lahko pri optimalnem izklopu z minimalnimi pojemki pričakujemo 20 % večje izklopne sile, kot je nominalna obremenitev. Ta karakteristika je bila merjena ob koračnih spremembah obremenitve z velikimi časovnimi presledki.
- Prve tri karakteristike kažejo zmerni porast velikosti izklopnih sil okoli 35%, v primeru, da se prišteje sunek sile zaradi vztrajnosti vrtečih se delov. Pogoji zaustavitve so povzročili podoben odziv, kot ga povzroči celoten pogon zaustavljen na obremenitveni strmini 1000 N/mm. Vpliv vztrajnosti se nazorno kaže pri spremembi obremenitvene strmine. Večji kot je sunek sile, bolj položna je strmina in večja je izklopna sila.
- Peti in šesti odziv kažeta delovanje algoritma zaznavanja togega naseda pri dveh različnih hitrostih.
- Četrty in sedmi odziv predstavljata reakcijo na nekontrolirano hitro zaviranje, simulacijo zaletavanja, ki je sicer možna samo v laboratorijskih pogojih.



Slika 4: Rezultati meritev motorja nastavljenega na tipično vrednost CL za nominalno obremenitev 2000 N.



Slika 5: Rezultati meritev motorja nastavljenega na predvideno vrednost CL za nominalno obremenitev 5000 N.

2.3 Komentar meritev motorja nastavljenega za predvideno nominalno obremenitev 5000 N

- Uporabljena je bila povsem enostavna linearna ekstrapolacija med momentom in silo pri prejšnji meritvi za določitev nove delovne točke pri 5000 N obremenitve. V močnejših pogonih imamo sicer vgrajene nekatere drugačne komponente, vendar smo njihov vpliv na spremembo odziva zanemarili.
- Iz statične izklopne karakteristike je razvidno, da lahko pri optimalnem izklopu z minimalnimi pojemki pričakujemo nekaj manj kot 20% večje izklopne sile kot je nominalna obremenitev.
- Iz pregleda dinamičnih karakteristik je sicer dokaj zanesljivo napovedati, da vpliv vztrajnosti na izklopne sile ne bo tako velik, kot smo predvidevali na začetku. Kar je možno tudi razložiti na osnovi fizikalnih zakonov. Namreč gibalna količina je v obeh primerih praktično enaka. In tudi sunek sile bo v obeh primerih zelo podoben. Zato je prispevek sunka sile pri preobremenitvi približno le 15% nominalne sile 5000 N.

3 Iskanje možnih scenarijev za zmanjšanje razlike med nominalno obremenitvijo in izklopnimi silami

Zaenkrat še nismo ugotovili, na kakšen način bi lahko še zmanjšali vpliv toleranc sestavnih delov, oziroma vpliv njihove kvalitete. Zato se pri tem izboru krmilnih strategij lotevamo le delnega nabora vzrokov, ki vplivajo na velikost izklopnih sil.

Vsekakor bi bilo pametno neposredno povezati nastavitev omejitve toka in izklopno silo. Kar bi lahko izvedli s pomočjo naslednjih nekaj ukrepov:

- Ustvarjanje izklopnega območja.
- Izklop ob pogoju PWM = 100 %.
- Preklop na drugačen nabor nastavitvev ob pogoju PWM = 100 %.
- Nastavitev CL v odvisnosti od hitrosti.

3.1 Izklopno območje

Izklopno območje bi bilo pogojeno s predhodno ugotovljeno končno pozicijo pogona. V tem območju bi lahko uporabili neodvisen nabor nastavitvev, vključno z omejitvijo toka in hitrostjo. Hkrati bi lahko upoštevali tudi smer gibanja (proti ali iz končne lege). Ko bi pogon dosegel mejo izklopnega območja, bi začele veljati območne nastavitve. Prednosti te metode bi lahko bile:

- Prispevek sunka sile bi se znatno zmanjšal, saj bi lahko hitrost motorja znižali iz 925 min⁻¹ na 300 min⁻¹.
- Omejitev toka bi imeli nastavljeno neodvisno in bi dosegali manjše izklopne sile.
- Razlika med izklopnimi silami ob različnih nivojih predhodne obremenitve bi izzvenela.
- Težava, da tri-točkovno krmiljeni tip AMV poveča izklopno silo ob večkratnem zaganjanju v bližini končne lege, se odpravi.

Metoda pa ima tudi slabosti:

- Za to rešitev potrebujemo pogon, ki je vedno priključen na napajanje, saj si mora zapomniti, kje se nahaja izklopno območje. Zato tipi pogonov, ki te možnosti nimajo, ne pridejo v poštev. So pa za to primerni vsi novi najmočnejši pogoni, ki jih lahko priključimo na stalno napajanje.
- Tudi ob ročni spremembi položaja pogona brez prisotnosti napajanja, bi pogon odreagiralo napačno, saj se zapomneno in dejansko izklopno območje ne bi več ujemala. Vendar bi ob prvi zaznavi končne lege ta težava prenehala obstajati.
- Nastavitve testne naprave bi bilo potrebno spremeniti.

3.2 Izklop ob pogoju PWM = 100 %

Verjetno bi bilo potrebno poleg zahteve PWM = 100 % vključiti še dodatne kriterije, kot so minimalni čas trajanja in/ali hitrost. Vsekakor bi se dalo omenjeni kriterij tudi umestiti v algoritem omejevanja vpliva vztrajnostnih sil. Tu bi ga vezali na sočasni pojav $CL < CL_{začetni}$. Hkrati bi sprožili zaviranje in zaustavitev motorja. Prednosti tega postopka bi bile:

- Primerna je za vse tipe pogonov.
- Tudi pri PWM blizu 100% bi imeli zagotovljeno izklapljanje v končni legi s primerljivimi izklopnimi silami.

Pomanjkljivosti:

- Med postopkom nastavljanja tokovne omejitve oz. hitrosti bi morali izklopiti pogoj. Potem bi ga morali ponovno vklopiti.
- Že na pogled je omenjena metoda videti bolj občutljiva na občasne in naključne obremenitve. Te obremenitve bi lahko povzročile napačno proženje zaznavanja končne lege. Vendar pa lahko zmanjšamo prag občutljivosti tako, da povečamo nastavitev omejitve toka.
- Pogoj je vezan na nastavljeno hitrost pogona. Imamo pa dve možni nastavitvi hitrosti.

3.3 *Preklop na drugačen set parametrov ob pogoju PWM = 100 %*

To je združena metoda, ki predhodnima dvema odpravljata pomanjkljivosti. V principu se pogoj PWM = 100% uporabi za preklop na drugačen nabor nastavitev podobno, kot se zgodi, ko pogon vstopi v izklopno območje. Prednosti te metode bi lahko bile:

- Enako kot metoda 3.1.
- Enako kot metoda 3.2.
- Poenotimo lahko odziv zaradi različno nastavljenih hitrosti.

Ostanejo še pomanjkljivosti:

- Med postopkom nastavljanja tokovne omejitve oz. hitrosti bi morali izklopiti pogoj. Potem bi ga morali ponovno vklopiti.
- Občutljivost na neenakomerno obremenitev je še vedno prisotna, vendar je v skrajnem primeru pogon primoran upočasniti delovanje, se pa ne bo zaustavil. Tudi tu bi lahko zmanjšali občutljivost tako, da bi povečali nastavitev omejitve toka.

3.4 *Kompensacija CL v odvisnosti od hitrosti*

Ta bi izničila 20% pribitek na nominalno silo, kar bi omogočilo, da se območje, ki je preostalo za kompenzacijo vztrajnostnih sil in

odstopkov vgrajenih sestavnih delov, razširi za to isto vrednost. Lahko bi linearno povezali hitrost z vrednostjo omejitve toka. Vendar regulirana hitrost nikoli ni povsem konstantna. Zato bi morali uporabljati filtrirane vrednosti. Morda bi bilo bolje uporabiti več nivojsko diskretno preslikavo.

Prednosti:

- Primerna je za vse tipe pogonov.
- Primerna je lahko za vse nastavitve hitrosti pogonov.

Slabosti:

- Učinkovitost pri PWM blizu 100% je vprašljiva. Nujno bi bilo testiranje.
- Ima vpliv na zagonske pogoje. Potrebno bi bilo spremeniti zagonske nastavitve motorja.

4 Zaključek

Analiza obstoječega stanja podprta z meritvami je pokazala, da novi močnejši pogoni ne bodo tako močno preobremenjeni v izklopnih legah, kot smo predvidevali. Zato bo tudi obremenitev testne naprave znotraj varnih in pričakovanih vrednosti. Vendar pa vseeno nameravamo vpeljati rešitev opisano pod točko 3.1 kljub temu, da ne pokrije vseh tipov pogonov. Izvorno bomo vključili vse nove najmočnejše tipe, ki so vsi zasnovani za uporabo pod stalno napajalno napetostjo. Vsekakor pa bo tako zagotovljen ugoden vpliv na življenjsko dobo naše proizvodne testne naprave.

Tudi možnost za vpeljavo enakega ukrepa za osnovno varianto AMV/E 65X obstaja. Pri teh pogonih bi bil učinek celo večji, kot pri močnejši različici. Do takrat pa bo v večini primerov izklopov v končnih legah še vedno posredoval na začetku omenjeni algoritem hitrega izklopa.

5 Literatura

- [1] Marko Nerat, Janko Petrovčič, Samo Krančan, Damir Vrančič, Razvoj inteligentnih elektromotornih pogonov za ventile, ERK (2013) Portorož, Slovenija.