

Návrh frekvenčného meniča zo skalárnym riadením

¹Matúš KUBAŠKO, ²Ján MOLNÁR

^{1,2} Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, FEI TU v Košiciach,
Slovenská Republika

¹matus.kubasko@student.tuke.sk, ²jan.molnar@tuke.sk

Abstrakt — Tento článok sa zaoberá návrhom frekvenčného meniča zo skalárnym riadením. Teoreticky popisuje nepriame frekvenčné meniče, skalárne riadenie týchto meničov a simuláciu asynchrónneho motora. Taktiež je zobrazená a popísaná topológia návrhu frekvenčného meniča.

Kľúčové slová — asynchrónny motor, frekvenčný menič, simulácia, COMSOL

Design of a frequency converter with scalar control

Abstract — This paper deals with the design of a frequency converter with scalar control. Theoretically describes indirect frequency converters, scalar control of these converters and simulation of an asynchronous motor. The frequency design topology of the frequency converter is also shown and described.

Keywords — frequency converter, asynchronous motor, simulation, COMSOL

I. ÚVOD

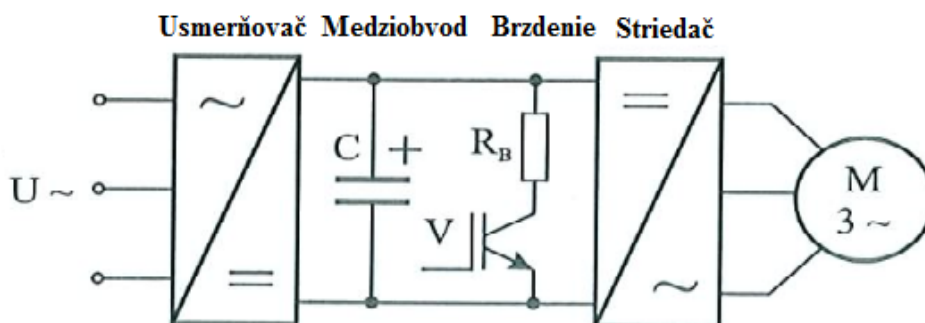
Elektrické pohony majú nenahraditeľný význam nielen v rôznych odvetviach priemyslu, ale aj v domácnosti. S nástupom automatizácie v priemyselných podnikoch sa začal klásť čoraz väčší dôraz na reguláciu elektromotorov. Väčšina jednosmerných pohonov sa nahradila striedavými pohonmi, s cieľom zabezpečiť spoľahlivú prevádzku a nenáročnú údržbu automatických strojov. To však vyžaduje zaoberať sa problematikou riadenia striedavých pohonov. Na túto aplikáciu sa najčastejšie používa riadenie pomocou frekvenčných meničov. Frekvenčný menič je zariadenie, ktoré slúži na premenu elektrického prúdu s nejakou frekvenciou na prúd s inou frekvenciou.

II. FREKVENČNÉ MENIČE

Frekvenčné meniče (VFD – Variable Frequency drive) slúžia k premene striedavej energie jednej frekvencie na striedavú energiu inej frekvencie. Oblasť ich použitia je veľmi rozšírená. Väčšinou ich môžeme nájsť ako súčasť striedavých regulovateľných pohonov s asynchrónnymi, ako aj synchronnými motormi. Umožňujú ich plynulý rozbeh bez prúdového nárazu na elektrickú sieť a riadia ich otáčky podľa požiadaviek aplikácie. Dovoľujú realizovať pohony s extrémne nízkymi otáčkami, ako aj extrémne vysokými otáčkami. Ďalším významným využitím je indukčný ohrev, kde sa jedná o výkony rádovo stovky kW (napájanie indukčných taviacich pecí). V aplikácii s usmerňovačmi umožňujú znížiť hmotnosť vstupného izolačného transformátora tým, že transformátor je napájaný z meniča frekvencie s výstupnou frekvenciou niekoľko tisíc Hz. V energetike našli uplatnenie frekvenčné meniče, ktoré dovoľujú spájať nesynchronizované striedavé siete, napríklad z 50 Hz na 60 Hz. Spolu s riadením frekvencie sa musí riadiť výstupné napätie, prípadne sa požaduje zmena počtu výstupných fáz. [1] [2].

A. Nepriame frekvenčné meniče

Táto skupina meničov patrí medzi najrozšírejšie, pretože tento typ meniča je často používaný v priemyselnej oblasti. Základné zapojenie pozostáva z usmerňovača, jednosmerného medziobvodu a striedača. Ako už bolo uvedené, jednosmerný medziobvod môže byť napäťového alebo prúdového typu [3]. Na Obr. 1 je zobrazená zjednodušená schéma zapojenia nepriameho frekvenčného meniča.



Obr. 1 Nepriamy frekvenčný menič [3]

Na vstupe meniča je usmerňovač. Môže byť riadený alebo neriadený. Usmerňovač je najčastejšie vytvorený z usmerňovacích diód (jednokvadrantový). V prípade, že sa vyžaduje rekuperácia energie zo záťaže do siete je potrebný na vstupe riadený usmerňovač (štorkvadrantový). Usmerňovač sa môže použiť jednofázový alebo trojfázový. To závisí od výkonových súčiastok frekvenčného meniča, na aké maximálne napätie budú nadimenzované. Na vyhladenie výstupného napätia usmerňovača slúži veľký kondenzátor v jednosmernom medziobvode. Preto sa javí jednosmerný medziobvod vzhľadom k striedaču ako napäťový zdroj [3].

Ak je na vstupe použitý klasický usmerňovač z usmerňovacích diód, nie je možné vrátiť elektrickú energiu z brzdovania motora naspäť do siete. V generátorickom režime motor vráti energiu cez striedač do jednosmerného medziobvodu. Táto činná energia prejde z motora cez striedač do jednosmerného medziobvodu, kde sa začne rapídne nabíjať kondenzátor. Cez diódový usmerňovač nie je možné túto energiu ďalej transportovať. Preto sa pripája brzdný odpor R_B paralelne ku kondenzátoru, a to výkonovým polovodičovým prvkom napríklad IGBT tranzistorom, aby napätie na kondenzátore nepresiahlo dovolenú hodnotu. Činná energia generovaná motorom sa potom spotrebuje v brzdnom odpore [3].

Striedač je buď jednofázový alebo trojfázový. Častejšie sa používa trojfázový striedač, pretože menič frekvencie sa používa hlavne na reguláciu rýchlostí trojfázových asynchrónnych prípadne synchronných motorov. Súčasne meniče menia efektívnu hodnotu výstupného napätia pomocou PWM – pulzne šírkovej modulácie striedača [4].

III. SKALÁRNE RIADENIE

Skalárny spôsob riadenia výkonových frekvenčných meničov je pomerne jednoduchý. Tento spôsob riadenia je menej dynamický to znamená, že odozva na zmeny rýchlosti je pomalšia a nie je možné zabezpečiť presné otáčky pri rôznom zaťažení motora. Používa sa už len v starších pohonoch, prípadne v jednoduchších aplikáciách, napríklad pre pohon ventilátorov alebo čerpadiel. Statorový prúd a ďalšie premenné sa považujú za skalárne hodnoty. Z dôvodu udržania konštantného sýtenia magnetického toku motora je so zmenou frekvencie spojená aj zmena výstupného napätia striedača. Avšak lineárne udržiavanie napätia s frekvenciou nie je postačujúce pri nízkych frekvenciách. Zvyčajne sa používajú nelineárne spôsoby riadenia, ktoré umožňujú aj v nízkej rýchlosti udržiavať konštantný magnetický tok (Voltage boost). Čiže pri nižšej frekvencii musí byť o niečo vyššie napätie, aby sa zachoval konštantný krútiaci moment [3].

Po dosiahnutí maximálneho napätia na výstupe striedača môžeme ďalej zvyšovať frekvenciu (Obr. 5), ale nie je možné udržať konštantný magnetický tok motora. Magnetický tok je nepriamo úmerný frekvencii, preto v oblasti odbudenia klesá moment zvratu motora. Ak nie je dodržaný pomer napätia a frekvencie, tak dôjde k presýteniu magnetického toku, a to by malo za následok zvýšenie strát a prehriatie vinutia motora. Ak by sme motor napájali maximálnym napätím a nízkou frekvenciou, hrozilo by

zničenie statorového vinutia motora nadmerným prúdom [3].

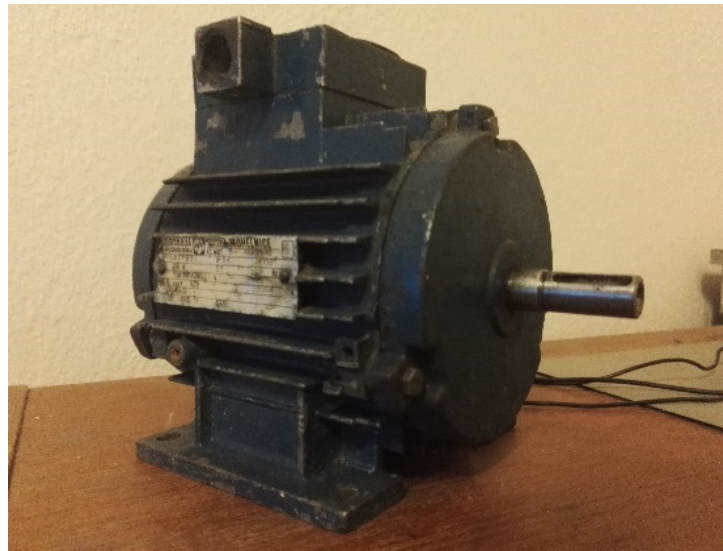
Výhody tohto riadenia v otvorenej slučke (bez spätnej väzby) sú také, že umožňuje riadenie pri vyšších frekvenciách (>400Hz), nie je potrebný prakticky žiadny snímač otáčok, je možné napojiť na jeden frekvenčný menič aj viac motorov. Nevýhodou je to, že pri otvorenej slučke nie je žiadna spätná väzba a nemáme žiadnu záruku, že motor sa roztočí podľa žiadanej hodnoty regulácie.

IV. ASYNCHRÓNNE MOTORY

Asynchrónne motory patria k najpoužívanejším elektrickým točivým strojom. K tomu im dopomohla ich jednoduchosť, veľká spoľahlivosť, dobré prevádzkové vlastnosti, ľahká údržba a obsluha. Asynchrónne motory bežných prevedení sú vyrábané vo veľkých sériách, čo priaznivo vplýva na ich cenovú dostupnosť. V porovnaní s jednosmernými strojmi je ich riadenie pomerne zložité, preto sa asynchrónne motory v minulosti napájali väčšinou zo siete a pracovali pri konštantných otáčkach. Používajú sa najmä na elektrický pohon rôznych strojov v priemyselnej oblasti, pohon elektrických dopravných prostriedkov, ale aj zariadení používaných v domácnosti. Asynchrónne motory sú dnes súčasťou moderných regulovateľných pohonov [5].

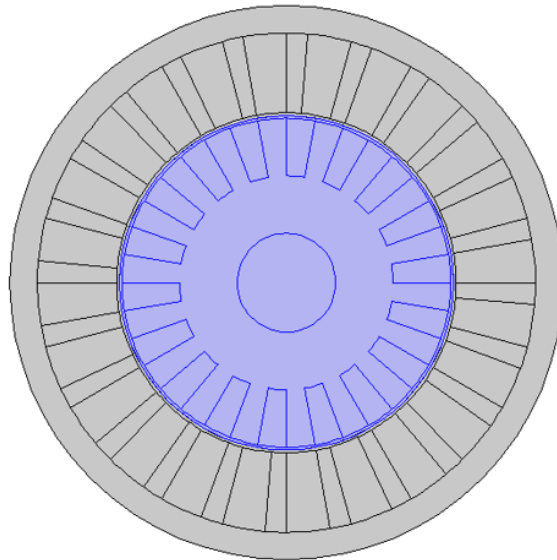
A. Simulácia asynchrónneho motora v programe COMSOL

V simulačnom programe COMSOL sme vytvorili 2D model asynchrónneho motora. Model motora bol vytvorený na základe rozmerov reálneho asynchrónneho motora s kotvou nakrátko, ktorý je zobrazený na Obr. 2.



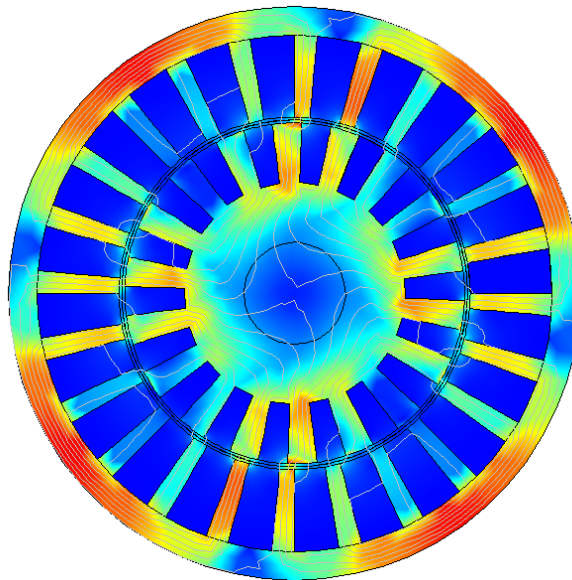
Obr. 2 Štvorpólový asynchrónny motor

Keďže rozmery motora nebolo možné odmerať úplne presne, ako napríklad hĺbku drážok statora alebo rotora. Z tohto dôvodu sú odsimulované parametre len informatívne, no pre zobrazenie základných závislostí parametrov je to postačujúce. Vytvorený 2D model môžete vidieť na Obr. 3.



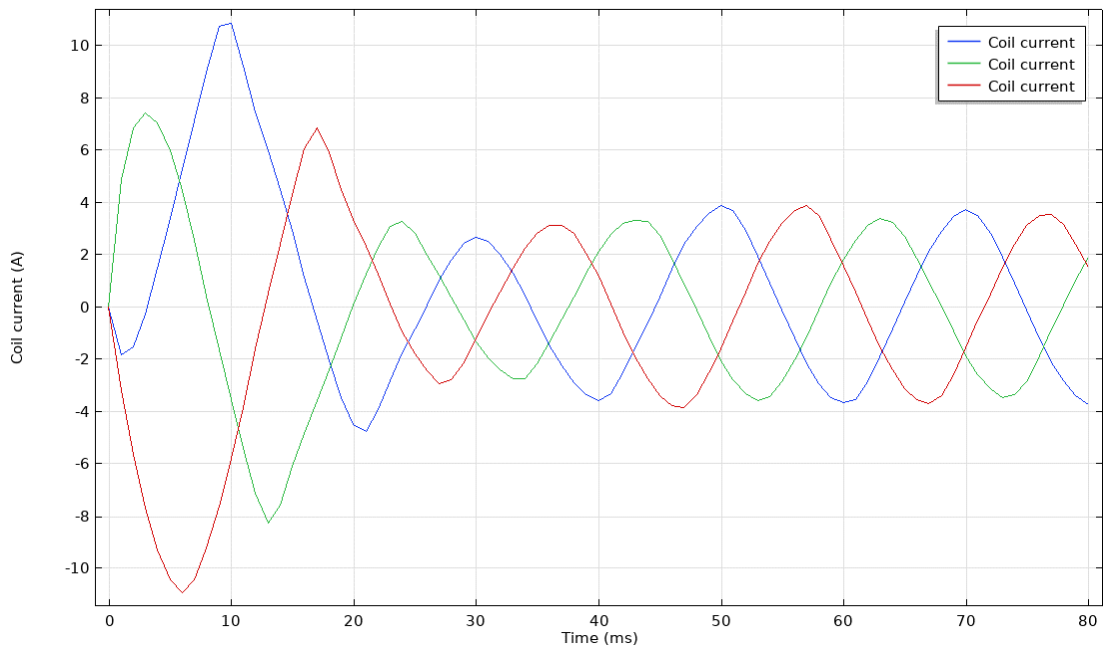
Obr. 3 Model 2D – COMSOL

Simulácia pri nezaťaženom rotore. V časti Definitions – Moving Mesh – Rotating Domain sme zvolili otáčky rotora 1380 ot/min. Frekvencia je nastavená na 50 Hz. Na Obr. 4 je zobrazený magnetický tok pri daných otáčkach.



Obr. 4 Magnetický tok pri RPM = 1380

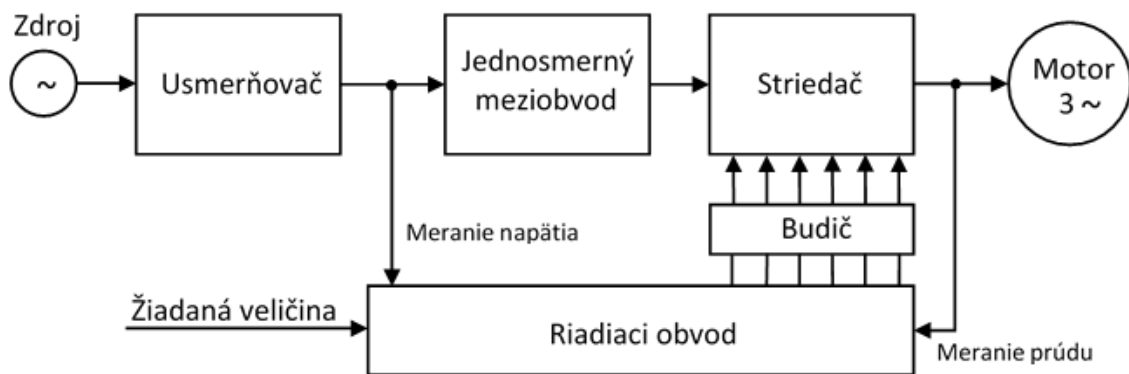
Na Obr. 5 je zobrazený prúd cievok statora. Pri rozbehu je prúd najvyšší, ak sa rotor rozbehne, prúd začne klesať.



Obr. 5 Prúdy pri RPM = 1380

V. TOPOLOGIA NÁVRHU FREKVENČNÉHO MENIČA

Existujú rôzne prevedenia frekvenčných meničov, preto je potrebné určiť základnú topológiu meniča. Topológiu určíme podľa zvoleného typu meniča a regulačnej štruktúry striedača. My sme sa rozhodli navrhnúť nepriamy typ frekvenčného meniča so skalárnym riadením. Pod pojmom nepriamy menič si môžete predstaviť premenu parametrov elektrickej energie s využitím jednosmerného medziobvodu. Skalárne riadenie umožňuje riadenie otáčok zmenou frekvencie a napätia, pričom krútiaci moment bude konštantný. Pre našu aplikáciu bude postačujúca výstupná frekvencia do 50 Hz. Motor bude riadený bez spätnej väzby otáčok motora v tzv. otvorenej slučke. Topológia je zobrazená na Obr. 5.



Obr. 5 Topológia návrhu meniča

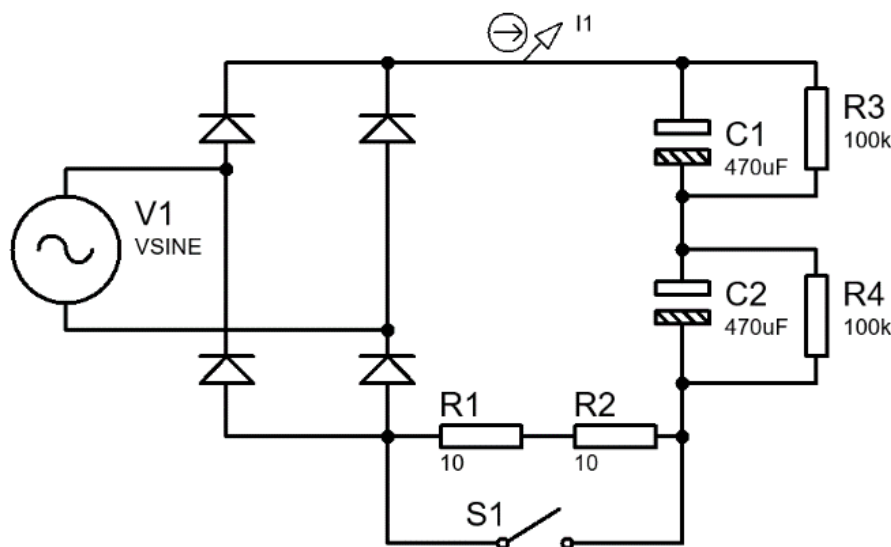
Menič bude pozostávať z hlavného obvodu, vedľajšieho obvodu, riadiaceho obvodu a pomocných obvodov. Hlavný výkonový obvod bude obsahovať usmerňovač, jednosmerný medziobvod a striedač. Vedľajší obvod tvorí budič. Riadiaci obvod bude vytvorený pomocou mikrokontroléra MC3PHAC. Pomocné obvody budú zabezpečovať sledovanie napätia v medziobvode a prúdu na výstupe striedača..

A. Usmerňovač a jednosmerný medziobvod

Pre požadovanú aplikáciu stačí použiť jednofázový neriadený mostíkový usmerňovač. Tento usmerňovač neumožňuje vrátiť elektrickú energiu späť do zdroja. Pri zapnutí meniča dôjde k nabíjaniu kondenzátora jednosmerného medziobvodu cez usmerňovač. Nabíjací prúd závisí najmä od veľkosti kapacity kondenzátora. My sme zvolili dva kondenzátory s parametrami 470 μF , 400 V, ktoré sú zapojené do série. Tento nabíjací nárazový prúd je potrebné obmedziť, aby sa nezničil usmerňovač [7].

My sme zvolili dva NTC termistory typu ICL - Inrush Current Limiting s hodnotou 10 Ω , ktoré sú určené pre obmedzenie nárazového prúdu. Namiesto spínača S1 zapojíme relé, ktoré po zapnutí meniča

s časovým oneskorením 500 ms vyskratuje spomínané termistory, pretože maximálny prúd, ktorý môže pretekať termistorom v ustálenom stave je len 4 A. Rezistory R3 a R4 z bezpečnostných dôvodov zabezpečia vybitie kondenzátorov C1 a C2 pri vypnutí meniča. Na Obr. 6 je zobrazené zapojenie usmerňovača a medziobvodu s obmedzením prúdu.



Obr.6 Usmerňovač a jednosmerný napäťový medziobvod

B. Striedač

Napäťový striedač bude vytvorený pomocou výkonových polovodičových IGBT tranzistorov. Zvolili sme výkonový bezpotenciálový modul IGBT BSM35GP120.

Tento modul obsahuje trojfázový usmerňovač, tranzistor pre spínanie brzdného odporu, trojfázový striedač a zabudovaný NTC termistor na sledovanie teploty modulu. Keďže napájanie meniča bude jednofázové, nebude využitý celý modul. Tranzistory IGBT a diódy sú stavané na maximálne napätie do 1200 V a prúd do 35A.

C. Budič

Existujú rôzne integrované obvody, ktoré umožňujú budenie IGBT tranzistorov. My sme sa rozhodli použiť trojfázový mostíkový budič IR2233 od výrobcu Infineon. Je to vysokonapäťový budič výkonových MOSFET a IGBT tranzistorov. Má tri nezávislé horné výstupy a tri dolné referenčné výstupné kanály. Nezávislý operačný zosilňovač môže poskytovať analógovú spätnú väzbu zo striedača, cez externý odpor snímača prúdu. Na vypnutie všetkých šiestich signálov slúži funkcia FAULT, ak došlo k nadprúdu alebo podpätiu. Poruchový stav je možné zresetovať pomocou vstupu FLT-CLR. Budič je prispôbený na použitie vo vysokofrekvenčných aplikáciách. Výstupné kanály môžu byť použité na riadenie N-kanálových výkonových IGBT alebo MOSFET tranzistorov. Horné výstupy môžu pracovať až do 1200V [8].

Úlohou budiča je zabezpečiť dostatočný výkon pre hradlá výkonových tranzistorov. Tento budič sme vybrali hlavne preto, že umožňuje riadenie celého trojfázového striedača a kontroluje riadiace signály prichádzajúce z riadiaceho obvodu. Taktiež je výhodou, že na budenie všetkých tranzistorov postačuje len jeden napájací zdroj. V prípade poruchy sa rozsvieti signalizačná LED dióda, ktorú môžeme pripojiť na výstup FAULT.

D. Galvanická izolácia

Z hľadiska bezpečnosti je vhodné použiť galvanickú izoláciu výkonového obvodu od nevýkonového obvodu. Jedná sa o izoláciu uzemnenia napájacieho zdroja riadiaceho mikrokontroléra od uzemnenia napájacieho zdroja budiča. Z tohto dôvodu budeme potrebovať dva galvanicky oddelené napájacie zdroje, jeden pre budič a jeden pre mikrokontrolér. S izoláciou uzemnenia týchto dvoch nezávislých obvodov je spojená aj izolácia signálov potrebných pre komunikáciu medzi budičom a mikroprocesorom. Izoláciu signálov budú zabezpečovať optické izolátory. Na každý jeden signál potrebujeme jeden optický izolátor (optočlen) 6N136. Optočlen 6N136 sa skladá z fotodiódy a vysokorychlostného tranzistora v plastovom puzdre. Signály je možné prenášať medzi dvoma elektricky

oddelenými obvodymi s frekvenciou až do 2 MHz. Naš menič bude mať spínaciu frekvenciu okolo 15 KHz, čiže tento optočlen vyhovuje našim požiadavkám.

E. Riadiaci obvod

Pre riadenie meniča sme zvolili 32 – bitový mikrokontrolér MC3PHAC naprogramovaný výrobcom Freescale Semiconductor. Je určený na reguláciu rýchlosti otáčania trojfázových asynchrónnych motorov v otvorenej slučke. Generuje riadiace impulzy pre výkonové tranzistory striedača pomocou pulznej šírkovj modulácie (PWM). Môže pracovať v dvoch režimoch tzv. standalone mode a PC master mode. [9] V režime PC master je možné riadiť mikrokontrolér cez sériovú komunikáciu. My budeme používať standalone režim a parametre meniča budú inicializované pasívnymi súčiastkami.

VI. ZÁVER

Tento článok sa zaoberal návrhom frekvenčného meniča so skalárnym riadením. Pri tomto návrhu bolo potrebné brať do úvahy fakt, že skalárne riadenie sa už dnes málo používa. Pretože existujú iné modernejšie typy riadenia, ako je vektorové riadenie alebo priame riadenie, ktoré majú zložitejší riadiaci algoritmus a poskytujú väčšiu dynamiku. Účelom tohto návrhu nebolo vytvorenie čo najzložitejšieho typu meniča, ale overiť základné znalosti z oblasti výkonovej elektroniky a pochopiť princípy elektrických pohonov a ich riadenia.

POĎAKOVANIE

Tento článok vznikol na základe podpory projektu FEI-2022-82.

LITERATÚRA

- [1] Jiří Pavelka, VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA, Vydavatelství ČVUT, 2000, ISBN 9788001020944
- [2] Václav Kus, ELEKTRICKÉ POHONY A VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA, Západočeská univerzita v Plzni, 2005, ISBN 80-7043-422-8
- [3] Jiří Javůrek, Regulace moderních el. pohonů, První vydání, Praha 2003, ISBN 80-7043-422-8
- [4] Jaroslav Timko, ELEKTRICKÉ POHONY A VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA, Technická univerzita v Košiciach, 2008, ISBN 978-80-553-0093-1
- [5] Pavel Koblíček, Elektrické pohony a jejich řízení, 3. vydání, České vysoké učení technické v Praze, ČVUT, 2016, ISBN 9788001060070
- [6] Kováčová I., Kováč D., Vince T.: Elektromagnetická kompatibilita - 1. vyd - Košice : TU, - 2009. - 137 s. - ISBN 978-80-553-0150-1.
- [7] Dziak, J. : Linear circuit simulation using MATLAB and modeling of nonlinear elements, In: SCYR 2014 Proceeding from Conference: 20.5.2014: Herľany, S. 70 - 71, Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2014 /978-80-553-1714-4/.
- [8] Bereš, M., Ženčuch, D.: Design and Implementation of a modifiable closed-loop control system for DC to DC voltage regulation, In: Electromechanical and Energy Saving Systems = Електромеханічні і енергозберігаючі системи : Scientific production journal : Науково-виробничий журнал. - Kremenčuk (Ukrajina) : Národná Kremenčutská Univerzita Michaila Ostrogradského Roč. 54, č. 2 (2021), s. 22-30 [print]. - ISSN 2072-2052
- [9] Jacko P., Kováč D.,: Converters and time conversion measurement of STM32F446RE microcontroller , In: Electromechanical and energy systems. Modeling and optimization methods. - Kremenčuk : Kremenčuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2017 P. 154-155. - ISSN 2079-5106.