

# Реализација индиректног векторског управљања асинхроним мотором у аритметици са покретном тачком

Бојан Кнежевић  
Машински факултет  
Универзитет у Бањој Луци  
Бања Лука, БиХ  
bojan.knez@unibl.rs

Бранко Блануша, Петар Матић  
Електротехнички факултет  
Универзитет у Бањој Луци  
Бања Лука, БиХ  
bbranko@etfbl.net, pero@etfbl.net

Дарко Марчетић  
Факултет техничких наука  
Универзитет у Новом Саду  
Нови Сад, Србија  
darmar@uns.ac.rs

*Садржај*—Развој дигиталних сигнал процесора (ДСП) омогућио је реализацију математички захтјевних алгоритама за управљање енергетским претварачима и погонима. Доминантна реализација алгорита векторског управљања је са процесорима који реализују аритметику фиксне тачке јер су такви процесори најзаступљенији и цијеном најприступачнији за масовно коришћење. Данас, разлика у цијени и перформансама готово да не постоји па не постоји ни разлог за не коришћење дигиталних сигнал процесора са аритметиком покретне тачке у електричним погонима. Овај рад презентује једну реализацију алгорита индиректног векторског управљања асинхроним мотором као цјеловито хардверско рјешење користећи процесор са аритметиком покретне тачке. Реализовани погон се заснива на интеграцији више хардверских система, које су као функционалне цјелине лако доступне на тржишту, у једну цјелину са минималним коришћењем сегмената који захтијевају самоградњу.

*Кључне ријечи*—дигитални сигнал процесор; аритметика покретне тачке; векторско управљање; практична реализација

## I. Увод

Векторско управљање омогућило је да управљање асинхроним мотором буде еквивалентно управљању мотором једносмјерне струје. Независно управљање моментом и побудом у машини уз робуственост и једноставност конструкције омогућило је да асинхронни мотор буде доминантно рјешење не само као погонска машина у индустрији већ и у апликацијама са регулацијом брзине и положаја.

Захтјеван алгоритам подразумијева коришћење моћних дигиталних сигнал процесора који имају модификовану

архитектуру и могућност реализације сложених математичких операција у реалном времену.

Први дигитални сигнал процесори били су реализовани са аритметиком фиксне тачке. Бројни систем им је заснован на раду са цјелобројним вриједностима. Кроз дугогодишњи развој и унапређења ДСПа фиксне тачке као и математичких библиотека омогућено је да се рад са цијелим бројевима виртуелно представља као рад са реалним бројевима. При томе је неопходно да се све вриједности скалирају у односу на максималне вриједности које могу да се појаве у моделу, односно да се математички модел дефинише у релативним јединицама.

Процесори који подржавају аритметику покретне тачке због своје сложености нису били конкурентни цијеном нити брзином рада процесорима са фиксном тачком па се нису примјењивали у електричним погонима. Развојем ДСПа покретне тачке цијена и перформансе су се изједначиле са ДСПом фиксне тачке уз своју основну предност рада са реалним бројевима и стварним вриједностима, односно без потребе за увођењем базних вриједности у математички модел [1].

У овом раду представљено је рјешење једног фреквенцијског регулатора који је реализован са циљем да се користи у тестирању погона и алгоритама са векторски управљаним асинхроним мотором али без ограничења и за друге типове управљачких алгоритама и мотора (нпр. директна контрола момента, синхронни мотор са перманентним магнетима). Алгоритам индиректног векторског управљања са стварним (апсолутним) вриједностима реализује се на ДСП са аритметиком покретне тачке. Управљачки сигнали које генерише ДСП на својим излазима воде се на трофазни инвертор. Комплетан хардвер који је пројектован, израђен и у овом

раду описан базира се на интеграцији готових хардверских модула који су као функционалне цјелине лако доступни на тржишту.

Заправо, основна идеја је била да се комерцијално доступни фреквенцијски регулатор адаптира уз минималне измјене, ако су оне неопходне, за управљање са ДСПом код којег се лако мијења извршни код. Тако формирана апаратура погодна је за брза и ефикасна тестирања различитих управљачких алгоритама (као што су представљени у [2]-[5]) и лако прилагодљива за моторе различитих снага и типова, а да при томе нема потребе за посебним пројектовањем додатног хардвера.

Поређење ДСПа са аритметиком покретне и фиксне тачке дато је у другом поглављу рада са циљем да се у основи прикажу разлике и предности примјене различитих типова процесора. У трећој глави описан је коришћени процесор, а у четвртој коришћени фреквенцијски регулатор. За повезивање процесора са фреквенцијским регулатором пројектован је минималан али неопходан интерфејс који је описан у петој глави. У шестој глави дати су графички прикази карактеристичних величина добијених коришћењем реализованог система. Резултати рада сумирани су у закључку.

## II. ПОРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСОРА СА АРИТМЕТИКОМ ФИКСНЕ И ПОКРЕТНЕ ТАЧКЕ

Основна разлика између појмова покретна и фиксна тачка је у начину представљања нумеричких података са којим процесор ради. Док процесори са фиксном тачком врше израчунавања искључиво са цјелобројним вриједностима, процесори који подржавају аритметику покретне тачке могу да врше прорачуне и са цјелобројним али и са реалним бројевима.

Када је прецизност у питању, поређења ради, можемо навести да ДСП произвођача ТИ<sup>1</sup> са фиксном тачком серије С2000 представља нумеричке цјелобројне податке са јединственим 16 битним ријечима. Процесор са покретном тачком истог произвођача користи за представљање бројева 32 бита од којих се 24 користе за репрезентацију мантисе цијелог броја или као база реалног броја, а преосталих 8 бита за експонент. Представљањем броја са 24 бита плус 8 за експонент у поређењу са 16 бита код процесора фиксне тачке значајно проширује опсег динамичке прецизности. Процесори са покретном тачком могу да раде и са дуплом прецизношћу са 64 бита (53+11) за сваки број што значајно увећава прецизност али на уштрб брзине рада јер свака операција захтјева већи број процесорских циклуса [1],[6].

Много већа рачунска моћ процесора са аритметиком покретне тачке је пресудна предност у односу на процесоре са аритметиком фиксне тачке. Међутим, на почетку развоја процесора са покретном тачком, раних деведесетих година када је ТИ развио први процесор са покретном тачком, друге доминантне карактеристике

умањивале су главне предности овог типа аритметике. Функције покретне тачке захтијевају већу хардверску сложеност процесора са додатним рачунским јединицама. Подаци представљени са 32 бита захтијевају двоструко више линија него исти код процесора фиксне тачке (16 битни). Поменути фактори поред којих се још могу поменути и већи број пинова, дупло веће магистрале података па самим тим и већа кућишта процесора, проузроковале су значајно већу цијену процесора са покретном тачком у односу на тадашње процесоре са фиксном тачком. Цијена процесора била је пресудан фактор за коришћење јефтинијих процесора у масовним апликацијама.

Са друге стране, процесори са покретном тачком нудили су једноставност у примјени. Први процесори који су могли да се програмирају директно у С програмском језику били су процесори са покретном тачком док су процесори са фиксном тачком још увијек захтијевали програмирање у асемблеру. Осим тога, рад са реалним бројевима омогућен је директно у програмском коду док су код процесора фиксне тачке операције са реалним бројевима обављане индиректно кроз додатне програмске наредбе продужавајући вријеме потребно за програмирање. Из поменутих разлога прве примјене процесора са фиксном тачком биле су у апликацијама које нису биле масовне и гдје самим тим производна цијена није била пресудна али јесте вријеме и трошкови развоја реализованог алгорита. Такве примјене су најчешће истраживања, развој прототипова, коришћење у сегментима војне индустрије као што су радар, препознавање слике, тродимензионални графички акцелератори за радне станице и слично.

Почетне значајне разлике међу процесорима покретне и фиксне тачке које су одређивале и примјену истих данас су сведене на минимум. Данашњи ниво интеграције омогућава да у истом паковању и по истој цијени имамо "систем на чипу"<sup>2</sup> сложеније покретне тачке и фиксне тачке. Иако су процесори са фиксном тачком и даље најзаступљенији у уређајима масовне производње, процесори са покретном тачком све их више сустижу у обиму примјене.

Када се одлучујемо коју врсту процесора ћемо да користимо потребно је да дамо одговор на два питања: колики је степен прецизности који захтијева дата апликација и колико су предвидиве вриједности у скупу података са којима радимо. Аритметика са покретним зарезом има већу прецизност у односу на фиксну тачку и то захваљујући три кључна фактора. Први, већу прецизност обезбјеђује већи број бита који се користи за представљање нумеричких података (24 бита у односу на 16 бита). Други, коришћење експонената повећава прецизност значајним проширењем динамичког опсега доступног за апликацију. Ова особина посебно долази до изражаја код података чији је опсег доста широк и њихове

<sup>1</sup> ТИ- Тексас Инструментс (енг. *Texas Instruments, USA*).

<sup>2</sup> Интеграција процесора са периферијама и меморијом у једном интегрисаном колу енг. *SOC, system on a chip*.

бројне вриједности тешко предвидиве. Трећи, интерно представљање података у процесорима са покретном тачком далеко је егактније него у процесорима са фиксном тачком обезбјеђујући већу прецизност крајњег резултата.

Последњи фактор ћемо детаљније објаснити. Постоје за три врсте података три дужине ријечи којима су представљени ти подаци. Улазно излазни подаци који се представљају са 24 бита (16 код фиксне тачке) су први тип са карактеристичном дужином ријечи. Коefицијенти које се користе при множењима представљају се као и улазно излазни подаци са 16 бита код фиксне тачке, а код покретне са 24 или 53 бита зависно да ли се користи једнострука или двострука прецизност. Прецизност може бити повећана са додатним битима у неким случајевима када експонент може да представља значајне нуле у коefицијенту. Коначно трећа дужина ријечи карактеристична је за међурезултате итеративних операција множења са акумулацијом<sup>3</sup> [1],[6].

Може се закључити да још увијек постоје мале разлике у цијени и једноставности коришћења између процесора са фиксном и покретном тачком али су оне све мање значајне. Главни критеријум међу пројектантима је све више математичка флексибилност и прецизност коју нуде процесори са покретном тачком [7]. Све апликације које захтијевају рад са стварним вриједностима уз већу прецизност и шири динамички опсег представљају логичну примјену процесора са покретном тачком. Остале апликације које немају ни један од ових захтијева могу бити засноване на процесорима са фиксном тачком.

### III. ДИГИТАЛНИ СИГНАЛ ПРОЦЕСОР, РАЗВОЈНА ПЛОЧА И СОФТВЕРСКО РАЗВОЈНО ОКРУЖЕЊЕ

У овом раду биће описан систем за индиректно векторско управљање асинхроним мотором базирано на ДСП процесору са покретном тачком TMS320C28335 произвођача ТИ.

Коришћени процесор базиран је на процесорима са фиксном тачком из групе C28x чије су могућности проширене додатним регистрима и инструкцијама које подржавају *IEEE* операције са покретном тачком једноструке прецизности [8],[9].

Сам процесор инсталиран је на електронску плочицу заједно са пратећим елементима неопходним за самостално функционисање као и заштиту улаза и излаза (Сл. 1). Формат карте прилагођен је коришћењу са конекторима *DIMM100*<sup>4</sup> преко којих је омогућен приступ свим периферним прикључцима процесора.

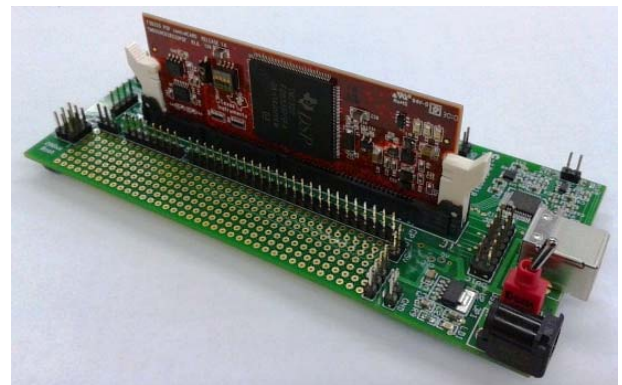
Коришћени модел поменуте плоче има назив *Delfino F28335 controlCARD*<sup>TM</sup> и намијењена за брзи развој апликација и карактерише је мала осјетљивост на шумове и лака монтажа (енг. *plug in*). Врло је погодна за јединствене или мале серије уређаја. Напајање карте је



Слика 1. Процесор на штампаној плочи формата *DIMM100*, *Delfino F28335controlCARD*<sup>TM</sup>.

јединствено на напонском нивоу 5VDC. Аналогни улази напонски су заштићени диодама, а шум је потиснут анти-алијасинг филтерима. Два дигитална излаза повезана су са двије *LED* диоде, а трећа је индикатор напајања. За кориснике је још битно напоменути да постоје двије секције микро прекидача којима се подешавају тип комуникације са окружењем и начин бутовања процесора [10].

Развојна плоча на коју се прикључује карта са процесором омогућава лак приступ улазно-излазним и комуникационим терминалима (Сл. 2). Помоћу ње је омогућено прикључење процесора са персоналним рачунаром преко *USB* порта јер је на самој развојној плочи уграђен *USB JTAG* емулатор. Комерцијални назив развојне плоче је *TMS320C2000*<sup>TM</sup> *Eksperimenter Kit*.



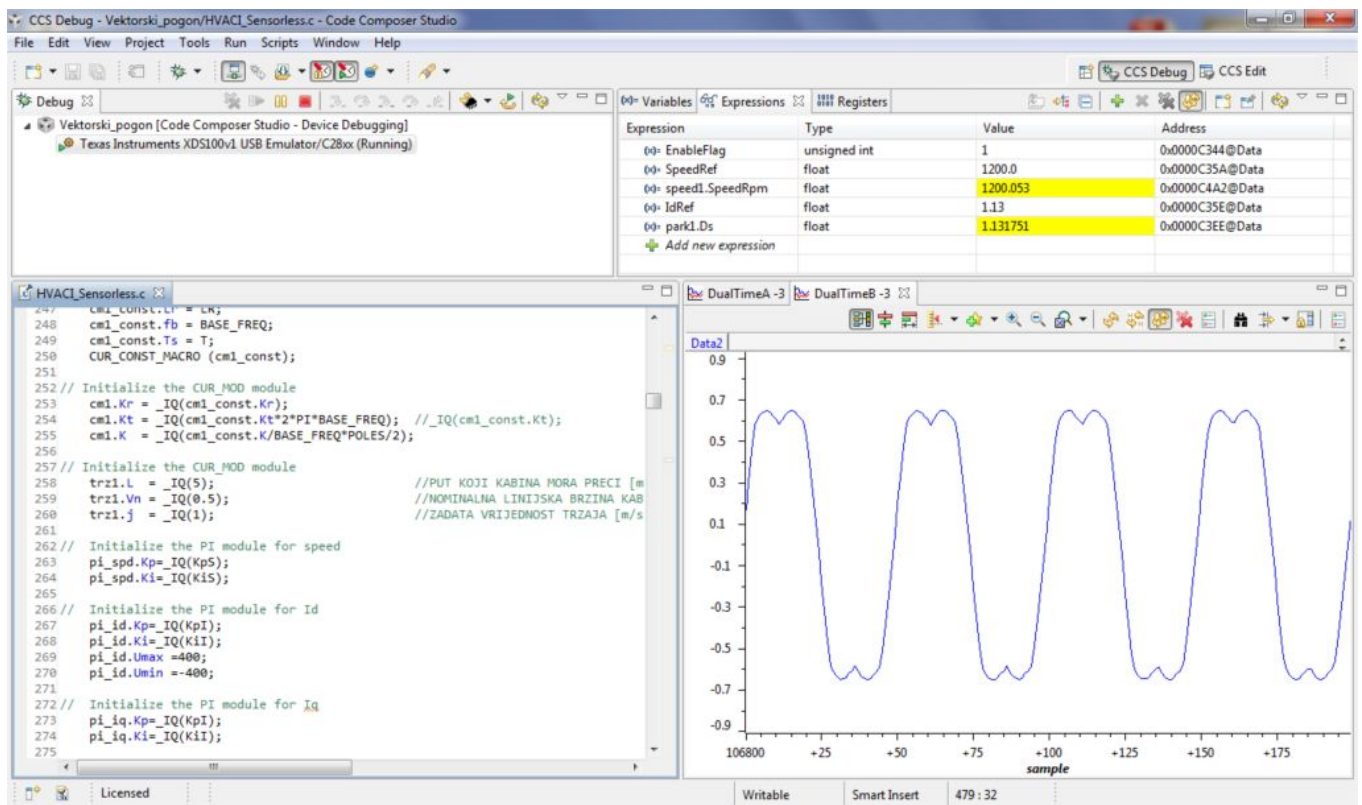
Слика 2. Развојна плоча *TMS320C2000*<sup>TM</sup> *Eksperimenter Kit* са процесорском картом.

Осим лако приступачних терминала на развојној плочи налазе се и подручја погодна за формирање прототипских електричних кола. Напајање је могуће преко *USB* порта или из екстерног напајања што може да се селектује уграђеним преклопником. Два напонска нивоа су доступна за употребу у екстерним колима, 5V и 3.3V [10].

Софтверско развојно окружење које се користи за писање програмског кода, компајлирање, трансфер кода у процесорску меморију и мијењање и читавање појединих величина током извршења програма назива се *Code Composer Studio- CCS*. Коришћена верзија је тренутно актуелна v.5.3.0. Програмски језик за писање кода је *C++*. На Сл. 3 дат је приказ прозора *CCS*а у којем је графички приказ и могућност промјене параметара током извршења програма искоришћен за промјену референце брзине.

<sup>3</sup> Операција множења са акумулацијом, енгл. *multiply-accumulate operations, MAC*.

<sup>4</sup> *DIMM*-енгл. *Dual In Line Memory Module 100 pins*.



Слика 3. Прозор CCSa са графичким приказом времена испуне једне фазе.

#### IV. ФРЕКВЕНЦИЈСКИ РЕГУЛАТОР

Модерни фреквенцијски регулатори који се могу наћи на тржишту примјењују модуларни начин реализације хардвера. Разлог томе је оптимизација производње. На примјер, исто управљање са истим управљачким алгоритмом које се користи за генерисање управљачких сигнала не зависи од снаге фреквенцијског регулатора у који се уграђује. Стога се управљачка плоча са процесором и њему потребним интерфејсом израђује засебно на посебној штампаној плочи која се уграђује у више серија претварача. Унутар претварача она се повезује кабловским конектором са плочом на којој су електронска кола ниског напона.

Плоча са електронским колима ниског напона садржи, између осталог, сљедеће цјелине: Претвараче једносмјерне струје са галванским раздвајањем. Напон једносмјерног међукола претвара се у напоне вриједности  $+5V$ ,  $\pm 15V$ ,  $24V$  и служи за напајање електронских компоненти унутар претварача; Мјерење и скалирање линијских струја и напона једносмјерног међукола које се преко кабловског конектора просљеђују управљачкој плочи; Прекидачи за укључење отпорника за ограничење струје пуњења кондензатора и укључење отпорника за кочење (релеји или транзистори); Галванско раздвајање процесорских управљачких сигнала од драјверских кола инвертора и слично. За разлику од управљачких плоча, плоче са електроником ниског напона могу да се уграђују у фреквенцијске регулаторе приближних снага. То углавном зависи од типа инвертора и његових драјверских кола.

Трећи сегмент фреквенцијских регулатора су кола енергетске електронике која се састоје од инвертора и драјверских и заштитних кола. Код претварача мањих снага (до  $2.2kW$ ) инвертор и његова драјверска и заштитна кола су интегрисани у једно кућиште па осим њега плоча енергетске електронике садржи само мали број додатних пасивних компоненти. На Сл. 4 приказани су примјери конструкције претварача неких произвођача.

Могуће је да плоча са колима енергетске електронике и електронике ниског напона буду изведене као једна али и у том случају управљачка плоча је увијек одвојена и спојена неком врстом конектора. Ова погодност омогућава да прикључимо процесор по нашем избору на остатак хардвера помоћу конектора и евентуално додатног интерфејса ако је он неопходан.

Фреквенцијски регулатор који је искоришћен у нашем примјеру и по принципу који је описан називне је снаге  $2.2kW$ ,  $10A$ . Напајање је монофазно па је и излазни напон максимално  $220V$  ефективно. Инвертор је интегрисан са драјверским колима *Smart Power Module* произвођача *Fairchild Semiconductor* тако да је плоча енергетске електронике мала са неколико пасивних компонената које дефинишу прекострујне заштите и елиминишу сметње.

Мјерење струја реализовано је са двије ЛЕМ сонде које врше галванско одвајање, имају омјер  $1:1250$  и дају на излазу струјни сигнал до  $\pm 20mA$ . На плочи постоје двије одвојене референтне тачке, за напоне  $5V$  и  $\pm 15V$  и напон  $24V$ . Сви мјерни сигнали су у односу на масу напона  $5V$  којим се напаја и процесор.





Слика 4. Примјери конструкције фреквенцијских регулатора произвођача *Hyundai, Omron, BigM*.

## V. ИЗРАЂЕНИ ИНТЕРФЕЈС

Процесорски аналого-дигитални конвертори могу да врше аквизицију само позитивних напонских сигнала до 3V. Струјне сонде претварача дају биполарни струјни сигнал реда величине неколико mA. Да би се помириле наведене разлике неопходно је израдити додатно коло у облику диференцијалног појачивача са операционим појачивачем за обе струје. Струјни сигнал сонди претвара се отпорником у напонски, а потом му се додаје 1.5V и све заједно се појачава (скалира) у опсег од 0 до 3V.

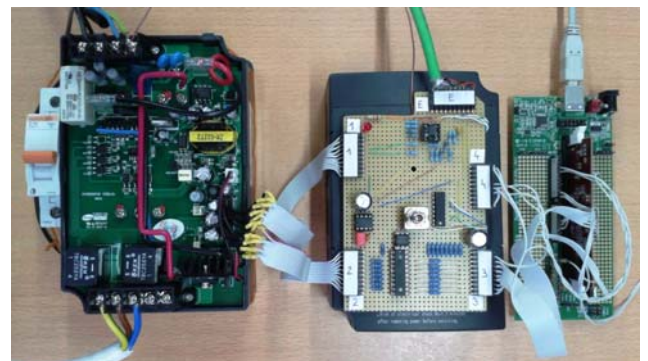
Напон једносмјерног међукола скалиран је у претварачу на напон до 5V. Напонским раздјелником ова вриједност умањена је три пута и доведена на аналогни улаз процесора.

Управљачки сигнали за инвертор у претварачу су галвански раздвојени оптокаплерима. Сваки транзистор у

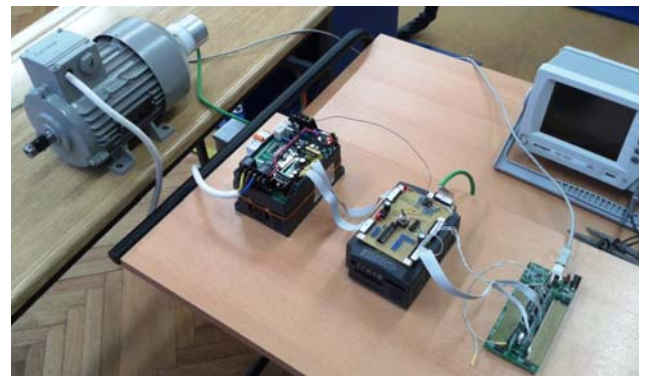
инвертору има посебан управљачки сигнал. Због смањења могућности појаве сметњи али и због повећања напона, сви дигитални сигнали са процесора ка претварачу просљеђују се преко Шмитових окидних кола. Дигитални сигнали су управљачки сигнали транзистора инвертора (шест PWM сигнала) и сигнали за укључења вентилатора и отпорника за кочење.

Коришћени инкрементални енкодер резолуције 500 импулса по обртају генерише диференцијалне сигнале двију фаза и индекса. Процесор има предвиђене улазе за енкодер али они не могу бити диференцијални. С тога се врши прилагођење сигнала енкодера процесорским улазима.

На Сл. 5 и Сл. 6 дата је слика функционално повезаног система процесор-интерфејс-претварач-мотор.



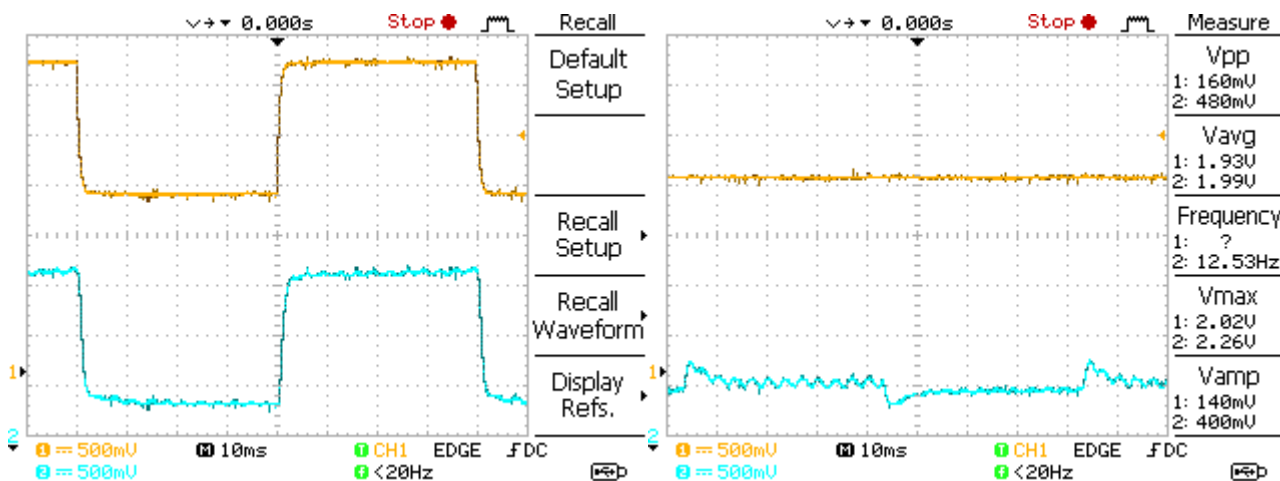
Слика 5. Претварач-интерфејс-процесор.



Слика 6. Изглед комплетног система.

## VI. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Након формирања хардверског дијела система неопходно је написати код управљачког алгорита. Алгоритам индиректног векторског управљања писан је у C++ програмском језику. Искоришћени су готови C++ модули (макрои) који се стандардно користе код управљања погонима и чине саставни дио сваког управљачког алгорита. Осим писања кода алгорита потребно је извршити умјеравање линијских струја и напона једносмјерног међукола и извршити подешавање регулатора струја по  $d$  и  $q$  оси и брзинског регулатора. На Сл. 7 приказани су одзиви струја на скоковиту промјену референце.



Слика 7. Графички приказ промјена струја по  $q$  и  $d$  оси на скоковиту промјену референци, респективно.

## VII. ЗАКЉУЧАК

Сваки истраживачки рад подразумијева експерименталну верификацију. За подручје истраживања управљања електричним погонима неопходна апаратура за провјеру управљачких алгоритама је фреквенцијски претварач са процесором којем је лако мијењати програм који ће се извршавати као и вриједности одређених параметара. Такође је неопходно и њихово лако ишчитавање и праћење током извршења програма [11].

У раду је приказан један успјешан начин како је могуће реализовати апаратуру која испуњава наведене захтјеве уз минималан утршак времена и средстава за њену реализацију. Користећи процесор са аритметиком покретне тачке програмирање је једноставније. Нема потребе за увођењем базних вриједности. Све величине су изражене у стварним вриједностима, а математичке операције су једноставне за коришћење при програмирању.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gene Frantz, Ray Simar, "Comparing Fixed- and Floating-Point DSPs," Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, USA, 2004. <http://www.ti.com/lit/wp/spry061/spry061.pdf>
- [2] B. Knežević, B. Blanuša, D. Marčetić: "Design of Elevator Drive With Jerk Control", 16th International Symposium on Power Electronics - Ee 2011, Novi Sad, Republic of Serbia, October 26th-28th, 2011, T2-1.8, pp. 1-4.
- [3] B. Knežević, B. Blanuša, D. Marčetić: "Model of Elevator Drive With Jerk Control", XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies IEEE, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, October 27-29, 2011, pp. 1-5.
- [4] B. Blanuša, B. Knežević: "Efficiency Optimized Control of Elevator Drive", INFOTEH, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, March 2012.
- [5] B. Blanuša, B. Knežević: "One Solution for Efficiency Optimized Control of Elevator Drive", 38. JUPITER, Belgrade, Republic of Serbia, May 2012, pp. 4.19-4.23.
- [6] "TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332, TMS320F28235, TMS320F28234, TMS320F28232, Digital Signal Controllers (DSCs)," Data Manual, Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, USA, 2012. <http://www.ti.com/lit/ds/sprs439m/sprs439m.pdf>

- [7] "C28x Floating Point Unit, fastRTS Library", Module User's Guide, Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, USA, 2008. [ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy\\_FTP-10-30-12/controlSUITE/libs/math/FPUfastRTS/V100/doc/controlSUITE\\_C28x\\_FPU\\_FastRTS.pdf](ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy_FTP-10-30-12/controlSUITE/libs/math/FPUfastRTS/V100/doc/controlSUITE_C28x_FPU_FastRTS.pdf)
- [8] "TMS320C28x Floating Point Unit and Instruction Set", Reference Guide, Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, USA, 2012. <http://www.ti.com/lit/ug/sprueo2a/sprueo2a.pdf>
- [9] "TMS320C28x FPU Primer", Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, USA, 2012. <http://www.ti.com/lit/an/spraan9a/spraan9a.pdf>
- [10] "TMS320C2000™ Experimenter Kit Overview", Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, USA, 2008. <http://www.ti.com/lit/ml/sprufr5f/sprufr5f.pdf>
- [11] Qian Cheng, Lei Yuan: "Vector Control of an Induction Motor based on a DSP", Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.

## ABSTRACT

The development of digital signal processor (DSP) has enabled the realization of demanding mathematical algorithms for controlling power converters and drives. Implementation of field oriented control algorithms is the dominant with fixed point processors such as the most common and the most affordable price for the mass use. Today, the difference in price and performance almost does not exist, so there is no reason for not using digital signal processors with floating point arithmetic in power drives. This paper presents an implementation of the algorithm of indirect field oriented control of induction motor as a complete hardware solution using a floating point processor. Realized drive is based on the integration of multiple hardware systems that are as functional units readily available in the market in a single unit with a minimum use of segments that require additional development.

## IMPLEMENTATION OF INDIRECT VECTOR CONTROL OF INDUCTION MOTOR BASED ON FLOATING POINT PROCESSOR

Bojan Knežević, Branko Blanuša, Petar Matić,  
Darko Marčetić