

МОДЕЛИРАЊЕ НА DC/DC КОНВЕРТОРИ ЗА УПРАВУВАЊЕ НА ЕДНОНАСОЧНИ МОТОРИ СО КОМПЈУТЕРСКА СИМУЛАЦИЈА

Гоце СТЕФАНОВ¹, Влатко ЧИНГОСКИ², Елена СТЕФАНОВА³

¹ *Електротехнички факултет Радовиш, УГД–Штип,*
goce.stefanov@ugd.edu.mk

² *Електротехнички факултет Радовиш, УГД–Штип,*
vlatko.cingoski@ugd.edu.mk

³ *ФИНКИ, УКИМ–Скопје,* stefanova.elena@yahoo.com

АПСТРАКТ

Во трудот е дадена методологијата и добиените резултати од компјутерска симулација и анализа на DC/DC конвертоти базирани на IGBT транзистори и применети во управувањето на еднонасочни електромотори. Направена е хармониска анализа на напонот и струјата на влез и излез од конверторот и одредени се хармониските изобличувања, факторот на моќнос и коефициентот на полезно дејство на конверторот. Исто така, дадени се и експерименталните резултати од примената на овој вид конвертори при регулирање на брзината на еднонасочен електромотор. Компјутерските симулации дадени во овој труд реализирани се со програмскиот пакет PowerSim.

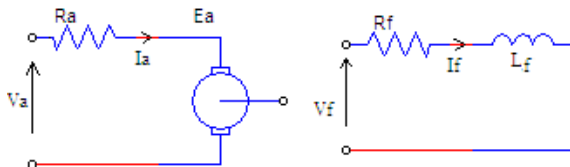
COMPUTER SIMULATION AND MODELING OF DC/DC CONVERTERS FOR CONTROL OF DC MOTORS

ABSTRACT

This paper illustrates the methodology and results of computer simulation and analysis of DC/DC converters based on IGBT transistors and applied in the management and control of DC electric motors. Harmonic analysis of voltage and current input and output of the converter together with harmonic distortions, power factor and the coefficient of efficiency of the control system are also investigated and presented in the paper. The experimental results of the application of these converters in regulating the speed of the DC electric motor are also given. Computer simulations presented in this paper have been implemented with the programming package PowerSim.

1 ВОВЕД

Во трудот е разгледан еднонасочен електромотор со одделна (независна) возбуда. На сликата 1 е покажано еквивалентното коло на одделно побуден еднонасочен електромотор. Моторот се состои од две кола: коло на статорот (полето, возбуда) и коло на роторот (арматура). Колото на статорот е приклучено на еднонасочен напон V_f . Отпорноста на намотката на статорот е R_f , а индуктивноста L_f . Колото на роторот е приклучено на еднонасочен напон V_a . Отпорноста на роторот е R_a , а неговата струја е I_a .



Слика 1 Еквивалентно коло на одделно побуден еднонасочен електромотор.

Индуктивноста на статорот нема влијание на анализата во состојба на мирување, бидејќи изворот на напојување е еднонасочен. Струјата на статорот I_f е:

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad (1)$$

За мали мотори до неколку десетици киловати, колото на статорот е перманентен магнет. Во такви случаи, флуksот на статорот е константен и не може да се регулира.

Колото на роторот се состои од намотката на роторот и комутаторски делови. Надворешниот извор на напон V_a е поврзан на роторот за да обезбеди електрична енергија за да се совлада оптоварувањето на осовината. Изворот на напон V_a е поврзан на роторот преку деловите на комутаторот и четкиците. Напонот на статорот V_f најчесто е од исти ред на големина како напонот на роторот V_a . Повратната електромоторна сила, E_a (прикажана на сликата 1) е еднаква со напонот на изворот V_a намалена за падот на напонот на активниот отпор на роторот R_a . Затоа струјата I_a низ роторот може да се изрази како:

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} \quad (1)$$

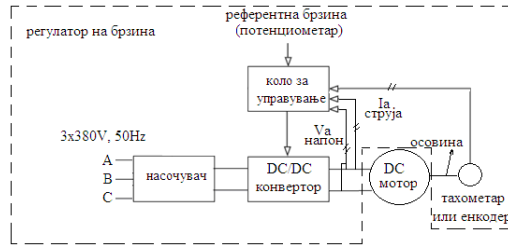
Равенката која ја дава зависноста на аголната брзина на еднонасочните мотори е основа за колата за управување со брзината на овие мотори. Таа е дадена [1] со изразот:

$$\omega = \frac{V_a}{K\Phi} - \frac{R_a}{K\Phi} I_a \quad (2)$$

V_a , I_a и R_a се напонот, струјата и отпорноста на роторската намотка соодветно, Φ е флуksот на статорот кој е пропорционален со статорската струја I_f . Константата K зависи од структурните параметри како што се бројот на полови, проводници и бројот на паралелни патеки. Равенката (2) покажува дека со промена на напонот на роторот V_a може да се регулира брзината на еднонасочниот електромотор.

2 РЕГУЛАТОР НА БРЗИНА НА ЕДНОНАСОЧЕН ЕЛЕКТРОМОТОР

На сликата 2 е покажан блок дијаграмот на еден управуван еднонасочен електромотор.

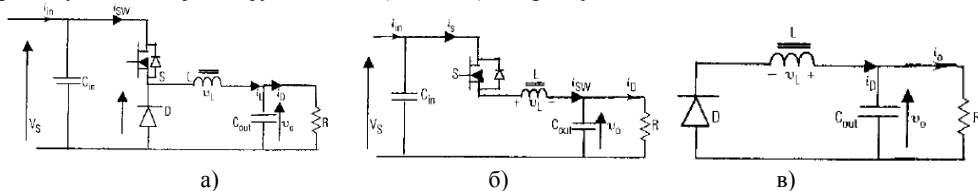


Слика 2 Блок дијаграм на управуван еднонасочен електромотор.

Блок дијаграмот се состои од пет блока: насочувач, DC/DC конвертор, тахометар или енкодер и коло за управување кои го сочинуваат регулаторот на брзина, како и блокот на еднонасочниот електромотор. Преку насочувачот регулаторот е поврзан на нисконапонска трифазна мрежа со напон $3 \times 380\text{V}$, 50Hz . На излезот од насочувачот се добива еднонасочен напон со средна вредност V_a . DC/DC конверторот (чопер) се состои од полупроводнички прекинувачи реализирани со тиристори, MOST транзистори или IGBT транзистори. Тој на својот излез генерира напон во подрачје од 0 до V_a . Максималниот напон кој го дава чоперот на излезот не смее да биде поголем од напонот за кој е наменет електромоторот. (Податокот за овој напон, како и бројот на вртежи, моќноста како и напонот на статорот V_f се дадени на табличката на електромоторот). DC/DC конверторот го регулира напонот на својот излез врз основа референтен ИШИМ (импулсно широчински) сигнал, добиен од колото за управување. Во колото за управување влегуваат: референтен сигнал за брзината (добиен од потенциометар или процесен сензор на притисок, ниво, проток), повратен сигнал од тахометарот пропорционален на брзината на осовината на моторот, како и повратни сигнали за струјата и напонот на моторот. Сигналот за брзината на осовината на моторот може да се добие од тахометар поставен на осовината на моторот. Во овој случај овој сигнал е аналоген, зошто тахометарот во суштина е генератор на еднонасочен напон (динамо). Кога на осовината на моторот е поставен енкодер, тој на излезот дава дигитален сигнал (импулси) пропорционален на бројот на вртежи на електромоторот.

2.1 DC/DC конвертор

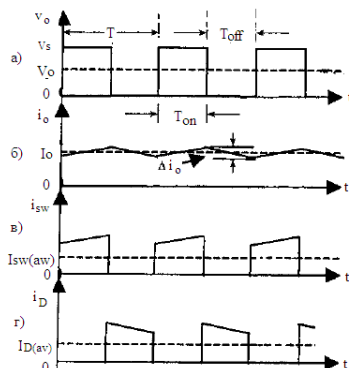
Како што беше кажано погоре DC/DC конверторот на својот влез прима еднонасочен напон со средна вредност V_a и после обработката, врз основа на референтниот ИШИМ сигнал од колото за управување, на излезот дава еднонасочен напон со средна вредност во подрачје од 0 до V_a . На сликата 3 е покажано колото на DC/DC конвертор, т.н. step-down (buck) converter, реализиран со еден управуван транзисторски прекинувач S , кој напојува омски (активен) потрошувач R [2].



Слика 3 DC/DC конвертор: а) електрично коло, б) еквивалентно коло кога е вклучен транзисторскиот прекинувач, в) еквивалентно коло кога е исклучен транзисторскиот прекинувач.

На сликата 3а е прикажано електричното коло на DC/DC конверторот. i_{in} е влезната струја на конверторот, која најчесто е и струја на излез од насочувачот. V_s е влезниот напон на конверторот. i_{sw} е струјата низ транзисторскиот прекинувач S , а i_D е струјата низ диодата D . i_o и v_o се струјата и напонот на излезот од DC/DC конверторот кои се и струја и напон на потрошувачот R . На сликата 3б е прикажано еквивалентното

коло на конверторот кога е вклучен транзисторскиот прекинувач, а на сликата 3в е еквивалентното коло кога транзисторскиот прекинувач е исклучен. Работата на DC/DC конверторот најдобро може да се согледа со брановите форми на напонот и струјата во колото, покажани на сликата 4.



Слика 4 Бранови форми на напоните и струите во колото на DC/DC конверторот прикажан на сликата 3.

На сликата 4а е прикажана брановата форма на излезниот напон v_o на конверторот, кој е и напон на потрошувачот R . На оваа слика се гледа дека амплитудата на импулсите на излезниот напон е одредена од влезниот напон на конверторот V_s . Тоа покажува дека кога транзисторскиот прекинувач е вклучен, тој го пушта целиот напон од влезот на излезот. На истата слика со V_o е означена средната вредност на напонот на потрошувачот. На сликата 4б е прикажана брановата форма на излезната струја i_o низ потрошувачот R . Овде I_o е средната вредност на излезната струја на конверторот (струја низ потрошувачот). На сликата 4в е прикажана брановата форма на струјата i_{sw} низ транзисторот S , а на сликата 4г е прикажана брановата форма на струјата i_D низ диодата. Од сликата 3б и 4а може да се заклучи дека кога транзисторот е вклучен тој го пушта влезниот напон и на потрошувачот се јавува импулс со амплитуда V_s . Траењето на овој импулс е одредено од времето кога транзисторот е вклучен и овде е означено со T_{on} . Кога транзисторот S е исклучен, излезниот напон v_o е нула, слика 3в и 4а. Овој интервал е одреден од времето за кое транзисторот е исклучен и овде е означено со T_{off} . Така на излезот од конверторот се добиваат напонски импулси со правоаголна бранова форма со периода:

$$T_s = T_{on} + T_{off} = \frac{1}{f_s} \quad (3)$$

Во равенката (3), f_s е прекинувачката фреквенција или уште позната како фреквенција на копирање на конверторот.

Излезната струја на конверторот i_o произлегува од струјата низ транзисторот i_{sw} кога тој е вклучен, а кога е исклучен е од струјата низ диодата i_D . Со индуктивноста L се обезбедува излезната струја да биде континуална.

Средната вредност на излезниот напон V_o на конверторот е поврзана со средната вредност на влезниот напон V_s со равенката:

$$V_o = kV_s \quad (4)$$

Каде k е

$$k = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (5)$$

k е познат како фактор на исполнетост (duty cycle). Времето на проведување T_{on} и непроведување T_{off} на транзисторот се поврзани со периодата и факторот на исполнетост како:

$$T_{on} = kT_s, T_{off} = (1 - k)T_s \quad (6)$$

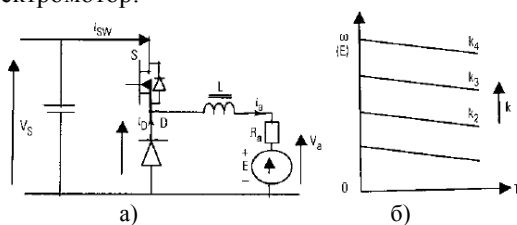
Средната вредност на излезната струја I_o е поврзана со средната вредност на влезната струја $I_{in(av)}$ со равенката:

$$I_o = \frac{I_{in(av)}}{k} \quad (7)$$

Знаејќи ги средните вредности на излезниот напон V_o и средната вредност на излезната струја I_o , може да се одреди излезната моќност P_o на конверторот, т.е.:

$$P_o = I_o V_o \quad (8)$$

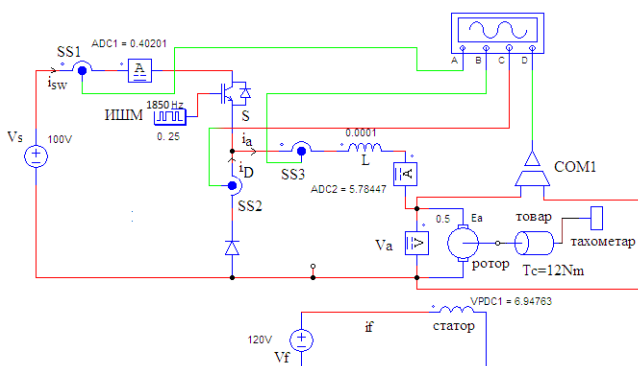
На сликата 5 е покажано колото на DC/DC конверторот, наменет за управување на брзината на DC електромотор.



Слика 5 DC/DC конверторот, наменет за управување на брзината на еднонасочен електромотор: а) еквивалентно коло, б) зависност на аголната брзина ω од моментот за различна вредност на константата K .

2.1.1 Компјутерски симулации на DC/DC конвертор во управувањето на еднонасочен мотор

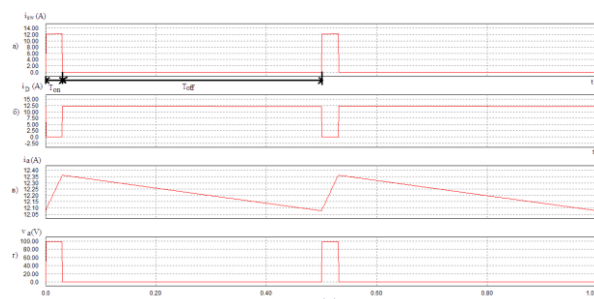
На сликата 6 е покажано колото користено за симулација на управување на брзината на еднонасочен електромотор со DC/DC конвертор во програмскиот пакет PowerSim [3].



Слика 6 Коло за симулација на управување на брзината на еднонасочен електромотор со DC/DC конвертор во програмскиот пакет PowerSim.

Во симулацијата е користен модел на мотор со номинален напон на роторот (арматурата) 100 V, номинална роторска струја 15 A, номинален број на вртежи 1200 врт/мин, како и номинален напон на статорот 120 V. Моторот е оптоварен со товар со инерцијален момент $T_c = 12$ Nm. На осовината на моторот е поврзан тахометар за мерење на брзината на вртење.

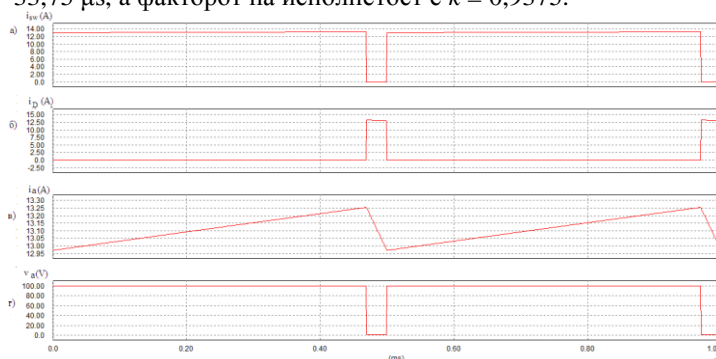
Во колото за симулација на сликата 6, SS1, SS2, SS3 се струјни сензори со чија помош брановите форми на струјата i_{sw} низ транзисторот, струјата низ диодата i_D и струјата низ роторот на моторот соодветно i_a се носат на осцилоскоп. COM1 е напонски сензор со чија помош брановата форма на напонот V_a на роторот од моторот се носи на осцилоскопот. Блокот ИШИМ е генератор на импулсно широчински сигнал. Тој генерира импулси со променлива ширина на базата на транзисторот S. Фреквенцијата на чопирање е $f_s = 1,85 \text{ kHz}$, односно периодата е $T_s = 1/f_s = 540 \mu\text{s}$. Во симулацијата е користен модел на идеален IGBT транзистор (напонот колектор-емитер кога транзисторот проведува е $V_{CESAT} = 0 \text{ V}$), како и идеален модел на диода ($V_D = 0 \text{ V}$ кога диодата проведува). Влезниот напон на конверторот е $V_s = 100 \text{ V}$, а напонот за напојување на статорската намотка е $V_f = 120 \text{ V}$. На сликата 7 се дадени брановите форми на влезната струја, која е и струја i_{sw} низ транзисторот S (слика 7а), струјата низ диодата i_D (слика 7б), струјата низ роторот на моторот i_a (слика 7в), како и на излезниот напон на конверторот, кој е и напон на роторот на моторот V_a (слика 7г). Брановите форми се дадени кога времето на проведување на транзисторот $T_{on} = T_s/16 = 540/16 = 33,75 \mu\text{s}$; времето на непроведување е $T_{off} = T_s - T_{on} = 506,25 \mu\text{s}$, а факторот на исполнетост е $k = 0,0625$.



Слика 7 Бранови форми на: а) струјата i_{sw} низ транзисторот S, б) струјата низ диодата i_D , в) струјата низ роторот на моторот i_a , г) излезниот напон на конверторот, кој е и напон на роторот на моторот V_a , кога $T_{on} = T_s/16 = 540/16 = 33,75 \mu\text{s}$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 506,25 \mu\text{s}$, $k = 0,0625$.

Од брановите форми на сликата 7 се гледа дека во интервалот на непроведување T_{off} на транзисторот, струјата низ роторот i_a е одредена од струјата низ диодата i_D , а во интервалот на проведување T_{on} , таа струја е одредена со струјата низ транзисторот i_{sw} .

На сликата 8 се дадени брановите форми на истите величини како на сликата 7, со тоа што $T_{on} = 15T_s/16 = 15 \cdot 540/16 = 506,25 \mu\text{s}$; времето на непроведување е $T_{off} = T_s - T_{on} = 33,75 \mu\text{s}$, а факторот на исполнетост е $k = 0,9375$.



Слика 8 Бранови форми на: а) струјата i_{sw} низ транзисторот S, б) струјата низ диодата i_D , в) струјата низ роторот на моторот i_a , г) излезниот напон на конверторот, кој е и напон на роторот на моторот V_a , кога $T_{on} = 15T_s/16 = 15 \cdot 540/16 = 506,25 \mu\text{s}$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 33,75 \mu\text{s}$, $k = 0,9375$.

Во табелата 1 се дадени податоци за факторот на исполнетост k , периодата на чопирање T_s , времето на проведување на транзисторот T_{on} , времето на непроведување на

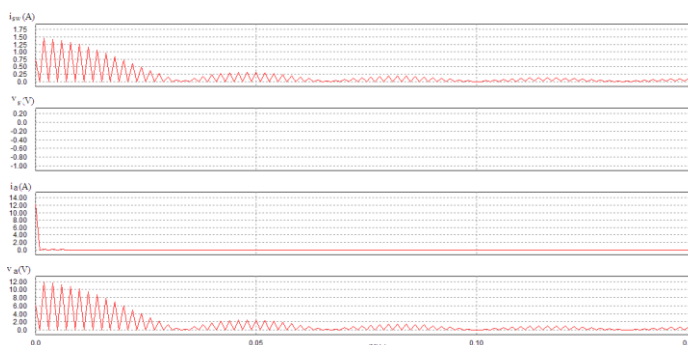
транзисторот T_{off} , фреквенцијата на чопаирање f_s , влезниот напон на конверторот V_s , средната вредност на струјата низ транзисторот I_{sw} , средната вредност на струјата низ диодата I_D , средната вредност на струјата низ роторот на моторот I_a , средната вредност на излезниот напон т.е. напонот на роторот на моторот V_a пресметан со равенката (1), како и напонот на роторот V_a измерен од колото за симулација на сликата 6. Исто така е даден и податок за бројот на вртежи на осовината на моторот измерен со тахометарот.

Табела 1 Резултати од симулацијата на DC/DC конверторот од сликата 7.

$k=T_{on}/T_s$	$T_s(\mu s)$	$T_{on}(\mu s)$	$T_{off}(\mu s)$	$f_s(kHz)$	$V_s(V)$	$I_{sw}(A)$	$I_D(A)$	$I_a(A)$	$V_a(A)$ пресме	$V_a(A)$ измер	n (врт/мин)
0,0625	540	33,75	506,25	1,85	100	0,76	12	12,77	6,25	6	72
0,125	540	67,5	472,5	1,85	100	1,71	12	13,7	12,5	12,5	150
0,1875	540	101,25	438,75	1,85	100	2,66	11,32	13,98	18,75	19	228
0,25	540	135	405	1,85	100	3,33	10	13,33	25	25	300
0,3125	540	168,75	371,25	1,85	100	4,53	9,85	14,38	31,25	31,5	378
0,375	540	202,5	337,5	1,85	100	4,94	8,23	13,17	37,5	37,5	450
0,4375	540	236,25	303,75	1,85	100	5,93	7,7	13,63	43,75	43,5	522
0,5	540	270	270	1,85	100	7,39	7,24	14,64	50	50,5	606
0,5625	540	303,75	236,25	1,85	100	9,17	7,1	16,23	56,25	56,5	678
0,625	540	337,5	202,5	1,85	100	8,6	5,16	13,77	62,5	62,5	750
0,6875	540	371,25	168,75	1,85	100	9	4,14	13,14	68,75	68,5	822
0,75	540	405	135	1,85	100	9,91	3,3	13,21	75	75	900
0,8125	540	438,75	101,25	1,85	100	10,64	2,5	13,15	81,25	81	972
0,875	540	472,5	67,5	1,85	100	11,53	1,65	13,18	87,5	87,5	1050
0,9375	540	506,25	33,75	1,85	100	12,3	0,85	13,15	93,75	93,5	1122

Од податоците во табелата 1 се забележува дека, како факторот на исполнетост k се зголемува, средната вредност на напонот V_a на роторот се зголемува, а со тоа се зголемува и бројот на вртежи на осовината на моторот. Исто така се забележува дека измерената вредност на напонот на роторот, дадена во 11-тата колона е скоро иста со пресметаната вредност дадена во 10-тата колона.

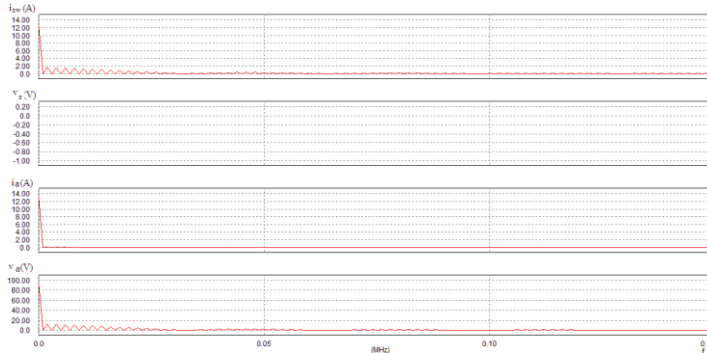
На сликата 9 се прикажани амплитудните спектри на хармониците во влезните струја и напон, како и во излезните струја и напон на DC/DC конверторот од сликата 7, кога времето на проведување на транзисторот $T_{on} = T_s/16 = 540/16 = 33,75 \mu s$; времето на непроведување е $T_{off} = T_s - T_{on} = 506,25 \mu s$, а факторот на исполнетост е $k = 0,0625$.



Слика 9 Амплитудни спектри на хармоници во влезните струја и напон, како и во излезните струја и напон на DC/DC конверторот од сликата 7, кога времето на проведување на транзисторот $T_{on} = T_s/16 = 540/16 = 33,75 \mu s$; времето на непроведување е $T_{off} = T_s - T_{on} = 506,25 \mu s$, а факторот на исполнетост е $k = 0,0625$.

На сликата 10 се прикажани амплитудните спектри на хармониците во влезните струја и напон, како и во излезните струја и напон на DC/DC конверторот од сликата 7 кога $T_{on} = 15T_s/16 = 15 \cdot 540/16 = 506,25 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 33,75 \mu s$, а факторот на исполнетост е $k = 0,9375$.

Во табелата 2 се дадени вкупното хармониско избличување на влезните струја



Слика 10 Амплитудни спектри на хармоници во влезните струја и напон, како и во излезните струја и напон на DC/DC конверторот од сликата 7 кога $T_{on} = 15T_s/16 = 15 \cdot 540/16 = 506,25 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 33,75 \mu s$, а факторот на исполнетост е $k = 0,9375$.

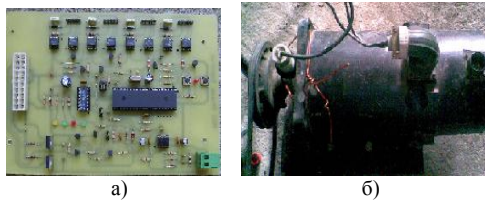
THD_{isw} и напон THD_{vs} , на излезните струја THD_{ia} и напон THD_{va} , како и факторот на моќност PF [4], [5] на DC/DC конверторот добиени според амплитудните спектри на хармоници од сликите 9 и 10.

Табела 2 Вкупно хармониско изобличување на влезните струја и напон, на излезните струја и напон, како и фактор на моќност на DC/DC конверторот

k T_{on}	THD_{isw}	THD_{vs}	THD_{ia}	THD_{va}	PF
$0,0625$ $T_s/16$	2,37	0	0	2,40	0,38
$0,9375$ $15T_s/16$	0,391	0	0	0,385	0,93

2.2 Резултати од практичната имплементација на DC/DC конверторот

Прототипот на колото за управување на DC/DC конверторот е базирано на микроконтролерот Pic 16F877 и е прикажано на сликата 11а, а на сликата 11б е прикажан управуваниот еднонасочен мотор со карактеристики $V_a = 100 \text{ V}$, $I_a = 17,6 \text{ A}$, $n = 1600$ врт/мин. Возбудата на овој мотор е реализирана со перманентен магнет. Во прототипот на DC/DC конверторот е употребен IGBT транзистор тип SKM200GB060. Овој транзистор има напон во проводна состојба $V_{CEsat} = 1,65 \text{ V}$, максимална колекторска струја $I_c = 200 \text{ A}$ и максимален напон колектор-емитер во исклучена состојба од 600 V .

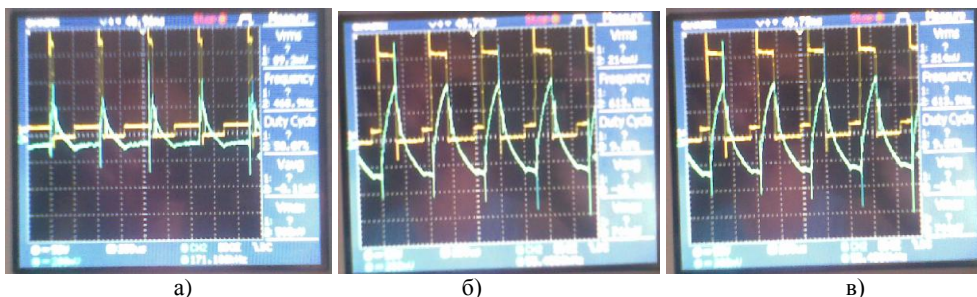


Слика 11 а) Прототип на колото за управување на DC/DC конверторот, б) управуваниот еднонасочен мотор.

Во фазата на тестирање на колото за управување и еднонасочниот мотор, моторот е оптоварен механички, преку систем на каишници и шајми, со алтернатор со карактеристики 14 V , 25 A . Излезот од алтернаторот е поврзан до акумулаторска батерија 12 V , 70 Ah .

На сликата 12 се прикажани брановите форми на струјата и напонот на роторот на моторот добиени во фазата на тестирање. На сликата 12а се прикажани брановите форми кога $T_{on} = T_s/16 = 540/16 = 33,75 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 506,25 \mu s$, а $k = 0,0625$; на сликата 12б се брановите форми кога $T_{on} = 5T_s/16 = 168,75 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 371,25 \mu s$, а

$k = 0,3125$ и на сликата 12в се брановите форми кога $T_{on} = 7T_s/16 = 236,25 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 303,75 \mu s$, а $k = 0,4375$



Слика 12 Бранови форми на струјата и напонот на роторот на моторот кога: а) $T_{on} = T_s/16 = 540/16 = 33,75 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 506,25 \mu s$, а $k = 1/16 = 0,0625$; б) $T_{on} = 5T_s/16 = 168,75 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 371,25 \mu s$, а $k = 5/16 = 0,3125$ и в) $T_{on} = 7T_s/16 = 236,25 \mu s$; $T_{off} = T_s - T_{on} = 303,75 \mu s$, а $k = 7/16 = 0,4375$.

На сите три осцилограми на каналот 1 е сигналот на напонот (осцилограм со жолта боја), а на каналот 2 е сигналот на струјата (осцилограм со зелена боја).

Во табелата 3 се дадени податоци за средните вредности на струјата, напонот и моќноста на роторот на моторот, како и податоци за струјата, напонот и моќноста на излезот на алтернаторот за трите случаи од сликата 12. Исто така во табелата се дадени податоци за бројот на вртежи на моторот и алтернаторот како и коифициентот на полезно дејство на системот мотор-алтернатор.

Табела 3 Податоци за струјата, напонот и моќноста на роторот на моторот, како и податоци за струјата, напонот и моќноста на излезот на алтернаторот

k	мотор				алтернатор				
	I_a (A)	V_a (V)	P_a (W)	P_{MOT} (B/M)	I_{ALT} (A)	V_{ALT} (V)	P_{ALT} (W)	P_{ALT} (B/M)	η (%)
1/16	2,22	21	46,75	360	12,45	1,6	19,92	546	42,60
5/16	5,11	54	276,25	900	15,7	11,6	182,12	1364	66,00
7/16	5,20	70,19	365	1260	15,8	15,3	241,74	1909	66,23

3 ЗАКЛУЧОК

Во трудот со компјутерски симулации е моделиран DC/DC конвертор за управување на еднонасочен мотор и се прикажани резултатите од експерименталното тестирање на прототипот на конверторот. Резултатите од експерименталното тестирање покажуваат дека прототипот на DC/DC конверторот со имплементираното управување ја регулира брзината, а со тоа и моќноста на еднонасочниот електромотор.

Направената хармониска анализа покажува дека хармониските изобличувања се поголеми при мал фактор на исполнетост и причинуваат факторот на моќност на конверторот да биде мал.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sharkawi El, M.A, *Fundamentals of Electric Drives*, 2000, Brooks Cole Publishers.
- [2] Shepherd W., Zhang Li, *Power Converter Circuits*, Marcel Dekker, 2004.
- [3] Powersim 8.0.5, simulation program, www.powersim.com.
- [4] Стефанов Г., Караџинов Љ., „Проектирање на мостен сериски резонантен конвертор со IGBT транзистори“, Летен симпозиум за електроника и процесирање на сигнали - ЛЕОС 2012, Маврово, 14-15 Септември 2012, Р.Македонија.
- [5] Stefanov G.G., Sarac V. J., Karadzinov Lj. V., “Analysis of Power Converter with Computer Simulation”, *Journal of International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies*, Volume 4, Part 2, pp. 30–47, Publisher Info Invest, Bulgaria, 2010.
- [6] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>