

UPRAVLJANJE INVERTORA PRIMJENOM REALNOG KLIZNOG REŽIMA

INVERTER CONTROL USING THE REAL SLIDING MODE

Lejla Ahmethodžić¹, Osman Mušić¹, Nijaz Hadžimejlić¹

Sažetak: U ovom radu opisano je rješenje upravljanja pretvarača istosmjerno-naizmjenično kod kojeg se za upravljanje ulaznog napona koristi zakon upravljanja zasnovan na primjeni kliznog režima. Pretvarač je puni most koji radi kao pretvarač za sniženje napona - Buck pretvarač. Struktura pretvarača omogućava s jedne strane da se u njemu ostvari klizni režim i s druge strane da se informacija o izvodu izlaznog napona dobije mjerenjem struje kondenzatora u ulaznom filtru. Uvođenje kliznog režima omogućava da se ostvare veoma dobre performanse pretvarača - brz odziv bez preskoka, mala osjetljivost na promjenu parametara pretvarača, potiskivanje uticaja promjena ulaznog napona na izlazni napon i mali uticaj promjene izlaznog opterećenja na izlazni napon.

Struktura regulatora je jednostavna, a njegova hardverska implementacija je lagana. U radu su opisani osnovni koraci u izboru elemenata regulatora i pretvarača. Eksperimentalni rezultati dobijeni na pretvaraču snage 300 W pokazuju dobro slaganje sa rezultatima simulacije i teoretskim predviđanjima.

Ključne riječi: Invertor, prekidno upravljanje, realni klizni režim.

Abstract: This paper describes a solution for handling the real sliding mode control of DC-AC converter. The converter used is a full bridge BUCK converter. The structure of this converter provides for the application of sliding mode control, but also for the information on the output voltage to be obtained by measuring the current of the output filter capacitor. Introduction of the sliding mode motion allows for very good performance of the controlled converter – fast response without overshoots, small sensitivity to changes of converter parameters, input voltage disturbance rejection and small influence of load on output voltage.

Controller structure is simple and its hardware implementation is easy. Basic steps in selecting the controller parameters are described in the paper. The proposed approach was tested on a 300 W inverter and the experiment results show good agreement with theoretical predictions and simulation results.

Keywords: Inverter, discontinuous control, real sliding modes.

UVOD

Uvođenjem kretanja u kliznom režimu mogu se postići visoke performanse upravljanog objekta čije su karakteristike [1], [2], [3]:

- brz odziv na promjenu zadane vrijednosti bez preskoka,
- mala osjetljivost na vanjske smetnje,
- mala osjetljivost na promjene parametara objekta,
- kretanje sistema nezavisno od upravljanja.

Sinteza sistema upravljanja primjenom kliznog režima se provodi u dva koraka. U prvom koraku se bira klizna površina koja obezbjeđuje željeno asimptotsko ponašanje upravljanog objekta. U drugom se koraku biraju parametri kliznog režima koji obezbjeđuju željenu dinamiku upravljanog pretvarača.

Rad prekidačkih pretvarača zasniva se na cikličkoj promjeni njihove strukture. Zbog ove njihove osobine uvođe-

nje kretanja u kliznom režimu je prirodan proces koji, uz jednostavnu strukturu regulatora, omogućava da se postignu kvalitete koji su pobrojani. U posljednjih dvadeset godina opisano je više rješenja upravljanja prekidačkih pretvarača primjenom kliznih režima [3], [4], [5]-[8]. Upravljanje invertora uvođenjem diskretnog kliznog režima opisano je u [7]. Rješenje upravljanja invertora sa povratnom spregom po izlaznoj struji primjenom kliznog režima i Parkove vektorske transformacije prezentirano je u [6]. U ovom radu će biti opisano rješenje upravljanja izlaznog napona invertora primjenom kontinualnog kliznog režima.

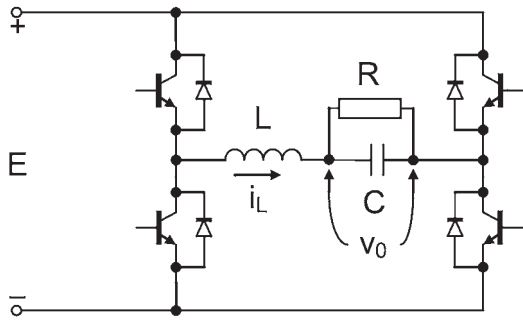
1. MATEMATSKI MODEL PRETVARAČA ISTOSMJERNO-NAIZMJENIČNO

Pretvarač istosmjerno - naizmjenično tipa Buck prikazan je na slici 1.

Matematski model pretvarača je dat jednačinama (1a) i (1b).

Kada su uključeni prekidači T1 i T4 vrijedi:

¹ Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina
lahmethodzic@etf.unsa.ba
Rad prihvaćen u martu 2012. godine.



Slika 1: Električna šema invertora

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= -\frac{v_o}{L} + \frac{E}{L} \\ \frac{dv_o}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC}\end{aligned}$$

Kada su uključeni prekidači T2 i T3 vrijedi:

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= -\frac{v_o}{L} - \frac{E}{L} \\ \frac{dv_o}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC}\end{aligned}$$

(1a)

(1b)

gdje je i_L struja zavojnice, a v_o napon kondenzatora - izlazni napon.

Promjenom stanja prekidača mijenja se model kojim je opisan pretvarač. Ako ovu promjenu predstavimo pogodnim vanjskim signalom, kretanje pretvarača može biti opisano jednačinama:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_o}{L} + \frac{E}{L}u$$

(2)

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC}$$

(3)

gdje je sa u označeno prekidno upravljanje:

$$u = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$$

Pretvarač je sistem promjenjive strukture, u njemu može nastati klizni režim [5]. Zbog toga je prirodno da se sinteza sistema upravljanja vrši u klasi dinamičkih sistema sa prekidnim upravljanjem.

Pretvarač je sistem drugog reda. Nakon diferenciranja jednačine (3) i uvrštenja jednačine (2) dobije se model oblika:

$$\frac{d^2 v_o}{dt^2} = -\frac{1}{RC} \frac{dv_o}{dt} - \frac{1}{C} \frac{v_o}{L} + \frac{1}{C} \frac{E}{L} u$$

(4)

2. SINTEZA SISTEMA UPRAVLJANJA PRETVARAČA

Formulisat ćemo zadatak sinteze sistema upravljanja na sljedeći način:

Treba sintetizirati sistem upravljanja primjenom kretanja u kliznom režimu tako da izlazni napon v_o prati zadanu vrijednost v_{OR} , tj. da važi:

$$v_o - v_{OR} = 0 \quad (5)$$

Da bismo riješili postavljeni zadatak zapišimo model (4) u koordinatama greške upravljanja, $x_1 = v_o - v_{OR}$ i njenog izvoda. Uvođenjem smjene: $x_1 = v_o - v_{OR}$ u jednačinu (4), dobije se model u obliku:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T_0} x_2 - \omega_0^2 x_1 -$$

$$-\left(\frac{1}{T_0} \frac{dv_{OR}}{dt} + \frac{d^2 v_{OR}}{dt^2} \omega^2 v_{OR} \right) + \omega_0^2 E u \quad (7)$$

$$\text{gdje je } T_0 = \frac{1}{RC} \text{ i } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

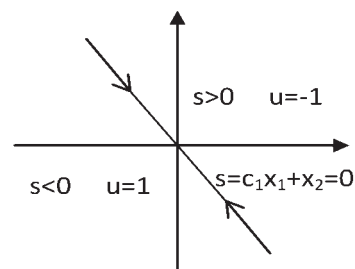
Kako je sistem (6), (7) drugog reda u kliznom režimu će se ostvariti odziv prvog reda [2], [5]. Takav se odziv u faznoj ravni može predstaviti pravcem (Slika 2) jednačine:

$$s = c_1 x_1 + x_2 = 0 \quad (8)$$

Navedeni pravac u faznom prostoru opisuje trajektoriju čije je stacionarno stanje $v_o = v_{OR}$, a u vremenskom domenu prelazni proces u kojem se greška eksponencijalno gasi sa vremenskom konstantom $\tau = 1/c_1$ [5].

Prekidno upravljanje se formira prema:

$$u = -\text{sgn}(s) \quad (9)$$



Slika 2: Klizna prava u faznoj ravni

Za odabrani zakon upravljanja treba odrediti: a) da li su cijeloj faznoj ravni zadovoljeni uslovi dostizanja prave klizanja, $s = 0^*$, i b) da li su ispunjeni uslovi egzistencije kliznog režima, tj. da li nakon padanja na pravu klizanja fazna tačka ostane na njoj.

Da bismo ustanovili da li su ispunjeni uslovi dostizanja prave klizanja posmatrajmo kretanje sistema (6), (7) iz početnog stanja $x_1 = x_{10}$, $x_2 = x_{20}$ i pretpostavimo prvo da je zadanu vrijednost izlaznog napona v_o konstantna, $v_{OR} = \text{const}$.

Kretanje sistema (6), (7) opisano je jednačinom:

$$\ddot{x}_1 + \frac{1}{T_0} \dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = -\omega_0^2 v_{oR} + Eu \quad (10)$$

Ako je početno stanje x_{10} , x_{20} u dijelu ravni ispod prave klizanja $s < 0$ upravljanje u , saglasno sa (9) ima vrijednost jednaku 1, $u = 1$, a ako je početno stanje iznad prave klizanja $u = -1$.

U prvom slučaju ravnotežno stanje sistema (10) je tačka na x_1 osi, $x_1 = E - v_{oR}$ i ona je zbog $E > v_{oR}$ u oblasti iznad prave klizanja, u kojoj je $s > 0$. U drugom slučaju pri $u = -1$ ravnotežno stanje ka kojem upravljanje vodi sistem je ispod prave klizanja, u oblasti gdje je $s < 0$.

Zakon upravljanja $u = -\text{sgn } s$ vodi faznu tačku ka pravoj klizanja iz svakog početnog položaja u faznoj ravni ukoliko je resurs upravljanja napon E veći od zadanog napona, $E > v_{oR}$, a to je uslov funkcionisanja pretvarača tipa Buck.

Razmotrimo sada slučaj kad je referentni napon promjenljiv $v_{oR} = v_{oR}(t)$; u našem slučaju v_{oR} je sinusoida. Kretanje sistema opisano je jednačinom:

$$\ddot{x}_1 + \frac{1}{T_0} \dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = - \left(\frac{1}{T_0} \frac{dv_{oR}}{dt} + \frac{d^2 v_{oR}}{dt^2} + \omega^2 v_{oR} \right) + Eu \quad (11)$$

Očito je da će i u ovom slučaju ravnotežna tačka prema kojoj upravljanje vodi sistem biti na suprotnoj strani prave klizanja ukoliko je resurs upravljanja veći od maksimalne vrijednosti izraza u zagradi, upravljanje uvijek vodi faznu tačku na pravu $s = 0$. Podsjetimo se da je uslov:

$$\left| \frac{1}{T_0} \frac{dv_{oR}}{dt} + \frac{d^2 v_{oR}}{dt^2} + \omega^2 v_{oR} \right|_{\max} < E \quad (12)$$

također uslov funkcionisanja Buck pretvarača u spoju invertora. Zaključujemo da su u pretvaraču sa slike 1 uvijek zadovoljeni uslovi padanja fazne tačke na pravu klizanja.

Pokazano je da su ispunjeni uslovi za padanje fazne tačke na kliznu pravu. Potrebno je još odrediti koje uslove treba zadovoljiti da bi bila obezbijedena egzistencija kliznog režima.

Klizni režim će postojati ako fazna tačka nakon padanja na pravu klizanja nastavi da se kreće po njoj - ne napušta je. Da bi se to desilo, fazne trajektorije treba da budu usmjerene ka kliznoj pravoj sa obje njene strane [5]. Analitički se ovo može izraziti zahtjevom da istovremeno bude zadovoljeno:

$$s > 0 \quad \dot{s} < 0 \quad (13)$$

$$s < 0 \quad \dot{s} > 0 \quad (14)$$

Diferenciranjem (8) dobije se (13) u obliku:

$$\begin{aligned} c_1 x_1 + x_2 &> 0 \\ \left(c_1 - \frac{1}{T_0} \right) x_2 - \omega_0^2 x_1 - \\ &- \left(\frac{1}{T_0} \frac{dv_{oR}}{dt} + \frac{d^2 v_{oR}}{dt^2} \omega^2 v_{oR} \right) - \omega_0^2 E < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

i analogno:

$$\begin{aligned} c_1 x_1 + x_2 &< 0 \\ \left(c_1 - \frac{1}{T_0} \right) x_2 - \omega_0^2 x_1 - \\ &- \left(\frac{1}{T_0} \frac{dv_{oR}}{dt} + \frac{d^2 v_{oR}}{dt^2} \omega^2 v_{oR} \right) + \omega_0^2 E > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

i konačno:

$$\begin{aligned} -E &< \left(c_1 - \frac{1}{T_0} \right) x_2 - \omega_0^2 x_1 - \\ &- \left(\frac{1}{T_0} \frac{dv_{oR}}{dt} + \frac{d^2 v_{oR}}{dt^2} \omega^2 v_{oR} \right) < E \end{aligned} \quad (17)$$

U oblasti u kojoj je zadovoljen gornji uslov znak izvoda funkcije $s(t)$ će biti određen upravljanjem; time će biti zadovoljen uslov za postojanje kliznog režima.

Relacija (17) će uvijek biti zadovoljena na segmentu prave klizanja oko koordinatnog početka kada resurs upravljanja ima dovoljno veliku vrijednost. Kada se Buck pretvarač koristi kao pretvarač istosmjerno - istosmjerno taj je uslov zadovoljen čim je $E > v_{oR}$, a zahtijevana dinamika upravljanog pretvarača određena konstantom c_1 određuje dužinu segmenta na pravoj klizanja na kojem postoji klizni režim. Što je zahtijevana dinamika bolja (veće c_1 - brže smirenje prelaznog procesa), to je za odabrani resurs upravljanja taj segment kraći. Kad se Buck pretvarač koristi kao invertor, što je slučaj kojeg razmatramo, brzina promjene zadanog signala postavlja dodatno ograničenje na dužinu segmenta na pravu na kojem postoji klizni režim. Što je brzina promjene zadanog signala veća, to je segment uži odnosno zahtijeva se veći resurs upravljanja E .

Izborom resursa upravljanja E uvijek se može obezbijediti egzistencija kliznog režima. U praksi se napon E najčešće bira tako da je za jednu trećinu veći od amplitude naizmjeničnog napona koji se generiše.

Blok dijagram upravljanog pretvarača i ekvivalentni blok dijagram pretvarača u kliznom režimu prikazani su na slici 3.

nja mijenja od $f_{\max}$ do $f_{\min}$ pri čemu je odnos ove dvije frekvencije:

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{E^2}{E^2 - v_{oR\max}^2} \quad (28)$$

Tipična promjena frekvencije prekidanja pri promjeni zadanog napona od $v_{oR\max}$ do nule je u omjeru 1:2.5 jer se resurs upravljanja E bira [3] tako da je zadovoljeno:

$$v_{oR\max} = 0,75E \quad (29)$$

3.1. Izbor parametara pretvarača i sistema upravljanja

Postupak izbora osnovnih parametara pri projektovanju pretvarača i sistema upravljanja vrši se kroz nekoliko koraka:

- Polazeći od zadane frekvencije sinusoidalnog napona koji će biti generisan, ω , treba izabrati minimalnu ω_0 i frekvenciju preključivanja $f_{\min}$ prema:

$$\omega_0 = (5 - 10)\omega$$

$$f = 5 \frac{\omega_0}{2\pi}$$

- Izabrati ripl struje zavojnice Δi_L ;
- Odrediti L prema:

$$L = \frac{E}{2\Delta i_L f_{\min}}$$

- Odabrati C prema:

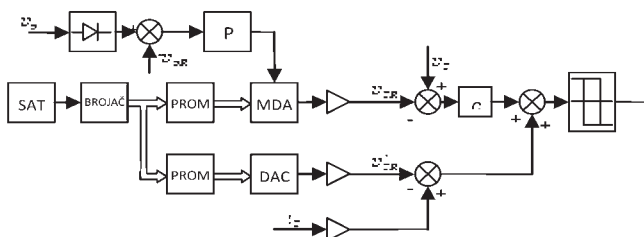
$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$

- Odabrati konstantu c_1 da se postignu željene dinamičke performanse.

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Sistem upravljanja koji je opisan testiran je na pretvaraču nazivne snage 300W sa galvanskom izolacijom preko transformatora sa prenosnim odnosom 1:2.5. U tabeli I su date zahtijevane (kolona 1) i ostvarene karakteristike pretvarača (kolona 2).

Na slici 5 prikazana je blok struktura realizovanog sistema upravljanja, sa standardnim oznakama blokova.

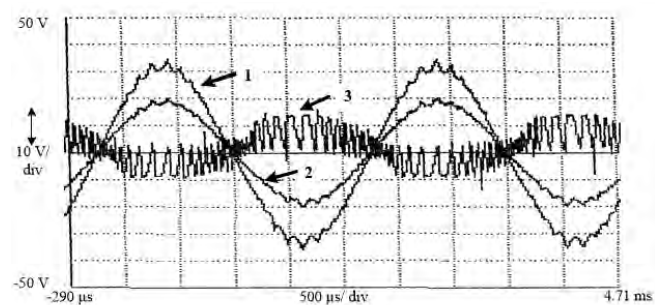


Slika 5: Blok struktura realizovanog sistema upravljanja

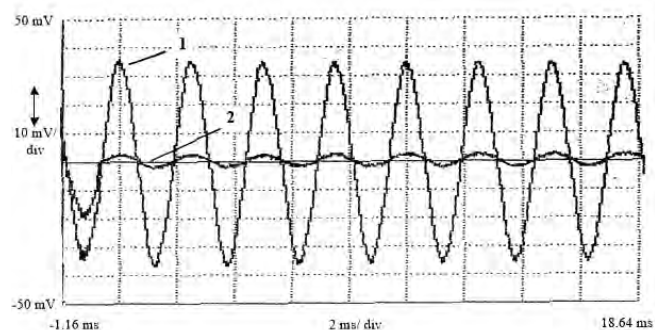
Tabela I: Tehničke karakteristike DC/AC pretvarača

	1	2
Ulazi napon	80V = ± 5%	80V = ± 5%
Izlazni napon	115Veff, 400Hz ± 2%	115Veff, 400Hz ± 2%
Izlazna snaga	300 VA	300 VA
Distorzija izlaznog napona	≤ 8%	4%
Regulacija tereta (10-100)%	≤ 1%	0.5%
Regulacija ulaznog napona (70-90)V	≤ 2%	0.5%
Odziv na skokovite promjene tereta (10-100)%		
Preskok	< 10%	5%
Vrijeme smirenja	< 10 ms	8 ms
Koeficijent korisnog dejstva	0.85	0.9

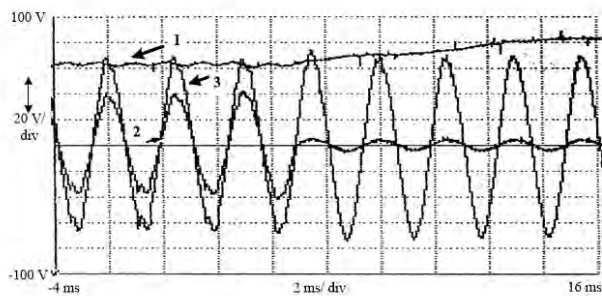
Na slikama 6, 7 i 8 su pokazani snimci sa osciloskopa mjereni na maketi snage 300 W.



Slika 6: Dijagrami izlaznog napona (1), izlazne struje (2), te funkcije preključivanja (3), pri nominalnom opterećenju pretvarača



Slika 7: Odziv pretvarača na skokovitu promjenu izlaznog opterećenja sa 100% na 10%, dijagram izlaznog napona (1) i dijagram izlazne struje (2)



Slika 8: Odziv sistema na skokovitu promjenu opterećenja i kontinualnu promjenu ulaznog napona, dijagram ulaznog napona (1), dijagram izlazne struje (2), te dijagram izlaznog napona (3)

5. ZAKLJUČAK

Prekidački pretvarači su objekti koji su inherentno pogodni za primjene zakona upravljanja uvođenjem kretanja u kliznom režimu. Rezultati dobiveni primjenom pristupa opisanog u ovom radu pokazuju da se uvođenjem kliznog režima mogu dobiti veoma dobre performanse upravljanog pretvarača uz veoma jednostavne hardversku izvedbu sistema upravljanja.

LITERATURA

- [1] A.Šabanović, F. Bilalović: Primjena kliznih režima u sistemima upravljanja električnih mašina, IV Savjetovanje Energetske elektronike, Sarajevo, 1981.
- [2] V.I. Utkin: Sliding Modes and their Applications in Variable Structure Systems, MIR Published, Moscow, 1978.
- [3] R. Venkateramanan, A. Šabanović, S. Čuk: Sliding Mode Control od DC-DC Converters, Proc. IECON 5, San Francisco, 1985.
- [4] F. Bilalović, O. Mušić, A. Šabanović: Buck Converter Regulator Operating in the Sliding Mode, PCI '83, Orlando, USA, 1983.
- [5] S. R. Sanders, G.C. Varghese, D.F. Cameron: Nonlinear Control Laws for Switching Power Converters, Proc. Of 25th Conference on Decision and Control, Athens, Greece, 1986.
- [6] M. Carpita, M. Marchesoni: Experimental study of a power conditioning system using sliding mode control, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 11 Issue 5, 1996.
- [7] L. K. Wong, F. H. F. Leung, P. K. S. Tam: Control of PWM Inverter using a Discrete-time Sliding Mode Controller, IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Hong Kong, July 1999.
- [8] A. B. Rey, Santiago de Pablo, J. M. Ruiz, J. A. Ravelo: A Novel Current Control Strategy for PWM Inverters using

the Sliding Mode Techniques, 7th IEEE International Power Electronics Congress, CIEP 2000. Acapulco, Mexico, 2000.

BIOGRAFIJA

Lejla Ahmethodžić je rođena 1984. godine u Visokom. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu 2008. godine na Odsjeku za automatiku i elektroniku. Dobila je nagradu Zlatna značka Univerziteta u Sarajevu kao najbolji student Elektrotehničkog fakulteta. Od 2005. godine je radila kao demonstrator na Elektrotehničkom fakultetu. Godine 2006. Učestvovala je u Turkish – German Summer Academy. Nakon diplomiranja se zapošljava kao asistent u stalnom random odnosu na istom fakultetu. U školskoj 2008/09. godini je u dopunskom radnom odnosu radila i na Mašinskom fakultetu u Sarajevu. Trenutno studira poslijediplomski magistarski studij na Odsjeku za Automatiku i elektroniku na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Koautor je 5 naučnih članaka na konferencijama.

Osman Mušić rođen je 1946. godine u Sarajevu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 1971. godine, magistrirao na Univerzitetu Hjustona, SAD, Departman za elektrotehniku, 1975. godine, a doktorirao na Univerzitetu u Sarajevu 1993. godine. Od 1971. do 1993. godine radio je na Institutu za automatiku i računarske nauke IRCA u Energoinvestu. Od 1985. do 1993. godine bio je šef Odjeljenja za Energetsku elektroniku i upravljanje elektromotornih pogona. Od 1993. radi na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu u zvanju docenta. Osnovne oblasti istraživanja kojim se bavi su prekidački pretvarači, upravljanje motora i upravljanje pretvarača primjenom teorije kliznih režima u sistemima sa promjenjivom strukturom. Autor je i koautor 35 članaka.

Nijaz Hadžimejlić je rođen 1954. godine u Visokom. Diplomirao je 1977. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Za odličan uspjeh na četvrtoj godini studija dobio je srebrnu značku "Hasan Brkić", a za odličan uspjeh tokom cijelog studija dobio je zlatnu značku "Hasan Brkić". Na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu odbranio je doktorsku disertaciju 1997. godine na temu Klizni režimi u sistemima upravljanja kretanja sa posebnim osvrtom na primjenu u električnom automobilu.

Od decembra 1977. do novembra 1998. godine u kontinuitetu je radio u Energoinvestu - Institut za automatiku i računarske nauke, u odjeljenju za energetske elektroniku i upravljanje elektromotornih pogona, na istraživanju i razvoju sistema i uređaja energetske elektronike. Od školske 1984/85. godine angažovan je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, u početku kao asistent, zatim kao viši asistent i kao docent u dopunskom radnom odnosu. Od 1998. godine radi na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu u stalnom radnom odnosu, u zvanju docenta, a od 2003. godine u zvanju vanrednog profesora na predmetima Elektronika i Energetska elektronika. Autor je ili koautor više od 50 naučnih i stručnih radova i studija i članaka u časopisima i na konferencijama.