Uspostavljanje stacionarnog stanja izlaznog napona kod operacionih pojačavača

RADOJLE M. RADETI, JP Elektromreža Srbije

Pogon prenosa Bor, Srbija

ZORAN LJ. MITROVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

DRAGAN V. PEJIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Stručni rad

UDC:621.375.4

DOI:10.5937/tehnika1506005R

Operacioni pojačavači (OP) predstavljaju nezaobilazan element u obradi analognih signala. U praksi je često potrebno da se utvrdi koliko je vremena potrebno da se izlazni napon OP približi stacionarnom stanju sa unapred zadatim maksimalnim odstupanjem. Postojeća literatura ovo pitanje samo dotiče i uglavnom daje neprecizne, nepotpune a ponegde i netačne odgovore. U ovom radu dati su rezultati detaljnog teorijskog istraživanja promene izlaznog napona OP nakon odskočne promene ulaznog napona

Ključne reči: operacioni pojačavač, smirivanje OP, maksimalna brzina promene izlaznog napona OP

1. UVOD

Operacioni pojačavači nalaze primenu u različitim sklopovima analognih elektronskih kola. Iako u velikom broju primena može da se smatra da su operacioni pojačavači idealne komponente, potrebno je poznavanje ponašanja pojačavača u slučajevima kada njihove karakteristike dovode do ponašanja koje odstupa od idealnog, kako bi se obezbedilo funkcionisanje projektovanog elektronskog kola prema zadatim specifikacijama.

Često se prevlači činjenica da je brzina odziva operacionog pojačavača na skokovite promene signala na ulazu konačna. Nakon skokovite promene ulaznog napona potrebno je određeno vreme da signal na izlazu operacionog pojačavača dostigne određenu vrednost napona. Vreme koje je potrebno da se izlazni napon nađe u unapred zadatim granicama oko stacionarnog stanja definiše se kao vreme smirivanja (eng. settling time). Postojeća literatura [1-8] ne tretira detaljno uspostavljanje stacionarnog stanja u kolima sa operacionim pojačavačima nakon skokovite promene na ulazu.

Kad se na ulaz operacionog pojačavača dovede

odskočni napon funkcija relativno niske amplitude, izlazni napon pojačavača menja se se eksponencijalno dok ne dostigne određenu vrednost. Ukoliko amplituda odskočnog napona na ulazu pređe određenu vrednost (U_{LS}) koja zavisi od tipa operacionog pojačavača, brzina promene izlaznog napona dostiže i maksimalnu vrednost (eng. slew rate). Zbog ograničene brzine odziva operacionog pojačavača doći će do razlike ulaznih napona i samim tim do uslova u kolu pod kojima ne možemo da smatramo da je operacioni pojačavač idealan. Izlazni napon će se menjati maksimalnom brzinom promene do trenutka kad povratna sprega ne dovede razliku ulaznih napona na vrednost U_{LS} , nakon čega će izlazni napon nastaviti da se menja eksponencijalno dok ne dostigne određenu vrednost.

U radu je data detaljna analiza ponašanja izlaza operacionog pojačavača nakon skokovite promene napona na ulazu kola uz matematičku analizu i primere.

2. POSTAVKA PROBLEMA

Za proizvoljan oblik ulaznog napona, analiza dinamike ponašanja OP mora se raditi u kompleksnom domenu primenom Laplasove transformacije.

Radi jednostavnosti posmatrajmo OP čija amplitudska karakteristika u otvorenoj sprezi ima jednu prelomnu frekvenciju (nakon koje je nagib amplitudske karakteristike -20 dB/dekadi). Za ovakav OP kompleksno ponašanje je dato izrazom

Adresa autora: Radojle Radeti, JP "Elektromreže Srbije", Pogon prenosa, Bor, Nade Dimića 40

Rad primljen: 14.08.2015.

Rad prihvaćen: 01.12.2015.

$$A_{OA}(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\check{S}_{P,OP}}}, \quad (1)$$

pri čemu je

$\check{S}_{P,OP}$ – prelomna kružna frekvencija (OP) i
 A_0 – pojačanje OP na niskim frekvencijama.

Prenosna funkcija pojačava sa povratnom spregom u kompleksnom obliku je:

$$A(s) = \frac{A_{OA}(s)}{1 + A_{OA}(s)S} \quad (2)$$

gde je

A_{OA} pojačanje OP bez povratne sprege

S – koeficijent povratne sprege

Ukoliko se na ulaz neinvertujućeg pojačava prikazanog na sl. 1. dovede signal koji se može predstaviti odskočnom funkcijom amplitude U_I čija je Laplasova transformacija data izrazom:

$$U_I(s) = \frac{U_I}{s} \quad (3)$$

Slika 1 – Neinvertujućeg pojačava napon na izlazu će biti:

$$U_O(s) = A(s)U_I(s) = \frac{A_{OA}(s)}{1 + A_{OA}(s)S} \frac{U_I}{s} \quad (4)$$

gde je

A_{OA} pojačanje OP bez povratne sprege

S – koeficijent povratne sprege

U_I ulazni napon

Kada se u izraz (4) uvrsti A_{OA} iz (1), posle sreivanja se dobija:

$$U_O(s) = \frac{A_0 \check{S}_{P,OP} U_I}{(1 + A_0 S) \check{S}_{P,OP} + s} \frac{1}{s} = \frac{a}{b + s} \frac{1}{s} \quad (5)$$

gde su

A_0 – pojačanje OP na niskim frekvencijama,

$\check{S}_{P,OP}$ – prelomna kružna frekvencija (OP),

U_I ulazni napon,

S – koeficijent povratne sprege,

a i b konstante date izrazima $a = A_0 \check{S}_{P,OP} U_I$ i

$$b = (1 + A_0 S) \check{S}_{P,OP}$$

Izlazni napon u vremenskom domenu dobija se inverznom Laplasovom transformacijom funkcije (5):

$$U_O(t) = \frac{a}{b} (1 - e^{-bt}) = \frac{A_0 \cdot U_I}{1 + A_0 S} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$U_O(t) = A \cdot U_I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

Jednčina (6) pokazuje da se u slučaju odskočnog napona na ulazu izlazni napon eksponencijalno menja uz vremensku konstantu τ :

$$\tau = \frac{1}{(1 + A_0 S) \check{S}_{P,OP}} \approx \frac{A}{2f A_0 f_{P,OP}} = 0,16 \frac{A}{GP}, \quad (7)$$

gde je $GP = A_0 f_{P,OP}$

A – pojačanje pojačava za $f = 0$

τ – vremenska konstanta

GP (gain bandwidth product – GBP, GB)

S – koeficijent povratne sprege

Pojačanje pojačava može da se kreće u opsegu od $A = 1$ do $A = A_0$.

Za pojačanje $A = 1$, vremenska konstanta je najmanja i data je izrazom:

$$\tau_1 = \frac{1}{A_0 \check{S}_{P,OP}} = \frac{1}{2f GP} \quad (8)$$

Kad je koeficijent povratne sprege $S = 0$, odnosno kad povratna sprega ne postoji, tj. OP radi u otvorenoj petlji kao komparator ($A = A_0$), njegova vremenska konstanta (τ_0) je:

$$\tau_0 = \frac{1}{\check{S}_{P,OP}} = \frac{1}{2f f_{P,OP}} = A_0 \tau_1 \quad (9)$$

Vremenske konstante τ_0 i τ_1 za tri karakteristi na OP su date u Tabeli 1.

Za bilo koje pojačanje OP A u opsegu od $A = 1$ do $A = A_0$, vremenska konstanta je:

$$\tau = \tau_1 A \quad (10)$$

Vremenska konstanta τ je proporcionalna pojačanju pojačava A . Što je veće pojačanje, vremenska konstanta je sve veća. Najveća vremenska konstanta, samim tim i najduže vreme koje je potrebno da OP dostigne odgovarajuću vrednost, je kod OP koji radi u otvorenoj petlji.

Tabela 1. Karakteristike tipa nihanja operacionih pojačava

	A_0	GP (MHz)	S (V/ μ s)	$U_{I,S}$ (mV)	τ_0 s	τ_1 μ s
OP07	500000	0,6	0,3	80	0,133	0,265
μ A741	200000	1	0,5	50	0,021	0,106
TL081	200000	3	13	650	0,011	0,053

Kod eksponencijalne promene izlaznog napona najveća brzina je neposredno nakon odskočne promene ulaznog napona, za $t = 0$, i ona iznosi:

$$\left. \frac{\partial U_o(t)}{\partial t} \right|_{t=0} = U_I \tau_1 \quad (11)$$

Iz (6) i Tabele 1 vidi se da brzina promene izlaznog napona ne zavisi od pojačanja pojačava, već samo od tipa primenjenog OP i amplitude odskočne funkcije ulaznog napona.

Prema podacima iz Tabele 1, za OP tipa 741 je $\tau_1 = 0,106 \mu$ s. Za skok ulaznog napona od $U_I = 1$ mV brzina promene izlaznog napona je:

$$\left. \frac{\partial U_o(t)}{\partial t} \right|_{t=0} = \frac{U_I}{\tau_1} = 0,094 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (12)$$

Maksimalna brzina promene izlaznog napona (*slew rate* – SR, ili samo S) je jedan od parametara OP, posebno značajan kad se na ulaz OP dovodi odskočni signal.

Slika 2 - Uticaj ograničene brzine promene izlaznog napona OP na rad integratora

Sa povećanjem amplitude ulaznog napona raste i brzina porasta izlaznog napona. Pri ulaznom naponu $U_{I,S}$ brzina promene dostiže svoju maksimalnu vrednost – *slew rate* (S).

$$\left. \frac{\partial U_o}{\partial t} \right|_{MAX} = S = \frac{U_{I,S}}{\tau_1} \quad (13)$$

gde je

$U_{I,S}$ – vrednost amplitude ulaznog napona pri kojoj dolazi do ograničavanja brzine promene izlaznog napona,

τ_1 – vremenska konstanta data izrazom (8)

U zavisnosti od vrste OP, maksimalna brzina promene izlaznog napona se kreće od oko 0,1 V/ μ s pa do više desetina pa i stotina V/ μ s.

Kod realnih OP brzina promene izlaznog napona pri snižavanju može da se razlikuje od brzine promene pri povećanju napona. Takođe, tokom povišavanja ili snižavanja napona, brzina ne mora biti jednaka u celom opsegu promene, već može da se menja tokom te promene. Slew rate je jedna od važnih karakteristika operacionih pojačava i proizvođači je daju u svojim katalogima.

Vrednost napona $U_{I,S}$ nakon koje je brzina promene izlaznog napona jednaka maksimalnoj brzini iznosi:

$$U_{I,S} = \tau_1 S \quad (14)$$

Za tri karakteristična OP veličine napona $U_{I,S}$ date su u Tabeli 1.

Pri nižim amplitudama ulaznog napona kola sa OP, manja je brzina promene izlaznog napona. Važi i obrnuto. Pri promenama izlaznog napona, na ulazu OP pojavljuje se dodatna komponenta napona. Njegova vrednost je:

$$U_{I,OP} \approx \frac{U_{I,S}}{S} \frac{\Delta U_o}{\Delta t} = \tau_1 \frac{\Delta U_o}{\Delta t} \quad (15)$$

Ograničavanje brzine promene izlaznog napona pojačava posebno je značajno kod integratora. Zbog ograničene brzine promene izlaznog napona, sa povećanjem frekvencije ulaznog napona – četvrtki – izlazni napon integratora sve više odstupa od očekivanog trogaonog oblika jer napon na “–” ulazu OP nije jednak nuli u kratkom vremenskom intervalu neposredno nakon promene vrednosti ulaznog napona (Sl. 2). Kada je dostignuta vrednost slew rate operacionog pojačava, brzina porasta napona na izlazu kola dalje ne može da se povećava ni pri naponima na ulazu OP većim od $U_{I,S}$.

Na osnovu prethodne analize može se izraziti unati vreme dostizanja stacionarnog stanja koje se naziva vreme smirivanja (*settling time*). Ovde se razlikuju dve situacije, kada je skok ulaznog napona mali i kada je skok ulaznog napona veliki.

Ako je skok napona na ulazu OP manji od $U_{I,S}$, izlazni napon dolazi u stacionarno stanje bez uticaja slew rate i tada se izlazni napon menja eksponencijalno. Kada se jednačina (6) reši po vremenu, za unapred zadato odstupanje (u_U) dobija se:

$$t = \tau_1 \ln \frac{1}{u_U} = A \tau_1 \ln \frac{1}{u_U}, \text{ (za } U_I < U_{I,S}) \quad (16)$$

gde je u_U relativno odstupanje izlaznog napona od konačne, očekivane vrednosti, dato izrazom:

$$u_U = \frac{U_o(t) - AU_I}{AU_I} \quad (17)$$

Izraz (17) pokazuje da vreme dostizanja stacionarnog stanja zavisi od pojačanja A . Što je pojačanje veće, to je i ovo vreme duže.

Za pojačanje sa OP tipa OP07, pojačanjem $A = 10$ i amplitudom ulaznog napona $U_I = 50$ mV, vreme potrebno da izlazni napon U_o dostigne vrednost koja je u granicama $0,9999U_k \leq U_o \leq 1.0001U_k$ (U_k je konačna vrednost napona, $u_U = 0,0001$, odnosno 0,01 %) je:

$$t = A\tau_1 \ln \frac{1}{u_U} \approx 24,4 \mu s$$

Kada je skok napona na ulazu OP veći od $U_{I,S}$, izlazni napon se menja brzinom ograničenom sa *slew rate*, dok povratna sprega ne smanji ulazni napon OP ispod $U_{I,S}$. Posle toga izlazni napon nastavlja da se menja eksponencijalno, kao u prethodnom slučaju, što je prikazano dijagramom na sl. 3.

Slika 3 - Porast izlaznog napona OP kada je

Brzina promene izlaznog napona neposredno nakon skoka ulaznog napona ograničena je maksimalnom brzinom (slew-rate) do nivoa U_S :

$$U_S = A(U_I - U_{I,S}) = St_s \quad (18)$$

U trenutku:

$$t_s = \frac{A(U_I - U_{I,S})}{S} \quad (19)$$

povratna sprega će smanjiti napon na ulazu OP na vrednost $U_{I,S}$. Nakon tog trenutka ($t > t_s$) napon će se menjati eksponencijalno:

$$U_o(t) = U_S + AU_{I,S} \left(1 - e^{-\frac{t-t_s}{\tau_1}} \right), \text{ za } t > t_s. \quad (20)$$

Vreme koje je potrebno da signal na izlazu operacionog pojačava dostigne stacionarno stanje (eng. settling time) ima dve komponente: vreme linearnog rasta maksimalnom brzinom (slew rate) dok se ulazni napon OP ne smanji ispod $U_{I,S}$ i vreme tokom koga izlazni napon nastavlja da se menja po eksponencijalnoj funkciji, pa je iz (19) i (20):

$$t = t_s + A\tau_1 \ln \frac{U_I}{U_{I,S}} \quad (21)$$

U literaturi se često navodi samo izraz za potrebno vreme dostizanja stacionarnog stanja koji važi za male skokove ulaznog napona.

2.1. Primer

Posmatrajmo pojačanje sa OP tipa OP07, $A = 10$, $u_U = 0,0001$ (0,01 %) i $U_I = 1$ V. Prema (21) vreme potrebno za dostizanje stacionarnog stanja je:

$$t = 31 \mu s + 18 \mu s = 49 \mu s$$

Ako bi se koristio samo izraz za male skokove ulaznog napona, tj. samo za eksponencijalnu promenu izlaznog napona, dobilo bi se 24,4 μs . Razlika je očigledna.

Da izlazni napon dostigne vrednost koja je relativno udaljena od konačne vrednosti $u_U = 0,00001$ (10 ppm), potrebno je oko $t = 58 \mu s$. Primer pokazuje da se i kod relativno sporog OP kao što je OP07, sa pojačanjima reda veličine $A = 10$, stacionarno stanje u potpunosti uspostavlja za vreme ispod 100 μs .

Slika 4 - Promena napona za ~A741 za pojačanja $A=1$ i $A=4$ pri pobudi odskočnom funkcijom velike amplitude

Na slici 4 prikazan je rast izlaznog napona invertujućeg pojačavača sa OP tipa $\mu A741$ za dva nivoa

poja anja ($A = 1$ i 4). Ulazni napon ima skok od 100 mV .

3. MAKSIMALNA BRZINA PROMENE NAPONA NA IZLAZU KOD OPERACIONOG POJA AVA A

Kada se na ulaz poja a sa OP dovede pravougaoni signal velike amplitude, zbog ograni ene brzine promene izlaznog napona OP usled *slew rate*, izlazni napon e imati približno trapezoidni talasni oblik, odnosno trougaoni oblik kod viših frekvencija. Oblik izlaznog signala za OP07 pri pobudi pravougaonim naponom koji se menja od -10 do $+10 \text{ V}$ prikazan je na slici 5.

Slika 5 - Izlazni napon poja a sa OP07 kad je na ulazu pravougaoni signal velike amplitude

Frekvencija pri kojoj izlazni signal prelazi iz trapezoidnog u trougaoni oblik je:

$$f = \frac{S}{4U_o} = 0,25 \frac{S}{U_o} \quad (22)$$

Ukoliko je ulazni napon trougaoni velike amplitude, izlazni napon e biti tako e trougaoni. Kad, prema izrazu (22), frekvencija ulaznog signala postane dovoljno visoka da se dostigne maksimalna brzina promene izlaznog napona (*slew rate*), amplituda izlaznog napona e po eti da se smanjuje.

Ograni ena brzina promene izlaznog napona OP odrazi e se i na izlazni napon poja a kad je ulazni napon sinusoidalan. Posmatrajmo napon:

$$u_o = U_{om} \sin \tilde{S}t \quad (23)$$

Brzina promene ovog napona je:

$$\frac{du_o}{dt} = \tilde{S}U_{om} \cos \tilde{S}t \quad (24)$$

Maksimalna brzina promene izlaznog napona promene ograni ena je *slew rate* - om (S):

$$S = \tilde{S}U_{om} = 2f \cdot f_{s1} \cdot U_{om} \quad (25)$$

Frekvencija (f_{s1}) na kojoj postaje primetan uticaj *slew rate* je:

$$f_{s1} = \frac{S}{2 \cdot f \cdot U_{om}} = 0,16 \frac{S}{U_{om}} \quad (26)$$

Amplituda izlaznog napona bi e tada:

$$U_{om} = \frac{S}{2 \cdot f \cdot f_{s1}} = 0,16 \frac{S}{f_{s1}} \quad (27)$$

3.1. Primer

Poja a sa OP07 kod koga je $S=0,3 \text{ V}/\mu\text{s}$ može da generiše na izlazu sinusoidalni napon amplitude 10 V do frekvencije:

$$f_{s1} = 0,16 \frac{S}{U_{om}} = 4,8 \text{ kHz}$$

Pove anjem frekvencije ili amplitude iznad ovih vrednosti, oblik izlaznog napona OP sve više odstupa od sinusoidalnog. Za frekvencije koje su malo više od grani ne f_{s1} oblik izlaznog napona prikazan je grafikom (c) na sl. 6.

Daljim pove anjem frekvencije ili amplitude, u jednom trenutku izlazni napon dobija trougaoni oblik (dijagram (d) na sl. 6.). U grani nom slu aju je prvi izvod sinusoidalne funkcije jednak maksimalnoj brzini odziva - *slew rate*, tj:

$$S = \tilde{S}U_{om} \cos \tilde{S}t$$

Frekvencija pri kojoj oblik izlaznog napona prelazi u trougaoni (f_{s2}) je:

$$f_{s2} = \frac{\sqrt{f^2 + 4}}{4f} \frac{S}{U_{om}} = 0,3 \frac{S}{U_{om}} \quad (28)$$

3.2. Primer

Za poja a sa OP tipa OP07 za amplitudu sinusoidalnog ulaznog napona od 10 V izlazni napon e po eti da biva trougaonog oblika na frekvenciji:

$$f_{s2} = 0,3 \frac{S}{U_{om}} = 9 \text{ kHz}$$

Na slici 6. prikazani su oblici izlaznih napona pri istoj amplitudi ulaznog napona, za nekoliko frekvencija. Na dijagramu (a) frekvencija je najniža ($f < f_{s1}$) i nema promene oblika izlaznog napona zbog uticaja *slew rate*, oblik izlaznog napona je sinusoidalan.

Na dijagramu (b) prikazan je grani ni slu aj, frekvencija je $f = f_{s1}$. Dijagram (c) prikazuje izlazni napon kad je frekvencija ulaznog signala $f_{s1} > f > f_{s2}$, dok dijagram (d) prikazuje grani ni slu aj kada oblik izlaznog napona prelazi u trougaoni ($f = f_{s2}$). Na frekvencijama iznad grani ne frekvencije f_{s2} oblik izlaznog napona je i dalje trougaoni i njegova amplituda se smanjuje sa porastom frekvencije.

Slika 6 – Promena napona za $\mu A741$ za pojačanje $A=1$ i $A=4$ pri pobudi odsko nom funkcijom velike amplitude

Izvedene relacije (22) do (27) važe i za rad OP bez povratne sprege ($\beta = 0$), kada se on koristi kao komparator.

Brzina kojom izlazni napon raste ili opada zavisi od brzine promene napona na ulazu kao, i od amplitude ulaznog napona. I u režimu rada operacionog pojačavača bez povratne sprege važi izraz:

$$\left. \frac{\partial U_o(t)}{\partial t} \right|_{t=0} = \frac{U_i}{\tau_1} \quad (29)$$

3.3. Primer

Ukoliko se na ulaz komparatora u kome se koristi OP tipa 741 bez povratne sprege dovede ulazni napon koji je predstavljen odsko nom funkcijom amplitude $U_i=2$ mV, brzina promene izlaznog napona biće:

$$\frac{\Delta U_o}{\Delta t} = \frac{U_i}{\tau_1} \approx 0,019 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Izrađena vrednost brzine promene izlaznog napona znatno je niža od maksimalne brzine promene izlaznog napona (slew rate) koja za ovaj OP iznosi oko $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$. Ako se skok ulaznog napona poveća, izlazni napon se brže menja, sve dok se ne dostigne maksimalna vrednost brzine promene – *slew rate*.

Slika 7 - Promene izlaznog napona za OP tipa $\mu A741$: a) za pozitivni odsko ni impuls; b) za negativni odsko ni impuls

Na slici 7 prikazani su izlazni naponi za prednju (sl. 7a) i zadnju (sl. 7b) ivicu ulaznog napona koji je predstavljen etvrtkom za komparator sa OP tipa $\mu A741$ bez povratne sprege. U oba slučaja data su po tri superponirana grafika za amplitude ulaznog napona: 2 mV, 5 mV i 10 mV. Sa dijagrama na sl. 7 se vidi da su vreme kašnjenja po etku promene izlaznog signala nakon promene ulaznog signala i vreme potrebno za uspostavljanje stacionarnog stanja na izlazu OP duža za niže amplitude ulaznog signala. Sa povećanjem amplitude ulaznog napona povećava se i brzina promene izlaznog napona, skraćuje se kašnjenje po etku promene izlaznog napona nakon promene ulaznog

napona, sve dok se ne dostigne vrednost *slew rate*. Dalje povećanje amplitude ulaznog signala neće uticati na brzinu uspostavljanja stacionarnog stanja na izlazu operacionog pojačavača.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza uspostavljanja stacionarnog stanja OP i na osnovu nje su izvedeni izrazi za vreme dostizanja napona na izlazu pojačavača sa unapred zadatim odstupanjem od konačne vrednosti. Pri tome je razmatran talasni oblik izlaznog napona pojačavača za različite amplitude ulaznog odskočnog signala i utvrđene su razlike u prenosnoj karakteristici, kao i granična vrednost amplitude ulaznog napona pri kojoj dolazi do promene oblika izlaznog napona. Analiza je obuhvatila i maksimalnu brzinu promene izlaznog napona (*slew rate*) kao i ponašanje realnih OP u komparatorskom radu.

LITERATURA

[1] Dragan Pantić, Linearna integrisana kola. Tehnička knjiga, Zagreb, 1974.

[2] Tomislav Brodić, Analogna integrisana kola, Svijetlost, Sarajevo, 1986.

[3] Linear and Conversion Product, 1986/1987, PMI, Santa Clara, USA, Data Book.

[4] Ron Mancini, OP Amps for Everyone, Texas Instruments, Dallas, Texas, 2002.

[5] Walt Jung, OP Amp Application Handbook, Analog Devices, Elsevier, Burlington, USA, 2005. ISBN 0-7506-7844-5

[6] Hank Zumbahlen, Linear Circuit Design Handbook, Analog Devices, Elsevier, Burlington, USA, 2008. ISBN 978-0-7506-8703-4

[7] Radojle Radeti, Operacioni pojačavači sa zbirkom šema, Infoelektronika, Miroslav Kops centar, Niš 2015.

[8] Robert I. Demrow, Settling Time of Operational Amplifiers, Analog Dialogue Vol.4, No.1, Analog Devices, Cambridge, MA USA 1970.

SUMMARY

THE ESTABLISHMENT OF OPERATIONAL AMPLIFIERS OUTPUT STEADY STATE VOLTAGE

Operational amplifiers (OA) present indispensable elements in analog signal processing. In practice it is often important to determine how much time an OP's output voltage takes to get close to a steady state within predetermined boundaries. The existing literature just touches this question and generally gives undefined, incomplete and somewhere inaccurate answers. In this paper, results of detailed theoretical investigation of a transition process in the OP after an input voltage Heaviside step change are given.

Key words: operational amplifiers, settling time, slew rate