

TEHNIČKO REŠENJE

Metoda za određivanje površina obuhvaćenih uštinutom histerezisnom petljom memristora na sinusnu pobudu

M-85: Prototip, nova metoda, softver, standardizovan ili atestiran instrument, nova genetska proba, mikroorganizmi

Autori:

dr Anamarija Juhas, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

dr Staniša Dautović, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Godina:

2018.

Podtip tehničkog rešenja:

Nova metoda - M85

Korisnik:

Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, za potrebe daljih istraživanja

Projekat u okviru koga je realizovano tehničko rešenje:

Broj projekta: TR 32016 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

Program istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2011-2018.

Tehnološka oblast: Elektronika, telekomunikacije i informacione tehnologije

Naziv projekta: Inovativne elektronske komponente i sistemi bazirani na neorganskim i organskim tehnologijama ugrađeni u robe i proizvode široke potrošnje

Rukovodilac projekta: dr Ljiljana Živanov, redovni profesor

Kako su rezultati verifikovani (od strane kog tela):

Verifikacija tehničkog rešenja je izvršena od strane:

Naučno-nastavnog veća Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Lista prethodnih tehničkih rešenja autora

A. Juhas, M. Milutinov, D. Herceg, M. Prša, N. Pekarić-Nadž, "Uređaj za generisanje homogenog magnetskog polja kontrolisanog intenziteta za potrebe biomagnetskih eksperimenata", 1. 12. 2010. M85, Projekat 18043, period 2008-2010.

<http://deet.ftn.uns.ac.rs/index.php/publikacije/tehnicka-re%C5%A1enja-lista>

A. Juhas, M. Milutinov, N. Pekarić-Nadž, "Primena Monte Karlo metode za procenu merne nesigurnosti proračuna električnog i magnetskog polja nadzemnih i podzemnih vodova", prihvaćeno na NN Veću FTN 26.12.2012. M85, Projekat TR 32016.

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, M. Milutinov, N. Burány, N. Pekarić-Nadž, "Uređaj za generisanje homogenog niskofrekventnog električnog polja za periodične provere ispravnosti sonde za merenje električnog polja", prihvaćeno na NN Veću FTN 30.05.2016. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, S. Dautović, L. A. Novak, "Metoda za modelovanje signala pojačavača snage bazirana na nenegativnim trigonometrijskim polinomima drugog stepena", prihvaćeno na NN Veću FTN 06.07.2016. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, S. Dautović, L. A. Novak, "Algoritam za određivanje graničnih linija impedansi za rezistivno-reaktivnu klasu-B/J pojačavača snage", prihvaćeno na NN Veću FTN 30.11.2016. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, S. Dautović, L. A. Novak, "Metoda za modelovanje signala struje u funkciji ugla provođenja sa primenom u analizi klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage", prihvaćeno na NN Veću FTN 26.04.2017. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, S. Medić, T. Grbić, M. Milutinov, S. Dautović, "Metoda za modelovanje histerezisne petlje bazirana na sigmoidalnim funkcijama", prihvaćeno na NN Veću FTN 28.06.2017. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, S. Dautović, "Metoda za modelovanje ponašanja idealnog memristora", prihvaćeno na NN Veću FTN 12.07.2017. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

A. Juhas, S. Dautović, L. A. Novak, "Metoda za određivanje maksimalne efikasnosti klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage sa konačnim brojem harmonika", prihvaćeno na NN Veću FTN 27.12.2017. M85, Projekat 32016

<http://www.ftn.uns.ac.rs/n1922811611/tehnicka-resenja-m-85>

1. Opis problema koji se rešava tehničkim rešenjem

Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi

Teorija signala i sistema, teorija električnih kola, idealan memristor, idealan generički memristor, uštinuta histerezijsna petlja

Problem koji se tehničkim rešenjem rešava

Strujno naponska karakteristika memristora priključenog na sinusnu pobudu ima oblik histerezijsne petlje koja je uštinuta u koordinatnom početku. Površina lista histerezijsne petlje je do sada računata ili iz strujno-naponske karakteristike za sve tipove memristora ili iz konstitutivne relacije u fluks-naelektrisanje ravni u slučaju idealnog pasivnog memristora.

U ovom tehničkom rešenju je predstavljena metoda za određivanje površine lista histerezijsne petlje idealnih i idealnih generičkih memristora na osnovu promenljive stanja, u slučaju sinusne pobude. Metoda omogućava određivanje površine za pasivne, aktivne ili lokalno aktivne memristore. Date su i dve interpretacije površine lista histerezijsne petlje: jedna interpretacija je povezana sa parnošću (neparnošću) memristansa u zavisnosti od početnog uslova i amplitude pobude, dok druga predstavlja geometrijsku interpretaciju.

Primenljivost prikazane metode je demonstrirana na više primera koji su od interesa u praksi.

2. Stanje rešenosti tog problema u svetu

U teoriji električnih kola, memristor kao četvrti osnovni jednopristupni element je definisao L. Chua u [1]. Uspešna realizacija pasivnog memristora nano-dimenzija u HP laboratorijama [2] privukla je veliku pažnju naučne zajednice i industrije, s obzirom na veoma atraktivne osobine realizovanog memristora kao što su male dimenzije, mala potrošnja, kao i mogućnost višebitnog zapisa.

Idealan naelektrisanjem-kontrolisan memristor se može opisati konstitutivnom relacijom u obliku $\varphi = \hat{\varphi}(q)$, gde q označava naelektrisanje, a φ fluks [3]. Ekvivalentno, ovaj memristor se može opisati kao strujom-kontrolisan idealan memristor [3] preko relacija

$$v = M(q)i, \quad \frac{dq}{dt} = i, \quad (1)$$

gde naelektrisanje predstavlja promenljivu stanja i

$$M(q) = \frac{d\varphi}{dq}, \quad (2)$$

je memristansa. Dualno, idealan fluksom-kontrolisan memristor se može opisati konstitutivnom relacijom u obliku $q = \hat{q}(\varphi)$, ili kao naponom-kontrolisan idealan memristor [3] preko relacija

$$i = W(\varphi)v, \quad \frac{d\varphi}{dt} = v, \quad (3)$$

u kom slučaju fluks predstavlja promenljivu stanja i

$$W(\varphi) = \frac{dq}{d\varphi}, \quad (4)$$

je memduktansa.

Ako je memristor priključen na periodičnu pobudu čija je vremenski konstantna komponenta jednaka nuli, tada strujno-naponska karakteristika ima oblik uštinite histerezijsne petlje (eng. pinched hysteresis loop). Primer uštinite histerezijsne petlje prikazan je na slici 1. Osobine uštinite histerezijsne petlje memristora i drugih mem-elemenata su predmet intenzivnih istraživanja, npr. [4]-[18]. U slučaju idealnog memristora, ova petlja seče samu sebe i neparno je simetrična u odnosu na koordinatni početak [5].

Kada se memristor priključi na periodičnu pobudu, čija je vremenski konstantna komponenta jednaka nuli, histerezijsna petlja ima dva lista (eng. lobe): jedan se formira tokom prve poluperiode, dok se drugi

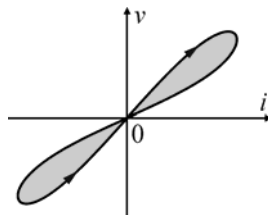
javlja tokom druge poluperiode. Za idealne memristore, ukupna površina uštinute histerezisne petlje jednaka je nuli, tj. vrednosti površina listova su jednake po apsolutnoj vrednosti, ali su suprotnog znaka. Za strujom-kontrolisan idealan memristor, priključen na periodičnu pobudu čija je vremenski konstantna komponenta jednaka nuli, površina lista koji odgovara prvoj poluperiodi $0 \leq t \leq T/2$ može se odrediti kao

$$S_{i-\text{contr}} = \int_0^{T/2} v(t) \frac{di(t)}{dt} dt. \quad (5)$$

Dualno, za naponom-kontrolisan memristor, površina lista se može izračunati kao

$$S_{v-\text{contr}} = \int_0^{T/2} i(t) \frac{dv(t)}{dt} dt. \quad (6)$$

Određivanje površine lista na osnovu izraza (5)-(6) je detaljno opisano i analizirano u radovima [6] i [11].



Slika 1. Primer uštinute histerezisne petlje idealnog memristora.

U radu [8], za određivanje površine lista uštinute histerezisne petlje strujom-kontrolisanog idealnog memristora priključenog na sinusnu pobudu predložen je izraz

$$S_{i-\text{contr}} = -\frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{dM(q)}{dq} i^3(t) dt, \quad (7)$$

u kojem se integracija vrši po vremenu kao i u izrazu (5). U radu [6] je predloženo određivanje površine lista histerezisne petlje idealnog memristora priključenog na sinusnu struju bazirano na sledećoj relaciji:

$$S_{i-\text{contr}} = \omega^2 \int_0^{\varphi^*(2Q)} (Q - q^*) d\varphi^* = \omega^2 Q \varphi^*(2Q) - \omega^2 \hat{A}(\varphi^*(2Q)), \quad (8)$$

gde $\hat{A}(\varphi^*) = \int_0^{\varphi^*} \hat{q}(\varphi) d\varphi$ označava koakciju [1], $q^* = \hat{q}(\varphi) - q_0$, $\varphi^* = \varphi - \varphi_0$, i $2Q = \int_0^{T/2} i(\tau) d\tau$. Integracija u izrazu (8) se vrši po fluksu, iako je naelektrisanje promenljiva stanja za strujom-kontrolisan memristor. Takođe je pretpostavljeno da konstitutivna relacija $\varphi = \hat{\varphi}(q)$ ima inverznu funkciju $q = \hat{q}(\varphi)$, što je ekvivalentno pretpostavci da je konstitutivna relacija monotona.

Metoda prikazana u ovom tehničkom rešenju ne zahteva da konstitutivna relacija bude monotona, čime je obuhvaćeno i određivanje površine lista histerezisne petlje u slučajevima kada je memristor lokalno aktivan (definicija kada je memristor lokalno aktivan je data u [19]). Osim toga, prikazana metoda omogućava određivanje površine lista histerezisne petlje i za idealne generičke memristore.

U ovom tehničkom rešenju u odeljcima 3.1 i 3.2 su korišćeni neki od rezultata koji su prikazani u našem radu "Computation of pinched hysteresis loop area from memristance-vs-state map" [20] koji se u trenutku pisanja tehničkog rešenja nalazi na recenziji.

3. Detaljan opis tehničkog rešenja (uključujući i prateće ilustracije i tehničke crteže)

U ovom odeljku opisan je postupak određivanja površine lista histerezisne petlje za strujom kontrolisane idealne i idealne generičke memristore. Za naponom kontrolisane memristore, postupak je dualan: dobija se jednostavnom zamenom odgovarajućih električnih veličina. U okviru tehničkog rešenja prikazani su i primeri određivanja površine lista uštinute histerezisne petlje za modele memristora koji se koriste u literaturi, kao što su linearan i nelinearan model HP memristora [2], model čija je memristansa polinomijalna funkcija naelektrisanja (koristi se u analizi električnih kola sa memristorima [21]) ili modela čija je memristansa deo po deo konstantna, koji se koristi u analizi rada RRAM-a sa memristorima [22]. U okviru primera određene su i površine histerezisne petlje u slučaju lokalno aktivnih memristora.

3.1. Površina lista histerezijske petlje memristora na sinusnu pobudu

U ovom odeljku opisano je određivanje površine lista u slučaju sinusne pobude za idealan i idealan generički memristor. Takođe je izvedena veza između postupka prikazanog u ovom tehničkom rešenju i postupka za određivanje površine iz konstitutivne relacije.

3.1.1. Idealan memristor priključen na sinusnu pobudu

Na osnovu izraza (5) i (1), površina lista histerezijske petlje za strujom-kontrolisan idealan memristor može se odrediti kao

$$S_{i-\text{contr}} = \int_0^{T/2} M(q) \frac{di(t)}{dt} i(t) dt. \quad (9)$$

Za sinusnu struju $i(t) = I_m \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi/T$, odgovarajuće naelektrisanje je jednako

$$q = q_0 + (1 - \cos(\omega t)) \frac{I_m}{\omega}, \quad (10)$$

gde q_0 označava početnu vrednost u trenutku $t = 0$. Naelektrisanje dostiže maksimalnu vrednost u $t = T/2$,

$$q_{T/2} = q_0 + \frac{2I_m}{\omega}. \quad (11)$$

Na osnovu (10)-(11), $di(t)/dt = \omega I_m \cos(\omega t)$ se može napisati kao [20]

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{2} \omega^2 (q_{T/2} + q_0 - 2q). \quad (12)$$

Uvrštavanje $i(t)dt = dq$ i (12) u (9) vodi ka [20]

$$S_{i-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_{q_0}^{q_{T/2}} (q_{T/2} + q_0 - 2q) M(q) dq. \quad (13)$$

Izraz (13) pokazuje da se površina lista može opisati u terminima naelektrisanja, koje ima ulogu promenljive stanja za strujom-kontrolisan memristor.

Primititi da $\int_{q_0}^{q_{T/2}} (q_{T/2} + q_0 - 2q) dq = 0$ implicira da konstantan član memristanse $M(q)$ ne doprinosi površini lista histerezijske petlje. Osim toga, iz (10)-(11) sledi

$$q_{T/4} = \frac{1}{2} (q_0 + q_{T/2}), \quad (14)$$

te se (13) može iskazati i u obliku

$$S_{i-\text{contr}} = \omega^2 \int_{q_0}^{q_{T/2}} (q_{T/4} - q) M(q) dq. \quad (15)$$

Odgovarajući izraz za određivanje površine lista histerezijske petlje naponom-kontrolisanog idealnog memristora priključenog na $v(t) = V_m \sin(\omega t)$, može se izvesti korišćenjem dualnih argumenata [20]:

$$S_{v-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_{\varphi_0}^{\varphi_{T/2}} (\varphi_{T/2} + \varphi_0 - 2\varphi) W(\varphi) d\varphi, \quad (16)$$

gde φ_0 označava početnu vrednost fluksa u $t = 0$, $\varphi = \varphi_0 + [1 - \cos(\omega t)] V_m / \omega$, $\varphi_{T/2} = \varphi_0 + 2V_m / \omega$ i $W(\varphi)$ je memduktansa.

Veza sa određivanjem površine iz konstitutivne relacije

Određivanje površine lista histerezijske petlje iz konstitutivne relacije, kako je predloženo u radu [6], pretpostavlja da je konstitutivna relacija monotona i da se osim u obliku $\varphi = \hat{\varphi}(q)$, može napisati i u obliku $q = \hat{q}(\varphi)$. U tom smislu, kada je konstitutivna relacija monotona, iz izraza (13) moguće je dobiti izraz (27) izveden u radu [6].

Pretpostavimo da je konstitutivna relacija memristora monotona. Tada se za strujom kontrolisan memristor, $q = \hat{q}(\varphi)$ može koristiti kao smena u integralu (13). U tom slučaju, $d\varphi = M(q) dq$ i (13) vode ka

$$S_{i-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 (q_{T/2} + q_0) \int_{\varphi_0}^{\varphi_{T/2}} d\varphi - \omega^2 \int_{\varphi_0}^{\varphi_{T/2}} q d\varphi, \quad (17)$$

gde su $\varphi_{T/2} = \varphi(q_{T/2})$ i $\varphi_0 = \varphi(q_0)$. Korišćenjem definicije koakcije $\hat{A}(\varphi) = \int_0^\varphi q(\varphi) d\varphi$ [1], [6] dobija se

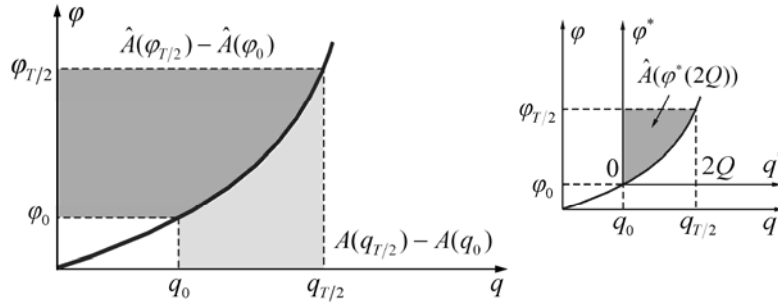
$$S_{i-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 (q_{T/2} + q_0)(\varphi_{T/2} - \varphi_0) - \omega^2 (\hat{A}(\varphi_{T/2}) - \hat{A}(\varphi_0)). \quad (18)$$

Primenom translacije (slika 2): $q_{T/2} - q_0 = 2Q$, $\varphi_{T/2} - \varphi_0 = \varphi^*(2Q)$, i $\hat{A}(\varphi_{T/2}) - \hat{A}(\varphi_0) - q_0(\varphi_{T/2} - \varphi_0) = \hat{A}(\varphi^*(2Q))$, izraz (18) se može konvertovati u izraz (27) izveden u radu [6].

Dualno, iz izraza (16), korišćenjem $dq = W(\varphi)d\varphi$, $q_{T/2} = q(\varphi_{T/2})$, $q_0 = q(\varphi_0)$, kao i definicije akcije $A(q) = \int_0^q \varphi(q) dq$ [1], [6], može se dobiti

$$S_{v-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 (\varphi_{T/2} + \varphi_0)(q_{T/2} - q_0) - \omega^2 (A(q_{T/2}) - A(q_0)). \quad (19)$$

Pretpostavimo da $(\varphi(t), q(t))$ prolazi konstitutivnu relaciju od tačke (q_0, φ_0) u početnom trenutku do tačke $(q_{T/2}, \varphi_{T/2})$ u trenutku $t = T/2$, pri sinusnoj pobudi. U slučaju kada se obe ove tačke poklapaju za strujom-kontrolisan i naponom-kontrolisan idealan memristor, veza između akcije i koakcije (slika 2) $\hat{A}(\varphi_{T/2}) - \hat{A}(\varphi_0) + A(q_{T/2}) - A(q_0) = q_{T/2}\varphi_{T/2} - q_0\varphi_0$, i izrazi (18)-(19) impliciraju $S_{i-\text{contr}} + S_{v-\text{contr}} = 0$.



Slika 2. Akcija (svetlo siva površ) i koakcija (tamno siva površ) u $\varphi - q$ ravni, pre i nakon translacije (na manjoj slici).

3.1.2. Idealan generički memristor priključen na sinusnu pobudu

Strujom-kontrolisan idealan generički memristor može se opisati sa [3]

$$v(t) = R(x)i(t), \quad \frac{dx}{dt} = f(x)i, \quad (20)$$

gde x označava promenljivu stanja. Korišćenjem $dq = idt$ dobija se

$$dq = \frac{dx}{f(x)}, \quad q(x) = \int \frac{dx}{f(x)}. \quad (21)$$

Uvrštavanje $q = q(x)$, $q_0 = q(x_0)$, $q_{T/2} = q(x_{T/2})$, $dq = dx/f(x)$ i $M(q) = M(q(x)) = R(x)$ u (13) daje [20]

$$S_{i-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_{x_0}^{x_{T/2}} [q(x_{T/2}) + q(x_0) - 2q(x)] \frac{R(x)}{f(x)} dx. \quad (22)$$

Izraz (22) pokazuje da se za idealne generičke memristore površina lista takođe može opisati u terminima promenljive stanja.

Dualno, naponom-kontrolisan idealan generički memristor se može opisati kao [3]

$$i(t) = G(x)v(t), \quad \frac{dx}{dt} = g(x)v. \quad (23)$$

Iz izraza (23) i $d\varphi = vdt$ sledi

$$d\varphi = \frac{dx}{g(x)}, \quad \varphi(x) = \int \frac{dx}{g(x)}. \quad (24)$$

Uvrštavanje $\varphi = \varphi(x)$, $\varphi_0 = \varphi(x_0)$, $\varphi_{T/2} = \varphi(x_{T/2})$, $d\varphi = dx/g(x)$ i $W(\varphi) = W(\varphi(x)) = G(x)$ u (16) daje [20]

$$S_{v-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_{x_0}^{x_{T/2}} [\varphi(x_{T/2}) + \varphi(x_0) - 2\varphi(x)] \frac{G(x)}{g(x)} dx. \quad (25)$$

Iz $G(x) = 1/R(x)$ i $g(x) = f(x)/R(x)$, sledi da se izraz (25) može napisati u obliku [20]

$$S_{v-\text{contr}} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_{x_0}^{x_{T/2}} [\varphi(x_{T/2}) + \varphi(x_0) - 2\varphi(x)] \frac{1}{f(x)} dx. \quad (26)$$

3.2. Primeri određivanja površine lista histerezisne petlje na sinusnu pobudu

Primeri prikazani u ovom odeljku prikazuju određivanje površine lista histerezisne petlje memristora sa memristansom koja se može opisati kao polinomijalna funkcija naelektrisanja, modela sa deo po deo konstantnom memristansom, zatim linearnog modela HP memristora, kao i nelinearnog modela HP memristora sa prozorskom funkcijom. Poslednja dva modela opisuju HP memristor kao pasivan. Modeli sa deo po deo konstantnom memristansom i memristansom koja je polinomijalna funkcija naelektrisanja mogu se koristiti za opisivanje pasivnih, ali i lokalno aktivnih memristora.

Numeričke vrednosti površina su verifikovane poređenjem sa vrednostima dobijenim numeričkom integracijom izraza (5) za strujom-kontrolisan memristor, odnosno numeričkom integracijom izraza (6) za naponom-kontrolisan memristor.

3.2.1. Memristansa kao polinomijalna funkcija naelektrisanja

Memristansa kao polinomijalna funkcija q glasi

$$M(q) = m_0 + \sum_{n=1}^N m_n q^n. \quad (27)$$

Ovaj tip memristanse je korišćen u analizi memristivno induktivno-kapacitivnog kola [21]. Ovom tipu memristanse odgovara konstitutivna relacija koja je takođe polinomijalna funkcija naelektrisanja. U opštem slučaju takva konstitutivna relacija nije monotona i odgovarajući memristor je lokalno aktivan.

Uvrštavanjem izraza (27) u izraz (13) dobija se

$$S_N = -\frac{1}{2} \omega^2 \sum_{n=1}^N \frac{m_n \beta_n}{(n+1)(n+2)}, \quad (28)$$

gde se $\beta_n = n(q_{T/2}^{n+2} - q_0^{n+2}) - (n+2)(q_{T/2}^n - q_0^n)q_{T/2}q_0$, može napisati kao

$$\beta_n = (q_{T/2} - q_0)^3 \alpha_n, \quad (29)$$

$$\alpha_1 = 1, \quad \alpha_n = nq_0^{n-1} + nq_{T/2}^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-2} (n-i)(i+1)q_0^i q_{T/2}^{n-1-i}, \quad n \geq 2. \quad (30)$$

Uvrštavanjem izraza (29), izraz (28) poprima oblik [20]

$$S_N = -\frac{1}{2} \omega^2 (q_{T/2} - q_0)^3 \sum_{n=1}^N \frac{m_n \alpha_n}{(n+1)(n+2)}. \quad (31)$$

Memristansa (27) za $N=1$ glasi $M(q) = m_0 + m_1 q$. Iz izraza (30)-(31) sledi

$$S_{N=1} = -\frac{1}{12} m_1 \omega^2 (q_{T/2} - q_0)^3. \quad (32)$$

Linearan model strujom-kontrolisanog HP memristora odgovara ovom slučaju za $m_1 = -c(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})$ [2], [6], gde su R_{off} , R_{on} , i c konstante povezane sa fizičkim osobinama memristora. Uvrštavanje $m_1 = -c(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})$ i izraza (11) u $S_{N=1}$ vodi ka

$$S_{\text{HP},i-\text{contr}} = \frac{2}{3\omega} c(R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) I_m^3, \quad (33)$$

što je u saglasnosti sa [6]. Iz izraza (33) sledi da površina $S_{\text{HP},i-\text{contr}}$ opada kao $1/\omega$ kada ω raste.

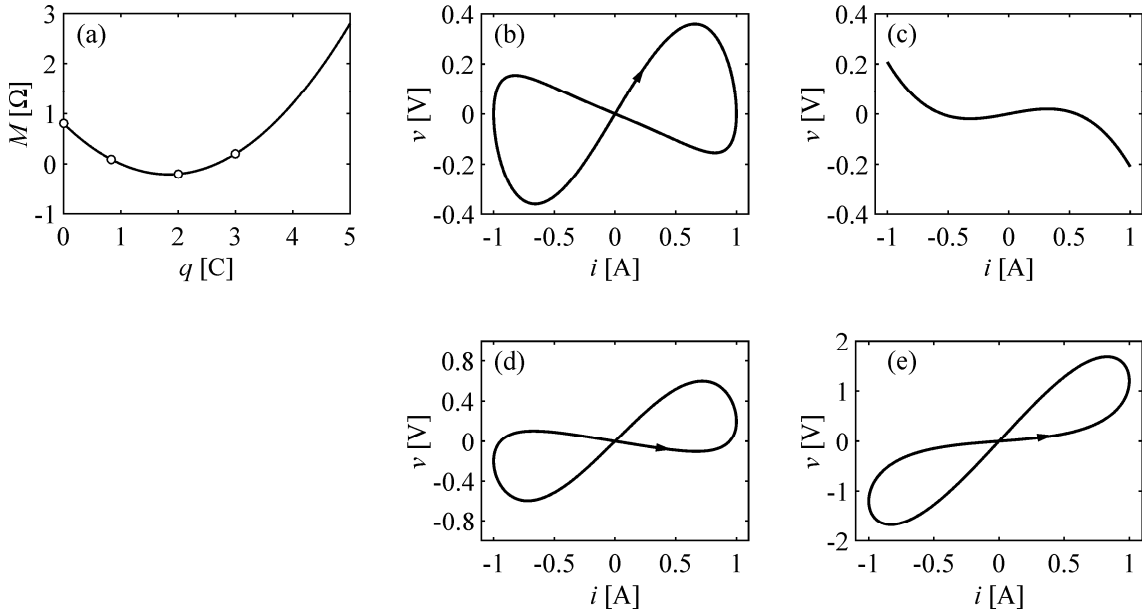
Za $N=2$ izraz (27) postaje $M(q) = m_0 + m_1 q + m_2 q^2$. Na osnovu izraza (30)-(31), dobija se $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 2(q_{T/2} + q_0)$ i

$$S_{N=2} = -\frac{1}{12} \omega^2 (q_{T/2} - q_0)^3 [m_1 + m_2 (q_{T/2} + q_0)]. \quad (34)$$

Za $m_1 = 0$, $|S_{N=2}|$ opada kao $1/\omega$ za $q_0 \neq 0$ i kao $1/\omega^2$ za $q_0 = 0$. Ako je $m_1 \neq 0$, tada $|S_{N=2}|$ opada kao $1/\omega$.

Kao primer, pretpostavimo $m_0 = 0,8\Omega$, $m_1 = -1,1\Omega/C$, $m_2 = 0,3\Omega/C^2$, $i = I_m \sin(\omega t)$, $I_m = 1A$, i $\omega = 1\text{rad/s}$. Na slici 3(a) je prikazana memristansa u funkciji naelektrisanja. Tačkama su označeni parovi

$(q_0, M(q_0))$ kojima odgovaraju histerezijsne petlje prikazane na slikama 3(b)-(e). Početna vrednost i površina histerezijsne petlje iznose $q_0 = 0$ i $S_{N=2} = 0,333 \text{ VA}$ za sliku 3(b), $q_0 = 0,833 \text{ C}$ i $S_{N=2} = 0$ za sliku 3(c), $q_0 = 2 \text{ C}$ i $S_{N=2} = -0,467 \text{ VA}$ za sliku 3(d), i $q_0 = 3 \text{ C}$ i $S_{N=2} = -0,867 \text{ VA}$ za sliku 3(e).



Slika. 3. (a) Memristansa $M(q) = m_0 + m_1 q + m_2 q^2$, $m_0 = 0,8 \Omega$, $m_1 = -1,1 \Omega/\text{C}$, i $m_2 = 0,3 \Omega/\text{C}^2$. Uštinute histerezijsne petlje za $i = I \sin(\omega t)$, $I = 1 \text{ A}$, $\omega = 1 \text{ rad/s}$, i različite početne vrednosti: (b) $q_0 = 0 \text{ C}$, (c) $q_0 = 0,833 \text{ C}$, (d) $q_0 = 2 \text{ C}$, i (e) $q_0 = 3 \text{ C}$.

3.2.2. Deo po deo konstantna memristansa

Deo po deo konstantna memristansa se može napisati kao

$$M(q) = r_0 + \sum_{n=1}^N r_n \text{sgn}(q - q_{Cn}), \quad (35)$$

gde q_{Cn} , $n=1, \dots, N$, označava tačke u kojima memristansa ima diskontinuitete. Memristor koji ima dva nivoa memristanse je korišćen kao model za binarnu memoriju [4] i u analizi nelinearnih oscilatora sa memristorima [23]. Memristor sa više nivoa memristanse se može koristiti za modelovanje budućih RRAM sa memristorima [22]. Osim toga, ovaj model se može koristiti za aproksimaciju memristanse sa deo po deo konstantnom funkcijom, kao što je predloženo u [24]. Bolje aproksimacije se mogu dobiti povećanjem N i smanjenjem rastojanja između tačaka q_{Cn} i $q_{C(n+1)}$ u kojima memristansa ima diskontinuitete.

Uvrštavanje izraza (35) u izraz (13) i korišćenje sledećih rešenja za integrale: $\int \text{sgn}(u) du = |u|$, $2 \int u \text{sgn}(u) du = u|u|$ vodi ka [20]

$$S_N^{\text{PWC}} = \sum_{n=1}^N r_n S_n, \quad (36)$$

gde je

$$S_n = \frac{1}{2} \omega^2 [(q_0 - q_{Cn}) |q_{T/2} - q_{Cn}| - (q_{T/2} - q_{Cn}) |q_0 - q_{Cn}|]. \quad (37)$$

Lako je pokazati da je $S_n = \omega^2 (q_{T/2} - q_{Cn})(q_0 - q_{Cn}) < 0$ za $q_0 < q_{Cn} < q_{T/2}$ i $S_n = 0$ inače.

Za $N=1$, deo po deo konstantna memristansa glasi $M(q) = r_0 + r_1 \text{sgn}(q - q_{C1})$ (slika 4(a)). Na osnovu (36), površina je $S_{N=1}^{\text{PWC}} = r_1 S_1$.

Za $N=2$, neka je $M(q) = r_0 + r_1 [\text{sgn}(q + q_C) - \text{sgn}(q - q_C)]$ (slika 4(b)). Ova memristansa se može dobiti iz izraza (35) uvrštavanjem $q_{C2} = -q_{C1} = q_C > 0$ i $r_2 = -r_1$. Na osnovu (36), površina je $S_{N=2}^{\text{PWC}} = r_1 (S_1 - S_2)$. Označimo sa

$$A_1 = \omega^2 (q_{T/2} + q_C)(q_0 + q_C), \quad A_2 = \omega^2 (q_{T/2} - q_C)(q_0 - q_C). \quad (38)$$

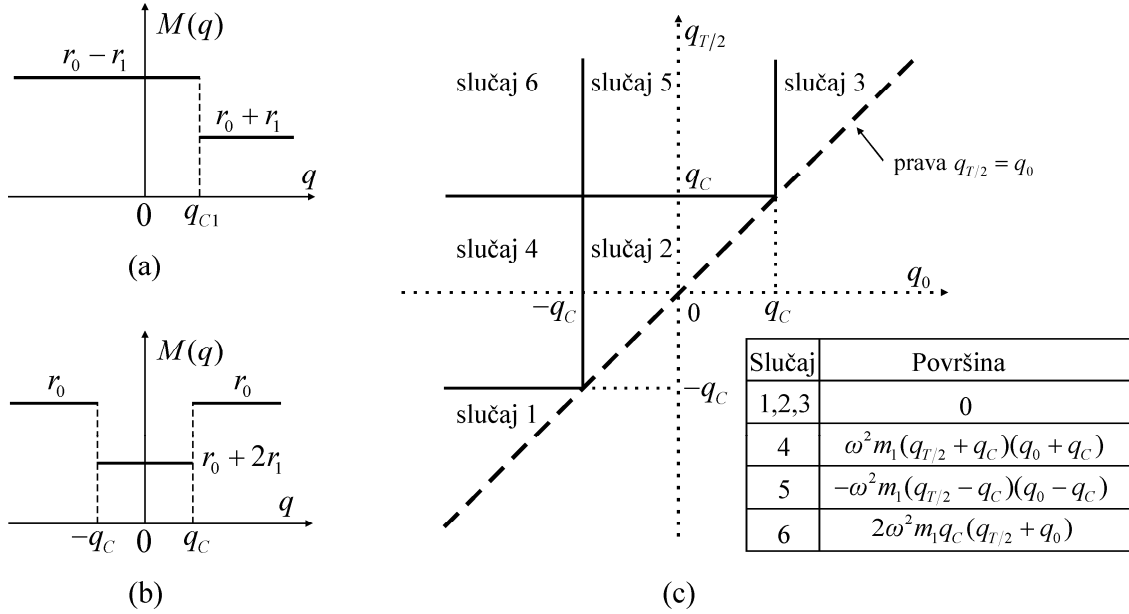
Primititi da je $S_1 = A_1$ za $-q_C \in (q_0, q_{T/2})$ i $S_2 = A_2$ za $q_C \in (q_0, q_{T/2})$. U zavisnosti od položaja q_0 i $q_{T/2}$ u odnosu na $-q_C$ i q_C , razlikuje se sledećih šest slučajeva (slika 4(c)):

slučajevi 1-3: q_0 i $q_{T/2}$ pripadaju istom podintervalu i to ili $(-\infty, -q_C]$ ili $[-q_C, q_C]$ ili $[q_C, \infty)$. Tada je $S_1 = S_2 = S_{N=2}^{\text{PWC}} = 0$;

slučaj 4: za $q_0 < -q_C < q_{T/2} \leq q_C$ površina je $S_{N=2}^{\text{PWC}} = r_1 A_1$;

slučaj 5: za $-q_C \leq q_0 < q_C < q_{T/2}$ površina je $S_{N=2}^{\text{PWC}} = -r_1 A_2$;

slučaj 6: za $q_0 < -q_C < q_C < q_{T/2}$ površina je $S_{N=2}^{\text{PWC}} = r_1 (A_1 - A_2)$.

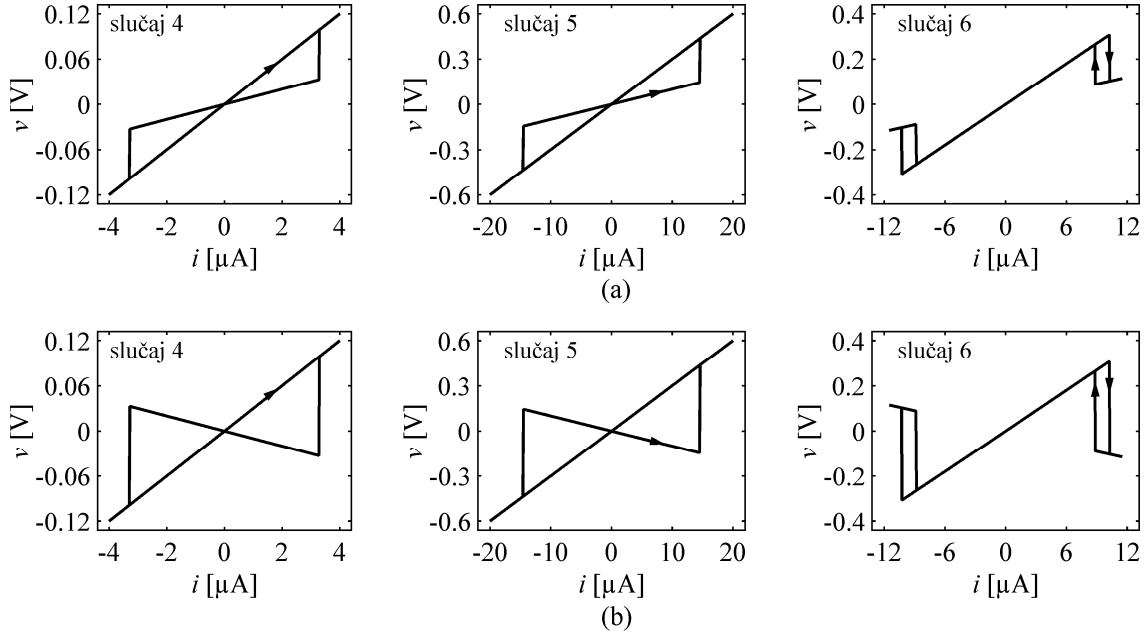


Slika. 4. Primeri deo po deo konstantne memristanse za a) $N = 1$, b) $N = 2$, i c) ilustracija slučajeva 1-6 u $q_{T/2} - q_0$ ravni, kao i površine lista histerezisne petlje za $N = 2$.

Primeri koji odgovaraju pasivnom i lokalno aktivnom memristoru su dati u tabeli 1. Odgovarajuće uštinute histerezisne petlje su prikazane na slici 5(a) u slučaju pasivnog memristora i na slici 5(b) u slučaju lokalno aktivnog memristora. Ilustrovani su samo slučajevi 4-6, s obzirom da u slučajevima 1-3 histerezisna petlja degeneriše u pravu.

Tabela 1. Primeri određivanja površina lista uštinute histerezisne petlje za idealan strujom-kontrolisan memristor sa deo po deo konstantnom memristansom.

	Pasivan memristor: $r_0 = 30 \text{ k}\Omega$, $r_1 = -10 \text{ k}\Omega$, $q_C = 1 \mu\text{C}$, $M_{\text{low}} = 10 \text{ k}\Omega$, $M_{\text{high}} = 30 \text{ k}\Omega$	Lokalno aktivan memristor: $r_0 = 30 \text{ k}\Omega$, $r_1 = -20 \text{ k}\Omega$, $q_C = 1 \mu\text{C}$, $M_{\text{low}} = -10 \text{ k}\Omega$, $M_{\text{high}} = 30 \text{ k}\Omega$
slučaj 4: $q_0 = -2 \mu\text{C}$ $I_m = 4 \mu\text{A}$, $q_{T/2} = -0,727 \mu\text{C}$	$S_{\text{p}(4)} = 0,108 \mu\text{VA}$	$S_{\text{A}(4)} = 0,216 \mu\text{VA}$
slučaj 5: $q_0 = 0$ $I_m = 20 \mu\text{A}$, $q_{T/2} = 6,37 \mu\text{C}$	$S_{\text{p}(5)} = -2,12 \mu\text{VA}$	$S_{\text{A}(5)} = -4,24 \mu\text{VA}$
slučaj 6: $q_0 = -2 \mu\text{C}$ $I_m = 11,5 \mu\text{A}$, $q_{T/2} = 1,66 \mu\text{C}$	$S_{\text{p}(6)} = 0,268 \mu\text{VA}$	$S_{\text{A}(6)} = 0,536 \mu\text{VA}$



Slika. 5. Primeri histerezisnih petlji idealnog memristora sa deo po deo konstantnom memristansom u slučaju kada je a) pasivan i b) lokalno aktivan. Odgovarajući brojni podaci su dati u tabeli 1.

Kao naredni primer, razmotrimo aproksimativan izraz za memristansu u slučaju linearnog modela HP memristora dat u [24]:

$$M_{HP}^{\text{aprox}, N}(q) = \frac{1}{2}(R_{\text{off}} + R_{\text{on}}) - \frac{1}{2N}(R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \sum_{n=1}^N \text{sgn}(q - q_{Cn}), \quad (39)$$

sa tačkama diskontinuiteta

$$q_{Cn} = (2n-1)\Delta q, \quad \Delta q = \frac{1}{2Nc}, \quad (40)$$

gde su R_{off} , R_{on} , i c konstante povezane sa fizičkim osobinama memristora (imaju isto značenje kao i u prethodnom odeljku). Iz (35) i (39) sledi $r_0 = (R_{\text{off}} + R_{\text{on}})/2$ i $r_1 = \dots = r_N = -(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})/(2N)$. Na osnovu (36)-(37) površina lista histerezisne petlje može se odrediti kao

$$S_N^{\text{HP}} = \frac{1}{4N}(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})\omega^2 \sum_{n=1}^N [(q_{Cn} - q_0) |q_{T/2} - q_{Cn}| + (q_{T/2} - q_{Cn}) |q_{Cn} - q_0|]. \quad (41)$$

Pretpostavimo $q_{Cn_{\min}} \leq q_0 < q_{C(n_{\min}+1)}$ i $q_{Cn_{\max}} < q_{T/2} \leq q_{C(n_{\max}+1)}$, tako da iz $q_0 < q_{T/2}$ sledi $n_{\min} \leq n_{\max}$. Za dovoljno veliko N približno važi $q_0 = (q_{Cn_{\min}} + q_{C(n_{\min}+1)})/2$ i $q_{T/2} = (q_{Cn_{\max}} + q_{C(n_{\max}+1)})/2$. Na osnovu izraza (40), q_0 i $q_{T/2}$ su približno jednaki

$$q_0 = 2n_{\min}\Delta q, \quad q_{T/2} = 2n_{\max}\Delta q. \quad (42)$$

Uvrštavanjem izraza (42) i $q_{Cn} = (2n-1)\Delta q$ u izraz (41) dobija se

$$S_N^{\text{HP}} = \frac{1}{4N}(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})\omega^2 (\Delta q)^2 \sum_{n=1}^N [(2n-1-2n_{\min}) |2n_{\max} - 2n+1| + (2n_{\max} - 2n+1) |2n-1-2n_{\min}|]. \quad (43)$$

Izraz u uglastoj zagradi pod sumom je različit od nule samo za $n_{\min} + 1 \leq n \leq n_{\max}$, tako da se može pisati

$$S_N^{\text{HP}} = \frac{1}{2N}(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})\omega^2 (\Delta q)^2 \sum_{n=n_{\min}+1}^{n_{\max}} [(2n-1-2n_{\min})(2n_{\max} - 2n+1)]. \quad (44)$$

U slučaju kada je $n_{\max} = n_{\min}$ suma je jednaka nuli. Za $n_{\max} > n_{\min}$, suma se može izračunati korišćenjem sledećih poznatih identiteta $\sum_{k=1}^K (2k-1) = K^2$ i $\sum_{k=1}^K (2k-1)^2 = (4K^2 - 1)K/3$. Nakon sređivanja dobija se

$$S_N^{\text{HP}} = \frac{1}{3N}(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})\omega^2 (\Delta q)^2 (n_{\max} - n_{\min}) \left[(n_{\max} - n_{\min})^2 + \frac{1}{2} \right]. \quad (45)$$

Za dovoljno veliko $(n_{\max} - n_{\min})$ prethodni izraz je približno jednak

$$S_N^{\text{HP}} \approx \frac{1}{3N}(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})\omega^2 (\Delta q)^2 (n_{\max} - n_{\min})^3. \quad (46)$$

Iz izraza (42) sledi

$$n_{\max} - n_{\min} = \frac{q_{T/2} - q_0}{2\Delta q}. \quad (47)$$

Uvrštavanjem (47) u (46) dobija se

$$S_N^{\text{HP}} \approx \frac{1}{24N\Delta q} (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \omega^2 (q_{T/2} - q_0)^3. \quad (48)$$

Konačno, uvrštavanjem $q_{T/2} - q_0 = 2I_m/\omega$ (videti (11)) i $2N\Delta q = 1/c$ (videti (40)) dobija se $S_N^{\text{HP}} \approx 2c(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})I_m^3/(3\omega)$, što se poklapa sa tačnim izrazom za površinu lista (33).

3.2.3. Naponom kontrolisan HP Memristor – linearan model

Memduktansa HP memristora može se napisati u obliku [25]

$$W(\varphi) = \frac{W_0}{\sqrt{1 - \gamma\varphi}}, \quad (49)$$

gde su $W_0 = 1/R_{\text{off}}$ i $\gamma = 2c(R_{\text{off}} - R_{\text{on}})/R_{\text{off}}^2$ konstante. Uvrštavanje izraza (49) u izraz (16) vodi ka

$$S_{\text{HP},v-\text{contr}} = -\frac{\omega^2 W_0}{3\gamma^2} \left[\sqrt{1 - \gamma\varphi_0} - \sqrt{1 - \gamma\varphi_{T/2}} \right]^3. \quad (50)$$

Iz $\varphi_{T/2} - \varphi_0 = 2V_m/\omega$, sledi da apsolutna vrednost $|S_{\text{HP},v-\text{contr}}|$ opada sa porastom kružne frekvencije ω . Izraz u zagradi se može napisati kao

$$\sqrt{1 - \gamma\varphi_0} - \sqrt{1 - \gamma\varphi_{T/2}} = \sqrt{1 - \gamma\varphi_0} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\gamma(\varphi_{T/2} - \varphi_0)}{1 - \gamma\varphi_0}} \right]. \quad (51)$$

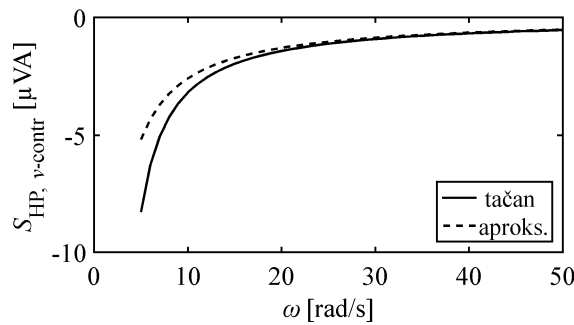
Iznad dovoljno visoke frekvencije, izraz u uglastoj zagradi u (51) je približno jednak prvom članu Maclaurin-ovog reda (tj. $1 - \sqrt{1 - y} \approx y/2$):

$$\sqrt{1 - \gamma\varphi_0} - \sqrt{1 - \gamma\varphi_{T/2}} \approx \frac{\gamma(\varphi_{T/2} - \varphi_0)}{2\sqrt{1 - \gamma\varphi_0}} \quad (52)$$

Uvrštavanjem (52) u (50) dobija se

$$S_{\text{HP},v-\text{contr}}^{\text{apros.}} \approx -\frac{\omega^2 W_0}{3\gamma^2} \left[\frac{\gamma(\varphi_{T/2} - \varphi_0)}{2\sqrt{1 - \gamma\varphi_0}} \right]^3. \quad (53)$$

Ovaj izraz, zajedno sa $\varphi_{T/2} - \varphi_0 = 2V_m/\omega$ pokazuje da $|S_{\text{HP},v-\text{contr}}|$ opada kao $1/\omega$, kada ω raste (slika 6).



Slika. 6. Linearan model naponom-kontrolisanog HP-memristora: $R_{\text{off}} = 16\text{ k}\Omega$, $R_{\text{on}} = 100\Omega$, $c = 10^4/\text{C}$, $V_m = 1\text{ V}$, površina $S_{\text{HP},v-\text{contr}}$ (puna linija) i $S_{\text{HP},v-\text{contr}}^{\text{apros.}}$ (isprekidana linija) u funkciji kružne frekvencije ω .

3.2.4. Idealan generički memristor

Nelinearan model strujom-kontrolisanog HP memristora sa prozorskom funkcijom predloženom u [2] glasi

$$v = [R_{\text{off}} - (R_{\text{off}} - R_{\text{on}})x]i, \quad \frac{dx}{dt} = cx(1 - x)i, \quad (54)$$

gde x označava promenljivu stanja i $x \in (0,1)$. Iz izraza (54) i $dq = idt$ sledi [3]

$$q(x) = \int \frac{dx}{cx(1-x)} = \frac{1}{c} \ln \frac{x}{1-x}. \quad (55)$$

Uvrštavanjem $R(x) = R_{\text{off}} - (R_{\text{off}} - R_{\text{on}})x$, $f(x) = cx(1-x)$, i izraza (55) u izraz (22), s obzirom da konstantan član memristanse ne doprinosi površini, dobija se

$$S_{\text{HP,IC}} = -(R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \frac{\omega^2}{c^2} \int_{x_0}^{x_{T/2}} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{x_{T/2} x_0}{(1-x_{T/2})(1-x_0)} - \ln \frac{x}{1-x} \right] \frac{dx}{1-x}. \quad (56)$$

Površina se može iskazati kao

$$S_{\text{HP,IC}} = (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \frac{\omega^2}{c^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{1-x_{T/2}}{1-x_0} \ln(x_{T/2} x_0) + \text{Li}_2(1-x_{T/2}) - \text{Li}_2(1-x_0) \right], \quad (57)$$

gde $\text{Li}_2(x)$ označava dilogaritam funkciju [26]:

$$\text{Li}_2(x) = -\int_0^x \frac{\ln(1-t)}{t} dt, \quad \text{Li}_2(1-x) = -\int_0^x \frac{\ln t}{1-t} dt. \quad (58)$$

Dualno, nelinearan model za naponom-kontrolisan HP memristor sa istom prozorskom funkcijom može se opisati sa

$$i = \frac{v}{R_{\text{off}} - (R_{\text{off}} - R_{\text{on}})x}, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{cx(1-x)}{R_{\text{off}} - (R_{\text{off}} - R_{\text{on}})x} v. \quad (59)$$

Primenom izraza (59) i $d\varphi = vdt$, dobija se

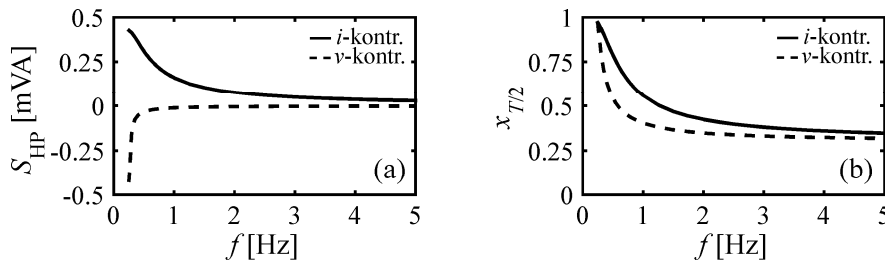
$$\varphi(x) = \frac{1}{c} \left[R_{\text{off}} \ln \frac{x}{1-x} + (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \ln(1-x) \right]. \quad (60)$$

Uvrštavanje izraza (60) i prozorske funkcije $f(x) = cx(1-x)$ u izraz (26) vodi ka površini lista histerezisne petlje naponom-kontrolisanog HP memristora, koja se u terminima dilogaritam funkcije (58) može napisati kao

$$S_{\text{HP,VC}} = (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \frac{\omega^2}{c^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{x_{T/2}}{x_0} \ln((1-x_{T/2})(1-x_0)) + \text{Li}_2(x_{T/2}) - \text{Li}_2(x_0) \right]. \quad (61)$$

Korišćenjem identiteta $\text{Li}_2(1-x) + \text{Li}_2(x) = \pi^2/6 - \ln x \ln(1-x)$ [26] može se pokazati da za iste vrednosti x_0 i $x_{T/2}$ važi $S_{\text{HP,IC}} + S_{\text{HP,VC}} = 0$.

Primeri promene vrednosti površina (57) i (61) u funkciji frekvencije su prikazani na slici 7(a). Parametri HP memristora su $R_{\text{off}} = 16 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{on}} = 100 \Omega$, i $c = 10^4 / \text{C}$ [25]. Za početnu vrednost promenljive stanja x_0 usvojeno je 0.3, za frekvenjski opseg 0,25–5 Hz ($f = \omega/2\pi$), a za amplitude sinusnih pobuda izabrano je $I_m = 0.34 \text{ mA}$ i $V_m = 1.5 \text{ V}$. Vrednost promenljive stanja u trenutku $t = T/2$ u funkciji frekvencije je prikazana na slici 7(b). Za ove podatke dobija se $x_{T/2} \approx 0.97$ na $f = 0.25 \text{ Hz}$, i za strujom-kontrolisan i za naponom-kontrolisan memristor. Odgovarajuće površine su $S_{\text{HP,IC}} \approx 0.43 \text{ mVA}$ i $S_{\text{HP,VC}} \approx -0.43 \text{ mVA}$. Na slici 7 se vidi da i površina i $x_{T/2}$ opadaju brže u slučaju naponom-kontrolisanog memristora (isprekidane linije) sa porastom frekvencije.



Slika. 7. Nelinearan model HP-memristora: $R_{\text{off}} = 16 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{on}} = 100 \Omega$, $c = 10^4 / \text{C}$, $x_0 = 0.3$, $I_m = 0.34 \text{ mA}$, $V_m = 1.5 \text{ V}$,
(a) površine $S_{\text{HP,IC}}$ i $S_{\text{HP,VC}}$ u funkciji frekvencije i (b) promenljiva stanja u trenutku $t = T/2$.

U analizi HP memristora često se koristi tzv. Joglekar-ova prozorska funkcija [27], [28] koja je data sa

$$f_{(\log, p)}(x) = 1 - (2x - 1)^{2p}, \quad (62)$$

gde je p prirodan broj. Na osnovu (21), odgovarajuće naelektrisanje se može odrediti kao

$$q(x) = q(x_0) + \frac{1}{c} \int_{x_0}^x \frac{du}{1 - (2u - 1)^{2p}}. \quad (63)$$

Integral (63) ima rešenje u vidu Gauss-ove hipergeometrijske funkcije koja se može predstaviti kao beskonačni red [28]. U našem primeru za određivanje integrala koristimo numeričku integraciju. Uvrštavanjem $R(x) = R_{\text{off}} - (R_{\text{off}} - R_{\text{on}})x$ i $f(x) = cf_{(\text{Jog}, p)}(x)$ u izraz (22), s obzirom da konstantan član memristanse ne doprinosi površini lista histerezisne petlje, dobija se

$$S_{i-\text{contr}}^{(\text{Jog}, p)} = -\frac{1}{2c} \omega^2 (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \int_{x_0}^{x_{T/2}} [q(x_{T/2}) + q(x_0) - q(x)] \frac{x}{1 - (2x - 1)^{2p}} dx. \quad (64)$$

Primititi da se (64) može napisati kao

$$S_{i-\text{contr}}^{(\text{Jog}, p)} = -\frac{1}{2c} \omega^2 (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) [q(x_{T/2}) - q(x_0)] \int_{x_0}^{x_{T/2}} \frac{x dx}{1 - (2x - 1)^{2p}} + \frac{1}{c} \omega^2 (R_{\text{off}} - R_{\text{on}}) \int_{x_0}^{x_{T/2}} [q(x) - q(x_0)] \frac{x dx}{1 - (2x - 1)^{2p}}. \quad (65)$$

Prilikom numeričke integracije u izrazu (65), nestandardan problem je zamena izraza (63) u (65), budući da je u izrazu (63) gornja granica varijabla x , a ne numerička vrednost. U svrhu rešavanja ovog problema, pri realizaciji MatLab koda za određivanje numeričkih vrednosti površine $S_{i-\text{contr}}^{(\text{Jog}, p)}$ za numeričku integraciju je korišćena funkcija `filter` na način opisan u radu [29]. Deo MatLab koda koji opisuje određivanje numeričke vrednosti izraza (65) glasi:

```
% vektor promenljive stanja
xx = x0:0.001*(x_Tp-x0):x_Tp; %
% Prozorska funkcija
F_Jog = 1-(1-2*xx).^(2*p);
% q(x) - q(x0)
q_od_x_norm = (1/c)*(xx(2)-xx(1))*filter(1,[1 -1],1./F_Jog);
% Prvi sabirak
INT1_x = (xx(2)-xx(1))*filter(1,[1 -1],xx./F_Jog);
sabirak_1 = q_od_x_norm(length(xx)) * INT1_x(length(xx));
% Drugi sabirak
INT2_x = 2*(xx(2)-xx(1))*filter(1,[1 -1],q_od_x_norm.*xx./F_Jog);
sabirak_2 = INT2_x(length(xx));
% Povrsina lista
S_Jog_p = -1/(2*c)*w^2*(Roff-Ron)*(sabirak_1 - sabirak_2);
```

3.3. Interpretacija površine lista histerezisne petlje preko memristanse i naelektrisanja

U ovom odeljku date su dve interpretacije površine lista histerezisne petlje povezane sa:

- parnošću (neparnošću) memristanse u odnosu na pravu $q = q_{T/4}$ (tačku $(q_{T/4}, 0)$),
- geometrijskom interpretacijom u $M - q$ ravni.

3.3.1. Interpretacija u zavisnosti od parnosti memristanse

Paran deo memristanse $M^{\text{even}}(q)$ je deo koji je simetričan u odnosu na pravu $q = q_{T/4}$,

$$M^{\text{even}}(q) = \frac{1}{2} [M(q) + M(2q_{T/4} - q)]. \quad (66)$$

Neparan deo memristanse $M^{\text{odd}}(q)$ je deo koji je neparno simetričan u odnosu na tačku $(q_{T/4}, 0)$,

$$M^{\text{odd}}(q) = \frac{1}{2} [M(q) - M(2q_{T/4} - q)]. \quad (67)$$

Osim toga, memristansa se na jedinstven način može napisati kao

$$M(q) = M^{\text{even}}(q) + M^{\text{odd}}(q). \quad (68)$$

S obzirom da je faktor $(q_{T/4} - q)$ neparno simetričan u odnosu na tačku $(q_{T/4}, 0)$, sledi da su

$$\begin{aligned} s^{\text{odd}}(q) &= \omega^2 (q_{T/4} - q) M^{\text{even}}(q), \\ s^{\text{even}}(q) &= \omega^2 (q_{T/4} - q) M^{\text{odd}}(q), \end{aligned} \quad (69)$$

neparna i parna funkcija u odnosu na $q_{T/4}$, respektivno. Uvrštavanjem izraza (68) u (15) i korišćenjem (69) dobija se

$$S_{i-\text{contr}} = \int_{q_0}^{q_{T/2}} s^{\text{odd}}(q) dq + \int_{q_0}^{q_{T/2}} s^{\text{even}}(q) dq. \quad (70)$$

Granice integrala su simetrične u odnosu na $q_{T/4}$ (videti (14)), iz čega sledi da je prvi integral jednak nuli. Sledi da se površina lista može izračunati kao

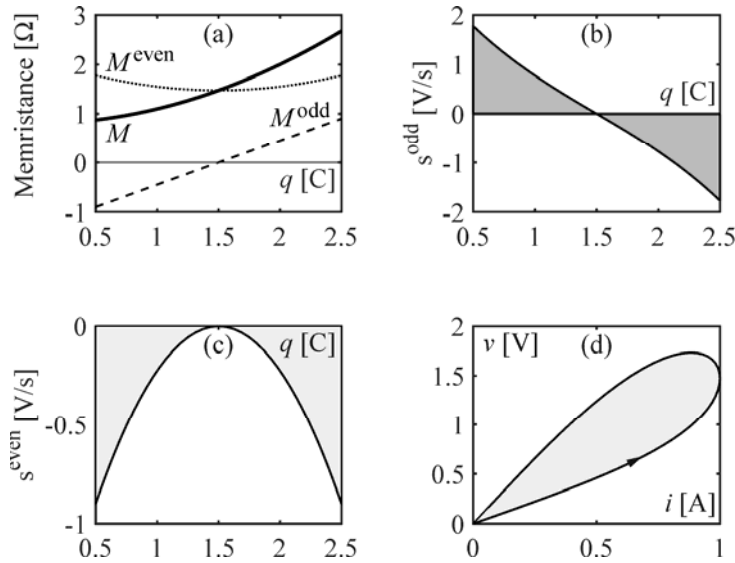
$$S_{i-\text{contr}} = 2\omega^2 \int_{q_0}^{q_{T/4}} (q_{T/4} - q) M^{\text{odd}}(q) dq, \quad (71)$$

gde je $M^{\text{odd}}(q)$ definisano izrazom (67). Prema tome, parni deo $M^{\text{even}}(q)$ ne doprinosi površini.

Na primer, neka je $M(q) = m_0 + m_2 q^2$. Iz izraza (67) dobija se $M^{\text{odd}}(q) = 2m_2 q_{T/4} (q - q_{T/4})$, što dalje zajedno sa (71) implicira

$$S_{i-\text{contr}} = -\frac{4}{3} m_2 \omega^2 q_{T/4} (q_{T/4} - q_0)^3. \quad (72)$$

Uvrštavanjem izraza (14) u izraz (72) dobija se $S_{N=2}$ (videti (34)). Primetiti da se za $q_{T/4} = 0$ dobija $M^{\text{odd}}(q) = 0$ i $S_{i-\text{contr}} = 0$ (u ovom slučaju histerezisna petlja degeneriše u krivu). Kao numerički primer, pretpostavimo $m_0 = 0,8\Omega$, $m_2 = 0,3\Omega/C^2$, $i = I_m \sin(\omega t)$, $I_m = 1\text{A}$, $\omega = 1\text{rad/s}$, i $q_0 = 0,5\text{C}$ (što odgovara $q_{T/4} = 1,5\text{C}$). Na slici 5(a) je prikazana memristansa, kao i njen paran i neparan deo u odnosu na $q_{T/4}$. Funkcije definisane izrazom (69) su prikazane na slikama 7(b) i 7(c). Zbir delova označenih tamno sivom bojom na slici 7(b) jednak je nuli. Svetlo siva površina na slici 7(c) i površina lista histerezisne petlje prikazana na slici 7(d) su jednake $-0,6\text{VA}$.



Slika 8. Podaci: $M(q) = m_0 + m_2 q^2$, $m_0 = 0,8\Omega$, $m_2 = 0,3\Omega/C^2$, $i = I \sin(\omega t)$, $I = 1\text{A}$, $\omega = 1\text{rad/s}$, i $q_0 = 0,5\text{C}$. (a) Paran i neparan deo memristanse u odnosu na $q_{T/4} = 1,5\text{C}$, (b) površina određena sa $s^{\text{odd}}(q)$ i q -osom, (c) površina određena sa $s^{\text{even}}(q)$ i q -osom, (d) list histerezisne petlje u prvom kvadrantu.

3.3.2. Geometrijska interpretacija

Posmatrajmo krivu u $v-i$ ravni koja odgovara memristoru priključenom na sinusnu pobudu $i(t) = I_m \sin(\omega t)$ tokom vremenskog intervala $t \in [\tau_1, \tau_2]$, gde je $0 \leq \tau_1 < \tau_2 \leq T/2$. Koristeći iste argumente kao u odeljku 3.1.1, pokazuje se da se površina ispod krive može izračunati kao

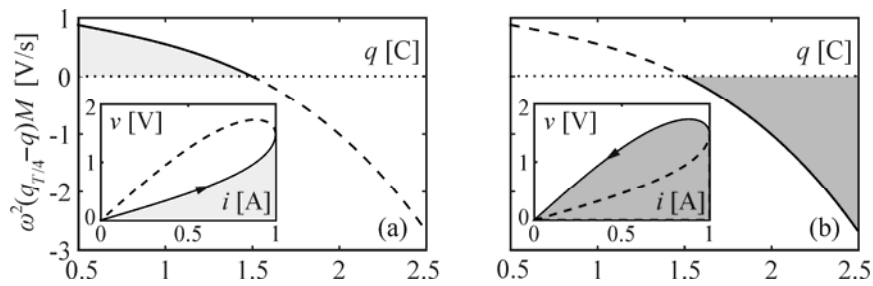
$$S_{[\tau_1, \tau_2]} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} v(t) \frac{di(t)}{dt} dt = \omega^2 \int_{q_1}^{q_2} (q_{T/4} - q) M(q) dq, \quad (73)$$

gde je $q_1 = q(\tau_1)$ i $q_2 = q(\tau_2)$.

Za iste podatke kao u prethodnom primeru, površina $S_{[\tau_1, \tau_2]}$ koja odgovara vremenskim intervalima $t \in [0, T/4]$, $t \in [T/4, T/2]$, i $t \in [0, T/2]$, jednaka je

$$\begin{aligned} S_{[0, T/4]} &= \frac{\omega^2}{2} \left[m_0 (q_{T/4} - q_0)^2 + \frac{m_2}{6} (q_{T/4}^4 - 4q_{T/4}q_0^3 + 3q_0^4) \right], \\ S_{[T/4, T/2]} &= -\frac{\omega^2}{2} \left[m_0 (q_{T/4} - q_{T/2})^2 + \frac{m_2}{6} (q_{T/4}^4 - 4q_{T/4}q_{T/2}^3 + 3q_{T/2}^4) \right], \\ S_{[0, T/2]} &= S_{[0, T/4]} + S_{[T/4, T/2]}. \end{aligned} \quad (74)$$

Uzimajući u obzir izraz (14), površine $S_{[0, T/2]}$ i $S_{N=2}$ (videti (34)) su jednake. Odgovarajuće numeričke vrednosti su: $S_{[0, T/4]} = 0,5125 \text{ VA}$, $S_{[T/4, T/2]} = -1,1125 \text{ VA}$, i $S_{[0, T/2]} = -0,6 \text{ VA}$. Na osnovu izraza (73), površine označene svetlo sivom bojom na slici 8(a) i na insertovanoj slici su jednake $S_{[0, T/4]}$. Slično, tamno sive površine na slici 8(b) i insertovanoj slici su jednake $S_{[T/4, T/2]}$.



Slika 9. Površine između $\omega^2(q_{T/4} - q)M(q)$ i q -ose za (a) $t \in [0, T/4]$, i (b) $t \in [T/4, T/2]$. Odgovarajuće površine u $v-i$ ravni su prikazane na insertovanim slikama.

3.4. Kako je realizovano tehničko rešenje i gde se primenjuje, odnosno koje su mogućnosti primene

U tehničkom rešenju je prikazana metoda za određivanje površine lista uštinute histerezisne petlje za idealne i idealne generičke memristore na sinusnu pobudu. Kao demonstracija primene prikazane metode, određivanje površine lista histerezisne petlje je ilustrovano na više primera koji su od interesa za proučavanje memristora i njihovog ponašanja u električnim kolima. U primere su uključeni i slučajevi kada je memristor lokalno aktivan.

Metodu opisanu u ovom tehničkom rešenju koriste istraživači sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu u aktivnostima koje se odnose na analizu memristora, kao i za dalja istraživanja. Jedan od pravaca daljih istraživanja obuhvata i proširenje primenljivosti opisane metode na slučaj periodične deo po deo linearne pobude (kao što su povorke pravougaonih ili trougaonih impulsa).

Primenom unificiranog opisa koji važi za sve idealne mem-elemente [5], rezultati prikazani u ovom tehničkom rešenju se mogu na jednostavan način proširiti i na idealne mem-kondenzatore i mem-kaleme.

4. Literatura

- [1] L. O. Chua, "Memristor – The missing circuit element," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 507–519, Sep. 1971.
- [2] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, "The missing memristor found," *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, May 2008.
- [3] L. O. Chua, "Everything you wish to know about memristors but are afraid to ask," *Radioengineering*, vol. 24, no. 2, pp. 319–368, Jun. 2015.
- [4] L. O. Chua, "Resistance switching memories are memristors," *Appl. Phys. A*, vol. 102, no. 4, pp. 765–783, Mar. 2011.
- [5] D. Biolek, Z. Biolek, and V. Biolkova, "Pinched hysteresis loops of ideal memristors, memcapacitors and meminductors must be 'self-crossing'," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 25, pp. 1385–1387, Dec. 2011.

- [6] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkova, "Computation of the area of memristor pinched hysteresis loop," *IEEE Trans. Circuit Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 59, no. 9, pp. 607–611, Sep. 2012.
- [7] S. Elwakil, M. E. Fouda, and A. G. Radwan, "A simple model of double-loop hysteresis," *IEEE Trans. Circuit Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 60, no. 8, pp. 487–491, Aug. 2013.
- [8] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkova, "Analytical computation of the area of pinched hysteresis loops of ideal mem-elements," *Radioengineering*, vol. 22, no. 1, pp. 132–135, Apr. 2013.
- [9] D. Biolek, Z. Biolek, and V. Biolkova, "Interpreting area of pinched memristor hysteresis loop," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 2, pp. 74–75, Jan. 2014.
- [10] Z. Biolek, and D. Biolek, "How can the hysteresis loop of the ideal memristor be pinched," *IEEE Trans. Circuit Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 61, no. 7, pp. 491–495, July 2014.
- [11] M. P. Sah, H. Kim, and L. O. Chua, "Brains are made of memristors," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 14, no. 1, pp. 12–36, Feb. 2014.
- [12] Y. Yu, B. Bao, H. Kang, and M. Shi, "Calculating area of fractional-order memristor pinched hysteresis loop," *J. Eng.*, 3, pp, Nov. 2015.
- [13] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkova, "Specification of one classical fingerprint of ideal memristor," *Microelectr. J.*, vol. 46, no. 4, pp. 298–300, Apr. 2015.
- [14] Z. Biolek, D. Biolek, V. Biolkova, and Z. Kolka, "Comments on pinched hysteresis loops of memristive elements," *Radioengineering*, vol. 24, no. 4, pp. 962–967, Dec. 2015.
- [15] Z. Biolek, D. Biolek, V. Biolkova, and Z. Kolka, "Variation of a classical fingerprint of ideal memristor," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 44, no. 5, pp. 1202–1207, May 2016.
- [16] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkova, "Hysteresis versus PSM of ideal memristors, memcapacitors, and meminductors," *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 20, pp. 1669–1671, Sep. 2016.
- [17] X. M. Wang, and S. Y. R. Hui, "Pinched hysteresis loops and symmetry," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 134–140, Jan. 2017.
- [18] X. M. Wang, and S. Y. R. Hui, "Graphical modelling of pinched hysteresis loops of memristors," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 86–96, Jan. 2017.
- [19] F. Corinto, P. P. Civalleri, and L. O. Chua, "A theoretical approach to memristor devices," *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, vol. 62, no. 10, pp. 2688–2700, Oct. 2015.
- [20] A. Juhas, and S. Dautovic, "Computation of pinched hysteresis loop area from memristance-vs-state map," na recenziji.
- [21] K. J. Chandía, M. Bologna, and B. Tellini, "Multiple scale approach to dynamics of an LC circuit with a charge-controlled memristor," *IEEE Trans. Circuit Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 65, no. 1, pp. 120–124, Jan. 2018.
- [22] F.-X. Dong, Y.-H. Tang, and J.-J. Wu, "SPICE modeling of memristors with multilevel resistance states," *Chin. Phys. B*, vol. 21, no. 9, pp. 098901(1-7), Sep. 2012.
- [23] F. Corinto, A. Ascoli, and M. Gilli, "Analysis of current-voltage characteristics for memristive elements in pattern recognition systems," *Int. J. Circ. Theor. Appl.*, vol. 40, no. 12, pp. 1277–1320, Dec. 2012.
- [24] A. Juhas, S. Dautović, "Metoda za modelovanje ponašanja idealnog memristora", prihvaćeno na NN Veću FTN 12. 07. 2017. M85, Projekat 32016.
- [25] R. K. Budhathoki, M. P. Sah, S. P. Adhikari, H. Kim, and L. O. Chua, "Composite behavior of multiple memristor circuits," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 60, no. 10, pp. 2688–2700, Oct. 2013.
- [26] L. Lewin, *Polylogarithms and Associated Functions*, North-Holland, New York, 1981, pp. 1-5.
- [27] Y. N. Joglekar, S. J. Wolf, "The elusive memristor: properties of basic electrical circuits," *Eur. J. Phys.*, vol. 30, no. 4, pp. 661–675, 2009.
- [28] F. Corinto, and A. Ascoli, "A boundary condition-based approach to the modeling of memristor nanostructures," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 59, no. 11, pp. 2713–2726, Nov. 2012.
- [29] K. Zaplatilek, "Memristor modeling in MATLAB and Simulink," Proceedings of the European Computing Conference, Paris, France, April 28–30, 2011, pp. 62–67.



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централa: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: _____

Ваш број: _____

Датум: 2018-07-19

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Новом Саду, на 60. редовној седници одржаној дана 18.07.2018. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

Тачка 11.1. Верификација нових техничких решења и именовање рецензента

Тачка 11.1.1: У циљу верификације новог техничког решења усвајају се рецензенти:

1. др Вељко Папић, доцент, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
2. др Александар Купусинац, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

Назив техничког решења:

**“МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПОВРШИНА ОБУХВАЋЕНИХ УШТИНУТОМ
ХИСТЕРЕЗИСНОМ ПЕТЉОМ МЕМРИСТОРА ЗА СИНУСНУ ПОБУДУ”**

Аутори техничког решења: Анамарија Јухас, Станиша Даутовић

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Декан

Проф. др Раде Дорословачки

РЕЦЕНЗИЈА ПРЕДЛОЖЕНОГ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предмет: Мишљење о испуњености критеријума за признавање техничког решења

Назив техничког решења

Метода за одређивање површина обухваћених уштинутим хистерезисним петљом мемристора на синусну побуду

Аутори: Анамарија Јухас и Станиша Даутовић

Техничко решење је развијено у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32016, руководилац пројекта: Проф. др Љиљана Живанов

Образложење

Мемристор су привукли много пажње како научне заједнице, тако и индустрије због атрактивних особина као што су нанометарске димензије, мала потрошња, велика брзина и могућност вишебитног записа. Предвиђа се да ће будуће генерације рачунарских меморија, као и реконфигурабилна логичка кола, бити базирани на мемристорима.

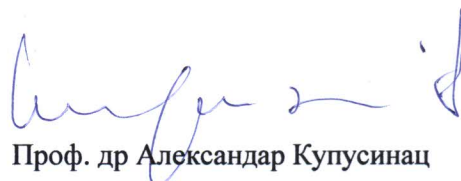
У техничком решењу је приказана нова метода за одређивање површина обухваћених уштинутим хистерезисним петљом у случајевима идеалног и идеалног генеричког мемристора на синусну побуду. Као илустрација примене развијене методе, приказано је како се она може успешно применити за одређивање површина обухваћених хистерезисним петљом у случају идеалног мемристора са коначним бројем вредности мемристансе, као и у случају када се мемристанса може описати као полиномијална функција променљиве стања, чиме су такође обухваћени и случајеви када се мемристанса може апроксимирати са део по део константном функцијом или са коначним бројем чланова развоја у Маклеронов ред. Метода је илустрована и за одређивање површина обухваћених хистерезисним петљом за ХП мемристор када се користи нелинеаран модел са прозорском функцијом. Метода је омогућила да се покаже како тип симетрије мемристансе за дати почетни услов и побуду утиче на површину и да се одреде критичне вредности почетног услова и амплитуде побуде које ће довести до колапса хистерезисне петље и њене дегенерације у нелинеарну криву.

Површине обухваћене уштинутим хистерезисним петљом, као и њихова промена са фреквенцијом, имају значајан утицај на избор могућих примена одређеног типа мемристора. Помоћу овог техничког решења се могу на лак начин одредити површине обухваћене хистерезисним петљом у случајевима идеалног и идеалног генеричког мемристора на синусну побуду, као и анализирати смањење ових површина са порастом фреквенције.

Закључак

На основу свега наведеног, предлажем да се Техничко решење под називом „**Метода за одређивање површина обухваћених уштинутим хистерезисним петљом мемристора на синусну побуду**“ чији су аутори Анамарија Јухас и Станиша Даутовић прихвати као ново техничко решење на пројекту ТР-32016 Министарства просвете, науке и технолошког развоја и класификује као резултат: **М85-НОВА МЕТОДА**.

У Новом Саду,
22. 08. 2018. године



Проф. др Александар Купусинац
Факултет техничких наука
Универзитет у Новом Саду

РЕЦЕНЗИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Метода за одређивање површина обухваћених уштинутом хистерезисном петљом мемристора на синусну побуду“

аутори: Анамарија Јухас, Станиша Даутовић

пројекат: TR32016 Министарства просвете, науке и технолошког развоја

Кратак приказ разматраног техничког решења

У техничком решењу је развијена нова метода за израчунавање површине листа (енг. *Lobe Area*, кратко енг. LA, срп. ЛА) уштинуте хистерезисне петље (енг. *Pinched Hysteresis Loop*, кратко енг. PHL, срп. ПХЛ), која се јавља као један од квалитативних индикатора мемристивног понашања у $u-i$ равни. Метода је применљива за идеалан мемристор и идеалан генерички мемристор (прва два мемристивна елемента из широко прихваћене хијерархије Леона Чуе), у случају када су они побуђени струјном или напонском простопериодичном синусном побудом, што је уобичајен случај приликом карактеризације мемристора.

У првом делу техничког решења је приказано стање решености овог проблема у свету и дат исцрпан преглед постојећих начина израчунавања ПХЛ ЛА мемристора доступних у литератури: а) интеграљење по времену у $u-i$ равни, б) интеграљење по времену производа извода мемристансе по наелектрисању $dM(q)/dq$ и трећег степена струје $i^3(t)$ и в) интеграљење по флуксу у случају рачунања ПХЛ ЛА преко тзв. акције и коакције мемристора, тј. у случају рачунања ПХЛ ЛА из конститутивне релације у $\phi-q$ равни (равни флукс-наелектрисање). У другом делу су приказане теоријске основне предложеног новог начина рачунања ПХЛ ЛА, базираног на опису идеалног/идеалног генеричког мемристора у тзв. равни мемристанса-променљива стања (енг. *Memristance-vs-State map*). У истом одељку је успостављена веза између рачунања ПХЛ ЛА за идеални мемристор у $M-q$ равни и на бази конститутивне релације.

У другом делу техничког решења, предложени нов начин одређивања ПХЛ ЛА је илустрован на следећим примерима: а) мемристанса $M(q)$ је полиномијална функција q , б) мемристанса $M(q)$ је део-по-део константна функција q , в) апроксимативна мемристанса $M(q)$ за тзв. Hewlett Packard (енг. HP, срп. ХП) ХП-модел мемристора, која се такође може класификовати као део-по-део константна функција q , г) линеаран модел напоном контролисаног ХП мемристора, д) нелинеаран модел струјом контролисаног ХП мемристора, са две различите прозорске функције предложене у литератури. У претходно наведеним примерима, случајеви а)-г) се односе на идеалне мемристоре, а последњи случај под д) на идеални генерички мемристор.

У трећем делу техничког решења, дате су две интерпретације одређивања ПХЛ ЛА, повезане са: а) генерализованом парношћу/непарношћу мемристансе $M(q)$ и б) геометријском интерпретацијом у $M-q$ равни.

Оцена техничког решења

Разматрани проблем је актуелан и за његово решавање постоји континуалан инжењерски интерес, што се може закључити на основу бројних чланака објављених од 2012. године до данас.

Предложеном новом методом за израчунавање ПХЛ ЛА идеалног/идеалног генеричког мемристора у терминима мемристансе и променљиве стања се ова површина може израчунати и у случајевима локално активних мемристора, односно мемристора чија конститутивна релација у $q - \varphi$ равни није искључиво монотона функција.

Развијена нова метода је лако применљива на велики број фабрикованих и математички моделованих мемристора доступних у литератури, што је илустровано са шест студија случајева анализираних у техничком решењу.

Презентовани резултати се на једноставан начин могу проширити на рачунање ПХЛ ЛА у одговарајућим равнима, за идеалне мем-кондензаторе и мем-калемове.

Значај остварених резултата

Користећи резултате претходног техничког решења „Метода за моделовање понашања идеалног мемристора“ истих аутора, из резултата мерења се може формирати апроксимативни модел идеалног мемристора, и на основу резултата овог техничког решења израчунати ПХЛ ЛА за различите амплитуде и фреквенције синусних напонских и струјних побуда, односно верификовати различити „отисци прста“ мемристора, као што су постојање уштинуте хистерезисне петље, смањивање њене површине са порастом фреквенције и тежња ПХЛ ка једнозначној функцији када фреквенција побуде тежи бесконачности.

У случају идеалних и идеалних генеричких мемристора, површина хистерезисне петље у $u-i$ равни, добијена као збир два листа ове петље, мора бити једнака нули, као последица дефиниција/особина које гарантује/захтева теорија. Предложеном новом методом датом у оквиру овог техничког решења се може тачно израчунати површина два листа петље, и утврдити колико фабриковани мемристор одступа од жељеног понашања идеалног/идеалног генеричког мемристора. На овај начин се такође могу израчунати губици (дисипирана снага) који су једнаки површини хистерезисне петље уколико је она различита од нуле, односно утврдити да ли је мемристор не-енергетски двокрајни елемент (уколико је збирна површина ПХЛ једнака нули).

Закључак

Разматрано техничко решење је оригинално, применљиво и значајно у области моделовања особина идеалног/идеалног генеричког пасивног/локално активног мемристора. У том смислу га позитивно оцењујем и предлажем да се техничко решење „Метода за одређивање површина обухваћених уштинутом хистерезисном петљом мемристора на синусну побуду“, чији су аутори Анамарија Јухас и Станиша Даутовић прихвати и класификује као резултат „М85-нова метода“.

Београд
20. август 2018.


Доц. др Вељко Шапић
Електротехнички факултет
Универзитет у Београду



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: 01.сл
Ваш број: _____
Датум: 2018-10-02

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 64. редовној седници одржаној дана 26.09.2018. године, донело је следећу одлуку:
-непотребно изостављено-

ТАЧКА 13.1. Верификација нових техничких решења и именовање рецензената

Тачка 13.1.3.: На основу позитивног извештаја рецензената верификује се техничко решење (М85) под називом:

Назив техничког решења:

“МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПОВРШИНА ОБУХВАЋЕНИХ УШТИНУТОМ ХИСТЕРЕЗИСНОМ ПЕТЉОМ МЕМРИСТОРА ЗА СИНУСНУ ПОБУДУ”

Аутори техничког решења: Анамарија Јухас, Станиша Даутовић

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешкович, дипл. правник



Декан

Проф. др Раде Дорословачки