Стручни критички осврт

Стеван Цветићанин, *Фракционо и тополошко уопштење једначине телеграфичара као модел електричног вода*. Докторска дисертација. Нови Сад: Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, 2017, 14 предстрана + 84 стр. (основни текст на штампаним странама 1–80; литература од стр. 81). Ментори: др Милан Рапаић и др Душан Зорица; комисија за оцену и одбрану: В. Стрезоски (председник), Т. Атанацковић, Т. Шекара, Ј. Микуловић и оба ментора. Научна област електротехничко и рачунарско инжењерство, научна дисциплина електроенергетика. Отворени приступ: НаРДуС.

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација узима за предмет уопштавање класичног Хевисајдовог модела електричног вода с расподељеним параметрима, и то на два начина. Први је фракциони: конститутивне релације калема и кондензатора замењују се релацијама с изводом нецелог реда Риман–Лиувиловог типа, чиме се у модел уводе меморијски ефекти. Други је тополошки: у редну грану елементарног кола додаје се фракциони кондензатор, па се разматра осам начина везивања отпорника, калема и кондензатора у тој грани. Из једне од тих топологија изводи се уопштена фракциона једначина телеграфичара, за коју се, за полубесконачан вод с нултим почетним условима, Лапласовом трансформацијом и контурном интеграцијом одређује транзијентни одзив и спроводи фреквенцијска анализа функције преноса. Тежиште рада је, дакле, теоријско — извођење, класификација и аналитичко решавање — а не мерење ни примена на конкретан вод; то ће се показати важним при мерењу свих замерки које следе.

Пре свега осталог ваља изрећи мерило, изричито и без изузетка. Рукопис је предат најкасније 13. јула 2017. године, на дан именовања комисије за оцену и одбрану, па се рад овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и знању који су постојали и били доступни средином јула 2017. Ништа настало касније није мерило: ни доцнија издања стандарда и прописа, ни радови објављени после тог тренутка. То правило важи и за списак литературе овог осврта — свака његова јединица објављена је пре рока, изузев саме дисертације и реферата комисије, те чињеница историјске природе које се временом не мењају (уз назнаку).

Наводи из дисертације преносе се дословно, у наводницима, ћирилицом како стоје у раду, с бројем штампане стране у загради (нпр. (стр. 44)); штампана страна једнака је страни PDF-а умањеној за четрнаест. Наводи страних извора такође су дословни, с

тачним извором. Текст рада ослоњен је на целовит препис дисертације, а оцена комисије на реферат.

Још једно ваља рећи на почетку, јер одређује како се чита цео методолошки слој рада. Дисертација је по методу теоријска: она изводи, доказује и класификује, а не поставља емпиријске хипотезе које би се потврђивале или оповргавале мерењем. Строго мерило потврђене или оповргнуте хипотезе на њу се стога не сме применити механички; изостанак изричито постављене хипотезе није, за овакав рад, суштински недостатак (в. одељак III). То штити рад од једне врсте пренаглашене замерке, али не и од захтева да оно што тврди буде тачно, доследно спроведено и одмерено у свом домету.

II Шта рад доноси

Осврт је дужан да почне оним што рад јесте, јер је то и највећи део онога што он вреди.

Прво, рад доноси потпуну и систематичну енумерацију тополошких уопштења редне гране. Пошавши од тога да је елементе редне гране „могуће повезати на осам различитих начина“ (стр. 30), он за сваку од осам топологија изводи подужну импедансу, припадну фракциону парцијалну једначину, њен ред и коефицијент простирања, и разврстава их на таласно-дифузне, дифузно-дисипативне и специјалне. Независна провера тих осам израза потврђује да су тачни. Уз то, рад показује да промена оточне гране не даје нови модел, и то не тврди него изводи: „израз за подужну оточну адмитансу биће исти за све топологије“ (стр. 30).

Друго, рад одабир носеће топологије не заснива на пуком математичком мерилу него и на физичком, и то мерило примењује самокритички. Топологију редне везе отпорника, калема и кондензатора одбацује зато „што не одговара физичком смислу Џуловог“ (стр. 41) ефекта — јер би у њој губици потицали од везаних наелектрисања — а бира ону код које постоји пренос временски константних сигнала и код које Џулови губици настају само услед кретања слободних наелектрисања. Таква критичка пажња при одабиру предмета права је вредност рада.

Треће, носећи резултат — уопштена фракциона једначина телеграфичара (3.52) — изведен је у целини, корак по корак, из система елементарног кола, с изричитим навођењем нултих фракционих почетних услова и правила композиције Риман–Лиувилових оператора; независна провера потврђује да је извођење коректно. Рад притом демонстрира општост тог резултата: показује да он „има веома широк дијапазон једначина на које се своди за специјалне случајеве параметара“ (стр. 44), а за нулту редну временску константу своди се тачно на фракциону једначину телеграфичара из претходног одељка.

Четврто, у глави о аналитичком решењу услов на који се цела конструкција ослања није постулиран него доказан: „Овим је доказано да две наведене класе параметара заиста испуњавају“ (стр. 50) услов да аргумент функције ψ остаје у полуотвореном интервалу (−π, π]. Ишчезавање сваког лука контуре изведено је експлицитним неједнакостима и асимптотиком коефицијента простирања, а не паушално, а класификација тачака гранања сведена је на знак једне скаларне критеријумске функције — елегантно и, за све приказане параметре, нумерички потврђено средство.

Пето, глава о графичком приказу доноси корисно дијагностичко средство и поштено тумачење. Ред фракционог калема добија јасан физички смисао — „индуктивност фракционог реда описује елемент“ (стр. 65) чија су својства између отпорника и калема — а карактер процеса очитава се из нагиба логаритма аргумента функције преноса на високим учесталостима, „чиме се једноставно на основу нагиба може одредити карактер“ (стр. 76) процеса и проценити ред једначине. Тамо где одзив има необичан облик, рад то не прећуткује: одзив с негативним вредностима означава као „дифузног типа, иако необичан“ (стр. 70).

Најзад, ваља рећи и оно што надилази појединачне вредности. Рад поштено оцртава сопствени домет — већ у глави о класичној једначини напомиње да „Важно је напоменути да ефекат рефлексије није разматран“ (стр. 18), а при извођењу транзијентног одзива изричито признаје да се задржава на двема довољним класама параметара јер „Како није акценат на утврђивању класа параметара“ (стр. 49) не тежи потпуном њиховом одређењу. Уз то, тамо где су се тврдње рада могле сравнити рачуном — композиције фракционих оператора, извођење система елементарног кола, свођење на специјалне случајеве, знак чланова функције ψ, критеријумска функција — у највећем делу показале су се тачним. Та поузданост математичке основе није споредна: она је оно што уопште омогућава да се о раду расправља овако детаљно.

III Предмет рада, полазишта и метод

Рад не поставља ниједну изричиту хипотезу ни формулисан циљ; реч „хипотеза“ у тексту не постоји, а предмет је одређен описно, док закључак набраја шта је урађено и шта се из тога може закључити. За теоријску дисертацију у којој се допринос исказује изведеним резултатима и класификацијом то је прихватљив облик; ипак, изричито формулисан циљ дао би већу проверљивост појединим тврдњама закључка, о којима ће бити речи у одељцима VII и X. Реч је о примедби на артикулацију полазишта, не о суштинском недостатку.

Методе које рад најављује и оне које стварно користи поклапају се: Хевисајдов приступ преко елементарног кола, фракционе конститутивне релације Риман–Лиувиловог типа, Лапласова трансформација, контурна интеграција, асимптотска фреквенцијска анализа модула и аргумента функције преноса, те верификација поређењем с Де Хуговим алгоритмом и с Пост–Видеровом формулом. Све су методе примерене проблематици; примедбе које следе тичу се строгости примене, не избора метода.

Две методолошке напомене ваља изрећи већ овде, начелно.

Прва се тиче физичке заснованости уопштења. Фракционе конститутивне релације уводе се претпоставком — „Уколико се уведе претпоставка да флукс кроз калем не зависи само од тренутне вредности струје“ (стр. 26) него и од њене историје — уз аналогију с меморијским ефектима и уз позивање на постојеће фракционе моделе елемената кола. Избор Риман–Лиувиловог извода и нултих почетних услова ослања се на референтне монографије фракционог рачуна које рад и користи (Podlubny, 1999; Kilbas, Srivastava, Trujillo, 2006), а против паушалног приговора да су Риман–Лиувилови почетни услови нефизички стоји то што им се физички смисао може дати (Heymans, Podlubny, 2006) — што иде у прилог раду. Оно што остаје као ограничење јесте да сам облик релације у контексту вода није поткрепљен мерењем и да изабране бездимензионе вредности параметара немају непосредну везу са стварним водом који се наводи као мотивација; рад то, доследно свом тону, и означава као задатак даљег истраживања.

Друга се тиче темеља класификације осам топологија. Разврставање почива на вези између реда једначине и врсте процеса (таласни, дифузни, дисипативни), преузетој аналогијом с класичном једначином телеграфичара и доследно проверене преко коефицијента простирања и високофреквенцијске асимптотике, али за фракциони случај недоказаној као општа теорема о карактеру решења. То не обеснажује класификацију — она репродукује све класичне граничне случајеве и потврђена је нумерички у глави 5 — али би било прецизније да је природа тог мерила (интерпретативна, по аналогији) изричито наглашена, и да одабир носеће топологије, који ионако почива и на физичким мерилима, не буде наизглед сведен на ред једначине.

IV Математички алати и класична једначина телеграфичара (главе 1–2)

Прва глава изричито је експозиторна — рад сам наводи да су теореме дате „детаља и без доказа, а преузете су из следеће литературе“ (стр. 5) — а носећи допринос смештен је, по изјави рада, у главе 3–5. Стога ниједна замерка у овом делу не погађа

носеће резултате; све су формалне, терминолошке или се тичу експозиторног апарата на који се каснија поглавља ослањају. То их не чини безначајним, јер се управо на тај апарат позивају извођења, али их ваља мерити по томе шта дирају.

Неколико омашки у самим формулама треба забележити, уз напомену да се ниједна не преноси у резултате. У синусном облику инверзије Лапласове трансформације (1.24) штампарски стоји косинус уместо синуса; да је намеравани облик синусни, показује сам рад, који формулације (1.23)–(1.25) назива еквивалентним, а потврђује и стандардни облик инверзије (Kuhlman, 2013). У радном облику (1.28) експонент је штампарски испао без чиниоца који зависи од времена, што је очигледно из непосредно суседних израза, а коришћена, брже конвергентна апроксимација исправна је. Опис да квадратни корен комплексног броја даје „конјуговано комплексна“ решења непрецизан је — два корена су супротна — али је сама формула (1.15) с двоструким знаком исправна, а у примени се узима главна грана. Иста формула прећутно претпоставља да аргумент није на негативној реалној полуоси (за реалан негативан аргумент, уз конвенцију да је знак нуле нула, даје нулу уместо чисто имагинарне вредности); у примени рада имагинарни део коефицијента простирања није нула, па то нема практичних последица.

Терминологија математичких алата на неколико места није уједначена. Назив „Кошијева интеграциона теорема“ стоји над интегралном формулом за изводе (1.17), док иста синтагма на стр. 53, при извођењу инверзије, означава тврдњу да је контурни интеграл аналитичке функције једнак нули — а ту тврдњу је глава 1 назвала „Основна Кошијева теорема“ (стр. 5). Формуле су садржински тачне и из контекста је свуда јасно на коју се теорема мисли, али исти назив за две различите теореме, употребљен у двема главама, треба ускладити; реч је о питању унутрашње доследности апарата, па се води као таква, а не позивањем на неки спољни назив. Слично, опис да фракциони интеграл „поседује својства полугрупе, што значи да за њега важи асоцијативност“ терминолошки је непрецизан — суштина је индексни закон, који рад изричито и тачно наводи одмах затим — а синтагма „бесконачни извод лика“ уз Пост–Видерову формулу неспретна је (мисли се на извод реда који расте неограничено).

Друга глава изводи класичну једначину телеграфичара из Хевисајдовог елементарног кола и разлаже је на специјалне случајеве — солидна експозиторна основа за уопштења која следе. И ту постоји неколико омашки које не дирају резултат. Уз преписивање једначине у сажети облик (2.22) константа која множи први извод по времену исписана је погрешно; исправну вредност намеће и сама еквиваленција с полазном једначином и каснији исказ рада да је однос двеју карактеристичних величина такав да поткорена величина остаје позитивна за све позитивне подужне параметре (што следи из неједнакости између аритметичке и геометријске средине). У једначинама (2.30)/(2.31) одштампан је погрешан знак уз

квадрат коефицијента, али опште решење (2.32) с реалним експонентима и иста једначина у глави 4 показују да је намеравани знак супротан. Коефицијент уз хиперболички синус у (2.34) погрешно је исписан, што не утиче на функције преноса вода коначне дужине јер је реч о слободној константи коју одређује гранични услов. У изразу за аргумент функције преноса (2.53) удвостручена је ознака те функције. Тврдња да је зависност логаритма аргумента од учесталости „линеарна“ у самој учесталости требало би да гласи да је афина у логаритму учесталости — што одговара тачним једначинама на које се позива и на чему класификација и почива.

Историјска атрибуција класичне једначине телеграфичара Хевисајду у суштини је тачна — њему се с правом приписује формулација пуне једначине, с индуктивношћу. Прецизније би, међутим, било навести да ју је он развио у низу ранијих радова (сабраних у *Electrical Papers*, 1892), а не тек у делу из 1899. на које се рад позива, и напоменути да дифузиони прекурсор без индуктивности потиче од В. Томсона (Келвина) из 1855. године — што су чињенице историјске природе које се временом не мењају, а које рад и сам обрађује као специјалан случај. Реч је о лакој непрецизности без утицаја на резултате.

Најзад, у обема уводним главама има већи број словних омашки (у предговору и захвалници, међу осталим, „инфитезималне“ (стр. III), „конденазтора“ (стр. III), „елемнатрног“ (стр. V), „березервној“ (стр. VII); у глави 1 и „фракционионог“, „Риман-Лувиловог“, „Лаплсове“; у натпису Слике 2.2 „Елемнтарно“). Оне не дирају садржај и исправљају се лектуром према правопису српскога језика (Матица српска, 2010), али их за коначну верзију треба уклонити.

V Фракциона и тополошка уопштења и извођење уопштене једначине (глава 3)

Ово је прва од трију глава које рад означава као носиоце свог доприноса, и она то оправдава. Енумерација осам топологија је потпуна, за сваку су изведени подужна импеданса, ред једначине и коефицијент простирања, а изразом (3.37) показано је да се анализа тачака гранања своди на облик независан од топологије — што уопштивост поступка стварно поткрепљује, а не само тврди. Извођење уопштене једначине телеграфичара из система елементарног кола спроведено је у целини и коректно, а њено свођење на претходне моделе за граничне вредности параметара доследно демонстрира да уопштени модел садржи раније као специјалне случајеве. Композиција Риман–Лиувилових оператора у том извођењу математички је исправна: за композицију код које је унутрашњи ред у отвореном интервалу (0, 1) довољан је нулти услов на унутрашњу функцију, што је нултим фракционим почетним условима обезбеђено; рад је ту довољност могао изричито образложити једном реченицом, будући да позива правило композиције „под претпоставком“ једног услова, без експлицитне провере за спој редова већег од један.

Замерке у овом делу су формалне или се тичу потпуности излагања, и ниједна не обара резултат.

Неколико их је редакцијских. У конститутивној релацији фракционог кондензатора (3.4) експонент оператора словно је исписан другом ознаком него у пратећем изразу, тексту и услову реда у самој једначини. Уз подужну оточну адмитансу (3.8) стоји јединица [S], док би, пошто је реч о подужној величини — граници количника прираштаја адмитансе и прираштаја дужине — по самом раду (који за одговарајућу класичну величину пише [S/m]) и по међународном еталону за писање величина и јединица (BIPM, *The International System of Units*, 8. изд., 2006, од. 5.3) требало да гласи [S/m]; реч је о унутрашњој неусаглашености која се не преноси у даљи рачун. У почетним и граничним условима (3.49)–(3.50), у ћириличном тексту, задржана је енглеска реч „and“ уместо „и“ — редакцијски заостатак из припреме рукописа. Наслови слика осам топологија (3.2–3.9) идентични су реч у реч, па не одређују коју топологију која слика приказује; разликовање се ослања на цртеж и на текст уз слику. Уз то, у овом делу има већи број словних грешака (нпр. „топлошко“, „матетматички“, „на онову“), исправљивих лектуром према правопису (Матица српска, 2010). За натписе и разликовање слика упутна је и пракса уређивања техничких издања која тражи да натпис сам идентификује приказ (IEEE Editorial Style Manual, 2016), али је садржинско језгро тих замерки у уредности, не у тачности.

Две примедбе тичу се потпуности излагања, а не грешке. Изрази (3.13)–(3.36) за седам од осам топологија дати су без појединачног извођења; поступак је, међутим, за све идентичан (импеданса из шеме, квадрат коефицијента простирања као производ подужне импедансе и адмитансе, превод у временски домен) и приказан је у целини за репрезентативну топологију, а независна провера потврђује да су свих осам израза тачни — па изостанак седам појединачних извођења не угрожава поузданост. Подужна редна капацитивност не уводи се истим граничним изразом као остали подужни параметри, него само посредно, преко фракционе временске константе која је изричито дефинисана; засебна гранична линија за њу зато није неопходна, али би је ради потпуности изложбе ваљало навести.

Најзад, мотивациона тврдња да је та топологија дала добре резултате у микро- и наноелектроници „до реда десетина гигахерца“ квантитативан је емпиријски исказ и требало је да на том месту носи конкретну референцу; општа литература о фракционим CMOS on-chip и тракастим водовима наведена је, међутим, непосредно раније (стр. 29), па је реч о изостанку цитата на самом месту изношења, а не о непоткрепљеној тврдњи. Слично, преглед стања о фракционим једначинама телеграфичара сажет је на једну страну, с временском одредницом „у последње време“ коју би ваљало прецизирати; кључне разлике према постојећим фракционим једначинама (тополошки члан у редној грани, полубесконачан домен) ипак су јасно назначене.

VI Аналитичко решење: тачке гранања, контурна интеграција и фреквенцијска анализа (глава 4)

Глава о аналитичком решењу методолошко је језгро рада и, по ономе што се могло проверити, коректна је и целовита: раздвајање реалног и имагинарног дела функције ψ, доказ носећег услова за две класе параметара, увођење критеријумске функције која дели три случаја тачака гранања и извођење импулсног одзива контурном интеграцијом изведени су уредно. Оно што глави недостаје јесте потпуна строгост у изрицању претпоставки под којима све то важи.

Најважнија замерка тиче се управо тога. Носеће решење ослања се, поред доказаног услова на аргумент функције ψ, и на паушалну формулацију да је „претпостављено је да су испуњени и сви остали неопходни услови“ (стр. 48), а ти услови се не наводе. Уџбеничка норма за Бромвичеву инверзију контурном интеграцијом кад постоје тачке гранања — управо она коју рад и користи (Duffy, 2004; Debnath, Bhatta, 2007) — тражи да се изричито наведу тачке гранања, изабране гране и засеци и оправда затварање контуре, као и да се потврди да конструисано решење задовољава полазни систем и почетне услове у временском, а не само у Лапласовом домену. Треба, ради правичности, одмах рећи да рад највећи део тога и чини: он уводи услов на аргумент функције ψ и детаљно анализира тачке гранања — што је баш оно што та норма тражи — па је замерка о потпуности излагања засека и о питањима постојања и јединствености, а не о одсуству поступка.

С том главном замерком повезана је и процена ишчезавања интеграла по луку у левој полуравни, где се користи позитивност косинуса аргумента коефицијента простирања, показана само за десну полураван; закључак остаје тачан, али би образложење било потпуно да се ослони на доминацију опадајућег експоненцијалног чиниоца над растућим, што асимптотика коефицијента простирања обезбеђује. У истом реду је и сужење домета: аналитичко решење важи под наведеним условом, а рад тај услов гарантује за две *довољне* класе параметара, свесно не одређујући потпун скуп; одабране класе покривају физички релевантне режиме, али обим важења решења ван њих остаје отворен и то би требало изричито навести као ограничење.

Остале примедбе су ситније и претежно редакцијске, али их ваља уклонити. У физичком тумачењу услова на једну од класа поткрала се омашка у смеру неједнакости за однос редне временске константе и количника оточних параметара; исправан смер слаже се с истовремено изведеним и коришћеним закључком о поретку двеју временских константи, па дефиниција класе и резултати остају нетакнути. При извођењу решења за пар конјуговано комплексних тачака гранања замењени су натписи двеју кружних контура; поступак је за обе симетричан, па омашка не дира резултат. Величина уведена као „импулсни одзив“ на два места

назива се „сопствени одзив“ (стр. 57), што у теорији система означава други појам; реч је о истом објекту, па је исправка терминолошка. Размерне (димензионе) величине наведене су међу „бездимензијских величина“ (стр. 47), иако су бездимензијски тек нормализовани количници; назив „константа“ за коефицијент простирања је, насупрот томе, устаљен (константан је дуж хомогеног вода), уз напомену да он зависи од комплексне променљиве. При извођењу асимптотика реалног и имагинарног дела коефицијента простирања упуте на изразе воде на реални и имагинарни део функције ψ, а не на сам коефицијент простирања, из кога они тек следе — што треба исправити. Најзад, водећи члан имагинарног дела функције ψ при ниским учесталостима исписан је као степен реда једног од параметара, док је прецизно водећи најнижи од трију редова; како све компоненте теже нули, закључак о статичкој дисипацији остаје неизмењен. И у овој глави има већи број словних грешака које ваља исправити лектуром (Матица српска, 2010).

VII Графички приказ, верификација и тумачење резултата (глава 5)

Глава доноси графички приказ решења за низ бездимензионих параметара, поређење аналитичког решења с двема нумеричким инверзијама и тумачење таласног и дифузног карактера одзива. Њене вредности наведене су у одељку II — физичко тумачење фракционог реда, дијагностика карактера процеса преко нагиба логаритма аргумента функције преноса, троструко унакрсно поређење и поштено означавање необичних одзива. Замерке се тичу онога што се из приказа закључује и како се тврдње формулишу.

Прва је природа саме верификације. Поређење је спроведено графички, без бројчане мере одступања и без навођења нумеричких поставки поступака (дужине и корака Де Хугове суме, детаља убрзавања конвергенције, начина рачунања извода реда 4, 8 и 12), па се приказ може поновити само начелно. Начело добре праксе да се за сваки резултат забележи како је добијен изричито је формулисано у струковним препорукама за поновљивост рачунарских истраживања: „For Every Result, Keep Track of How It Was Produced“ (Sandve, Nekrutenko, Taylor, Hovig, 2013). Треба у корист рада рећи да су параметри сваке слике наведени у потписима, па је то начело делом испуњено. Треба рећи и да сама верификација није пуко визуелно поређење: она је слагање двеју концепцијски различитих нумеричких инверзија с аналитички изведеним изразом, а поређење аналитичког решења с независним нумеричким поступцима признат је облик потврде аналитике (de Hoog, Knight, Stokes, 1982; Abate, Whitt, 2006; Kuhlman, 2013). Оно што недостаје јесте бројчана мера одступања и терминолошко разграничење — верификација (слагање с концептуалним моделом) наспрам валидације (слагање са стварношћу), како га одређују стандарди те области (AIAA G-077-1998; ASME V&V 10-2006).

Отуда и прецизнија примедба на исказ да се из поклапања закључује „исправност добијеног аналитичког решења“ (стр. 67). Оба нумеричка поступка полазе од исте функције преноса, па њихово слагање с аналитичким изразом потврђује коректност инверзионог поступка, а не независно да решење задовољава полазну једначину и почетне услове — то је изведено аналитички у глави 4. Формулацију би зато ваљало прецизирати на исправност инверзије. У истом смеру иду и обрти „вероватно не одлази у бесконачност“ (стр. 70) и „вероватно путује у бесконачност“ (стр. 72) при тумачењу понашања максимума профила: то су илустративне напомене без граничне анализе положаја максимума. Само разликовање дифузног од таласног карактера, међутим, не почива на њима него на реду највишег извода и високофреквенцијској асимптотици функције преноса, који су изведени — па закључак о карактеру остаје поткрепљен. На местима закључака у овој глави повремено стоје обрти попут „Јасно је“ и „Очекује се“ где би прикладнији био изричит упут на одговарајуће изразе из главе 4; реч је о стилско-формалној слабости, а не о непоткрепљеном исказу.

Једна нумеричка омашка погађа управо дијагностику коју рад истиче као предност. У реченици уз слику „где су приказани таласно-дифузни процеси“ (стр. 77) нагиб аргумента за високе учесталости исписан је као половина збира двају редова, али с вредношћу која заправо одговара самом збиру (изостало је дељење са два); дијагностички закон и вредност наведена за дифузно-дисипативни пример на истом месту тачни су, па се грешка не преноси даље, али је баш у дијагностичком исказу ваља исправити.

Тумачење одзива с негативним вредностима поштено је означено као необично, а изведено по изричитом критеријуму (асимптотско гашење и просторна ограниченост). Оправдано би било додати кратко физичко тумачење негативних вредности импулсног одзива — што отвара питања пасивности и каузалности модела, за која постоје меродавни оквири (Bagley, Torvik, 1986; Triverio, Grivet-Talocia, Nakhla, Canavero, Achar, 2007; Hartley, Veillette, Adams, Lorenzo, 2015) — али његово изостајање не поништава дату класификацију.

Најзад, за исту функцију наизменично се користе називи „критеријумска функција“ и „функција разграничења“ (стр. 65); реч је о истом објекту, увек уз исту ознаку, па би доследан назив побољшао прегледност. На више слика нема легенде, па се придруживање врста линија случајевима мора читати из текста (где је, додуше, дато прецизно), а има и словних грешака у прози и натписима слика — све исправљиво лектуром и уређивањем (Матица српска, 2010; IEEE Editorial Style Manual, 2016).

VIII Једначине, ознаке, јединице, слике и језик

Сабране на једно место, формалне слабости рада су бројне, али лаке и претежно редакцијске. У једначинама и ознакама: погрешно исписана карактеристична константа уз (2.22), погрешан знак уз квадрат коефицијента у (2.30)/(2.31), удвостручена ознака у (2.53), погрешан коефицијент у (2.34), несагласна ознака експонента у (3.4), јединица [S] уместо [S/m] уз (3.8) (BIPM, 8. изд., 2006), замењени натписи контура у извођењу за конјуговано комплексне тачке гранања, погрешне унутрашње упуте на изразе при асимптотикама, и нумеричка омашка у нагибу уз слику 5.20. Ниједна од њих не дира резултат, али се на неколико места види да су настале при слагању текста и преводу с претходне, енглеске верзије (задржано „and“ у (3.49)–(3.50)).

Међународни еталон за писање величина изричито допушта аутору да изабере сопствену ознаку за величину ако јој јасно наведе значење (BIPM, 8. изд., 2006, од. 5.3), па се ауторов избор интерне нотације, уведене у глави 1, овде не узима заману. Оно што остаје јесте да јединицу уз подужну величину и наведене несагласности треба ускладити.

Језик рада је стручан и, у целини, јасан, али словне грешке провлаче се кроз све главе, укључујући наслове одељака и натписе слика, и нарушавају уредност текста; за коначну верзију их треба пажљиво уклонити према правопису српскога језика (Матица српска, 2010). Терминолошке неуједначености (двоструки називи Кошијевих теорема, „импулсни“/„сопствени одзив“, „критеријумска функција“/ „функција разграничења“) не почивају ни на једном спољном пропису него на захтеву унутрашње доследности рада, и као такве се и износе.

IX Научни апарат

Научни апарат рада је, у целини, уредан и доследан. Рад цитира бројем у угластој загради; свих педесет четири јединице пописа позивају се у тексту бар једном, ниједно позивање не упућује на непостојећу јединицу, а нумерација прати ред првог позивања. Посредног цитирања нема — темељно Хевисајдово дело цитира се из изворника. Доследан нумерички стил допуштен је општим еталоном библиографског навођења, који не прописује једну шему (ISO 690:2010), па се у том погледу апарату нема шта приговорити.

Замерке су формалне. У попису има неколико куцаћих омашки у називима појединих јединица које не мењају идентитет извора. Конференцијске јединице и једно поглавље у зборнику наведени су без бројева страна, недоследно у односу на друге зборничке јединице (ISO 690:2010 тражи потпуност јединице, укључујући прилоге у зборницима); за сопствене конференцијске радове стране у тренутку предаје још нису биле познате. Једна конференцијска јединица упућује на скуп

одржан после предаје рукописа, али је рад био прихваћен пре предаје, па позивање није неправилно — требало би, међутим, да у попису носи ознаку „у штампи“. У истом попису недоследно се мешају српски и енглески маркери записа и, местимично, два писма унутар јединице; идентитет извора је јасан, али би уједначен библиографски стил побољшао уредност. Спорни су и подаци о издавачу и тому најстарије јединице, које би ваљало усагласити са наводом у тексту.

Кључна документацијска информација носи куцаће омашке, укључујући и наслов на енглеском, што је уочљиво јер је реч о идентификационом апарату; поједина поља (датум одбране, УДК) установа попуњава накнадно по обрасцу. Редослед двојице равноправних ментора варира по документима (у документацијској информацији обрнут у односу на реферат и запис у репозиторијуму) — формална неусаглашеност без садржинског значаја.

Једини садржински значајнији налаз у апарату јесте ограничена поновљивост слика: рад не именује програм ни нумеричке поставке, а програмски код и бројчани подаци нису приложени. Име програма и нумеричке поставке уз приложен код омогућили би тачну, а не само начелну поновљивост (Sandve и др., 2013).

X Однос рада и реферата комисије

Проверљиве бројчане оцене реферата слажу се са стварним стањем: пет поглавља, педесет четири библиографске јединице, тридесет седам слика и графика, осамдесет четири стране. Радови кандидата доследно су везани за допринос, а њихове категорије (часописни рад највишег ранга и два конференцијска рада) одговарају важећем правилнику о вредновању научноистраживачких резултата („Сл. гласник РС“ 24/2016, с изменама 21/2017 и 38/2017); услов о објављеном или прихваћеном раду пре предаје на оцену тиме је испуњен (Правила докторских студија Универзитета у Новом Саду, чл. 20). Састав комисије с два ментора и члановима с друге установе у складу је с прописаним оквиром (иста Правила, чл. 22).

Две оцене реферата ваља, међутим, одмерити према стању у тексту. Прва је формулација да дисертација „нема ни суштинских, ни формалних недостатака“. За суштински део рад ту оцену у највећем делу издржава — математички апарат је, по ономе што се могло проверити, исправан. За формални део, међутим, оцена не стоји дословно: постоје бројне словне грешке, погрешно исписана јединица уз (3.8), несагласна ознака експонента у (3.4), погрешан знак у (2.30)/(2.31), нумеричка омашка у нагибу за слику 5.20 и омашке у документацијској информацији. Ти недостаци не погађају суштину, али их има.

Друга се тиче трију исказа закључка које реферат преузима као утврђене. Тврдња да су „добијена аналитичка решења засигурно тачна“ (стр. 80) јаче је формулисана него што графичко поклапање без бројчане мере одступања носи — прикладније би било

рећи да је исправност потврђена с високом поузданошћу. Тврдња да „изведени модел уважава нове, непознате ефекте“ (стр. 80) изведена је из профила за изабране бездимензионе параметре, без поређења с мерењем — прикладније је рећи да су ефекти нестандардни у односу на класичне таласне и дифузне процесе, док је физичка провера изричито означена као даљи задатак. И оцена да је приказ логаритма аргумента функције преноса „много сврсисходније и једноставније“ (стр. 80) вредносни је суд; уместо њега прикладније би било навести конкретну дијагностичку предност (линеарност на високим учесталостима, из чијег се нагиба непосредно очитава ред једначине). Напокон, тврдња да је поступак примењив на „безброј других могућих фракционих и тополошких уопштења модела електричног вода“ (стр. 80) шира је од показаног: општост поступка јесте поткрепљена изразом (3.37), али су конкретне класе параметара и услови конвергенције изведени за једну топологију, па се на друге исти кораци преносе уз проверу тих услова. Пошто рад не поставља хипотезе, нема ни потврђених хипотеза у строгом смислу; реч је о доследно изведеним, али местимично прејако формулисаним закључцима.

XI Шта остаје

Кад се све сабере, добија се оцена коју вреди изрећи у једном комаду, без ублажавања и без претеривања.

Дисертација Стевана Цветићанина солидан је и математички добро изведен рад који доноси заокружено фракционо и тополошко уопштење једначине телеграфичара као модела електричног вода: потпуну класификацију осам топологија редне гране, извођење уопштене фракционе једначине телеграфичара у целини, аналитичко решење за полубесконачан вод контурном интеграцијом с доказаним условом на аргумент функције ψ и класификацијом тачака гранања преко једне критеријумске функције, те фреквенцијску анализу с корисним дијагностичким средством — нагибом логаритма аргумента функције преноса. Носеће резултате рад изводи, а не постулира: услов на аргумент је доказан, ишчезавање контурних лукова показано неједнакостима, свођење на класичне случајеве демонстрирано. Тамо где се могло проверити рачуном, математичка основа рада држи, а домет је поштено оцртан — рефлексија, вод коначне дужине, просторна фракционализација и поређење с мерењем изричито су означени као оно што рад не обухвата.

Слабости су, по оцени овог осврта, троврсне, и ниједна не руши носеће резултате. Прва је строгост аналитичког слоја: носеће решење ослања се на неисказане остале неопходне услове, засеци вишезначних функција и питања постојања и јединствености се не разматрају, а важење решења изведено је за две довољне класе параметара без одређења потпуног скупа. Друга је природа верификације и домет закључака: поређење потврђује инверзију, а не да решење задовољава полазну једначину; нема бројчане мере одступања ни описа нумеричких поставки, а три

закључка (засигурно тачна решења, нови непознати ефекти, предност дијагностике) формулисана су прејако у односу на приказано. Трећа је формални слој: словне грешке кроз све главе, неусаглашене ознаке и јединице, неуједначена терминологија и омашке у документацијској информацији.

Изнад свега тога стоји једна правилност: тамо где рад изводи и рачуна, брижљивији је него тамо где формулише закључке и оцењује домет. Управо зато највећи део онога што треба поправити не тражи ново истраживање него доследно спровођење онога што је рад већ започео.

За евентуално монографско издање или наставак истраживања најплодније би, по оцени овог осврта, биле следеће измене. Прво, употпунити строгост аналитичког решења: изричито навести засеке и изабране гране вишезначних функција, оправдати затварање контуре наведеним, а не паушалним условима, и потврдити да конструисано решење задовољава систем и почетне услове у временском домену, уз назнаку домета важења ван двеју разматраних класа параметара. Друго, верификацију допунити бројчаном мером одступања и описом нумеричких поставки, приложити код и податке, и терминолошки разграничити верификацију од валидације, а закључке о засигурно тачним решењима и новим, непознатим ефектима формулисати према ономе што приказано носи; физичку проверу мерењем и расправу о пасивности и каузалности (нарочито за одзиве с негативним вредностима) спровести или изричито оставити за даље истраживање. Треће, спровести пажљиву редакцију: исправити словне грешке, ускладити јединицу уз (3.8) на [S/m], ознаку експонента у (3.4), знак у (2.30)/(2.31), карактеристичну константу уз (2.22) и нагиб уз слику 5.20, ујединити називе Кошијевих теорема и функције која дели случајеве тачака гранања, и снабдети слике легендама и разликовним натписима. Уз такву редакцију — која у највећем делу не тражи ново истраживање него довршетак већ отворених линија — ова дисертација остаје вредан и употребљив допринос теорији електричних кола и водова и примени фракционог рачуна у моделирању електричног вода.

Литература

Предмет осврта

Цветићанин, Стеван, *Фракционо и тополошко уопштење једначине телеграфичара као модел електричног вода* [докторска дисертација]. Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, Нови Сад, 2017. (НаРДуС.)

Реферат Комисије о оцени докторске дисертације Стевана Цветићанина, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, 2017.

Фракциони рачун и физички смисао фракционих модела

Podlubny, I., *Fractional Differential Equations*. Mathematics in Science and Engineering 198. San Diego: Academic Press, 1999.

Kilbas, A. A., Srivastava, H. M., Trujillo, J. J., *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. North-Holland Mathematics Studies 204. Amsterdam: Elsevier, 2006. ISBN 9780444518323.

Heymans, N., Podlubny, I., „Physical interpretation of initial conditions for fractional differential equations with Riemann–Liouville fractional derivatives“, *Rheologica Acta* 45(5) (2006) 765–771. DOI 10.1007/s00397-005-0043-5.

Bagley, R. L., Torvik, P. J., „On the fractional calculus model of viscoelastic behavior“, *Journal of Rheology* 30(1) (1986) 133–155. DOI 10.1122/1.549887.

Hartley, T. T., Veillette, R. J., Adams, J. L., Lorenzo, C. F., „Energy storage and loss in fractional-order circuit elements“, *IET Circuits, Devices & Systems* 9(3) (2015) 227–235. DOI 10.1049/iet-cds.2014.0132.

Интегралне трансформације, контурна инверзија и модели вода

Duffy, D. G., *Transform Methods for Solving Partial Differential Equations*. 2nd ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2004. ISBN 9781584884514.

Debnath, L., Bhatta, D., *Integral Transforms and Their Applications*. 2nd ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2007. ISBN 9781584885757.

Triverio, P., Grivet-Talocia, S., Nakhla, M. S., Canavero, F. G., Achar, R., „Stability, causality, and passivity in electrical interconnect models“, *IEEE Transactions on Advanced Packaging* 30(4) (2007) 795–808. DOI 10.1109/TADVP.2007.901567.

Нумеричка инверзија Лапласове трансформације и верификација

de Hoog, F. R., Knight, J. H., Stokes, A. N., „An improved method for numerical inversion of Laplace transforms“, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 3(3) (1982) 357–366. DOI 10.1137/0903022.

Abate, J., Whitt, W., „A unified framework for numerically inverting Laplace transforms“, *INFORMS Journal on Computing* 18(4) (2006) 408–421. DOI 10.1287/ijoc.1050.0137.

Kuhlman, K. L., „Review of inverse Laplace transform algorithms for Laplace-space numerical approaches“, *Numerical Algorithms* 63 (2013) 339–355. DOI 10.1007/s11075-012-9625-3.

AIAA G-077-1998, *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*. Reston: AIAA, 1998.

ASME V&V 10-2006, *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*. New York: ASME, 2006. ISBN 079183042X.

Поновљивост, ознаке, јединице, стил и апарат

Sandve, G. K., Nekrutenko, A., Taylor, J., Hovig, E., „Ten Simple Rules for Reproducible Computational Research“, *PLoS Computational Biology* 9(10) (2013) e1003285. DOI 10.1371/journal.pcbi.1003285.

BIPM, *The International System of Units (SI)*. 8th ed. Sèvres: BIPM, 2006.

ISO 690:2010, *Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources*. Geneva: ISO, 2010.

IEEE Editorial Style Manual (for Authors). New York: IEEE, 2016.

Језик

Правопис српскога језика. Измењено и допуњено (екавско) издање. Нови Сад: Матица српска, 2010.

Формални оквир докторских студија (важећа верзија на рок)

Правила докторских студија Универзитета у Новом Саду (пречишћен текст), Сенат УНС, 19. 3. 2009, с изменама и допунама до 25. 2. 2013 (бр. 01-170/1).

Правилник о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, „Сл. гласник РС“ 24/2016, 21/2017, 38/2017.