Стручни критички осврт

Јелена М. Сворцан, *Методологија интегралне анализе и оптимизације аеродинамичких површина ваздухопловних конструкција*. Докторска дисертација. Београд: Машински факултет Универзитета у Београду, 2014, 135 нумерисаних страна (главни текст и литература), уз ненумерисану номенклатуру и прилоге А–В (ментор проф. др Слободан Ступар; Комисија: С. Ступар, А. Симоновић, С. Гвозденовић). Одбрањена 16. јула 2014. Отворени приступ: НаРДуС.

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација не решава један аеродинамички проблем, него гради поступак: затворен и аутоматизован низ геометријског моделирања, прорачуна струјања и оптимизације, који се затим испробава на три примера различите природе — раванском прорачуну мале ветротурбине с вертикалном осом обртања (Даријеусовог типа), раванском окозвучном струјању кроз линеарну каскаду профила NACA 8410 с активним млазевима и неуронским мрежама, и просторном опструјавању крила ONERA M6 које маше, пропиње се, савија и увија. Сам рад свој предмет одређује методолошки и тачно: „Другачије речено, предмет истраживања подразумева развој појединачних потпроцеса потребних за спровођење нумеричког експеримента, њихово међусобно повезивање, оцену валидности добијених резултата и употребљивости за даљи рад.“ (стр. 123). Полазиште је инжењерско и изречено без околишења: „Притом се кренуло од становишта да струјно поље не мора бити потпуно познато да би било могуће извући корисне закључке.“ (стр. 3). Рад, према томе, не тврди да је нашао тачна решења појединачних проблема, него да је направио поступак који ради и чији су резултати употребљиви; мера у којој су употребљиви јесте, дакле, главно питање овог осврта.

Катедра је дописом бр. 557/2 од 7. маја 2014. обавестила Наставно-научно веће о завршетку дисертације, а Веће је 8. маја 2014. (одлука бр. 557/3) образовало Комисију за оцену и одбрану; рукопис је, дакле, предат почетком маја 2014. Извештај Комисије датиран је 19. маја 2014, а одбрана је одржана 16. јула 2014. Рад се стога овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и знању који су постојали и били доступни пре маја 2014. Ништа што је настало касније није мерило: ни доцнија издања програмских приручника, ни каснији водичи за верификацију и валидацију, ни каснији акти Универзитета.

Наводи из рада дати су дословно, у писму и правопису рада, с бројем стране по штампаној пагинацији (главни текст на стр. 1–128), према примерку у Националном репозиторијуму дисертација. Извештај Комисије потиче из материјала 8. седнице Већа научних области техничких наука од 7. јула 2014, заједно с одлукама Наставно-научног већа и Већа.

За верификацију и валидацију прорачуна струјања, за извештавање о стохастичкој оптимизацији и за проверу неуронских мрежа постоје писани документи објављени пре рока: уређивачка политика часописа *Journal of Fluids Engineering* о нумеричкој тачности (JFE, 1993), поступак Селика и сарадника (Celik и др., 2008), водич NASA/NPARC (2008), извештај Оберкампфа и Тракана (Oberkampf, Trucano, 2002), смернице Бара и сарадника (Barr и др., 1995) за извештавање о хеуристичким експериментима и правила Прехелта (Prechelt, 1994) за мерење перформанси неуронских мрежа. Уређивачке политике формално обавезују само ауторе тих часописа, а смернице нису норме; овде служе као писани траг онога што се 2014. тражило, не као обавеза коју би дисертација прекршила. Тамо где писаног мерила нема — за прелаз с раванског прорачуна на стварну турбину поправним фактором, за верификацију спрегнутог прорачуна флуида и структуре и за стручну терминологију на српском — приговор се води као аргумент из саме грађе рада.

II Шта рад доноси

Осврт почиње оним што дисертација јесте, јер је то највећи део онога што она вреди.

Прво, рад доноси стварно изведен, затворен поступак прорачуна, а не његову скицу. Параметарски модел лопатице у програму CATIA v5 (VBScript), скрипт у IronPython-у који у окружењу ANSYS Workbench покреће геометрију, мрежу и прорачун, и корисничке функције у C-у у програму ANSYS FLUENT повезани су тако да се стотине конфигурација рачунају без ручног уплитања. Рад тачно каже зашто је то услов свега осталог: „Основна предност оваквог приступа је што је поступак моделирања или прорачуна могуће поновити произвољан број пута што представља потребан услов за спровођење оптимизације одабраних параметара.“ (стр. 32). У оптимизацији ветротурбине мрежа је параметризована тако да све конфигурације имају исту топологију и исти број ћелија — „Тако је постигнута условна једнакост мрежа“ (стр. 52) — чиме се из функције циља уклања шум који би настао од промене мреже.

Друго, најзанимљивија методолошка новина рада јесте спрега нестационарног прорачуна струјања с једначином обртања ротора. Угаона брзина ротора није задата, него се рачуна из аеродинамичког момента и момента инерције: „Нова вредност угаоне брзине ротора рачуна се након сваког временског корака.“ (стр. 70). Кôд је приложен (Прилог А), а трапезно правило из израза (5.19) у њему је доследно

спроведено. Рад новину тачно омеђује према литератури: „У литератури се могу наћи примери разматрања променљиве брзине ветра у нумеричким студијама [49, 72] али је тада промена брзине била задата по синусном закону и опет, угаона брзина ротора је била унапред задата.“ (стр. 68). Поступак је постављен тако да се лако допуни моментом оптерећења, о чему ће бити речи у одељку V.

Треће, рад доноси сопствену програмску реализацију вишекритеријумске оптимизацијеројем честица с архивом ε-ћелија, спрегнуту с аутоматским генерисањем мреже и прорачуном методом коначних запремина, с Парето скупом над 320 прорачуна струјања. Други критеријум није произвољан, него проистиче из тачно уоченог ограничења оптимума по осредњеном коефицијенту снаге: „Иако неки радни режим даје најбоље осредњене глобалне параметре, детаљнијом анализом може се видети да управо тај режим може значити значајно веће оптерећења за лопатицу и њен знатно краћи радни век.“ (стр. 62). Парето приступ је исправно схваћен — избор компромиса препушта се пројектанту: „Према томе, коначно одабрани дизајн мале ветротурбине са вертикалном осом обртања представља избор аутора.“ (стр. 67).

Четврто, нумеричка поставка за ветротурбину проширена је на седам изведених турбина пречника од 0,6 до 17 m и коефицијента испуне од 0,18 до 1,0, уз признање да је грађа за поређење оскудна: „Међутим, доступних података нема много и веома се међусобно разликују“ (стр. 53).

Пето, у каскади рад уводи критеријум одвајања који је промишљен с обзиром на стварну примену. Уместо нултог тангенцијалног напона на зиду, чије је мерење, како рад каже, „тешко изводљиво у пракси“ (стр. 82), критеријум се ослања на брзину у тачкама близу отвора, која се може мерити, а правило активације гласи: „Млазеви се активирају само уколико долази до коначног одвајања струјања и то почевши од млаза који се налази низводно од тачке одвајања.“ (стр. 82). Функције су написане за паралелни решавач.

Шесто, у трећем примеру изграђена је у комерцијалном решавачу целина од деформабилне мреже, структурног модела греде, спреге и генетског алгоритма око њих, а кôд за увијање приложен је у Прилогу B. Добро је изабран и оглед који показује зашто је спрега уопште потребна: поређење једноитеративне и спрегнуте анализе на слици 7.17 (стр. 118–119).

Седмо, рад на много места сам омеђује сопствене резултате, и то тамо где се резултат појављује; о тим оградама биће речи у одељцима V–VII.

Најзад, бројеви рада у највећем делу могу се пратити једни према другима. Подаци о крилу ONERA M6 и аеротунелу S2MA, о профилу NACA 8410 у каскади и о турбини у Упсали на стр. 68 верно су пренети из изворника, двоструки вишеструјни модел исправно је изведен, а једначине Спаларт–Алмарасовог и прелазног γ-Reθ модела

одговарају приручнику програма FLUENT. Порекло дела улазних и валидационих података за ветротурбину описано је, додуше, непрецизно (одељак V). Већина слабости које следе може се исправити без новог прорачуна.

III Циљ, хипотезе и метод

Рад не поставља научне хипотезе. Уместо њих поставља општи циљ — „Општи циљ ове дисертације био је развој валидне методологије интегралног процеса моделирања, анализе и оптимизације чији резултати имају даљу употребну вредност у домену ваздухопловства.“ (стр. 5) — и седам развојних задатака, међу њима „изналажење одговарајућих нумеричких поставки које на задовољавајући начин могу да представе разматране проблеме“ (стр. 5). Правилник о већима научних области Универзитета у Београду (чл. 20) и Правилник о докторским студијама Машинског факултета (чл. 25) траже „основне хипотезе“ само у образложењу теме, па њихов изостанак у тексту дисертације није формална замерка. Методолошки, међутим, он има последицу: ни валидност методологије ни представљање проблема „на задовољавајући начин“ (стр. 5) нигде нису одређени бројем ни прагом, па се испуњеност општег циља може проценити само описно, из поређења у главама 5–7, а закључак се не враћа на седам циљева један по један. Изричит критеријум прихватљивости — рецимо, дозвољено одступање положаја и висине максимума коефицијента снаге, или одступање коефицијента притиска у мерним пресецима — ојачао би закључке рада више него иједан додатни пример.

Наслов („ваздухопловних конструкција“) шири је од предмета: од три примера само је крило ONERA M6 ваздухопловни елемент, а рад сам тачније каже шта им је заједничко: „Оно што је заједничко одабраним тест-примерима је што они у својој основи представљају струјање око аеропрофила“ (стр. 3). Ова примедба не погађа резултате.

Увод домет провере уопштава: „па су све коришћене нумеричке поставке усвојене након детаљне анализе и поређења са доступним експерименталним подацима“ (стр. 3). С мерењима су, међутим, поређене основне поставке сва три примера, а не и њихова проширења — млазеви, кретање и деформација крила, неуронске мреже и резултати оптимизације. Рад то ограничење на другим местима и сам признаје, делом изричито, делом посредно: на стр. 80 наводи да се „међу доступним експерименталним подацима не налазе се карактеристике разматраних геометријских модела“ (стр. 80), а на стр. 117 да је модул клизања намерно низак, усвојен „да би се постигле деформације довољног интензитета за даљу анализу“ (стр. 117); реч је, дакле, о преширoко сроченој реченици, не о прикривању. И реченица „У ту сврху, развијени су сопствени алгоритми прилагођени разматраним категоријама проблема.“ (стр. 3) јача је од онога што рад показује: реч је о сопственим

програмским реализацијама познатих метода уз описана прилагођења, што рад на стр. 6 прецизније каже: „након чега су развијени сопствени кодови посебно прилагођени разматраним проблемима“ (стр. 6).

Поновљивост заслужује још једну реч, јер се тиче интегралног поступка као целине. Рад прилаже изводе три програма — функције за обртање ротора при променљивом ветру, скрипт за тренирање неуронске мреже и функције за увијање крила — и то је вредан део рада. Прилагање извода, а не целог кода, овде се не узима заману. Изворни кôд највећег дела поступка није дат: макрои за CATIA, скрипти за Workbench, реализације роја честица, вишекритеријумског роја и генетског алгоритма, функције за изворне чланове млазева и за савијање крила. Нису дати ни коефицијенти роја честица, ни скуп за тренирање мрежа, а генератор случајних бројева у Прилогу А покреће се временом, па ни приложени прорачун не може бити тачно поновљен. Смернице Бара и сарадника за извештавање о хеуристичким експериментима траже да „the algorithm and its implementation (the code) should be described in sufficient detail to allow replication, including any parameters, pseudo-random number streams, and nontrivial data structures employed“ (Barr и др., 1995, стр. 23, § 7.1), а Ајбен и Јеласити (Eiben, Jelasity) истичу да су резултати еволуционог рачунања тешко поновљиви управо зато што „many details of the EAs are not explicitly specified and the source code is not made available“ (Eiben, Jelasity, 2002, стр. 582). Рад, дакле, омогућава да се поступак изгради изнова по опису, али не и да се огледи непосредно понове.

IV Физички и нумерички модели, верификација и валидација

Трећа глава добро одваја подлогу од онога што се стварно користи — „Три коришћена модела у овом раду су: Спаларт-Алмарас, k-ω SST и прелазни SST модел.“ (стр. 21) — и тачно наводи ограничења осредњених једначина при природном прелазу. Запис неколико једначина ипак није исправан; довољно је навести примере. Једначина енергије (3.4) написана је у мешовитом облику, с временским чланом ρ∂e/∂t уместо ∂(ρe)/∂t, што за стишљив флуид није тачно. Израз (3.25) за турбулентну вискозност SST модела изоставља ограничивач напона смицања $SF_2/(a_1\omega)$, по коме модел носи име, па у записаном облику одговара стандардном k-ω моделу. Прелазни SST модел назван је „модел четвртог реда“ (стр. 23), а реч је о моделу с четири транспортне једначине. Сличних омашака има и у запису k-ε модела (3.22), у одељку о граничном слоју и уз интерполационе шеме на стр. 28. Ниједна од њих не прелази у резултате: прорачуни су рађени у FLUENT-у, који решава исправне облике једначина. Али глава која је подлога рада мора бити исправна и сама по себи.

Верификација прорачуна слабија је страна рада. За ветротурбину и каскаду студије мреже, броја итерација, величине ротирајућег домена и временске поделе описане су само речима — „Опет, изведена је одговарајућа студија и закључено да се може усвојити нижа вредност броја итерација за довољно фину временску поделу.“ (стр. 53) — без приказаних бројева. За крило ONERA M6 поређене су две мреже с мерењима (слика 7.4), али без броја ћелија ређе мреже, без интегралних коефицијената по мрежама и без бројчане мере разлике. Дискретизациона грешка није процењена ни на један од поступака објављених пре рока. Уређивачка политика часописа *Journal of Fluids Engineering* (ASME) тражи да се прикажу решења на више битно различитих мрежа: „Solutions over a range of significantly different grid resolutions should be presented to demonstrate grid-independent or grid-convergent results.“ (JFE, 1993, критеријум 4), да се критеријум заустављања итеративног прорачуна прецизно објасни (JFE, 1993, критеријум 5) и да се у нестационарним прорачунима покаже временска тачност: „In time-dependent solutions, temporal accuracy must be demonstrated so that the spurious effects of phase error are shown to be limited.“ (JFE, 1993, критеријум 6). Поступак Селика и сарадника (Celik и др., 2008) тражи три битно различите мреже, при чему је пожељно да однос профињења буде већи од 1,3. Последица није формална: без процене нумеричке несигурности не може се рећи да ли су мале разлике међу решењима с највишим коефицијентом снаге у оптимизацијама (коефицијент снаге око 0,44–0,48 на сликама 5.9–5.11, разлике реда 1 % међу јединкама генетског алгоритма) веће од дискретизационе грешке. Иста уређивачка политика, треба рећи у корист рада, признаје да ће се многи практични инжењерски прорачуни и даље радити на једној мрежи — „many practical engineering calculations will continue to be performed by first order methods, on a single fixed grid“ (JFE, 1993, завршни пасус) — али их не сматра прикладним за архивски часопис. Рад тај компромис признаје: „Треба напоменути да је тренутни циљ био спровести процес оптимизације и да је то морало бити реализовано на мали уштрб тачности и у складу са доступним рачунарским ресурсима.“ (стр. 52).

Временска дискретизација заслужује посебну напомену. У симулацији теренског рада „Куранов број је износио 20 све време прорачуна.“ (стр. 70), уз временску шему првог реда, а у Прилогу А ротор се обрне за 3° по кораку; провера независности резултата од временског корака није приказана, а величина корака у тексту главе 5 није наведена. Симао Фереира и сарадници (Simão Ferreira и др.), у раду из 2007. о динамичком слому на раванској ветротурбини, препоручују временски корак од највише четвртине степена заокрета ротора, који „is recommended as maximum time step for a relevant simulation“ (Simão Ferreira и др., 2007, стр. 6). У корист рада иде то што избор временске шеме првог реда није произвољан: уз адаптивни временски

корак, какав рад задаје корисничком функцијом, програм у издању 13.0 не допушта интеграцију по времену другог реда (ANSYS, 2010, § 28.14.2). Недостатак је, дакле, у изостанку провере, не у избору шеме.

Валидација је у сва три примера исказана поређењем на сликама и описним оценама, типа *задовољавајуће* и *чини се*, без бројчане мере одступања и без унапред задатог прага. Оберкампф и Тракано управо ту праксу описују као слабу: „Comparison of computational results and experimental data on a graph, however, is only incrementally better than a qualitative comparison.“ (Oberkampf, Trucano, 2002, стр. 16). Код ветротурбине проблем је оштрији, јер поставка није независна од мерења с којима се пореди. Рад каже: „Све одлуке о прорачунској мрежи и нумеричком моделу донете су након опсежног испитивања, а на основу доброг или лошег поклапања са доступним експерименталним подацима.“ (стр. 44), и то понавља на стр. 53. Затим се израчуната крива скалира поправним фактором изведеним из односа максимума, што по конструкцији изједначава висину максимума рачуна и мерења. Такво поређење проверава само облик криве и положај максимума. Исти извор такву праксу назива калибрацијом: „This type of calibration is expedient in certain engineering situations, but it is weakly defensible.“ и „the term calibration more appropriately describes the process than does validation“ (Oberkampf, Trucano, 2002, стр. 61), а уређивачка политика *Journal of Fluids Engineering* додаје да „‚reasonable agreement‘ with experimental data alone will not be enough to justify a given single-grid calculation, especially if adjustable parameters are involved“ (JFE, 1993, критеријум 10). Исти извори, ради правичности, калибрацију у инжењерским околностима не одбацују, а поређење с поузданим мерењем признају као основ валидације; рад је то поређење урадио на свим основним поставкама и занемарене утицаје унапред набројао. Замерка је у имену, не у поступку: поређење на сликама 5.7 и 5.15 има карактер калибрације и провере сагласности, а не независне валидације, и то је требало рећи изричито.

Код каскаде поставка је проверена на расподели коефицијента притиска по профилу (слика 6.1) и на зависности односа притисака од излазног Маховог броја (слика 6.2). Расподеле се добро поклапају с мерењима, осим иза врха подпритиска, где рад сам признаје највеће неслагање: „Иако је тешко поредити их јер се највеће неслагање резултата догађа управо у најкритичнијим зонама, чини се да прелазни SST модел даје резултате који боље описују физику струјања“ (стр. 79). На слици 6.2а опсези прорачунатих и измерених тачака за модел 1 се готово не преклапају, а за модел 2 прорачун лежи 7–8 % изнад мерења. Уз то, опис поставке не наводи Рејнолдсов број, интензитет турбуленције на улазу, удаљеност првог чвора од зида y+, критеријум конвергенције ни начин осредњавања нестационарног прорачуна. За прелазни модел то није ситница: аутор тог модела, Лангтри (Langtry), пише да „In order to capture the laminar and transitional boundary layers correctly, the grid must have a y+ of approximately 1. If the y+ is too large (i.e. > 5) than the transition onset location moves

upstream with increasing y+“ (Langtry, 2006, стр. 42), а исто стоји и у приручнику програма FLUENT. Израз *валидирана* у закључку — „дефинисана је и валидирана одговарајућа нумеричка поставка“ (стр. 124) — зато је јачи од показаног; тачније би било: проверена поређењем с расположивим мерењима.

Код крила ONERA M6 поставка на структурираној мрежи од преко 1,1 милиона ћелија с k-ω SST моделом прати мерења у већини пресека, а неслагање на крају крила рад наводи: „Генерално, нумерички резултати задовољавајуће прате карактер измерених вредности у свим пресецима, осим у последњем, на самом крају крила, где није постигнуто успешно симулирање струјања по горњаци у близини излазне ивице.“ (стр. 105). Та оцена не помиње да у пресецима z_rel = 0,44–0,8 прорачун на гушћој мрежи не репродукује двоструки (λ) ударни талас по горњаци; то је требало навести, уз бројчану меру слагања.

V Ветротурбина с вертикалном осом: модели, оптимизација и симулација теренског рада

Пета глава је најобимнија и носи највећи део доприноса рада, па се у њој вредности и слабости раздвајају степеницу по степеницу.

Модели из одељка 5.1. Двоструки вишеструјни модел по Парашивоју и вртложни модел приказани су једначинама и алгоритмима (слике 5.3 и 5.4) довољно да се могу програмирати, а изведени су исправно. Резултати тих сопствених кодова у дисертацији, међутим, нису приказани, осим скице трага на слици 5.5 без параметара турбине и режима; рад за њих упућује на објављени чланак [89]. Тиме допринос 4 у самом тексту дисертације остаје без приказане провере.

Изворни подаци. Експериментални извори су у целини добро изабрани и претежно примарни — извештаји Sandia, NREL и AGARD, архива NASA NPARC и теза из Упсале — и цитирани су на месту употребе. Улазни подаци о аеропрофилима нису, ипак, свуда тачно описани. За профиле NACA 0015–0025 рад каже да су преузети из [79], „где је описано детаљно мерење аеропрофилних карактеристика над целим опсегом нападних углова“ (стр. 36). Извештај Sandia из кога су подаци преузети каже, напротив, да су табеле добијене комбинацијом прорачуна и мерења: карактеристике пре слома узгона и на његовом почетку израчунате су програмом PROFILE, а из мерења су преузете само карактеристике у каснијем слому и после њега (Sheldahl, Klimas, 1981, стр. 11). Рад на стр. 7 те податке тачније назива „измерене или прорачунате“; на стр. 36 и на слици 5.24, где се статичке криве називају експерименталним, то треба ускладити. За профиле Gemini, NACA 2415 и Avistar наведен је извор [77], који садржи мерења других шест профила (Selig, McGranahan, 2004), па се порекло њихових карактеристика не може пратити. Најважнија несагласност тиче се мерења за поређење: мерења на слици 5.15а

(турбина Sandia пречника 5 m, лопатице NACA 0015 тетиве 15,2 cm) не потичу из цитираног извештаја [78], који описује исту турбину с лопатицама друге геометрије: „The curved part of each blade is a NACA-0012 airfoil section with a 19-cm chord“ (Sheldahl, Blackwell, 1977, стр. 11); по свему судећи потичу из каснијег испитивања које рад не наводи, па се поређење не може пратити до наведеног извора. Турбина Sandia од 17 m из истог извора [94] у табели 5.2 описана је тетивом 61,0 cm и испуном 0,14, а у табели 5.3 тетивом 53,3 cm и испуном 0,19, без напомене да је реч о двема конфигурацијама. Турбина од 12 kW из Упсале у табели 5.3 наведена је с профилом NACA 0018, а на стр. 68 — исправно — с NACA 0021; није јасно којим је профилом рачунат тест-пример на слици 5.15в.

Избор турбине у одељку 5.2. Поставка с моделом Спаларт–Алмарас и клизајућим мрежама проверена је на три изведене турбине, уз поправни фактор који је речима „дефинисан као однос максималног израчунатог и максималног измереног коефицијента снаге за сваки модел“ (стр. 45). На сликама 5.7 и 5.15 њиме се, међутим, множи израчуната крива, што одговара обрнутом односу — измереног према израчунатом максимуму. Примена је доследна, па резултати нису погођени, али дефиниција у тексту треба да се исправи, јер се иста величина касније моделује изразом (5.15). Други несклад је бројчан: „Интересантно је да се вредности поправног фактора ова два модела разликују, 0.65 за први модел у поређењу са 0.85 за други модел.“ (стр. 45), а легенда слике 5.7б гласи 0.65Cp; фактор 0,6 из легенде слике 5.7в у тексту се не помиње. Пошто на вредности 0,85 почива образложење усвојене вредности — „За даље испитивање усвојена је вредност поправног фактора 0.8 јер су разматране вредности пречника ветротурбине много ближе другом него првом валидационом моделу.“ (стр. 46) — неусклађеност треба отклонити, и уз то рећи зашто није усвојено 0,85. Трећи валидациони модел (пречник 2,5 m, испуна 0,96) не слаже се с мерењем ни по облику ни по положају максимума ($\lambda \approx 2{,}2$ према $\approx 1{,}6$). Рад закључак, треба признати, правилно ограничава на случајеве који га подржавају — „Може се закључити да је у случају прва два валидациона модела тренд криве коефицијента снаге очуван и да је увођењем поправног фактора постигнуто задовољавајуће поклапање резултата.“ (стр. 45) — али неслагање трећег модела не коментарише.

Сам избор турбине носи три несагласности и једну методолошку слабост. Прво, за изабрану турбину наведени су „коефицијент испуне 0.3, односно тетива лопатице 18cm“ (стр. 49), што уз дефиницију $\sigma = Bc/r$ из Номенклатуре, три лопатице и $r = 0{,}9$ m није сагласно: излази тетива од 9 cm, а 18 cm одговара $\sigma = Bc/D$; из рада се не види која је вредност коришћена. Друго, као средња брзина ветра у граду „усвојена је вредност 5m/s“ (стр. 49), без извора, а из те вредности следи оптимални коефицијент рада 2,83 и тиме избор турбине. Вишегодишње средње брзине ветра на станици Београд–Врачар за период 1981–2010 крећу се, по правцима, од 1,7 до 3,1 m/s (РХМЗ, снимак странице од 22. 2. 2014), па вредност 5 m/s треба читати као

усвојену прорачунску брзину, не као средњу брзину у граду; на оптимизацију у одељку 5.3 она не утиче. Треће, при r = 0,9 m и σ = 0,3 профили NACA 0018 и NACA 2415 на сликама 5.9 и 5.11 постижу исти или нешто виши максимум при приближно истом коефицијенту рада као NACA 0021; пресудио је навод из [43] о дебљим профилима, и рад избор изричито назива селекцијом аутора. Уз то, као методолошка слабост, избор модела Спаларт–Алмарас у одељку 5.2 није образложен, а у одељку 5.3 рад прелази на k-ω SST јер се боље слаже с мерењима. Селекција из одељка 5.2 тиме почива на поставци која је касније напуштена, и није проверено да ли би нова поставка довела до истог избора.

Проширена валидација у одељку 5.3. Седам тест-примера (табела 5.3) широка је основа за раванску методологију. Али поправни фактор на слици 5.15 креће се од 0,6 до 1,15, и начин његовог одређивања у одељку 5.3 није описан. Вредност већа од 1 није у складу с тумачењем фактора као збира занемарених губитака — „поново је уведен поправни фактор чија је улога да обухвати све физичке утицаје који су занемарени“ (стр. 53) — него показује да фактор упија и грешку самог раванског модела; он је збирна емпиријска корекција. Оцена „Чини се да коришћени модел очувава облик криве коефицијента снаге.“ (стр. 55) важи за већину примера; код примера в прорачун не прати пад криве иза максимума, а код примера ђ (испуна 0,96) максимум је померен, што рад не коментарише. Тиме и оцена са стр. 58 — „закључено је да је могуће са задовољавајућом тачношћу симулирати оптимални радни режим“ (стр. 58) — важи уз ограду изложену у одељку IV.

Раванска анализа. Рад образлаже раванску анализу овако: „Анализа је и даље раванска јер би тродимензионални модел само довео до огромног повећања у трајању прорачуна без икаквих значајних побољшања у резултатима.“ (стр. 51). Друга половина те реченице није поткрепљена и противречи и цитираном извору и самом раду. Рад [43], на који се дисертација иначе ослања, каже: „The performance coefficient predicted by the two dimensional computational model is significantly higher than that of the experimental and the three dimensional CFD model.“ (Howell и др., 2010, сажетак), а сам рад на стр. 55 наводи да поправни фактор „Тај фактор у себи, између осталог, садржи утицај тродимензионалности и нестационарности брзине ветра“ (стр. 55). Раванска анализа у оптимизацији оправдана је трајањем прорачуна, уз корекцију поправним фактором — не истоветношћу резултата.

Полуемпиријске зависности. Зависност оптималног коефицијента рада од испуне (5.14) служи само за избор средишње угаоне брзине, уз распон ±20 %, па је њена несигурност делимично покривена. Озбиљније је питање површи поправног фактора k_1 у изразу (5.15). Она је провучена кроз седам тачака из разнородних мерења, с назубљеним деловима, без описа поступка провлачења, а простор претраге протеже се делимично изван опсега података (испуна до 0,1, дебљина до 0,26), где се k_1 екстраполира. Кориговани коефицијент снаге, у коме k_1 у

разматраном домену варира отприлике од 0,6 до 1,2, јесте функција циља оптимизације. Положај оптимума може зато зависити од те површи више него од прорачуна струјања, а осетљивост оптимума на k_1 није испитана. Рад ограничење увиђа — „прилично је тешко извести тачне, дефинитивне закључке“ (стр. 56) — али је не преноси у закључак, који говори о полуемпиријским зависностима „поправног фактора којим је могуће кориговати резултате раванске анализе да би се добиле реалне, тродимензионалне, употребљиве вредности“ (стр. 124), без ограде. Као допринос може се бранити поступак извођења поправног фактора из мерења, а не општа употребљивост добијених зависности.

Једнокритеријумска оптимизација. Метода роја честица примењена је с 15 честица у 12 корака, по једанпут, а вредности коефицијената ω, C_1 и C_2 из израза (4.2) и праг слуђености честице нису наведени. Рад то образлаже: „У том смислу, коефицијенти који се појављују можда нису најбоље подешени“ (стр. 57) и „Основно ограничење у овој студији је дужина укупног времена прорачуна па број изведених итерација није велик.“ (стр. 60). Смернице Бара и сарадника ипак траже да се подешавања наведу и образложе — „the report should specify the parameter settings and how they were chosen. In particular, the values for any parameters associated with a stopping rule must be documented and justified.“ (Barr и др., 1995, стр. 25, § 7.5) — и да се при употреби генератора случајних бројева кôд испита с различитим почетним семенима (Barr и др., 1995, стр. 26, § 7.7). Исте смернице, треба додати, прихватају да се рачунско време узме у обзир, па скупа функција циља оправдава мали рој и мали број корака; не оправдава, међутим, изостанак параметара и поновљених покретања. Ток на слици 5.21 — побољшање до другог корака, затим десет корака без промене — из једног покретања не може се разликовати од раног застоја роја, а оцена „Опет, јасно је видљиво груписање честица око оптималног решења.“ (стр. 60) појачана је, јер путање честица на слици 5.22 покривају готово цео простор претраге. Исход оптимизације, најзад, није наведен бројем: оптимална испуна и дебљина могу се само очитати са слике 5.22 (приближно тетива 190 mm и дебљина 0,215), а кориговани оптимум $C_p \approx 0{,}45$ са слике 5.21 виши је од свих коригованих максимума у валидацији и од решења с највишим коефицијентом снаге у вишекритеријумској оптимизацији (0,3659 у табели 5.4), без коментара.

Динамички слом узгона. Одељак 5.3.2 појаву само најављује, како и сам каже: „Овде је само поменут још један пример феномена на који се мора пазити кад се спроводи нумеричка анализа“ (стр. 62). Уз слике 5.23–5.24 нису наведени конфигурација ни брзина ветра, а петље $Cl(\alpha)$ спајају силе из нестационарног прорачуна с геометријским нападним углом из (5.16), који занемарује индуковану брзину, па њихов облик не треба тумачити само као динамику граничног слоја.

Вишекритеријумска оптимизација. Други критеријум, разлика највећег и најмањег коефицијента узгона у једном обртају, представљен је као мера замора: „минималној разлици максималног и минималног коефицијента узгона чиме је описан опсег оптерећења које лопатица трпи“ (стр. 63). То је бездимензијски показатељ динамичности режима и близине слома узгона, а не мера амплитуде силе или замора, који зависе и од динамичког притиска и тетиве (а они се међу варијантама мењају), од броја циклуса и од материјала. Полупречник, искључен из прве оптимизације, овде је поново променљива, без навода којом је корекцијом тада добијен коефицијент снаге. Табела 5.4, насловљена као Парето скуп, наводи десет решења с највећим коефицијентом снаге, док Парето фронт на слици 5.26 има још око шест тачака с малим Cp; изостављање тог дела фронта није образложено. Закључак о оптималном дизајну — „средњу вредност коефицијента испуне (0.5 - 0.7)“ (стр. 67) — табела 5.4 подржава само делимично: пет од десет решења, међу њима четири с највећим коефицијентом снаге, има испуну 0,36–0,49.

Симулација теренског рада. Овде је методолошка новина рада највећа, и овде је приговор најтежи, јер погађа тврдњу закључка. Једначина обртања ротора (5.18)–(5.19) садржи само аеродинамички момент; момент генератора и губици нису моделовани (у Прилогу А момент је збир притисног и вискозног дела, а момент инерције задат је вредношћу 48 без образложења). Генератор је сведен на горњу границу угаоне брзине: „Угаона брзина може да расте до неке, унапред задате номиналне вредности (која је у реалности одређена генератором и/или редуктором)“ (стр. 70). Ротор зато убрзава ка слободном ходу — кориговани коефицијент снаге тежи нули при $\lambda \approx 7$ — док мерена турбина у Упсали, оптерећена генератором, ради при $\lambda \approx 1{,}7–4{,}5$. Поређење с мерењем (слике 5.30 и 5.31) само је визуелно: „Може се приметити да приказани графици сада више подсећају на резултате сакупљене током експеримента“ (стр. 71), при чему је свака мерена тачка десетоминутни просек — „Свака тачка одговара радном интервалу од 10min.“ (стр. 70) — а нумеричке вредности су тренутне. У заједничком опсегу нумерички кориговани коефицијент снаге знатно је виши (при $\lambda \approx 4{,}5$ око 0,27 према око 0,15), а није наведено којим је поправним фактором добијен. Приказани резултат стога не подражава рад оптерећене турбине на терену, иако је сам поступак спрезања основа за то. Реченица главе 5 — „нешто другачија методологија нумеричке процене перформанси ветротурбине која подражава њен реални рад на терену“ (стр. 68) — и реченица закључка — „Развијена је нова методологија анализе ветротурбине којом се врши симулација њеног реалног рада на терену при изразито променљивим брзинама ветра.“ (стр. 124) — шире су од приказаног. Израз *нешто другачија методологија* у глави 5 тачнији је од израза *нова методологија* у закључку.

Новина поступка, ипак, стоји. Један од два чланка на које се дисертација на стр. 68 позива описан је, по свему судећи, нетачно: опис издавача и радови који га цитирају наводе чланак Куимана и Тулиса (Kooiman, Tullis, 2010) као експериментално

испитивање турбине у градском ветру — „Kooiman and Tullis [66] experimentally tested a VAWT within the urban environment“ (Danao, 2012, стр. 69) — а не као нумеричку студију са синусном променом брзине; за други рад опис је тачан: „the free stream velocity was varied sinusoidally around a mean velocity“ и „In all the simulations that are presented in this paper, the rotational speed of the rotors was kept constant“ (Scheurich, Brown, 2013, стр. 97 и 94). Угаона брзина ротора израчуната из једначине кретања јесте стварна разлика у односу на тада објављене нумеричке студије. Допуна моментом генератора, по могућности са законом управљања какав се користи на мереној турбини, претворила би овај одељак у најјачи део рада.

VI Каскада: управљање млазевима и неуронске мреже

Поставка и њена провера. За валидацију су изабрани меродавни, примарни извори — извештаји AGARD о брзом каскадном аеротунелу у Брауншвајгу — и подаци су верно пренети. Исход поређења приказан је у одељку IV; овде треба додати један унутрашњи несклад. Уводна реченица одељка 6.1.1 каже да су и „дијаграми зависности коефицијента пада притиска од коефицијента протока и сл“ поређени с прорачуном (стр. 77), а на стр. 80 стоји: „Нажалост, међу доступним експерименталним подацима не налазе се карактеристике разматраних геометријских модела“ (стр. 80). Друга реченица је тачнија, али је прекатегорична: Шлихтингов (Schlichting) извештај [73] на слици 2 садржи мерену зависност коефицијента губитка турбинских решетки профила NACA 8410 од скретања струје, између осталог за угао поставке 30° и однос d/c = 1,0, при Рејнолдсовом броју $5{\cdot}10^5$ (Schlichting, 1957, сл. 2). Та мерења су нестишљива, за друге нападне углове и ван опсега прорачунатих карактеристика, па их рад оправдано не пореди; требало је, међутим, да их наведе и да каже зашто их не пореди.

Исказ „Карактеристике зависе само од геометрије модела, а не од услова на границама“ (стр. 79) шири је од онога што стоји иза њега — карактеристична линија зависи и од улазног Маховог и Рејнолдсовог броја и од турбуленције на улазу; као поређење геометрија при истим условима исказ је исправан. Уз то, коефицијент испуне на стр. 77 дефинисан је реципрочно од дефиниције у Номенклатури, али пошто све геометрије имају испуну 1,0, омашка нема бројчане последице.

Млазеви. Моделовање млазева запреминским изворима масе, количине кретања и енергије прорачунски је јефтино, а програм га документовано подржава. Израз за изворе, међутим, није дат, функција није приложена, ламинарност млаза није образложена, а модел није проверен према прорачуну са стварним отвором; оштри локални врхови коефицијента притиска на местима извора на слици 6.7 нису продискутовани. Поузданост апсолутних износа ефеката млазева тиме остаје непозната. Важније је питање функције циља. Коефицијент пада тоталног притиска ζ (6.2) рачуна се само из величина основне струје; маса, количина кретања и

енергија које млазеви уносе нису урачунати, нема коефицијента количине кретања млаза ни нето биланса. Смањење ζ зато показује бруто, а не нето добитак, а решење које све три мреже дају као оптимално — „сви млазеви активирани, максимална вредност односа B и тангенцијално убризгавање“ (стр. 93) — лежи на граници простора параметара управо зато што функција циља нема трошка. То решење није ни проверено новим прорачуном струјања.

Најављени циљ — „дефинисање алгоритма управљања масеним протоком млазева при различитим/динамичким радним условима“ (стр. 74) — остварен је делимично: приказани су правило активације млазева сталног режима по детекцији одвајања и неуронска мрежа која предвиђа ζ за низ излазних притисака, али не и управљање у нестационарним условима. Рад упрошћење изриче — „ради упрошћења студије, овде су разматрани само млазеви константног радног режима“ (стр. 76) — па је реч о најави шире од исхода, не о прикривању.

Неуронске мреже. Три архитектуре, тренинг повратним простирањем грешке и систематско варирање броја итерација и коефицијента учења изведени су прегледно, а рад препознаје и опасност од преприлагођавања: „таква архитектура осетљивија на погрешне улазне податке јер јој њена сложенија структура омогућава да се прилагоди свим улазним подацима, па и погрешним“ (стр. 98). У математичком приказу има и грешака. У изразима (6.9) и (6.10) изостао је знак минус, па они дају негативне парцијалне изводе функције грешке (6.8); грешка се поништава у (6.11) и у скрипту из Прилога Б, тако да је спроведено учење ипак исправан спуст по градијенту. Тврдња изречена за архитектуру 3 — „На овај начин такође је повећан број коефицијента“ (стр. 89) — није тачна: помак (чвор вредности 1) постоји само у улазном слоју, па без помака у скривеним слојевима архитектура 3 (6–5–5–1) има 60 тежина, а архитектура 1 (6–10–1) 70; већа тачност архитектуре 3 при дужем тренирању не може се објаснити већим бројем коефицијената.

Најважнија замерка тиче се мере тачности. Рад отворено каже на ком је скупу мерена: „Поређење различитих НМ вршено је над скупом за проверу, једнаком скупу за тренирање“ (стр. 90). Вероватноће у табели 6.2 и на сликама 6.13–6.14 зато мере прилагођење мреже подацима, а не способност предвиђања. Прехелтова правила за мерење перформанси неуронских мрежа захтевају да се подаци поделе бар на два дела, „one part on which the training is performed, called the training data, and another part on which the performance of the resulting network is measured, called the test set“, и да током тренинга „absolutely no information about the test set examples or the test set performance of the network must be available“ (Prechelt, 1994, стр. 9, § 2.3). Истим правилима тражи се и више покретања уз статистику расподеле резултата (Prechelt, 1994, стр. 15), што је овде утолико важније што рад сам каже да „Треба имати у виду и да су почетне вредности коефицијената на свим архитектурама случајно задате што може имати утицаја на ток конвергенције“ (стр.

91). У корист рада иде то што уџбеник Хастија, Тибширанија и Фридмана (Hastie, Tibshirani, Friedman) за мале скупове, какав је скуп од око 350 прорачуна, предвиђа поступке попут унакрсне провере уместо поделе на три дела (Hastie и др., 2009, стр. 222) — дакле, пут је постојао и није захтевао нове прорачуне струјања. Способност предвиђања проверена је једино на две геометрије ван скупа за тренирање (нападни углови 60° и 40°, слике 6.17–6.18), и то само сликом; при 40°, изван научених 50°–70°, поклапање је слабије, што рад наводи, а за модел 2 с активираним млазевима предвиђање није успело.

Уз табелу 6.2 треба додати још две ствари. Реченица „Веома је задовољавајуће што је вероватноћа предвиђања резултата са тачношћу већом од 85% за све три архитектуре након дужих поступака тренирања преко 75%“ (стр. 91) важи само за најдуже тренирање ($\eta = 0{,}5$: 77, 81 и 84 %); при $\eta = 1$ архитектура 1 достиже 69 %. Релативна грешка $\delta = |1 - Y_ANN/Y_CFD|$ из (6.12) неподесна је мера за ζ, које у скупу пролази кроз нулу: за мале вредности ζ_CFD δ расте без ограничења. Такве тачке, ради правичности, чине проценте у табели пре песимистичним него оптимистичним; уз релативну требало је дати и апсолутну грешку. Први улаз мреже, најзад, означен је као угао поставке β (стр. 87, слике 6.9–6.11, скрипт у Прилогу Б), а по табели 6.1 β је сталан (30°), док се мења нападни угао α — што текст на стр. 90 и 93 и сам каже.

Новина и уопштење. Рад неуронске мреже уводи као модел који „у принципу, није био заступљен при разматрању ове класе проблема“ (стр. 9). Примена неуронских мрежа на пројектовање профила турбомашина постојала је, међутим, пре рока: Раj и Мадаван (Rai, Madavan) у предавању из 1997. предлажу да се простор пројектних решења представи неуронском мрежом, а затим оптимизацијом претражи (Rai, Madavan, 1997, сажетак), а Пјере и Ван ден Брамбуше (Pierret, Van den Braembussche) неуронску мрежу користе као приближни модел, површ одзива, изграђен из базе решења Навије–Стоксових једначина за претходне варијанте (Pierret, Van den Braembussche, 1999, сажетак). Новина рада је ужа, али стварна: процена перформанси окозвучне каскаде с активним млазевима. Уопштење с једне каскаде и једне излазне величине на ваздухопловне конструкције у доприносу 9 — „Проверена је могућност њихове примене као алата за процену (и оптимизацију) аеродинамичких перформанси ваздухопловних конструкција.“ (стр. 127) — превазилази приказане резултате, иако је на стр. 95 примена исказана с оградом: „Чини се да приказана методологија има потенцијала за реалну примену.“ (стр. 95).

VII Крило променљивих граница: интеракција флуида и структуре и оптимизација

Поставка. Прелаз с вискозне поставке на структурираној мрежи на Ојлерове једначине на неструктурираној мрежи образложен је инжењерски — фина мрежа не подноси померање чворова — а нова поставка проверена је и према мерењима и према финијем решењу пре употребе (слика 7.7), уз изричиту ограду: „Треба, међутим, имати у виду да се све време проверавају само силе услед расподеле притиска, а да смичући напони нису разматрани.“ (стр. 106). Из те ограде следи и главно ограничење свих бројева главе: финеса која се касније оптимизује рачуната је из сила притиска у невискозном моделу, па њене апсолутне вредности (око 19–20) нису финеса стварног крила, а релативни добитак без провере вискозним моделом не може се пренети изван те поставке. Није речено ни који је од три описана начина деформације мреже стварно коришћен и с којим параметрима.

Кретање крутог крила. Махање и пропињање крутог крила показују да поставка ради с покретном мрежом. Тврдња о повећању осредњених сила при махању заснована је, међутим, на визуелном прегледу слике 7.9, без израчунатих средњих вредности; са слике следи да отпор расте знатно више од узгона, па финеса при махању опада, што рад не каже, иако изричито додаје: „али би за извођење конкретнијих закључака требало спровести детаљнију анализу“ (стр. 113).

Структурни модел. Крило је моделовано као пуна укљештена греда, и тај је избор упрошћење које рад изриче. У спроведеном моделу стоје три бројчане грешке. Прво, модул еластичности у тексту гласи: „Претпостављена вредност модула еластичности је константна дуж размаха и нешто нижа него за алуминијум“ (стр. 115), уз $E = 5$ GPa, што је око четрнаест пута мање од алуминијумове вредности, а приложени кôд дефинише (али не користи) $E = 35\cdot10^{9}$ Pa; како кôд за савијање није приложен, из рада се не може утврдити којом је вредношћу рачунато чисто савијање на сликама 7.14 и 7.15. Друго, константа $K = 2{,}9177\cdot10^{-5}$ у (7.13) око 25 % је мања од вредности која следи из пројектних координата профила ONERA „D“ из AGARD AR-138; разлика одговара фактору 1/2 уместо 2/3 у интегралу $\int z^3 dx$, па је савојна крутост потцењена, а угиб прецењен за око трећину — што закључак о савијању, квалитативан и заснован на претпостављеном E, не мења. Треће, и најважније: увојна крутост у (7.8) узета је као производ модула клизања и поларног момента инерције I_0, а то је тачно само за кружни пресек. Уџбеничка теорија Сен-Венанове торзије за крутост узима торзиону константу J, која је за круг једнака $\pi R^4/2$, уз напомену да је кружни пресек једини пресек без витоперења (Lagace, 2001, стр. 25–26 и 32). За пуни пресек профила ONERA „D“ J је око 25 пута мање од I_0. Бројчани резултати увијања зато одговарају ефективном модулу $G\cdot I_0/J \approx 1{,}25$ GPa, а не претпостављених 50 MPa; величине G и G_i у одељцима 7.5.4–7.5.5 јесу параметри ефективне крутости, а не модули клизања у физичком смислу. Референтна оса на 42

% тетиве изабрана је по минимуму поларног момента инерције — „Ова локација одабрана је на основу минималне вредности поларног момента инерције аеропрофила“ (стр. 117) — дакле кроз тежиште пресека, а не као еластична оса, коју одређују центри смицања. То утиче на бројне вредности увијања, али не и на његов смер.

Спрега. Партиционисана спрега постављена је разложно — „Због комплексности струјног поља и великих промена струјних величина на почетку прорачуна, овакав спрегнути прорачун вршен је над конвергираним решењем струјног поља око крутог модела.“ (стр. 110) — а чворови у равни симетрије клизе по њој да би се сачувао квалитет мреже. Критеријум прекида изречен је, међутим, само речима — „Уколико је постигнута конвергенција промене геометрије, прорачун се прекида.“ (стр. 111) — без мере, толеранције и броја спрегнутих итерација, а приложени кôд не садржи аутоматски критеријум прекида, па је конвергенција очигледно праћена и прорачун заустављан ручно. Рад Дегроте и сарадника (Degroote и др.), који дисертација сама цитира као [28], описује управо такву шему, у којој се проблем струјања и проблем структуре решавају наизменично „until the change is smaller than the convergence criterion“ (Degroote и др., 2010, ауторска верзија, стр. 3) — критеријум је, дакле, саставни део поступка и треба да буде документован. Спрегнути поступак није проверен ни према аналитичком решењу греде ни према објављеним нестационарним или аероеластичним мерењима; писаног водича за верификацију таквог прорачуна пре рока није било, али провера структурног дела према затвореном решењу укљештене греде била би кратка и јефтина. Резултати спрегнутих и динамичких прорачуна имају зато значај показа поступка, што одговара циљу изреченом на стр. 100: „Основни циљ овог дела рада био је установити могућност утицања на струјну слику око тела спровођењем што вернијих нумеричких прорачуна струјања.“ (стр. 100).

На истој страни стоји: „Како таква разматрања још увек или нису део комерцијално доступних прорачунских пакета, или су применљива само на веома упрошћене геометрије“ (стр. 100). За 2014. тај исказ је преоштар. Уз издање 14.0 програма ANSYS, које рад користи, стоји: „System Coupling is a new component system that allows you to perform fluid-structure (FSI) analyses using the FLUENT and Mechanical systems in Workbench. In this release, one- and two-way transfers between running solvers, also referred to as co-simulation, is supported.“ (ANSYS, 2011, § 2.10). Блажа формулација на стр. 10 — „Само мали број комерцијалних пакета има модул за прорачун ових ефеката“ (стр. 10) — ближа је стању, мада ни она не каже да је двосмерну спрегу нудио и сам програм који рад користи. Сопствене рутине с моделом греде у самом решавачу струјања оправдане су једноставношћу и аутоматизацијом оптимизације, а не одсуством комерцијалних решења.

Оптимизација генетским алгоритмом. „Оптимизација је вршена над популацијом која је бројила 8 јединки јер су у питању сложени прорачуни који трају неколико сати.“ (стр. 120) — за пет променљивих, по једно покретање за сваку функцију циља, без наведених граница дозвољених вредности G_i, начина формирања почетне популације и укупног броја евалуација (30 генерација види се само на слици 7.20). Није речено ни да ли мутација може захватити јединке које се преносе у следећу генерацију, а то има видљиву последицу: на слици 7.20б највећи коефицијент узгона пада између четврте и пете генерације (с око 0,3652 на око 0,3635), што се не слаже с описаним преношењем боље половине популације, осим ако мутација захвата и пренете јединке или се оне поново рачунају. Пад је мали и не утиче на коначну вредност, али без провере поновљивости евалуације разлике међу јединкама реда 1 % не могу се одвојити од нумеричког шума. Нађене расподеле зато треба читати као побољшања унутар испитаног скупа, не као утврђене оптимуме — што рад, стављањем речи *оптималним* под наводнике на стр. 121, и сам наговештава.

Добици су исказани према различитим, изричито наведеним основицама: финеса +10 % према еластичном крилу сталног модула клизања, узгон +33 % према крутом крилу. Сведени на исту основицу, бројеви самог рада дају слику коју закључак не показује. Са слике 7.9 финеса крутог крила износи око 21,4; уз +20 % узгона и +44 % отпора финеса еластичног крила пада на око 17,8; повећање од 10 % даје око 19,6, што се слаже са завршном вредношћу на слици 7.20а. Финеса оптималног еластичног крила (у смислу рада), дакле, по невискозном рачуну остаје испод финесе крутог крила, а коефицијент узгона другог оптималног крила око 11 % је већи од узгона еластичног крила сталног модула. Сви ти проценти важе само за намерно ниско изабран модул и невискозан модел. Рад упрошћења на крају главе набраја — „Иако су у приказаним примерима уведена значајна упрошћења (невискозан флуид, случајеви оптерећења одговарају чистом савијању и увијању, разматрање крила као пуне греде, итд) добијени резултати оправдавају спровођење овакве спрегнуте анализе.“ (стр. 121) — али закључак ограничења не понавља.

VIII Приказ литературе и софтвера

Друга глава набраја литературу по областима и сама себи изричито одређује обим: „Из тог разлога, овде су набројане само референце које су се показале најкориснијим и најинтересантнијим.“ (стр. 6). Литература је претежно новија — више од половине јединица објављено је у последњих пет година пре предаје — и добро покрива ветротурбине с вертикалном осом. Критичког приказа нема, а изричита празнина коју рад попуњава означена је само за симулацију рада ветротурбине при променљивом ветру (стр. 68); за каскаду с млазевима и еластично крило разграничење од најближих објављених радова изостаје.

Неколико уопштених исказа о стању области не одговара стању пре рока. Најважнији је образложење избора стохастичких метода: „Из тог разлога, сем у специјалним случајевима, класичне методе оптимизације нису нарочито употребљиве.“ (стр. 8). Исказ не помиње градијентне методе с адјунгованим прорачуном осетљивости, које су пре 2014. биле широко примењиване у аеродинамичкој оптимизацији облика (Jameson, 2003). Џејмсон (Jameson), у предавањима из 2003, о њима пише: „the gradient with respect to an arbitrarily large number of parameters can be calculated with roughly the same computational cost as two flow solutions“, и додаје да брзо израчунавање градијената „makes optimization computationally feasible even for designs in three-dimensional viscous flow“ (Jameson, 2003, стр. 2). Сам избор стохастичких метода за проблеме у раду — нестационарно струјање с клизајућом мрежом, мали број параметара, спрегнут прорачун у комерцијалном решавачу — остаје оправдан; непотпун је само приказ стања области. Из истог пасуса следи и други исказ, изречен с оградом — „чини се да је сврсисходније користити стохастичке методе оптимизације“ (стр. 8), које, по раду, могу да испеглају (реч у раду стоји под наводницима, као слика) непознате утицаје и грешке апроксимације. То важи за нумерички шум функције циља, али не и за систематску грешку модела (раванска анализа, поправни фактор, модел турбуленције), коју ниједна метода оптимизације не отклања. Оптимуми из глава 5 и 7 јесу оптимуми усвојеног модела. У истом су реду исказ да нумеричко решавање аероеластичности „није распрострањено“ (стр. 10), који не важи за линеарну нумеричку аероеластичност — „Computational aeroelasticity based on low-fidelity methods, such as linear aerodynamic flow equations coupled with modal structural equations, is well established.“ (Guruswamy, 2009, стр. 101) — и оцена да је концепт „тек у последњих неколико година постао популаран“ (стр. 34), иако су ветротурбине с вертикалном осом опсежно истраживане крајем седамдесетих и почетком осамдесетих (Howell и др., 2010, увод), па је реч о обнови интересовања.

Неки наводи не одговарају садржају за који су наведени. Опис другог приступа покретном домену на стр. 9 по сажецима одговара методи урањајуће границе из [96], а не просторно-временској методи коначних елемената с покретном мрежом из [90]. Рад [9], који је експерименталан, наведен је на стр. 8 међу примерима прорачунских студија, а радови [8] и [33], по својим сажецима експериментални, међу примерима у којима се комбинују мерење и прорачун.

Опис софтвера у главном је веран документацији: избор клизајућих мрежа и оцена да је то најтачнији, али и најзахтевнији модел одговарају приручнику програма, као и изворни чланови, макрои корисничких функција и начини деформације мреже.

IX Једначине, слике, табеле и језик

Нумерација је уредна: слике (76), табеле (7) и једначине (83) нумерисане су без празнина и понављања, број се слаже с извештајем Комисије, а садржај се поклапа с насловима у тексту. Преузете слике носе ознаку извора, како тражи Упутство Универзитета у Београду за обликовање дисертације (Универзитет у Београду, 2012б, стр. 1). За слику 7.1, чији су натписи преведени на српски, тачнија би била ознака да је прилагођена према извору.

У сликама и табелама има ситних несагласности, на пример: табела 5.5 упућује на непостојећу слику 5.32, док текст исправно упућује на 5.31, а легенда слике 5.7б не слаже се с текстом.

Ознаке нису уједначене. Највећа релативна дебљина аеропрофила на сликама 5.17, 5.19, 5.22 и 5.27 означена је на три начина, а λ је и коефицијент рада и коефицијент у интерполационим шемама. Велики део симбола у једначинама модела турбуленције, као и ω, C_1 и C_2 из (4.2) и k_1–k_3 из одељка 5.3, није у Номенклатури. Сам избор ознака није грешка, јер су симболи величина, за разлику од симбола јединица, по брошури Међународног бироа за тегове и мере само препоруке (BIPM, 2006, стр. 131), па је примедба само о доследности.

Ни терминологија није уједначена. Кретање крутог крила названо је махањем и пропињањем у Уводу, резимеу и одељку 7.5.2, махањем и осциловањем у закључку, а feathering у енглеском апстракту; у шестој глави смењују се активна контрола и управљање, удувавање и убризгавање, коефицијент пада притиска и коефицијент пада тоталног притиска. Слично је и у петој глави: $y+$ је на стр. 44 назван „Бездимензиона величина мреже“ (стр. 44), а реч је о бездимензијској удаљености првог чвора од зида; на стр. 52 рад га назива исправно. Српски терминолошки стандард за аеродинамику у време израде није постојао — серија SRPS ISO 1151 о појмовима и ознакама динамике лета преузета је 2013. на енглеском (ISS, 2013) — па је реч о унутрашњој недоследности, коју би монографско издање требало да уједначи. У тексту има и словних грешака које не мењају смисао, нпр. „пропоручено“ (стр. 6) и „наочито“ (стр. 124). Једна је омашка формална: у изјави о истоветности штампане и електронске верзије (непагинирана) наслов рада завршава се речима *ваздухопловних елемената*, уместо речима *ваздухопловних конструкција*, како стоји на насловној страни и у осталим изјавама.

X Научни апарат

Апарат има чврсту основу. Попис литературе и позивања у тексту усклађени су у оба смера, двоструких јединица нема, а попис је доследно поређан абецедно по латиничком облику презимена, с ћириличким јединицама на свом месту. Тиме је

испуњен захтев Универзитета у Београду: „У попису литературе не сме бити радова који нису цитирани, ни оних на које се у раду не упућује.“ (Универзитет у Београду, 2012а, стр. 1).

Слабост је у распореду позивања. Две трећине јединица (64 од 97) јављају се само у другој глави, најчешће у набрајању без садржајног исказа — „Број техничких извештаја, радова, доктората итд. који се могу наћи заиста је велик, нпр. [1], [9], [18], и [56].“ (стр. 8) — а главе 3, 4 и 8 скоро да немају позивања. Једначине и константе модела турбуленције и метода оптимизације нису на месту употребе приписане ниједном извору; извор је назначен само уопштено у другој глави, а изворни радови модела — Спаларт и Алмарас (Spalart, Allmaras, 1992), Ментер (Menter, 1994), Кенеди и Еберхарт (Kennedy, Eberhart, 1995) — нису у попису. По облику, једначине одговарају приручнику програма [4], али ни он није наведен уз њих. Уређивачка политика *Journal of Fluids Engineering* за приказ постојећег алгоритма тражи да „all pertinent references or other publications must be cited in the paper“ (JFE, 1993, критеријум 8). Поступак ажурирања архиве вишекритеријумског роја ε-ћелијама приказан је по прегледу [69], на који се упућује само у натпису слике 5.25, а изворни рад о ε-доминацији није наведен.

Библиографских омашака има више него што би требало; довољно је навести примере. У [22] наведен је погрешан DOI (10.1002/fld.1001 припада другом раду; исправан је 10.1002/fld.2651), без свеске и страна; у [18] презиме другог аутора гласи Englaro, не „Enlargo“ (стр. 130); у [69] замењени су свеска и број (стоји 3(2), треба 2(3)); у насловима више јединица стоје словне грешке, на пример „Mathemathical“ (стр. 134) у [83]. Више радова из зборника нема страна, тезе (14 јединица) наведене су без ознаке врсте рада, интернет књига [92] нема ознаку издања ни датум приступа, а приручници ANSYS [4]–[7] немају ознаку издања. Као писани траг праксе техничких наука у време предаје може послужити уреднички приручник IEEE (верзија од 20. марта 2014), по коме запис техничког извештаја садржи установу, место, број и датум, запис дисертације врсту рада, установу и место, а запис приручника издање (IEEE, 2014, стр. 33–35). Ниједна од тих омашки не отежава проналажење извора, али их у монографском издању треба отклонити.

Рад цитира своје раније радове [89] (JMST 2013) и [48] (OTEH 2012) тамо где се њихови резултати користе, што је исправно. Прилози A–B, најзад, нису повезани с одељцима на које се односе (5.3.4, 6.3.1 и 7.5.4); једино упућивање на њих јесте општа реченица „Неке од најинтересантнијих функција дате су у прилогу на крају рада“ (стр. 33).

XI Однос рада и извештаја Комисије

Извештај Комисије не наводи замерке и тачно описује садржај рада, а његова најважнија реченица о валидацији прецизнија је од закључка самог рада: „Већински је извршена валидација постигнутих резултата кроз поређење са доступним експерименталним подацима, али би за даљи научни рад и доприносе у области истраживања било значајно извођење сопствених експеримената коришћењем савремених експерименталних техника.“ (извештај Комисије, т. 4.2). Реч *већински* тачно погађа стање описано у одељцима III–VII. Закључак рада ту ограду не преноси — „На основу остварених резултата који су упоређени са досадашњим истраживањима и доступним експерименталним подацима“ (стр. 125) — а допринос 10 проверу валидности исказује без ње.

Десет научних доприноса, како их рад формулише у закључку (стр. 126–127), садржи уопштења која текст не подржава у пуној мери. Допринос 8 гласи: „Развијени су сопствени кодови за спровођење једно- и вишекритеријумске оптимизације двема стохастичким методама: оптимизацијомројем честица и генетским алгоритмом.“ (стр. 127) — а вишекритеријумски је примењен само рој честица, док је генетски алгоритам примењен једнокритеријумски; анализа и класификација метода оптимизације своди се на кратак преглед у четвртој глави. Доприноси 6, 7 и 9 изостављају ограде које одговарајуће главе саме изричу (одељци V–VII).

Међу радовима које извештај наводи као верификацију научног доприноса носећи је чланак у *Journal of Mechanical Science and Technology* 27(8) 2013 (M23), који рад цитира као [89] и који непосредно одговара петој глави. Тиме је испуњен услов Правилника о докторским студијама Машинског факултета (чл. 15) да докторанд пре предаје дисертације ментору има објављен или прихваћен најмање један рад из дисертације у међународном часопису с листе ISI-JCR-SCI, а одлука Наставно-научног већа бр. 557/6 наводи управо тај рад.

XII Шта остаје

Дисертација Јелене Сворцан солидан је и самостално изведен методолошки инжењерски рад. Домаћој прорачунској аеродинамици доноси стварно изграђен, аутоматизован поступак од параметарске геометрије преко мреже и прорачуна струјања до стохастичке оптимизације, испробан на три проблема различите природе, и четири праве методолошке новине: спрегу нестационарног прорачуна с једначином обртања ротора, вишекритеријумски рој честица с инжењерски смисленим другим критеријумом, мерљив критеријум активације млазева у каскади и целину деформабилне мреже, модела греде и генетског алгоритма у комерцијалном решавачу. Бројеви рада у највећем делу могу се пратити једни према другима, али порекло дела улазних и валидационих података треба тачније навести;

рад, уз то, на много места сам омеђује своје резултате. Слабости су четири: верификација и валидација, у којој дискретизациона грешка није процењена, а поређење с мерењима код ветротурбине има карактер калибрације (одељак IV); оптимизације, изведене по једанпут, без наведених параметара и, код ветротурбине, над функцијом циља која зависи од полуемпиријске површи k_1 (одељци V и VII); проширења која нису ни проверена мерењима ни физички довршена (одељци V–VII); и несразмера између глава и закључка, који не преноси бројчане резултате глава 5–7 и изоставља ограде што их главе саме изричу (одељци V и XI). Те слабости дирају тезу у оној мери у којој рад тврди да је поступак валидиран, да симулира реални рад турбине на терену и да се поправним фактором добијају реалне, тродимензионалне вредности; као теза о изводљивости интегралног поступка, рад стоји.

У евентуалном монографском издању или наставку истраживања најплодније би биле следеће измене:

- приказати бројчано студије мреже и временског корака, поређења с мерењима исказати мером одступања, поставку ветротурбине проверити на мерењима која нису коришћена за њено подешавање, а поправни фактор назвати збирном емпиријском корекцијом;
- испитати осетљивост оптимума ветротурбине на површ k_1, поновити оптимизације из више почетних семена, навести све параметре метода и исход једнокритеријумске оптимизације дати бројем;
- допунити једначину обртања ротора моментом генератора и губицима и поновити поређење с мерењима из Упсале на истој основи осредњавања;
- у каскади урачунати енергију и масу млазева у функцију циља, проверити модел млаза према прорачуну са стварним отвором и тачност неуронских мрежа мерити на одвојеном скупу или унакрсном провером;
- у интеракцији флуида и структуре заменити поларни момент торзионом константом, одредити еластичну осу, проверити структурни део према затвореном решењу греде, документовати критеријум спреге и добитке исказати према истој основици, уз проверу вискозним моделом;
- ускладити закључак и доприносе с оградама из глава, исправити једначине, дефиницију поправног фактора, ознаке и модул еластичности, допунити попис изворним радовима модела и метода и отклонити библиографске омашке.

Уз ту врсту редакције — која у највећем делу не тражи ново истраживање — дисертација би дала монографију коју би домаћи читалац могао да користи као приручник за изградњу сопственог интегралног поступка, а спрега слободног обртања ротора с прорачуном струјања имала би шта да каже и ширем кругу истраживача ветротурбина с вертикалном осом.

Литература

Предмет осврта

Сворцан, Јелена М., *Методологија интегралне анализе и оптимизације аеродинамичких површина ваздухопловних конструкција* [докторска дисертација], Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2014. Национални репозиторијум дисертација: https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/7895.

Ступар, С., Симоновић, А., Гвозденовић, С., *Извештај о завршеној докторској дисертацији Јелене Сворцан*, Машински факултет Универзитета у Београду, 19. 5. 2014 (с одлукама Наставно-научног већа бр. 557/5 и 557/6 од 22. 5. 2014); у материјалима 8. седнице Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, 7. 7. 2014.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, *Одлука о давању сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији Јелене Сворцан*, 02 бр. 61206-3015/2014, 7. 7. 2014.

Формални оквир докторских студија (важећи у мају 2014)

Правилник о већима научних области на Универзитету у Београду, Гласник Универзитета у Београду, бр. 134/2007, 150/2009, 158/2011, 164/2011 и 165/2011 (чл. 20).

Универзитет у Београду — Машински факултет, *Правилник о докторским студијама* (пречишћен текст), Наставно-научно веће, 28. 11. 2013 (основни текст бр. 432/1 од 3. 3. 2011; измене и допуне бр. 1447/1 од 11. 7. 2013), чл. 15 и 25; www.mas.bg.ac.rs/_media/fakultet/dokumenti/pravilnik_o_doktorskim_studijama.pdf.

Универзитет у Београду, *Докторска дисертација мора да садржи* [упутство], Београд, 2012 (2012а); www.bg.ac.rs/files/sr/studije/Sta_doktorska_disertacija_mora_da_sadrzi.pdf, снимак Wayback Machine од 20. 6. 2013.

Универзитет у Београду, *Упутства за обликовање докторске дисертације*, Београд, 2012 (2012б); www.bg.ac.rs/files/sr/studije/Uputstva_za_oblikovanje_doktorske_disertacije.pdf, снимак Wayback Machine од 20. 6. 2013.

Верификација и валидација прорачуна струјања

ASME, *Journal of Fluids Engineering Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy*, New York, 1993 (Freitas, C. J., Editorial, *Journal of Fluids Engineering*, 115(3), 1993, 339–340); наводи према издању на сајту часописа за ауторе

(journaltool.asme.org/Templates/JFENumAccuracy.pdf), снимак Wayback Machine од 11. 7. 2007 (критеријуми 4, 5, 6, 8 и 10 и завршни пасус).

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., Raad, P. E., Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 2008, 078001.

NASA Glenn Research Center, NPARC Alliance, *CFD Verification and Validation Web Site: Tutorial — Examining Spatial (Grid) Convergence; Validation Assessment* (J. W. Slater), последња измена 17. 7. 2008; www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/, снимци Wayback Machine од 22. 12. 2013 и 28. 2. 2014.

Oberkampf, W. L., Trucano, T. G., *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics*, SAND2002-0529, Sandia National Laboratories, Albuquerque, March 2002 (објављено и у *Progress in Aerospace Sciences*, 38(3), 2002, 209–272).

Модели турбуленције и програм FLUENT

Langtry, R. B., *A Correlation-Based Transition Model using Local Variables for Unstructured Parallelized CFD Codes*, Dr.-Ing. dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenbau, 2006.

Spalart, P. R., Allmaras, S. R., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 92-0439, 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 1992.

Menter, F. R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, 32(8), 1994, 1598–1605.

ANSYS, Inc., *ANSYS FLUENT User's Guide*, Release 13.0, Canonsburg, PA, November 2010 (§ 28.14.2).

ANSYS, Inc., *Release Notes, Release 14.0*, § 2.10 System Coupling, Canonsburg, PA, 2011.

Simão Ferreira, C. J., Bijl, H., van Bussel, G., van Kuik, G., Simulating dynamic stall in a 2D VAWT: modeling strategy, verification and validation with Particle Image Velocimetry data, *Journal of Physics: Conference Series*, 75, 2007, 012023.

Оптимизација и неуронске мреже

Kennedy, J., Eberhart, R., Particle Swarm Optimization, y: *Proceedings of ICNN'95 — International Conference on Neural Networks*, vol. 4, IEEE, 1995, 1942–1948.

Barr, R. S., Golden, B. L., Kelly, J. P., Resende, M. G. C., Stewart, W. R., Designing and Reporting on Computational Experiments with Heuristic Methods, *Journal of Heuristics*, 1(1), 1995, 9–32.

Eiben, A. E., Jelasity, M., A Critical Note on Experimental Research Methodology in EC, y: *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC'02)*, vol. 1, IEEE, 2002, 582–587.

Jameson, A., *Aerodynamic Shape Optimization Using the Adjoint Method*, Lectures at the Von Karman Institute, Brussels, Stanford University, 6. 2. 2003.

Prechelt, L., *PROBEN1 — A Set of Neural Network Benchmark Problems and Benchmarking Rules*, Technical Report 21/94, Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik, 30. 9. 1994.

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2nd ed., Springer, New York, 2009 (10. отисак, 2013).

Rai, M. M., Madavan, N. K., *Application of Artificial Neural Networks to the Design of Turbomachinery Airfoils*, NASA Ames Research Center, 1997 (NTRS 20070002487).

Pierret, S., Van den Braembussche, R. A., Turbomachinery Blade Design Using a Navier–Stokes Solver and Artificial Neural Network, *Journal of Turbomachinery*, 121(2), 1999, 326–332.

Интеракција флуида и структуре

Degroote, J., Haelterman, R., Annerel, S., Bruggeman, P., Vierendeels, J., Performance of Partitioned Procedures in Fluid–Structure Interaction, *Computers & Structures*, 88(7–8), 2010, 446–457; наводи према ауторској верзији (Universiteit Gent, biblio.ugent.be/publication/940207).

Guruswamy, G. P., An Evaluation on the Efficient use of Supercomputers for Computational Aeroelasticity, *International Journal of Aerospace Innovations*, 1(2), 2009, 101–109.

Lagace, P. A., *16.20 Structural Mechanics, Unit 10: St. Venant Torsion Theory*, предавања за курс у јесен 2002, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (© 2001).

Ветротурбине с вертикалном осом, каскаде и крило ONERA M6 — изворни подаци

Howell, R., Qin, N., Edwards, J., Durrani, N., Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, 35(2), 2010, 412–422.

Kooiman, S. J., Tullis, S. W., Response of a Vertical Axis Wind Turbine to Time Varying Wind Conditions Found within the Urban Environment, *Wind Engineering*, 34(4), 2010, 389–401.

Danao, L. A. M., *The Influence of Unsteady Wind on the Performance and Aerodynamics of Vertical Axis Wind Turbines*, PhD thesis, University of Sheffield, September 2012.

Scheurich, F., Brown, R. E., Modelling the aerodynamics of vertical-axis wind turbines in unsteady wind conditions, *Wind Energy*, 16(1), 2013, 91–107; текст у репозиторијуму Strathprints Универзитета у Стратклајду, у прелому часописа.

Sheldahl, R. E., Blackwell, B. F., *Free-Air Performance Tests of a 5-Metre-Diameter Darrieus Turbine*, SAND77-1063, Sandia Laboratories, Albuquerque, December 1977.

Sheldahl, R. E., Klimas, P. C., *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*, SAND80-2114, Sandia National Laboratories, Albuquerque, March 1981.

Selig, M. S., McGranahan, B. D., *Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines*, NREL/SR-500-34515, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2004.

Schlichting, H., *Cascade Flow Problems*, AGARD Report 93, February 1957.

Републички хидрометеоролошки завод Србије, *Београд–Врачар: релативне честине ветра по правцима и средње брзине ветра, 1981–2010*, страница hidmet.gov.rs (http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/stanica_sr.php?moss_id=13274), снимак Wayback Machine од 22. 2. 2014.

Величине, ознаке и научни апарат

Bureau International des Poids et Mesures, *The International System of Units (SI)*, 8th ed., BIPM, Sèvres, 2006.

SRPS ISO 1151-1:2013, SRPS ISO 1151-2:2013, SRPS ISO 1151-3:2013 — Flight dynamics — Concepts, quantities and symbols, Институт за стандардизацију Србије (ISS), Београд, 31. 7. 2013 (на енглеском језику).

IEEE, *IEEE Editorial Style Manual*, IEEE Periodicals, Transactions/Journals Department, Piscataway, NJ, V6, 20. 3. 2014.