

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марјана Додића,
дипл. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду – Машинског факултета бр. 369/8 од 07.12.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марјана Додића под називом:

**„НУМЕРИЧКО РЕШАВАЊЕ ГЛАУЕРТОВЕ ЈЕДНАЧИНЕ ПРОТОЧНОСТИ
РОТОРА У УСЛОВИМА РАВНОТЕЖНОГ ЛЕТА ХЕЛИКОПТЕРА ИСПОД
ГРАНИЦЕ ПРИХВАТЉИВОСТИ СТОЛ-ФЛАТЕРА“**

Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и након разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Марјан Додић је студент треће године Докторских студија на Универзитету у Београду – Машинском факултету. Прву годину студија уписао је школске 2017/18. године и од тада се непрекидно налази у статусу студента. Другу годину студија уписује школске 2018/19. године и обнавља је током три наредне школске године. Трећу годину студија кандидат први пут уписује школске 2022/23. године, а други пут школске 2023/24. године. Имајући у виду да кандидат студира уз рад, статус студента Докторских студија је усклађен са важећим прописима.

Кандидат је положио све испите предвиђене планом и програмом Докторских студија са просечном оценом 9,86 (девет и 86/100). Почев од уписа, па до коначног именовања ментора, улогу потенцијалног ментора докторанда обављао је проф. др Мирко Динуловић.

Кандидат се обратио Већу за докторске студије дописом бр. 369/1 од 03.03.2023. године, са захтевом да му се одобри израда докторске дисертације на Универзитету у Београду – Машинском факултету и предлогом теме „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“. За менторе су предложени др Мирко Динуловић, редовни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета и др Александар Бенгин, редовни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета. На основу сагласности Катедре за ваздухопловство бр. 369/2 од 20.03.2023. године, Наставно-научно веће Универзитета у Београду – Машинског факултета је донело Одлуку бр.

369/3 од 06.04.2023. године о именовању проф. др Мирка Динуловића и проф. др Александра Бенгина за менторе докторске дисертације, као и Одлуку бр. 369/3 од 06.04.2023. године о прихватању теме докторске дисертације и именовању Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: др Александар Симоновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет, др Огњен Пековић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет, др Јелена Сворцан, ванредни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет, др Тони Иванов, доцент, Универзитет у Београду – Машински факултет и др Бранимир Крстић, ванредни професор, Универзитет одбране у Београду – Војна академија.

На основу Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације бр. 369/4 од 19.04.2023. године, Наставно-научно веће Универзитета у Београду – Машинског факултета доноси Одлуку бр. 369/5 од 01.06.2023. године којом прихвата научну заснованост теме докторске дисертације и констатује да кандидат испуњава услове за израду докторске дисертације. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је Одлуком бр. 61206-2080/2-23 од 12.06.2023. године дало сагласност о прихватању теме докторске дисертације под називом: „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“.

Ментори проф. др Мирко Динуловић и проф. др Александар Бенгин су 28.11.2023. године известили Колегијум наставника Катедре за ваздухопловство о завршеној докторској дисертацији кандидата Марјана Додића, на основу чега је Катедра за ваздухопловство упутила обавештење бр. 369/7 од 01.12.2023. године Наставно-научном већу о завршетку израде докторске дисертације Марјана Додића, као и предлог Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације. На основу наведеног дописа Катедре за Ваздухопловство, Наставно-научно веће Универзитета у Београду – Машинског факултета је донело Одлуку бр. 369/8 од 07.12.2023. године о формирању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:

1. др Оливера Костић, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Машински факултет
2. др Огњен Пековић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет
3. др Јелена Сворцан, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет
4. др Тони Иванов, доцент,
Универзитет у Београду – Машински факултет
5. др Бранимир Крстић, ванредни професор,
Универзитет одбране у Београду – Војна академија

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата Марјана Додића, под насловом „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“, припада научној области Машинско инжењерство, ужа научна област Ваздухопловство, за коју је матичан Универзитет у Београду - Машински факултет. У својству ментора, израдом докторске

дисертације руководили су др Мирко Динуловић, редовни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета на Катедри за ваздухопловство, и др Александар Бенгин, редовни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета на Катедри за ваздухопловство.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат **Марјан (Душко) Додић** рођен је 1981. године у Нишу. Након завршетка основне школе „Бора Станковић“ у Јелашници, уписује Војну гимназију у Београду коју завршава 2000. године. На Војнотехничкој академији у Жаркову дипломирао је 2005. године, са просечном оценом 8,71 и стекао звање дипломирани инжењер машинства, смер Ваздухопловнотехничка служба, машинско усмерење, специјалност Ваздухоплови и ваздухопловни мотори. На Универзитету у Београду – Машинском факултету дипломирао је 2007. године, одбранивши дипломски рад на тему „Анализа пројектно-конструктивног решења турбомлазног мотора ММ17“ код проф. др Васка Фотева, дипл. инж. маш.

У периоду од 2005. до 2016. године, радио је на војном аеродрому „Пуковник-пилот Миленко Павловић“ у Батајници на пословима ваздухопловнотехничког одржавања школске, школско-борбене и транспортне авијације и хеликоптера у првом и другом нивоу одржавања. Обављао је дужности командира вода за ваздухопловнотехничко одржавање: хеликоптера и транспортне авијације у другом нивоу одржавања (хеликоптери Ми-8 и SA-341/2 Газела, авион Ан-26); инструмената, електро-електронске и радио-навигацијске опреме школских и школско-борбених авиона (Утва 75, Г-4 Супергалеб); авиона и мотора (школски авион Утва-75); авиона и мотора (школско-борбени авион Г-4 Супергалеб), као и дужности технолога и командира чете за ваздухопловнотехничко одржавање подзвучне авијације у другом (базном) нивоу одржавања. Више пута је награђиван и похваљиван, а посебно за учешће у заштити цивилног становништва од поплава 2014. године, када су хеликоптерске јединице РВ и ПВО реализовале велики број летачких задатака у оквиру треће мисије Војске Србије.

У наставни процес на Војној Академији укључен је од 2011. године у звању сарадника у настави на Катедри војног ваздухопловства. Од 2016. године стално је запослен на Катедри војномашинског инжењерства Војне Академије Универзитета одбране у Београду, на месту сарадника у настави, у звању асистента за ужу научну област Ваздухопловно машинство. Изводи наставу (вежбе, стручну праксу и посебне облике наставе) на два студијска програма: ОАС Војномашинско инжењерство, модул Ваздухоплови и ваздухопловни мотори и ОАС Војно ваздухопловство, модули Пилот авиона и Пилот хеликоптера.

Кандидат се дужи низ година бави научноистраживачким радом у области ваздухопловства. Током рада на пословима ваздухопловнотехничког одржавања је учествовао у реализацији вибродиагностичких процедура у оквиру превентивног и корективног одржавања главног ротора хеликоптера Ми-8/17 и Х-42/45 Газела, као и у откривању, испитивању и отклањању последица отказа цилиндричних структура у ваздухопловству, о чему је објављен већи број научних радова. У више наврата је учествовао у испитивању турбовратилних мотора на испитној станици у ВЗ „Мома Станојловић“. Учествовао је у више научноистраживачких пројеката под окриљем Универзитета одбране у Београду.

Коаутор је значајног броја научних радова, од тога 6 радова објављено у часописима са SCI листе, једног малог патента, као и једног методичког приручника. Области интересовања кандидата су перформансе лета авиона и хеликоптера, погонске групе

ваздухоплова, аеродинамика ротирајућег крила, аероеластичност, ваздухопловне композитне структуре, технологија и организација одржавања војних ваздухоплова.

Кандидат активно користи и влада следећим програмским алатима: NX Siemens, PLM Siemens, GasTurb, Mathematica, MATLAB Simulink, Python, Julia, GraphPad Prism. Активан је у лабораторијском раду. Тренутно је ангажован на припреми и изградњи Лабораторије за ваздухопловне пропулзоре на Војној академији Универзитета одбране у Београду. Говори енглески и служи се руским језиком. Кандидат Марјан Додић је ожењен и отац је двоје деце.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“ докторанда Марјана Додића је документ формата А4, штампан двострано и у боји. Дисертација је писана на српском језику, латиничним писмом и садржи укупно 146 страна. Првих 5 нумерисаних страна чине: насловне стране на српском и енглеском језику, списак чланова комисије и сажетак на српском и енглеском језику. Садржај и списак ознака и скраћеница су нумерисани римским бројевима. Главни део дисертације је нумерисан арапским бројевима и садржи 132 стране које обухватају 7 нумерисаних поглавља, литературу и биографију докторанда. Последње 4 стране дисертације нису нумерисане и на њима се налазе: изјава о ауторству, изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјава о коришћењу. Дисертација садржи 64 слике, 23 табеле и 126 математичких израза којима је приказан научни проблем која се разматра.

Кратак садржај докторске дисертације:

1. Уводна разматрања
 2. Преглед литературе
 3. Глауертова једначина проточности идеалног ротора
 4. Модел равнотежног лета хеликоптера
 5. Нумеричка анализа решавања Глауертове једначине проточности идеалног ротора
 6. Резултати истраживања
 7. Закључак
- Литература

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље представља увод у истраживање и у њему је поред кратког осврта на проблем моделирања летелица са ротирајућим крилом детаљно изложен предмет истраживања, дефинисани су циљеви и представљене методе научног истраживања. Постављене су полазне хипотезе и изложен је план истраживања са конкретним задацима који из њега проистичу.

Друго поглавље садржи релевантан преглед литературе који полази од нумеричких метода за решавање нелинеарних једначина, а затим се фокусира на проблем нумеричког решавања Глауертове једначине проточности ротора, где је посебна пажња посвећена проблему одређивања граничних вредности параметара Глауертове једначине за случај

равнотежног лета хеликоптера. У наставку су сумирани најважнији резултати истраживања појаве динамичког столинга (стол-флатера) на главном ротору хеликоптера, као и актуелни проблеми одређивања критеријума прихватљивости стол-флатера.

Треће поглавље представља детаљан опис Глауертове једначине проточности идеалног ротора у условима равнотежног лета хеликоптера. У њему су изложене познате процедуре решавања предметне једначине, почев од приближног аналитичког решења, преко тачног аналитичког решења, закључно са релевантним нумеричким поступцима, чија је примена устаљена у пракси.

Четврто поглавље је резервисано за презентацију побољшаног математичког модела равнотежног лета хеликоптера класичне једнороторне конфигурације. У питању је класични *low-fidelity* математички модел устаљеног лета хеликоптера, оригинално допуњен варијабилном еквивалентном површином паразитног отпора и узгона неротирајућих компоненти, као и уведеним ограничењима у погледу расположиве снаге и новедефинисане границе прихватљивости стол-флатера, засноване на модификованом Харисовом критеријуму. Презентацији поменутог математичког апарата у овом поглављу претходи детаљан опис спроведене процедуре за одређивање опсега параметара Глауертове једначине проточности у задатим условима.

Пето поглавље приказује одабране нумеричке методе за решавање нелинеарних једначина које су коришћене у истраживању, као и сам план нумеричких експеримената који представљају срж овог истраживачког рада.

Шесто поглавље је најобимније и у њему су представљени резултати истраживања и извршена је њихова анализа. Након презентације резултата који се односе на одређивање опсега параметара Глауертове једначине, дата је детаљна анализа перформанси нумеричких метода, која обухвата више сегмената, почев од присуства дивергенције, потребног броја итерација, величине релативне грешке, поступка решавања у једној итерацији, перформанси Њутновог метода са и без употребе фактора релаксације, закључно са анализом решења у затвореном (аналитичком) облику.

Седмо поглавље је закључно. У њему је изложена субјективна оцена успешности спроведеног истраживања, дефинисани су најважнији закључци и дате су смернице за даљи рад у оквиру предмета истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Марјана Додића представља савремен и оригиналан научни допринос проучавању нумеричког решавања Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера. Снажан развој нумеричке анализе и теорије апроксимација, забележен током последњих петнаестак година, изнедрио је велики број савремених једнокорачних и мултикорачних метода високог реда конвергенције за нумеричко решавање нелинеарних једначина. Међутим,

у пракси не постоје примери решавања Глауертове једначине проточности овим савременим методама, већ се она и даље решава употребом Њутновог метода, уз уочене недостатке у виду већег броја потребних итерација при малим вредностима коефицијента напредовања μ , као и у виду нестабилности конвергенције итеративног низа која се може јавити при одређеној комбинацији параметара којима се описује равнотежни лет.

Са друге стране, добро је познато да се алгебарске једначине могу решити уз помоћ радикала само ако су степена не вишег од четвртог, при чему Карданове формуле већ за једначине трећег степена постају врло компликоване. Како рационална форма Глауертове једначине представља управо алгебарску једначину четвртог степена, њено аналитичко решење је могуће пронаћи, што је и учињено 2019. године, али у оквиру врло ограничене студије, превасходно оријентисане ка демонстрацији перформанси савремених алата симболичке алгебре. С обзиром на комплексност самог аналитичког решења, његова употребна вредност у условима аритметике двоструке прецизности са покретним зарезом у 64-битној архитектури, која је уобичајена за већину савремених, комерцијално доступних математичких и инжењерских платформи, остала је потпуно неистражена.

Такође, у доступној литератури се не може пронаћи препорука који је облик Глауертове једначине (рационални или ирационални) погоднији за нумеричко решавање, док математичка анализа решавања из ње потпуно изостаје. У оквиру докторске дисертације дати су одговори на ова, али и на многа друга питања. Представљена је модификација поступка одређивања почетне вредности коефицијента проточности ротора којом се отпочиње процедура итеративног решавања, те је серијом нумеричких експеримената извршена анализа перформанси већег броја савремених метода за решавање нелинеарних једначина на примеру Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера. Детектоване су савремене методе које су, уколико се користе заједно са новоуведеним начином одређивања почетне вредности, у стању да до решења Глауертове једначине проточности дођу у само једној итерацији, са високом тачношћу у најширем спектру параметара којима се описује равнотежни лет хеликоптера. У циљу одређивања граница наведеног спектра, значајно је побољшан стандардни математички модел равнотежног лета хеликоптера нижег нивоа тачности (енг. *low-fidelity*) и представљен је оригинални начин његовог решавања, погодан за имплементацију у окружење које захтева израчунавања у реалном времену. Модификован је оригинални Харисов критеријум прихватљивости стол-флатера тако да је омогућена његова имплементација у *low-fidelity* модел равнотежног лета хеликоптера у широком опсегу Рејнолдсових бројева. Оригиналност резултата који су добијени у оквиру дисертације потврђена је њиховим публикавањем у часопису категорије M21.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе, представљене у поглављу *Литература*, закључује се да је кандидат Марјан Додић при изради докторске дисертације користио актуелну и релевантну литературу. У другом поглављу дисертације кандидат детаљно представља релевантна научна достигнућа у ширем спектру дисциплина, као што су нумеричке методе за решавање нелинеарних једначина, теорија идеалног ротора, динамички столинг и проблем одређивања критеријума прихватљивости стол-флатера, што указује на изражену мултидисциплинарност дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Примењене научне методе истраживања су мултидисциплинарне. Примењене су како прорачунске, тако и методе нумеричког експеримента ради потврде хипотезе. Изведени нумерички експерименти захтевали су вишемилионска израчунавања Глауертове једначине проточности ротора. У докторској дисертацији су коришћене следеће методе и технике истраживања:

- *Метода посматрања и дескрипције* је коришћена у почетним фазама истраживања тј. приликом утврђивања утицаја великог броја параметара летелице на резултујући угао нагиба диск-актуатора;
- *Метода моделирања* је употребљена приликом израде математичког модела равнотежног лета хеликоптера класичне једнороторне конфигурације, укључујући и моделирање динамичког столинга на главном ротору;
- *Статистичка метода*, показала се веома значајном у почетној фази истраживања, пре свега због великог броја показатеља којима су дефинисане узајамне везе између геометријских, физичких и аеродинамичких карактеристика летелица са ротирајућим крилом;
- *Регресиона анализа* се користила за математичко моделирање утицаја локалног Рејнолдсовог и Маховог броја на основна (таблична) аеродинамичка својства репрезентативних аеропрофила лопатица главног и репног ротора хеликоптера;
- *Нумеричке методе за решавање нелинеарних једначина* заузимају централно место у самом истраживању и њихова примена на решавање Глауертове једначине проточности ротора уједно представља предмет истраживања;
- *Компаративна анализа* је употребљена за оцену перформанси метода за нумеричко решавање нелинеарних једначина на примеру Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати који су добијени у оквиру докторске дисертације поред научне вредности имају и широку практичну примену. За брзе итеративне циклусе у прелиминарној фази пројектовања, као и код различитих врста инжењерских симулација у реалном времену, од изузетног је значаја да број потребних итерација буде што мањи, односно да рачунска ефикасност буде што већа. Ово питање данас постаје посебно актуелно са аспекта развоја хибридних *dual-solver* модела код којих се коришћене методе, алати и модели не умрежавају хоризонтално, као на пример добро познато *CFD/CSD* упаривање, већ вертикално, где. долази до повезивања и паралелне употребе једног сложеног, рачунски захтевног алата и једног или више једноставнијих *low-fidelity* алата, какав је, у дисертацији представљен, побољшани математички модел равнотежног лета хеликоптера. Поред тога, практично сви статички и динамички модели опструјавања ротора хеликоптера који представљају неизоставан математички апарат примењен у симулаторима лета, као и код испитивања аероеластичне стабилности и управљивости,

у основи полазе од проблема решавања Глауертове једначине проточности и теорије идеалног ротора.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да кандидат Марјан Додић поседује смисао, знање и вештине које су неопходне за самостално решавање комплексних инжењерских и научних проблема у области ваздухопловства. Именовани правилно користи савремене научне методе, вешто анализира добијене резултате и изводи релевантне закључке. Резултати урађене докторске дисертације представљају доказ оспособљености кандидата за обављање самосталног научноистраживачког рада.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“, кандидат Марјан Додић је у складу са постављеним циљевима и полазним хипотезама остварио један оригинални научни допринос и више стручних доприноса. Сви доприноси кандидата, научни и стручни, који су проистекли из докторске дисертације, збирно су представљени у једном научном раду, публикованом у часопису категорије M21.

4.1.1. Оригинални научни допринос

Научни допринос кандидата огледа се у модификацији поступка за израчунавање почетне вредности коефицијента проточности ротора λ , односно индуковане проточности λ_i , које се користе за нумеричко решавање одговарајућих (рационалних и ирационалних) облика Глауертове једначине проточности ротора. Новоуведене почетне вредности, као и оне које су од раније присутне у доступној литератури, упарене су са савременим једнокорачним и мултикорачним методама за нумеричко решавање нелинеарних једначина у циљу детекције методе која наведену једначину може решити у само једној итерацији, са задовољавајућом тачношћу у широком спектру параметара којим су практично обухваћени сви случајеви равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера.

Обимним нумеричким експериментима укупно је, не рачунајући Њутнов метод (са и без фактора релаксације), испитано 12 нумеричких метода, од којих су 4 оптималне трокорачне методе реда конвергенције осам. Установљено је да трокорачне методе *Sharma-Sharma* и *KT_Diff* (Метода King-Traub са изводом) успешно решавају Глауертову једначину проточности у само једној итерацији у свим испитиваним случајевима, са релативном грешком мањом од $\sim 10^{-16}$, практично без употребе критеријума за прекид итеративног низа. Међутим, наведено важи само за решавање ирационалног облика Глауертове једначине са непознатом λ_i , дакле само једног од укупно четири испитивана облика, и то искључиво у комбинацији са новоуведеном почетном вредношћу. Уколико се користе стандардне почетне вредности, релативна грешка значајно расте са смањењем коефицијента напредовања μ . Употреба осталих нумеричких метода које су коришћене у истраживању, као и нумеричко решавање преостала три облика Глауертове једначине проточности имају своје недостатке и ти недостаци су јасно и недвосмислено утврђени

и приказани у дисертацији. Установљено је да код вишекорачних метода високог реда конвергенције, уколико се користе у пару са високопрецизном почетном вредношћу, долази до акумулирања рачунске грешке, чак и током прве итерације, што последично доводи до аномалија у величини релативне грешке нумеричког решења. Ове аномалије, изазване нагомилавањем рачунске грешке у аритметици коначне дужине, успешно се отклањају вишеструким повећањем броја тачних цифара тј. аритметиком повећане прецизности, али уз неприхватљиво високу рачунску цену, пре свега са аспекта израчунавања у реалном времену.

Горе наведени резултати приказани су у раду објављеном у часопису категорије M21 (стр. 19-21, Сл. 13-16), <https://doi.org/10.3390/aerospace10030238>, као и у дисертацији у Поглављу 6 (стр. 110-112, Сл. 55-58). Од значаја је и откриће да решавање рационалне форме Глауертове једначине проточности са непознатом λ , уз употребу коефицијента индуковане брзине у лебдењу λ_h као почетне вредности, често доводи до стабилне конвергенције ка решењу које нема физички смисао, па је последично томе стварна релативна грешка нумеричког решења велика, док је излазна релативна грешка сасвим задовољавајућа, па се јавља привид да је нумеричко решење тачно. При томе, вероватноћа конвергенције ка „погрешном“ решењу не зависи од изабране нумеричке методе, већ искључиво од коефицијента напредовања μ . Употреба λ_h као почетне вредности је не само чест случај у пракси, већ и ствар препоруке дате у релевантној литератури Овај резултат је проистекао из анализе обимних података, генерисаних нумеричким експериментима и такође је представљен у наведеном раду (стр. 18, Сл. 12), као и у дисертацији (стр.107, Сл. 52).

Засебно су анализиране перформансе Њутновог метода (са и без употребе фактора релаксације) и установљено је да Њутнов метод не испољава компаративне предности у односу на остале једнокорачне методе које су биле предмет истраживања. Такође, употреба релаксационог фактора је пожељна једино у случају решавања рационалне форме Глауертове једначине проточности са непознатом λ , јер тада смањује присуство дивергенције око 7,5 пута, док у осталим случајевима није уочено позитивно дејство увођења наведеног фактора, док се број потребних итерација значајно повећава.

Овај резултат је део истог научног рада, публикованог у часопису категорије M21 (стр. 21, 22, Сл. 17-19), и представљен је у дисертацији (стр.107, Слика 52).

Анализирано је и тачно решење Глауертове једначине, добијено употребом софтвера за симболичко израчунавање (Mathematica) 2019. године. С обзиром на комплексност и рачунску сложеност аналитичког решења са једне и аритметике коначне дужине са ограниченим бројем тачних цифара са друге стране, не треба да чуди закључак да је детектовано нумеричко решење у једној итерацији значајно прецизније од тачног аналитичког решења. Такође, у око 5% испитаних случајева уопште није могуће доћи до аналитичког решења, тако да оно није погодно за практичну примену. Овај резултат је део исте публикације категорије M21 (стр.23, Сл.20), док је у докторској дисертацији представљен на страни 115 (Сл. 63).

Научни допринос кандидата заокружен је побољшањем математичког модела равнотежног лета хеликоптера, што подразумева следеће: нови модел укључује варијацију референтних површина паразитног отпора и узгона оквашених неротирајућих компоненти структуре летелице у зависности од нападног угла трупа, као и процедуру за одређивање критеријума прихватљивости стол-флатера, што није карактеристично за постојеће *low-fidelity* моделе, већ искључиво за моделе вишег нивоа сложености; представљен је оригинални поступак решавања система нелинеарних једначина који подразумева свођење система на једну нелинеарну једначину употребом симболичког израчунавања, уз занемарљиво мали губитак тачности добијеног решења.

Међутим, ова једначина има 16 различитих варијанти, где избор варијанте зависи од референтних вредности Рејнолдсовог и Маховог броја, као и од нападног угла трупа, па је било неопходно омогућити континуалну промену варијанте једначине која се нумерички решава без прекида итеративног низа, што је успешно урађено. Модел је представљен и валидиран у истом раду (стр. 6-11, Сл.2, Сл.4), као и у самој дисертацији (Поглавље 6, стр. 69-71, Сл.17-19). Важно је напоменути да је публикован рад већ једном цитиран у делу који се односи управо на побољшани *low-fidelity* модел равнотежног лета хеликоптера.

4.1.2. Стручни доприноси

Докторска дисертација кандидата, као и публиковни научни рад који је из ње проистекао, садрже додатне, стручне доприносе који су веома значајни, али немају карактер научног доприноса. Пре свега, то се односи на изведени поступак модификације Харисовог критеријума прихватљивости стол-флатера који је заснован на оригинално представљеном емпиријском одређивању репрезентативног Рејнолдсовог броја назадујуће лопатице главног ротора хеликоптера. Међутим, с обзиром да је верификација наведеног критеријума прихватљивости стол-флатера изведена на само једном примеру (експерименталног испитивања у лету хеликоптера *Lynx*) неопходне су додатне верификације како би овај појединачни допринос попримио карактер научног.

Само моделирање критеријума прихватљивости стол-флатера се показало од изузетне важности за одређивање граница опсега параметара Глауертове једначине проточности ротора у равнотежном лету хеликоптера. Наведене границе су публиковане, како у раду (стр. 11, Сл. 3), тако и у самој дисертацији (стр. 66, 67, Сл. 14, 15) и као такве представљају значајну информацију научној и стручној заједници, поготово јер се слични резултати не могу пронаћи у доступној литератури. Међутим, овај допринос остаје на нивоу стручног, пре свега јер је заснован на недовољно утемељеном приступу моделирања границе прихватљивости стол-флатера и последично томе произвољно извршеног проширивања граница максималних и минималних вредности параметара Глауертове једначине, што је потпуно оправдано (као додатни степен сигурности) са аспекта примарног циља саме дисертације.

Додатни стручни допринос дисертације јесте позивање на опрез приликом прелиминарне процене потребне снаге за реализацију лета хеликоптера при великим нападним угловима трупа, и то у домену моделирања паразитног отпора оквашених, неротирајућих компоненти. Наиме, уобичајена је пракса (редовно заступљена у литератури) да се у математичком изразу за израчунавање паразитног отпора користи коефицијент напредовања μ уместо коефицијента непоремећене ваздушне струје μ_c , што за последицу има значајно потцењивање потребне снаге погонске групе за савладавање наведене силе отпора, што доводи до погрешне прелиманерне процене перформанси летелице.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и постојећих решења из области докторске дисертације, комисија констатује да су приказани резултати истраживања изузетно значајни, актуелни и научно утемељени. Упоредном анализом постављених циљева истраживања и остварених резултата докторске дисертације, констатујемо да су пружени одговори на сва релевантна питања и да су решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања.

Представљена процедура нумеричког решавања Глауертове једначине проточности ротора у само једној итерацији доказано доводи до квалитетног решења у читавом дијапазону параметара којима се описује равнотежни (напредујући, прогресивни) лет хеликоптера класичне једнороторне конфигурације, док се побољшани математички модел таквог лета може вертикално повезивати са комплекснијим инжењерским алатима у циљу формирања хибридних *dual-solver* платформи за решавање великог броја проблема из области прелиминарног пројектовања летелица са ротирајућим крилом, процене летних перформанси, симулације лета у реалном времену и анализе аероеластичне стабилности и управљивости.

Кандидат је пажљивим планирањем, организацијом и реализацијом комплексних серија нумеричких експеримената и обрадом и анализом великог броја генерисаних података у потпуности верификовао полазне хипотезе и постављене научне циљеве дисертације.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Марјан Додић је верификово свој научни допринос публикавањем резултата проистеклих из дисертације у оквиру једног рада у научном часопису категорије M21. Поред наведеног, кандидат је објавио још један рад у часопису категорије M51, који је проистекао из истраживања у оквиру саме дисертације.

4.3.1 Преглед објављених резултата по категоријама у вези са темом дисертације:

Врхунски међународни часопис (M21)

1. **Marjan Dodic**, Branimir Krstic, Bosko Rasuo, Mirko Dinulovic, Aleksandar Bengin, *Numerical Analysis of Glauert Inflow Formula for Single-Rotor Helicopter in Steady-Level Flight below Stall-Flutter Limit*, Aerospace (2023) Vol.10, Issue 3, 238, ISSN: 2226-4310, IF:2022: 2.6

<https://doi.org/10.3390/aerospace10030238>

Врхунски часопис националног значаја (M51)

2. **Marjan Dodic**, Branimir Krstic, Bosko Rasuo, *Single rotor helicopter parasite drag estimation in the preliminary design stage*, Tehnika (2018) Vol. 73, Issue 1, pp. 65-77

<https://doi.org/10.5937/tehnika1801063D>

4.3.2 Остала библиографија кандидата:

Истакнути међународни часопис (M22)

1. Younes Djemaoune, Branimir Krstic, Stefan Rasic, Daniel Radulovic, **Marjan Dodic**, *Numerical Investigation into In-Plane Crushing of Tube-Reinforced Damaged 5052 Aerospace Grade Aluminum Alloy Honeycomb Panels*, Materials (2022) Vol. 14, Issue 17, 4992, ISSN: 1996-1944, IF 2021: 3.748
2. Branimir Krstic, Lamine Rebhi, Nada Ilic, **Marjan Dodic**, Mirko Dinulovic, Predrag Andric, Dragan Trifkovic, *Failure of mounting bolt of helicopter main gearbox support strut*, Engineering Failure Analysis (2016), Vol. 70, pp. 351-363, ISSN: 1350-6307, IF 2016: 1.676
3. Branimir Krstic, Lamine Rebhi, Dragan Trifkovic, Nabil Khetrou, **Marjan Dodic**, Sreten Peric, Milorad Milovancevic, *Investigation into recurring military helicopter landing gear failure*, Engineering Failure Analysis (2016), Vol. 63, pp. 121-130, ISSN: 1350-6307, IF 2016: 1.676

Међународни часопис (M23)

4. Younes Djemaoune, Branimir Krstic, Stefan Rasic, Daniel Radulovic, **Marjan Dodic**, *Experimental investigation of an alternative approach to temporarily repair Nomex honeycomb sandwich structures in aerospace applications*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L: Journal of Materials: Design and Applications (2022) Vol. 237, Issue 5, pp. 1215–1228, ISSN: 1464-4207, IF 2021: 2.663
5. Dalibor Petrovic, **Marjan Dodic**, Nenad Kapor, *A New Design Solution for Aircraft Wheels that Reduces Overpressure in the Tire while Retaining its Absorption Power and its Dimensions*, Strojniski Vestnik-Journal Of Mechanical Engineering (2020), Vol. 66, Issue 7-8, pp. 431-438, ISSN: 0039-2480, IF 2020: 1.554

Национални часопис међународног значаја (M24)

6. Younes Djemaoune, Branimir Krstic, Bosko Rasuo, Stefan Rasic, Daniel Radulovic, **Marjan Dodic**, *Numerical Investigation of Dynamic Response of Honeycomb Sandwich Panels Filled with Circular Tubes Under Low Velocity Impact in the In-Plane Direction*, FME Transactions (2022) Vol. 49, Issue 4, pp. 969-976, ISSN: 1451-2092

Врхунски часопис националног значаја (M51)

7. Younes Djemaoune, Branimir Krstic, Daniel Radulovic, Stefan Rasic, **Marjan Dodic**, *Numerical investigation of open-hole damaged Nomex™ honeycomb panel under three-point bending load*, Scientific Technical Review (2021) Vol. 71, Issue 2, pp. 14-18

Истакнути часопис националног значаја (M52)

8. Lamine Rebhi, Mirko Dinulovic, Predrag Andric, **Marjan Dodic**, Branimir Krstic, *On the effective shear modulus of composite honeycomb sandwich panels*, Scientific Technical Review (2016) Vol. 66, Issue 4, pp. 59-65

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације кандидата Марјана Додића, дипл. инж. маш., под насловом „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена докторска дисертација представља оригиналан научни допринос нумеричком решавању Глауертове једначине у оквиру теорије идеалног ротора примењене на равнотежни лет хеликоптера. За потребе извођења нумеричких експеримената у оквиру ове дисертације наменски је развијен нумерички код са великим бројем пратећих скрипти у програмском језику Julia[®]. Резултати истраживања указују на могућност успешне примене побољшаног математичког модела равнотежног лета хеликоптера, као и саме процедуре нумеричког решавања Глауертове једначине у моделирању летелица са ротирајућим крилом. Тема припада области машинства, ужа научна област Ваздухопловство. Комисија констатује да је дисертација написана према свим стандардима научноистраживачког рада, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Универзитета у Београду - Машинског факултета. Комисија констатује да је кандидат Марјан Додић, дипл. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предметом и задатим циљевима истраживања.

Комисија предлаже Наставно – научном већу Универзитета у Београду – Машинског факултета да се докторска дисертација под насловом „Нумеричко решавање Глауертове једначине проточности ротора у условима равнотежног лета хеликоптера испод границе прихватљивости стол-флатера“ кандидата Марјана Додића, дипл. инж. маш., заједно са овим Извештајем, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 18.12.2023.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Оливера Костић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Огњен Пековић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Јелена Сворцан, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Тони Иванов, доцент
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Бранимир Крстић, ванредни професор
Универзитет одбране у Београду – Војна академија