

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14 · Поштански фах 73
18000 Ниш · Србија
Телефон 018 529 105 · Телефакс 018 588 399
E-mail: efinfo@elfak.ni.ac.rs; <http://www.elfak.ni.ac.rs>
Текући рачун: 840-1721666-89; ПИБ: 100232259



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING

Aleksandra Medvedeva 14 · P.O. Box 73
18000 Niš - Serbia
Phone +381 18 529 105 · Fax +381 18 588 399
E-mail: efinfo@elfak.ni.ac.rs
<http://www.elfak.ni.ac.rs>

ДЕКАН

15.06.2023. године

О Б А В Е Ш Т Е Њ Е
НАСТАВНИЦИМА И САРАДНИЦИМА ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Докторска дисертација кандидата **мр Маја Станковић** под насловом „Дистрибуирана калибрација сензорских мрежа у великим системима управљања заснована на консензусу“ и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације доступни су на увид јавности у електронској верзији на званичној интернет страници Факултета и налазе се у штампаном облику у Библиотеци Електронског факултета у Нишу, и могу се погледати до **15.07.2023. године**.

Примедбе на наведени извештај достављају се декану Електронског факултета у Нишу у напред наведеном року.

Председник Наставно-научног већа
ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА У НИШУ

Декан

Проф. др Драган Манчић



ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
родитеља и име
Датум и место рођења

Станковић, Срђан, Маја
29. 05. 1976., Београд

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ
У НИШУ

Основне студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет
Телекомуникације
Дипломирани инжењер електротехнике
1995.
2002.
8.57 (осам и 57/100)

Примљено 15.06.2023
Број
07/03-014/23-004

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет
Управљање системима
Магистар електротехничких наука
2002
2014
10 (десет)
Управљање системима
Дистрибуирани градијентни алгоритам за макро-калибрацију бежичних сензорских мрежа

Докторске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Година уписа
Остварен број ЕСПБ бодова
Просечна оцена

Универзитет у Нишу
Електронски факултет у Нишу
Електротехника и рачунарство - научна област Управљање системима
2017.
400
10

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске
дисертације
Име и презиме ментора,
звање
Број и датум добијања
сагласности за тему
докторске дисертације

Дистрибуирана калибрација сензорских мрежа у великим системима управљања заснована на консензусу
Др Драган Антић, редовни професор
8/20-01-002/22-017 од 21.02.2022. год.

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна
Број поглавља
Број слика (шема, графикона)
Број табела
Број прилога

152
8
39
0
3

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТКИЊЕ
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>M. Stanković, "Distributed asynchronous consensus-based algorithm for blind calibration of sensor networks with autonomous gain correction", <i>IET Control Theory & Applications</i>, Vol. 12, No. 16, pp. 2287-2293, 2018.</p> <p>У овом раду се разматра нови алгоритам за дистрибуирану асинхрону калибрацију појачања врши аутономно, уведена је стохастичка комуникација између сензора заснована на принципу „оговарања“. Уведене су инструменталне променљиве у основни градијентни алгоритам у циљу превазилажења проблема корелисаности променљивих у алгоритму. Доказано је да алгоритам пружа конвергенцију ка консензусу са вероватноћом 1 и у средње-квадратном смислу, уз нерестриктивне претпоставке о корелационој функцији мереног сигнала, на бази коришћења теорије асинхроне стохастичке апроксимације. Теоријски резултати су потврђени експериментално.</p>	M21
2	<p>M. Stanković, D. Antić, "Distributed consensus-based calibration of networked control systems", <i>Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics</i>, Vol. 18, No. 2, pp. 95-111, 2020.</p> <p>У раду је предлошен нови приступ дистрибуираној макро-калибрацији наслепо великих сензорских мрежа заснован на аутономној корекцији појачања. У детерминистичком случају непостојања поремећаја изведене су рекурзије подешавања појачања и офсета које, у целини, представљају специфичне шеме динамичког консензуса са тачкама конвергенције окарактерисаним једнаким вредностима офсета и појачања. Доказана је експоненцијална конвергенција алгоритма ка консензусу. Доказано је да алгоритам конвергира ка датим референтним вредностима параметара у случају једног референтног чвора. Низ симулација илуструје битне особине алгоритма, укључујући брзину конвергенције.</p>	M51
3	<p>M. Stanković, D. Antić, "Distributed non-linear robust consensus-based sensor calibration for networked control systems", <i>IET Control Theory & Applications</i>, Vol. 14, No. 9, pp. 1200-1208, 2020.</p> <p>У раду је дат опити предлог нелинеарних алгоритама дистрибуиране калибрације сензорских мрежа наслепо. Под веома генералним претпоставкама доказана је конвергенција предложеног алгоритма ка консензусу са вероватноћом 1 и у средњеквадратном смислу у случају постојања мерног и комуникационог шума. У случају избора нелинеарности на бази теорије робусне статистике, предложени су робусни алгоритми дистрибуиране калибрације отпорни на спорадично велике реализације комуникационог или мерног шума. Показано је, на бази Монте Карло анализе, да је предложени робусни алгоритам супериоран у односу на линеарни алгоритам, како у погледу помераја, тако и у погледу варијансе, што је од значаја за праксу.</p>	M21
4	<p>M. Stanković, D. Antić, S. Nikolić, "Convergence Rate for Distributed Macro Calibration of Sensor Networks based on Consensus", <i>Acta Polytechnica Hungarica</i>, 2023. Vol. 20, No. 4, pp. 161-179, 2023.</p> <p>У овом раду је дата детаљна теоријска анализа конвергенције алгоритама дистрибуиране макро калибрације која полази од линеарног модела сензора у случају присуства адитивног комуникационог и мерног шума. Показано је да је конвергенцију ка консензусу са вероватноћом 1 и у средњеквадратном смислу могуће постићи уз адекватну претпоставку о брзини конвергенције алгоритма за корекцију појачања. Оцена брзине конвергенције алгоритма за корекцију појачања изведена је на бази опитних особина алгоритама дистрибуиране стохастичке апроксимације и особина квадратних функција Љапунова. Показано је да алгоритам пружа конвергенцију ка жељеним вредностима параметара и у случају постојања једног изабраног референтног чвора. Низ симулационих примера илуструју особине анализираних алгоритма.</p>	M23
5	<p>M. Stanković, D. Antić, "Multi-Agent Distributed Calibration of Large Sensor Networks", in <i>ICIST 2020 Proceedings</i>, 2020, pp. 68-73.</p> <p>У овом раду је представљена опита методологија дистрибуиране калибрације великих сензорских мрежа на бази консензуса. Дата је најпре опита анализа примене сензорских мрежа у склопу мрежних система управљања и кибер-физичких система. Демонстриран је значај адекватне макро-калибрације великих сензорских мрежа која је усмерена на постизање датих особина мреже нао целине. Као пример дата је презентација једне оригиналне методе за дистрибуирану макро калибрацију наслепо засноване на градијентном алгоритму. Дат је, такође, и низ симулационих илустрационих примера који приказују изложене опите концепте.</p>	M33
6	<p>M. Станковић, „Дистрибуирана макро-калибрација сензорских мрежа”, <i>Зборник радова 21. конференције YU INFO</i>, Копаник, Србија, Март 8.-11., 2015, стр. 216-221.</p> <p>У овом раду је дата дискусија проблема калибрације великих сензорских мрежа у склопу мрежних система управљања, кибер-физичких система и интернета ствари. Показано је да је неопходно усмерити пажњу на постизање жељених особина мреже као целине, с обзиром на типична ограничења која проистичу из практичних примена. Приказан је један дистрибуиран алгоритам калибрације сензорских мрежа заснован на консензусу. Прилошен је и низ илустративних примера.</p>	M63

НАПОМЕНА: уколико је кандидаткиња објавила више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидаткиња испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.	ДА
<p>На основу Извештаја Комисије за оцену испуњености критеријума за покретање поступка за пријаву докторске дисертације и покретање поступка за оцену и одбрану докторске дисертације бр. 07/03-014/23-001 од 22. 05. 2023. год., установљено је да кандидаткиња мр Маја Станковић, дипл. инж. ИСПУЊАВА све предвиђене критеријуме за покретање</p>	

поступка за оцену и одбрану докторске дисертације. Наиме, кандидаткиња мр Маја Станковић, дипл. инж. доставила је Факултету доказ да је првопотписани аутор рада у часопису са SCI листе, као и да је првопотписани аутор рада објављеног у часопису који издаје Универзитет у Нишу, па је Комисија, сходно томе, предложила покретање поступка за оцену и одбрану докторске дисертације.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације

Ова докторска дисертација посвећена је проблему дистрибуиране макро калибрације великих сензорских мрежа који је од великог значаја за савремене примене, посебно у склопу кибер-физичких система, интернета ствари и управљања великим системима. Дисертација има логичан ток и прецизно је језички формулисана. Подељена је на шест поглавља: *Кибер-физички системи и интернет ствари*, *Калибрација сензорских мрежа*, *Калибрација без присуства поремећаја - синхроне комуникације*, *Калибрација у присуству поремећаја - синхроне комуникације*, *Калибрација у присуству поремећаја - асинхроне комуникације* и *Дистрибуирани нелинеарни робусни алгоритми калибрације*, и три прилога: *Динамички консензус протоколи - дефиниција*, *Конвергенција консензус протокола* и *Робусна естимација параметара*. Осим наведених поглавља и додатака, дисертација садржи и одговарајући кратак резиме, написан на српском и енглеском језику, списак слика и табела, као и увод. На крају дисертације изведени су одговарајући закључци, дати су главни доприноси докторске дисертације и списак коришћене литературе.

У поглављу 2 дате су дефиниције кибер-физичких система и интернета ствари, заједно са одговарајућом компаративном анализом, са посебним нагласком стављеним на улогу бежичних сензорских мрежа у оквиру кибер-физичких система и мрежних система управљања великим системима. Обухваћене су опште особине ових мрежа, карактеристике њихових чворова и интеграција у склопу кибер-физичких система.

Поглавље 3 посвећено је приказу области калибрације великих сензорских мрежа. Дате су основне дефиниције калибрације сензора и сензорских мрежа, које укључују микро-калибрацију, макро-калибрацију, макро-калибрацију наслепо и дистрибуирану калибрацију. У посебном одељку су приказани различити модели сензора коришћени приликом калибрације. На бази доступне литературе, која се састоји не само од научних радова, већ и од приказа пројектованих решења, укратко су описане најзначајније методе за дистрибуирану калибрацију, с обзиром на сродност са методом калибрације предложеном у овој докторској дисертацији. У посебном одељку су приказана нека актуелна решења у области калибрације сензора која су се показала као успешна и методолошки интересантна.

Оригинални предлог алгоритма макро-калибрације наслепо, који представља основу докторске дисертације, састоји се од:

1) независног рекурзивног градијентног алгоритма за оцењивање параметара корекције појачања сензора, који полази од модела прираштаја излазног сигнала сензора, и

2) рекурзивног градијентног алгоритма за оцењивање параметара корекције офсета, који користи текуће резултате добијене у оквиру алгоритма оцењивања параметара појачања.

Овакав комбиновани алгоритам није до сада разматран у литератури. У практичном, инжењерском смислу, предложени алгоритам пружа рачунски једноставно решење проблема макро калибрације у пракси, засновано на локалној обради мерних података и комуникацији сензора само са својим суседима.

У Поглављу 4 анализиран је предложени алгоритам у случају одсуства поремећаја и при синхроним комуникацијама између чворова. Најпре је дат алгоритам за корекцију офсета, а затим алгоритам за корекцију појачања, док је у одвојеном одељку дата анализа алгоритма у случају симултане корекције офсета и појачања. Дати су докази конвергенције предложеног алгоритма у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1. Доказано је да је конвергенција ка консензусу експоненцијална, чиме се постиже асимптотска једнакост свих коригованих појачања и офсета. У случају када је карактеристика једног изабраног сензора изабрана као референтна (идеална) доказано је да алгоритам обезбеђује експоненцијалну конвергенцију свих сензора ка изабраној карактеристици, што је од изузетног значаја за праксу. Резултати симулације илуструју понашање алгоритма при различитим мрежама и при различитим изборима величине корака алгоритма.

У Поглављу 5 предложени алгоритам је теоријски анализиран у случајном окружењу, посебно у случају комуникационог, а посебно у случају мерног шума. У случају белог комуникационог шума доказана је конвергенција ка консензусу у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1. У циљу поступности анализе, пажња је, најпре, посвећена корекцији офсета, а затим корекцији појачања. У случају белог мерног шума, показано је да оригинална градијентна процедура приказана у Поглављу 4 не обезбеђује консензус услед корелације зашумљених променљивих у основној форми алгоритма. Предложено је оригинално решење засновано на увођењу инструменталних променљивих. Показано је да се за инструменталне променљиве могу да изаберу закасне вредности мереног сигнала. Симултано оцењивање калибрационих параметара је методолошки сложено, јер подразумева анализу брзине конвергенције алгоритма за корекцију појачања. На оригиналан начин, користећи брзину конвергенције квадратних функција Љапунова, доказано је да конвергенција ка консензусу постоји и у случају симултаног оцењивања офсета и појачања. Анализа обухвата и процедуре које се добијају из основне процедуре фиксирањем карактеристика једног изабраног сензора. Дата је и исцрпна анализа симулационих резултата.

У Поглављу 6 приказан је нови алгоритам за асинхрону макро-калибрацију наслепо у условима постојања комуникационог и мерног шума. Најпре је дата дефиниција проблема, где је пажња посвећена примени асинхроних комуникација на бази принципа „оговарања“ ("gossip") као и одговарајућих Поасонових модела. Приказан је алгоритам за оцену корекционог параметра за појачање, а затим за офсет. Посебно је од значаја анализа услова који се односе на особине мереног сигнала. Доказ конвергенције асинхроних алгоритма представља један од најважнијих теоријских доприноса докторске дисертације, имајући у виду да је закључке могуће применити и на опште алгоритме динамичког консензуса. Доказ се заснива на комбинацији аргумената употребљених приликом доказа конвергенције у синхроном случају у оквиру Поглавља 5. Посебно је показано да алгоритам конвергира и у случају једног изабраног референтног чвора. Приложени су илустративни резултати симулација.

Поглавље 7 је посвећено дистрибуираним нелинеарним робусним алгоритмима калибрације. Дата је општа

формулација алгоритама калибрације у случају примене нелинеарне трансформације резидуала, која има значај сама за себе. Под општим условима, који се односе на избор применене нелинеарне трансформације, представљен је доказ конвергенције алгоритама калибрације ка консензусу у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1. Посебан значај за проблеме калибрације има робустификација предложених алгоритама у односу на комуникациони и мерни шум, остварена адекватним избором нелинеарних трансформација резидуала. Дат је осврт на елементе робусне статистике релевантне за овај корак, па је показано да се осетљивост алгоритама на велике реализације шума ("outliers") може значајно смањити. За праксу је овај резултат од великог значаја имајући у виду да велике реализације поремећаја импулсног типа могу често да буду присутне у великим сензорским мрежама. Резултати симулација веома убедљиво показују да су предложени алгоритми далеко робуснији на шумове од линеарних, како у погледу варијансе оцена, тако и у погледу помераја.

У Прилогу 1 дата је општа дефиниција континуалних и дискретних консензус протокола коришћена у докторској дисертацији.

Прилог 2 посвећен је конвергенцији основних алгоритама динамичког консензуса употребљених у докторској дисертацији.

У Прилогу 3 дати су основне дефиниције робусних алгоритама естимације параметара, са нагласком на рекурзивним методама.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације

Кандидаткиња је успешно остварила све постављене циљеве из пријаве докторске дисертације. Наиме, главни циљ спроведеног научног истраживања био је развој новог дистрибуираног алгорита за макро калибрацију наслепо. На бази увида у улогу великих сензорских мрежа у мрежним системима управљања и кибер-физичким системима, као и на основу анализе публикованих резултата у области калибрације сензора и сензорских мрежа, формулисан је предлог новог алгорита са побољшаним својствима у односу на постојеће. Анализи конвергенције овог алгорита, која за себе представља нетривијалан проблем, посвећена су Поглавља 4 до 7. При томе су обухваћени случајеви а) одсуства поремећаја и б) када су присутни комуникациони и мерни шумови како у случају синхроних, тако и асинхроних комуникација. Докази су изведени у виду низа теорема и односе се на конвергенцију са вероватноћом 1 и у средње-квадратном смислу. Додатан увид у особине предложеног алгорита пружају многобројни резултати Монте-Карло симулација. Посебан теоријски и практични значај има предложени алгоритама робусне калибрације.

Потребно је нагласити да докторска дисертација представља добру основу за нова истраживања у овој области, како у погледу примене предложеног алгорита у сложеним системима управљања, тако и у погледу екстензије његове примене на нелинеарне моделе сензора.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације

По оцени чланова Комисије, најзначајнији доприноси докторске дисертације мр Маје Станковић, дипл. инж. су:

- оригиналан предлог новог алгорита за дистрибуирану макро-калибрацију наслепо великих сензорских мрежа, као делова кибер-физичких система, заснован на распрегнутој корекцији офсета и појачања, који има низ предности у односу на постојеће, пошто је рачунски и комуникационо веома једноставан и може да представља широко применљив алат у склопу дистрибуираних система управљања великим и сложеним системима,

- доказ експоненцијалне конвергенције коригованих вредности појачања и офсета ка консензусу у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1 у случају широке класе мерених сигнала без присуства поремећаја,

- доказ конвергенције предложеног алгорита у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1 при синхроним комуникацијама у присуству комуникационог и мерног шума, на бази оригинално изведеног директног увида у брзину конвергенције алгорита за корекцију појачања,

- доказ конвергенције предложеног алгорита у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1 при асинхроним комуникацијама у присуству комуникационог и мерног шума,

- доказ конвергенције у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1 нелинеарног алгорита корекције појачања и офсета при широкој класи нелинеарних трансформација у алгоритму,

- предлог нових робусних алгоритама корекције појачања и офсета добијених тако што су нелинеарности, укључене у предложени алгоритама, изабране у складу са методологијом робусне статистике,

- доказ да се избором референтног чвора може постићи да предложени алгоритама пружа конвергенцију свих коригованих појачања и офсета у мрежи ка жељеним вредностима у средње-квадратном смислу и са вероватноћом 1, што је од великог значаја за праксу,

- верификација теоријских резултата коришћењем низа карактеристичних примера који ове теоријске резултате у потпуности потврђују.

Даљи истраживачки рад, који би се надовезивао на резултате дисертације, могао би да буде усмерен ка сложенијим моделима сензора, ка детаљнијем увиду у начин избора тежинских коефицијената алгорита у складу са унапред дефинисаним додатним критеријумима који се постављају пред мрежу у целини, као и ка моделима који би садржали и просторну компоненту.

Један део резултата, непосредно проистеклих или везаних за ову дисертацију, већ је верификован у научним радовима објављеним у истакнутим међународним и домаћим часописима, као и у зборницима са међународних и домаћих конференција, који су цитирани у оквиру литературе.

Оцена самосталности научног рада кандидаткиње

Кандидаткиња Маја С. Станковић је у научно-истраживачком раду везаном за докторску дисертацију показала велику самосталност, која се посебно огледа кроз предлог самог алгорита, нове приступе његовој теоријској анализи, као и иницирању конструкције нових алгоритама са специјалним особинама. Наравно, претходно публиковани резултати, укључујући практичну имплементацију симулационих модела, представљају у целини резултат заједничког рада са истраживачима Лабораторије за моделирање, симулацију и управљање системима при Катедри за аутоматiku, Електронског

факултета у Нишу, Универзитета у Нишу. Провером докторске дисертације на плагијаризам од стране Универзитета у Нишу потврђена је њена оригиналност као и самосталност научног рада кандидаткиње, при чему индекс сличности указује углавном на аутоцитате из објављених радова кандидаткиње.

ЗАКЉУЧАК

На основу целовитог увида може се закључити да поднета докторска дисертација мр Маје Станковић, дипл. инж. садржи низ оригиналних научних доприноса развоју дистрибуираних алгоритама макро калибрације сензорских мрежа у великим мрежним системима управљања. Резултати истраживања поседују значајне научне доприносе, који, са једне стране, имају теоријски значај, а са друге стране, указују да је предложени алгоритам калибрације погодан за широку примену у пракси. Приказаним резултатима обезбеђена је добра основа за будућа истраживања у научној области мрежних система управљања.

Имајући у виду значај обрађене проблематике и остварене научне резултате, чланови Комисије предлажу Наставно-научном већу Електронског факултета у Нишу да прихвати докторску дисертацију кандидаткиње мр Маје Станковић, дипл. инж. под насловом „Дистрибуирана калибрација сензорских мрежа у великим системима управљања заснована на консензусу“ и одобри њену усмену одбрану.


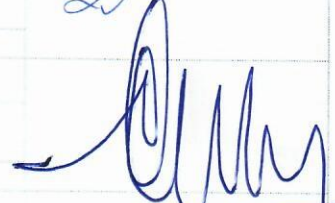



КОМИСИЈА

Број одлуке НСВ о именовану Комисије

8/20-01-005/23-037

Датум именовања Комисије

05. 06. 2023.

Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис
1.	Проф. др Дарко Митић, редовни професор Електротехничко и рачунарско инжењерство - Аутоматика (Научна област) Универзитет у Нишу, Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	председник 
2.	Проф. др Драган Антић, редовни професор Електротехничко и рачунарско инжењерство - Аутоматика (Научна област) Универзитет у Нишу Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	ментор 
3.	Проф. др Властимир Николић, редовни професор Машинско инжењерство - Аутоматско управљање и роботика (Научна област) Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 
4.	Проф. др Марко Милојковић, редовни професор Електротехничко и рачунарско инжењерство - Аутоматика (Научна област) Универзитет у Нишу Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 
5.	Проф. др Саша С. Николић, ванредни професор Електротехничко и рачунарско инжењерство - Аутоматика (Научна област) Универзитет у Нишу, Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 

Датум и место: 15.06.2023. год., Ниш