

ПРИМЉЕНО:		30. 10. 2023	
Рад.јед.	б р о ј	Арх.шифра	Прилог
0301	1601/1		

## НАУЧНОМ ВЕЋУ ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ

### Извештај комисије за избор др Игора Франовића у звање научни саветник

На седници Научног већа Института за физику у Београду одржаној 3. октобра 2023. године именовани смо у комисију за избор др Игора Франовића у звање научни саветник.

Прегледом материјала који нам је достављен, као и на основу личног познавања кандидата и увида у његов рад и публикације, Научном већу Института за физику у Београду подносимо овај извештај, чији су саставни део и прилози из поднетог материјала.

### 1. БИОГРАФСКИ И СТРУЧНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Др Игор Франовић је рођен 25. фебруара 1979. године у Београду. Завршио је Пету београдску гимназију као ђак генерације 1997. године, након чега је уписао основне студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер теоријска и експериментална физика. Дипломирао је 2002. године са просечном оценом 9,43, одбравивши дипломски рад на тему “Анализа Јан-Телеровог ефекта на примеру прелазног метал-комплекса” под руководством проф. др Драгољуба Белића. Магистарске студије на Физичком факултету у Београду, смер теоријска физика кондензованог стања, завршио је са просечном оценом 10,00, а магистарску тезу под насловом “Перколациони фазни прелази на просторно-временским фракталним структурама у ex-vivo и in-vitro неуронским културама” одбранио је 2011. године под менторством доц. др Владимира Миљковића. Докторат под насловом “Collective dynamics and self-organisation of stochastic neuronal systems influenced by synaptic time delay” одбранио је 2013. године на Физичком факултету у Београду под менторством др Николе Бурића.

Од 2004. до 2006. године кандидат је на Физичком факултету Универзитета у Београду, као стипендиста Министарства науке и заштите животне средине, учествовао на пројекту “Фазни прелази и нелинеарне појаве у биолошким и неорганским материјалима”, којим је руководио проф. др Сава Милошевић. Од јануара 2008. године до јануара 2011. године био је запослен на Физичком факултету као истраживач приправник у оквиру пројекта “Фазни прелази и карактеризација неорганских и органских система”, којим је руководио проф. др Мићо Митровић. Од јануара 2011. до марта 2014. године био је ангажован на Физичком факултету у Београду као истраживач приправник, а затим и као истраживач сарадник на националном пројекту “Фазни прелази и карактеризација неорганских и органских система” (ОН171015), којим је руководила проф. др Сунчица Елезовић-Хацић. Од марта 2014. године др Франовић је запослен у Лабораторији за примену рачунара у науци у оквиру Националног центра изузетних вредности за изучавање комплексних система Института за физику у Београду. У периоду од 2014. до 2019. године, био је ангажован на националном пројекту “Моделирање и нумеричке симулације сложених вишечестичних система” (ОН171017), којим је руководио др Антун Балаж. У оквиру овог пројекта, др Франовић је руководио потпројектом

Самоорганизација у спрегнутим ексциtabilним системима. У периоду од 2019. до 2023. године, др Франовић је руководио истраживањем на потпројекту “Емергентна динамика на комплексним мрежама: стохастички ефекти, кашњење у интеракцијама, адаптивност” у оквиру Центра изузетних вредности за изучавање комплексних система. У децембру 2014. године изабран је у звање научни сарадник, а маја 2019. године у звање виши научни сарадник.

Истраживачки рад др Франовића обухвата области теорије нелинеарне динамике, стохастичких процеса и теорије комплексних мрежа, а као водеће теме истраживања се издвајају самоорганизација и формирање патерна у системима спрегнутих ексциtabilних јединица, редукционе методе за анализу колективне динамике спрегнутих динамичких система, динамика система на вишеструким временским скалама, мултистабилност, алтернирајућа динамика и адаптивност у неуронским системима, као и развој методе средњег поља за анализу стабилности и бифуркација система стохастичких диференцијалних једначина са и без кашњења.

Његов досадашњи рад укључује 47 радова у међународним часописима, као и два поглавља у књизи. Од 46 радова категорије M20, 32 је објављено у часописима изузетних вредности категорије M21a. У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, др Франовић је објавио 16 радова у часописима са ISI листе. Од тога је 10 у категорији M21a, 4 у категорији M21 и 2 у категорији M22. Своје резултате је представио кроз 11 предавања по позиву категорије M32, као и три предавања по позиву на иностраним универзитетима и институтима. Др Франовић је добитник награде за најбољег младог истраживача Физичког факултета у Београду за 2013. годину, као и добитник Годишње награде за научни допринос Института за физику у Београду за 2020. годину.

## **2. ПРЕГЛЕД НАУЧНЕ АКТИВНОСТИ**

Досадашњи научноистраживачки рад др Игора Франовића припада области нелинеарне динамике и статистичке физике.

Др Франовић се бави теоријском анализом самоорганизације и генеричких форми емергентног понашања у комплексним системима, чија је локална динамика представљена моделима спрегнутих осцилатора или ексциtabilних јединица. У свом раду интегрише концепте и методе из неколико различитих области физике, укључујући теорију нелинеарне динамике, статистичку физику и теорију комплексних мрежа, док се као главна мотивација и потенцијалне области примене добијених резултата истичу карактеризација, предвиђање и контрола колективне динамике неуронских мрежа и других биолошких система.

У ширем контексту, проучавање емергентних феномена заснованих на (парцијалној) синхронизацији елемената, као главном принципу самоорганизације, представља парадигму за карактеризацију макроскопске динамике великог броја природних и артифицијелних система, од физике, хемије и биологије, преко инжењерства и технологије до социологије и економије. При том, класа ексциtabilних система, чије је карактеристично нелинеарно понашање одређено тиме што им се параметри налазе у близини бифуркације која преводи систем из стационарног стања у осцилаторни режим, је у фокусу

савремених истраживања како због теоријског значаја, тако и због могућности практичне примене, пре свега у биофизици и неуронауци. Комплексности колективног понашања система спрегнутих ексциtabilних јединица доприносе особине локалне динамике, која типично подразумева вишеструке временске скале, значајан утицај шума и кашњења у интеракцијама, коезистенција атрактивних и репулзивних интеракција, као и модуларна организација како на структурном, тако и на функционалном нивоу. Проучавање емергентне динамике на оваквим системима већ је довело до настанка значајних нових теоријских концепата, као што су редукциони приступи за анализу макроскопске динамике система; методе анализе патерна кохеренције-некохеренције, као и различитих форми пропагативних и само-локализованих патерна активности; установљење појма адаптивних мрежа; развој техника анализе стабилности и бифуркација система стохастичких диференцијалних једначина са и без кашњења.

У досадашњем раду, др Франовић се бавио развојем редукционих метода за проучавање генеричких форми емергентног понашања у системима спрегнутих ексциtabilних или осцилаторних јединица, развојем теорије динамике система на вишеструким временским скалама, као и развојем аналитичких метода за проучавање стабилности и бифуркација макроскопске динамике стохастичких система с кашњењем у интеракцијама. Укупан досадашњи рад др Франовића се може поделити у следеће подтеме:

- патерни кохеренције-некохеренције у системима спрегнутих ексциtabilних јединица;
- алтернирајућа (switching) динамика у системима спрегнутих ексциtabilних јединица с адаптивношћу;
- мултистабилност и споре стохастичке флукуације средње активности у неуронским мрежама;
- екстензија појма ексциtabilности на системе с периодичним орбитама;
- макроскопска динамика хетерогених система;
- хаотични системи с екстремном мултистабилношћу;
- спонтано кластеровање у системима спрегнутих ексциtabilних јединица под утицајем шума и кашњења у интеракцијама;
- проблем активације у системима спрегнутих ексциtabilних јединица с вишеструким изворима шума;
- развој гаусијанске методе средњег поља за анализу стабилности и бифуркација система стохастичких диференцијалних једначина са и без кашњења;
- динамика мотива стохастичких неурона с кашњењем у интеракцијама;
- патерни пропагације синхронизоване активности у мезоскопским неуронским мрежама;
- примена теорије нелинеарне динамике у интердисциплинарним истраживањима;
- неуређене конфигурације кинетичког Изинговог модела на комплексним мрежама.

У наредним подсекцијама су приказани главни научни резултати добијени у оквиру оних подтема којима се бавио у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања.

## 2.1. Патерни кохеренције-некохеренције у системима спрегнутих ексциtabilних јединица

Током последњих петнаест година, појава патерна кохеренције-некохеренције (алтернативно, патерна парцијалне синхронизације) на путу десинхронизације од потпуно синхронизованог ка несинхронизованом турбулентном стању постала је доминантна тема у истраживању колективне динамике спрегнутих осцилатора, замењујући као водећу тему фазни прелаз синхронизације приликом настанка колективне моде. Међутим, интуиција развијена за системе спрегнутих осцилатора не важи у системима спрегнутих осцилатора, између осталог и због фундаменталне особине спрегнутих ексциtabilних система да настајак нетривијалног колективног понашања захтева значајно присуство репулзивних, а не атрактивних интеракција. Два суштинска питања која су остала отворена односе се на пуну класификацију патерна кохеренције-некохеренције у системима спрегнутих ексциtabilних јединица, као и генеричке механизме настанка оваквих патерна. Недавна истраживања др Франовића значајно су допринела расветљавању ова два питања.

С једне стране, др Франовић је с колегама показао да у спрегнутим ексциtabilним системима с нелокалним атрактивним и репулзивним интеракцијама могу да настану патерни кохеренције-некохеренције који не постоје у системима спрегнутих осцилатора. То се пре свега односи на постојање тзв. *patched* патерна карактерисаних део-по-део константним профилем средњих фреквенција осциловања јединица, при чему се популација спонтано дели на тзв. већинске и мањинске *patch*-еве чије су фреквенције фиксирани у односу 1:2. У смислу временске зависности, *patched* патерни могу да буду периодични, квазипериодични и хаотични, а само хаотични патерни могу да манифестују интерфејсе између *patch*-ева, састављене од јединица с интермедијерном фреквенцијом између већинских и мањинских *patch*-ева, чија динамика одговара тзв. хаотичном лутању (*chaotic itinerance*). Применом класичне теорије бифуркација и хаоса у коначним системима обичних диференцијалних једначина, утврђено је да сценарио преласка у хаос с параметром који одређује превалентност репулзивних у односу на атрактивне интеракције, зависи од таласног броја патерна, одређеног дометом нелокалних интеракција. У случају већег таласног броја, тј. мањег домета интеракција, прелазак у хаос одвија се преко квазипериодичне динамике, разбијањем инваријантног турса. У случају мањег таласног броја, прелазак у хаос може бити праћен *derpinning* прелазом, где интерфејси престају да буду статични и манифестују дифузионо кретање. Др Франовић је показао да *patched* патерни показују значајне разлике у односу на химера стања, пре свега због тога што је прелазак у хаос колективни, а не просторно локализовани феномен, као и због тога што максимални Љапуновљев експонент достиже ненулту константну вредност с повећањем величине система. С друге стране, с другом групом страних колега, др Франовић је показао да у једноставним моделима система нелокално спрегнутих јединица с фазно-осетљивом ексциtabilношћу може да дође до формирања патерна каскадне активности, познатих у неуронауци као неуронске лавине, при чему такви патерни изненађујуће коегзистирају с робусним колективним ритмовима. Овакви патерни показују неке од особина критичног скалирања, пошто су уочени у околини критичних прелазних између стања ниске и високе средње фреквенције осциловања. Са становишта самоорганизације активности, оба новооткривена

типа патерна комбинују две касичне особине ексциtabilних система, самолокализоване ексцитације и пропагацију таласа активности. Као интересантна чињеница, показало се и да само мотиви од две спрегнуте ексциtabilне јединице могу да покажу нетривијалне патерне активности у форми тзв. leap-frogging динамике с алтернирајућим редоследом опаљивања јединица, који су организовани путем комплексног сценарија око прелаза канарда између subthreshold и релаксационих осцилација.

Поред нових типова патерна специфичних за спрегнуте ексциtabilне системе, истраживања др Франовића показала су и да генерички механизми настанка патерна кохеренције-некохеренције не следе сценарије познате из система спрегнутих осцилатора. Конкретно, у случају тзв. bump стања у системима с нелокалном атракцијом и глобалном репулзијом, по први пут је механизам настанка патерна кохеренције-некохеренције непосредно повезан с класичним Тјуринговим механизмом настанка патерна. Испоставило се да bump стања, за разлику од патерна кохеренције-некохеренције у системима спрегнутих осцилатора, могу да настану на суперкритичан начин, unlocking-ом само једне јединице с Тјуринговог патерна који одговара стању модулисана кохеренције. С друге стране, у случају солитарних стања, показана су два генеричка механизма настанка фундаментално различита од механизма настанка солитарних стања у системима спрегнутих осцилатора, од којих је један повезан, а други независан од небалансираних кластер стања у глобално повезаним мрежама.

Описани резултати приказани су у следећим радовима:

1. Scale-free Avalanches in Arrays of FitzHugh–Nagumo Oscillators, M. Contreras, E. S. Medeiros, A. Zakharova, P. Hövel, and **I. Franović**, Chaos **33**, 093106 (2023).
2. Patched Patterns and Emergence of Chaotic Interfaces in Arrays of Nonlocally Coupled Excitable Systems, **I. Franović** and S. R. Eydam, Chaos **32**, 091102 (2022).
3. Unbalanced Clustering and Solitary States in Coupled Excitable Systems, **I. Franović**, S. R. Eydam, N. Semenova, and A. Zakharova, Chaos **32**, 011104 (2022).
4. Bumps, Chimera States, and Turing Patterns in Systems of Coupled Active Rotators, **I. Franović**, O. E. Omel'chenko, and M. Wolfrum, Phys. Rev. E **104**, L052201 (2021).
5. Leap-frog Patterns in Systems of Two Coupled FitzHugh-Nagumo Units, S. R. Eydam, **I. Franović**, and M. Wolfrum, Phys. Rev. E **99**, 042207 (2019).

## 2.2. Алтернирајућа динамика у системима спрегнутих ексциtabilних јединица с адаптивношћу

Адаптивност је фундаментална особина бројних спрегнутих динамичких система која се огледа у промени структуре система под утицајем повратне спреге с

динамиком система. У погледу карактеристичних временских скала, системи с адаптивношћу најчешће имају брзо-спору структуру, у смислу да се адаптација одвија на споријој скали у односу на локалну динамику јединица. У неуронским системима, на пример, испољава се у два вида: кроз адаптацију јачина веза (синаптичка пластичност), и/или кроз промену особина локалне динамике јединица (адаптација фреквенције опаљивања или локалне ексцитабилности неурона). Користећи адаптацију у неуронским системима као мотивацију, др Франовић је са страним колегама, као и у сарадњи с др Ивом Бачић током њеног доктората, показао да: а) адаптивност може да доведе до појаве нових емергентних феномена заснованих на алтернирајућој динамици, као што су колективна *bursting* активност на нивоу великих популација, као и стохастички *bursting* на нивоу једне или мотива две спрегнуте јединице; б) у интеракцији са шумом, адаптивност може да игра значајну улогу у механизму настанка или контроли резонантних феномена (инверзна стохастичка резонанца, резонанца кохеренције); в) брзина адаптације на нетривијалан начин утиче на форме *switching* динамике између коегзистентних метастабилни стања; г) адаптивност може да доведе до критичних прелаза или да одржава динамику система у близини критичности. Конкретно, на примеру неуронске популације повезане повратном спрегом с резервоаром метаболичких ресурса, показано је да адаптивност доприноси настанку цикличних патерна активности, у којој динамика популације пролази кроз сукцесивне критичне прелазе који одговарају *switch*-евима из активног у псеудо-стационарни режим и обрнуто, што се манифестује као колективна *bursting* активност популације. На примеру мотива две стохастичке ексцитабилне јединице с адаптивним везама, показано је да спора адаптација (сингуларни лимес) може да индукује нову временску скалу на којој се одвија *switching* између осцилаторних мода изазваних шумом. С друге стране, умерено брза адаптација (коначно раздвајање временских скала) индукује алтернирајућу динамику између коегзистентних псеудо-стационарних и осцилаторних метастабилних стања. Тада је могућ и сценарио тзв. *biased switching*-а, где постоји преферентна вредност нивоа шума на којој је прелаз из осцилаторног у псеудо-стационарно стање много вероватнији од прелаза у супротном смеру, што се на нивоу средње фреквенције осциловања система манифестује као ефекат инверзне стохастичке резонанце, где фреквенција осциловања постаје минимална за интермедијерни интензитет шума. На примеру стохастичке ексцитабилне јединице са спором адаптацијом параметра ексцитабилности, утврђено је да редукована динамика садржи регион бистабилности између псеудо-стационарног режима и стохастички пертурбованих осцилација, што при малим, али коначним брзинама адаптације доводи до појаве *bursting* динамике засноване на алтернирању између коегзистентних стања.

У контексту развоја аналитичких метода, значај групе радова о адаптивности огледа се у увођењу нових редукционих метода за анализу система с динамиком на вишеструким временским скалама. Наиме, уведена је метода стохастичког усредњавања (*stochastic averaging*) за анализу брзо-спорих система са стохастичком *layer* динамиком заснована на комбинацији Фокер-Планковог формализма и класичне теорије сингуларних пертурбација. Такође, уведена је и нова редукциона техника заснована на интеграцији От-Антонсенове теорије за анализу макроскопске *layer* динамике спрегнутих фазних осцилатора и теорије сингуларних пертурбација.

Наведени резултати приказани су у следећим радовима:

1. Perspectives on Adaptive Dynamical Systems,  
J. Sawicki, R. Berner, S. A. M. Loos, M. Anvari, R. Bader, W. Barfuss, N. Botta, N. Brede, **I. Franović**, D. J Gauthier, S. Goldt, A. Hajizadeh, P. Hövel, O. Karin, P. Lorenz-Spreen, C. Miehl, J. Mölter, S. Olmi, E. Schöll, A. Seif, P. A. Tass, G. Volpe, S. Yanchuk, and J. Kurths,  
Chaos **33**, 071501 (2023).
2. Collective Activity Bursting in a Population of Excitable Units Adaptively Coupled to a Pool of Resources,  
**I. Franović**, S. R. Eydam, S. Yanchuk, and R. Berner,  
Front. Netw. Physiol. **2**, 841829 (2022).
3. Dynamics of a Stochastic Excitable System with Slowly Adapting Feedback,  
**I. Franović**, S. Yanchuk, S. R. Eydam, I. Bacic, and M. Wolfrum,  
Chaos **30**, 083109 (2020).
4. Two Paradigmatic Scenarios for Inverse Stochastic Resonance,  
I. Bačić and **I. Franović**, Chaos **30**, 033123 (2020).
5. Inverse Stochastic Resonance in a System of Excitable Active Rotators with Adaptive Coupling,  
I. Bačić, V. Klinshov, V. I. Nekorkin, M. Perc, and **I. Franović**,  
EPL **124**, 40004 (2018).
6. Noise-induced Switching in Two Adaptively Coupled Excitable Systems,  
I. Bačić, S. Yanchuk, M. Wolfrum, and **I. Franović**,  
Eur. Phys. J. - Spec. Top. **227**, 1077 (2018).

### **2.3. Мултистабилност и споре стохастичке флукуације средње активности у неуронским мрежама**

У оквиру ове области, др Франовић се бави анализом проблема макроскопске варијабилности, која представља емергентну форму колективног понашања на неуронским мрежама. Наиме, познато је да се активност неурона може описати као двоструки стохастички процес, који се с једне стране манифестује као микроскопска варијабилност у временским серијама појединачних неурона, и с друге стране, као макроскопска варијабилност, која се опажа на дугим временским скалама, и укључује споре стохастичке флукуације средње фреквенције емитовања импулса. Споре флукуације настају услед спонтаног алтернирања између епизода повишене активности неурона и епизода релативног мировања. Таква алтернирајућа динамика између различитих колективних стања је од посебног значаја за пирамидалне неуроне у неокортексу, и сматра се да представља динамичку парадигму за реализацију различитих форми учења и меморије. Циљ истраживања је да се утврде услови који омогућавају појаву switching динамике, при чему је акценат стављен на садејство различитих типова шума, кашњења у интеракцијама и хетерогености топологије интеракција мреже. Између осталог, разматран је и случај кластерованих мрежа неурона, које су нарочито заступљене у можданом кортексу. Главни резултат досадашњег

истраживања представља развој ефективног модел колективне активности кластероване мреже rate неурона, који омогућава да се процене различити доприноси ефективном макроскопском шуму, као и да се одреде области параметара где је могуће очекивати switching динамику. Од посебног значаја за могуће апликације је чињеница да се механизми switching динамике у случајним и модуларним неуронским мрежама квалитативно разликују, при чему је показано да кластеровање доприноси мултистабилности мреже, чинећи switching феномен робуснијим. Утврђено је и да карактеристике switching динамике индуковане спољашњом стимулацијом значајно зависе од типа стимулације, при чему стимулација усмерена на одређени кластер, за разлику од дистрибуиране стимулације, значајно смањује макроскопску варијабилност динамике мреже, усмеравајући је ка појединим метастабилним стањима. Додатно, релаксација мреже не зависи доминантно од амплитуде стимулације, већ од стања система у тренутку примене стимулације, при чему је уочен и феномен стохастичке амплификације појединих метастабилних стања са значајно продуженом релаксацијом након престанка стимулације.

У недавном истраживању са страним колегама, др Франовић је актуелизовао питање механизма настанка спорих стохастичких флукуација посматрајући реалистичнији модел мреже састављене од spiking неурона. У том контексту, отворено је питање механизма преласка из хомогеног асинхроног стања мреже с некорелисаном активношћу неурона у хетерогено асинхроно стање rate хаоса, које се одликује спорим стохастичким флукуацијама средње фреквенције осциловања. Показана су три различита сценарија преласка у стање rate хаоса, укључујући кластеровање структуре мреже, појачавање јачина синапси и повећавање константе интеграције синапси. Као изненађујући резултат, на примеру једноставног задатка динамичке меморије, показало се да рачунске способности мреже суштински зависе од сценарија преласка у режим rate хаоса.

Наведени резултати су објављени у следећим радовима:

1. Rate Chaos and Memory Lifetime in Spiking Neural Networks, V. Klinshov, A. V. Kovalchuk, **I. Franović**, M. Perc, and M. Svetec, Chaos Soliton. Fract. **158**, 112011 (2022).
2. Stimulus-evoked Activity in Clustered Networks of Stochastic Rate-based Neurons, **I. Franović** and V. Klinshov, Eur. Phys. J. - Spec. Top. **227**, 1063 (2018).
3. Clustering Promotes Switching Dynamics in Networks of Noisy Neurons, **I. Franović** and V. Klinshov, Chaos **28**, 023111 (2018).
4. Slow Rate Fluctuations in a Network of Noisy Neurons with Coupling Delay, **I. Franović** and V. Klinshov, EPL **116**, 48002 (2016).
5. Mean-field Dynamics of a Random Neural Network with Noise, V. Klinshov and **I. Franović**, Phys. Rev. E **92**, 062813 (2015).



## 2.4. Екстензија појама ексцитабилности на системе с периодичним орбитама

Класичан појам ексцитабилности повезан је са система који имају линеарно стабилан еквилибријум, али који могу да дају два различита типа одговора на спољашње пертурбације: линеаран одговор мале амплитуде за слабије пертурбације или нелинеаран одговор велике амплитуде за довољно јаке пертурбације. У теорији нелинеарне динамике, ексцитабилност је објашњена чињеницом да се систем налази у близини бифуркације од стационарног режима ка режиму периодичних осцилација. Међутим, постављало се питање да ли је појам ексцитабилности једино примењив на системе с линеарно стабилним еквилибријумом, или је овај појам ипак могуће генерализовати. У сарадњи с иностраним колегама, др Франовић је показао да је појам ексцитабилности могуће проширити на системе са стабилном периодичном орбитом, уз одређене сличности и разлике у односу на класичан појам ексцитабилности. Сличности се састоје у томе да ексцитабилне периодичне орбите манифестују нелинеарно threshold-like понашање и нелинеаран одговор на шум у форми резонантног феномена. С друге стране, указано је и на неколико значајних разлика у поређењу с класичним појмом ексцитабилности: а) ексцитабилне периодичне орбите не налазе се у близини бифуркације, већ типично канард прелаза између subthreshold и релаксационих осцилација; б) одговор система на пертурбацију је неуниформан, тј. мења се дуж периодичне орбите; в) резонантан феномен индукован шумом не промовише осциловање, већ се напротив састоји у супресији стохастички пертурбованих осцилација.

Наведени резултати приказани су у раду:

1. Phase-sensitive Excitability of a Limit Cycle, I. Franović, O. E. Omel'chenko, and M. Wolfrum, *Chaos* **28**, 071105 (2018).

## 2.5. Макроскопска динамика хетерогених система

Велики број природних и артифицијелних система одликује се варијабилношћу параметара локалне динамике, која се још назива и диверзитет, хетерогеност, нечистоће, или quenched неуређеност у зависности од области примене. Понекад је варијабилност толико изражена да се локална динамика јединица разликује на квалитативном, а не само на квантитативном нивоу. На пример, неуронске популације се типично састоје од ексцитабилних јединица и јединица у режиму тоничног опаљивања, тако да интеракције суштински утичу на промене интринзичне динамике јединица. Овакав сценарио се суштински разликује од класичног Курамотовог модела у којем се јединице одликују само квантитативном хетерогеношћу, у смислу да се популација састоји од осцилатора с различитим локалним фреквенцијама. Значајан напредак у анализи макроскопске динамике спрегнутих осцилатора постигнут је појавом От-Антонсенове теорије (2008/2009. год.), која се у основи заснива на открићу инваријантног манифолда којем, под одређеним условима, генерички тежи асимптотска динамика система. Др Франовић је с руским колегом први пут систематски применио От-Антонсенову теорију на анализу макроскопске динамике система с квалитативном хетерогеношћу локалне динамике, аналогне

оној у типичним неуронским популацијама. Хетерогеност је реализована на нивоу локалних бифуркационих параметара јединица, за које је, због могућности детаљне математичке анализе, претпостављено да су униформно дистрибуирани на одређеном интервалу. Користећи главне карактеристике дистрибуције, средњу вредност и ширину, као бифуркационе параметре, утврђено је да постоје три макроскопска режима, и да су границе њихових домена стабилности организоване преко сложеног сценарија који укључује три бифуркације кодимензије два. Такође, доказано је да постоје два домена бистабилне динамике између два макроскопска еквилибријума, или макроскопског еквилибријума и макроскопског граничног круга.

Наведени резултати описани су у раду:

1. Two Scenarios for the Onset and Suppression of Collective Oscillations in Heterogeneous Populations of Active Rotators,  
V. Klinshov and I. Franović,  
Phys. Rev. E **100**, 062211 (2019).

## 2.6. Хаотични системи с екстремном мултистабилношћу

Упркос томе што је зачета пре тачно 50 година, сведоци смо тога да и даље постоји активно интересовање за развој теорије хаоса. Последњих неколико година, нарочито је интензивна област истраживања која повезује две класе система чија је динамика сензитивна на избор почетних услова: хаотичне системе с једне стране, и мултистабилне системе карактерисане коегзистенцијом више атрактора за исте вредности параметара с друге стране. У контексту примена, од посебног значаја су питања конструисања система који имају задату форму мултистабилног понашања, као и проналажење стратегија контроле switching динамике између коегзистентних стања. Иако је мултистабилност класично повезана с коначно много коегзистентних стања, последњих неколико година откривена је нова класа дисипативних система с бесконачно много коегзистентних атрактора. У оквиру те класе, пронађени су екстремно мултистабилни системи с непребројиво много коегзистентних атрактора, тако да континуална промена почетних услова може да изазива бифуркације, и мегастабилни системи с пребројиво много коегзистентних стања, где варијација почетних услова не изазива бифуркације. Иако је владао став да су ове две подкласе система дисјунктне, у сарадњи с иранским колегама, др Франовић је развио први пример система који манифестује како екстремну, тако и мега мултистабилност при варијацији почетних услова две различите варијабле система. Модел је заснован на неаутономном тродимензионалном систему који може да манифестује периодично, квазипериодично и хаотично понашање, а примењивост модела демонстрирана је конструкцијом аналогног електричног кола.

Наведени резултати приказани су у радовима:

1. A Non-autonomous Mega-extreme Multistable Chaotic System,  
A. Ahmadi, S. Parthasarathy, H. Natiq, S. Jafari, I. Franović, and K. Rajagopal,  
Chaos Soliton. Fract. **174**, 113765 (2023).

2. Rate Chaos and Memory Lifetime in Spiking Neural Networks, V. Klinshov, A. V. Kovalchuk, I. Franović, M. Perc, and M. Svetec, Chaos Soliton. Fract. **158**, 112011 (2022).

## 2.7. Примена теорије нелинеарне динамике у интердисциплинарним истраживањима

У оквиру ове теме, др Франовић се бави применом теорије нелинеарне динамике на моделовање комплексног понашања сеизмичких раседа, геолошких структура одговорних за настанак земљотреса. Конкретно, третиране су три групе проблема, укључујући (а) анализу осетљивости парадигматских модела раседа на спољашње пертурбације, (б) настанак колективне моде у сложеним раседима под утицајем шума и кашњења у интеракцијама и (в) механизам настанка апериодичних временских серија на једноставним (монокомпонентним) раседима. Током анализе групе проблема (а), користећи методу кривих фазног одговора првог и другог реда, експлицитно је демонстриран низ нетривијалних ефеката, укључујући: нарушење принципа суперпозиције при деловању сукцесивних пертурбација услед јаке нелинеарности модела, сложену зависност промене фазе сеизмичког циклуса од параметара и комплексности раседа, као и постојање дуговременског ефекта пертурбација, како у случају монокомпонентних, тако и у случају сложених раседа. Поводом круга питања (б), детаљно су испитани коефекти сеизмичког шума (белог и обојеног) и кашњења у интеракцијама на појаву колективне моде у два класа модела комплексних раседа. За оба сценарија, развијен је mean-field модел који на квалитативно исправан начин описује колективну динамику раседа, чиме је показано да се метод средњег поља може успешно примењивати и у случају система чији елементи имају дисконтинуалну и stiff динамику. Бифуркационом анализом ефективних модела утврђено је постојање области параметера који подржавају бистабилну динамику, којој у егзактним системима одговарају комплексне апериодичне осцилације чија статистика квалитативно задовољава релевантне сеизмичке законе скалирања, као што је Гутенберг-Рихтеров (Gutenberg-Richter) закон. У оквиру целине (в), показано да сасвим једноставан модел монокомпонентног раседа, представљеног канонским Burridge-Knopoff моделом, може да генерише комплексне форме понашања захваљујући меморијском ефекту, уведеном у типични модел трења између масивног блока и контактне површине раседа. На основу спроведене бифуркационе анализе, показано је да се прелазак у хаос одвија према Ruelle-Takens-Newhouse сценарију.

Наведени резултати су представљени у следећим радовима:

1. Effect of Colored Noise on the Generation of Seismic Fault Movement: Analogy with Spring-block Model Dynamics, S. Kostić, N. Vasović, K. Todorović, and I. Franović, Chaos Soliton. Fract. **135**, 109726 (2020).
2. Nonlinear Dynamics Behind the Seismic Cycle: One-dimensional Phenomenological Modeling, S. Kostić, N. Vasović, K. Todorović, and I. Franović, Chaos Soliton. Fract. **106**, 310 (2018).

3. Dynamics of Fault Motion in a Stochastic Spring-slider Model with Varying Neighboring Interactions and Time-delayed Coupling,  
S. Kostić, N. Vasović, **I. Franović**, K. Todorović, V. Klinshov, and V. I. Nekorkin,  
Nonlinear Dyn. **87**, 2563 (2017).
4. Phase Response Curves for Models of Earthquake Fault Dynamics,  
**I. Franović**, S. Kostić, M. Perc, V. Klinshov, V. I. Nekorkin, and J. Kurths,  
Chaos **26**, 063105 (2016).
5. Earthquake Nucleation in a Stochastic Fault Model of Globally Coupled Units with Interaction Delays,  
N. Vasović, S. Kostić, **I. Franović**, and K. Todorović,  
Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. **38**, 117 (2016).
6. Triggered Dynamics in a Model of Different Fault Creep Regimes,  
S. Kostić, **I. Franović**, M. Perc, N. Vasović, and K. Todorović,  
Sci. Rep. **4**, 5401 (2014).
7. Complex Dynamics of Spring-Block Earthquake Model Under Periodic Parameter Perturbations,  
S. Kostić, N. Vasović, **I. Franović**, and K. Todorović,  
J. Comput. Nonlin. Dyn. **9**, 031019 (2014).
8. Dynamics of Landslide Model with Time Delay and Periodic Parameter Perturbations,  
S. Kostić, N. Vasović, **I. Franović**, D. Jevremović, D. Mitrinović, and K. Todorović,  
Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. **19**, 3346 (2014).
9. Friction Memory Effect in Complex Dynamics of Earthquake Model,  
S. Kostić, **I. Franović**, K. Todorović, and N. Vasović,  
Nonlinear Dyn. **73**, 1933 (2013).
10. Dynamics of Simple Earthquake Model with Time Delay and Variation of Friction Strength,  
S. Kostić, N. Vasović, **I. Franović**, and K. Todorović,  
Nonlinear Proc. Geoph. **20**, 857 (2013).

### **3. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАЛИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА**

#### **3.1. Квалитет научних резултата**

##### **3.1.1. Научни ниво и значај резултата, утицај научних радова**

Др Франовић је у свом досадашњем раду дао кључни допринос у укупно 46 радова категорије M20, као и једном поглављу у монографији. Од тога је 32 рада објављено у часописима категорије M21a, 9 у часописима категорији M21 и 5 у категорији M22, а поглавље у монографији је каласификовано у категорију M14.

У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, др Франовић је објавио 16 радова у часописима категорије M20. Од тога је 10 објављено у часописима категорије M21a, 4 у категорији M21, а 2 у категорији M22. Одржао је више предавања на научним скуповима, од којих је 11 по позиву, категорија M31 и M32.

Као пет најзначајнијих радова кандидата из изборног периода издвајају се:

1. **I. Franović**, S. R. Eydam, N. Semenova, and A. Zakharova,  
Unbalanced Clustering and Solitary States in Coupled Excitable Systems,  
*Chaos* **32**, 011104 (2022).  
**M21a**, цитиран 11 пута (Scopus)  
DOI: 10.1063/5.0077022
2. **I. Franović**, O. E. Omel'chenko, and M. Wolfrum,  
Bumps, Chimera States, and Turing Patterns in Systems of Coupled Active Rotators,  
*Phys. Rev. E* **104**, L052201 (2021).  
**M21**, цитиран 6 пута (Scopus)  
DOI: 10.1103/PhysRevE.104.L052201
3. **I. Franović**, S. Yanchuk, S. R. Eydam, I. Bačić, and M. Wolfrum,  
Dynamics of a Stochastic Excitable System with Slowly Adapting Feedback,  
*Chaos* **30**, 083109 (2020).  
**M21a**, цитиран 20 пута (Scopus)  
DOI: 10.1063/1.5145176
4. V. Klinshov and **I. Franović**,  
Two Scenarios for the Onset and Suppression of Collective Oscillations in Heterogeneous Populations of Active Rotators,  
*Phys. Rev. E* **100**, 062211 (2019).  
**M21**, цитиран 11 пута (Scopus)  
DOI: 10.1103/PhysRevE.100.062211
5. **I. Franović**, O. E. Omel'chenko, and M. Wolfrum,  
Phase-sensitive Excitability of a Limit Cycle,  
*Chaos* **28**, 071105 (2018).  
**M21a**, цитиран 16 пута (Scopus)  
DOI: 10.1063/1.5045179

У првом раду, кандидат је проучавао (а) механизми настанка стања спонтаног нарушења синхронизације, као и њихове потенцијалне везе на путу десинхронизације од потпуно синхронизоване до асинхроне динамике; (б) настанак и начини карактеризације нових патерна парцијалне синхронизације, специфичних само за системе спрегнутих ексцитабилних јединица. Патерни парцијалне синхронизације у просторно дистрибуираним системима, укључујући химере и солитарна стања, подразумевају спонтано нарушење симетрије, у смислу да у системима идентичних јединица са симетричним интеракцијама неке

јединице манифестују другачије средње фреквенције осциловања, тј. постају некохерентне (frequency unlocked) у односу на већину кохерентних (frequency locked) јединица. Међутим, интуиција развијена на основу система спрегнутих осцилатора не може да се пренесе у системе ексцитабилних јединица, које манифестују осцилације само под утицајем спољашње стимулације, између осталог и зато што колективни феномени у њима типично подразумевају значајан утицај одбојних, а не само привлачних интеракција. На примеру модела спрегнутих Фицхју-Нагумо (FitzHugh-Nagumo) јединица с ексцитабилном локалном динамиком у близини сингуларне Хопфове бифуркације и мешовитим привлачним и одбојним нелокалним интеракцијама, објашњени су механизми настанка небалансираних двокластер стања и њихова веза са солитарним стањима. Док кластеровање подразумева спонтану поделу система на две или више група при чему јединице у оквиру исте групе имају идентичну динамику, солитарна стања подразумевају да се мала група јединица, распоређених случајно у простору, одвоји средњом фреквенцијом осциловања од кластера кохерентних јединица. Користећи две комплементарне редукционе методе, тзв. метод експонената евопарације (evaporation exponents) и метод увођења тест осцилатора (probe oscillators), извршена је класификација и објашњене су бифуркације које, приликом доминације одбојних над привлачним интеракцијама, доводе до настанка небалансираних двокластер стања (стања са значајном асиметријом величина кластера) у глобално повезаним мрежама. Утврђено је да постоји шест типова небалансираних кластер стања, при чему је откривен нови тип кластер стања заснован на алтернирајућој (leap-frogging) динамици кластера с изменом редоследа емитовања импулса између кластера. Такође је утврђено да постоје два типа солитарних стања, с тим што доминантан тип у потпуности наслеђује особине, као што су област параметара постојања, однос средњих фреквенција и орбите солитарних и типичних јединица, од одговарајућих небалансираних двокластер стања. С друге стране, мањински тип солитарних стања нема коресподентна двокластер стања, а самоорганизација ових стања заснована на алтернирајућем емитовању импулса типичних и солитарних јединица. На крају, демонстрирано је да солитарна стања нису отпорна на присуство шума, пошто чак и мали шум изазива прелаз (biased switching) ка тзв. patched патернима. Овај феномен објашњен је као манифестација тзв. ефекта стохастичке преференције атрактора (noise-induced preference of attractors), где атрактори с малом базом атракције (у овом случају солитарна стања) постају неопсервабилни у присуству шума.

У другом раду, кандидат је показао да класичне парадигме настанка патерна кохеренције-некохеренције (coherence-incoherence patterns), уочене код система спрегнутих интринзичних осцилатора, не важе у случају система спрегнутих ексцитабилних јединица. Још од открића химера стања (2004. год.), патерни коегзистенције кохеренције-некохеренције у системима спрегнутих осцилатора сматрани су изолованим од остатка велике класе патерна у нелинеарним системима. С једне стране, генерички механизми настанка патерна кохеренције-некохеренције остали су неповезани с класичним механизмима настанка патерна. С друге стране, сматрано је да патерни кохеренције-некохеренције нису глобални атрактори система, тј. да су увек коегзистентни са униформним комплетно кохерентним стањем, и да су као последица, асимптотски стабилни једино у термодинамичком лимесу, тако да доживљавају колапс на униформно комплетно кохерентно стање у системима коначне величине. У овом раду, показано је да ова

два класична става не важе за патерне кохеренције-некохеренције у спрегнутим ексцитабилним системима. Наиме, на примеру тзв. bump стања, типичних за неуронске системе и који се од химера разликују по томе што је кохерентан домен стационаран, демонстрирано је да патерни кохеренције-некохеренције генерички могу да настану на суперкритичан начин од Тјурингових патерна, тако да не постоји бистабилност с униформним комплетно кохерентним стањем, као и да такав механизам патерн формирања не зависи од величине система. Увођењем модела ланца спрегнутих активних ротатора с нелокалним атрактивним интеракцијама и глобалном репулзијом, по први пут је показано да патерни кохеренције-некохеренције могу да настану путем класичне парадигме локалне активације и дугодометне инхибиције коју је увео Тјуринг (1952) а актуелизовали Гирер и Мајнхарт (1972). Конкретно, испоставља се да суперкритични механизам настанка bump стања укључује два корака, од којих је први Тјурингова бифуркација од униформног комплетно кохерентног стања до просторно модулисаног комплетно кохерентног стања, док се други корак састоји у просторно локализованој хомоклиничној бифуркацији у којој само једна јединица доживљава unlocking од кохерентне групе јединица. Овакав основни тип патерна затим добија просторно-временску комплексност секундарним бифуркацијама (интермитенција или распад торуца), које доводе до преласка у ниско-димензиони и екстензивни хаос. Додатно је показано да је прилагођавањем јачина нелокалне атракције и глобалне репулзије могуће добити и друге механизме патерн формирања, од којих неки одговарају и раније утврђеним субкритичним прелазима од кохерентног стања ка патернима кохеренције-некохеренције.

У трећем раду, кандидат је извршио екстензију теорије сингуларних пертурбација на стохастичке multiscale системе са шумом на брзој карактеристичној временској скали. Конкретно, увео је модел стохастичког ексцитабилног система са спором адаптацијом која утиче на ексцитабилност јединице. Модел је развијен тако да укључује главне парадигме неуронске динамике, као што су ексцитабилност, шум и адаптивност. С теоријске тачке, главни допринос рада састоји се у увођењу нове редукционе методе стохастичког усредњавања (stochastic averaging), заснованог на комбиновању Фокер-Планковог формализма и сингуларне теорије пертурбација. Решавање layer проблема путем Фокер-Планкове једначине омогућило је конструкцију бифуркационог дијаграма спорог (редукованог) подсистема path-following техником. Бифуркациона анализа у сингуларном лимесу је показала постојање три карактеристична динамичка режима: шумом индуковано опаљивање (spiking), шумом пертурбовани spiking, као и домен бистабилности, који у случају малог, али коначног раздвајања временских скала одговара стохастичком bursting-у. Показано је да се механизам стохастичког bursting-a, као нове форме емергентног понашања, заснива на шумом индукованој switching динамици између два коегзистентна метастабилна стања (квазистационарно стање и осцилаторна мода). Такође, у случају коначног раздвајања временских скала, демонстрирано је да се променом јачине повратне спреге може појачавати или слабити ефекат резонанце кохеренције у режиму шумом индукованог опаљивања, што представља нову методу контроле ефекта резонанце кохеренције, принципијелно другачије од класичне Пирагасове технике. Додатно, показано је и да је могуће контролисати статистичке особине

стохастичког bursting-a, као што је релативан однос трајања епизода опаљивања и квази-стационарних периода.

У четвртом раду кандидат је анализирао макроскопску динамика популације с квалитативном хетерогеношћу локалне динамике, у смислу да се популација састоји од активних ротатора с ексцитабилном или осцилаторном интринзичном динамиком. Овакав сценарио се суштински разликује од класичног Курамотовог модела у којем се јединице одликују само квантитативном хетерогеношћу, тако да се популација састоји од осцилатора с различитим локалним фреквенцијама. Хетерогеност (диверзитет) је фундаментална карактеристика бројних биолошких система, нпр. неуронских популација, а у конкретном случају је реализована тако што су локални бифуркациони параметри активних ротатора дистрибуирани према унапред задатој дистрибуцији вероватноће. Анализа режима макроскопске динамике, укључујући локалну структуру стања и одговарајуће области стабилности, обављена је екстензијом От-Антонсеновог (*Ott-Antonsen*) редукиционог метода, који одговара термодинамичком лимесу, на популације с динамичком хетерогеношћу јединица. Као бифуркациони параметри разматране су карактеристике дистрибуције локалних фреквенција ротатора (средња вредност и ширина дистрибуције). Конкретно, откривено је да постоје три режима макроскопске динамике, и то: (1) глобално хомогено стање мировања, где се сви ротатори налазе у ексцитабилном стању; (2) глобално осцилаторно стање, где су локалне осцилације ротатора парцијално синхронизоване; (3) хетерогено макроскопски стационарно стање, где се неке јединице налазе у ексцитабилном, а друге у осцилаторном режиму, при чему су њихове локалне активности несинхронизоване. Хетерогено стационарно стање је од фундаменталног значаја за неуронске системе јер показује особину макроскопске ексцитабилности. Детаљна бифуркациона анализа показала је да су области стабилности појединих стања задата сложеним бифуркационим сценаријом, организованим око три бифуркације кодимензије два (Богданов-Такенс бифуркација, *cusp* бифуркација, *fold*-хомоклинична бифуркација). Такође, показано је да постоје области параметара у којима систем манифестује бистабилност између два макроскопска стационарна стања, или глобалног стационарног и осцилаторног стања. Откривена су два генеричка механизма настанка колективне моде (класичан курамотовски и преко SNIPER бифуркације), као и два сценарија (глатки/суперкритични и хистеретични/субкритични) преласка из хомогеног у хетерогено стационарно стање с повећањем диверзитета.

У петом раду кандидат је извршио генерализацију појма ексцитабилности на системе у којима са стабилним периодичним осцилацијама, чија локална динамика има *limit cycle* атрактор. Класичан појам ексцитабилности повезан је са системима који имају линеарно стабилно стационарно стање (еквilibријум), али манифестују нелинеарно *threshold-like* понашање, тако да пертурбација довољно велике амплитуде може да изазове ексцитацију, као нелинеаран одговор система у форми *spike*-а. Према класичној теорији нелинеарне динамике, ексцитабилност настаје услед тога што се систем налази у близини бифуркације од стационарног стања ка режиму периодичних осцилација. У овом раду је пак показано и да системи у режиму релаксационих осцилација могу да испоље ексцитабилно понашање, које је неуниформног карактера дуж периодичне орбите, а састоји се у нелинеарном *threshold-like* одовору система на спољашњу пертурбацију



одређене амплитуде и правца. Због неуниформности дуж периодичне орбите, феномен је назван phase-sensitive excitability периодичне орбите. Користећи елементе теорије сингуларних пертурбација, показано је да је threshold динамика задата структуром максималног канарда, која је повезана с нестабилном фиксном тачком. Дакле, у поређењу с класичним појмом ексцитабилности, систем се не налази у близини бифуркације, али се налази у близини канард прелаза. Такође, сама ексцитација, на супрот класичној ексцитабилности, је инхибиторног типа, у смислу да пертурбација изазива девијацију с периодичне орбите у форми мале (subthreshold) осцилације која прати структуру максималног канарда. Као и у случају класичне ексцитабилности, системи с phase-sensitive excitability манифестују нелинеаран одговор на шум у форми инверзне стохастичке резонанце, тако да постоји преферентни ниво шума на коме је фреквенција стохастички пертурбованих осцилација минимална. Објашњено је да ефекат инверзне стохастичке резонанце настаје као резултат конкуренције растуће ефикасности ексцитације и деградације нелинеарног одговора система с повећањем интензитета шума.

### **3.1.2. Цитираност научних радова кандидата**

Према подацима о цитираности аутора преузетим из базе Scopus 26. 9. 2023. године, радови чији је др Франовић коаутор досад су цитирани 480 пута, док је број цитата без аутоцитата 339, уз Хиршов индекс 14.

### **3.1.3. Параметри квалитета радова и часописа**

Битан елемент за процену квалитета научних резултата је и квалитет часописа у којима су радови објављени, односно њихов импакт фактор – ИФ. Др Франовић је објављивао радове у часописима категорија M21a, M21 и M22, при чему су подвучени импакт-фактори часописа у којима су публиковани радови након одлуке Научног већа Института за физику о предлогу за стицање претходног научног звања:

- 7 радова у часопису Chaos, Solitons & Fractals (ИФ 9.922 за два рада, ИФ 5.944 за један рад, ИФ 3.315 за два рада, ИФ 1.611 за један рад и ИФ 1.268 за један рад)
- 11 радова у часопису Chaos (ИФ 3.741 за четири рада, ИФ 3.642 за два рада, ИФ 2.643 за један рад, ИФ 2.283 за два рада, 2.188 за један рад и 2.081 за један рад)
- 10 радова у часопису Physical Review E (ИФ 2.707 за један рад, ИФ 2.353 за два рада, ИФ 2.366 за један рад, ИФ 2.326 за 5 радова и ИФ 2.508 за један рад)
- 1 рад у часопису Physical Review Letters (ИФ 7.943)
- 1 рад у часопису Scientific Reports (ИФ 5.578)
- 2 рада у часопису Nonlinear Dynamics (ИФ 3.464 за један рад и ИФ 3.009 за други рад)
- 4 рада у часопису Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations (ИФ 2.866 за три рада и ИФ 2.806 за један рад)

- 4 рада у часопису EPL (ИФ 1.957 за један рад, ИФ 2.893 за један рад и ИФ 2.095 за два рада)
- 2 рада у часопису European Physical Journal Special Topics (ИФ 1.947 за два рада)
- 1 рад у часопису Nonlinear Processes in Geophysics (ИФ 1.692)
- 1 рад у часопису European Physical Journal B (ИФ 1.575)
- 1 рад у часопису Journal of Computational Nonlinear Dynamics (ИФ 1.530)

Укупан импакт-фактор радова др Франовића износи 142.069, а фактор утицаја радова у периоду након одлуке Научног већа Института за физику о предлогу за стицање претходног научног звања радова је 63.943. Часописи у којима објављује др Франовић су цењени по свом угледу и водећи у његовим областима рада. Међу поменутиим часописима посебно се истичу Chaos, Chaos, Solitons & Fractals, Physical Review Letters, Scientific Reports, Nonlinear Dynamics, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations, Physical Review E, EPL.

Додатни библиометријски показатељи у вези са објављеним радовима кандидата у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање звања виши научни сарадник приказани су у следећој табели:

	ИФ	М	СНИП
Укупно	63.943	132.25	20.37
Усредњено по чланку	3.996	8.265	1.273
Нормирано на број аутора	16.979	41.1	5.726

#### **3.1.4. Степен самосталности и степен учешћа у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству**

Од 46 објављених радова, др Франовић је први аутор 25 радова, други наведени аутор 7 радова, трећи аутор 6 радова, пети и девети аутор по једног рада, а последњи је аутор 5 публикација. На радовима који су објављени у периоду након одлуке Научног већа Института за физику у Београду о предлогу за стицање звања виши научни сарадник, др Франовић је први аутор 6 публикација, други наведени аутор 3 рада, трећи наведени аутор једног рада, пети и девети аутор по једног рада, као и последњи аутор 4 публикације. При изради поменутих радова, др Франовић је учествовао у осмишљавању и формулацији проблема, конструкцији релевантних нумеричких симулација и прикупљању података, развоју теоријских метода за анализу добијених резултата, као и писању и уређивању радова.

Током магистарских студија на Физичком факултету у Београду, др Франовић се бавио развојем теоријских и квантитативних метода за карактеризацију пропагативних патерна транзијентне синхронизације у неуронским популацијама, анализом односа структурних и функционалних неуронских мотива, као и применом теорије сингуларне пертурбације на анализу феномена стохастичке фазне синхронизације у системима bursting неурона. Током докторских студија, у сарадњи са др Николом Бурићем са Института за физику у Београду, др Франовић је започео истраживање у области емергентне динамике

на системима ексциtabilних јединица под утицајем шума и кашњења у интеракцијама. У том контексту, започет је развој нове mean-field методе за анализу стабилности и (стохастичких) бифуркација система стохастичких диференцијалних једначина, као и система стохастичких диференцијалних једначина с кашњењем.

Након завршеног доктората, др Франовић је покренуо истраживања у неколико различитих праваца, одржавајући активну научну сарадњу с више страних истраживача и истраживачких група. Из перспективе развоја аналитичких метода, посветио се генерализацији редукционих приступа на системе с динамиком на вишеструким временским скалама. У том смислу, допринео је развоју нове аналитичке методе за опис колективне динамике система засноване на комбиновању класичног От-Антонсеновог приступа и теорије сингуларних пертурбација. Такође, осмислио је методу за анализу динамике стохастичких система с брзо-спором структуром у којој се комбинује Фокер-Планков формализам за третирање стохастичке брзе динамике с елементима класичне теорије сингуларних пертурбација. Један од значајних праваца истраживања односи се и на екстензију појма ексциtabilности, с једне стране на системе с limit cycle атрактором, формулишући појам phase-sensitive excitability, а с друге стране на генерализацију појма ексциtabilности на спрегнуте системе.

Др Франовић је покренуо и нови правац истраживања усмерен на разумевање механизма настанка патерна парцијалне синхронизације (coherence-incoherence patterns) у спрегнутим ексциtabilним системима, као и објашњењу разлика у односу на класичне механизме познате у системима спрегнутих осцилатора. У том контексту, др Франовић је открио нову класу тзв. patched патерна специфичних само за спрегнуте ексциtabilне системе; повезао механизам настанка bump стања са класичним Тјуринговим патернима у системима с нелокалном атракцијом и глобалном репулзијом; објаснио генеричке механизме настанка солитарних стања и каскадне активности (avalanches) у спрегнутим ексциtabilним системима. Као трећа значајна област недавних истраживања, издваја се истраживање улоге адаптивности, како на нивоу јачине веза, тако и на нивоу промена карактеристика локалне динамике јединица, на емергентну алтернирајућу (switching) динамику и одржавање система у околини критичности у спрегнутим ексциtabilним системима, или хетерогеним системима састављеним од ексциtabilних јединица и интринзичних осцилатора.

Др Франовић има широку научну сарадњу с колегама из иностранства из области нелинеарне динамике, статистичке физике и неуронауке, укључујући: групу др Луиса Канга из Рикен института из Токија, Јапан; групу професора Владимира Некоркина из Института примењене физике Руске академије наука у Нижњем Новгороду; групу др Матијаса Волфрума из Вајерштрас института у Берлину, Немачка; др Олеха Омелченка са Универзитета у Потсдаму, Немачка; др Рика Бернера са Хумболт универзитета у Берлину, Немачка; проф. др Филипа Хефела са Универзитета у Сарбрикену, Немачка; проф. др Ану Захарову са Техничког универзитета у Берлину, Немачка; др Надежду Семјонову с Фемто-СТ института, Француска; групу др. Саада Џафарија са Амиркабир универзитета у Техерану, Иран; као и проф. др Матјажа Перца са Универзитета у Марибору и проф. др Јиргена Куртса са Института за климатологију у Потсдаму.

### 3.1.5. *Награде*

Др Франовић је добитник награде за најбољег младог истраживача Физичког факултета Универзитета у Београду за 2013. годину, као и добитник Годишње награде за научни допринос Института за физику у Београду за 2020. годину. Такође, кандидат је 2012. године добио DAAD стипендију за студијски боравак у СР Немачкој.

### 3.1.6. *Елементи применљивости научних резултата*

Истраживања др Франовића се односе на самоорганизацију и генеричке форме емергентне динамике у система спрегнутих ексциtabilних јединица или осцилатора, а као главна мотивација и потенцијалне области примене добијених резултата се истичу карактеризација, предвиђање и контрола колективног понашања неуронских и других биолошких система. Неки од кључних појмова у истраживању др Франовића, као што су ексциtabilност, шум и адаптивност, представљају главне особине неуронских система. Ексциtabilност има и шири значај у светлу чињенице да се може сматрати основним елементом физике живота (*physics of life*), пошто представља водећу парадигму локалне динамике не само нервног, него и срчаног ткива, бета-ћелија панкреаса задужених за секрецију инсулина, као и неких генских мрежа. Поред тога, спрегнутим ексциtabilним системима могуће је описати бројне друге системе, како природне тако и артифицијелне, од хемијских реакција до ласера и модела климе. За разумевање неуронских система, од фундаменталног значаја је неколико корпуса проблема које др Франовић проучава, укључујући критичне прелазе ка синхронизацији, али и феномени парцијалне синхронизације (химере, *bimr* и солитарна стања) на путу од кохеренције ка некохеренцији. Док настанак колективне моде може да се повеже с настанком колективних ритмова у кортексу, познато је да *bimr* стања играју значајну улогу у формирању краткорочне меморије, репрезентацији визуелних стимулуса и усмеравању положаја главе. Такође, др Франовић се бави и механизмима настанка самолокализованих ексцитација и пропагативних патерна транзијентне синхронизације, које у контексту неуронауке одговарају тзв. неуронским лавинама (*neuronal avalanches*), честом типу спонтане активности неуронских популација. Поред аналогича с нормалним, физиолошки пожељним (хомеостатским) стањима неуронских популација, истраживања др Франовића могу да пруже и значајан увид у механизме настанка патолошких стања, тј. неуролошких обољења која на нивоу динамике неурона као заједничку одлику имају изразито висок степен синхронизоване активности (епилепсија, Алцхајмерова и Паркинсонова болест, тремор). У том случају, пожељно је пронаћи методе контроле за изазивање прелаза десинхронизације ка хомеостатској асинхроној активности. Истраживања др Франовића у том контексту указују на значајну улогу адаптивности, како у форми синаптичке пластичности, тако и у форми метаболичке адаптације локалне динамике неурона. Проучавање механизма адаптације, као и њихове интеракције са шумом, представља основ за развијање метода контроле патолошких стања у неуронских система путем супресије ексесивно синхронизованих стања и индуковања прелаза ка асинхроним стањима.

### 3.2. Ангажованост у формирању научних кадрова

Др Франовић је био ментор докторске дисертације др Иве Бачић под називом “Self-organization in coupled excitable systems: interplay between multiple timescale dynamics and noise”, која је одбрањена 2020. године на Физичком факултету Универзитета у Београду. Истраживања у оквиру тезе припадају областима нелинеарне динамике и стохастичких процеса, а као главни научни доприноси издвајају се екстензија појма ексцитабилности на динамику спрегнутих система; развој редукционих приступа за стохастичке системе с динамиком на вишеструким временским скалама; анализа коефекта адаптивности и шума на појаву и потенцијалне методе контроле алтернирајуће (switching) динамике између метастабилних стања и резонантних феномена. Наведени научни доприноси описани су у поглављима: 2. The excitability of coupled systems, 3. Switching dynamics induced by the interplay of adaptivity and noise, 4. Resonant phenomena in coupled systems with local dynamics near the bifurcation threshold. Поглавља описују резултате представљене у следећим радовима:

- **I. Franović**, S. Yanchuk, S. R. Eydam, I. Bačić, and M. Wolfrum, Dynamics of a Stochastic Excitable System with Slowly Adapting Feedback, *Chaos* **30**, 083109 (2020).
- I. Bačić and **I. Franović**, Two Paradigmatic Scenarios for Inverse Stochastic Resonance, *Chaos* **30**, 033123 (2020);
- I. Bačić, V. Klinshov, V. I. Nekorkin, M. Perc, and **I. Franović**, Inverse Stochastic Resonance in a System of Excitable Active Rotators with Adaptive Coupling, *EPL* **124**, 40004 (2018).
- I. Bačić, S. Yanchuk, M. Wolfrum, and **I. Franović**, Noise-induced Switching in Two Adaptively Coupled Excitable Systems, *Eur. Phys. J. - Spec. Top.* **227**, 1077-1090 (2018).
- **I. Franović**, O. V. Maslennikov, I. Bačić, and V. I. Nekorkin, Mean-field Dynamics of a Population of Stochastic Map Neurons, *Phys. Rev. E* **96**, 012226 (2017).

Такође, од септембра 2023. године, др Франовић је ментор на докторским студијама Зорану Рајчевићу. Поред менторстава у Србији, кандидат је био члан комисије на одбрани докторске тезе др Себастијана Ејдама на Техничком универзитету у Берлину 2019. године.

Кандидат је ангажован као наставник на предмету Физика неуређених система у оквиру уже научне области Физика кондензоване материје и статистичка физика на докторским студијама Физичког факултета Универзитета у Београду.

### 3.3. Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења

Радови кандидата укључују теоријски и нумерички приступ, па се узимају са пуном тежином уколико имају до пет коаутора. У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, један прегледни рад кандидата категорије M21a подлеже нормирању, јер има 24 коаутора, као и још један рад категорије M21a који има шест коаутора. Сви остали радови улазе са пуном тежином при обрачуна броја бодова.

Укупан број М бодова које је кандидат остварио након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања је 174.5, а након нормирања тај број је 164.75. Ова разлика је мала и не утиче на квантитативну процену резултата кандидата.

### 3.4. Руковођење пројектима, потпројектима и пројектним задацима

Др Франовић је до сада био руководиоца једног пројекта и две потпројектне теме. У периоду од 2017-2018. године руководио је билатералним пројектом између Републике Србије и СР Немачке под називом “Emergent Dynamics in Systems of Coupled Excitable Units”. Такође, руководио је потпројектом у оквиру пројекта основних истраживања, као и потпројектом у оквиру Националног центра изузетних вредности Центар за изучавање комплексних система.

У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање звања виши научни сарадник, руководио је следећим потпројектима:

**Назив:** Самоорганизација у спрегнутим ексцитабилним системима

**Тип пројекта:** потпројекат у оквиру пројекта ОН171017 Моделирање и нумеричке симулације сложених вишечестичних система

**Финансиран од:** Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

**Период:** 2016-2019.

**Доказ:** Потврда руководиоца пројекта ОН171017 “Моделирање и нумеричке симулације сложених вишечестичних система”

**Назив:** Емергентна динамика на комплексним мрежама: стохастички ефекти, кашњење у интеракцијама, адаптивност

**Тип пројекта:** тема у оквиру Националног центра изузетних вредности за изучавање комплексних система

**Финансиран од:** Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

**Период:** 2019-2023.

**Доказ:** Потврда руководиоца Националног центра изузетних вредности за изучавање комплексних система

### 3.5. Активност у научним и научно-стручним друштвима

Др Франовић је у периоду пре и након избора у звање виши научни сарадник учествовао, а и тренутно учествује у уређивању неколико међународних научних часописа. У периоду од 2017. до 2020. године, др Франовић је био Associate Editor

у часопису Chaos, Solitons & Fractals категорије M21a. Тренутно је Associate Editor у часописима Journal of Applied Nonlinear Dynamics (категирија M23) и Frontiers in Network Physiology (додељивање ИФ се очекује следеће године). Такође, др Франовић је Guest Editor у часопису Chaos (категирија M21a) на фокус издању Regime switching in coupled nonlinear systems: sources, prediction, and control, као и у часопису Entropy (категирија M22) на специјалном издању Synchronization in Complex Networks of Nonlinear Dynamical Systems. Као доказ, приложена је релевантна комуникација с часописима као и исписи са сајта часописа.

Поред тога, у периоду након избора у претходно звање био је члан Научног комитета и координатор секције 9 Theoretical, Mathematical and Computational Physics конференције BPU11 11th International Conference of the Balkan Physical Union, одржане од 28.8.-1.9.2022. године. Такође је био уредник секције PoS Proceedings-a BPU11.

Кандидат је до сада био рецензент у преко 20 међународних часописа, укључујући: Scientific Reports, PLOS ONE, Nonlinear Dynamics, Chaos, Chaos, Solitons & Fractals, International Journal of Bifurcation and Chaos, EPL, SIAM Journal on Applied Dynamical Systems, Physics Letters A, European Physical Journal B, Neural Networks, Neurocomputing, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, Journal of Statistical Physics, Frontiers in Computational Neuroscience, Radiofizika, Nonlinear Processes in Geophysics, Applied Mathematics and Computation, International Journal of Electronics and Communications, Theory in Biosciences, Journal of Difference Equations and Applications, IEEE Transactions on Cybernetics, Environmental Earth Sciences, Wave Motion. Као доказ су приложени примери релевантне комуникације с часописима.

Др Франовић је члан научно-стручног друштва International Physics and Control Society (IPACS).

### **3.6. Утицај научних резултата**

Утицај научних резултата огледа се у подацима о цитираности, наведеним у секцији 3.1.2.

Др Франовић је одржао 11 предавања по позиву:

1. 4th International Conference on Integrable Systems and Nonlinear Dynamics (ISND-2023) у Јарослављу, Русија (и online), септембра 2023. године;
2. Dynamics Days Europe 2023 (DD23) у Напуљу, Италија, септембра 2023. године;
3. Dynamics Days US 2023, online, јануара 2023. године;
4. SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS21), online, маја 2021. године;
5. International Symposium Topical problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2021) у Нижњем Новгороду, Русија (и online), септембра 2021. године;
6. Symposium of SFB 910: Dynamical patterns in complex networks, online, октобра 2021. године;
7. The 1st Online Conference on Nonlinear Dynamics and Complexity (NSC 2020), online, новембра 2020. године;

8. The 20th Symposium on Condensed Matter Physics (SFKM 2019) у Београду, октобра 2019. године;
9. The 7th Conference on Information Theory and Complex Systems (TINKOS 2019) у Београду, октобра 2019. године;
10. 9th International Conference on Physics and Control (PhysCon 2019) у Инополису, Русија, септембра 2019. године;
11. Dynamics of Coupled Oscillator Systems, Weierstrass Institute (WIAS), Берлин, Немачка, новембра 2018. године.

Такође, др Франовић је своје резултате представио и на 3 конференције у иностранству:

1. Sixth Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA 2022), Калињинград, Русија (и online), септембра 2022. године;
2. Solvay Workshop on Nonlinear phenomena and complex systems in memory of Grégoire Nicolis (online) јуна 2021. године;
3. Second Online Conference on Nonlinear Dynamics and Complexity (NDC2021) октобра 2021. године.

Поред тога, одржао је и 3 предавања по позиву на институтима у иностранству: на Техничком универзитету у Берлину, Немачка (online), јуна 2020. године; Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) новембра 2019. године; Институт за физику и астрономију Универзитета у Потсдаму, Немачка, новембра 2018. године, као и семинар на Институту за физику у Београду августа 2021. године.

### **3.7. Конкретан допринос кандидата у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству**

Др Франовић је суштински допринео сваком раду на коме је учествовао. Шеснаест радова у часописима у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање звања виши научни сарадник су у погледу ангажовања кандидата урађени на Институту за физику у Београду. Од ових радова, кандидат је кореспондирајући аутор за 11 радова, а први аутор 6 радова. Међу радовима на којима је кореспондирајући аутор налазе се и 4 рада који су ушли у корпус докторске тезе др Иве Бачић, чијом је израдом руководио др Франовић. За три од та четири рада др Франовић је последњи аутор. Такође, у једном од радова са страним колегама, др Франовић је последњи и кореспондирајући аутор, а очекује се да тај рад буде у саставу докторске тезе Макса Контрераса, која ће бити одбрањена у Немачкој. У свим радовима где је кореспондирајући аутор, кандидат је био покретач истраживања, суштински је утицао на дефинисање проблема и формулисање математичког модела, а значајно је допринео математичкој и нумеричкој анализи модела, као и интерпретацији резултата. Такође је дао суштински допринос у писању изворне верзије рада и каснијој ревизији. У једном прегледном раду, који даје осврт и перспективу на тему адаптивних мрежа, др Франовић је девети од 24 коаутора, при чему је допринео писањем свог поглавља и едитовањем коначне верзије рада. У пет радова у којима је други, трећи или четврти аутор, др Франовић је допринео математичкој и нумеричкој анализи модела, као и едитовању рада.



На Институту за физику у Београду, др Франовић је зачетник новог правца истраживања у области физике комплексних система, усмереног на истраживање емергентне динамике у системима спрегнутих ексцитабилних јединица и осцилатора. Знања и искуства које је стекао у теоријском моделирању, аналитичким методама и техникама анализе динамике комплексних система успешно преноси млађим сарадницима у Лабораторији за примену рачунара у науци у оквиру Центра изузетних вредности за проучавање комплексних система.

### **3.8. Уводна предавања на конференцијама, друга предавања и активности**

- 1. I. Franović,**  
Emergence of collective oscillations in assemblies of stochastic active elements with coupling delay,  
9th International Conference on Physics and Control (PhysCon 2019),  
Innopolis, Russia,  
September 8-11, 2019, Conference Proceedings, pp. 90-96, M31
- 2. I. Franović,**  
Patched patterns and emergence of chaotic interfaces: a new paradigm in coupled excitable systems,  
4th International Conference on Integrable Systems and Nonlinear Dynamics (ISND-2023), Yaroslavl, Russia (and online), September 25-29, 2023, M32
- 3. I. Franović,**  
Switching Dynamics in Excitable Systems with Adaptation,  
Dynamics Days Europe (DDE23), Naples, Italy, September 3-8, 2023, M32
- 4. I. Franović,**  
Patched patterns and emergence of chaotic interfaces: a new paradigm in coupled excitable systems,  
Dynamics Days US 2023 (online), January 9-11, 2023, M32
- 5. I. Franović,**  
Switching Dynamics in Systems of Stochastic Excitable Units with Adaptive Couplings,  
SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS21) (online),  
May 23-27, 2021, M32
- 6. I. Franović,**  
Bumps, chimera states, and Turing patterns in systems of coupled active rotators,  
International Symposium Topical problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2021), Nizhny Novgorod, Russia (and online), September 19-22, 2021, M32
- 7. I. Franović,**  
Unbalanced clustering and solitary states in coupled excitable systems,  
Symposium of SFB 910: "Dynamical patterns in complex networks" (online),  
October 29, 2021, M32

8. **I. Franović,**  
Dynamics of a Stochastic Excitable System with a Slowly Adapting Feedback,  
The 1st Online Conference on Nonlinear Dynamics and Complexity (NSC2020), (online), November 23-25, 2020, M32
9. **I. Franović,**  
Macroscopic dynamics in heterogeneous assemblies of excitable and oscillatory units,  
The 7th Conference on Information Theory and Complex Systems (TINKOS 2019), Belgrade, Serbia, October 15-16, 2019, M32
10. **I. Franović,**  
Macroscopic Variability in Modular Neural Networks,  
The 20th Symposium on Condensed Matter Physics (SFKM 2019), Belgrade, Serbia, October 7-11, 2019, M32
11. **I. Franović,**  
Switching dynamics in two adaptively coupled excitable systems,  
Workshop Dynamics of Coupled Oscillator Systems, Weierstrass Institute (WIAS), Berlin, Germany, November 19 - 21, 2018, M32
12. **I. Franović,**  
Solitary states in arrays of excitable FitzHugh-Nagumo units  
Sixth Scientific School "Dynamics of Complex Networks and their Applications" (DCNA'2022), Kaliningrad, Russia (and online), September 14 - 16, 2022, pp. 89-92  
DOI: 10.1109/DCNA56428.2022.9923122, M33
13. **I. Franović,**  
Emergent Dynamics in Populations of Active Rotators with Diversity,  
Solvay Workshop on "Nonlinear phenomena and complex systems" in memory of Grégoire Nicolis (online), June 14-16, 2021, M34
14. **I. Franović,**  
Unbalanced clustering and solitary states in coupled excitable systems,  
Second Online Conference on Nonlinear Dynamics and Complexity NDC2021 (online), October 4-6, 2021, M34

Као доказ приложена су позивна писма за учешће на конференцијама, веб сајтови конференција, изводи из књига апстраката.

#### 4. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАНТИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

Остварени резултати у периоду након одлуке Научног већа Института физику у Београду о предлогу за стицање звања виши научни сарадник приказани су у табели. Према бази Scopus, укупан број цитата је 480, док је број цитата без аутоцитата 339, уз Хиршов индекс 14. Сви изводи из база односе се на дан 26. 9. 2023. године.

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M21a	10	10	100	90.25
M21	8	4	32	32
M22	5	2	10	10
M28b	2.5	3	7.5	7.5
M29a	1.5	3	4.5	4.5
M31	3.5	1	3.5	3.5
M32	1.5	10	15	15
M33	1	1	1	1
M34	0.5	2	1	1

Поређење са минималним квантитативним условима за избор у звање научни саветник:

Минимални број М бодова	Неопходно	Остварено	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	70	174.5	<b>164.75</b>
M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90	50	161.5	<b>151.75</b>
M11+M12+M21+M22+M23	35	142	<b>132.25</b>

## 5. ЗАКЉУЧАК

Др Игор Франовић у потпуности испуњава све услове за избор у звање научни саветник предвиђене Правилником о стицању истраживачких и научних звања Министарства науке, технолошког развоја и иновација. У досадашњој каријери остварио је оригиналне и веома значајне научне резултате који побољшавају наше разумевање самоорганизације и генеричких форми понашања комплексних система. Посебно истичемо да у свом раду интегрише и развија концепте и методе из неколико различитих области физике, укључујући теорију нелинеарне динамике, статистичку физику и теорију комплексних мрежа, што је од великог значаја за повезивање ових области.

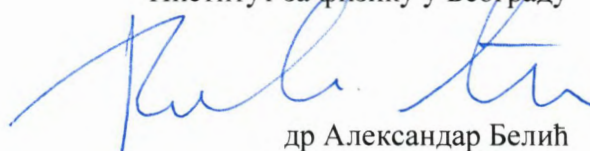
Имајући у виду квалитет његовог научноистраживачког рада и достигнути степен истраживачке компетентности и самосталности, изузетно нам је задовољство да предложимо Научном већу Института за физику у Београду да донесе одлуку о прихватању предлога за избор др Игора Франовића у звање научни саветник.

Београд, 30. октобар 2023. год.

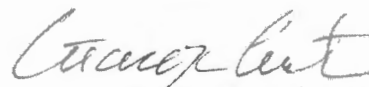
Чланови комисије:



др Антун Балаж  
научни саветник  
Институт за физику у Београду



др Александар Белић  
научни саветник  
Институт за физику у Београду



др Ђорђе Спасојевић  
редовни професор  
Физичког факултета Универзитета у Београду