

Ю.В. ЧЕРНЕЦЬКА, Б.А. ЛІСОВИК

ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО КЛАСИФІКАЦІЇ, ВИКЛИКІВ ТА ІНТЕГРАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОСТРОВІВ У СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

У статті наведено огляд концепції енергетичних островів як підходу до підвищення стійкості та надійності сучасних електроенергетичних систем в умовах аварійних порушень, каскадних відключень і загрози масштабних знеструмлень. Розглянуто основні визначення, що застосовуються в дослідженнях острівної роботи, зокрема поняття енергетичного острова, острівного режиму та навмисного керованого островування. Запропоновано класифікацію енергетичних островів за масштабом мережі, що охоплює макро-, мезо-, мікро- та наноострови, наведено їх характерні особливості та області застосування. Наведено історичні та сучасні приклади функціонування макроостровів, зокрема енергетичний острів Західного Берліна, Бурштинський енергетичний острів та енергосистема ERCOT, з урахуванням умов їх ізоляції або обмеженої інтеграції з суміжними енергосистемами. Значну увагу приділено концепції навмисного керованого островування як інструменту поділу електроенергетичної системи на самодостатні підсистеми з метою підвищення керованості та зменшення ризику розвитку каскадних аварій. Розглянуто особливості реалізації навмисного керованого островування (ICI) в розподільчих мережах та визначено основні технічні виклики, пов'язані з вибором місць ізоляції, забезпеченням автономної роботи ізольованих сегментів та підтриманням частоти, напруги і балансу потужності. За результатами огляду літератури видно, що з урахуванням технічних обмежень мікро- та мезомережі є найбільш придатними для впровадження острівних режимів у сучасних електроенергетичних системах.

Ключові слова: енергетичний острів, острівна робота, навмисне кероване островування, макроострів, мезоострів, мікроострів, наноострів.

Yu. V. CHERNETSKA, B. A. LYSOVYK

REVIEW OF APPROACHES TO THE CLASSIFICATION, CHALLENGES, AND INTEGRATION OF ENERGY ISLANDS IN MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS

The article provides a review of the concept of power islands as an approach to enhancing the resilience and reliability of modern power systems under emergency disturbances, cascading outages, and the risk of large-scale blackouts. Key definitions used in studies of island operation are examined, including the notions of a power island, island operation, and intentional controlled islanding (ICI). A classification of power islands by network scale is proposed, covering macro-, meso-, micro-, and nano-islands, and their characteristic features and application areas are described. Historical and contemporary examples of macro-island operation are presented, including the West Berlin power island, the Burshtyn power island, and the ERCOT system, taking into account their isolation conditions or limited integration with neighboring power systems. Particular attention is given to the concept of intentional controlled islanding as a tool for dividing a power system into self-sufficient subsystems to enhance controllability and reduce the risk of cascading failures. The features of ICI implementation in distribution networks are discussed, and the main technical challenges related to the selection of isolation points, ensuring autonomous operation of isolated segments, and maintaining frequency, voltage, and power balance are identified. Based on the literature review, it is concluded that, considering technical limitations, micro- and meso-grids are the most suitable for implementing islanding modes in modern power systems.

Keywords: power island, island operation, intentional controlled islanding, macro power island, meso power island, micro power island, nano power island.

Вступ. Сучасні електроенергетичні системи (ЕЕС) функціонують в умовах зростаючих викликів, зумовлених аваріями, кібератаками, стихійними лихами та військовими діями, що ставлять під загрозу надійність їх роботи. За умов недостатньої ефективності систем захисту зростає ймовірність масштабних знеструмлень споживачів, внаслідок чого відбувається порушення стійкості системи передачі, що може спричинити розвиток каскадних відключень. У разі їх неконтрольованого розгортання це здатне призвести до повномасштабного блекауту.

Одним із дієвих підходів до пом'якшення наслідків таких загроз є стратегія примусового поділу системи або її частини на незалежні, стійкі енергетичні острови. Такий підхід дозволяє знизити ризику масових знеструмлень, забезпечити електропостачання критичних споживачів, підвищити загальну надійність та гнучкість ЕЕС.

Метою досліджень є систематизація класифікаційних підходів, технічних особливостей та практичних аспектів функціонування енергетичних островів у сучасних електроенергетичних системах з акцентом на можливості інтеграції і керування острівними режимами.

Викладення основного матеріалу. В сучасних

електроенергетичних системах (ЕЕС) дедалі частіше розглядають концепцію поділу на ізольовані електроенергетичні острови як ефективний інструмент підвищення гнучкості, стійкості та надійності роботи. У випадках порушення цілісності основної мережі окремі її частини можуть відокремлюватися й функціонувати як автономні енергетичні утворення – так звані «острови».

На сьогоднішній день існує досить значна кількість досліджень, присвячених напряму енергетичних островів, в яких пропонуються різні сценарії, стратегії та алгоритми для гнучкої, стійкої та надійної роботи островів. Серед таких робіт широкого вжитку набути наступні терміни:

Енергетичний острів (power island) – це ізольована електростанція або група ізольованих електростанцій разом із відповідним локальним навантаженням, що включає генераторне обладнання (газові та/або парові турбіни, парогенератори-утилізатори, котли), системи екологічного контролю, допоміжне механічне та електричне обладнання, необхідне для автономного функціонування [1, 2].

Острівна робота (island operation) – незалежна робота цілої мережі або частини мережі, яка відключена та ізольована від об'єднаної системи, що має

принаймні один енергогенеруючий модуль або систему HVDC, що постачає енергію в цю мережу та контролює напругу і частоту [3].

Навмисне кероване островування (intentional controlled islanding – ICI) – це механізм навмисного відключення, передбачає від'єднання ЛЕП для створення стійких енергетичних островів із нестабільної системи, що дає змогу захисту груп споживачів від знеструмування в суміжних мережах [4, 5].

Виходячи з масштабів, рівня автономності та ступеня інтеграції з основною мережею, енергетичні острови можуть виникати на базі різних архітектурних форм енергомереж. Класифікація таких систем, здатних до роботи в острівному режимі, включає:

Макроострови на базі макромереж (macrogrid) – це велика ЕЕС, що об'єднує одну або кілька систем розподілу у загальну структуру передачі. Реалізовується на базі системи передачі, та може включати HVDC та HVAC, інтегрувати віддалену генерацію та забезпечувати міжрегіональні та міждержавні електричні зв'язки. Потужність таких мереж сягає гігаватів.

Мезоострови на базі мезомереж (mesogrid) – це ЕЕС що займає проміжне місце між мікромережею та макромережею. Зазвичай працює на середніх напругах, забезпечує двонаправлені потоки енергії та підключається до електромережі на кількох підстанціях, через що ідеально підходить для інтеграції великих електростанцій на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [6].

Мікроострови на базі мікромереж (microgrid) – це локальна енергетична система з чіткими електричними межами, яка здатна працювати як у синхронному режимі з основною мережею, так і в автономному (острівному) режимі. Вона вважається єдиною керованою системою по відношенню до зовнішньої мережі [7].

Наноострови на базі наномереж (nanogrid) – це локальна ЕЕС малої потужності, що обслуговує окремий об'єкт (наприклад житловий будинок), здатна працювати як у підключеному до основної мережі режимі, так і в автономному (острівному) режимі. Структурно вона подібна до мікромережі, але має менші масштаби генерації, навантаження та складності керування. Потужність, як правил не перевищує 100 кВт. Може реалізовуватись на постійному, змінному струмі, або працювати у гібридному режимі. Зазвичай включає відновлювані джерела енергії (наприклад сонячні модулі), акумуляторні системи та навантаження будь-якого типу. Керується локальною енергетичною автоматикою з можливістю інтеграції через спеціалізований інтерфейс (gateway) до більшої енергосистеми. У порівнянні з мікромережею має спрощену архітектуру та нижчу складність у керуванні [8].

Макроострови в історичному та сучасному контексті здебільшого були вимушеним рішенням, обумовленим політичними, економічними або геополітичними обставинами. Наприклад з 1950-х років територія Західного Берліна була енергетичним островом (Energieinsel West-Berlin). Причиною цього слугувало припинення постачання електроенергії з НДР після Берлінської кризи 1948–1949 років, через що місто було змушене повністю забезпечувати себе

електроенергією. Через це були створені великі резерви генерації та палива. Це тривало до 1970-х років, так як почали з'являтися спроби інтеграції Західного Берліна з сусідніми енергосистемами [9].

У 2002-2022 роках в західній частині України функціонував Бурштинський енергетичний острів (БЕО), який являв собою виокремлену з ОЕС України територію у 27 тис. км² з населенням близько 3 млн. осіб, мав безпосередні міждержавні електричні зв'язки з державами країн ЄС (Угорщиною, Словаччиною та Румунією). До 2022 року був окремо від ОЕС України інтегрованим спочатку до спілки з координації передачі електроенергії (UCTE), згодом до європейської мережі операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E), відповідно працював синхронно з цими країнами. Склався БЕО з 4 електростанцій, 8 високовольтних підстанцій (ПС), повітряних високовольтних ліній електропередач (ЛЕП) (220 кВ – 750 кВ) загальною протяжністю понад 1000 км [10 – 12]. На відміну від енергетичного острова Західного Берліну, БЕО не був ізолюваним та працював паралельно з енергосистемами трьох країн, проте був ізолюваним від ОЕС України.

Техаська енергосистема, яку обслуговує ERCOT (Electric Reliability Council of Texas) є ще одним прикладом макроострова. Вона охоплює близько 90 % споживання електроенергії в штаті Техас і функціонує майже повністю ізолювано від решти енергосистем США, маючи обмежені з'єднання через HVDC-лінії. Така автономія зумовлена історичним прагненням уникнути федерального регулювання, проте в екстремальних умовах, як-от під час зимової бурі «Урі» в лютому 2021 року, це обмеження стало критичним: через дефіцит потужності понад 5 мільйонів споживачів залишилися без світла. Досвід ERCOT продемонстрував як переваги енергетичної самодостатності, так і її вразливість, зокрема у відсутності зовнішньої підтримки в кризових ситуаціях [13].

У сучасних умовах пріоритет надається динамічним, гнучким структурам, здатним швидко адаптуватися до змін у мережі. У цьому контексті особливе значення має концепція ICI, що розглядається як перспективний інструмент для підвищення стійкості та керованості ЕЕС.

ICI застосовується для поділу розподільчої системи на підсистеми, кожна з яких повинна ефективно балансувати генерацію та споживання та бути самодостатньою. Це необхідно по двом основним причинам [14]:

По-перше, для можливості від'єднання від основної мережі під час масштабних порушень.

По-друге, для зменшення навантаження на вище розташовані рівні енергосистеми.

Останнім часом концепція ICI розглядається як коригувальний та адаптивний підхід до управління, спрямований на створення самодостатніх підсистем в межах розподільчих мереж з метою підвищення стійкості та уникнення масштабного відключення. Основна увага приділяється саме мікро- та мезомережам, оскільки реалізація островів на рівні систем передачі має обмежену перспективу через складність синхронізації, інерційність великих генераторів і високу вартість [15].

Ключовими технічними викликами в рамках ІСІ є:

1) ідентифікація місць ізоляції, тобто оптимального набору ліній електропередач (ЛЕП), які мають бути відключені для формування електрично ізольованих островів;

2) забезпечення автономної працездатності ізолюваного сегмента, що включає підтримання частоти, напруги, балансу активної/реактивної потужності, адаптацію до локальних змін режиму.

У випадку розподільчих мереж виникає низка обмежень - системи розподілу є "пасивними", мають обмежену керованість та побудовані здебільшого за радіальними або кільцевими схемами, де можливості резервування мінімальні.

Через більші втрати у розподільчих мережах та менший рівень резервування, створення життєздатного острова вимагає попереднього аналізу структури та джерел живлення.

Окрім цього, момент виникнення аварії не може бути об'єктом планування або вибору – рішення про поділ системи приймається автоматикою, виходячи з заданих критеріїв (наприклад, частота, напруга, напрямки потужності). З практичної точки зору, організація острівного режиму зазвичай відбувається вже після повного від'єднання споживання, коли мережа відновлюється в автономному режимі вручну або напівавтоматично [5, 14].

Таким чином, ІСІ на розподільчому рівні вимагає як модернізації інфраструктури, так і удосконалення алгоритмів енергоменеджменту, що дозволяють оперативно адаптуватися до аварійних подій, не допустити каскадного розвитку відмов і підтримувати енергопостачання пріоритетних навантажень [16].

Острівний режим потребує підтримки стабільної частоти, напруги, балансування потужності та адаптації до локальних умов. У розподільчих мережах на основі використання систем енергоменеджменту можливе забезпечення тривалої роботи мережі в острівних режимах, водночас це вимагатиме модернізації мереж, що може потребувати значних інвестицій. Важливу роль у цьому процесі відіграє вдосконалення алгоритмів управління та синхронізації з основною мережею, необхідне для підвищення ефективності при переходах між режимами роботи та забезпечення стабільності системи [17].

У трьох розглянутих сценаріях розвитку островів для європейської синхронної системи передачі результати дослідження показують, що ІСІ забезпечує стійкі острови зі стабільною частотою в Європі для широкого діапазону режимів роботи як у поточних, так і в майбутніх сценаріях [5].

Висновки. Концепція поділу ЕЕС на енергетичні острови є досить прогресивним рішенням, що дозволяє підвищити стійкість, надійність та гнучкість ЕЕС. Окрім цього інтерес до даного напрямку підтверджується досить стрімким зростанням кількості авторитетних досліджень що проводяться у різних країнах. В умовах зростаючих загроз для електроенергетичних систем концепція енергетичних островів, зокрема на базі розподільчих мереж, набуває стратегічного значення. Історичні приклади макроостровів засвідчують

можливість автономного функціонування енергосистем, однак саме мікро- та мезомережі є найбільш придатними для впровадження ІСІ, яке дозволяє забезпечити надійне електропостачання критичних навантажень у разі системних збоїв.

Успішна реалізація ІСІ вимагає подолання низки технічних викликів – від визначення місць ізоляції до забезпечення автономної стабільності локальних сегментів. Проте розвиток розподіленої генерації, енергетичної автоматики та інтелектуальних систем керування створює реальні передумови для масштабного застосування острівного режиму як ефективного інструменту підвищення гнучкості, стійкості та надійності сучасних електроенергетичних систем.

Список літератури

- 1 Abu Dhabi Transmission & Despatch Company. The Electricity Transmission Code. Version 2, Revision 1. Abu Dhabi: Department of Energy, 2016. URL: <https://www.doe.gov.ae/-/media/Project/DOE/Department-Of-Energy/Media-Center-Publications/English-Files/ELECTRICITY-TRANSMISSION-CODE-2016-Ver-02-Rev-1.pdf>
- 2 General Electric Company and Baker Hughes, a GE company, LLC. "Amended and Restated HDGT Distribution and Supply Agreement." February 27, 2019. URL: <https://www.lawinsider.com/contracts/5AWeg5MpCGo#power-island>
- 3 European Commission. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. Official Journal of the European Union, L 112, 27 April 2016. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>
- 4 LIBRANDI, Mariano Dominguez, et al. Frequency stability of intentional controlled islanding scheme in the future European synchronous transmission grid. In: 2021 IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021. p. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9494977>
- 5 FERNÁNDEZ-PORRAS, Pablo; PANTELI, Mathaios; QUIRÓS-TORTÓS, Jairo. Intentional controlled islanding: when to island for power system blackout prevention. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12.14: 3542-3549. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-gtd.2017.1526>
- 6 Elpipes. Mesogrids as Stepping Stones to Grid-of-Grids. June 2015. URL: <https://elpipes.blogspot.com/2015/06/mesogrids-as-stepping-stones-to.html>
- 7 International Smart Grid Action Network (ISGAN). Definition of Microgrids. URL: <https://www.iea-isgan.org/definition/>
- 8 Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W., Guerrero, J.M., & Vasquez, J.C. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40 (2014), 659–672. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116305640>
- 9 LUDLOFF, Pál Leon. Oberjägerweg Blues. 2023. URL: <https://edoc.hu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/9229cfdc-315a-4f79-931a-9a12d820b14a/content>
- 10 "Бурштинський острів" витримує усі тести щодо паралельної роботи з європейською енергосистемою URL: https://web.archive.org/web/20170211075355/http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=93953&cat_id=35082
- 11 ДЕКЛАРАЦІЯ відповідності матеріально-технічної бази роботодавця вимогам законодавства з питань охорони праці та промислової безпеки URL: https://uz.dsp.gov.ua/images/pdf/Declar_vidpov/6.pdf
- 12 На підстанції 750 кВ «Західноукраїнська» введено в дію нові реактори URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/na-pidstantsiyi-750-kv-zahidnoukrayinska-vvedeno-v-diyu-novi-reaktory>
- 13 The University of Texas at Austin. Events February 2021 Texas Blackout. July 2021. URL: <https://energy.utexas.edu/sites/default/files/UTAustin%20%282021%29%20EventsFebruary2021TexasBlackout%2020210714.pdf>
- 14 L'ABBATE, Angelo, et al. Distributed Power Generation in Europe:

- technical issues for further integration. JRC European Commission Scientific and Technical Report. EUR, 2007, 23234. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38614105.pdf>
- 15 Shahidehpour, M., & Khodayar, M. Communication and Control in Microgrids. Chapter in: Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration. Wiley, 2014. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118720677>
 - 16 Meliopoulos, A.P., Cokkinides, G.J., & Xia, F. Protection Considerations in Microgrids. Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5768104>
 - 17 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). 4.5 Blaupause 12: Dauerhafter Betrieb eines Inselnetzes im Verteilnetz mittels dezentraler Erzeugung und Energiemanagement. 2024. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Sinteg/4-5-12-blaupause.pdf?__blob=publicationFile&v=6

References (transliterated)

- 1 Abu Dhabi Transmission & Despatch Company. The Electricity Transmission Code. Version 2, Revision 1. Abu Dhabi: Department of Energy, 2016. URL: <https://www.doe.gov.ae/-/media/Project/DOE/Department-Of-Energy/Media-Center-Publications/English-Files/ELECTRICITY-TRANSMISSION-CODE-2016-Ver-02-Rev-1.pdf>
- 2 General Electric Company and Baker Hughes, a GE company, LLC. "Amended and Restated HDGT Distribution and Supply Agreement." February 27, 2019. URL: <https://www.lawinsider.com/contracts/5AWeg5MpCGo#power-island>
- 3 European Commission. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. Official Journal of the European Union, L 112, 27 April 2016. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>
- 4 LIBRANDI, Mariano Dominguez, et al. Frequency stability of intentional controlled islanding scheme in the future European synchronous transmission grid. In: 2021 IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021. p. 1-6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9494977>
- 5 FERNÁNDEZ-PORRAS, Pablo; PANTELI, Mathaios; QUIRÓS-TORTÓS, Jairo. Intentional controlled islanding: when to island for power system blackout prevention. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12.14: 3542-3549. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-gtd.2017.1526>
- 6 Elpipes. Mesogrids as Stepping Stones to Grid-of-Grids. June 2015. URL: <https://elpipes.blogspot.com/2015/06/mesogrids-as-stepping-stones-to.html>
- 7 International Smart Grid Action Network (ISGAN). Definition of Microgrids. URL: <https://www.iea-isgan.org/definition/>
- 8 Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W., Guerrero, J.M., & Vasquez, J.C. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40 (2014), 659–672. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116305640>
- 9 LUDLOFF, Pál Leon. Oberjägerweg Blues. 2023. URL: <https://edoc.hu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/9229cfdc-315a-4f79-931a-9a12d820b14a/content>
- 10 "Burshtynskyi ostriv" vytrymuie usi testy shchodo paralelnoi roboty z yevropeiskoiu enerhosystemoiu. URL: https://web.archive.org/web/20170211075355/http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=93953&cat_id=35082
- 11 DEKLARATsIla vidpovidnosti materialno-tekhnichnoi bazy robotodavtsia vymoham zakonodavstva z pytan okhorony pratsi ta promyslovoy bezpeky URL: https://uz.dsp.gov.ua/images/pdf/Declar_vidpov/6.pdf
- 12 Na pidstantsii 750 kV «Zakhidnoukrainska» vvedeno v diiu novi reaktory URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/na-pidstantsiyi-750-kv-zakhidnoukrainska-vvedeno-v-diyu-novi-reaktory>
- 13 The University of Texas at Austin. Events February 2021 Texas Blackout. July 2021. URL: <https://energy.utexas.edu/sites/default/files/UTAustin%20%282021%29%20EventsFebruary2021TexasBlackout%2020210714.pdf>
- 14 L'ABBATE, Angelo, et al. Distributed Power Generation in Europe: technical issues for further integration. JRC European Commission Scientific and Technical Report. EUR, 2007, 23234. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38614105.pdf>
- 15 Shahidehpour, M., & Khodayar, M. Communication and Control in Microgrids. Chapter in: Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration. Wiley, 2014. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118720677>
- 16 Meliopoulos, A.P., Cokkinides, G.J., & Xia, F. Protection Considerations in Microgrids. Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5768104>
- 17 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). 4.5 Blaupause 12: Dauerhafter Betrieb eines Inselnetzes im Verteilnetz mittels dezentraler Erzeugung und Energiemanagement. 2024. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Sinteg/4-5-12-blaupause.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Надійшла (Received) 15.02.2026

Прийнята (Accepted) 05.03.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Чернецька Юлія Валентинівна (Chernetska Yuliia Valentynivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; e-mail: j.chernetska-ice@iill.kpi.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6821-3211>

Лисовик Богдан Андрійович (Lysovuk Bohdan Andriiovych) – аспірант, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; e-mail: lisovik7114@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3842-0832>