

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-49>

УДК 621.331.5

ПЛОЩИК АННА

Національна академія Державної прикордонної служби імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0002-7034-1930>e-mail: ploschik.a@gmail.com**ГОРОДИСЬКИЙ РОМАН**

Національна академія Державної прикордонної служби імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0002-0918-864X>e-mail: gorodden80@gmail.com**ВАВРИЧЕН ОЛЕКСІЙ**

Національна академія Державної прикордонної служби імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0000-0001-7777-9188>e-mail: oavavrichen@gmail.com

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ БАЛАНСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

У роботі представлено огляд особливостей використання суперконденсаторів як ефективних накопичувачів енергії, які за низкою параметрів є порівнюваними з традиційними хімічними джерелами струму. Розглянуто можливості їх заряджання від джерел живлення з обмеженням струму та застосування для енергопостачання різноманітних електронних пристроїв. Зазначено, що досягнення необхідної робочої напруги у більшості прикладних систем вимагає послідовного з'єднання окремих комірок, що, через відмінності у параметрах ємності та ізоляційного опору, спричиняє небезпеку виникнення дисбалансу напруги. Такий дисбаланс може призводити до перевищення допустимого рівня напруги на окремих елементах, їхнього прискореного старіння та скорочення ресурсу. З метою забезпечення надійності функціонування суперконденсаторного модуля розглянуто необхідність впровадження схем балансування. У межах дослідження систематизовано наявні інженерні рішення щодо реалізації таких схем, виконано їх порівняльний аналіз за критеріями енерговитратності, швидкодії та економічної ефективності. Запропоновано підхід до вибору найбільш доцільної стратегії балансування з урахуванням специфіки застосування у складі автономного зарядного пристрою для радіостанцій, що функціонують у складних умовах польової експлуатації, де обмежений доступ до централізованого живлення, наявні змінні навантаження та чинники зовнішнього середовища.

Ключові слова: суперконденсатори, схеми балансування, електроживлення радіостанцій, моделювання.

PLOSCHYK ANNA**HORODYSKYI ROMAN****VAVRICHEN OLEKSI**

Bohdan Khmelnytsky National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine

RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMUNUTOR

This paper provides a comprehensive review of the use of supercapacitors as advanced energy storage elements, emphasizing their advantages over traditional electrochemical batteries in terms of charge/discharge rates, longevity, and operational safety. Supercapacitors are particularly well-suited for short-term energy buffering in systems requiring rapid charge cycles and high reliability. Their ability to be charged from current-limited sources and to supply energy to a broad range of electronic devices makes them increasingly relevant for applications in autonomous and portable systems, including military-grade communication equipment.

A key challenge in the implementation of supercapacitors in high-voltage systems is the necessity of connecting individual cells in series to achieve the required operating voltage. This introduces the issue of voltage imbalance, resulting from inherent variations in cell capacitance and leakage resistance due to manufacturing tolerances or aging effects. Such imbalance can cause overvoltage in certain cells, leading to accelerated degradation, thermal stress, and reduced system reliability.

To address this problem, the paper explores various balancing techniques, including passive resistive methods, active redistribution circuits, and switched-capacitor configurations. Theoretical foundations of each method are presented, followed by modeling and simulation of their behavior in a typical charging application for radio communication devices. The simulations were performed using specialized simulation software designed for modeling electrical circuits and energy storage systems. The behavior of various balancing methods was analyzed within the context of a supercapacitor-based charging unit for radio communication devices. The modeling focused on evaluating the dynamic characteristics, voltage equalization efficiency, and energy losses of different circuit configurations.

The results of the comparative analysis consider multiple criteria such as balancing speed, energy loss, thermal performance, and implementation cost. Based on these findings, practical recommendations are proposed for selecting the most appropriate balancing strategy for use in portable, field-deployable charging systems. The paper emphasizes the importance of optimizing the energy management system to ensure stable operation of radio stations under dynamic and demanding conditions.

Keywords: supercapacitors, balancing circuits, power supply for radio communication devices, simulation modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 31.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 25.08.2025

Актуальність та постановка проблеми

У сучасних системах автономного енергозабезпечення, зокрема для мобільних засобів зв'язку, широко застосовуються суперконденсатори як надійні елементи зберігання енергії. Однак при їх послідовному з'єднанні виникає проблема нерівномірного розподілу напруги між окремими

комірками, що призводить до перенапруги на окремих елементах, їх прискореного старіння та зниження надійності системи загалом. Вирішення цієї проблеми потребує глибокого аналізу та вибору ефективної стратегії балансування, яка забезпечує рівномірний розподіл напруги в умовах змінних навантажень.

У зв'язку з цим, актуальним є проведення огляду існуючих схем балансування суперконденсаторів, визначення їх переваг і недоліків, а також формування уніфікованих підходів до оцінки їх ефективності.

Аналіз досліджень та публікацій

Авторами роботи [1] встановлено, що електрохімічні суперконденсатори завдяки зберіганню енергії в електричному полі подвійного електрохімічного шару демонструють унікальні характеристики, які заповнюють проміжок між звичайними конденсаторами та акумуляторними батареями за питомою енергією й питомою потужністю. Встановлено, що використання високопористих електродів з активованого вуглецю дозволяє досягти надзвичайно великої ємності, що підходить для короткочасних циклів заряду–розряду. Іоністори виявилися ефективними в широкому спектрі застосувань: від резервного живлення в споживчій електроніці до зберігання енергії при гальмуванні у гібридних електротранспортних засобах. Авторами також підкреслено, що ключовими перешкодами залишаються зниження питомого опору, підвищення допустимої напруги елемента, а також забезпечення рівномірності параметрів при серійному з'єднанні великої кількості комірок. Інші дослідження [2] показують, що використання гібридної електричної системи з елементами накопичення енергії на основі суперконденсаторів та літій-іонних акумуляторів дозволяє ефективно зменшити електромагнітні випромінювання, що виникають при керуванні електродвигунами в промислових системах. Запропонована система демонструє здатність забезпечувати короткочасні пускові струми до 300 А, що дозволяє зменшити зношування акумуляторної батареї. Авторами дослідження [3] встановлено, що при послідовному з'єднанні суперконденсаторів необхідно застосовувати системи балансування, оскільки нерівномірність ємності або внутрішнього опору елементів призводить до нерівномірного розподілу напруги, що спричиняє перевищення граничної напруги на окремих елементах та прискорене старіння.

В наступному дослідженні [4] авторами роботи встановлено, що для адекватного опису електричних характеристик суперконденсатора використовували математичну модель на основі спрощеної еквівалентної електричної схеми з урахуванням змінної ємності, яка залежить від напруги на комірці. Запропонована модель, реалізована в середовищі MATLAB. Було встановлено, що реальна ємність модуля варіюється залежно від напруги комірки, що підтверджує нелінійність поведінки суперконденсаторів.

Метою дослідження є аналіз, порівняння та визначення ефективної реалізації балансування суперконденсаторів для забезпечення стабільної роботи зарядного пристрою радіостанцій, з урахуванням параметрів енерговитратності, швидкодії та конструктивної складності схем. Для досягнення поставленої мети проведено моделювання типових схем балансування в програмному середовищі з метою наочного порівняння їх характеристик та обґрунтування вибору найбільш доцільного варіанта для практичного впровадження. Отримані результати мають як наукове, так і прикладне значення, спрямоване на вдосконалення систем електроживлення портативної радіотехніки.

Виклад основного матеріалу

Балансування суперконденсаторів відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності гібридних систем енергозбереження, зокрема у автономних сонячних електростанціях. У статті [5] було змодельовано гібридну систему з батареями та суперконденсаторами, де останні ефективно згладжують пікові навантаження, зменшуючи глибину розряду акумуляторів. Автори застосували алгоритм керування потужністю (PMS), що динамічно розподіляє енергію залежно від режимів надлишку чи дефіциту. Подібні підходи до керування гібридними накопичувачами висвітлені у роботах [6] та [7], які вказують на ефективність застосування суперконденсаторів у зменшенні циклічного навантаження на батареї та стабілізації напруги постійного струму у таких системах.

За своєю будовою суперконденсатори являють собою два електроди (зазвичай з активованого вугілля чи графіту), розділених електролітом. Типовий суперконденсатор може мати тисячі шарів електродів та електролітів, які згорнуті до компактної структури, щоб забезпечити максимальну площу поверхні. Крім того, можуть використовуватись різні матеріали для підвищення продуктивності, включаючи вуглецеві нанотрубки, металеві оксиди та полімери [8]. Все це призводить до того, що не існує два абсолютно однакових конденсатора, що призводить до неоднорідного їх заряду та розряду. Важливим є те, що в суперконденсаторів обмежена робоча напруга, яка не перевищує 3В. Для обходу цього обмеження застосовується послідовне ввімкнення суперконденсаторів, але при цьому зменшується їх ємність та виникає необхідність балансування напруги заряджання.

Без балансування, суперконденсатори будуть розряджатись та заряджатись нерівномірно, що може призвести до перевантаження та пошкодження деяких елементів, та зменшення загальної ємності блоку.

Важливо зауважити, що балансування суперконденсаторів необхідне тільки при їх використанні в батарейних блоках або схемах, а не при використанні окремих елементів.

Для вивчення невідповідності напруги на суперконденсаторах з різною ємністю при заряді змодельовано два суперконденсатори, з'єднані послідовно для заряджання, у програмі імітаційного моделювання, врахувавши внутрішній опір джерела живлення. Розглянемо послідовне з'єднання суперконденсаторів (рисунок 1), номіналом 5Ф із відхиленням від номінального у 10%, тобто отримаємо номінали $C_1=5.5\text{ Ф}$, $C_2=4.5\text{ Ф}$.

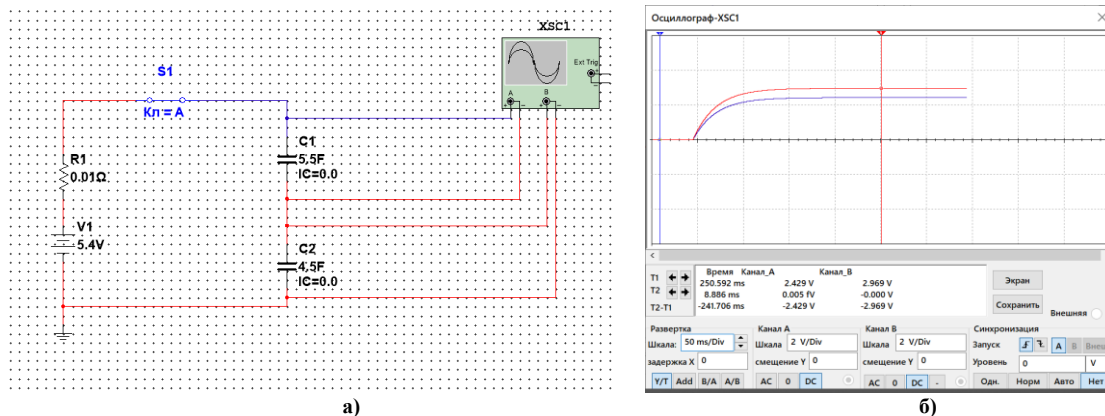


Рис. 1. Моделювання схеми а)-послідовного з'єднання суперконденсаторів та б)-осцилограма напруги заряду

Після проведення моделювання отримаємо осцилограму напруги, яка показує, що напруга на суперконденсаторі C_2 ємністю 4.5 Ф зростає набагато швидше, ніж на суперконденсаторі C_1 з ємністю 5.5 Ф. При майже завершній зарядці суперконденсатор C_2 досягає напруги 2,969, а конденсатора C_1 – 2,429 В. Як вже було згадано, перевищення робочої напруги на суперконденсаторі може спричинити незворотні процеси, що є неприпустимим. Для вирішення цієї проблеми розглянемо та порівняємо різні способи балансування суперконденсаторів.

В першу чергу необхідно розглянути пасивне балансування. Найпростіше можна збалансувати напругу на конденсаторах, додавши до них паралельно шунтуючі резистори. Щоб уникнути появи нерівномірного струму витоку, необхідно підібрати таке значення опору резисторів, за якого струм через них буде суттєво перевищувати струм витоку. Це забезпечує стабілізацію розподілу напруги між елементами та запобігає її поступовому дисбалансу. Водночас зазначений підхід ефективний лише для балансування напруги в умовах зберігання заряду, а не під час активного циклу заряду-розряду. В системі моделювання Multisim було здійснено дослідження балансування суперконденсаторів резистором в 1Ом. На рисунку 2 (б) видно, що здійснюється балансування суперконденсаторної батареї.

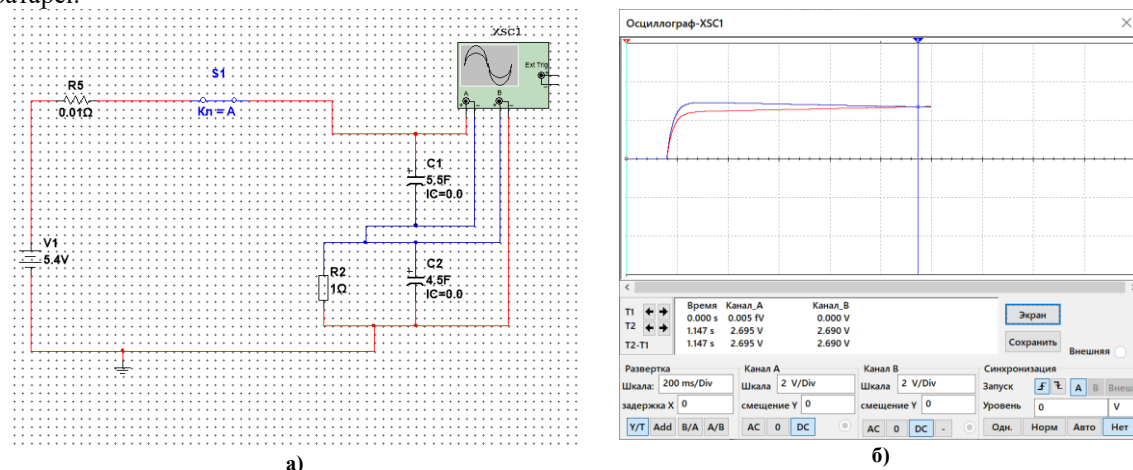


Рис. 2. Моделювання схеми а)-пасивного балансування суперконденсаторів та б)-осцилограма збалансованої напруги заряду

На відміну від пасивного балансування, де використовуються лише резистивні ділянки для вирівнювання напруги між суперконденсаторами, активне балансування передбачає застосування елементів, здатних динамічно реагувати на зміну напруги на кожному з елементів комірки. Одним з таких рішень є використання регульованого стабілітрона, зокрема TL431ACD, який дозволяє реалізувати більш ефективний контроль за рівнем напруги на кожному суперконденсаторі.

Стабілітрон TL431ACD — це програмований стабілітрон, що виконує функцію регульованого шунтувального стабілізатора. Його робота базується на принципі порівняння напруги, що прикладається до його вхідного вузла, із внутрішнім еталоном. Якщо напруга перевищує встановлений поріг, пристрій переходить у провідний стан, спрямовуючи надлишковий струм в обхід

суперконденсатора. Це дозволяє ефективно стримувати зростання напруги на комірці вище допустимого рівня та запобігти перевантаженню.

У дослідженні, що проводилося, кожен суперконденсатор у послідовному з'єднанні був доповнений схемою із TL431ACD, настроєною на порогову напругу, яка відповідає максимально допустимому значенню для конкретного елемента (наприклад, 2,7 В). Такий підхід забезпечує індивідуальний захист кожного суперконденсатора, зменшуючи ризик його деградації або виходу з ладу.

На рисунку 3 наведено результат експериментального моделювання такої схеми активного балансування. Видно, що стабілітрон починає проводити струм лише тоді, коли напруга на відповідному конденсаторі перевищує заданий поріг, чим досягається ефективно вирівнювання напруги без постійного розсіювання енергії, характерного для пасивних резисторних схем.

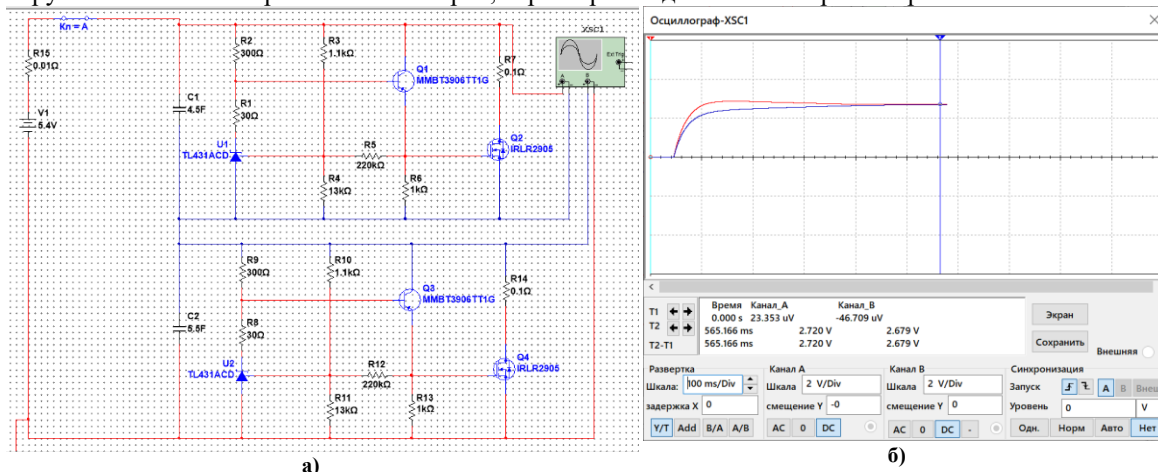


Рис. 3. Моделювання схеми а)-активного балансування суперконденсаторів та б)-осцилограма збалансованої напруги заряду

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У ході проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз та порівняння пасивних та активних схем балансування суперконденсаторів з метою визначення найефективнішої для забезпечення стабільного й безпечного заряджання акумуляторів радіостанцій. Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю забезпечення надійної роботи джерел автономного живлення в системах мобільного зв'язку, зокрема в умовах, що потребують високої надійності та довговічності енергетичних елементів.

Пасивне балансування за допомогою шунтуючих резисторів виявилось простим у реалізації та економічно доцільним рішенням для пристроїв із невеликим динамічним навантаженням або у випадках тривалого зберігання заряду. Проте виявлено, що цей метод не забезпечує оперативного реагування на швидкі коливання напруги й постійно розсіює енергію у вигляді тепла. Таким чином, його ефективність є обмеженою під час роботи радіостанцій.

Натомість активне балансування із застосуванням регульованого стабілітрона дозволило забезпечити високоточне динамічне регулювання напруги на кожному окремому елементі, запобігаючи перевищенню допустимих меж. За результатами моделювання підтверджено, що схема активного балансування починає функціонувати лише у разі досягнення критичного рівня напруги, що дозволяє значно зменшити втрати енергії у порівнянні з пасивною схемою та підвищити загальну енергоефективність системи. Крім того, активна схема забезпечує індивідуальний захист кожного суперконденсатора, що значною мірою зменшує ризик виходу з ладу окремих комірок, особливо за умов тривалого використання.

Таким чином, на підставі порівняльного аналізу конструктивної складності, енергоспоживання, швидкодії та точності балансування, рекомендовано для практичного застосування в системах заряджання акумуляторів радіостанцій обрати активну схему балансування.

Отримані результати є підґрунтям для подальших досліджень у напрямку інтеграції активного балансування в складні багатокоміркові структури суперконденсаторних батарей, а також для розробки інтелектуальних систем моніторингу та керування зарядом у портативних і стаціонарних засобах зв'язку.

Література

1. R. Kötz i M. Carlen, «Principles and applications of electrochemical capacitors», *Electrochimica Acta*, вип. 45, вип. 15–16, с. 2483–2498, Трав 2000, doi: 10.1016/S0013-4686(00)00354-6.
2. B. Mihailescu, P. Svasta, i A. Vasile, «Programmable hybrid electric system with low electromagnetic emissions», в *ResearchGate*, Bucharest, Romania: Centre for Technological Electronics and

Interconnection Techniques Politehnica University of Bucharest, c. 99–103. doi: 10.1109/SIITME.2012.6384355.

3. R. Kalbitz, «Supercapacitor – A Guide for the Design-In Process», *Appl. Note*, c. 1–9.

4. A. B. Cultura i Z. M. Salameh, «Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application», представлена на International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications, Bangkok, Thailand, 2015. doi: 10.2991/cisia-15.2015.235.

5. C. Melkia, S. Ghodelbourk, Y. Soufi, M. Maamri, i M. Bayoud, «Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Photovoltaic», *Eur. J. Electr. Eng.*, вип. 24, вип. 5–6, с. 265–271, Груд 2022, doi: 10.18280/ejee.245-605.

6. W. Jing, C. Hung Lai, S. H. W. Wong, i M. L. D. Wong, «Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview», *IET Renew. Power Gener.*, вип. 11, вип. 4, с. 461–469, Бер 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0500.

7. P. Singh i J. S. Lather, «Power management and control of a grid-independent DC microgrid with hybrid energy storage system», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, вип. 43, с. 100924, Лют 2021, doi: 10.1016/j.seta.2020.100924.

8. A. Patel *et al.*, «Carbon Nanotube/Reduced Graphene Oxide/Aramid Nanofiber Structural Supercapacitors», *ACS Appl. Energy Mater.*, вип. 3, вип. 12, с. 11763–11771, Груд 2020, doi: 10.1021/acsaem.0c01926.

References

1. R. Kötz i M. Carlen, «Principles and applications of electrochemical capacitors», *Electrochimica Acta*, вип. 45, вип. 15–16, с. 2483–2498, Трав 2000, doi: 10.1016/S0013-4686(00)00354-6.

2. B. Mihailescu, P. Svasta, i A. Vasile, «Programmable hybrid electric system with low electromagnetic emissions», в ResearchGate, Bucharest, Romania: Centre for Technological Electronics and Interconnection Techniques Politehnica University of Bucharest, c. 99–103. doi: 10.1109/SIITME.2012.6384355.

3. R. Kalbitz, «Supercapacitor – A Guide for the Design-In Process», *Appl. Note*, c. 1–9.

4. A. B. Cultura i Z. M. Salameh, «Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application», представлена на International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications, Bangkok, Thailand, 2015. doi: 10.2991/cisia-15.2015.235.

C. Melkia, S. Ghodelbourk, Y. Soufi, M. Maamri, i M. Bayoud, «Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Photovoltaic», *Eur. J. Electr. Eng.*, вип. 24, вип. 5–6, с. 265–271, Груд 2022, doi: 10.18280/ejee.245-605.

5. W. Jing, C. Hung Lai, S. H. W. Wong, i M. L. D. Wong, «Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview», *IET Renew. Power Gener.*, вип. 11, вип. 4, с. 461–469, Бер 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0500.

6. P. Singh i J. S. Lather, «Power management and control of a grid-independent DC microgrid with hybrid energy storage system», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, вип. 43, с. 100924, Лют 2021, doi: 10.1016/j.seta.2020.100924.

7. A. Patel *et al.*, «Carbon Nanotube/Reduced Graphene Oxide/Aramid Nanofiber Structural Supercapacitors», *ACS Appl. Energy Mater.*, вип. 3, вип. 12, с. 11763–11771, Груд 2020, doi: 10.1021/acsaem.0c01926.