



КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ
Харківського національного університету
ВНУТРІШНІХ СПРАВ



Науковий парк «Наука та безпека»

МАТЕРІАЛИ
V Міжнародної
науково-практичної конференції

АВІАЦІЯ
ПРОМИСЛОВІСТЬ
СУСПІЛЬСТВО



КРЕМЕНЧУК
16 травня 2024 року



**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ
НАУКОВИЙ ПАРК «НАУКА ТА БЕЗПЕКА»**



МАТЕРІАЛИ

V Міжнародної науково-практичної конференції

«АВІАЦІЯ, ПРОМИСЛОВІСТЬ, СУСПІЛЬСТВО»

(посвідчення Державної наукової установи «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації» Міністерства освіти і науки України від 15 вересня 2023 року № 371)

Дата проведення конференції – 16 травня 2024 року



*16 травня 2024 року
м. Кременчук*

**MINISTRY OF INTERNAL AFFAIRS OF UKRAINE
KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY OF INTERNAL AFFAIRS
KREMENCHUK FLIGHT COLLEGE
SCIENCE PARK «SCIENCE & SECURITY»**



PROCEEDINGS

of the V International scientific and practical conference

«AVIATION, INDUSTRY, SOCIETY»

(Certificate, issued by State scientific institution «Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information» of Міністерства освіти і науки України
No 371 of September 15, 2023)

Date – May 16, 2024



*May 16, 2024
Kremenchuk*

УДК 62(33:34:37:61:65:80)

A20

*Рекомендовано до друку оргкомітетом відповідно до доручення
Харківського національного університету внутрішніх справ
від 08 лютого 2023 року № 12*

Редакційна колегія:

Сокуренко В.В., ректор Харківського національного університету внутрішніх справ, генерал поліції третього рангу, заслужений юрист України, член-кореспондент Національної академії правових наук України, доктор юридичних наук, професор (голова редколегії);

Музичук О.М., проректор Харківського національного університету внутрішніх справ, полковник поліції, заслужений юрист України, доктор юридичних наук, професор (заступник голови редколегії);

Яковлєв Р.П., директор Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ (член редколегії);

Владов С.І., начальник відділу організації наукової роботи та гендерних питань Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, кандидат технічних наук (член редколегії);

Рудь Ю.Л., старший науковий співробітник відділу організації наукової роботи та гендерних питань Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, кандидат економічних наук (член редколегії, відповідальна за випуск)

A20

Авіація, промисловість, суспільство : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (м. Кременчук, 16 травня 2024 року) / Міністерство внутрішніх справ України, Харківський національний університет внутрішніх справ, Кременчуцький льотний коледж., Науковий парк «Наука та безпека». Харків : ХНУВС, 2024. 530 с.
ISBN 978-966-610-282-2

У збірнику оприлюднені результати наукових досліджень учених, здобувачів вищої освіти, практиків з питань сучасних тенденцій і перспектив розвитку авіації, промисловості, суспільства в умовах сьогодення.

УДК 62(33:34:37:61:65:80)

Доповіді друкуються в авторській редакції!

Оргкомітет не завжди поділяє думку та погляди авторів. Відповідальність за достовірність фактів, власних імен, назв, цитат, цифр та інших відомостей несуть автори публікацій.

5. Владов С. І., Дерябіна І. О., Гусарова О. В., Пилипенко Л. М., Пономаренко А. В. Ідентифікація багаторежимної моделі авіаційних двигунів вертольотів у польотних режимах з використанням модифікованого градієнтного алгоритму навчання радіально-базисних нейронних мереж. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 4 (79). С. 52–63. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.4.6>

УДК 615.47

Волков Є.Д., інженер

Аврунін О. Г., д.т.н., професор

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ СТРУКТУР З ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація: Сучасна галузь обробки зображень тісно пов'язана з системами комп'ютерного зору, що можна використати для виконання різноманітних задач, від догляду за пацієнтами, до автоматичного аналізу візуального стану тканин. Використання цієї технології спрямоване на підвищення ефективності медичних процедур через зниження впливу людського фактора. Дана робота має на меті проведення часткового аналізу поточного стану індустрії комп'ютерного зору, висвітлення поточних проблем та досліджень шляхів їхнього подолання для кращої інтеграції в нові сфери людської діяльності. Розглянуто сучасні тенденції розвитку нейромережових структур з обробки зображень.

Ключові слова: аналіз зображень, комп'ютерний зір, згорткові нейронні мережі, CNN, AlexNet, оптимізація.

Комп'ютерний зір активно набирає популярності в галузі обробки зображень, не в останню чергу в медичному середовищі. Розпізнавання людської активності – усталена тенденція з численними завданнями, такими як моніторинг догляду за літніми людьми, відстеження реабілітаційної активності, аналіз корекції постави [1] – а також більш традиційні завдання, такі як автоматизована медична діагностика [2, 3, 4] є помітними областями досліджень у межах комп'ютерного зору. Для цих та інших завдань реалізуються різні моделі обробки зображень, проводяться численні дослідження щодо їх поліпшення. Індустрія не стоїть на місці і для кращої орієнтації в доступному виборі інструментів необхідно проводити огляди актуальних рішень та тенденцій обробки зображень.

Більшість із досліджуваних сучасних алгоритмів комп'ютерного зору побудовані на основі згорткових нейронних мереж (CNN) [5], що являють собою багатопшарову ієрархічну мережу з глибоким прямим зв'язком, натхненну біологічним механізмом рецептивного поля. За допомогою кількох рівнів перетворення інформації базове уявлення вихідних даних поступово перетворюється на уявлення об'єктів вищого рівня від простих ліній і вигинів, до візерунків та комплексних форм, а оброблені дані передаються у функцію прогнозування для безпосереднього вирішення остаточного завдання. При цьому, на тлі аналогічних більш ранніх систем, структура моделей CNN зарекомендувала себе тісними локальними зв'язками нейронів, якіснішим

розподілом ваг і знижувальною дискретизацією, що зменшує загальний обсяг системи порівняно з повнозв'язковими аналогами.

Однією з найбільш обговорюваних моделей, заснованих на CNN, є AlexNet [6], яка виграла конкурс великомасштабного візуального розпізнавання ImageNet (ILSVRC) у 2012 році завдяки своїй чудовій продуктивності. З підвищенням точності AlexNet у завданнях комп'ютерного зору, таких як класифікація зображень, дослідники почали виправляти дефекти мережевих моделей на основі AlexNet, сподіваючись на подальше підвищення їх продуктивності. Значних успіхів було досягнуто в її оптимізації, і деякими з найбільш репрезентативних моделей нейронних мереж на її основі є Visual Geometry Group (VGG) [7], GoogLeNet [8], Residual Network (ResNet) [9], Мережа стиснення та збудження (SENet) [10] та MobileNet [11]. З розвитком цих архітектур моделі нейронних мереж стають глибшими, ширшими та складнішими. Хоча ця еволюція може допомогти мережам краще відображати об'єкти та їх властивості, немає жодної гарантії, що вони зможуть працювати ефективно у всіх випадках і, як і раніше, все ще страждають від часом суттєвих недоліків.

З операційної точки зору залишається безліч проблем, пов'язаних з дорожнечою і складністю роботи зі згортковими моделями в умовах обмежених ресурсів. Так, глибокі моделі CNN складно інтегрувати безпосередньо в мобільні пристрої через необхідність підтримувати точність моделі, враховуючи її суттєвий розмір та продуктивність. Для виконання своєї базової функції дані моделі вимагають великого обсягу оперативної пам'яті для зберігання безлічі параметрів і забирають багато процесорного часу, що робить їх неможливими для ефективного розгортання на платформах з обмеженими обчислювальними ресурсами, на кшталт портативних пристроїв або спеціалізованої апаратури. В результаті дуже важливо знайти способи мінімізувати рівень складності нейронних мереж, одночасно створюючи моделі, які виконуються швидко, не жертвуючи при цьому підсумковою точністю. Крім того, враховуючи, що глибокі CNN за своїм влаштуванням зазвичай схожі на чорні ящики, інтерпретація та пояснення їхньої поведінки може бути недоступною рядовому розробнику. Як наслідок, ускладнюється процес їх детального налагодження та оптимізації. На додаток до цього, все ще відчувається брак теоретичних та математичних засад для пояснення оптимізаційних заходів. Нейромережева модель розвивається у бік глибших рівнів та більшого масштабу параметрів у міру розвитку технології. Отже, пошук стратегій зниження обчислювальної складності моделі має вирішальне значення, що потребує постійної оптимізації теоретично та експериментально. Поліпшення якості моделі на цьому етапі багато в чому залежить від попередніх знань проектувальника, що завдає шкоди всій теоретичній основі глибокого навчання, оскільки оптимізація доволі часто має більш інженерний характер без чіткого математичного обґрунтування. В результаті розуміння того, які характеристики засвоїли глибокі мережі та база глибокої CNN для досягнення високої продуктивності, стає все більш важливою

областю досліджень.

З точки зору навчання також мають місце певні складності. Зокрема, вибір гіперпараметрів (наприклад, кроку навчання, темпу та фільтра для даних) істотно впливає на підсумкову продуктивність CNN. Однак, вибір оптимальних гіперпараметрів вимагає великої кількості знань і таланту, а ці гіперпараметри надзвичайно внутрішньо залежні, будь-яка крихітна зміна може істотно вплинути на підсумкові результати навчання. Ретельний вибір гіперпараметрів стає одним із ключових завдань проектування, а його рішення полягає в пошуку та використанні відповідного методу оптимізації. У цьому контексті метаевристичні алгоритми можуть використовуватися для автоматичного налаштування гіперпараметрів шляхом виконання як випадкового, так і спрямованого пошуку на основі попередніх результатів.

Також, характерною для промисловості нейронних мереж та для комп'ютерного зору зокрема проблемою залишається потреба у великооб'ємних масивах даних та суттєвій обчислювальній потужності для навчання. Навіть при використанні того самого набору даних для різних завдань, маркування даних відрізняється, що ускладнює ручний збір великомасштабних і анотованих вибірок навчального матеріалу. Це призводить до значного збільшення трудових та тимчасових витрат на маркування наборів даних, створених під конкретне завдання. На успіх навчання моделі також може суттєво вплинути якість анотацій отриманої вибірки.

Щоб частково виправити ці недоліки моделей, багато вчених розробили різні методи оптимізації роботи CNN, такі як скорочення мережі, дистиляція знань та декомпозиція тензорів. У своїй роботі автори Янг з колегами [12] пропонують новий метод скорочення мережі, що базується на показнику «чутливості» згорткових шарів. Чутливість шарів пропонується визначати за допомогою моделі навчання із підкріпленням. Вона ранжує шари за ступенем чутливості та видаляє з мережі ті, які є найменш чутливими. В експериментальних умовах такий підхід дозволяв у двічі скоротити кількість математичних операцій, скорочуючи підсумкові моделі на 40-60% від вихідної кількості параметрів.

У роботі [13] групи Гуо розглядається поліпшення існуючих механізмів «дистиляції знань»: процесу попереднього налаштування мережі, що навчається, за рахунок ваг вже навченої мережі-«вчителя». Новий підхід передбачає додавання в модель, яка виступає джерелом даних, блоку що самонавчається для конверсії вихідних шарів в універсальний набір векторів однакової довжини, своєрідний буфер пам'яті, який потім можна буде використовувати для налаштування нової моделі. Даний метод покликаний вирішити проблему передачі знань між моделями у випадках, коли в них присутні суттєві структурні відмінності, на кшталт кількості параметрів, що відстежуються, глибини шарів та інших. У ході експериментів навчені з використанням нового методу нейромережі показували результати, які перевершували «вчительські», при

цьому процес навчання займав менше часу.

Третій із вищезазначених підходів, запропонований командою Фернадеса [14], полягає в оптимізації процесу аналізу складних соціальних мереж за допомогою тензорів. У своїй роботі дослідники пропонують додатково проводити декомпозицію складних багатовимірних тензорів до операцій з більш простими, зменшуючи таким чином загальну обчислювальну складність підсумкової моделі. Даний підхід, теоретично, можна застосовувати і до моделей комп'ютерного зору, які на певному етапі також активно використовують тензорні обчислення. Потрібні подальші дослідження у цьому напрямі.

Незважаючи на значні досягнення моделей CNN у завданнях комп'ютерного зору, таких як класифікація зображень [15], виявлення об'єктів [16] та розпізнавання відео [17], ця область як і раніше наповнена різноманітними проблемами і має широкий простір для подальшого розвитку та оптимізації. Оскільки завдання комп'ютерного зору стають все більш складними та насущними, існує гостра потреба в моделях та алгоритмах CNN, які забезпечуватимуть більш високу продуктивність та ефективність, зберігаючи при цьому відносну легковагість як щодо пам'яті, так і швидкості обчислення. Поточні дослідження намагаються досягти зазначених цілей, при цьому торкаючись все більш нових аспектів, таких як обмін знаннями моделей для різних завдань, адаптація до предметної області та інтерпретованість стану моделі. Це буде дуже корисним та відкриє нові перспективи для реалізації практичних задач у біомедичній сфері [18], зокрема при розробці навігаційних систем [19], аналізі томографічних даних [20-24], мікроскопічних зображень [25-29] та телемедичних застосувань [30].

Список використаних джерел

1. Singh T., Vishwakarma D. K. Video benchmarks of human action datasets: a review. *Artificial intelligence review*. 2018. Vol. 52, no. 2. P. 1107–1154. URL: <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9651-1> (date of access: 21.04.2024).
2. Using medical imaging in disaster medicine / Y. Sokol et al. 2020 IEEE 4th international conference on intelligent energy and power systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263175> (date of access: 21.04.2024).
3. Tymkovych, M., Gryshkov, O., Avrunin, O., . . . Glasmacher, B. (2021). Application of SOFA framework for physics-based simulation of deformable human anatomy of nasal cavity. Paper presented at the IFMBE Proceedings, (80) 112-120. doi:10.1007/978-3-030-64610-3_14
4. Використання DICOM зображень в медичних системах / М. Ю. Тимкович, О. Г. Аврунін, В.В. Семенець. Техн. електродинаміка: Темат. вип.: Силова електроніка та енергоефективність, (СЕЕ'2012). 2012. НТУУ «КПІ», Київ. С. 178-183. ISSN 1607-7970.
5. A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and

prospects / Z. Li et al. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2021. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1109/tnnls.2021.3084827> (date of access: 21.04.2024).

6. Alom Md. Z. et al. The history began from AlexNet: a comprehensive survey on deep learning approaches. *ArXiv*. 2018. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.01164> (date of access: 21.04.2024).

7. Going deeper in spiking neural networks: VGG and residual architectures / A. Sengupta et al. *Frontiers in neuroscience*. 2019. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00095> (date of access: 21.04.2024).

8. Khan R. U., Zhang X., Kumar R. Analysis of ResNet and GoogleNet models for malware detection. *Journal of computer virology and hacking techniques*. 2018. Vol. 15, no. 1. P. 29–37. URL: <https://doi.org/10.1007/s11416-018-0324-z> (date of access: 21.04.2024).

9. Wightman R., Touvron H., Jégou H. ResNet strikes back: an improved training procedure in timm. *Computing research repository (CoRR)*. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.00476> (date of access: 21.04.2024).

10. Delving deep into spatial pooling for squeeze-and-excitation networks / X. Jin et al. *Pattern recognition*. 2022. Vol. 121. P. 108159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108159> (date of access: 21.04.2024).

11. MobileFormer: bridging mobilenet and transformer / Y. Chen et al. *2022 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, New Orleans, LA, USA, 18–24 June 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr52688.2022.00520> (date of access: 21.04.2024).

12. Deep neural network pruning method based on sensitive layers and reinforcement learning / W. Yang et al. *Artificial intelligence review*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10566-5> (date of access: 21.04.2024).

13. Semantic-aware knowledge distillation with parameter-free feature uniformization / G. Guo et al. *Visual intelligence*. 2023. Vol. 1, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s44267-023-00003-0> (date of access: 21.04.2024).

14. Fernandes S., Fanaee-T H., Gama J. Tensor decomposition for analysing time-evolving social networks: an overview. *Artificial intelligence review*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09916-4> (date of access: 21.04.2024).

15. Chandra M. A., Bedi S. S. Survey on SVM and their application in image classification. *International journal of information technology*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/s41870-017-0080-1> (date of access: 21.04.2024).

16. A state-of-the-art survey of object detection techniques in microorganism image analysis: from classical methods to deep learning approaches / P. Ma et al. *Artificial intelligence review*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10209-1> (date of access: 21.04.2024).

17. Multiview transformers for video recognition / S. Yan et al. *2022 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, New Orleans, LA, USA, 18–24 June 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr52688.2022.00333>

(date of access: 21.04.2024).

18. Місоченко С. Ю. Дослідження використання вірогіднісних методів у сфері обробки біомедичних зображень / С. Ю. Місоченко, К. Г. Селіванова, О. Г. Аврунін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХХ міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 19-21 жовтня 2022 р. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – С. 902.

19. A. Sokolov, Oleg Avrunin and A. Sokolov, "Architectures of portable systems for orientation of the blind", Jan. 2022, [online] Available: <https://doi.org/10.35598/mcfpga.2022.014>.

20. Avrunin, O. G., Nosova, Y. V., Abdelhamid, I. Y., . . . Harasim, D. (2021). Research active posterior rhinomanometry tomography method for nasal breathing determining violations. *Sensors*, 21(24) doi:10.3390/s21248508

21. Avrunin, O. G., Nosova, Y. V., Abdelhamid, I. Y., . . . Kalizhanova, A. (2021). Possibilities of automated diagnostics of odontogenic sinusitis according to the computer tomography data. *Sensors*, 21(4), 1-22. doi:10.3390/s21041198

22. Шамраєва, Е.О. Вибір метода сегментації кісткових структур на томографічних зображеннях /Е.О. Шамраєва, О.Г. Аврунін // Біоніка інтелекта: інформація, мова, інтелект.– 2006.– № 2 (65). – С.83–87.

23. Аврунін О.Г., Шамраєва Е.О. Реконструкці об'ємних моделей черепа і імплантата по томографічним знімкам // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 9 (67). – С. 137–140.

24. Шамраєва Е.О, Аврунін О.Г. Побудова моделей черепних імплантантів по рентгенографічним даним// Прикладна радіоелектроніка.– 2005.– Т4, С. 441–443.

25. Maksym Tymkovych, Oleg Avrunin, Oleksandr Gryshkov, Valerii Semenets and B. Glasmacher, "Ice Crystals Microscopic Images Segmentation Based on Active Contours", Apr. 2019, <https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783332>.

26. Tymkovych M., Gryshkov O., Selivanova K., Mutsenko V., Avrunin O., Glasmacher B.. Application of Artificial Neural Networks for Analysis of Ice Recrystallization Process for Cryopreservation, IFMBE Proceedings, 80 (2021), 102-111. doi:10.1007/978-3-030-64610-3

27. Tymkovych, M. Y., Gryshkov, O., Selivanova, K. G., Mutsenko, V., & Glasmacher, B. (2019). Multiscale quantitative analysis of microscopic images of ice crystals. 46th ESAO Congress. *The International Journal of Artificial Organs*, (42), 429.

28. Gryshkov O. Optimal cryopreservation yields intact alginate microspheres and high cell viability after thawing/Oleksandr Gryshkov, Maksym Tymkovych, Tim Rittinghaus, Oleg Avrunin, Birgit Glasmacher//Cryobiology. – Vol. 85. – P. 178.

29. Аврунін О.Г. Досвід розробки біомедичної системи цифрової мікроскопії / О.Г. Аврунін // Прикладна радіоелектроніка. – 2009. – Т.8. – № 1. – С. 46–52.

30. Kolisnyk, K., Deineko, D., Sokol, T., Kutsevlyak, S., & Avrunin, O. (2019).

Application of modern internet technologies in telemedicine screening of patient conditions. IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T, 459-464. doi:10.1109/PICST47496.2019.9061252.

УДК 519.3:62-50

Даниліна Г.В., канд. техн. наук, доцент,

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3634-7734>

Рашевський М.О., канд. фіз.-мат. наук, доцент,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1136-2691>

ВСП «Криворізький фаховий коледж НАУ», м. Кривий Ріг, Україна

АСИМПТОТИЧНІ РОЗВ'ЯЗКИ ДЕЯКИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Анотація: Нестационарні системи автоматичного керування, як правило описуються системами диференціальних, диференціально-функціональних інтегро-диференціальних рівнянь тощо, залежно від елементів системи. Згадані рівняння містять змінні коефіцієнти, тому, як правило, не інтегруються у квадратурах. Використання наближених (асимптотичних) методів потребує врахування різного роду вродженості коефіцієнтів системи, які називають точками нестійкості. Досліджується побудова асимптотичного зображення розв'язку системи керування, що описується інтегро-диференціальним рівнянням при наявності вродженості деяких коефіцієнтів.

Ключові слова: система автоматичного керування, асимптотичне зображення розв'язку, нестійкість спектру, узагальнені розв'язки.

Вивчення ряду проблем руху об'єктів у суцільному середовищі, наприклад, динаміки польоту літака, призводить до необхідності інтегрувати систему диференціальних, інтегро-диференціальних [1] або функціонально-диференціальних рівнянь [3]. Опис руху тіл у суцільному середовищі з урахуванням впливу нестационарного обтікання об'єкта при малих його еволюціях і деформації його поверхні зводиться до інтегро-диференціальної системи вигляду

$$\frac{dx(\tau, \varepsilon)}{d\tau} = a(\tau, \varepsilon)x(\tau, \varepsilon) + \int_0^{\tau} K(\tau, \sigma, \varepsilon)x(s, \varepsilon)ds + h(\tau, \varepsilon)u; \quad (1)$$

$$u = \int_{-\infty}^t G(t-t'; \tau'; \varepsilon)x(t'; \varepsilon)dt'. \quad \tau = \varepsilon t, \sigma = \varepsilon s, 0 \leq \sigma \leq \tau \leq L.$$

Тут $x(\tau, \varepsilon)$ – функція, що описує відхилення регульованої величини; $u(\tau, \varepsilon)$ – керуюча функція; $G(t, s, \varepsilon)$ – імпульсна перехідна функція регулятора. Сформульована задача належить до задач теорії автоматичного керування процесом за умови повільної зміни параметрів регульованого об'єкта і ланки керування. Припускається, що всі згадані функції зображуються збіжними рядами за степенями дійсного малого параметра $\varepsilon > 0$: