

## Перспективні напрямки математичного моделювання складних систем

### Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	<i>Третій (освітньо-науковий)</i>
Галузь знань	<i>11 - Математика та статистика</i>
Спеціальність	<i>113 Прикладна математика</i>
Освітньо-наукова програма	<i>Математичне моделювання та обчислювальні методи</i>
Статус дисципліни	<i>Обов'язкова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс весняного семестру</i>
Обсяг дисципліни	<i>120 годин / 4 кредити ЕКТС (лекції – 28 год., практичні заняття – 12 год., СРС – 80 год.)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>залік, модульна контрольна робота</i>
Розклад занять	<i>2 год лекційних та 1 год практичних занять на тиждень</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лекції та практичні заняття проводить: академік, д.т.н., професор, Довгий Станіслав Олексійович, s.dovhyi@itgip.org</i>
Розміщення курсу	<a href="https://classroom.google.com/c/ODQ0MTYwODg4NjY5?cjc=jniuorep">https://classroom.google.com/c/ODQ0MTYwODg4NjY5?cjc=jniuorep</a>

#### Програма навчальної дисципліни

##### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

*Вивчення даної дисципліни забезпечується дисциплінами обов'язкового компоненту циклів загальної та професійної підготовки: «Теорія ймовірностей», «Програмування» та «Математичної статистики». Вивчення дисципліни «Перспективні напрямки математичного моделювання складних систем» забезпечує засвоєння дисциплін вибіркового блоку таких, як «Сучасні технології обчислювального інтелекту, інтелектуальні обчислення та аналіз даних у дослідженні динамічних систем та процесів» та «Моделі, методи, технології штучного інтелекту та інтелектуальний аналіз даних у дослідженні динамічних систем та процесів» тощо.*

**Мета:** формування у здобувачів ступеня доктора філософії здатності до системного наукового бачення сучасних підходів до математичного моделювання складних, багаторівневих, нелінійних і стохастичних систем різної природи (соціально-економічних, технічних, екологічних, біологічних, інформаційних), а також набуття здатності розробляти, аналізувати, верифікувати та інтерпретувати нові моделі з використанням міждисциплінарних методів.

**Предмет вивчення** є теоретичні засади, методологія та інструментарій побудови, аналізу, ідентифікації, верифікації та застосування математичних моделей складних систем різної природи, що характеризуються нелінійністю, багатofакторністю, ієрархічною структурою, багатомасштабністю, стохастичністю та наявністю невизначеності.

### **Програмні результати навчання:**

#### **Загальні компетентності**

- ЗК01. Здатність абстрактно мислити, виконувати поглиблений критичний аналіз, оцінку і синтез нових та комплексних ідей, формування необхідних методологічних принципів і навичок аналізу предмету наукового дослідження і явищ реального світу осмисленого підходу до життя, відокремлювати головні проблеми від другорядних, розуміти глобальні аспекти та їх наслідки;*
- ЗК02. Вміння виявляти проблему, виконувати постановку задачі та вирішувати її, зокрема, виявляти актуальні, значущі проблеми, які потребують розширення та переоцінки існуючих та/або розроблення нових підходів, створення нових моделей, методів, технологій, тощо генерувати нові ідеї.*
- ЗК03. Здатність до ґрунтовних досліджень, пошуку, оброблення аналізу інформації з різних джерел, використання сучасних інформаційних технологій, започаткування, планування, реалізації та коригування послідовного процесу ґрунтового наукового дослідження, демонструючи значну авторитетність, інноваційність, високий ступінь самостійності, з дотриманням належної академічної та професійної доброчесності й здатності до саморозвитку та самонавчання"*
- ЗК04 Здатність використовувати академічну українську та іноземну мови у професійній діяльності та дослідженнях, застосовувати методи та технології наукових комунікацій для оприлюднення результатів досліджень, ефективно взаємодіяти у плюрилінгвальному (багатомовному) та полікультурному середовищі, працювати у міжнародному контексті.*

#### **Фахові компетентності**

- ФК01. Здатність виконувати оригінальні наукові дослідження, визначати наукову проблему, формулювати робочі гіпотези дослідження, отримувати науковий результат, який передбачає продукування нових знань в прикладній математиці та дотичних мультидисциплінарних сферах, оприлюднювати отримані наукові результати*
- ФК02. Здатність до формулювання цілей та задач дослідження, його структурно-логічної схеми, розвинення окремих напрямків досліджень на основі існуючих та власних теоретичних підходів, моделей і методів, алгоритмів, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань.*
- ФК03 Здатність спілкуватись українською та англійською мовами, усно і письмово презентувати результати власних наукових досліджень, розуміти англійські наукові тексти в галузі прикладної математики, вільно спілкуватись з питань, що стосуються сфери наукових та експертних знань, з колегами, широкою науковою спільнотою, суспільством у цілому*

- ФК04 Здатність застосовувати сучасні інформаційні та комунікаційні технології, працювати з структурованими та неструктурованими даними, отримуваними з баз даних, електронних ресурсів мережі Інтернет, інших джерел, використовувати спеціалізоване програмне забезпечення для математичного моделювання та застосування обчислювальних методів як у процесі навчання, так і на всіх етапах наукової діяльності: теоретичного обґрунтування постановки задач та вибору методу її розв'язку, вибору методики виконання дослідження, проведення чисельних експериментів, практичного застосування, аналізу та інтерпретації результатів.*
- ФК05 Здатність виявляти, ініціювати, розв'язувати комплексні проблеми у сфері прикладної математики започатковуючи дослідницькі, інноваційні проєкти, розробляти дослідницькі пропозиції, планувати та виконувати НДР на замовлення та на конкурсній основі, провадити дослідження самостійно, керувати проєктами та формувати команду дослідників для їх реалізації*
- ФК06 Здатність до розроблення нових та застосування математичних моделей, обчислювальних методів до розв'язання широкого кола прикладних задач, зокрема, в сфері національної безпеки та оборони, екологічної безпеки і збалансованого природокористування*
- ФК07 Здатність розв'язувати наукові та науково-прикладні проблеми, формулювати наукову проблему та робочу гіпотезу, будувати і розробляти логічну математичну схему розв'язку задач, обґрунтувати пропоновану методику розв'язку задач з належною аргументацією з чітким визначенням припущень, засобів дослідження і висновків щодо досягнення цілей, створення нових цілісних знань, безперервного саморозвитку та самовдосконалення*
- ФК08 Здатність приймати науково-обґрунтовані рішення, щодо розроблення нових методів та моделей, у процесі дослідження об'єктів та систем, робити на основі математичної постановки задачі попередній аналіз очікуваних результатів досліджень на основі загальних властивостей поведінки розв'язків задач більш загальних класів, оцінювати нові прикладні аспекти виконаних досліджень, за потреби, виконувати їх адаптацію для подальшого розвитку і використання для розв'язку інших задач прикладної математики та дотичних сферах*
- ФК09 Здатність використовувати дані експериментів і натурних спостережень на етапах постановки задач, опрацювання проєктних гіпотез моделі і формулювання результатів досліджень.*
- ФК11 Здатність дотримуватись академічної та професійної доброчесності, морально-етичних правил поведінки, етики досліджень в академічному середовищі*

### **Програмні результати навчання**

- ПРН05. Знати та розуміти методологічні основи прикладної математики, методи наукового дослідження в даній галузі відповідно до її об'єкту і предмету, застосовувати міждисциплінарний підхід, використовувати у власних дослідженнях, науковій та науково-педагогічній діяльності
- ПРН07. Вміти оцінювати, класифікувати і обґрунтовувати вибір методів, алгоритмів, методик розв'язання задач дослідження, здійснювати пошук та оброблення даних, застосовувати сучасні інструменти та технології пошуку та аналізу даних, необхідних для виконання дослідження, застосовувати методи математичного моделювання, обчислювальні методи, методи математичної фізики, прикладної статистики, штучний інтелект.
- ПРН08. Формулювати гіпотези, виконувати теоретичний аналіз, експериментально підтверджувати, обґрунтовувати і застосовувати на практиці нові ідеї, інноваційні розробки, методи, технології розв'язку професійних, науково-технічних задач, в тому для національної безпеки та оборони, екологічної безпеки і збалансованого природокористування.

- ПРН09. Знати перспективні напрямки, розуміти математичні концепції, методи прикладної математики, зокрема, математичного моделювання, обчислювальні методи, вміти застосовувати їх у дослідженнях динамічних процесів та складних систем
- ПРН11 Вміти застосовувати знання в галузі прикладної математики для провадження міждисциплінарних досліджень, зокрема розв'язання слабкоформалізованих задач національної безпеки та оборони, екологічної безпеки і збалансованого природокористування
- ПРН12. Знати теорію сингулярних та гіперсингулярних інтегральних рівнянь та знати методи побудови моделей із застосуванням теорії сингулярних рівнянь, виконувати математичну постановку задач та вміти створювати обчислювальні технології та відповідні алгоритми
- ПРН13 Знати та вміти застосовувати математичні моделі, обчислювальні методи, інформаційні технології та штучний інтелект для дослідження динамічних систем, аналізу та прогнозування їх стану
- ПРН14 Знати сучасні напрямки розвитку теорії стійкості та керування, методологію застосування апарату прикладної математики, розроблення відповідних моделей та проєктування алгоритмів та обчислювальних технологій
- ПРН16 Знати сучасні підходи математичного моделювання за емпіричними даними та статистичного оброблення даних, вміти будувати математичні моделі досліджуваних динамічних процесів та систем, розробляти відповідні обчислювальні методи та алгоритми

## **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

*Дисципліна «Перспективні напрямки математичного моделювання складних систем» вивчається у весняному (другому) семестрі першого курсу, тому для успішного засвоєння дисципліни необхідні знання з дисциплін «Теорія ймовірностей», «Програмування» та «Математичної статистики», що вивчаються на бакалавраті та магістратурі за спеціальністю “Прикладна математика”. Для успішного опанування дисципліни «Перспективні напрямки математичного моделювання складних систем» аспірант повинен володіти знаннями з основ постановки задач і методів математичного моделювання, обчислювальних методів та методик проведення чисельних експериментів і оброблення даних. Здобувач має вміти розробляти комп'ютерні моделі, реалізовувати їх у спеціалізованих програмних середовищах, створювати власні програмні рішення з використанням сучасних мов програмування, а також розробляти, аналізувати й застосовувати знання з різних предметних галузей. На результатах навчання з дисципліни «Перспективні напрямки математичного моделювання складних систем» базуються такі освітні компоненти, як написання дисертації, та вивчення дисциплін вибіркового блоку за спеціальністю 113 “Прикладна математика”.*

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

**Тема 1.** Теоретичні основи складних систем.

**Тема 2.** Нелінійна динаміка та теорія хаосу.

**Тема 3.** Стохастичні моделі складних систем.

**Тема 4.** Теорія складних мереж і графові моделі.

**Тема 5.** Агентно-орієнтоване моделювання.

**Тема 6.** Байєсівські мережі та динамічні графові моделі.

**Тема 7.** Гібридні моделі: поєднання математичних методів і штучного інтелекту.

**Тема 8.** Мульти-масштабне та ієрархічне моделювання.

**Тема 9.** Ідентифікація, верифікація та чутливість моделей.

**Тема 10.** Сценарне моделювання та прогнозування розвитку складних систем.

**Тема 11.** Методи зменшення розмірності та маніфолдне навчання.

**Тема 12.** Інверсні задачі та задачі реконструкції динаміки.

**Тема 13.** Обчислювальні методи керування складними динамічними системами.

**Тема 14.** Обчислювальні експерименти та високопродуктивні обчислення для моделювання динаміки.

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

##### Базова література

1. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., et al. Machine learning in computational science. *Nature Reviews Physics*. 2021. Vol. 3. P. 422–440. DOI: 10.1038/s42254-021-00314-5. URL: <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>

2. Lu, Y., Aleta, A., Du, C., Shi, L., & Moreno, Y. LLMs and generative agent-based models for complex systems research // *Physics of Life Reviews*, 51, 2024. – p. 283–293. – DOI: 10.1016/j.plrev.2024.08.005. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.08.005>

3. Guo, J., et al. Advances in physics-informed neural networks for solving complex PDEs // *Journal of Computational Physics*, 2025. – 475 p. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197625020524>

4. Shi, Y., et al. A survey on machine learning approaches for uncertainty quantification in complex systems // *Springer Nature Computational Science*, 10, 2025. – p. 203–250. – DOI: 10.1007/s44379-024-00011-x. – URL: <https://doi.org/10.1007/s44379-024-00011-x>

5. Cheng, C., et al. Hybrid SEIRV-DNNs approach for dynamic parameter inference in epidemiological models // *Scientific Reports*, 15, 2025. – <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12857096/>

6. Liu, Z., Kambali, P. N., & Nataraj, C. Hybrid adaptive modeling using nonlinear dynamics-based features // arXiv:2501.11835 [cs, stat]. 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2501.11835>

7. Trofymchuk O. M., Kaliukh Iu. I., Berchun Ya. O., Marienkov M. G., Khymentko B. O., Tytarenko V. A., Vapnichna V. V. Hybrid Numerical Method for the Evaluation of the Seismic Protection of Buildings Based on Digital Twins // *Journal of Mathematical Sciences (United States)*. – 2025. – Volume 291. – p. 883–899. – DOI: 10.1007/s10958-025-07858-2. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-025-07858-2>

8. Trofymchuk O., Vishnyakov V., Sheviakina N., Klymenko V., Zahorodnia S. Geoinformation terrain analysis for optimizing military equipment routes / *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEMConference Paper*. – 2024. – ISSN: 1314-2704. – DOI: 10.5593/sgem2024v/3.2/s12.281 – [https://epslibrary.at/sgem\\_jresearch\\_publication\\_view.php?page=view&editid1=10073](https://epslibrary.at/sgem_jresearch_publication_view.php?page=view&editid1=10073)

9. Trofymchuk O., Anpilova Y., Hordiienko O., Karpenko O. Method for Detecting Natural and Anthropogenic Changes That Filled with Water in Landscapes Using Radar Satellite Imagery // *Book Chapter in Systems, Decision and Control in Energy*. – 2023. – p. 799-813. – DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7\_46

10. Tulyakova N., Trofymchuk O. Real-time filtering adaptive algorithms for non-stationary noise in electrocardiograms // *Biomedical Signal Processing and Control* Open source preview. - 2022. – p. 217-238. – <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103308> – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1746809421009058>

11. Trofymchuk O., Bidiuk P., Terentiev O., Klymenko V. The methodology for adaptive modeling and forecasting nonlinear and nonstationary processes // *Міжнародний науково-технічний*

- журнал Проблеми керування та інформатики. – 2024, № 1. – 63-79 с. – ISSN 2786-6491 – <https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/216/302>
12. Kuznietsova N.V., Trofymchuk O.M., Bidyuk P.I., Terentiev O.M., Levenchuk L.B. Bayesian modelling of risks of various origin // KPI Science News, no. 4, pp. 7–18, 2021. – doi: 10.20535/kpissn.2021.4.251684. – <http://scinews.kpi.ua/article/view/251684>
13. Трофимчук О.М., Бідюк П.І., Терент'єв О.М., Просянкіна-Жарова Т.І. Математичне моделювання, інтелектуальний аналіз даних та штучний інтелект для підтримки прийняття рішень з повоєнного відновлення // Екологічна безпека та природокористування. – 2025. – вип. 3 (55). – с. 33-49. – ISSN: 2411-4049. – <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.33-49>
14. Myrontsov M., Karpenko O., Karmazenko V., Karmazenko S., Dovgyi S. Experimental works on studying the dynamics of the flushed area of productive reservoirs in oil and gas wells / 15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment Monitoring. – 2021. – DOI: 10.3997/2214-4609.20215K2108. – <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.20215K2108>
15. Dovgyi S., Zoziuk M., Koroliouk D. Adaptive Deep Learning System for Investigating General Data // Cybernetics and Systems Analysis. – 2023. – 59(5). – p. 704–712. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s10559-023-00606-x>
16. Dovgyi S., Kopyika O., Kozlov O. Architectures for the Information Systems, Network Resources, and Network Services / Ceur Workshop Proceedings. – 2021. – p. 293–301. – <https://ceur-ws.org/Vol-3187/short9.pdf>
17. Довгий С. О., Остапенко А.О., Буланчук Г.Г. Моделювання в'язких течій методом ґраткових рівнянь Больцмана на графічних процесорах з використанням WebGL API // Журнал обчислювальної та прикладної математики. - 2021. - № 1. - С. 123-130. - [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jopm\\_2021\\_1\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jopm_2021_1_18)
18. Васін П.О., Довгий С.О., Лебідь О.Г., Черній Д.І. Моделювання обтікання системи керованих крил (профілів) у потоці ідеальної нестисливої рідини // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2025. – 2 (9). – с. 10-19. – <http://mmtt.khpi.edu.ua/article/view/341038/329077>
19. Довгий С.О., Буланчук Г.Г., Буланчук О.М. GPU-реалізація розрахунку правої частини слар у методі дискретних вихрових рамок для задач обтікання тонких пластин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2025. – 1 (8). – с. 67-74. – <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/4422a9b8-5ff8-41a3-85c6-7fe37e4de969>
20. Довгий С.О., Копійка О.В., Козлов О.С., Литвиненко А.О. Інформаційні технології ІТ-сервісів архітектури додатків // Екологічна безпека та природокористування. – 2023. – 3 (47). – ISSN: 2411-4049. – [https://www.researchgate.net/publication/376372858\\_Information\\_technologies\\_of\\_application\\_architectures\\_IT\\_services](https://www.researchgate.net/publication/376372858_Information_technologies_of_application_architectures_IT_services)
21. Довгий С.О., Буланчук Г.Г., Буланчук О.М., Листопадова В.В. Точність розрахунків поля швидкостей від системи вихрових відрізків при використанні графічних процесорів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2023. – Випуск 1. – с. 103-109.
22. Довгий С.О., Копійка О.В. Зміна бізнес-моделі управління ІТ на підприємстві природокористування у зв'язку з розвитком сервісно-орієнтованих інформаційних технологій // Екологічна безпека та природокористування. – 2021. – № 1 (37). – ISSN: 2411-4049. – <https://es-journal.in.ua/article/view/228374>

### *Додаткова література*

1. Knights V., Petrovskaya O., Gadjos J. Nonlinear dynamics and machine learning for robotic control in IoT framework // Future Internet. – 2024. – Vol. 16(12), Art. 435. – <https://www.mdpi.com/1999-5903/16/12/435>
2. Дриньов Д. М., Мосьондз М. А., Авраменко Д. О. Моделювання динамічних процесів в задачах штучного інтелекту // Управління змінами та інновації. – 2024. – № 9. – 25-25 с. – DOI: 10.32782/СМІ/2024-9-5. – <https://cmi.politehnica.zp.ua/index.php/journal/article/view/120>

### Нормативно-правова література:

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції Державної цільової науково-технічної програми з використання технологій штучного інтелекту в пріоритетних галузях економіки на період до 2026 року» від 13 квітня 2024 р. № 320-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/320-2024-%D1%80> (дата звернення: 06.06.2025).

2. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act) // Official Journal of the European Union. – L 1689, 12.7.2024. – URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj> (дата звернення: 06.06.2025).

### Інформаційні ресурси

1. Світовий центр даних КПП - <http://wdc.kpi.ua/uk> (дата звернення: 06.06.2025).

2. Звіти компанії Gartner – <https://www.gartner.com/en/insights> (дата звернення: 11.02.2026).

3. Аналітичний онлайн-ресурс KDnuggets про Data Science, Machine Learning, AI та аналітики великих даних – <https://www.kdnuggets.com/> (дата звернення: 06.06.2025).

### Навчальний контент

#### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

*Для лекційних занять використовуються пояснювально-ілюстративний метод та метод проблемного виконання, для проведення практичних занять використовується дослідницький метод навчання: викладач ставить перед аспірантами проблему, і ті вирішують її самостійно або під керівництвом викладача.*

*За дистанційної форми навчання заняття проводять за допомогою платформи для проведення онлайн-зустрічей Zoom*

Назви тем	Кількість навчальних годин				Форми контролю
	Усього годин (кредитів)	Лекції	Комп'ютерний практикум	Самостійна робота студентів	
	<i>90 год</i>	<i>20 год</i>	<i>10 год</i>	<i>60 год</i>	
Тема 1. Теоретичні основи складних систем.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 2. Нелінійна динаміка та теорія хаосу.	10	2	2	6	Участь у дискусії, тестування
Тема 3. Стохастичні моделі складних систем.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 4. Теорія складних мереж і графові моделі.	10	2	2	6	Участь у дискусії, тестування
Тема 5. Агентно-орієнтоване моделювання.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 6. Байєсівські мережі та динамічні графові моделі.	10	2	2	6	Участь у дискусії, тестування

Тема 7. Гібридні моделі: поєднання математичних методів і штучного інтелекту.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 8. Мульти-масштабне та ієрархічне моделювання.	10	2	2	6	Участь у дискусії, тестування
Тема 9. Ідентифікація, верифікація та чутливість моделей.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 10. Сценарне моделювання та прогнозування розвитку складних систем.	10	2	2	6	Участь у дискусії, тестування
Тема 11. Методи зменшення розмірності та маніфолдне навчання.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 12. Інверсні задачі та задачі реконструкції динаміки.	8	2		6	Участь у дискусії, тестування
Тема 13. Обчислювальні методи керування складними динамічними системами.	10	2	2	6	Участь у дискусії, тестування
Тема 14. Обчислювальні експерименти та високопродуктивні обчислення для моделювання динаміки.	4	2		2	Участь у дискусії, тестування
<b>Загалом</b>	<b>120</b>	<b>28</b>	<b>12</b>	<b>80</b>	

## 6. Самостійна робота студента/аспіранта

Розподіл годин самостійної роботи для аспірантів:

1. Підготовка до заліку – 2 год.
  2. Опрацювання питань, які не розглядаються на аудиторних заняттях – 78 год., з них на виконання індивідуальних дослідницьких завдань – 12 год.
- Усього 80 год.

Передбачено три індивідуально-дослідницькі завдання у межах самостійної роботи, що спрямовані на формування і розвиток практичних умінь підготовки публікацій, доповідей та проектів з актуальних проблем

### **Індивідуально-дослідницьке завдання 1.**

Розробка та дослідження нелінійної або стохастичної моделі складної системи

Мета: побудувати математичну модель складної системи з урахуванням нелінійності та/або стохастичних факторів і провести її повний аналітико-чисельний аналіз.

Зміст роботи:

1. Формалізація прикладної задачі (економічної, екологічної, соціальної, технічної).
2. Побудова системи рівнянь (ОДУ, SDE або різницевої моделі).
3. Аналіз стаціонарних станів і стійкості.
4. Дослідження біфуркацій або стохастичних ефектів.
5. Проведення аналізу чутливості.
6. Інтерпретація результатів у прикладному контексті.

Очікуваний результат:

1. Модель з обґрунтованою структурою.
2. Кількісні оцінки режимів функціонування.
3. Висновки щодо критичних параметрів системи.
4. Підготовлений науковий звіт (формат статті).

### **Індивідуально-дослідницьке завдання 2.**

Побудова ймовірнісної або мережевої моделі складної системи з реальними даними

Мета: розробити графову або байєсівську модель складної системи та виконати її ідентифікацію на основі емпіричних даних.

Зміст роботи:

1. Визначення структури системи (DAG або мережевої топології).
2. Побудова моделі (Bayesian Network / Dynamic Bayesian Network / Complex Network).
3. Навчання параметрів (MLE, EM або Bayesian inference).
4. Проведення прогнозування та сценарного аналізу.
5. Оцінка якості моделі (log-likelihood, AIC/BIC, ROC-криві).
6. Аналіз впливу вузлів (centrality або causal impact).

Очікуваний результат:

1. Калібрована модель із кількісною оцінкою точності.
2. Прогнозні сценарії розвитку системи.
3. Обґрунтування практичної значущості результатів.
4. Обсяг звіту: 15–25 сторінок.
5. Наявність аналітичної, чисельної та інтерпретаційної частини.
6. Презентація результатів із науковою дискусією.
7. Бажано – підготовка матеріалів до публікації.

### **Індивідуально-дослідницьке завдання 3.**

Гібридне моделювання складної системи.

Мета: інтегрувати математичну модель з методами машинного навчання для підвищення точності або адаптивності прогнозування.

Зміст роботи:

1. Побудова базової математичної моделі.
2. Формування та попередня обробка набору даних.
3. Навчання ML-компоненти (нейронна мережа, градієнтний бустинг або інша модель).
4. Інтеграція ML у структуру математичної моделі (PINN або surrogate-модель).
5. Порівняльний аналіз pure-model vs hybrid-model.
6. Оцінка узагальнювальної здатності (cross-validation).

Очікуваний результат:

1. Робоча гібридна модель.
2. Порівняти отримані моделі за метриками - RMSE, MAE,  $R^2$ .
3. Висновки щодо переваг та обмежень інтеграції ШІ.
4. Обсяг звіту: 15–25 сторінок.
5. Наявність аналітичної, чисельної та інтерпретаційної частини.
6. Презентація результатів із науковою дискусією.
7. Бажано – підготовка матеріалів до публікації.

Результати опанування відповідного матеріалу перевіряються під час усного опитування і підсумкового (залік) контролю знань.

Самостійна робота аспірантів передбачає підготовку та поглиблене вивчення тем навчальної дисципліни за напрямками:

1. Стохастичні моделі складних систем..
2. Теорія складних мереж і графові моделі.
3. Байєсівські мережі та динамічні графові моделі
4. Мульти-масштабне та ієрархічне моделювання.
5. Сценарне моделювання та прогнозування розвитку складних систем.

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Вимоги, яких має дотримуватися студент в рамках даної дисципліни:

- правила відвідування занять: відвідування лекцій та практичних занять, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, студентам рекомендується відвідувати заняття, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для виконання семестрового індивідуального завдання та проводяться контрольні заходи (тести) з поточної оцінки самостійної роботи студентів з засвоєння поточного матеріалу. Останні є складовою частиною поточного рейтингу і проводяться тільки у день проведення відповідних лекцій та практичних занять. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за своєчасність виконання студентами практичних та контрольних робіт, а також виконання завдань, які здатні розвинути практичні уміння та навички;
- правила поведінки на заняттях: студент повинен брати участь у розв'язку задач, готувати короткі доповіді;
- захист комп'ютерних практикумів – захист відбувається у визначені терміни під час аудиторних занять;
- політика щодо академічної доброчесності – політика та принципи академічної доброчесності визначені у Етичному кодексі вченого Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України.

## 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Семестровий контроль - залік. Рейтингова система оцінювання результатів навчання передбачає оцінювання заходів поточного контролю з дисципліни впродовж семестру. Рейтингова оцінка здобувача складається з балів, отриманих здобувачем за результатами заходів поточного контролю. Рейтингова оцінка доводиться до здобувачів на передостанньому занятті з дисципліни в семестрі. Здобувачі, які виконали всі умови допуску до заліку та мають рейтингову оцінку 60 і більше балів, отримують відповідну до набраного рейтингу оцінку без додаткових випробувань

Зі здобувачами, які виконали всі умови допуску до заліку та мають рейтингову оцінку менше 60 балів, а також з тими здобувачами, хто бажає підвищити свою рейтингову оцінку, на останньому за розкладом занятті з дисципліни в семестрі викладач проводить семестровий контроль у вигляді залікової контрольної роботи.

Для посилення зацікавленості здобувачів у якісному виконанні індивідуальних семестрових завдань, передбачених індивідуальним навчальним планом здобувача, рейтингову оцінку, у разі виконання залікової контрольної роботи, можна визначати як суму балів за залікову контрольну роботу та балів за індивідуальне семестрове завдання. У цьому випадку розмір шкали оцінювання залікової контрольної роботи зменшується на максимальне значення балів, передбачених за виконання відповідного індивідуального семестрового завдання.

Після виконання залікової контрольної роботи, якщо оцінка за залікову контрольну роботу більша ніж за рейтингом, здобувач отримує оцінку за результатами залікової контрольної роботи. Якщо оцінка за залікову контрольну роботу менша ніж за рейтингом, то здобувач отримує більшу з оцінок, що отримані за результатами залікової контрольної роботи або за рейтингом.

До відомості семестрового контролю викладач заносить рейтингові бали, отримані здобувачем у семестрі або за результатами виконання залікової контрольної роботи, та оцінку відповідно до цих балів

Критерії нарахування балів:

1. Практичні заняття оцінюються виходячи з максимальної кількості балів - 20 бали кожне:

- «відмінно» –95 відсотків максимального балу;
- «добре» –75-95;
- «задовільно» –60-75;
- «достатньо» – 50 відсотків – робота виконана, але не захищена.

Умови допуску до підсумкового контролю:є зарахування усіх практичних робіт Рейтинг студента з дисципліни складається з балів, що він отримує за:

- виконання ПРАКТИЧНИХ (лабораторних) робіт;
- виконання самостійної роботи.

За період вивчення дисципліни студент може набрати 100 балів. Їх розподіл між видами робіт наведено в таблиці 1

Таблиця 1. Розподіл між видами робіт

Бали за виконання	Номер комп'ютерного практикуму або індивідуально дослідницького завдання						Разом
	1	2	3	4	5	6	
Комп'ютерний практикум	10	10	10	10	10	10	100
Індивідуально дослідницьке завдання	20	10	10				

2. Залікова контрольна робота оцінюється за такими критеріями:

- «відмінно» – повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації), надані відповідні обґрунтування та особистий погляд;
- «добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації), що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», або незначні неточності);
- «задовільно» – неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки);
- «незадовільно» – незадовільна відповідь–0 балів.

*Залікова контрольна робота передбачається у вигляді тесту, критерії оцінювання тесту:*

<i>Кількість правильних відповідей</i>	<i>Відсоток правильних відповідей</i>	<i>Оцінка за національною шкалою</i>	<i>Оцінка за шкалою ECTS</i>
<i>48-50</i>	<i>95-100</i>	<i>Відмінно</i>	<i>A</i>
<i>41-47</i>	<i>82-94</i>	<i>Дуже добре</i>	<i>B</i>
<i>37-40</i>	<i>75-81</i>	<i>Добре</i>	<i>C</i>
<i>34-36</i>	<i>69-74</i>	<i>Задовільно</i>	<i>D</i>
<i>30-33</i>	<i>60-68</i>	<i>Достатньо</i>	<i>E</i>
<i>5-29</i>	<i>10-13</i>	<i>Не задовільно</i>	<i>FX</i>

Відповідність рейтингових балів оцінкам за шкалою Інституту та шкалою ECTS

<i>Рейтингова оцінка</i>	<i>Оцінка за національною шкалою</i>	<i>Оцінка за шкалою ECTS</i>
<i>90-100</i>	<i>Відмінно</i>	<i>A</i>
<i>82-89</i>	<i>Дуже добре</i>	<i>B</i>
<i>75-81</i>	<i>Добре</i>	<i>C</i>
<i>69-74</i>	<i>Задовільно</i>	<i>D</i>
<i>60-68</i>	<i>Достатньо</i>	<i>E</i>
<i>45-59</i>	<i>Не задовільно</i>	<i>FX</i>
<i>Невиконання умов допуску до семестрового контролю</i>	<i>Не допущено</i>	

### **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

- *перелік питань, які виносяться на семестровий контроль у додатку*
- *є можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів Coursera, EdX за відповідною тематикою – зараховується додатково до 10 балів до загального рейтингу студента, якщо студент набрав не менше 75 балів за період вивчення курсу та отримав відповідний сертифікат.*

**Ухвалено:**

**Вченою радою Інституту телекомунікацій**

**і глобального інформаційного простору**

**НАН України Протокол №11 від 28.08.2025**

**Введено в дію:**

**Наказом директора**

**Наказ від 29.08.2025 №47-с**

## Теми і зміст лекцій

### Тема 1. Теоретичні основи складних систем

*Поняття складності. Властивості складних систем: нелінійність, відкритість, багаторівневість, емерджентність. Типи складних систем. Міждисциплінарні підходи до їх дослідження.*

### Тема 2. Нелінійна динаміка та теорія хаосу

*Нелінійні динамічні системи. Аттрактори, біфуркації, хаотична поведінка. Фрактальні структури. Аналіз стійкості та структурна стабільність моделей.*

### Тема 3. Стохастичні моделі складних систем

*Стохастичні диференціальні рівняння. Марковські процеси. Монте-Карло методи. Моделювання невизначеності та шумів у складних системах.*

### Тема 4. Теорія складних мереж і графові моделі

*Мережеві структури: scale-free, small-world мережі. Центральність, кластеризація, перколяція. Динаміка процесів на мережах. Соціальні, економічні та технічні мережі.*

### Тема 5. Агентно-орієнтоване моделювання

*Принципи побудови multi-agent систем. Локальні правила та глобальна поведінка. Емерджентні ефекти. Порівняння з системною динамікою.*

### Тема 6. Байєсівські мережі та динамічні графові моделі

*Ймовірнісне моделювання причинно-наслідкових зв'язків. Dynamic Bayesian Networks. Навчання параметрів і структури з даних. Прогнозування та сценарний аналіз.*

### Тема 7. Гібридні моделі: поєднання математичних методів і штучного інтелекту

*Model-driven vs data-driven підходи. Hybrid modeling. Інтеграція машинного навчання в структуру математичних моделей. Physics-informed neural networks.*

### Тема 8. Мульти-масштабне та ієрархічне моделювання

*Моделі різних масштабів (мікро–мезо–макро). Узгодження рівнів опису. Коеволюційні та адаптивні системи. Методи агрегування та декомпозиції.*

### Тема 9. Ідентифікація, верифікація та чутливість моделей

*Калібрування параметрів. EM-алгоритм. Аналіз чутливості (tornado, variance-based methods). Валідація моделей і оцінка адекватності.*

### Тема 10. Сценарне моделювання та прогнозування розвитку складних систем

*Foresight-підходи. Моделювання ризиків і кризових явищ. Decision intelligence. Практичні кейси (економічні, екологічні, соціальні системи).*

### Тема 11. Методи зменшення розмірності та маніфолдне навчання.

*Розглядаються підходи до виявлення прихованої низьковимірної структури у високовимірних динамічних даних для спрощення аналізу та моделювання.*

### Тема 12. Інверсні задачі та задачі реконструкції динаміки.

*Вивчаються методи відновлення параметрів і структури моделей складних систем за експериментальними або спостережуваними даними.*

### Тема 13. Обчислювальні методи керування складними динамічними системами.

*Досліджуються алгоритми оптимального та адаптивного керування нелінійними і стохастичними динамічними процесами в умовах невизначеності.*

Тема 14. Обчислювальні експерименти та високопродуктивні обчислення для моделювання динаміки.

*Охоплюються підходи до масштабування чисельних моделей на паралельних архітектурах і використання GPU та кластерних обчислень для складних симуляцій.*

## Теми і зміст комп'ютерних практикумів

### Комп'ютерний практикум 1.

Нелінійна динаміка та біфуркаційний аналіз

Зміст заняття: дослідити режими функціонування нелінійної динамічної системи та виявити зони стійкості й хаосу.

Основні завдання практикуму:

1. Обрати нелінійну динамічну систему (Лоренца, Лотки–Вольтерри або власну модель).
2. Виконати аналітичний аналіз стаціонарних точок (знаходження рівноваг).
3. Дослідити локальну стійкість (якобіан, власні значення).
4. Реалізувати чисельне інтегрування (Runge–Kutta 4-го порядку).
5. Побудувати фазові портрети.
6. Провести параметричне варіювання.
7. Побудувати біфуркаційну діаграму.
8. Обчислити максимальний показник Ляпунова.
9. Проаналізувати зони регулярної та хаотичної поведінки.

Очікувані результати:

1. Фазові портрети.
2. Біфуркаційна діаграма.
3. Оцінка показника Ляпунова.
4. Висновки щодо переходу до хаосу.

Літературні джерела:

1. Lu, Y., Aleta, A., Du, C., Shi, L., & Moreno, Y. LLMs and generative agent-based models for complex systems research // *Physics of Life Reviews*, 2024, 51, 283–293. – DOI: 10.1016/j.plrev.2024.08.005. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.08.005>

### Комп'ютерний практикум 2.

Стохастичне моделювання та аналіз невизначеності

Зміст заняття: дослідити вплив шумів і параметричної невизначеності на поведінку складної системи.

Основні завдання практикуму:

1. Сформулювати детерміновану модель.
2. Додати стохастичний компонент (SDE).
3. Реалізувати метод Ейлера–Маруями.
4. Провести 1000+ Монте-Карло симуляцій.
5. Побудувати розподіли результатів.
6. Обчислити довірчі інтервали.
7. Провести Sobol sensitivity analysis.
8. Порівняти deterministic vs stochastic сценарії.

Очікувані результати:

1. Гістограми та щільності розподілів.
2. Sobol-індекс.
3. Оцінка впливу невизначеності.

Літературні джерела:

1. Guo, J., et al. (2025). Advances in physics-informed neural networks for solving complex PDEs // Journal of Computational Physics, 475. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197625020524>

### **Комп'ютерний практикум 3.**

Аналіз складних мереж

Зміст заняття: дослідити структуру реальної або синтетичної складної мережі та змодельовати процес поширення.

Основні завдання практикуму:

1. Згенерувати Erdos–Renyi, Barabasi–Albert, Watts–Strogatz мережі.
2. Побудувати розподіл узгодженності.
3. Обчислити міру центральності.
4. Визначити коефіцієнт кластеризації.
5. Реалізувати SIR модель.
6. Дослідити перколяційний поріг.
7. Порівняти результати для різних топологій.

Очікувані результати:

1. Графіки розподілу ступенів.
2. Метрики центральності.
3. Порівняльний аналіз швидкості поширення.

Літературні джерела:

1. Shi, Y., et al. A survey on machine learning approaches for uncertainty quantification in complex systems // Springer Nature Computational Science, 10, 2025. – p. 203–250. – DOI: 10.1007/s44379-024-00011-x. – URL: <https://doi.org/10.1007/s44379-024-00011-x>

### **Комп'ютерний практикум 4.**

Динамічні мережі Байєса.

Зміст заняття: побудувати й навчити ймовірнісну графову модель складної системи.

Основні завдання практикуму:

1. Визначити структуру причинно-наслідкових зав'язків.
2. Побудувати направлений ациклічний граф.
3. Оцінити параметри (MLE).
4. Реалізувати EM-алгоритм.
5. Провести inference.
6. Побудувати динамічну мережу Байєса.
7. Оцінити точність прогнозу (log-likelihood).

Очікувані результати:

1. Графова структура моделі.
2. Навчені умовних таблиць ймовірностей.
3. Прогностична точність.

Літературні джерела:

1. Cheng, C., et al. Hybrid SEIRV-DNNs approach for dynamic parameter inference in epidemiological models // Scientific Reports, 15, 2025. – <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12857096/>

### **Комп'ютерний практикум 5.**

Гібридне моделювання.

Зміст заняття: продемонструвати поєднання різних підходів

Основні завдання практикуму:

1. Сформулювати базову математичну модель.
2. Зібрати набір даних.
3. Побудувати ML-модель (нейронна модель або регресія).
4. Інтегрувати surrogate або PINN.
5. Провести крос-валідацію.
6. Порівняти моделі за статистиками RMSE, MAE.
7. Інтерпретувати результати.

Очікувані результати:

1. Порівняйте базову та гібридні моделі.
2. Оцінка приросту точності.
3. Аналіз узагальнювальної здатності.

Літературні джерела:

1. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., et al. Machine learning in computational science. Nature Reviews Physics. 2021. Vol. 3. P. 422–440. DOI: 10.1038/s42254-021-00314-5. URL: <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>
2. Lu, Y., Aleta, A., Du, C., Shi, L., & Moreno, Y. LLMs and generative agent-based models for complex systems research // Physics of Life Reviews, 51, 2024. – p. 283–293. – DOI: 10.1016/j.plrev.2024.08.005. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.08.005>
3. Guo, J., et al. Advances in physics-informed neural networks for solving complex PDEs // Journal of Computational Physics, 2025. – 475 p. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197625020524>
4. Shi, Y., et al. A survey on machine learning approaches for uncertainty quantification in complex systems // Springer Nature Computational Science, 10, 2025. – p. 203–250. – DOI: 10.1007/s44379-024-00011-x. – URL: <https://doi.org/10.1007/s44379-024-00011-x>
5. Cheng, C., et al. Hybrid SEIRV-DNNs approach for dynamic parameter inference in epidemiological models // Scientific Reports, 15, 2025. – <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12857096/>
6. Liu, Z., Kambali, P. N., & Nataraj, C. Hybrid adaptive modeling using nonlinear dynamics-based features // arXiv:2501.11835 [cs, stat]. 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2501.11835>

### **Комп'ютерний практикум 6.**

Обчислювальні методи керування складними динамічними системами

Зміст заняття: ознайомлення з сучасними обчислювальними алгоритмами та методами автоматичного синтезу керування для складних динамічних систем із використанням адаптивних, оптимальних та AI-підходів.

Основні завдання практикуму:

1. Реалізувати й протестувати чисельні алгоритми для синтезу керувань на прикладі нелінійних динамічних об'єктів (PID, MPC, адаптивні тощо).

2. Розробити та впровадити модель керування із використанням нейронних мереж для обраної задачі динамічної системи.
3. Дослідити вплив параметрів керування на динаміку системи через модельні симуляції й аналіз стабільності.
4. Порівняти ефективність традиційних і ШІ-орієнтованих методів у чисельних експериментах.
5. Оцінити стійкість і роботу обчислювальної схеми в умовах невизначеності моделізації.

Очікувані результати:

1. Після виконання практикуму аспіранти повинні:
2. знати ключові обчислювальні підходи до керування складними динамічними системами (регулятори, оптимальні, адаптивні методи);
3. вміти реалізувати контролери у популярних середовищах (MATLAB/Python) та аналізувати їх поведінку;
4. порівнювати результати традиційних і ШІ-орієнтованих підходів до керування;
5. здатні аргументовано обрати метод керування залежно від динамічної структури системи;
6. оформити звіт із результатами чисельних експериментів та аналізом чутливості.

Літературні джерела:

1. Rakhmatillaev, J., Bucinskas, V. & Kabulov, N. An integrative review of control strategies in robotics // *Robotic Systems and Applications*. – 2025. – 5(2), p. 50–74. – DOI: 10.21595/rsa.2025.25014. – <https://doi.org/10.21595/rsa.2025.25014>
2. Rojas, L., Yepes, V. & Garcia, J. Complex Dynamics and Intelligent Control: Advances, Challenges, and Applications // *Mathematics*. – 2025. – 13(6). – DOI: 10.3390/math13060961. – <https://doi.org/10.3390/math13060961>
3. Tkáčik, T., Jadlovska, A. Dynamical Neural Models in Experimental Identification and Control // *Applied Science*. – 2025. – 15(17). – DOI: 10.3390/app15179342. – <https://doi.org/10.3390/app15179342>

## Перелік питань до заліку з дисципліни

1. Що таке складна система і чим вона відрізняється від простої?
2. Назвіть основні властивості складних систем.
3. Що таке емерджентність і як її виявити в системі?
4. Які типи складних систем існують (технічні, соціальні, біологічні)?
5. Що таке самоорганізація і як вона проявляється в різних системах?
6. Поясніть принцип нелінійної взаємодії компонентів системи.
7. Що таке багаторівнева ієрархія у складній системі?
8. Наведіть приклади відкритих і закритих систем.
9. Як міждисциплінарний підхід допомагає у дослідженні складних систем?
10. Які основні виклики при формалізації слабоструктурованих задач?
11. Що таке нелінійна динамічна система?
12. В чому полягає різниця між атрактором і дивним атрактором?
13. Що таке біфуркація і які її типи існують?
14. Як обчислюють показники Ляпунова і для чого вони потрібні?
15. Що таке хаотична поведінка системи?
16. Наведіть приклад нелінійної моделі в економіці або екології.
17. Що таке фрактальна структура і як її виявляють у системі?
18. Поясніть концепцію структурної стабільності моделей.
19. Які методи чисельного інтегрування застосовують для нелінійних систем?
20. Як відрізнити детерміновану хаотичну поведінку від стохастичної?
21. Що таке стохастична модель і коли її застосовують?
22. Які основні типи стохастичних процесів існують?
23. Що таке марковський процес і його основні властивості?
24. Як формулюються стохастичні диференціальні рівняння (SDE)?
25. Що таке Монте-Карло симуляція і де її застосовують?
26. Як враховувати шум у математичних моделях?
27. Що таке variance-based sensitivity analysis?
28. Наведіть приклад стохастичної моделі в соціальній системі.
29. Як перевіряють стабільність стохастичної моделі?
30. Що таке довірчий інтервал і як його обчислюють у моделюванні?
31. Що таке scale-free та small-world мережі?
32. Що таке центральність вузла і які метрики використовують?
33. Поясніть поняття кластеризації у мережах.
34. Що таке перколяційний поріг у мережі?
35. Як моделюють динаміку процесів на мережах?
36. Наведіть приклад застосування мережевого моделювання у фінансах.
37. Як вимірюють стійкість мережі до атак чи збоїв?
38. Що таке агенти у мережевих моделях?
39. Які відмінності між детермінованими та стохастичними мережами?
40. Як здійснюють прогнозування на основі мережевих моделей?
41. Що таке агентно-орієнтована модель (ABM)?
42. Які типи агентів існують і які правила їх взаємодії?
43. Що таке емерджентна поведінка і як її аналізувати?
44. Що таке байєсівська мережа і де її застосовують?
45. Що таке Dynamic Bayesian Network (DBN)?
46. Як навчати параметри DBN з даних?
47. Що таке inference у причинно-наслідкових мережах?
48. Як здійснюють сценарний аналіз із використанням DBN?
49. Що таке гібридне моделювання у складних системах?

50. Поясніть різницю між model-driven та data-driven підходами.
51. Що таке physics-informed neural networks (PINN)?
52. Як інтегрувати ML у структуру математичної моделі?
53. Наведіть приклад успішного hybrid modeling у прикладній математиці.
54. Що таке калібрування моделі і які методи застосовують?
55. Як оцінюють точність моделі (validation, cross-validation)?
56. Що таке sensitivity analysis і які методи існують?
57. Що таке foresight-підхід у моделюванні?
58. Як моделювати ризики та кризові явища у складних системах?