

О.Л. Коренівська, к.т.н., доц.
В.Б. Бенедицький, ст. викладач
М.В. Шевченко, магістрант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Автоматизація розрахунку структурної надійності технічних систем

Сучасний розвиток технічних систем вимагає підвищених вимог до їх надійності, особливо у сферах біомедичної інженерії, електроніки, приладобудування та інформаційних технологій. Відмова навіть одного елемента може призвести до збоїв у системах зв'язку, енергетичних мережах, транспорті або медичній техніці. Знання теорії надійності дозволяє інженерам гарантувати стабільність та безпеку роботи обладнання. Вона формує здатність прогнозувати поведінку складних технічних систем під час експлуатації, визначати ймовірність відмов, час напрацювання системи, розробляти заходи для підвищення стабільності роботи обладнання та збільшення довговічності і строку його експлуатації, забезпечує інженерів методологією прогнозування, аналізу та підвищення працездатності складних технічних систем.

Одним із ключових завдань підготовки майбутніх інженерів є опанування методів кількісної оцінки структурної надійності та формування практичних навичок роботи з відповідними інструментами. У статті розглянуто проблему викладання дисципліни «Теорія надійності» у сучасному технічному університеті та запропоновано авторський підхід до її практичної реалізації через використання хмарного середовища програмування Google Colaboratory.

Розроблений програмний продукт дозволяє виконувати аналітичні та імітаційні розрахунки структурної надійності технічних систем, моделювати різні закони розподілу часу до відмови, аналізувати вплив резервування та будувати статистичні моделі для прогнозування ресурсу елементів. Особлива увага приділена інтеграції результатів у навчальний процес, що забезпечує підвищення рівня засвоєння матеріалу студентами та формування компетентностей у сфері інженерної аналітики. Важливою перевагою розробки є відсутність потреби у дорогому ліцензійному програмному забезпеченні, що робить її універсальною для використання як у навчальних закладах, так і в наукових дослідженнях.

Ключові слова: надійність технічних систем; показники надійності; розрахунок структурної надійності; хмарні середовища розрахунку надійності; властивості надійності.

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку науки й техніки дисципліна «Теорія надійності» займає провідне місце у підготовці інженерних кадрів для різних галузей – від електроніки та інформаційних технологій до приладобудування і біомедичної інженерії. Надійність є базовим показником якості будь-якої технічної системи, адже саме вона визначає працездатність, безпеку та ефективність функціонування приладів у реальних умовах експлуатації. Для інженера володіння методами аналізу та прогнозування надійності є не менш важливим, ніж знання принципів конструювання чи технологій виробництва.

Виклики сучасності вимагають нових підходів до вивчення й застосування теорії надійності. По-перше, тенденція до мініатюризації приладів призводить до підвищення щільності розміщення елементів, що збільшує ризик локальних відмов і ускладнює теплові та електромагнітні режими. По-друге, зростає кількість складних багатокомпонентних систем, які об'єднують апаратні модулі, програмне забезпечення, сенсорні вузли та мережеві протоколи. Надійність таких систем уже не може розглядатися ізольовано, а потребує системного підходу, що враховує взаємодію компонентів.

Особливої уваги потребує аналіз надійності у сферах, де відмова може мати критичні наслідки. У медичній техніці йдеться про життя та здоров'я пацієнтів, тому прилади мають відповідати найвищим стандартам безвідмовності та функціональної безпеки. У військовій техніці та подвійних технологіях надійність стає фактором національної безпеки, адже відмова окремого вузла може призвести до виходу з ладу всієї системи.

Таким чином, формування у студентів інженерних спеціальностей глибоких знань із теорії надійності та навичок застосування сучасних методів розрахунку і моделювання є актуальним завданням, що визначає якість їхньої майбутньої професійної діяльності.

Разом з тим практика викладання дисципліни засвідчує низку труднощів. Студенти стикаються з високим рівнем абстракції, складним математичним апаратом та відсутністю достатньої кількості практичних прикладів. Викладачі своєю чергою змушені шукати інноваційні підходи для підвищення мотивації та залученості студентів.

Метою статті є аналіз основних проблем викладання теорії надійності технічних систем та визначення шляхів їх вирішення з урахуванням сучасних підходів. Розгляд можливості автоматизації розрахунків структурної надійності складних технічних систем, можливість застосування результатів для підготовки студентів технічних спеціальностей.

Огляд літератури та стан питання. Теорія надійності як науковий напрям почала активно формуватися у середині ХХ століття у зв'язку з розвитком авіаційної, космічної та військової техніки. Класичні роботи Р.Барлоу, Ю.К. Беляєва, Д.В. Гаскарова, Б.В. Гніденка, Т.Д. Голінкевича, В.І. Городецького, А.К. Дмитрієва, Г.В. Дружиніна, К.Капура, Б.А. Козлова, В.Д. Кудрицького, Г.Крамера, Л.Ламберсона, Б.Р. Левіна, В.М. Маркова, А.В. Мозгалевського, В.С. Пугачова, В.А. Острейковського, Ф.Прошана, А.А. Свешнікова, А.Д. Соловйова, І.А. Ушакова, А.В. Федухіна, Р.М. Юсупова та інших дали можливість сформулювати основні підходи до розрахунку надійності, прогнозування показників довговічності та запропонувати аналітичні залежності, які пов'язують надійність технічних систем з впливом експлуатаційних навантажень та параметрами фізико-хімічних процесів у конструкційних матеріалах. Саме вони заклали фундаментальні підходи до визначення інтенсивності відмов, функцій розподілу часу безвідмовної роботи та статистичного аналізу відмов. Ці методи і сьогодні складають основу викладання дисципліни у технічних університетах.

У подальшому теорія надійності набула міждисциплінарного характеру. З одного боку, розвивалися математичні методи – Марковські процеси, стохастичні моделі деградації, методи Монте-Карло, які дозволили моделювати складні багатокomпонентні системи. З іншого боку, з'явилися прикладні підходи до оцінки надійності конкретних приладів – від мікроелектронних вузлів до енергетичних та біомедичних систем. Основні поняття теорії надійності, методи, моделі та показники розрахункової надійності регламентуються нормативним документами Державного стандарту України [1–3], описані вченими України в монографіях, навчальних посібниках [4–7], низці науково-практичних публікацій [9–23], де, зокрема, розглянуті питання системотехнічного проектування, їх математичні моделі, методи аналізу і прогнозування надійності та оцінка кількісних показників надійності.

Сьогодні питаннями надійності технічних систем в Україні займаються Ю.Ф. Зінковський, Б.М. Уваров, Н.Р. Веселовська, О.І. Худолій, Ю.Я. Бобало, Б.Ю. Волочій, О.Ю. Лозинський, Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський, Д.В. Федасюк, С.В. Щербаковських, В.С. Яковина, В.І. Василишин, С.В. Женжера, О.В. Чечуй, А.П. Глушко, Н.О. Князева, О.Л. Ненов, І.В. Колумба, С.Є. Гнатюк, Л.М. Сакович, В.С. Кузавков, С.С. Михайлюк, С.В. Погребняк, І.А. Шапошник та інші. В роботах авторів наводиться прикладне застосування методів розрахунку надійності в різних технічних сферах – радіоелектронні апарати, телекомунікаційна та радіотехніка, медична техніка, системи зв'язку тощо.

У [8] подається широка бібліографія з надійності і довговічності, пов'язана з різноманітними аспектами теорії і практики надійності приладів та різного типу технічних систем і устаткування.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється поєднанню класичних моделей з інноваційними технологіями. Зокрема, у працях останніх років розглядається використання машинного навчання для прогнозування надійності приладів, а також цифрових двійників як нового підходу до моделювання надійності [21–23], визначаються питання аналізу надійності вбудованих та IoT систем [22], розглядаються питання автоматизації розрахунків та розробки програмного забезпечення для розрахунку та моделювання надійності [15–17, 23]. Такі рішення відкривають нові можливості для навчання студентів, адже дозволяють поєднувати фундаментальну теорію з практикою аналізу сучасних складних систем.

Разом із тим огляд літератури засвідчує, що, попри наявність значної кількості досліджень і програмних інструментів, проблема ефективної методики викладання теорії надійності залишається актуальною. Потребує вирішення питання доступності програмного забезпечення, оновлення навчальних кейсів та інтеграції дисципліни з іншими галузями інженерії, особливо з біомедичною та інформаційною сферою. Також питання автоматизації та спрощення розрахунків так і не вирішено.

Викладення основного матеріалу. Надійність – це комплексна характеристика, що відображає здатність системи виконувати задані функції у визначених умовах протягом встановленого часу. Знання теоретичних основ дозволяє фахівцям не лише оцінювати працездатність апаратури, але й прогнозувати можливі відмови. При створенні радіоелектронних пристроїв і мереж важливо передбачити всі можливі фактори впливу: температурні коливання, електромагнітні завади, зношування компонентів. Теорія надійності дає інженерам математичний апарат для розрахунку ймовірності відмов, визначення середнього напрацювання на відмову, розробки методів резервування. Це дозволяє вже на етапі проектування зробити систему більш стійкою. Теорія надійності допомагає організувати технічне обслуговування, планувати ремонти, визначати оптимальні інтервали діагностики та заміни обладнання. Завдяки цьому зменшуються простой, знижуються фінансові втрати та підвищується довіра користувачів.

Особливе значення надійність має для систем зв'язку оборонного та медичного призначення, авіації, енергетики, транспорту. Будь-який збій у таких сферах може поставити під загрозу життя людей чи національну безпеку. Інженери, які володіють знаннями з теорії надійності, здатні забезпечити стабільність роботи навіть в умовах надзвичайних ситуацій.

Розрахунок структурної надійності будь-якої технічної системи полягає у визначенні низки показників надійності, які найширше описують її функціональні характеристики. Найчастіше визначенню підлягають два показники безвідмовності, які зазначають навіть у технічній документації на виріб – імовірність безвідмовної роботи та напрацювання на відмову [1–7].

Перед складанням логічних схем вважають, що відмови елементів незалежні, і кожен елемент може перебувати в одному з двох станів: працездатному або непрацездатному [4]. Стан системи (працездатний або непрацездатний) визначається станом елементів та їх поєднанням. Тому розрахунок безвідмовності будь-яких технічних об'єктів можна звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, визначення ймовірності кожного з них і складання ймовірностей працездатних станів системи. Це метод прямого перебору. Він практично універсальний, однак при великій кількості елементів системи n такий шлях стає нереальним через великий обсяг обчислень (наприклад, при $n = 10$ число можливих станів системи становить $N = 2^n = 1024$). Тому на практиці використовують більш ефективні і економічні методи розрахунку, не пов'язані з великим обсягом обчислень. Застосування таких методів пов'язане зі структурою системи та логічними імовірнісними зв'язками між елементами системи.

Вихідними даними для розрахунку надійності є схема електрична принципова, перелік елементів та інформація про інтенсивність відмов основних елементів схеми. Для розрахунку необхідно за електричною принциповою схемою скласти логічну схему для розрахунку надійності. Для цього проводиться оцінка впливу відмови кожного елемента на стан системи. Якщо відмова елемента призводить до відмови всього приладу, то елементи на логічній схемі включають послідовно (рис. 1, а). Якщо відмова елемента не призводить до відмови приладу, то елемент включають паралельно (рис. 1, б). Існують також складні з'єднання, які поєднують послідовне та паралельне з'єднання (рис. 1, в, г). Окрім зазначених способів з'єднання елементів також можна зустріти з'єднання типу мосту (рис. 2, а, б) та систему типу « m із n » (рис. 2, в) [4].

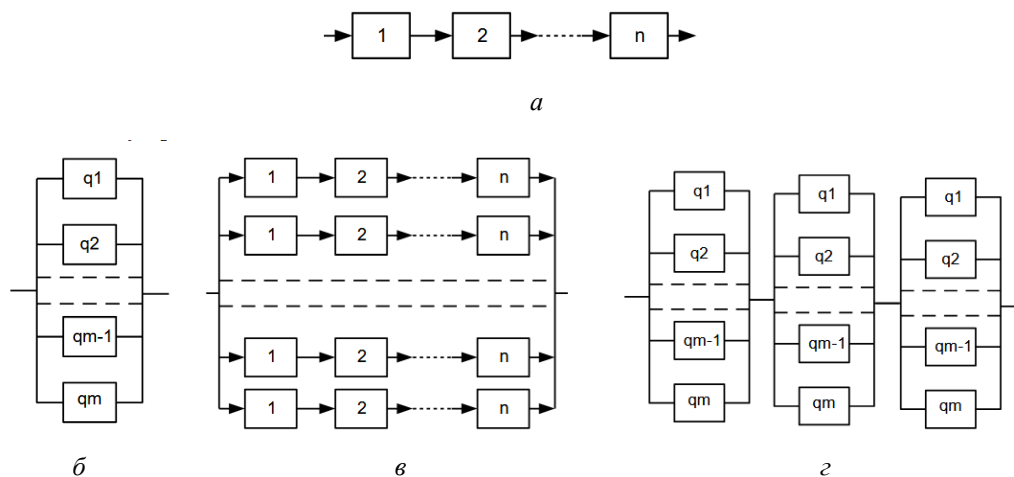


Рис. 1. Основні види з'єднань елементів на логічних схемах надійності [4]: а) послідовне з'єднання; б) паралельне з'єднання; в) послідовно-паралельне з'єднання; г) паралельно-послідовне з'єднання

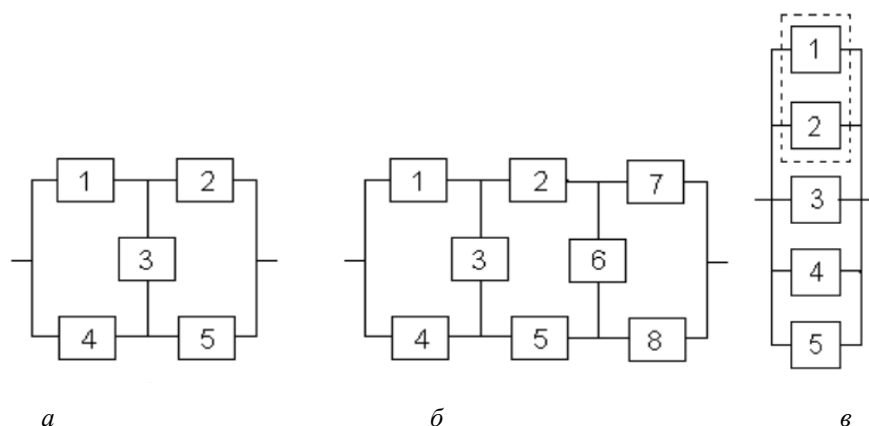


Рис. 2. Специфічні види з'єднань елементів на логічних схемах надійності [4]: а) мостове з'єднання з одним діагональним елементом; б) мостове з'єднання з двома діагональними елементами; в) система типу « m із n »

Під час складання логічних схем надійності варто дотримуватися такого порядку [4]:

1. Складається логічна схема системи, яка формується з блоків;
2. Для кожного блоку складається логічна схема системи, яку становлять вузли;
3. Для кожного вузла складається логічна схема системи, яка утворюється з елементів, які входять до її складу.

Розрахунок ведеться з найнижчого ієрархічного рівня до вищого. Зазвичай для складних технічних систем ручний розрахунок займає багато часу, тому для спрощення та наочності розрахунки автоматизують. Наразі можна виокремити такі популярні шляхи автоматизації розрахунку структурної надійності:

- використання спеціалізованого програмного забезпечення. Програмні пакети ReliaSoft, Isograph, ANSYS Reliability, MATLAB Reliability Toolbox дозволяють автоматизувати побудову блок-схем надійності (Reliability Block Diagrams), дерев відмов (Fault Tree Analysis) та провести моделювання методом Монте-Карло. Але вони дуже дорогі та недостатньо адаптовані до навчальних потреб;

- CAD/CAE-інтеграція з модулем надійності. Інженерні пакети (SolidWorks, CATIA, ANSYS) можуть інтегрувати перевірку надійності на етапі проєктування. Це дозволяє одразу враховувати надійність конструкції в процесі моделювання. Недоліки: висока вартість, складність навчання та роботи в них;

- використання бібліотек і скриптів у середовищах MATLAB, SciPy (Python), OpenReliability підтримують статистичний аналіз відмов, розрахунок показників надійності, є можливість врахувати різні логічні схеми надійності. Перевагою є гнучкість інструментів для навчальних задач, можливість будувати власні алгоритми;

- онлайн-сервіси та хмарні стимулятори. Системи з вбудованими шаблонами (наприклад, Reliability Workbench, RAM Commander) дають можливість студентам швидко будувати схеми без складного програмування.

У таблиці 1 наведено порівняння різних програмних продуктів, які використовують для розрахунку надійності.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика програмних засобів вивчення та аналізу надійності технічних систем

Програмний продукт	Основний функціонал	Переваги	Недоліки	Освітнє застосування
MATLAB / Simulink	Моделювання систем, розрахунок показників надійності, побудова RBD, статистичний аналіз відмов	Потужні аналітичні можливості, велика бібліотека функцій, інтеграція з реальним обладнанням	Висока вартість ліцензії, складність для початківців	Лабораторні роботи з аналізу надійності електронних систем, систем зв'язку, сенсорних мереж, проєктні курси
ReliaSoft (Weibull++, BlockSim)	Аналіз розподілів відмов, побудова дерев несправностей, оцінка ефективності технічного обслуговування	Професійний рівень розрахунків, інтуїтивний інтерфейс, підтримка промислових стандартів	Висока вартість, орієнтованість на промислові задачі, складність адаптації до навчальних курсів	Ознайомлення з індустріальними інструментами, курсові проєкти та магістерські дослідження
ANSYS Reliability Engineering Workbench	Аналіз механічних, електронних та теплових систем, FMEA/Fault Tree Analysis, багатофакторний аналіз	Глибокий аналіз складних систем, точні результати, інтеграція з CAD	Високі вимоги до ресурсів ПК, складне освоєння	Курси з приладобудування, авіаційної та військової техніки, дипломні проєкти
Python (бібліотеки Reliability, SciPy)	Моделювання статистики відмов, побудова розподілів, прогнозування довговічності	Безкоштовність, гнучкість, можливість розробки власних методів	Потреба програмування, відсутність графічного інтерфейсу	Курсові проєкти, дипломи, дослідження у сфері IT та біомедицинської інженерії
LabVIEW	Створення віртуальних лабораторій, інтеграція з сенсорами, збір експериментальних даних	Візуальне програмування, робота з реальними пристроями	Необхідність вивчення специфічної мови, ліцензія	Практичні лабораторні заняття з надійності медичних приладів, сенсорних систем
R	Статистичний аналіз відмов, побудова моделей надійності, візуалізація даних	Відкрите ПЗ, велика кількість пакетів для статистики	Менш зручний для інженерних задач, крута крива навчання	Статистичні дослідження, аналітичні курси, дослідницькі роботи

Як бачимо з таблиці 1, більшість ресурсів мають високу вартість, складність роботи в них, недостатню адаптованість до навчальних потреб. Наразі застосування хмарних сервісів, зокрема Google Colab, відкрили нові можливості для інтерактивного та доступного навчання, ведення розрахунків. У цій роботі розглянемо можливості застосування хмарного середовища Google Colab для розрахунку структурної надійності технічних систем та застосування його в навчальних цілях.

Основні переваги використання Google Colab та подібних платформ:

1. Доступність і відсутність витрат. Colab безкоштовний і працює у браузері, тому студентам не потрібно встановлювати спеціальні пакети чи купувати ліцензії. Викладач може підготувати готові ноутбуки з кодом, і студенти лише відкривають їх через посилання. Дозволяє проводити розрахунки з будь-якого місця, де є підключення до інтернету;

2. Можливість моделювання складних процесів. Використання бібліотек Python (NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib) дозволяє моделювати випадкові процеси, оцінювати інтенсивність відмов, будувати функції надійності. Метод Монте-Карло чи моделювання відмов системи з резервуванням можна реалізувати у кількох рядках коду;

3. Є можливість візуалізації результатів, отримати не просто цифри, а графіки розподілу відмов, діаграми структурної надійності, графові моделі телекомунікаційних мереж тощо. Це робить абстрактні математичні поняття більш зрозумілими;

4. Спільна робота і перевірка. Викладач може у реальному часі бачити, як студенти виконують завдання. Ноутбуки можна коментувати, редагувати спільно, що спрощує перевірку звітів. Студенти можуть працювати в групах над одним проектом;

5. Міждисциплінарність і гнучкість. Colab дозволяє інтегрувати моделі з теорії надійності з елементами телекомунікацій (наприклад, симуляція відмов каналів зв'язку). Легко поєднати з машинним навчанням для прогнозування відмов – це робить курс сучасним і цікавим;

6. Автоматизація звітності. Студенти можуть оформлювати лабораторний звіт прямо у Colab: код + розрахунки + графіки + висновки. Це економить час на підготовку звітів і перевірку.

Авторами розроблено програмний продукт у Google Colaboratory, що дозволяє проводити оцінку структурної надійності електронної апаратури за логічною схемою надійності. На рисунку 3 наведено загальний вигляд вікна програми, де можна бачити основні функціональні можливості цього продукту.

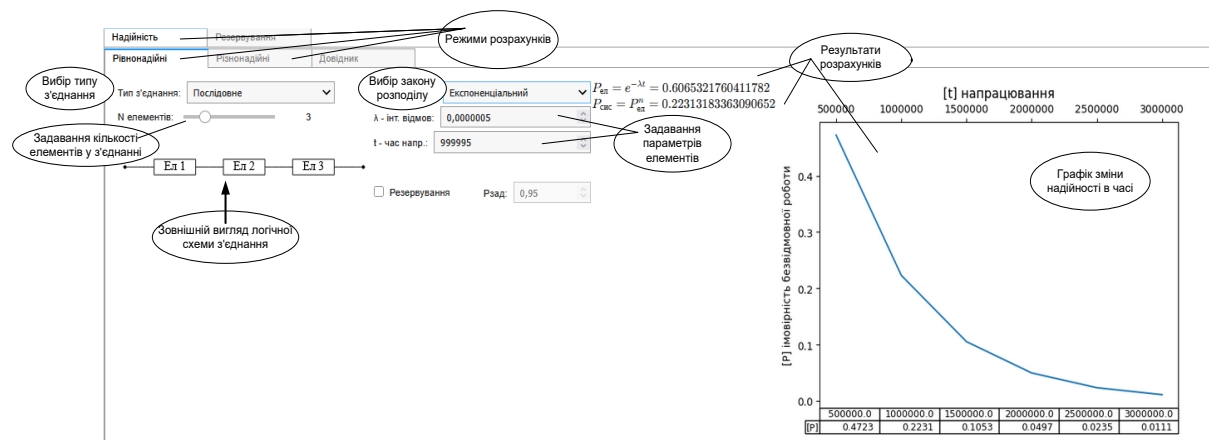


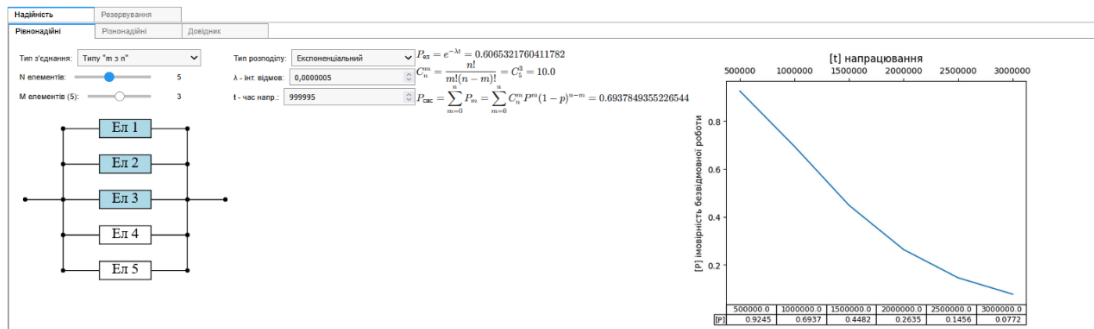
Рис. 3. Вікно представлення результатів розрахунків надійності в Google Colaboratory

У програмі реалізовано можливість вибору:

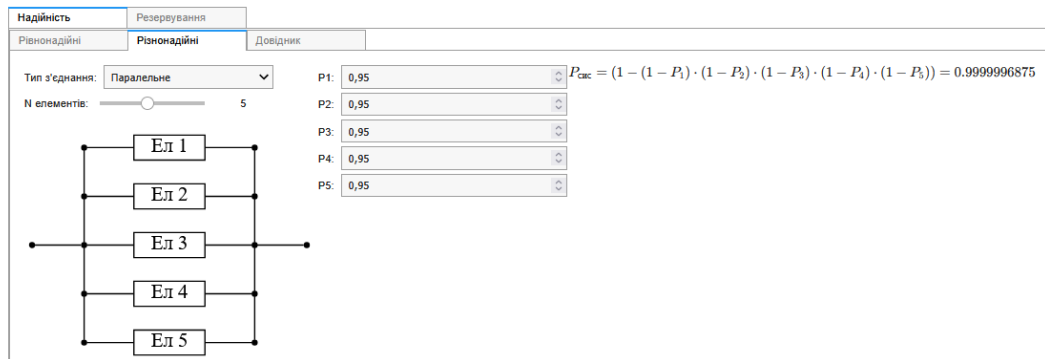
- режиму розрахунків. Проводиться розрахунок надійності для сконфігурованої логічної схеми (можна обрати різні типи логічних з'єднань – послідовне, паралельне, послідовно-паралельне, паралельно-послідовне, мостова схема та система типу «m із n», задати різну кількість елементів у з'єднанні). Забезпечено режим розрахунку надійності при резервуванні;

- розрахунки можна проводити для рівнонадійних та різних за надійністю елементів (рис. 4);
- для рівнонадійних елементів є можливість вибору трьох основних законів розподілу – Вейбула, Релея та експоненційний (показниковий) розподіл. У цьому режимі є можливість задавання вручну значення інтенсивності відмов елементів та часу напрацювання для оцінки надійності. Також у програмі міститься Довідник для визначення функції Лапласа (для розрахунків за розподілом Вейбула) (рис. 5);

- окремо варто розглянути можливість аналізу та розрахунку схем при резервуванні (рис. 6). Програма дозволяє проводити розрахунок кратності резервування (необхідну кількість резервних елементів) для досягнення заданої надійності при заданих значення ймовірності безвідмовної роботи елементів.



a



b

Рис. 4. Порівняння розрахунків у режимах рівнонадійних та різномодальних елементів:
a) рівнонадійні елементи; б) різномодальні елементи

Надійність Резервування
Рівнонадійні Різномодальні Довідник

Таблиця Ф(x) Муавра-Лапласа

1 to 20 of 500 entries

x	fx
0.0	0.0
0.01	0.003989356314631588
0.02	0.007978313716901941
0.03	0.01196647341411261
0.04	0.015953436852830793
0.05	0.019938805838372486
0.06	0.02392218265410684
0.07	0.02790317018052113
0.08	0.03188137201398744
0.09	0.03585639258517215
0.1	0.03982783727702899
0.11	0.04379531254231683
0.12	0.04775842602058389
0.13	0.05171678665456114
0.14	0.0556700480590645
0.15	0.0596176923702425
0.16	0.06355946289143288
0.17	0.0674949316750384
0.18	0.07142371590090069
0.19	0.07534543473479549

Show 20 per page 1 2 10 20 25

Рис. 5. Довідник значень функції Лапласа

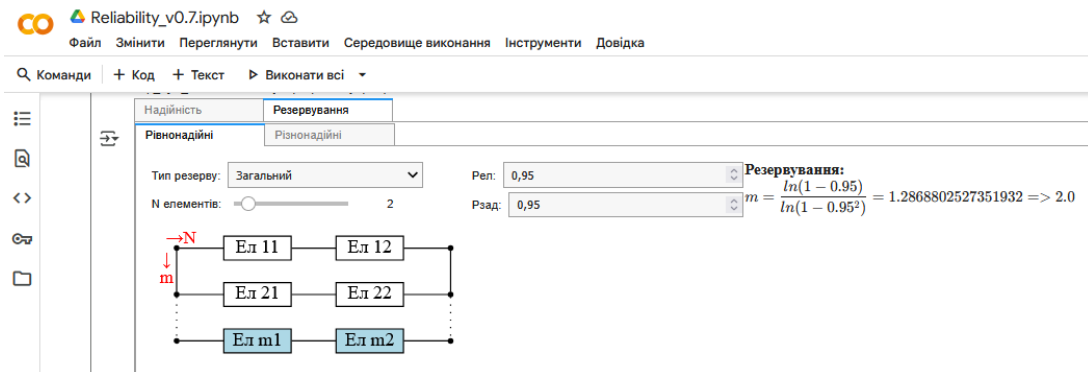


Рис. 6. Приклад розрахунку надійності в режимі Резервування

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, розроблений програмний продукт дозволяє забезпечити розрахунок структурної надійності, зменшивши час розрахунків для розробників та забезпечивши наочність для студентів. Забезпечено можливість аналізу системи для декількох законів розподілу напрацювання на відмову, що описує поведінку об'єкта та його надійність на різних етапах життєвого циклу апаратури. Однією з важливих функціональних можливостей програмного продукту є аналіз варіантів резервування системи з метою підвищення структурної надійності. Забезпечується можливість розрахунку кратності резервування при різних схематичних реалізаціях логічної схеми надійності. Вони забезпечують доступність програмних засобів, спрощують проведення і перевірку практичних робіт, дозволяють виконувати складні симуляції навіть на слабких комп'ютерах. Завдяки цьому студенти отримують не лише теоретичні знання, а й сучасні практичні навички, які можна застосовувати у професійній діяльності. Важливою перевагою розробки є відсутність потреби у дорогому ліцензійному програмному забезпеченні, що робить її універсальною для використання як у навчальних закладах, так і в наукових дослідженнях.

Практична значущість роботи посилюється тим, що дослідження виконано в межах програми проєкту «Widen performance in research and innovation capacity and competence Across EU» / «WIDE AcrossEU» 101 158 561 Horizon Europe program, за якою було закуплено сучасне вимірювальне обладнання. Це дозволяє поєднувати програмне моделювання з експериментальними дослідженнями: визначати час до відмови реальних приладів, здійснювати втомні та кліматичні випробування, проводити моніторинг параметрів роботи сенсорних систем та виконувати валідацію теоретичних моделей на основі отриманих даних. Таким чином, стаття має як освітню, так і прикладну цінність, адже створює основу для впровадження сучасних методів оцінки надійності у підготовку майбутніх інженерів та у практику науково-дослідних робіт.

Список використаної літератури:

1. Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94. – Чинний від 01.01.96 р. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 90 с.
2. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення : ДСТУ 2861-94. – Чинний від 01.01.96 р. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 16 с.
3. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги : ДСТУ 2862-94. – Чинний від 01.01.96 р. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 40 с.
4. Коренівська О.Л. Теорія надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної та телекомунікаційної техніки : навч. посіб. / О.Л. Коренівська, В.Б. Бенедиктий. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. – 180 с.
5. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем : монографія / Ю.Я. Бобало, Б.Ю. Волощій, О.Ю. Лозинський та ін. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 300 с.
6. Electronic reliability design handbook (MIL-HDBK-338B) : military handbook. – Washington : DoD, 1998. – 1046 p.
7. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем / В.І. Василюшин, С.В. Женжеря, О.В. Чечуй, А.П. Глушко. – Х. : ХНУПС, 2018. – 268 с.
8. Піддубняк О.П. Надійність приладів. Додаток: Бібліографія з надійності і довговічності об'єктів : конспект лекцій / О.П. Піддубняк. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 152 с.
9. Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання / Н.О. Князева, О.Л. Ненов, І.В. Колумба // Вісник Університету «Україна». Серія : Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. – 2019. – № 2 (23). – С. 194–210.
10. Рижаків В.А. Кількісне оцінювання структурної надійності систем зв'язку / В.А. Рижаків, Л.М. Сакович // Зв'язок. – 2004. – № 4. – С. 53–57.
11. Гнатюк С.Є. Методика оцінки показників надійності систем спеціального зв'язку / С.Є. Гнатюк, Л.М. Сакович // Озброєння та військова техніка. – 2015. – № 1. – С. 26–28.
12. Кузавков В.С. Аналіз параметрів надійності об'єктів радіоелектронної техніки з надлишковістю / В.С. Кузавков, С.С. Михайлюк, С.В. Погребняк // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. ВІПІ. – 2022. – Вип. 2, № 2. – С. 15–20.
13. Шапошник І.А. Поелементний метод розрахунку надійності з коефіцієнтами складності компонентів виробу / І.А. Шапошник // «Молодий вчений». Технічні науки. – 2023. – № 10 (122). – С. 4–8.
14. Зінковський Ю.Ф. Визначення показників надійності в системах автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв / Ю.Ф. Зінковський, Б.М. Уваров // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 50. – С. 36–46.
15. Нікітчук А.В. Автоматизація розрахунку показників надійності радіоелектронних засобів / А.В. Нікітчук, Б.М. Уваров // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 54. – С. 82–89.
16. Мандзій Б.А. Автоматизація побудови моделей надійності резервованих та відновлювальних технічних систем / Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 2/4 (62). – С. 44–49.

17. Шевченко М.В. Використання Google Colaboratory в навчальному процесі технічних дисциплін / М.В. Шевченко, О.Л. Коренівська, В.Б. Бенедикський // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення : Тези VII Всеукраїнської науково-технічної конференції, 02–03 грудня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2024. – С. 391–392.
18. Zio E. Reliability engineering: Old problems and new challenges / E.Zio // Reliab. Eng. Syst. Saf. – 2009. – № 94. – P. 125–141.
19. Rackwitz R. Reliability analysis. A review and some perspectives / R.Rackwitz // Struct. Saf. – 2001. – № 23. – P. 365–395.
20. El Hajj Chehade F. Structural reliability software and calculation tools: A review / F.El Hajj Chehade, R.Younes // Innov. Infrastruct. Solut. – 2020. – № 5. – 29 p.
21. Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review / S.S. Afshari, F.Enayatollahi, X.Xu, X.Liang // Reliab. Eng. Syst. Saf. – 2022. – № 219. – 223 p.
22. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks / A.Bobbio, L.Portinale, M.Minichino, E.Ciancamerla // Reliab. Eng. Syst. Saf. – 2021. – № 71. – P. 249–260.
23. Zheng Z. Software-hardware embedded system reliability modeling with failure dependency and masked data / Z.Zheng, J.Yang, J.Huang // Comput. Ind. Eng. – 2023. – Vol. 186. – 32 p.

References:

1. DSTU 2860-94 Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia (1995), Chynnyi vid 01.01.96 r., Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, 90 p.
2. DSTU 2861-94 Nadiinist tekhniky. Analiz nadiinosti. Osnovni polozhennia, Chynnyi vid 01.01.96 r., Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, 1995, 16 p.
3. DSTU 2862-94 Nadiinist tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy (1994), Chynnyi vid 01.01.96 r., Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, 40 p.
4. Korenivska, O.L. and Benedytskyi, V.B. (2020), *Teoriia nadiinosti, ekspluatatsii ta remontu radioelektronnoi ta telekomunikatsiinoi tekhniky*, navch. posib., Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», Zhytomyr, 180 p.
5. Bobalo, Yu.Ya., Volochii, Yu.B., Lozynskyi, O.Yu. et al. (2013), *Matematychni modeli ta metody analizu nadiinosti radioelektronnykh, elektrotekhnichnykh ta prohramnykh system*, monohrafiia, Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, Lviv, 300 p.
6. *Electronic reliability design handbook (MIL-HDBK-338B)* (1998), military handbook, DoD, Washington, 1046 p.
7. Vasylyshyn, V.I., Zhenzhera, S.V., Chechui, O.V. and Hlushko, A.P. (2018), *Osnovy teorii nadiinosti ta ekspluatatsii radioelektronnykh system*, KhNUPS, Kh., 268 p.
8. Piddubniak, O.P. (2014), *Nadiinist pryladiv. Dodatok: Bibliohrafiia z nadiinosti i dovhovichnosti obektiv*, konspekt lektsii, Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, Lviv, 152 p.
9. Kniazieva, N.O., Nienov, O.L. and Kolumba, I.V. (2019), «Otsinka strukturnoi nadiinosti telekomunikatsiinykh merezh nevyznachenoï topologii na osnovi imitatsiinoho modeliuvannia», *Visnyk Universytetu «Ukraina»*. Serii. Informatyka, obchysliualna tekhnika ta kibernetika, No. 2 (23), pp. 194–210.
10. Ryzhakov, V.A. and Sakovych, L.M. (2004), «Kilkisne otsiniuvannia strukturnoi nadiinosti system zviazku», *Zviazok*, No. 4, pp. 53–57.
11. Hnatiuk, S.Ye. and Sakovych, L.M. (2015), «Metodyka otsinky pokaznykiv nadiinosti system spetsialnoho zviazku», *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, No. 1, pp. 26–28.
12. Kuzavkov, V.C., Mykhailiuk, S.C. and Pohrebniak, S.V. (2022), «Analiz parametriv nadiinosti obektiv radioelektronnoi tekhniky z nadlyshkovistiu», *Systemy i tekhnologii zviazku, informatyzatsii ta kiberbezpeky*. VITI, Issue 2, No. 2, pp. 15–20.
13. Shaposhnyk, I.A. (2023), «Poelementnyi metod rozrakhunku nadiinosti z koefitsientamy skladnosti komponentiv vyrobu», *Molodyi vchenyi. Tekhnichni nauky*, No. 10 (122), pp. 4–8.
14. Zinkovskiy, Yu.F. and Uvarov, B.M. (2012), «Vyznachennia pokaznykiv nadiinosti v systemakh avtomatyzovanoho proektuvannia radioelektronnykh prystroiv», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «KPI»*. Serii. Radiotekhnika. Radioaparobuduvannia, No. 50, pp. 36–46.
15. Nikitchuk, A.V. and Uvarov, B.M. (2013), «Avtomatzatsiia rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti radioelektronnykh zasobiv», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «KPI»*. Serii. Radiotekhnika. Radioaparobuduvannia, No. 54, pp. 82–89.
16. Mandzii, B.A. and Ozirkovskiy, L.D. (2013), «Avtomatzatsiia pobudovy modelei nadiinosti rezervovanykh ta vidnovliuvalnykh tekhnichnykh system», *Skhidno-Yevropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologii*, No. 2/4 (62), pp. 44–49.
17. Shevchenko, M.V., Korenivska, O.L. and Benedytskyi, V.B. (2024), «Vykorystannia Google Colaboratory v navchalnomu protsesi tekhnichnykh dystsyplin», *Kompiuterni tekhnologii: innovatsii, problemy, rishennia*, Tezy VII Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 02–03 hrudnia, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 391–392.
18. Zio, E. (2009), «Reliability engineering: Old problems and new challenges», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, No. 94, pp. 125–141.
19. Rackwitz, R. (2001), «Reliability analysis. A review and some perspectives», *Struct. Saf.*, No. 23, pp. 365–395.
20. El Hajj Chehade, F. and Younes, R. (2020), «Structural reliability software and calculation tools: A review», *Innov. Infrastruct. Solut.*, No. 5, 29 p.
21. Afshari, S.S., Enayatollahi, F., Xu, X. and Liang, X. (2022), «Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, No. 219, 223 p.
22. Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M. and Ciancamerla, E. (2021), «Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, No. 71, pp. 249–260.
23. Zheng, Z., Yang, J. and Huang, J. (2023), «Software-hardware embedded system reliability modeling with failure dependency and masked data», *Comput. Ind. Eng.*, Vol. 186, 32 p.

The paper «Automation of structural reliability calculation of technical systems» has been developed within the framework of the project «Widen performance in research and innovation capacity and competence Across EU» / «WIDE AcrossEU» 101 158 561 Horizon Europe program. Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Research Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.



Funded by the
European Union

Коренівська Оксана Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп’ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-3735-7690>.

Наукові інтереси:

- побудова вимірювальної та медичної апаратури;
- дослідження структурної надійності систем.

E-mail: o.l.korenivska@gmail.com.

Бенедикський Василь Борисович – старший викладач кафедри комп’ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0003-1623-1594>.

Наукові інтереси:

- технічні аспекти розробки вимірювальної апаратури та обробки сигналів.

E-mail: vslbened@gmail.com.

Шевченко Максим Вікторович – магістр спеціальності телекомунікації та радіотехніка Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- програмування, дослідження IoT-систем.

E-mail: trm251_shmv@student.ztu.edu.ua.

Korenivska O.L., Benedytskyi V.B., Shevchenko M.V.

Automation of structural reliability calculation of technical systems

The modern development of technical systems requires increased reliability, especially in the fields of biomedical engineering, electronics, instrument engineering, and information technology. The failure of even a single element can lead to malfunctions in communication systems, power grids, transport or medical equipment. Knowledge of reliability theory enables engineers to guarantee the stability and safety of equipment operation. It develops the ability to predict the behaviour of complex technical systems during operation, determine the probability of failures, the system’s operating time, develop measures to improve the stability of equipment operation and increase its durability and service life, and provides engineers with a methodology for predicting, analysing and improving the performance of complex technical systems.

One of the key tasks in training future engineers is to master methods of quantitative assessment of structural reliability and to develop practical skills in working with the relevant tools. The article discusses the problem of teaching the discipline «Theory of Reliability» at a modern technical university and proposes the author’s approach to its practical implementation through the use of the cloud programming environment Google Colaboratory.

The developed software product allows performing analytical and simulation calculations of structural reliability of technical systems, modelling various laws of time distribution to failure, analysing the impact of redundancy, and building statistical models for predicting the resource of elements. Particular attention is paid to the integration of the results into the educational process, which ensures an increase in the level of assimilation of the material by students and the formation of competencies in the field of engineering analytics. An important advantage of the development is the absence of the need for expensive licensed software, which makes it universal for use both in educational institutions and in scientific research.

Keywords: reliability of technical systems; reliability indicators; structural reliability calculation; cloud-based reliability calculation environments; reliability properties.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2025.