

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства і
природокористування
Навчально-науковий інститут
енергетики, автоматики та водного господарства
Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки

01-04-94М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«Надійність гідротехнічних споруд та систем»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою
«Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології»
спеціальності 194
«Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології»
всіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з якості
ННІЕАВГ
Протокол № 5 від 30.12.2024 року

Рівне – 2024

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи із навчальної дисципліни «Надійність гідротехнічних споруд та систем» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології» всіх форм навчання. [Електронне видання] / Дем'янюк А. В. – Рівне НУВГП. 2024. – 25 с.

Укладач: Дем'янюк А. В., старший викладач кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Відповідальний за випуск – Волк Л. Р., в.о. завідувача кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Керівник групи забезпечення спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія і водні технології» – Клімов С. В.

© А. В. Дем'янюк, 2024
© НУВГП, 2024

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ | 4 |
| 1. Структура навчальної дисципліни | 5 |
| 1.1. Перелік змістових модулів та тем лекцій і короткий зміст лекційного матеріалу | 5 |
| 1.2. Перелік тем практичних занять | 6 |
| 1.3. Перелік тем до самостійної роботи студента | 7 |
| 2. Завдання до практичних занять та самостійної роботи студентів | 7 |
| 2.1. Формулювання поняття надійності гідротехнічного об'єкту | 7 |
| 2.2. Складання переліку відмов гідротехнічного об'єкту | 9 |
| 2.3. Складання переліку можливих причин відмов гідротехнічного об'єкта | 10 |
| 2.4. Формулювання задачі надійності гідротехнічного об'єкта | 11 |
| 2.5. Визначення стану гідротехнічного об'єкта на етапі експлуатації | 12 |
| 2.6. Визначення розрахункових показників надійності гідротехнічного об'єкта | 13 |
| 2.7. Визначення параметрів розподілу ряду даних спостережень за гідротехнічним об'єктом | 15 |
| 2.8. Побудова емпіричної та аналітичної функцій розподілу і функції забезпеченості за даними спостережень | 17 |
| 2.9. Використання експоненціального закону при моделюванні показників надійності | 18 |
| 2.10. Використання логічних схем гідротехнічного об'єкта для оцінки надійності | 20 |
| 2.11. Використання логіко-імовірнісних методів аналізу дерев подій та аналізу дерев відмов | 21 |
| Рекомендована література | 24 |

Вступ

Навчальна дисципліна «Надійність гідротехнічних споруд та систем» розроблена для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, що навчаються за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології».

Предметом навчальної дисципліни є основні поняття та основні методи теорії надійності та основні показники надійності в їх застосуванні щодо гідротехнічних споруд.

Метою викладання навчальної дисципліни «Надійність гідротехнічних споруд та систем» є дати майбутнім бакалаврам основні відомості з теорії надійності; ознайомити студентів з сучасними підходами до забезпечення, аналізу та оцінки надійності гідротехнічних об'єктів з врахуванням невизначеності інформації; сприяти розвитку інтересу молодих фахівців до впровадження підходів та методів математичної теорії надійності в практику розрахунків гідротехнічних об'єктів, аналізу їх стану; оптимізації проектних рішень, умов експлуатації та технічного обслуговування; дати практичні навички з застосування методів теорії надійності при моделюванні визначальних факторів, розрахунках конструкцій та споруд.

Метою проведення практичних занять є закріплення та засвоєння теоретичного матеріалу з лекційного курсу. В результаті проведення практичних занять майбутні інженери повинні засвоїти і вміти практично застосовувати сучасні підходи до аналізу, оцінки та забезпечення надійності гідротехнічних об'єктів з врахуванням невизначеності інформації, навчитися впровадженню підходів та методів математичної теорії надійності в практику розрахунків гідротехнічних об'єктів різного типу та призначення.

За навчальними планами освітньо-професійної програми «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» навчальна дисципліна представлена лекційним курсом, практичними заняттями та самостійною роботою. Кількість кредитів ECTS – 5,0; загальний обсяг дисципліни складає 150 год.

1. Структура навчальної дисципліни

1.1. Перелік змістових модулів та тем лекцій і короткий зміст лекційного матеріалу

Змістовий модуль 1. Задачі надійності гідротехнічних об'єктів

Тема 1. Предмет теорії надійності

Основні поняття і визначення. Теорія надійності як прикладна наукова дисципліна. Об'єкт в теорії надійності. Функція за вимогою. Надійність як інтегральна властивість якості об'єкта. Поняття надійності гідротехнічного об'єкта.

Тема 2. Відмови гідротехнічних об'єктів

Поняття відмови. Відмова технічного об'єкта як випадкова подія та як подія-припущення. Загальна класифікація відмов гідротехнічних об'єктів. Аварії.

Тема 3. Причини відмов та аварій на гідротехнічних об'єктах

Приклади відмов та аварій на гідротехнічних об'єктах. Основні причини відмов та аварій на гідротехнічних об'єктах. Відмови внаслідок спільних причин.

Тема 4. Задачі надійності гідротехнічних об'єктів

Основні поняття і визначення. Основна задача надійності. Абсолютна оптимізація надійності, методи умовної оптимізації, концепція практично досяжного мінімального ризику. Задачі проектної та експлуатаційної надійності.

Тема 5. Оцінка надійності за станами

Показники стану. Оцінка експлуатаційної надійності на основі розпізнавання станів. Основні стани технічних об'єктів. Метод граничних станів.

Тема 6. Показники надійності

Імовірнісна міра надійності. Основні показники надійності.

Змістовий модуль 2. Моделі теорії надійності

Тема 7. Невизначеність даних та методи її подолання

Невизначеність факторів. Підходи до подолання невизначеності даних. Подолання стохастичної невизначеності даних як випадкових величин. Подолання невизначеності експертних оцінок.

Тема 8. Основи системної теорії надійності

Системна теорія як один з напрямків в математичній теорії надійності. Статистичні моделі системної теорії надійності.

Експоненціальний закон надійності, стаціонарний пуассонівський потік випадкових подій.

Тема 9. Елементарні моделі системної теорії надійності

Залежність надійності об'єкта від часу. Модель Вейбула – розподіл Вейбула, закон Вейбула-Гнеденко. Надійність відновлюваних об'єктів. Узагальнення елементарних моделей системної надійності.

Тема 10. Логічні схеми системної теорії надійності

Схеми послідовного та паралельного з'єднання елементів за надійністю. Система без надмірності. Система із резервуванням.

Тема 11. Графоаналітичні методи системної теорії надійності

Евристичні прийоми досліджень. Формалізація причинно-наслідкових діаграм. Формальні графоаналітичні методи системної теорії надійності – метод аналізу дерев подій, метод аналізу дерев відмов (несправностей, помилок).

Тема 12. Основи параметричної теорії надійності

Параметрична теорія як один з напрямків в математичній теорії надійності. Задача стохастичної динаміки. Метод умовних функцій надійності В. В. Болотіна. Метод перерізів випадкових процесів. Елементарні моделі параметричної надійності.

1.2. Перелік тем практичних занять

1. Формулювання поняття надійності гідротехнічного об'єкту
2. Складання переліку відмов гідротехнічного об'єкту
3. Складання переліку можливих причин відмов гідротехнічного об'єкта
4. Формулювання задачі надійності гідротехнічного об'єкта
5. Визначення стану гідротехнічного об'єкта на етапі експлуатації
6. Визначення розрахункових показників надійності гідротехнічного об'єкта
7. Визначення параметрів розподілу ряду даних спостережень за гідротехнічним об'єктом
8. Побудова емпіричної та аналітичної функцій розподілу і функції забезпеченості за даними спостережень
9. Використання експоненціального закону при моделюванні показників надійності

10. Використання логічних схем гідротехнічного об'єкта для оцінки надійності
11. Використання логіко-імовірнісних методів аналізу дерев подій та аналізу дерев відмов

1.3. Перелік тем до самостійної роботи студента

1. Складові надійності об'єкту.
2. Приклади відмов і аварій на гідротехнічних споруд.
3. Розслідування відмов і аварій, що сталися на гідротехнічних об'єктах.
4. Прямі і зворотні задачі надійності.
5. Метод граничних станів.
6. Методи розрахунку ймовірностей.
7. Проблема невизначеності в гідротехніці.
8. Основи системного моделювання. Задачі системного моделювання надійності. Моделі “чорна”, “сіра” та “біла” скринька.
9. Параметрична ідентифікація розрахункових моделей.
10. Приклади логічних схем надійності реальних гідротехнічних об'єктів.
11. Приклади дерев подій та дерев відмов для реальних гідротехнічних об'єктів.
12. Елементарні моделі параметричної надійності об'єктів.

2. Завдання до практичних занять та самостійної роботи студентів

2.1. Формулювання поняття надійності гідротехнічного об'єкту

Надійністю називають інтегральну властивість технічного об'єкта, яка характеризує його здатність виконувати функції за вимогою при встановлених режимах і умовах експлуатації, технічного обслуговування й ремонту, забезпечення функціонування після транспортування, зберігання та перерв в роботі впродовж заданого періоду часу, зберігаючи при цьому у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують ці здатності.

Функція за вимогою – це певне завдання або сукупність завдань об'єкта, що розглядаються як необхідні для надання визначеної

послуги споживачу. Наприклад, дренажний пристрій в тілі греблі, виконуючи збір та організоване відведення води, що профільтувала через тіло та основу споруди (функція за вимогою), забезпечує стійкість низової призми греблі.

Приклад тестового питання: Що із наведеного НЕ відноситься до функцій за вимогою гідротехнічного затвора?

- водопропускна;
- водопідпірна;
- плавність маневрування;
- регулювати рівень;
- регулювати витрату;

Завдання 1. Сформулювати поняття надійності та визначити функцію або сукупність функцій за вимогою двох гідротехнічних об'єктів із наведеного переліку відповідно до варіанту. Варіант визначається за порядковим номером студента в списку групи N . Номер першого об'єкту відповідає номеру варіанту N ; другого – $N+3$. Для малокомплектних груп із кількістю студентів менше десяти варіант визначається за вибором студента.

Перелік гідротехнічних об'єктів:

- глуха гребля;
- водоскидна гребля;
- водосховище;
- дериваційний канал;
- експлуатаційний водоскид;
- гідроакумуюча гідроелектростанція;
- будівельний водоскид;
- експлуатаційний затвор;
- підйомний механізм затвору;
- направляючий апарат гідротурбіни;
- ремонтний затвор;
- гідравлічна турбіна;
- гідрогенератор;
- трансформатор;
- дренаж;
- протифільтраційна завіса;
- гідровузол.

При виконанні завдання можна використати приклади характерних функцій за вимогою для гідротехнічних об'єктів:

- виробіток електроенергії;
- водопропускна функція;
- водопідпірна функція;
- створювати та передавати обертальний момент;
- подавати воду;
- регулювати рівень;
- функція маневрування;
- розвивати тягове зусилля;
- забезпечувати плавність маневрування;
- збирати та відводити воду.

2.2. Складання переліку відмов гідротехнічного об'єкту

В теорії надійності під відмовою розуміють випадкову подію, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати функцію за вимогою.

Існують різні класифікації відмов технічних об'єктів. Зокрема, відповідно до класифікації відмов за наслідками та причинами виникнення, відмова об'єкта може бути:

- повною або неповною;
- незалежною (первинною) та залежною (вторинною);
- поступовою або раптовою;
- переборною або непереборною.

Розрізняють також відмови:

- параметричні;
- функціональні;
- системні;
- конструкційні, проектні або експлуатаційні.

Для об'єкту робочий затвор водозливної греблі прикладом поступової відмови може бути зменшення товщини обшивки через корозію металу. Прикладом раптової відмови може бути заклинювання затвору в пазах при його підйомі.

Одним із підходів до підвищення надійності об'єкту є складання переліку можливих (гіпотетичних) його відмов із наступним складанням переліку можливих причин цих відмов.

Приклад тестового питання: Неможливість відкриття отвору водозливної греблі (відмова греблі) через відмову електродвигуна підйомного механізму затвору – це відмова

- залежна;
- поступова;
- незалежна;
- первинна;
- недопустима;

Завдання 2 . Скласти перелік можливих відмов різних видів для гідротехнічних об'єктів із переліку Завдання 1.

2.3. Складання переліку можливих причин відмов гідротехнічного об'єкта

Причини відмов та аварій на гідротехнічних об'єктах характеризуються надзвичайною різноманітністю. Зазвичай їх розділяють на чотири характерні групи (форми аварій):

- втрата стійкості споруд, конструкцій, основ, надлишкові деформації;
- втрата міцності споруд, конструкцій, основ, накопичення пошкоджень і знос;
- недостатня функціональна здатність, наприклад, обмежена пропускна здатність водопропускних споруд;
- особливі причини такі, як воєнні дії, диверсії тощо.

Приклад тестового питання: До якої форми аварій можна віднести відмову об'єкту, зображеного на фото [19]?



- втрата стійкості споруд, конструкцій, основ;
- втрата міцності споруд, конструкцій, основ;

- недостатня функціональна здатність;
- обмежена пропускна здатність;
- надлишкові деформації;

Завдання 3. До попередньо складеного переліку можливих відмов (Завдання 2) скласти перелік можливих причин відмов.

Наприклад, відмова греблі – перелив води через гребінь – може бути викликана такими причинами:

- катастрофічний паводок;
- порушення функціональної здатності водоскидів;
- вітрові хвилі;
- сейш;
- зсув берегового примикання;
- недостатність запасу висоти греблі (помилка проектування).

2.4. Формулювання задачі надійності гідротехнічного об'єкта

Надійність гідротехнічного об'єкта, як властивість, закладається на стадіях вишукувань і проектування, реалізується при будівництві і підтримується в процесі його експлуатації. Надійність, яку визначають й забезпечують при проектуванні, називають проектною надійністю; на стадії експлуатації – експлуатаційною. Відповідно, формулюють задачі проектної (зворотної) і експлуатаційної (прямої) надійності. Зокрема, формулювання задачі надійності об'єкта включає визначення засобів забезпечення проектної та експлуатаційної надійності об'єкту.

Приклад тестового питання: Що із наведеного НЕ відноситься до заходів, за допомогою яких може бути досягнена проектна надійність гідротехнічного об'єкту?

- перевірка запроєктованого варіанту конструкції на міцність;
- перевірка запроєктованого варіанту конструкції на стійкість;
- перевірка запроєктованого варіанту конструкції на фільтраційну міцність;
- перевірка значень контрольних показників, отриманих за допомогою контрольно-виміральної апаратури в тілі споруди щодо неперевищення ними гранично допустимих значень;
- розрахунок пропускної спроможності водопропускних елементів;

- розрахункова перевірка умов спряження б'єфів;

Приклад тестового питання: Що із наведеного НЕ відноситься до засобів, за допомогою яких можна забезпечити експлуатаційну надійність об'єкту?

- дотримання правил експлуатації щодо режимів роботи об'єкту;
- своєчасне проведення ремонтних робіт;
- своєчасне виконання заходів технічної експлуатації;
- врахування мінливості фізико-механічних характеристик ґрунтів основи при розрахунках;
- регулярний інструментальний моніторинг стану об'єкту;

Завдання 4 . Скласти перелік можливих заходів для забезпечення проектної надійності гідротехнічного об'єкту із переліку Завдання 1.

Завдання 5 . Скласти перелік можливих заходів для забезпечення експлуатаційної надійності гідротехнічного об'єкту із переліку Завдання 1.

Завдання 6. Скласти перелік вихідних даних при вирішенні задачі проектної надійності (ап'єрорних даних) та експлуатаційної надійності (апостеріорних даних) для гідротехнічного об'єкту із переліку Завдання 1.

2.5. Визначення стану гідротехнічного об'єкта на етапі експлуатації

Показники стану – це параметри й ознаки, які характеризують фізичні, механічні, естетичні та інші властивості об'єкта, що в сукупності визначають поточний стан об'єкту. В якості показників стану обирають такі характеристики, які можуть бути спостережені або виміряні наявними засобами контролю і методами технічної діагностики. Для гідротехнічних об'єктів це можуть бути як геометричні параметри, показники властивостей матеріалів та ґрунтів, колір, вологість, об'єми, швидкості і витрати води, п'єзометричні рівні, деформації: осідання, зміщення, прогини тощо. В якості контрольних показників також можуть бути використані непрямі ознаки наявності явищ і процесів (наприклад, ознакою високого рівня ґрунтових вод може бути розростання вологолюбної рослинності на окремих ділянках).

Приклад тестового питання: Які із наведених візуальних ознак НЕ відносяться до тих, що можуть вказувати на розвиток несприятливих процесів в тілі земляної греблі?

- наявність просочування води через деформаційні шви;
- наявність ділянок просідання ґрунту на гребені або укосах;
- наявність вологих ділянок на укосах;
- каламутність води, що профільтрувала через тіло греблі;
- наявність винесення ґрунту із тіла греблі в місці виходу фільтраційних вод;

Завдання 7. Скласти перелік та опис показників, що контролюють візуальними або інструментальними методами, для об'єкту із завдання 1, що знаходиться в експлуатації (за вибором студенту). При складанні опису контрольного показника можна скористатися формою таблиці 2.1.

Таблиця 2. 1

Приклад складання переліку та опису контрольних показників

| Найменування параметру | Показник № 1 | № 2 | № 3 |
|---|--------------|-----|-----|
| 1. Найменування контрольного показника | | | |
| 2. Опис показника | | | |
| 3. Місце заміру | | | |
| 4. Кількість контрольних точок | | | |
| 5. Кількість вимірювальних створів | | | |
| 6. Вимірювальний прилад (для показників, що контролюють інструментальними методами) | | | |
| 7. Періодичність проведення замірів | | | |
| 8. Примітки | | | |

2.6. Визначення розрахункових показників надійності гідротехнічного об'єкта

Показники надійності, на відміну від інших характеристик надійності (показників стану, критеріїв надійності), можуть характеризувати не тільки окремі здатності об'єкта, але й слугувати кількісною мірою надійності об'єкту за сукупністю різних його здатностей, властивостей надійності, відмов.

Одним із важливих показників безвідмовності, поряд із ймовірністю безвідмовної роботи $V(t)$ та ймовірністю відмови $P(t)$, є інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

Статистичну оцінку інтенсивності відмов об'єкта, що не відновлюється, можна визначити за формулою

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{m(t_{+\Delta t/2}) - m(t_{-\Delta t/2})}{[n - m(t)]\Delta t}, \quad (2.1)$$

де $m(t_{+\Delta t/2})$, $m(t_{-\Delta t/2})$, $m(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили, до моменту часу, відповідно, $t_{+\Delta t/2} = t + \Delta t/2$, $t_{-\Delta t/2} = t - \Delta t/2$, t ; n – загальна кількість об'єктів, що випробувалися; Δt – достатньо малий відрізок часу, в межах якого спостерігається достатня кількість відмов.

Серед показників довговічності розглядають технічний ресурс L або термін служби T – сумарне напрацювання об'єкта або календарна тривалість його служби від початку експлуатації або її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан. При достатній кількості випробувань напрацювання об'єкта на відмову можна визначити за формулою

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}. \quad (2.2)$$

Завдання 8. На випробування поставлено $1000+10 \cdot N$ одиниць однотипних датчиків тиску. За 4000 год. відмовило $100+8 \cdot N$ датчиків. Визначити ймовірність безвідмовної роботи датчиків тиску. Варіант визначається за порядковим номером студента в списку групи N .

Завдання 9. На випробування поставлено однотипні двигуни для підйомного механізму затвору. Отримані такі значення тривалості роботи до першої відмови: $t_1 = 1000+50 \cdot N$ год.; $t_2 = 1050+60 \cdot N$ год.; $t_3 = 900+80 \cdot N$ год.; $t_4 = 1200+45 \cdot N$ год.; $t_5 = 1100+30 \cdot N$ год.; $t_6 = 950+40 \cdot N$ год. Визначити статистичну оцінку напрацювання на відмову.

Завдання 10. На випробування поставлено $1250+40 \cdot N$ світлових індикаторів. Випробування проводилися впродовж 1000 год. В перші 100 годин відмовили $50+8 \cdot N$ виробів. За наступні 100 год.

відмовили ще $60+3 \cdot N$ виробів. Визначити інтенсивність відмов за другий період.

2.7. Визначення параметрів розподілу ряду даних спостережень за гідротехнічним об'єктом

Закон розподілу ймовірностей для дискретної випадкової величини показує множину можливих подій (значень випадкової величини) із ймовірностями їх появи. В результаті спостережень отримують ряди випадкових величин, для опису яких можна використати емпіричний розподіл.

Основними параметрами розподілу випадкової величини є: вибіркове середнє, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії, коефіцієнт варіації. Значення параметрів розподілу визначають із використанням всіх значень ряду даних (вибірки значень випадкової змінної x) за формулами:

- вибіркове середнє

$$\mu_x = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.3)$$

де n – число членів вибірки; x_i – i -те значення змінної x ;

- вибіркова дисперсія

$$D(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (2.4)$$

- середньоквадратичне відхилення

$$S(x) = \sqrt{D(x)}, \quad (2.5)$$

- коефіцієнт варіації

$$C_v(x) = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}}. \quad (2.6)$$

- вибіркова асиметрія

$$A(x) = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)}. \quad (2.7)$$

- коефіцієнт асиметрії

$$C_s(x) = \frac{A(x)}{\sigma(x)^3}. \quad (2.8)$$

Завдання 11. Визначити основні параметри розподілу випадкової величини напрацювання об'єкта на відмову, заданої в табл. 2.2, із використанням формул (2.3 – 2.8) або вбудованих функцій *MS Excel*. Варіант визначається за порядковим номером студента в списку групи *N*.

Таблиця 2. 2

Вибіркові дані напрацювання об'єкта на відмову x_i , год.

| № з/п | Варіанти завдань: | | | | | | | |
|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 10400 | 7750 | 6700 | 2710 | 6740 | 7280 | 5670 | 2120 |
| 2 | 4900 | 4530 | 5120 | 3410 | 5240 | 3430 | 3340 | 9820 |
| 3 | 11050 | 5500 | 1930 | 7660 | 1660 | 2330 | 2010 | 6820 |
| 4 | 2040 | 2240 | 2500 | 7530 | 5440 | 2940 | 7560 | 9570 |
| 5 | 3030 | 2530 | 1780 | 10840 | 2470 | 2500 | 3720 | 1670 |
| 6 | 5650 | 3570 | 7000 | 3420 | 3750 | 5650 | 3590 | 3730 |
| 7 | 3030 | 1720 | 12270 | 4180 | 4290 | 9170 | 2860 | 4290 |
| 8 | 2020 | 2200 | 7820 | 3770 | 10240 | 3630 | 2520 | 3020 |
| 9 | 6070 | 3850 | 5220 | 1570 | 4680 | 1330 | 5010 | 5590 |
| 10 | 3030 | 5000 | 3870 | 7200 | 3110 | 1520 | 4170 | 3000 |
| 11 | 10380 | 4360 | 5050 | 2900 | 2390 | 5960 | 8380 | 2930 |
| 12 | 3030 | 5280 | 2580 | 9790 | 2240 | 5220 | 8660 | 1610 |
| 13 | 5400 | 7820 | 6720 | 1090 | 5280 | 6400 | 5030 | 5820 |
| 14 | 8830 | 1420 | 2850 | 6060 | 2700 | 6800 | 2500 | 1950 |
| 15 | 5030 | 1600 | 2750 | 4310 | 3120 | 2100 | 3890 | 5560 |
| 16 | 3730 | 5860 | 5330 | 4910 | 3900 | 3280 | 5310 | 1790 |
| 17 | 5240 | 13600 | 3040 | 7740 | 3920 | 5540 | 2840 | 3000 |
| 18 | 4640 | 2040 | 8760 | 1620 | 11090 | 4700 | 3660 | 2370 |
| 19 | 5650 | 5030 | 7530 | 15300 | 2830 | 4250 | 9150 | 2200 |
| 20 | 3570 | 3700 | 3920 | 9140 | 11140 | 4650 | 3330 | 3200 |
| 21 | 3730 | 11190 | 5100 | 3640 | 2870 | 12300 | 4310 | 2300 |
| 22 | 9030 | 8560 | 2930 | 7950 | 2240 | 4600 | 3330 | 3200 |
| 23 | 5030 | 3850 | 4540 | 6530 | 2270 | 2160 | 3740 | 4800 |
| 24 | 2180 | 3280 | 2180 | 3730 | 6140 | 2480 | 1680 | 2100 |
| 25 | 2470 | 5340 | 7620 | 4160 | 5600 | 1350 | 3430 | 2390 |
| 26 | 4840 | 5520 | 4930 | 4890 | 3640 | 3110 | 4340 | 1470 |

2.8. Побудова емпіричної та аналітичної функцій розподілу і функції забезпеченості за даними спостережень

Для побудови емпіричної функції розподілу $F_{m(n)}$ виконують ранжування членів вибірки в зростаючому порядку; для побудови емпіричної функції забезпеченості $G_{m(n)}$ – в спадаючому порядку. Емпіричну ймовірність $F_{m(n)} = P_{m(n)}$ або емпіричну забезпеченість $G_{m(n)} = P_{m(n)}$ i -го значення випадкової величини можна визначити за формулою Чегодаєва

$$P_{m(n)} = \frac{m - 0,3}{n + 0,4}, \quad (2.9)$$

де m – порядковий номер ранжируваного в зростаючому (при визначенні $F_{m(n)}$) чи спадаючому (при визначенні $G_{m(n)}$) порядку ряду значень, n – кількість значень у вибірці.

Найбільш широко використовуваним аналітичним розподілом в статистиці є нормальний розподіл. Функція щільності нормального розподілу записується у вигляді

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (2.10)$$

інтегральна функція нормального розподілу – у вигляді

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right). \quad (2.11)$$

Ординати функції забезпеченості при відомій ординаті інтегральної функції розподілу можна розрахувати за залежністю

$$G(x) = 1 - F(x). \quad (2.12)$$

Широкого застосування при аналізі надійності технічних об'єктів також набула логарифмічно нормальна функція розподілу, коли нормальний закон застосовується до логарифмів значень випадкової величини – застосовується заміна змінної $y_i = \ln(x_i)$.

Завдання 12. Побудувати інтегральну криву емпіричного розподілу $F_{m(n)}$ та криву забезпеченості $G_{m(n)}$ за ординатами,

розрахованими за формулою (2.9) для даних напрацювання об'єкта на відмову із табл. 2.2.

Завдання 13. Побудувати інтегральну криву нормального розподілу $F_{m(n)}$ та криву забезпеченості нормального розподілу $G_{m(n)}$ для вибірових даних з табл. 2.2 із використанням значень параметрів розподілу вибіркового середнього та середньоквадратичного відхилення, визначених в Завданні 10. Ординати інтегральної кривої розподілу розрахувати за формулою (2.11) або за допомогою вбудованих функцій *MS Excel*. Криві емпіричного та нормального розподілу для вибірових даних розмістити на одному полі. Зробити висновок про можливість використання нормального закону розподілу для даної вибірки.

Завдання 14. Побудува кривих логарифмічно-нормального розподілу. Ординати кривих інтегральної кривої та кривої забезпеченості розраховують за формулами для нормального закону (формула (2.11) або за допомогою вбудованих функцій *MS Excel*), застосовуючи їх для логарифмів вибірових даних з табл. 2.2, попередньо визначивши параметри ряду логарифмів із використанням формул (2.3 – 2.8) або вбудованих функцій *MS Excel*. Криві для логарифмічно-нормального розподілу розмістити на тому ж полі, що і криві розподілу із Завдань 11 та 12. Провести порівняльний аналіз ступеня відповідності моделей аналітичних законів розподілу: нормального та логарифмічно-нормального, – емпіричному розподілу.

2.9. Використання експоненціального закону при моделюванні показників надійності

Експоненціальний закон надійності є однією із найпростіших математичних моделей надійності статистично однорідних об'єктів, що не відновлюються. Математичним виразом експоненціального закону надійності є

$$V(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.13)$$

або

$$V(t) = \exp\left(-\frac{t}{t_m}\right), \quad (2.14)$$

де $t_m = 1/\lambda$ – середній період напрацювання об'єкта до відмови.

Приклад тестового питання: Експоненціальний закон надійності дозволяє визначити:

- ймовірність безвідмовної роботи об'єкта в момент часу t ;
- ймовірність відмови в момент часу t ;
- момент часу t , в який відбудеться відмова;
- тривалість періоду безвідмовної роботи;
- напрацювання на відмову;

Приклад тестового питання: Якому характерному періоду життєвого циклу об'єкту відповідає ділянка 2 кривої зміни інтенсивності відмов в часі (рис. 2.1) об'єктів, що складаються з великої кількості елементів?

- період “нормальної” експлуатації;
- запуск об'єкту в роботу та припрацювання;
- наближення до нормативного терміну експлуатації;
- період будівництва;
- відмова об'єкту;

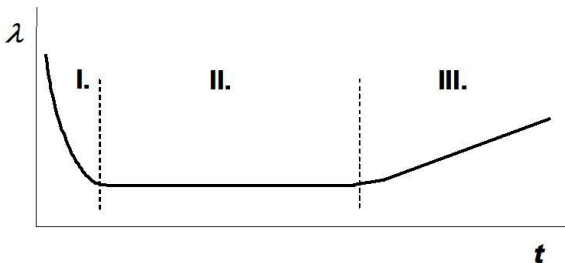


Рис. 2. 1. Крива зміни інтенсивності відмов в часі

Приклад тестового питання: До якого характерного періоду життєвого циклу об'єкту (рис. 2.1) може бути застосований експоненціальний закон надійності?

- 1
- 2
- 3
- 1 і 2
- 2 і 3

Завдання 15. Визначити ймовірність відмови двигуна насосу при напрацюванні 300 год. Відомо, що середній строк служби

двигуна становить $1000+10 \cdot N$ год. Надійність двигуна підкоряється експоненціальному закону надійності.

2.10. Використання логічних схем гідротехнічного об'єкта для оцінки надійності

При дослідженні надійності систем в системній теорії припускається, що складові частини системи взаємодіють між собою за певними логічними схемами. Найпростішими логічними схемами надійності є схеми так званого послідовного й паралельного з'єднань елементів за надійністю.

Ймовірність безвідмовної роботи системи з послідовним за надійністю з'єднанням елементів (системи без надмірності), відмови яких є незалежними подіями, може бути визначена за формулою

$$V_S = \prod_{i=1}^n V_i \quad \text{або} \quad V_S = \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (2.15)$$

де V_i, P_i – відповідно, ймовірності безвідмовної роботи та виходу з ладу (відмови) i -го елемента, $i = 1, \dots, n$; n – загальна кількість елементів в системі із послідовним з'єднанням.

Ймовірність відмови системи із паралельним за надійністю з'єднанням елементів, відмови яких є незалежними подіями (системи із резервуванням), може бути визначена за формулою

$$P(S^r)^{\text{inf}} = \prod_{j=1}^m P(e_j). \quad (2.16)$$

Ймовірність безвідмовної роботи $V(t)$ та ймовірність відмови $P(t)$ доповнюють одна одну до одиниці.

Приклад тестового питання: Спосіб забезпечення надійності об'єкта або системи за рахунок використання в складі системи додаткових елементів та/ або можливостей, надлишкових відносно мінімально необхідних для виконання потрібних функцій - це

- система без надмірностей;
- забезпеченість;
- систематичність;
- резервування;
- аналіз надійності;

Завдання 16. Визначити ймовірність відмови системи, з'єднання елементів якої за надійністю представлено логічною схемою, наведеною на рис. 2.2 (а, б). Ймовірність безвідмовної роботи кожного з елементів $V = 1 - 0,01 \cdot N$.

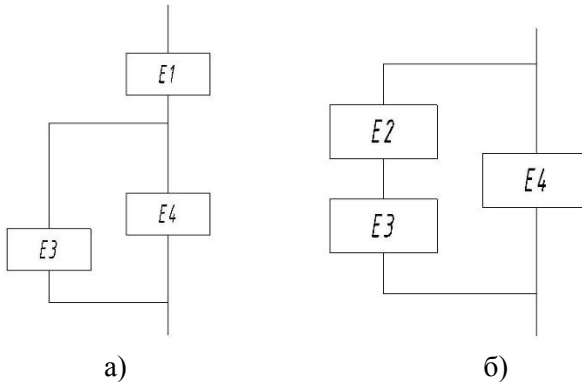


Рис. 2. 2. Логічна схема з'єднання елементів в системі за їх надійністю

Завдання 17. Скласти логічну схему з'єднання елементів в системі за їх надійністю для об'єкту – обладнання із п. 2.1.

2.11. Використання логіко-імовірнісних методів аналізу дерев подій та аналізу дерев відмов

Причинно-наслідкові діаграми – графоаналітичні моделі, які відображають взаємозв'язки між можливими причинами і наслідками реалізації різних подій і станів у системі, що досліджується. Аналізу причин відмов та розробці заходів їх усунення сприяє побудова дерева відмов та непрацездатних станів.

Дерево подій (аварій, відмов, наслідків) лежить в основі логіко-імовірнісної моделі причинно-наслідкових зв'язків відмов системи з відмовами її елементів та іншими подіями (впливами). Дерево подій складається з послідовностей та комбінацій порушень та несправностей. Таким чином воно є багаторівневою графологічною структурою причинних взаємозв'язків, отриманих в результаті відслідковування небезпечних ситуацій в зворотному напрямку з метою пошуку можливих причин їх виникнення.

Основою побудови дерева відмов є символічне представлення існуючих в системі умов-подій, які можуть викликати відмову.

Вихідними подіями є переліки можливих видів подій-відмов та їх причин, нерозрахункові значення зовнішніх впливів і т.д. Відповідно, кожному виду подій присвоюються символи, які використовуються для графічної побудови дерева. Логічні символи пов'язують події у відповідності до їх причинних взаємозв'язків.

Ймовірність реалізації подій-наслідків, в тому числі і ймовірність головної події, розраховуються в залежності від дії логічних операторів (табл. 2.3).

Таблиця 2. 3

Розрахункові формули для оцінки ймовірностей подій-наслідків

| № з/п | Найменування оператора | Розрахункові формули для оцінки ймовірностей подій-наслідків |
|-------|------------------------------|--|
| 1 | АБО | $P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$ |
| 2 | Виключне АБО | $P = P_1(1 - P_2) + P_2(1 - P_1),$ де P_1, P_2 - ймовірності вхідних взаємовиключних незалежних подій. |
| 3 | АБО пріоритетом ³ | $P = P_1^* + \sum_{i=1}^{n-2} (1 - P_i^*) P_{i+1}^* + \dots + (1 - P_{n-1}^*) P_n^*$ $P_i^* = \frac{P_i P(Q_i)}{\sum_{j=1}^n P_j P(Q_j)} \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_j) \right)$ $P(Q_i) = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}$ |
| 4 | I | $P = \prod_{i=1}^n P_i$ |
| 5 | ЗАБОРОНА | $P = P_C P_A$, для події-умови С та вхідної події А. |

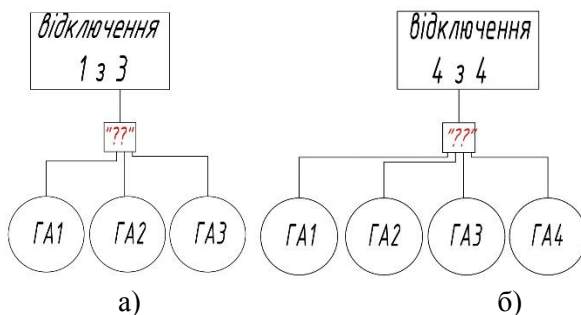
Приклад тестового питання: ”При спробі підняття затвору можливі ситуації: затвор не вдасться відкрити; затвор вдасться відкрити частково; затвор вдасться відкрити повністю”. Твердження є прикладом формулювання

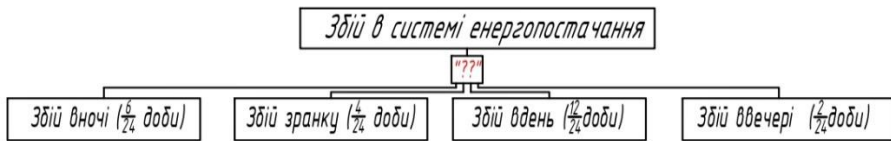
- ймовірності відмови;
- залежних подій;
- повної групи подій;
- задачі оптимізації;
- кількісної оцінки надійності;

Приклад тестового питання: Поєднання подій логічним оператором “АБО” передбачає, що для реалізації сценарію

- необхідна (одночасна) наявність всіх умов-подій-причин, об’єднаних оператором;
- достатня наявність хоча б однієї із умов-подій, об’єднаних оператором;
- достатня наявність хоча б однієї із умов-подій, об’єднаних оператором, при цьому ці умови-події взаємно виключають одна одну;
- події-наслідку достатньо появи однієї події-причини;

Завдання 18. Розглядається система, що включає об’єкт, що виробляє електроенергію (ГЕС із декількома агрегатами) та енергомережу. Головною подією при відмові системи визначено збій в мережі через відсутність/ нестачу електроенергії. Припускається, що нестача електроенергії в мережі може відбутися через вихідну подію – відмову гідроагрегату (ГА). Визначити необхідний оператор для поєднання незалежних подій – відмов ГА для умов, показаних на рис. 2.3 (а, б) та для поєднання проміжних подій (рис. 2.3 (в)).





в)

Рис. 2. 3. Фрагменти дерев подій

Завдання 19. Визначити ймовірність головної події (переповнення водосховища) для дерева відмов, представленого на схемі. Ймовірності настання подій наведено на схемі рис. 2.4.



Рис. 2. 4. Дерево подій при моделюванні переповнення водосховища

Рекомендована література

Базова

1. Бобровський А. Л., Стефанишин Д. В. Термінологічний словник з надійності та безпеки гідротехнічних об'єктів : словник, довідкові матеріали. Рівне, 2005. 223 с.
2. Гідротехнічні споруди: навч. посіб. / М. М. Хлапук, Л. А. Шинкарук, А. В. Дем'янюк, О. А. Дмитрієва. Рівне : НУВГП, 2013. 241 с.
3. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.
4. ДБН В.1.2-5:2007 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів.
5. ДБН В.2.4-3:2010 Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення.
6. Стефанишин Д. В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності. К. : Азимут – Україна, 2009. 104 с.
7. Основи теорії надійності будівель і споруд : навчальний посібник для студентів будівельних спеціальностей усіх форм навчання / В. А. Пашинський. Кропивницький : ЦНТУ, 2016. 155 с.
8. Науменко І. І. Оцінка надійності водогосподарських об'єктів. Рівне : НУВГП, 2006.

Додаткова

1. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення.
2. ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги.
3. ДСТУ 2863-94 Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги.
4. ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення.
5. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.
6. ДСТУ 7136:2009. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Моніторинг потенційно небезпечних об'єктів. Порядок проведення.
7. ДСТУ 8647:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов.
8. ДСТУ 8646:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строки служби) технічних систем.
9. ДСТУ EN 60300-3-1:2022 Управління надійністю. Частина 3-1. Посібник із застосування. Методи аналізу надійності. Настанова з методології (EN 60300-3-1:2004, IDT; IEC 60300-3-1:2004, IDT).
10. ДСТУ EN 60300-3-2:2022 Управління надійністю. Частина 3-2. Посібник із застосування. Збір даних про надійність на місці (EN 60300-3-2:2005, IDT; IEC 60300-3-2:2004, IDT)
11. ДСТУ EN 60300-3-3:2022 Управління надійністю. Частина 3-3. Посібник із застосування. Вартість життєвого циклу (EN 60300-3-3:2017, IDT; IEC 60300-3-3:2017, IDT).
12. ДСТУ EN 60300-3-11:2022 Керування надійністю. Частина 3-11. Посібник із застосування. Технічне обслуговування, орієнтоване на надійність (EN 60300-3-11:2009, IDT; IEC 60300-3-11:2009, IDT).
13. ДСТУ EN 61078:2022 Блок-схеми надійності (EN 61078:2016, IDT; IEC 61078:2016, IDT).
14. ДСТУ EN 61703:2022 Математичні вирази для надійності, доступності, ремонтпридатності та умов підтримки технічного обслуговування (EN 61703:2016, IDT; IEC 61703:2016, IDT).
15. ДСТУ EN 62308:2022 Надійність обладнання. Методи оцінювання надійності (EN 62308:2006, IDT; IEC 62308:2006, IDT).
16. ДСТУ EN 62502:2022 Методи аналізування надійності. Аналізування дерева подій (ETA) (EN 62502:2010, IDT; IEC 62502:2010, IDT).
17. ДСТУ IEC 60812:2015 Методи аналізування надійності систем. Аналіз наслідків видів відмов (FMEA) (IEC 60812:2006, IDT).
18. ДСТУ ISO 8930:2022 Будівельні конструкції та будівництво. Загальні принципи надійності конструкцій. Терміни та визначення понять (ISO 8930:2021, IDT)
19. ASDSO. Lesson Learned: Earth and rockfill embankment dams must be stable under the full range of anticipated loading conditions. <https://damfailures.org/lessons-learned/earth-and-rockfill-embankment-dams-must-be-stable-under-the-full-range-of-anticipated-loading-conditions/>