

УДК 528.38/.41-027.45:624

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.301024.07.1087

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО СУПРОВОДУ БУДІВНИЦТВА

БЕГІЧЕВ С. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
ІШУТИНА Г. С.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
ЧУМАК Л. О.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Анотація. Безпечність та надійність будівель і споруд як складної технічної системи залежить не лише від правильного врахування даних про конструктивні особливості споруди, а й від особливості поведінки ґрунтової основи, що сприймає навантаження і працює спільно з інженерною спорудою, а також від геодезичного супроводу будівництва. Геодезичні роботи становлять невід’ємну частину технологічного процесу будівельного виробництва та належать до основних видів робіт. Забезпечення надійної і безпечної, довготривалої експлуатації будинків і споруд житлово-цивільного, промислового та сільськогосподарського призначення, що розташовані як у звичайних, так і в складних інженерно-геологічних, сейсмонебезпечних, гірничо-геологічних умовах, – актуальне наукове завдання в наш час. Будівлі, розташовані на підроблюваних територіях, на просадних ґрунтах, зсувонебезпечних схилах або в умовах щільної міської забудови, потребують визначення розвитку деформаційних процесів за результатами періодичного геомоніторингу як на стадії відбудови, так і на стадії їх експлуатації. **Мета роботи** – створити марківську дискретно-неперервну стохастичну модель функціонування локальної геодезичної мережі (ГМ) для забезпечення геодезичного супроводу будівництва та виконати чисельні розрахунки надійності та безпечності ГМ залежно від особливостей її відновлення. Проаналізувати нормативно-правові документи з надійності та безпечності будівельних об’єктів, та методи оцінювання надійності та безпечності технічних систем. Виконати чисельний розрахунок показників надійності, безпечності та ефективності: коефіцієнта готовності, граничних імовірнісних станів, середнього часу між відмовами, середньої тривалості безвідмовної роботи геодезичної мережі (ГМ). **Методика.** Аналіз нормативно-правових документів із надійності та безпечності будівельних об’єктів. Огляд методів оцінки надійності та безпечності технічних систем. Застосування методу простору станів, побудова графів станів і переходів відновлюваної геодезичної мережі. Побудова у програмному засобі Mathcad графіків функції готовності, ймовірності роботи до першої відмови та частоти потрапляння в аварійну ситуацію. **Наукова новизна.** Метод простору станів дозволяє вперше в геодезії змоделювати поведінку запроєктованої ГМ із метою з’ясування часу перебування у різних станах технічної системи залежно від інтенсивності відмов геодезичних пунктів та інтенсивності їх відновлення. На побудованому графі станів і переходів, на відміну від методу «дерева відмов», є можливість одночасно побачити всі можливі ситуації, що розділені масками аварійних ситуацій. **Практична значимість.** Завдяки використанню стабільних геодезичних пунктів, відібраних за результатами виконаної оцінки надійності, є можливість підвищити якість геодезичного супроводу будівництва. Обґрунтовано найбільш доцільну схему відновлення ГМ за результатами аналізу моделей функціонування запроєктованої ГМ та обчислених значень: коефіцієнта готовності, частоти відмов ГМ та ймовірності роботи до першої відмови. **Результати.** Побудовано графічну модель надійнісної поведінки ГМ, що включає 8 пунктів у вигляді графа станів і переходів. Складено та розв’язано систему лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена. Отримано розподіл ймовірностей перебування в кожному стані ГМ. Обґрунтовано доцільну періодичність відновлення ГМ залежно від інтенсивності відмов. Доведено, що періодичне відновлення геодезичних пунктів дозволяє підтримувати заданий рівень надійності ГМ, що підвищує точність геодезичного супроводу будівництва та забезпечує функціональну безпечність.

Ключові слова: надійність геодезичної мережі; марківська дискретно-неперервна стохастична модель; метод простору станів; граф станів і переходів; будівлі і споруди; функціональна безпечність; геодезичний моніторинг

RESEARCH OF THE RELIABILITY OF THE GEODETIC NETWORK IN PROVIDING GEODETIC SUPPORT OF CONSTRUCTION

BIEHICHEV S.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ISHUTINA H.S.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*
CHUMAC L.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: sergey_begichev@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9861-8754

^{2*} Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

³ Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: larisa4umak@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

Abstract. The safety and reliability of buildings and structures as a complex technical system depends not only on the correct consideration of data on the structural features of the building, but also on the behavior of the soil base and on the geodetic support of the construction. Geodetic works are an integral part of the technological process of construction production and belong to the main types of work. Ensuring reliable and safe, long-term operation of buildings and structures of residential, civil, industrial and agricultural purpose, located both in ordinary and in difficult engineering-geological, earthquake-hazardous, mining-geological conditions is an urgent scientific task in our time. Buildings located on artificial territories, on subsiding soils, landslide-prone slopes or in conditions of dense urban development need to determine the development of deformation processes based on the results of periodic geomonitoring at the stage of their operation. **The purpose of the work** is to create a Markov discrete-continuous stochastic model of the operation of the local geodetic network (GN) to provide geodetic support for construction and perform numerical calculations of the reliability and safety of the GN depending on the features of its restoration. Analyze regulatory and legal documents on the reliability and safety of construction objects. Perform an analysis of methods for assessing the reliability and safety of technical systems. Perform a numerical calculation of reliability, safety and efficiency indicators: availability ratio, limit probability states, mean time between failures, average duration of fault-free operation of the geodetic network (GN). **Methodology.** Analysis of regulatory documents on the reliability and safety of construction objects. Review of methods for assessing the reliability and safety of technical systems. Application of the state space method, construction of graphs of states and transitions of a renewable geodesic network. Construction of graphs of the readiness function, the probability of operation before the first failure and the frequency of getting into an emergency situation in the Mathcad software tool. **Scientific novelty.** The state space method allows simulating the behavior of the designed GN in order to identify the time spent in various states of the technical system depending on the intensity of failures of geodetic points and the intensity of their recovery. On the graph of states and transitions, in contrast to the “fault tree” method, it is possible to simultaneously see all possible situations separated by masks of emergency situations. **Practical value.** Due to the use of stable geodetic points selected based on the results of the performed reliability assessment, there is an opportunity to improve the quality of geodetic construction support. The most expedient scheme of GN restoration has been substantiated. The results of the analysis of the functioning models of the designed GN were used and the calculated values of: availability coefficient, frequency of GN failures and the probability of operation before the first failure. **Results.** A graphic model of the reliability behavior of GM in the form of a graph of states and transitions has been built. Geodetic network includes 8 points. A system of Kolmogorov-Chapman linear differential equations was compiled and solved. The distribution of probabilities of being in each state of GN has been obtained. The reasonable periodicity of GN restoration depending on the intensity of failures has been substantiated. It has been proven that periodic restoration of geodetic points allows maintaining a given level of GM reliability. This increases the accuracy of geodetic monitoring of construction and ensures functional safety.

Keywords: *reliability of the geodetic network; Markov discrete-continuous stochastic model; state space method; graph of states and transitions; buildings and structures; functional safety; geodetic monitoring*

Постановка проблеми. Інженерно-геодезичні роботи в будівництві становлять комплекс геодезичних вимірювань для вишукувань, проєктувань, зведення й експлуатації інженерних споруд. Ще на

стадії інженерно-геодезичних вишукувань створюється планово-висотна основа і виконується топографічне знімання для проєктування будівельного майданчика та інженерної споруди. Під час будівництва та

експлуатації будівель і споруд здійснюють спостереження за деформаціями основ і фундаментів із метою обґрунтування теоретичних розрахунків стійкості споруд і вжиття заходів для захисту споруд у разі виявлення недопустимих деформацій. Виникнення різного виду деформацій спричиняють природні умови (зміна температури, рівня ґрунтових вод, сейсмічні явища, дії вітру, геологічні умови), недосконалість конструкцій, механічні навантаження та техногенний фактор (наземне та підземне будівництво).

Вплив наведених чинників викликає відносну зміну форми, геометричних параметрів і просторового положення будівель і споруд. При цьому можуть виникнути такі види деформацій: осідання, просідання, перекося, горизонтальні зміщення, деформації кручення та згину, крени, зсуви, прогинання з появою тріщин і розламів у споруді тощо.

За результатами геодезичних спостережень перевіряють правильність проєктних розрахунків, виявляють закономірності і роблять прогноз розвитку деформацій будівель і споруд.

Для отримання достовірних даних геомоніторингу потрібно мати стабільні (надійні) вихідні геодезичні пункти.

Геодезична мережа (ГМ) – це сукупність пунктів, які рівномірно розташовані на певній території та закріплені спеціальними центрами, що забезпечують їх збереження та стійкість у просторовому положенні протягом тривалого часу. Державна геодезична мережа – це носій координат і висот України.

ГМ служить основою для виконання геодезичних, топографічних, геолого-розвідувальних та маркшейдерських робіт. Внаслідок негативного впливу як техногенних, так і природних чинників спостерігається зміщення, а іноді й знищення пунктів геодезичних мереж. Порушені пункти виявляють за результатами польового обстеження під час виконання геодезичних робіт у конкретному районі. При цьому візуальне обстеження не дає уявлення про надійність пункту та вплив

його на стан геодезичної мережі в цілому. Шляхом застосування методів оцінки надійності можна обрати стабільні (надійні) геодезичні пункти, що будуть використані як вихідні для прокладання локальної геомоніторингової мережі.

Виділення невирішеної проблеми.

Проектуючи будівлі та споруди необхідно забезпечити їх заданий рівень надійності та безпечності. Як надійність, так і безпечність – це дві характеристики будь-якої технічної системи. *Надійність* – властивість системи виконувати всі свої функції із заданими показниками в означених межах протягом заданого часу в певних умовах її експлуатації. *Безпечність* – це властивість системи у разі виходу із ладу окремих підсистем чи модулів переходити в такий режим роботи, в якому вона не буде становити загрози життю людей і навколишньому середовищу чи іншим системам.

Безпечність – дуже широке поняття і воно використовується як у техніці, так і в екології, охороні здоров'я тощо. Геодезичні мережі, будівлі і споруди також являють собою технічні системи що включають елементи – геодезичні пункти, будівельні конструкції.

Для будівель і споруд протягом усього часу їх експлуатації важливі і надійність, і функціональна безпечність, проте є певне протиріччя між цими поняттями. У разі виходу окремих систем із ладу ми повинні знати момент часу, коли відбулась відмова, отже у нас повинна бути якась система моніторингу, засоби контролю стану технічної системи. Тобто до технічної системи (будівель та споруд) ми повинні ще додати додаткове обладнання для засобів контролю і діагностики з метою виявлення проблем з підсистемами.

Внаслідок того, що ми додаємо додаткову систему (моніторингову мережу), яка повинна працювати разом з основною та фундаментом будівлі, з погляду надійності, це послідовне з'єднання. Тобто є основна система і послідовно до неї приєднуються засоби контролю і діагностики (деформаційні марки); це система

забезпечення безпечності (локальна геомоніторингова мережа). Локальна геомоніторингова мережа є додатковою системою забезпечення безпечності.

Уведення засобів безпечності завжди зменшує надійність системи. Це означає, що надійність основної системи зменшується. Відповідно, для того, щоб дійти до початкового бажаного рівня надійності, який був без цієї системи, ми повинні підвищувати надійність цілої системи, що робить її дорожчою. Проте такі заходи щодо підвищення надійності та забезпечення функціональної безпечності дають змогу зберегти життя і здоров'я людей у процесі експлуатації будівель та споруд.

Якщо під час геомоніторингу буде виявлений недопустимий розвиток деформаційних процесів будівлі й подальша її експлуатація може бути небезпечною, то своєчасне вживання спеціальних заходів з укріплення фундаменту або будівельних конструкцій дозволить зберегти функціональну безпечність у заданих межах, не очікуючи виникнення аварійної ситуації. Для того, щоб підвищити і безпечність, і надійність, потрібно докладно проаналізувати систему на наявність слабких місць і вчасно їх усунути.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для технічних систем важливі як надійність, так і функціональна безпечність, яка регламентується двома групами стандартів:

1) Міжнародний стандарт ІЕС 61508. Цей стандарт був розроблений міжнародною організацією зі стандартизації (International Electrotechnical Commission), яка готує та публікує міжнародні стандарти для всіх електричних, електронних і суміжних технологій, що мають загальну назву «електротехнології». У серії стандартів ІЕС 61508 надано визначення функціональної безпеки, наведені у відповідних підрозділах основні норми функціональної безпеки електричних, електронних та програмованих електронних пристроїв та систем.

Особливість стандартів цієї серії – ризик-орієнтований підхід до оцінювання

безпеки. Встановлено різні види ризику залежно від можливої завданої шкоди життю або здоров'ю людини, зовнішньому середовищу внаслідок впливу техногенних об'єктів. Для зменшення рівня ризику передбачено комплекс заходів, які і регламентує серія стандартів ІЕС 61508. Серія цих стандартів прийнята як державні стандарти у багатьох країнах світу. З вересня 2019 року серія стандартів ІЕС 61508 впроваджена в Україні на рівні ДСТУ (наказ ДП «УкрНДНЦ» від 13.08.2019 № 249).

2) ISO 26262 – міжнародний стандарт із функціональної безпеки дорожніх транспортних засобів. Стандарт підготовлений до випуску Технічним комітетом ISO/TC 22/SC 32 «Електричні, електронні компоненти та види систем загального призначення» Міжнародної організації зі стандартизації. У цьому стандарті визначено різні види безпечності, рівень вбудованої безпечності (safe integral level) для різних систем.

З метою забезпечення надійності й безпеки висотних будинків, об'єктів АЕС та інших відповідальних і технічно складних будівельних об'єктів запроваджують заходи від прогресуючих руйнувань. Під час зведення висотних і унікальних споруд, монтажу складного технологічного устаткування створюється спеціальна геодезична служба, головне завдання якої – науковий супровід та забезпечення передбачених проектом виконання будівельних робіт (ПВБР), геометричних параметрів інженерних споруд і встановлення елементів конструкцій у проектне положення із заданою точністю. На основі геомоніторингу визначають динаміку розвитку деформаційних процесів у період будівництва й експлуатації будівлі.

Надійності та безпечності будівельних об'єктів присвячена низка нормативно-правових документів [1–8]. ДБН В.1.2-2:2006 [1] поширюється на проектування будівельних конструкцій та основ будівель і споруд, що зводяться або реконструюються, і встановлює основні положення та правила щодо визначення навантажень (від

устаткування, людей, тварин, складових матеріалів і виробів; снігові та вітрові навантаження) і впливів, а також їх поєднань. ДБН В.1.2-5:2007 [2] встановлює порядок та умови виконання науково-технічного супроводу будівельних об'єктів незалежно від форм їх власності, відомчої належності та призначення. Ці Норми поширюються на будівельні об'єкти на різних етапах їх життєвого циклу.

ДБН В.1.2-12:2008 [3] встановлює вимоги безпеки під час нового будівництва, реконструкції і технічного переоснащення об'єктів в умовах ущільненої забудови і охоплює безпеку прилеглої забудови і території, безпеку об'єкта, що будується, безпеку виробничого процесу з виконання будівельно-монтажних робіт.

ДБН В.1.2-14:2018 [4] поширюється на вишукування, будівництво та ліквідацію будівель і споруд незалежно від їх призначення. Ці норми встановлюють загальні принципи забезпечення надійності і конструктивної безпеки будівель і споруд.

ДБН В.1.3-2:2010 [5] містить відомості та вимоги щодо створення внутрішньої та зовнішньої розмічувальної мережі для будівництва; виконання геодезичного контролю точності геометричних параметрів будівель (споруд) та виконавчого знімання; геодезичний моніторинг будівель та споруд; наведено схеми закріплення деформаційних марок та періодичність спостережень за видом деформацій.

У ДСТУ Б В.2.1-30:2014 [6] встановлено методи вимірювання деформацій (вертикальних і горизонтальних переміщень, кренів) основ фундаментів будинків і споруд з урахуванням ґрунтових умов на стадії будівництва або експлуатації; наведено методи визначення зсувів земельних ділянок або ґрунтового масиву.

Отже, нормативні документи [5; 6] встановлюють методи геодезичних спостережень за вертикальними та горизонтальними переміщеннями основи фундаментів; точність геодезичних вимірювань; вимоги до побудови геодезичних розмічувальних мереж; періодичність геомоніторингу; проектування,

виконання та приймання геодезичних робіт, які потрібно виконувати під час будівництва, реконструкції, технічного переоснащення об'єктів будівництва будь-якого призначення.

У ДСТУ Б В.1.2-3:2006 [7] наведено граничні значення прогинів і переміщень несучих і огорожувальних конструкцій будівель та споруд для розрахунку за другою групою граничних станів незалежно від застосовуваних будівельних матеріалів. Цей стандарт рекомендує враховувати всі основні фактори під час визначення прогинів і переміщень будівель та споруд. Якщо прогини й переміщення стали наслідком тривалих процесів (повзучості, просадки основ тощо), потрібно враховувати збільшення у часі їх значень.

ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009 [8] встановлює загальні положення, методичні принципи та порядок розрахунку точності, правила вимірювання геометричних параметрів у будівництві.

Питанням проектування будівель і споруд з урахуванням функціональної безпечності, теорії ймовірності та теорії надійності присвячені роботи Є. А. Бакуліна [9], А. Я. Барашикова [10], Я. Й. Червинського [11], В. М. Першакова [12] та ін.

У процесі проектування будівлі чи споруди передбачають заданий рівень надійності та функціональної безпечності її конструкцій і вузлів. Проаналізувавши досвід будівництва й експлуатації дослідники прийшли до висновку, що будівлі й споруди, які були побудовані й експлуатувались в однакових умовах, втрачають функціональну безпечність і надійність внаслідок виходу з ладу конструктивних елементів у різні випадкові моменти часу. Термін служби будівлі або її будівельної конструкції точно встановити неможливо. Проте є можливість оцінити ймовірність безпечної роботи певної споруди.

Публікація [9] присвячена розробленню нової практичної інженерної методики оцінки надійності технічного стану будівель промислового призначення з підвищеним рівнем відповідальності, що

експлуатуються. Враховано фактори ризику, що негативно впливають на термін експлуатації будівель і становлять загрозу руйнування.

У навчальному посібнику [10] викладено відомості про діагностику, обстеження та оцінювання технічного стану будівель і споруд для прийняття рішення щодо подальшої долі обстежуваного об'єкта.

Автори публікації [11] дійшли висновку, що «лише порівняння даних точних геодезичних спостережень за деформаціями основ, складених замочками лесоподібними ґрунтами, фундаментів будівель і споруд із результатами їх аналітичних розрахунків і моделювання методом скінченних елементів можуть служити критерієм достовірності двох підходів призначення величин модуля деформації таких ґрунтів».

При цьому ймовірність прогнозування деформацій земної поверхні під час підземної розробки вугільних родовищ невисока, тому потрібно впровадити більш достовірні методики розрахунку деформацій земної поверхні, що засновані на гіпотезах геомеханіки.

Отже, достовірність даних обстежень технічного стану будівель і споруд безпосередньо залежить від надійності даних геомоніторингу, що, у свою чергу, залежать від сталості та надійності вихідних пунктів геодезичних мереж. На основі виконаної оцінки надійності геодезичних мереж можна обрати стабільні, надійні пункти як вихідні, що дозволить отримати достовірні дані розвитку деформаційних процесів будівель та споруд.

У публікації [12] виконано аналіз технічного стану чотириповерхової житлової будівлі, проаналізовано причини її руйнування та надано рекомендації щодо її відновлення. Серед основних причин руйнування будівлі виділено наявність нерівномірних осідань основи по торцях будівлі внаслідок замочування просідних ґрунтів. Саме за результатами геомоніторингу можна своєчасно виявити розвиток деформаційних процесів та

підсилити за необхідності основу та фундамент будівлі.

Мета роботи – аналіз нормативних документів щодо надійності та функціональної безпечності технічних систем (будівель та геодезичних мереж). Застосування методу простору станів та побудова надійнішої моделі геодезичної мережі у вигляді графа станів і переходів. За допомогою побудованої моделі у ПК MathCad визначити функцію готовності, коефіцієнт готовності, ймовірність роботи до першої відмови, середній час роботи до першої відмови, частоту потрапляння в аварійну ситуацію. Аналіз можливості настання аварійної ситуації залежно від своєчасності технічного обслуговування (відновлення геодезичних пунктів) та заданого рівня надійності. Аналіз взаємозв'язку між показниками надійності і між показниками безпечності.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів. Існують чотири кількісні показники безпечності, які дозволяють оцінити рівень функціональної безпечності:

1. MCS (Minimal Cut Sets) – мінімальні перерізи;
2. $Q(t)$ – ймовірність появи аварійної ситуації;
3. RPN (Risk Priority Number) – коефіцієнт ризику;
4. $W(t)$ – частота відмов.

Мінімальні перерізи – це комбінації мінімальної кількості відмов елементів системи, що спричиняють аварійну ситуацію. Вилучення хоча б одного несправного елемента системи з комбінації мінімальної кількості відмов елементів системи унеможливує виникнення аварійної ситуації. Мінімальні перерізи дають змогу кількісно визначати найбільш критичні елементи системи з погляду ризику її експлуатації («слабкі місця» будівлі з максимальними значеннями деформацій). Сума мінімальних перерізів дає ймовірність виникнення аварійної ситуації.

Будь-яка технічна система (будівля, геодезична мережа) на початку досліджень

перебуває у працездатному безпечному стані. У процесі функціонування система у разі виходу з ладу її елементів може перейти через деякий час у непрацездатний стан. Розрізняють декілька підвидів непрацездатного стану: безпечний, критичний та катастрофічний.

Отже, постає завдання виявити момент часу, коли система може втратити функціональну безпечність і перейти до аварійного стану, загрожуючи здоров'ю та життю людей під час її експлуатації.

За результатами систематичного геомоніторингу за станом будівель та споруд можна виявити розвиток небезпечних деформацій та вжити відповідних заходів із посилення фундаментів будівлі. При цьому є сенс удосконалювати не просто геомоніторинг (як засіб для збору технічних даних спостережень і вимірів у процесі будівництва та здачі в експлуатацію будівлі), а науково-технічний супровід будівництва шляхом проведення досліджень з оцінки надійності вихідних опорних геодезичних пунктів.

Це передбачає обробку й активне використання отриманої за час геомоніторингу достовірної інформації з використанням методів оцінки надійності та безпечності для своєчасного прийняття оперативних рішень, які сприяють безпечному та якісному веденню будівельних робіт та експлуатації будівель та споруд.

Є ціла низка програмних засобів що дозволяють знаходити мінімальні перерізи:

– RAM Commander (ALD, <https://aldservice.com>) – один з найпотужніших;

– Fault Tree Analysis Software (ALD, <http://www.fault-tree-analysis-software.com/>) – онлайн інструмент;

– BlockSim (ReliaSoft, <http://www.reliasoft.com/>);

– TopEvent FTA (Reliotech, <http://www.fault-tree-analysis.com/>) –

безкоштовний програмний засіб;

– Fault Tree Analysis Software (Itemsoftware, <http://www.itemsoft.com/>).

У публікації [13] шляхом побудови дерева відмов та застосування програмного засобу TopEvent FTA знайдено мінімальні перерізи та визначено слабкі місця в геодезичній мережі.

Потужним інструментом, що дозволяє отримати мінімальні перерізи не з дерев відмов, а з графів станів переходів, постає *функція аварійності (ФА)*.

Функція аварійності – це залежність ймовірності виникнення в технічній системі сукупності непрацездатних станів, які спричиняють аварійну ситуацію внаслідок тривалої експлуатації. Тобто ФА, на відміну від дерева відмов, дозволяє врахувати показники безпечності і надійності. Дерево відмов не дозволяє показати вплив надійності на безпечність і при виявленні слабких місць потрібно заново перебудувати дерево. Для великих систем це дерево має 10^5 – 10^6 подій нижнього рівня, це буде трудомістким процесом, що вимагає багато часу. Тому більш перспективним бачиться *метод простору станів*.

У цьому методі можна побудувати працездатні стани і непрацездатні стани (безпечні, критичні та катастрофічні). Коли щось вийде з ладу, це не спричинить аварійну ситуацію, а буде лише «непрацездатним безпечним станом». Критичним (передаварійним) буде стан, за якого в разі виходу з ладу ще одного елемента технічна система перейде в катастрофічний стан (станеться аварійна ситуація).

Завдання досліджень – виявлення моментів часу можливості переходу системи у «непрацездатний критичний» і «непрацездатний катастрофічний» стани та своєчасне реагування шляхом вживання заходів щодо підтримання надійного безпечного працездатного стану системи.

Отже, комбінуючи розглянуті стани, можна отримати показник «функція аварійності», що має такі властивості:

1) Кількість функцій аварійності $Q_{Ai}(t)$ визначається кількістю мінімальних перерізів, що спричиняють аварійну ситуацію.

2) Значення ФА для конкретної тривалості експлуатації системи дорівнює значенню ймовірності існування мінімального перерізу, яке отримане за допомогою дерева відмов для такої самої тривалості експлуатації.

3) Значення об'єднання усіх функцій аварійності $Q_{Ai}(t)$ дорівнює ймовірності появи аварійної ситуації $Q_{AC}(t)$ на цьому інтервалі:

$$Q_{AC}(t) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - Q_{Ai}(t)), \quad (1)$$

де $Q_{Ai}(t)$ – i -та функція аварійності; k – кількість функцій аварійності.

ФА може набрати значення від 0 до 1.

$$Q_{AC}(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ f(t), & 0 \leq t \leq \infty. \\ 1, & t = \infty \end{cases} \quad (2)$$

Можна сказати, що аварійна функція є аналогом «мінімальних перерізів», проте якщо мінімальні перерізи є точками оцінки, тобто мають певне значення при певному часі, то ФА це є залежність від часу. Отже, за допомогою ФА ми бачимо, як змінюються у часі ці мінімальні перерізи. Для того, щоб її визначити, знаходять маску аварійності – логічну функцію, яка дозволяє виділити фактично траєкторії, що спричиняють аварійну ситуацію. Аварійних ситуацій може бути від 2 до 10. На одному дереві відмов ми побачимо лише одну аварійну ситуацію, отже, за наявності 10 аварійних ситуацій потрібно будувати 10 дерев відмов. У побудованому графі станів і переходів ми одночасно бачимо всі можливі ситуації, що розділені масками аварійних ситуацій.

Коефіцієнт ризику визначається мініаналізом, який дає змогу оцінити і якісні, і кількісні ризики експлуатації системи. *Частота відмов* – це швидкість потрапляння в аварійну ситуацію. Хоча ймовірність виникнення аварійної ситуації може бути велика, але якщо частота відмов низька, йде компенсування одного іншим. Функція частоти відмов є сумою добутоків інтенсивностей переходів у непрацездатний стан на ймовірності перебування у

працездатних станах, з яких система переходить у непрацездатний.

Основний показник, який дозволяє якісно і кількісно оцінити безпечність – мінімальні перерізи (які можна встановити з дерева відмов при визначенні безпечності).

До методів оцінювання надійності можна віднести: структурні схеми надійності; логіко-ймовірнісні методи; метод простору станів та вдосконалений метод простору стану. До методів аналізу безпечності можна віднести: дерево відмов; динамічні дерева відмов; дерева подій та бінарні діаграми рішень. Логіко-ймовірнісний метод (дерево відмов) застосовується і для аналізу надійності, і для аналізу безпечності. Проте аварійна ситуація в динамічних деревах відмов (для аналізу безпечності) буде відрізнятися схематично від звичайних дерев відмов для оцінки надійності технічної системи. Це дає можливість усунути наявні недоліки, що є у деревах відмов, побудованих для оцінювання надійності.

Бажаним є заданий рівень надійності ГМ (ймовірність безвідмовної роботи не менше 90 %) $P(t) \geq 0,9$. ГМ, що включає п'ять геодезичних пунктів, вийде з ладу (втратить надійність), якщо знищити (або змінити своє просторове положення) хоча б один із пунктів. Для забезпечення надійності ГМ, що включає 10 геодезичних пунктів, допускається втрата стабільного положення лише одного пункту. Якщо припустити, що для працездатного стану ГМ достатньо мати не менше половини стабільних геодезичних пунктів (50 % мережі замість 90 %), тоді ГМ, яка містить вісім пунктів за умови наявності не менше чотирьох надійних, стабільних пунктів, буде працездатною. Проте якщо вийде з ладу будь-який п'ятий пункт, тоді ГМ перейде в непрацездатний безпечний стан.

Застосуємо метод простору станів і побудуємо у вигляді графа станів і переходів надійнісну модель ГМ, що містить вісім геодезичних пунктів і може відновлюватися шляхом ремонту (у разі знищення геодезичних пунктів

встановлюють інші). Згенеруємо стани, в яких може перебувати ГМ (рис. 1).

Працездатні стани: S_1-S_5 (не менше 50 % стабільних геодезичних пунктів). Стан S_1 має вектор стану $(8,0)$, де 8 – кількість надійних, стабільних (працездатних) геодезичних пунктів; 0 – кількість

геодезичних пунктів що вийшли з ладу. Стан S_2 має вектор $(7,1)$, стан S_3 $(6,2)$ тощо.

Критеріїв, за якими можна визначити підвид непрацездатного стану ГМ, наразі не існує. В даному дослідженні приймемо: S_6 – безпечний; S_7 – критичний стан; S_8 і S_9 – катастрофічний (потребує повного відновлення ГМ).

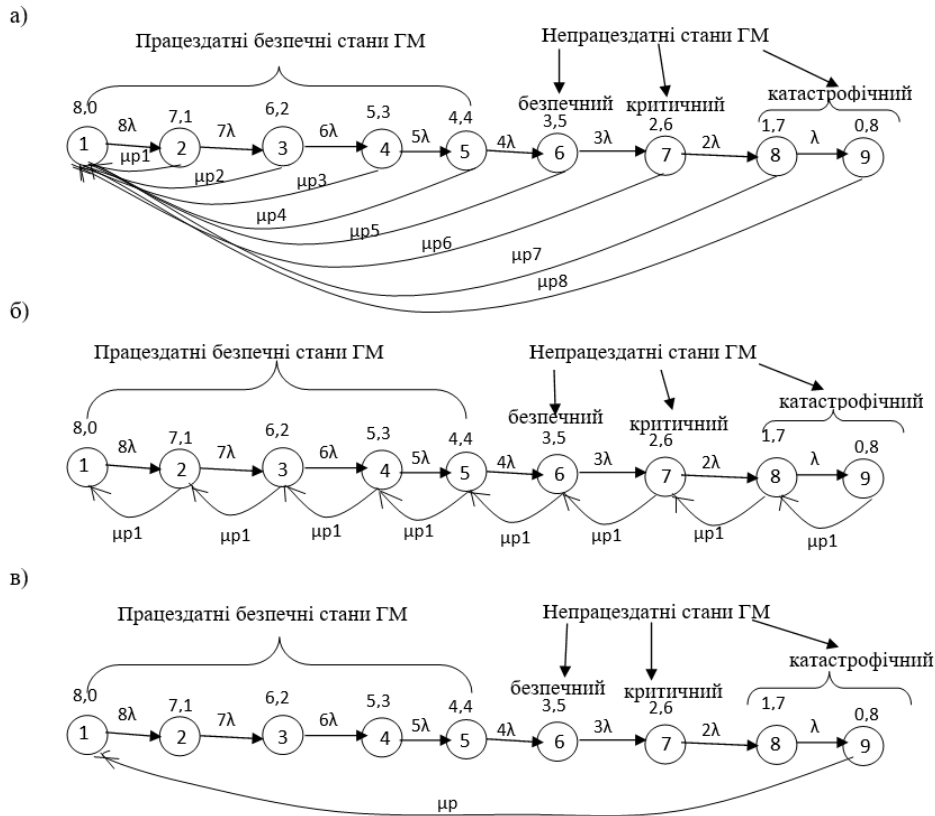


Рис. 1. Граф станів та переходів ГМ, що включає 8 геодезичних пунктів: а – з поточним відновленням до стану S_1 ; б – з поточним відновленням до попереднього стану S_{i-1} ; в – змішана схема поточного відновлення

При переході з першого стану в другий може вийти з ладу будь-який з восьми геодезичних пунктів (рис. 2).

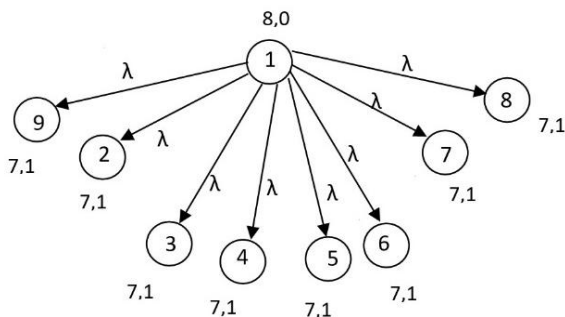


Рис. 2. Перехід ГМ зі стану S_1 у стан S_2

Інтенсивність переходу з першого стану (S_1) в другий (S_2) буде 8λ ; зі стану S_2 в стан

S_3 – 7λ тощо (рис. 1). Розглянемо та порівняємо декілька варіантів схем відновлення геодезичної мережі та оберемо найбільш доцільний для забезпечення заданого рівня надійності ГМ. Під час поточного відновлення потрібно відновити стан ГМ до стану S_1 (рис. 1, а), отже, інтенсивність відновлення буде залежати від кількості пунктів, що потрібно відновити і є обернено пропорційною величиною до часу відновлення. Якщо під час обстеження ГМ ми опинились у стані 9, то відповідно інтенсивність відновлення буде $\mu_{р8}$. Отже, для переходу в стан 1 знадобиться у 8 раз більше часу на відновлення восьми пунктів,

ніж на відновлення одного пункту (рис. 1, а).

Інтенсивність відновлення – це величина, обернено пропорційна часу відновлення:

$$\mu_p = \frac{1}{T_p} \quad (3)$$

Отже, $\mu_{p2} = \frac{1}{2T_p}; \mu_{p3} = \frac{1}{3T_p}; \mu_{p4} = \frac{1}{4T_p}; \mu_{p5} = \frac{1}{5T_p}; \mu_{p6} = \frac{1}{6T_p}; \mu_{p7} = \frac{1}{7T_p}; \mu_{p8} = \frac{1}{8T_p}$.

Для схеми, зображеної на рисунку 1, б, характерне відновлення лише одного геодезичного пункту, в результаті чого технічна система повертається у попередній стан (S_{i-1}). Для спрощення розрахунків будемо враховувати скорочений граф, об'єднавши всі непрацездатні стани (S₆–S₉) в один (S₆). Нас цікавить момент переходу системи з працездатного стану S₅ в непрацездатний S₆.

Складемо систему лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для графу, зображеного на рис. 1, а.

$$\frac{dP1(t)}{dt} = -8\lambda \cdot P1(t) + \mu_{p5} \cdot P6(t) + \mu_{p4} \cdot P5(t) + \mu_{p3} \cdot P4(t) + \mu_{p2} \cdot P3(t) + \mu_{p1} \cdot P2(t);$$

$$\frac{dP2(t)}{dt} = -7\lambda \cdot P2(t) - \mu_{p1} \cdot P2(t) + 8\lambda \cdot P1(t);$$

$$A = \begin{pmatrix} -8\lambda & \mu_{p1} & \mu_{p2} & \mu_{p3} & \mu_{p4} & \mu_{p5} \\ 8\lambda & -7\lambda - \mu_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7\lambda & -6\lambda - \mu_{p2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6\lambda & -5\lambda - \mu_{p3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5\lambda & -4\lambda - \mu_{p4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\lambda & -\mu_{p5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.12 & 0.1 & 0.05 & 0.033 & 0.025 & 0.02 \\ 0.12 & -0.205 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.105 & -0.14 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.09 & -0.108 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.075 & -0.085 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & -0.02 \end{pmatrix}$$

Розрахуємо в програмному засобі Mathcad:

– середній час перебування ГМ в станах нормального функціонування (S₁–S₅) до першої відмови:

$$T = \begin{pmatrix} 51.789 \\ 30.316 \\ 22.737 \\ 18.889 \\ 16.667 \end{pmatrix} \text{ днів}$$

– середній час роботи ГМ до першої відмови МТТФ (Mean time to failure):

$$\frac{dP3(t)}{dt} = -6\lambda \cdot P3(t) - \mu_{p2} \cdot P3(t) + 7\lambda \cdot P2(t);$$

$$\frac{dP4(t)}{dt} = -5\lambda \cdot P4(t) - \mu_{p3} \cdot P4(t) + 6\lambda \cdot P3(t);$$

$$\frac{dP5(t)}{dt} = -4\lambda \cdot P5(t) - \mu_{p4} \cdot P5(t) + 5\lambda \cdot P4(t);$$

$$\frac{dP6(t)}{dt} = -\mu_{p5} \cdot P6(t) + 4\lambda \cdot P5(t).$$

Матричний вигляд скороченого графа станів і переходів ГМ, що має 8 пунктів (рис. 1, а):

$$MG = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 8\lambda \\ 2 & 1 & \mu_{p1} \\ 2 & 3 & 7\lambda \\ 3 & 1 & \mu_{p2} \\ 3 & 4 & 6\lambda \\ 4 & 1 & \mu_{p3} \\ 4 & 5 & 5\lambda \\ 5 & 1 & \mu_{p4} \\ 5 & 6 & 4\lambda \\ 6 & 1 & \mu_{p5} \end{pmatrix}$$

Нехай час відновлення $T_p = 10$ днів, інтенсивність відмов $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $\mu_{p1} = 0,1$.

Формуємо повну матрицю (A) інтенсивності переходів із стану в стан геодезичної мережі:

$$MTTF = \sum_k T_k \approx 140 \text{ днів}$$

– середній час роботи системи між відмовами МТБФ (Mean time between failures):

$$MTBF = MTTF + T_p \approx 150 \text{ днів.}$$

На рисунку 3 наведено розв'язки системи лінійних диференціальних рівнянь у Mathcad за допомогою методу Рунге–Кутта–Мерсона.

	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0
1	5.648	0.374	0.334	0.199	0.073
2	11.297	0.235	0.233	0.235	0.174
3	16.945	0.181	0.167	0.19	0.195
4	22.593	0.148	0.131	0.147	0.173
5	28.242	0.123	0.107	0.117	0.143
6	33.89	0.102	0.088	0.095	0.116
7	39.538	0.085	0.073	0.079	0.095
8	45.187	0.07	0.061	0.065	0.078
9	50.835	0.058	0.051	0.054	0.065
10	56.484	0.048	0.042	0.045	0.054
11	62.132	0.04	0.035	0.037	0.045
12	67.78	0.033	0.029	0.031	0.037
13	73.429	0.028	0.024	0.026	0.031
14	79.077	0.023	0.02	0.021	0.025
15	84.725	0.019	0.017	0.018	...

MR -> Rkadapt(P0,0.2,5TS,20,DI) =

	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0
1	0.249	0.943	0.056	1.459·10 ⁻³	2.186·10 ⁻⁵
2	0.497	0.89	0.104	5.474·10 ⁻³	1.648·10 ⁻⁴
3	0.746	0.842	0.146	0.012	5.241·10 ⁻⁴
4	0.994	0.797	0.182	0.019	1.171·10 ⁻³
5	1.243	0.756	0.213	0.028	2.156·10 ⁻³
6	1.491	0.718	0.24	0.038	3.512·10 ⁻³
7	1.74	0.683	0.262	0.049	5.259·10 ⁻³
8	1.988	0.651	0.281	0.06	7.403·10 ⁻³
9	2.237	0.621	0.297	0.071	9.944·10 ⁻³
10	2.485	0.594	0.31	0.083	0.013
11	2.734	0.568	0.32	0.094	0.016
12	2.982	0.544	0.328	0.105	0.02
13	3.231	0.522	0.334	0.116	0.024
14	3.479	0.502	0.339	0.127	0.028
15	3.728	0.483	0.342	0.137	...

MR -> Rkadapt(P0,0.5,5-TS,1000,DI) =

Рис. 3. Розрахунок системи диференціальних рівнянь у Mathcad для схеми з поточним відновленням до стану S₁

Застосування методу простору станів дозволяє визначити та проаналізувати стани, в яких перебуває ГМ, та переходи між ними. Сумарна ймовірність перебування системи у працездатних станах є функцією готовності KG(t), а сумарна швидкість, із якою система переходить із множини працездатних станів у множину непрацездатних, – функцією інтенсивності потоку відмов w(t). Функція w(t) характеризує, як часто об’єкт стає непрацездатним, а функція KG(t) –

відношення тривалості перебування у працездатному стані до тривалості його експлуатації, тобто це є ймовірність працездатності ГМ у вказаний момент часу.

Для кращої візуалізації отриманих розрахунків побудуємо графіки: ймовірності роботи до першої відмови (рис. 4, а); функції готовності KG(t) (рис. 4, б) та графік частоти відмов w(t) (рис. 4, в). Коефіцієнт готовності KG = 0,737; частота відмов w ≈ 0,006.

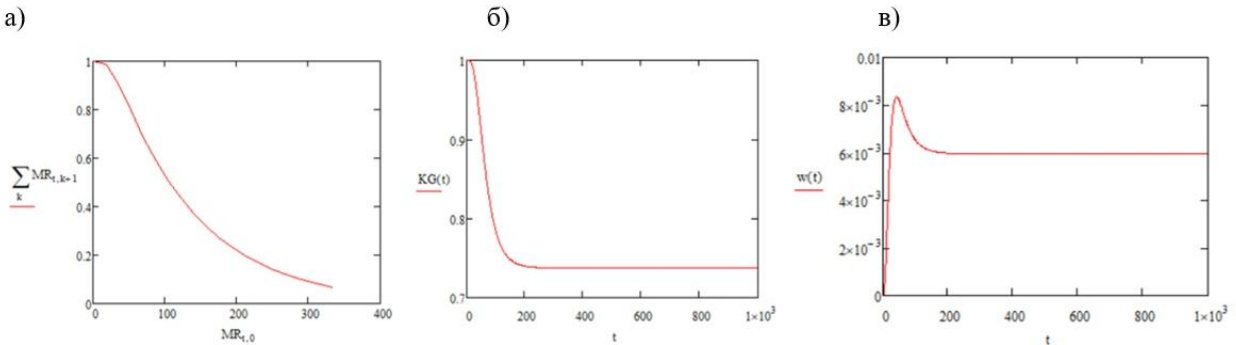


Рис. 4. Графіки для схеми поточного відновлення ГМ до стану S₁:

а – ймовірності роботи до першої відмови MR(t); б – функції готовності KG(t); в – частоти відмов w(t)

Розглянемо схему (рис. 1, б) коли відновлення відбувається до попереднього стану за рахунок відновлення лише одного пункту, що займає значно менше часу. Запишемо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dP1(t)}{dt} &= -8\lambda \cdot P1(t) + \mu_{p1} \cdot P2(t); \\ \frac{dP2(t)}{dt} &= -7\lambda \cdot P2(t) - \mu_{p1} \cdot P2(t) + 8\lambda \cdot P1(t); \\ \frac{dP3(t)}{dt} &= -6\lambda \cdot P3(t) - \mu_{p1} \cdot P3(t) + 7\lambda \cdot P2(t); \\ \frac{dP4(t)}{dt} &= -5\lambda \cdot P4(t) - \mu_{p1} \cdot P4(t) + 6\lambda \cdot P3(t); \\ \frac{dP5(t)}{dt} &= -4\lambda \cdot P5(t) - \mu_{p1} \cdot P5(t) + 5\lambda \cdot P4(t); \end{aligned}$$

$$\frac{dP6(t)}{dt} = -\mu_{p1} \cdot P6(t) + 4\lambda \cdot P5(t).$$

Повна матриця інтенсивності переходів зі стану в стан геодезичної мережі (рис. 1, б) набуде вигляду:

$$A = \begin{pmatrix} -8\lambda & \mu_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8\lambda & -7\lambda - \mu_{p1} & \mu_{p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7\lambda & -6\lambda - \mu_{p1} & \mu_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6\lambda & -5\lambda - \mu_{p1} & \mu_{p1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5\lambda & -4\lambda - \mu_{p1} & \mu_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\lambda & -\mu_{p1} \end{pmatrix}$$

Середній час перебування в працездатних станах до першої відмови:

$$T = \begin{pmatrix} 56.442 \\ 57.731 \\ 50.617 \\ 35.556 \\ 16.667 \end{pmatrix} \text{ днів}$$

MTTF \approx 217 днів; MTBF \approx 227 днів; KG = 0,914; $w \approx$ 0,011 (рис. 5). Аналіз графіків (рис. 5) показав, що завдяки довшому перебуванню у працездатних станах ГМ при поточному відновленні до попереднього стану, коефіцієнт готовності виріс, проте майже вдвічі збільшилась частота відмов.

Розглянемо випадок, коли відбувається повне відновлення ГМ, що включає вісім пунктів (рис. 1, в). Можна перейти у стан S1 лише з непрацездатного стану (S6), при

цьому залишимо без зміни інтенсивність відмови λ і час відновлення T_p .

Аналіз побудованих графіків (рис. 6) та розрахунки показали значно менші значення кількісних характеристик готовності (KG = 0,541; $w \approx$ 0,017) і середнього часу роботи до першої відмови (MTTF \approx 59 днів) і між відмовами (MTBF \approx 69 днів) порівняно з аналогічними показниками до схем із поточним відновленням ГМ (рис. 1, а, б).

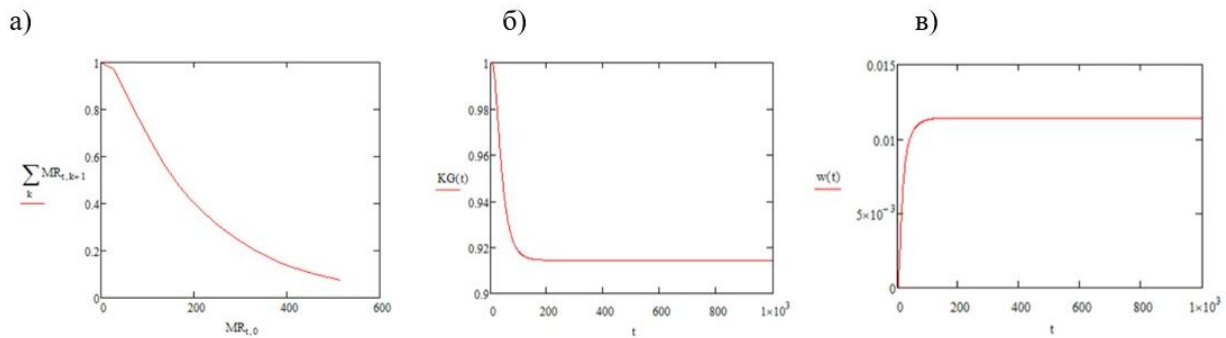


Рис. 5. Графіки поточного відновлення ГМ до стану S_{i-1} : а – $MR(t)$; б – $KG(t)$; в – $w(t)$

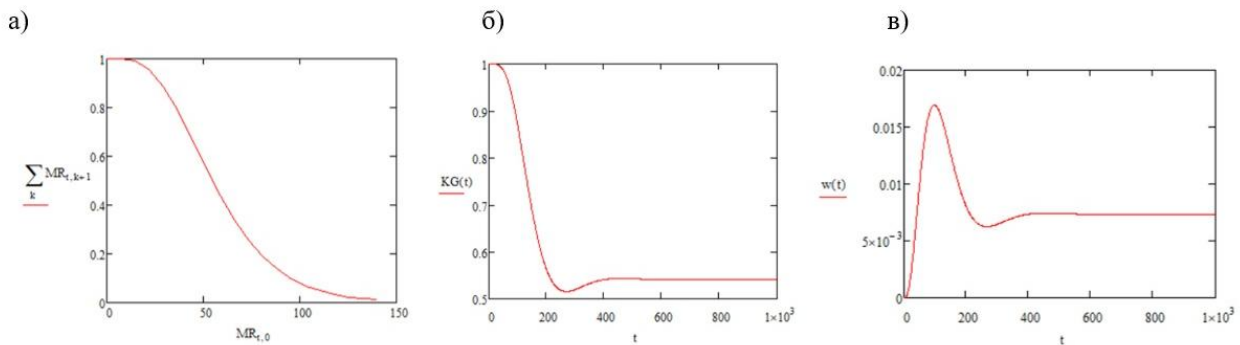


Рис. 6. Графіки повного відновлення ГМ: а – $MR(t)$; б – $KG(t)$; в – $w(t)$

Це дозволяє зробити висновок, що за однакових показників інтенсивності відмов λ і часу відновлення T_p важливою стає періодичність проведення обстежень (моніторингу) геодезичних пунктів, за результатами якого можна своєчасно відновити ГМ до працездатного стану. Найгірші показники функції готовності отримані за повного відновлення ГМ (рис. 1, в), найкращі – за поточного відновлення у попередній стан ГМ (рис. 1, б).

Якщо скоротити вдвічі час відновлення ($T_p = 5$ днів), тоді за першою схемою отримаємо збільшене значення KG = 0,929,

MTTF \approx 326 днів; у випадку другої схеми ці показники суттєво зросли KG = 0,992 і MTTF \approx 956 днів і стали оптимальним варіантом проектування ГМ; за схемою повного відновлення (рис. 1, в) незначне поліпшення показника KG = 0,702.

Висновки та перспективи розвитку напрямку досліджень. Інженерно-геодезичні роботи становлять невід’ємну частину технології виконання інженерно-будівельних робіт, які повинні забезпечувати якість і надійність споруд. Забезпечення надійної та безпечної, довготривалої експлуатації будинків і споруд залежить від багатьох факторів, у

тому числі від достовірності даних геодезичного супроводу будівництва. Для цього на територіях, що підлягають забудові, рекомендується обирати стабільні, надійні геодезичні пункти для створення локальних геодезичних мереж для геодезичного супроводу будівництва.

Пропонується застосовувати поточне відновлення ГМ шляхом періодичного моніторингу стабільного стану геодезичних пунктів і проведення їх планових обстежень, не доводячи ГМ до критичного та катастрофічного непрацездатного стану.

Через те, що процес виходу з ладу елементів будівельних конструкцій має випадковий характер, стає неможливим визначення точного терміну служби будівлі. З метою своєчасного вживання інженерних заходів до підсилення фундаментів будівель

рекомендується проводити систематичний геомоніторинг розвитку деформаційних процесів, використовуючи стабільні (надійні) геодезичні пункти.

Важливою проблемою, яку потрібно вирішити на етапі проектування ГМ, стає вибір оптимальної періодичності і тривалості проведення відновлення мережі. Потрібно врахувати, що періодичність відновлення ГМ впливає на частоту появи аварійних ситуацій та на функцію готовності. Доцільним бачиться зниження часу робіт на відновлення ГМ, що у випадку зі схемою поточного відновлення до попереднього стану дозволить суттєво підвищити кількісні характеристики готовності ($K_G = 0,992$) і середній час роботи до першої відмови ($MTTF \approx 956$ днів).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. URL: <https://drive.google.com/file/d/1PGwFjEjtkl55VtcQ8YFUauLLiR2qreZf/view>
2. ДБН В.1.2-5:2007. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=21673
3. ДБН В.1.2-12:2008. Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=45889
4. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. URL: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2018/12/DBN-V1214-2018.pdf>
5. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25911
6. ДСТУ Б В.2.1-30:2014. Ґрунти. Методи вимірювання деформацій основ будинків і споруд. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59085
7. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. URL: <https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/dstu-b-v-1-2-3-2006-progini-perem-shchennya.pdf>
8. ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Виконання вимірювань, розрахунків та контроль точності геометричних параметрів. Настанова. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25920
9. Бакулін Є. А. Визначення надійності будівель підвищеного рівня відповідальності з урахуванням факторів ризику : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Київ, 2010. 197 с.
10. Барашиков А. Я., Малишев О. М. Оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд : навч. посіб. для студ. вищих навч. закл. Київ : Основа, 2008. 320 с. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/572>
11. Червинський Я. Й., Петраков О. О., Зоценко М. Л., Винников Ю. Л. Дослідження технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах. *Наука та будівництво*. 2014. № 2. С. 17–24. URL: <http://www.niisk.com/vidavnictvo/17-24-1.pdf>
12. Lysnytska K., Pershakov V. Оцінка надійності будівлі на прикладі житлового будинку. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2018. № 1 (3). С. 58–67. URL: <http://bctp.knuba.edu.ua/article/view/184013>
13. Бегічев С. В., Ішутіна Г. С., Тругуб О. В. Логіко-ймовірнісне моделювання відмов геодезичних мереж. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). С. 33–46. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.33.1057>

REFERENCES

1. *DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia* [System for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and influences. Design standards]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1PGwFjEjtkl55VtcQ8YFUauLLiR2qreZf/view> (in Ukrainian).

2. *DBN V.1.2-5:2007. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Naukovo-tekhnichnyi suprovid budivelnykh ob'ektiv* [System for ensuring the reliability and safety of construction objects. Scientific and technical support of construction objects]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=21673 (in Ukrainian).
3. *DBN V.1.2-12:2008. Budivnytstvo v umovakh ushchilненоi zabudovy. Vymohy bezpeky* [Construction in the conditions of compacted buildings. Security requirements.]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=45889 (in Ukrainian).
4. *DBN V.1.2-14:2018. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud* [General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures] URL: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2018/12/DBN-V1214-2018.pdf> (in Ukrainian).
5. *DBN V.1.3-2:2010. Heodezychni roboty u budivnytstvi* [Geodetic works in construction]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25911 (in Ukrainian).
6. *DSTU B V.2.1-30:2014. Grunty. Metody vymyriuvannia deformatsii osnov budynkiv i sporud* [Soils. Methods of measuring deformations of foundations of buildings and structures]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59085 (in Ukrainian).
7. *DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia* [Deflections and displacements. Design requirements]. URL: <https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/dstu-b-v-1-2-3-2006-progini-perem-shchennya.pdf> (in Ukrainian).
8. *DSTU-N B V.1.3-1:2009. Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametriv u budivnytstvi. Vykonnannia vymyriuvan, rozrakhunok ta kontrol tochnosti heometrychnykh parametriv. Nastanova* [System for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction. Performance of measurements, calculation and accuracy control of geometric parameters. Attitude]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25920 (in Ukrainian).
9. Bakulin Ye.A. *Vyznachennia nadiinosti budivel pidvyshchenoho rivnia vidpovidalnosti z urakhuvanniam faktoriv ryzyku : dys... kand. tekhn. nauk : 05.23.01* [Determining the reliability of buildings with an increased level of responsibility, taking into account risk factors : diss... Cand. Sc. (Tech.) : 05.23.01]. Kyiv, 2010, 197 p. (in Ukrainian).
10. Barashykov A.Ya. and Malyshev O.M. *Otsiniuvannia tekhnichnoho stanu budivel ta inzhenernykh sporud* [Assessment of the technical condition of buildings and engineering structures]. *Osnova* [Basis]. 2008, 320 p. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/572> (in Ukrainian).
11. Chervynskiy Ya.Yo., Petrakov O.O., Zotsenko M.L. and Vynnykov Yu.L. *Doslidzhennia tekhnichnoho stanu budivel ta sporud pry nebezpechnykh heolohichnykh protsesakh* [Research of the technical condition of buildings and structures during dangerous geological processes]. *Nauka ta budivnytstvo* [Science and Construction] 2014, no. 2, pp. 14–24. URL: <http://www.niisk.com/vidavnictvo/17-24-1.pdf> (in Ukrainian).
12. Lysnytska K. and Pershakov V. *Otsinka nadiinosti budivli na prykladi zhytlovoho budynku* [Assessment of building reliability using the example of a residential building]. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka* [Building Structures. Theory and Practice]. 2018, no. 1 (3), pp. 58–67. URL: <http://bctp.knuba.edu.ua/article/view/184013> (in Ukrainian).
13. Biehichev S.V., Ishutina H.S. and Tregub O.V. *Lohiko-ymovirnisne modeliuvannia vidmov heodezychnykh merezh* [Logical-probabilistic modeling of failures of geodesic networks]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 3 (021), pp. 33–46. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.33.1057> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 26.08.2024.