

ОГЛЯД МЕХАНІЗМІВ ROOT CAUSE АНАЛІЗУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Телекомунікаційні мережі є невід'ємною частиною сучасного інформаційного суспільства, забезпечуючи передачу даних та спілкування між мільйонами користувачів по всьому світу. Складність та масштаби цих мереж постійно зростають, що підвищує вимоги до їх надійності та стабільності. Одним з ключових завдань у забезпеченні ефективної роботи телекомунікаційних мереж є виявлення та усунення першопричин збоїв і аномалій, які можуть суттєво вплинути на якість обслуговування кінцевих користувачів. Аналіз першопричин (RCA) є потужним інструментом для виявлення першопричин проблем, запобігання їх повторенню та підвищення загальної надійності телекомунікаційних мереж. У статті представлено детальний огляд сучасних методів та інструментів RCA, що використовуються в телекомунікаційних мережах. Зокрема, розглядаються такі методи, як аналіз діаграми «риб'яча кістка», метод «п'яти причин», аналіз дерева несправностей, а також застосування машинного навчання для аналізу великих об'ємів даних. Кожен з цих підходів має свої переваги та недоліки, а їх комплексне використання дозволяє підвищити точність та ефективність виявлення першопричин проблем. Практичні приклади демонструють ефективність застосування різних методів RCA для вирішення конкретних проблем в телекомунікаційних мережах. Наприклад, використання аналізу діаграми «риб'яча кістка» та методу «п'яти причин» дозволяє виявити основні причини затримок у роботі мережі та проблеми з обладнанням на базових станціях. Впровадження систем прогнозування відмов на основі машинного навчання значно підвищує надійність мережі, дозволяючи на ранніх стадіях виявляти потенційні проблеми та вживати необхідних технічних заходів. Окреслено перспективи розвитку RCA в телекомунікаційних мережах. Основна увага приділяється розробці адаптивних і самонавчальних машинних систем, здатних динамічно реагувати на зміну мережесевих умов. Використання більш складних алгоритмів штучного інтелекту та інструментів прогнозування потенційних проблем дозволить суттєво підвищити ефективність RCA та забезпечити високу якість телекомунікаційних послуг.

Ключові слова: телекомунікації, надійність мереж, аналіз збоїв, машинне навчання, прогнозування проблем, стабільність системи, якість обслуговування, обсяг даних, діагностика мереж.

Вступ. У сучасному світі телекомунікаційні мережі грають ключову роль у забезпеченні безперервного обміну інформацією та підтримці критично важливих комунікаційних послуг. Зростання складності та масштабів цих мереж підвищує вимоги до їх надійності, доступності та якості обслуговування. Одним із головних завдань забезпечення безперебійного функціонування телекомунікаційних мереж є виявлення та усунення першопричин виникнення збоїв та аномалій, що може значно вплинути на якість обслуговування кінцевих користувачів.

Root Cause аналіз (RCA) є ефективним інструментом, що дозволяє ідентифікувати основні причини проблем у мережах, запобігаючи їх повторному виникненню. RCA використовує різні методики та механізми, включаючи машинне навчання, алгоритми штучного інтелекту, аналіз великих даних та інші сучасні технології для глибокого аналізу інцидентів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. А. Мащак розглядає моделі для оцінки ризику, надає цінну інформацію про ризики в системах зв'язку [2]. Р. Одарченко досліджує архітектуру сучасних систем моніторингу [3]. С. Сазонова досліджує оцінку ризиків стратегічного управління телекомунікаційними підприємствами в умовах цифрової економіки [4]. В. Chen, J. Li та J. Wei пропонують графовий алгоритм для RCA, що є важливим вкладом

у розвиток методів аналізу кореневих причин в телекомунікаційних мережах, демонструє застосування передових алгоритмів для виявлення причин збоїв [5]. A. Gómez-Andrades, P. Muñoz, I. Serrano та R. Varco досліджують автоматичний RCA для LTE мереж на основі неконтрольованих технік [6, 7]. Це дослідження є важливим прикладом застосування сучасних методів машинного навчання в RCA. M. Schaaf, G. Wilke, T. Mikkola, E. Bunn, I. Hela, H. Wache та S. G. Grivas досліджують своєчасний RCA для складних ситуацій у великих масштабах телекомунікаційних мереж, що важливо для розуміння складності та масштабів проблем у мережах [8].

Варто зазначити, що існує значна кількість досліджень, які торкаються різних аспектів телекомунікаційних мереж, проте обмежена кількість публікацій, які детально розглядають методи RCA у цьому контексті. Зокрема, роботи, що використовують сучасні підходи, такі як машинне навчання та штучний інтелект для автоматизації процесів RCA, представлені не в повному обсязі. Це свідчить про необхідність подальших досліджень у цій галузі для забезпечення більш ефективного виявлення та усунення корінних причин збоїв у телекомунікаційних мережах.

Мета статті - огляд механізмів Root Cause аналізу телекомунікаційних мереж.

Виклад основного матеріалу. Root Cause аналіз (RCA) у телекомунікаційних мережах використовує різноманітні методики та інструменти для ідентифікації основних причин збоїв та аномалій [4].

Автоматичний пошук кореневої причини несправності вирішує Correlation Engine [6] – спеціалізована платформа для реалізації різних алгоритмів кореляції, аналізу впливу на сервіси (Services Impact Analysis) і відновлення сервісів (Runbook Automation).

Correlation Engine використовує алгоритми машинного навчання для аналізу великих обсягів даних, зібраних з різних елементів телекомунікаційної мережі. Це включає дані про події, журнали системи, показники продуктивності та інші важливі метрики. Використовуючи ці дані, платформа може автоматично виявляти аномалії та кореляції між різними подіями, що дозволяє швидко ідентифікувати кореневі причини несправностей.

Однією з ключових переваг Correlation Engine є її здатність проводити аналіз впливу на сервіси (Services Impact Analysis). Відповідно платформа може визначити, які сервіси і користувачі можуть підлягати впливам певних несправностей. Такий підхід дозволяє операторам мережі визначити пріоритети власних дій, спрямовуючи зусилля на найкритичніші області, що впливають на якість обслуговування кінцевих користувачів [3]. Крім того, Correlation Engine підтримує функції автоматизації відновлення сервісів (Runbook Automation). Це означає, що платформа може автоматично запускати процедури відновлення у випадку виявлення певних типів несправностей. Наприклад, якщо виявлено, що відмова обладнання пов'язана з конкретною проблемою, вона може автоматично виконати сценарій, що передбачає перезапуск обладнання або зміну налаштувань конфігурації, щоб швидко відновити нормальну роботу мережі.

Платформа також підтримує функції зворотного зв'язку та самонавчання, що дозволяє їй постійно покращувати свої алгоритми аналізу та виявлення несправностей на основі нових даних і зворотного зв'язку від операторів мережі. Це забезпечує постійне вдосконалення точності і швидкості ідентифікації кореневих причин проблем, що є критично важливим для підтримання високої надійності та стабільності телекомунікаційних мереж.

Аналіз причинно-наслідкових діаграм (Fishbone Diagram) дозволяє структурувати можливі причини проблем у вигляді діаграми «риб'ячої кістки». Кожна «кістка» відповідає певній категорії можливих причин (наприклад, обладнання, програмне забезпечення, процеси, люди), що дозволяє систематизувати та детально аналізувати кожен фактор [1].

Метод п'яти «чому» (5 Whys) передбачає послідовне задавання питання «чому?» для виявлення корінної причини проблеми. Наприклад, у випадку збоїв у мережі, відповідь на перше «чому?» може вказати на відмову обладнання, а наступні «чому?» допоможуть виявити глибші причини, такі як неправильна конфігурація або неякісне технічне обслуговування.

Аналіз дерева несправностей (Fault Tree Analysis) [2] дозволяє графічно моделювати взаємозв'язки між різними компонентами системи та визначати, як їх відмова може призвести до загальної системної несправності. Цей підхід ефективний для комплексного аналізу складних мережевих систем. Наприклад, в контексті телекомунікаційних мереж, ФТА можна застосувати для аналізу відмови базової станції. Верхній рівень дерева представляє повну відмову базової станції, тоді як нижчі рівні дерева включають можливі причини цієї відмови, такі як збої в електроживленні, програмні збої, апаратні збої та інші. Кожна з цих причин може бути розгалужена на більш дрібні компоненти та події, що можуть спричинити їх.

Цей метод також дозволяє визначити імовірності виникнення кожної з подій, що входять до дерева несправностей. Завдяки цьому можна провести кількісний аналіз ризиків, пов'язаних з роботою мережевої системи. Наприклад, якщо відомі імовірності збоїв окремих компонентів, можна обчислити загальну імовірність системної несправності, що надає можливість визначати пріоритети прикладених зусиль щодо підвищення надійності системи, спрямовуючи ресурси на найбільш критичні вузли та компоненти.

ФТА також дозволяє ідентифікувати так звані «одиночні точки відмови» (single points of failure), які є критичними компонентами системи, відмова яких призведе до загальної несправності. Виявлення таких точок є надзвичайно важливим для проектування та експлуатації надійних телекомунікаційних систем, оскільки їх дублювання або зміцнення може значно підвищити стійкість мережі до збоїв.

Більш того, аналіз дерева несправностей може бути інтегрований з іншими методами аналізу, такими як аналіз впливу та критичності збоїв (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), що дозволяє створити більш детальну та всебічну картину надійності системи. Комбінування різних методів аналізу допомагає забезпечити більш точну і надійну діагностику проблем, а також розробити ефективні стратегії запобігання збоєм.

Використання алгоритмів машинного навчання та аналізу великих даних дозволяє автоматизувати процес виявлення та аналізу корінних причин, що значно підвищує ефективність управління телекомунікаційними мережами. Наприклад, за допомогою кластерного аналізу можна ідентифікувати аномалії у великих обсягах телекомунікаційних даних та визначити патерни, що призводять до збоїв. Це дозволяє операторам мережі не лише швидше виявляти проблеми, але й передбачати їх виникнення.

Одним із прикладів успішного використання алгоритмів машинного навчання є застосування нейронних мереж для прогнозування збоїв. Нейронні мережі здатні аналізувати величезні обсяги даних у реальному часі, виділяючи ключові фактори, що можуть сигналізувати про можливий збій. Зокрема, нейронні мережі можуть враховувати різноманітні параметри, такі як зміни в параметрах сигналу, статистику використання мережевих ресурсів, історичні дані про збої та інші показники. Завдяки цьому, оператори можуть заздалегідь вживати необхідних заходів для запобігання можливим проблемам.

Алгоритми машинного навчання дозволяють створювати моделі прогнозування, які можуть самонавчатися та адаптуватися до змін у мережі, що особливо важливо в умовах постійно зростаючої складності та динамічності телекомунікаційних систем. Моделі можуть автоматично оновлювати свої параметри, враховуючи нові дані та тренди, що з'являються, що дозволяє зберігати їхню ефективність на високому рівні протягом тривалого часу.

Інший приклад ефективного використання алгоритмів машинного навчання – застосування методів глибокого навчання для аналізу журналів подій та логів системи. За допомогою таких методів можна швидко ідентифікувати послідовності подій, що передують збою, та визначити ключові індикатори, що можуть вказувати на наближення проблеми, що дозволяє операторам своєчасно втручатися та проводити необхідні корегувальні дії.

У випадку, якщо у великій телекомунікаційній мережі виявлено періодичні затримки передачі даних, що спричиняло незадоволення користувачів та впливало на якість наданих послуг. Ця проблема має значний вплив на функціонування критично важливих сервісів, таких як відеоконференції, онлайн-ігри та інші реальні часи. Для її вирішення доцільно застосувати

аналіз причинно-наслідкових діаграм та метод п'яти «чому», що дозволило виявити глибинні причини затримок. Розглянемо практичну реалізацію використання методу.

Початковий етап аналізу може виявити, що затримки виникають переважно у пікові години, коли навантаження на мережу є максимальним. Розглянувши діаграму причинно-наслідкових зв'язків, встановлено, що основною причиною затримок є перенавантаженість мережеских вузлів. Метод п'яти «чому» дозволяє глибше дослідити цю проблему.

Затримки передачі даних у пікові години виникають через перенавантаження мережеских вузлів. Отже перше «чому» фокусується на тому, що вузли перевантажуються через високе навантаження на мережу в ці години. Друге «чому» пояснює, що високе навантаження призводить до перенавантаження вузлів через їх недостатню пропускну здатність для обробки всього трафіку в вищезгадані періоди часу. Третє «чому» підкреслює, що вузли мають недостатню пропускну здатність через що й відбувається перенавантаження вузлів. Четверте «чому» вказує на те, що вузли мають недостатню пропускну здатність через неправильно налаштовану маршрутизацію трафіку, яка створює "вузькі місця" в мережі. І п'яте «чому» пояснює, що конфігурації маршрутизаторів не оновлюються через брак ресурсів або недоліки в процесах модернізації мережевого обладнання.

Подальший детальний аналіз підтвердив, що неправильно налаштована маршрутизація трафіку спричиняє накопичення даних у певних вузлах, тоді як інші вузли залишаються недовантаженими. Це призвело до нерівномірного розподілу навантаження по мережі та зумовило затримки у передачі даних.

Для вирішення цієї проблеми доцільним є проведення оновлення конфігурації маршрутизаторів, запровадження нових алгоритмів балансування навантаження, що дозволяють рівномірно розподілити трафік між усіма мережескими вузлами. У результаті, повинна зменшитися затримка у передачі даних та підвищитися загальна ефективність роботи мережі.

Після впровадження цих змін необхідним є проведення моніторингу роботи мережі, який повинен підтвердити стабільне зниження затримок навіть у пікові години. Користувачі мережі мають помітити покращення якості наданих послуг, що в подальшому позитивно вплине на рівень їх задоволеності. Відповідно застосування аналізу причинно-наслідкових діаграм та методу п'яти «чому» дозволяє виявити та усунути ключову проблему, що впливала на якість роботи телекомунікаційної мережі.

В іншому випадку, під час експлуатації базової станції мобільного зв'язку було зафіксовано відмову обладнання, що призвело до втрати покриття в регіоні. Ця ситуація викликала значні незручності для користувачів, оскільки вони втратили можливість здійснювати дзвінки, користуватися мобільним інтернетом та іншими послугами зв'язку. Для вирішення цієї проблеми та запобігання її повторенню використано метод аналізу дерева несправностей.

Перш за все, необхідно створити детальну діаграму дерева несправностей, яка допоможе ідентифікувати та структуровано проаналізувати всі можливі причини відмови. Розглядаються різні фактори, включаючи механічні, електричні та зовнішні умови, які могли спричинити збій.

Додатковий детальний аналіз компонентів джерела живлення може виявити, що проблемою є неякісні кабелі живлення, які не витримували необхідного навантаження і призводять до нестабільної роботи обладнання.

Для запобігання подібним інцидентам у майбутньому, усі неякісні кабелі повинні бути замінені на нові, відповідної якості, що мали сертифікати відповідності стандартам. Крім того, доцільним є впровадження додаткових процедур контролю якості під час закупівлі та встановлення кабельної продукції, що дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційно дефектні компоненти.

Завдяки цим заходам досягається не тільки відновлення нормального функціонування базової станції, але й значно підвищується надійність її роботи в майбутньому. Оператори

зв'язку повинні отримали рекомендації щодо регулярного моніторингу стану джерел живлення та перевірки якості кабельної продукції, що дозволить запобігти виникненню аналогічних проблем в інших регіонах. Аналіз дерева несправностей є ефективним інструментом для ідентифікації та усунення кореневих причин відмов у телекомунікаційних мережах.

Аналізуючи великі обсяги історичних даних про збої та стан обладнання, система здатна ідентифікувати патерни, що передують збоєм. Зокрема, вона здатна виявляти характерні ознаки, такі як частота появи певних помилок, зміни в поведінці мережі або деградація параметрів обладнання, що сигналізують про наближення збою. Крім того, використання таких аналітичних інструментів сприяє оптимізації ресурсів і знижує витрати на технічне обслуговування. Оператори можуть планувати заміну та ремонт обладнання на основі фактичного стану та прогнозованого часу до збою, замість традиційних календарних графіків, що дозволяє уникати зайвих витрат на обслуговування справного обладнання та зосередити ресурси на критичних ділянках мережі.

Представлені приклади демонструють ефективність використання різних методів та інструментів RCA для виявлення та усунення корінних причин проблем у телекомунікаційних мережах. Інтеграція цих підходів у практику експлуатації мереж дозволяє значно підвищити їх надійність та якість обслуговування кінцевих користувачів.

Висновки. Отже, можна зробити висновок, що виявлення та усунення першопричин збоїв у телекомунікаційних мережах є критично важливим завданням для забезпечення їх надійної та ефективно роботи. Огляд сучасних механізмів RCA показав, що використання передових технологій, таких як машинне навчання, аналіз великих даних та штучний інтелект, значно підвищує ефективність і точність виявлення основних причин проблем. Незважаючи на існуючі виклики, пов'язані з інтеграцією та масштабуванням цих технологій, їх подальший розвиток і впровадження обіцяють значні покращення у сфері управління та моніторингу телекомунікаційних мереж.

Подальші дослідження у цій області мають бути спрямовані на розробку більш адаптивних та самонавчальних систем RCA, здатних до динамічного реагування на змінні умови мережі. Це включає інтеграцію більш складних алгоритмів штучного інтелекту, а також розвиток інструментів для прогнозування потенційних проблем на основі аналізу історичних даних. Таким чином, забезпечення високої якості та безперервності телекомунікаційних послуг стане реальністю завдяки вдосконаленню механізмів Root Cause аналізу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бойко Ю. М., Дружинін В. А., Толупа С. В. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад. Київ: Логос, 2018. 227 с.
2. Мащак А. В. Моделі для оцінки ризику експлуатації системи радіоуправління безпілотним літальним апаратом: дис.... канд-та тех. наук: 05.12.17. Львів, 2016. 161 с.
3. Одарченко Р. С. Дослідження архітектури сучасних систем моніторингу в мережах стільникового зв'язку. *Наукоємні технології*. 2018. № 2 (38). С. 195–202.
4. Сазонова С. Оцінка ризиків стратегічного управління телекомунікаційними підприємствами в умовах цифрової економіки. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2021. № 3 (89). С. 31–37.
5. Chen B., Li J., Wei J. A Graph-Based Algorithm for Root Cause Analysis of Faults in Telecommunication Networks. *IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Auckland, New Zealand, 2023*. PP. 1–7,
6. Correlation Engine. URL: <https://www.illumina.com/products/by-type/informatics-products/connected-analytics/modules/correlation-engine.html>
7. Gómez-Andrades A., Muñoz P., Serrano I., Barco R. Automatic Root Cause Analysis for LTE Networks Based on Unsupervised Techniques. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. Vol. 65. № 4. PP. 2369–2386.

8. Schaaf M., Wilke G., Mikkola T., Bunn E., Hela I., Wache H., Grivas S. G. Towards a timely root cause analysis for complex situations in large scale telecommunications networks. *Procedia Computer Science*. 2015. №60. PP. 160–169.

REFERENCES:

1. Boiko Yu. M., Druzhynin V. A., Toliupa S. V. (2018) Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavadostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavrad [Theoretical aspects of increasing the noise immunity and efficiency of signal processing in radio engineering devices and means of telecommunication systems in the presence of interference]. Kyiv: Lohos. 227 p.

2. Mashchak A. V. (2016) Modeli dlia otsinky ryzyku ekspluatatsii systemy radioupravlinnia bezpilotnym litalnym aparatom [Models for assessing the risk of operation of the radio control system of an unmanned aerial vehicle: dissertation]: dys.... kand-ta tekh. nauk: 05.12.17. Lviv. 161 p.

3. Odarchenko R. S. (2018) Doslidzhennia arkhitektury suchasnykh system monitorynhu v merezhakh stilnykovoho zviazku [Research of the architecture of modern monitoring systems in cellular networks]. *Naukoiemni tekhnolohii*. vol. 2 (38). pp. 195–202.

4. Sazonova S. (2021) Otsinka ryzykiv stratehichnoho upravlinnia telekomunikatsiinykh pidpriemstvamy v umovakh tsyvrovoi ekonomiky [Assessment of risks of strategic management of telecommunication enterprises in the digital economy]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. vol. 3 (89). pp. 31–37.

5. Chen B., Li J., Wei J. A (2023) Graph-Based Algorithm for Root Cause Analysis of Faults in Telecommunication Networks. IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), *Auckland, New Zealand*, pp. 1–7.

6. Correlation Engine. URL: <https://www.illumina.com/products/by-type/informatics-products/connected-analytics/modules/correlation-engine.html>

7. Gómez-Andrades A., Muñoz P., Serrano I., Barco R. (2016) Automatic Root Cause Analysis for LTE Networks Based on Unsupervised Techniques. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. vol. 65. № 4. pp. 2369–2386.

8. Schaaf M., Wilke G., Mikkola T., Bunn E., Hela I., Wache H., Grivas S. G. (2015) Towards a timely root cause analysis for complex situations in large scale telecommunications networks. *Procedia Computer Science*. vol. 60. pp. 160–169.

OVERVIEW OF ROOT CAUSE ANALYSIS MECHANISMS FOR TELECOMMUNICATION NETWORKS

Telecommunication networks are an integral part of modern information society, providing data transmission and communication among millions of users worldwide. The complexity and scale of these networks are constantly growing, which increases the demands on their reliability and stability. One of the key tasks in ensuring the efficient operation of telecommunication networks is the identification and elimination of the root causes of failures and anomalies that can significantly affect the quality of service for end users. Root cause analysis (RCA) is a powerful tool for identifying the primary causes of problems, preventing their recurrence, and enhancing the overall reliability of networks. The article provides a detailed review of contemporary methods and tools of RCA used in telecommunication networks. In particular, methods such as fishbone diagram analysis, the «five whys» method, fault tree analysis, and the application of machine learning for big data analysis are considered. Each of these approaches has its advantages and disadvantages, and their comprehensive use allows for higher accuracy and efficiency in identifying the root causes of problems. Practical examples demonstrate the effectiveness of applying various RCA methods to solve specific problems in telecommunication networks. For instance, the use of fishbone diagram analysis and the «five whys» method allows for the identification of the primary causes of network delays and equipment issues at base stations. The implementation of failure prediction systems based on machine learning significantly enhances network reliability by allowing for the early detection of potential problems and the necessary technical measures. The prospects for the development of RCA in telecommunication networks are outlined. The primary focus is on the development of adaptive and self-learning systems capable of dynamically responding to changing network conditions. The use of more complex artificial intelligence algorithms and tools for predicting potential problems will significantly improve the effectiveness of RCA and ensure high-quality telecommunication services.

Key words: telecommunications, network reliability, failure analysis, machine learning, problem prediction, system stability, service quality, data volume, network diagnostics.

