

Кононова І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дубина В.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОСТІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Електронні комунікаційні мережі мають вирішальне значення для державного управління у воєнний час і є критично важливими для забезпечення ефективної обороноздатності та координації дій в умовах війни. Підвищення надійності комунікаційного обладнання є ключовим завданням для забезпечення ефективності та стабільності сучасних електронних комунікаційних мереж. Стаття присвячена теоретичному дослідженню процесу функціонування електронної комунікаційної мережі в умовах обмеженої надійності комунікаційного обладнання з метою аналізу сучасних способів резервування при використанні різних видів надлишковості. У статті обґрунтована доцільності комплексного (сумісного) використання різних видів надлишковості для забезпечення необхідних значень показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку. Визначено, що структурне резервування в традиційних його застосуваннях не захищає систему від збоїв, хоча в багатьох випадках потік збоїв у них інтенсивніший, ніж потік відмов; у разі часового резервування враховується характер наслідків відмов об'єкта під час виконання ним своїх завдань; інформаційне резервування існує у вигляді надлишковості та внутрішньої інформаційної мови пристроїв обробки і передачі даних, а також у вигляді надлишковості завадостійких кодів; функціональне резервування дозволяє за рахунок перерозподілу функцій і більш інтенсивної роботи елементу, який виконує до відмови тільки свої основні функції, забезпечити нормальне функціонування об'єкта при виникненні відмов окремих елементів.

З'ясовано, що кожен метод резервування окремо має певні переваги та недоліки, які необхідно враховувати під час вибору та обґрунтування методів підвищення надійності комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі. Визначено, що ефективність введення надлишковості, як методу підвищення надійності, може бути суттєво підвищена при комплексному використанні різних її видів.

Ключові слова: моделі надійності, комунікаційне обладнання, відмови, збої, резервування.

Постановка проблеми. Забезпечення надійності функціонування складних технічних систем (до яких також відноситься і комунікаційне обладнання (КО) електронних комунікаційних мереж (ЕКМ)) на теперішній час представляє собою єдиний процес, який охоплює всі основні етапи їх життя: проектування, виробництво, випробування та експлуатацію. Ця комплексна проблема включає в себе широке коло наукових, інженерних і економічних аспектів. Її вирішення пов'язано з реалізацією багаточисельних організаційних та технічних, а часто і фундаментальних наукових досліджень, які потребують великих витрат засобів та часу і які відносяться до різних галузей науки і техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз відомих багаточисельних в наш час теоретичних та прикладних робіт [1–6] в даній предметній галузі показав, що при досягнутих рівнях надійності комплектуючих елементів і якості

проектно-конструктивних та виробничо-технологічних робіт основними шляхами забезпечення необхідної надійності функціонування складних систем є введення різних видів надлишковості при розробці, а також удосконалення принципів і організації технічного обслуговування та ремонту в процесі експлуатації.

Метою роботи є короткий аналіз переваг та недоліків методів резервування при використанні різних видів надлишковості, а також обґрунтування доцільності комплексного (сумісного) їх використання для забезпечення необхідних значень показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Надамо визначення основних понять, які часто використовуються при дослідженні надійності КО ЕКМ – надлишковість і резервування, наведено в ДСТУ [7].

Надлишковість – додаткові засоби і (або) можливість понад мінімально необхідних для виконання об'єктом заданих функцій.

Залежно від характеру додаткових засобів і можливостей, використовуваних для забезпечення надійності, на даний час розрізняють п'ять видів надлишковості: структурну, часову, інформаційну, функціональну та навантажувальну. Вид використуваної надлишковості визначає метод резервування.

Резервування – метод забезпечення надійності об'єкта завдяки використанню додаткових засобів і (або) можливостей, надлишкових щодо мінімально необхідних для виконання необхідних функцій.

Структурне резервування – резервування із застосуванням резервних елементів структури об'єкта.

Часове резервування – резервування із застосуванням резервів часу.

Інформаційне резервування – резервування із застосуванням резервів інформації.

Функціональне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта виконувати додаткові функції.

Навантажувальне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта сприймати додаткові навантаження понад номінальних.

Надамо коротку характеристику вказаним вище методам резервування.

Структурне резервування передбачає використання резервних елементів, що входять у фізичну структуру об'єкта. Цей вид резервування найвідоміший, досить добре досліджений і широко використовується на практиці для підвищення надійності. Методи структурного резервування вирізняються універсальністю і дають змогу створювати з ненадійних елементів системи з необхідним рівнем надійності. Водночас у багатьох випадках схемна реалізація цих методів пов'язана з низкою труднощів. Зокрема, структурне резервування заміщенням вимагає певного часу на перемикання резерву, причому перемикачі в деяких випадках виявляються не дуже простими і надійними. Тому надійність системи знижується через можливі відмови перемикачів і несвоєчасне їхнє спрацьовування. Крім того, резервними елементами можна скористатися тільки після виявлення відмови основного елемента, перевірки технічного стану резервного і формування команди на перемикання. Це означає, що для ефективного застосування структурного резерву має бути створена розвинена система контролю з високими показниками повноти та достовірності функціонування. Погіршення характеристик контролю

спричиняє зниження ефективності структурного резервування, а досягнення необхідних характеристик потребує певних витрат обладнання і часу. А це, своєю чергою, знижує надійність резервованої системи.

У системах обробки і передачі інформації, що входять до складу КО ЕКМ, крім відновлення працездатності шляхом перемикання на резервні елементи, потрібно проводити також інформаційне відновлення, на яке часто витрачаються значні ресурси обладнання і часу. При цьому ефективність саме інформаційного відновлення визначає, як правило, ефективність структурного резервування. Є ще два фактори, що впливають на надійність таких систем, зокрема, на надійність інформаційних обчислювальних систем: наявність збоїв і знецінення частини роботи внаслідок відмов і збоїв. Структурне резервування в традиційних його застосуваннях не захищає систему від збоїв, хоча в багатьох випадках потік збоїв у них інтенсивніший, ніж потік відмов. Знецінення частини роботи під час відмов і збоїв у багатьох випадках відбувається раніше, ніж вступає в дію структурне резервування. Тому відмова системи може виникнути раніше, ніж буде використана структурна надлишковість.

З вищесказаного випливає, що використання загальнотехнічних схем структурного резервування спричиняє в низці випадків серйозні труднощі. Одним з ефективних шляхів подолання цих труднощів є спільне використання структурної надлишковості з розробкою спеціальних засобів системного програмного забезпечення.

Навантажувальне резервування засновано на здатності елементів об'єкта виконувати свої функції при додаткових навантаженнях понад мінімальних. Можна говорити про наявність навантажувального резервування в об'єктах зі структурною надлишковістю, якщо режим роботи деякої частини або всіх елементів структурного резерву полегшується з метою підвищення їхньої безвідмовності та економії ресурсу. При цьому створюється запас щодо навантаження, при якому інтенсивність відмов окремого резервного елемента λ_p менша, ніж інтенсивність відмов λ окремого основного елемента, що працює в номінальному (навантаженому) режимі. У цьому разі для характеристики навантажувального резервування може бути використано коефіцієнт навантаження резервного елемента, $\alpha = \lambda_p / \lambda$, який може набувати значень від 0 до 1. Саме в такому значенні слід розуміти навантажувальне резервування, яке ми використовуватимемо надалі під час роз-

гляду об'єктів зі структурним і навантажувальним резервуванням. Основним недоліком цього методу резервування є збільшення часу переведення працездатного резервного елемента з ненавантаженого (при $\alpha=0$) або полегшеного режиму (при $0<\alpha<1$) в робочому режимі і підключенням його замість основного елемента, що відмовив.

Часове резервування представляє собою метод забезпечення нормального функціонування об'єктів, що виконують певні завдання в умовах впливу різних збурень (відмов, збоїв, завод, тощо), шляхом призначення та використання резервного (надлишкового) часу [8]. На відміну від інших видів надлишковості тут резервом є час. Цей резерв вноситься не в об'єкт, як, наприклад, у разі структурного резервування, а в порядок (алгоритм) використання (застосування) об'єкта.

У разі часового резервування враховується характер наслідків відмов об'єкта під час виконання ним своїх завдань. У класичній теорії надійності оцінка показників надійності зводиться до вивчення перебування об'єкта в підмножині працездатних станів на деякому інтервалі часу. Однак у реальних ситуаціях за певних вимог до часу відновлення працездатності об'єкта наслідки відмови можуть бути усунені та не впливати на виконання об'єктом своїх функцій.

Особливість зазначеного підходу до аналізу та забезпечення надійності складних технічних об'єктів полягає у «зважуванні» відмов за важливістю та ознакою витрачання часу на усунення їх наслідків. Це дає змогу розкрити й використати для підвищення надійності функціонування об'єктів внутрішні резерви (зокрема, часові), закладені в самих об'єктах і їх алгоритмах використання за призначенням.

До переваг такого підходу можна віднести наступне:

1) поліпшення показників надійності функціонування об'єкта часто не пов'язано зі збільшенням об'єму обладнання та витрачанням додаткових коштів, а ґрунтується на запровадженні або використанні наявних в об'єктах резервів часу;

2) урахування резерву часу дає змогу відобразити дійсну надійність, тобто дає змогу більш об'єктивно оцінити можливості систем нормально функціонувати в умовах впливу різних дестабілізуючих факторів. Саме наявністю резерву часу можна в багатьох випадках пояснити, чому об'єкти виконують свої функції успішніше, ніж це впливає з показника безвідмовності обладнання;

3) глибше проникнення в сутність досліджуваних процесів функціонування дає змогу виявити

і обґрунтувати нові, ефективні методи забезпечення надійності складних технічних об'єктів у реальних умовах експлуатації.

В загальному випадку структурна схема надійності об'єкта з часовим резервуванням може бути представлена у вигляді умовної системи об'єкт-час (системи ОЧ), яка включає в себе два загальні елементи: вихідний резервуючий об'єкт та резерв часу (рис. 1).

Така схема аналогічна схемі ненавантаженого дублювання обладнання, так як після відмови об'єкта починає діяти («вмикається») резерв часу. Відмова системи ОЧ (в подальшому – просто системи) виникає в момент витрачання резерву часу.

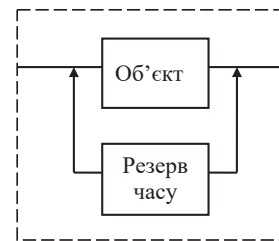


Рис. 1. Структурна схема надійності системи з часовим резервуванням (системи ОЧ)

Елементи, зображені на рис. 1, названі загальними, оскільки кожний з них може бути класифікований за низкою ознак. Зокрема, в об'єкті можуть бути реалізовані різні методи резервування, наприклад, структурного та навантажувального.

В об'єкті можуть виникати відмови двох типів, які відрізняються за наслідками: незнецінюючі і знецінюючі попереднє напрацювання. Незнецінюючі відмови викликають лише затримку виконання завдання на час відновлення працездатності об'єкта, але не призводять до повторення попереднього напрацювання. При знецінюючих відмовах після відновлення працездатності об'єкт приступає до повного або часткового повторення знеціненого напрацювання.

Методи створення часової надлишковості побудовані на різних джерелах резервного часу. До них належать: запас продуктивності системи, що створює різницю між оперативним часом виконання завдання і фактичним часом; комплексування пристроїв однакового призначення; створення внутрішніх запасів продукції в накопичувачах; функціональна інерційність, яку спричиняють фізико-технічні процеси в об'єкті; спосіб завантаження об'єкта, а також інші способи, які призводять до виникнення у об'єкта або окремих його пристроїв надлишкового часу, яке може

бути використано для відновлення працездатного стану об'єкта, виявлення і локалізації відмов, реконфігурації технічної структури, повторення знецінених робіт, інформаційного відновлення, підключення структурного резерву тощо.

Надійність систем із часовим резервуванням оцінюють за результатами виконання встановлених часових обмежень до всієї траєкторії функціонування об'єкта або за результатами виконання деякого завдання. Виконання завдання – це подія, що полягає в завершенні заданого обсягу робіт зі встановленими обмеженнями на час виконання всіх робіт і окремих етапів та встановленими вимогами до якості і ритмічності роботи системи. Порушення встановлених вимог та обмежень призводить до зриву виконання завдання і розглядається як відмова (зрив функціонування) системи.

Таким чином, для системи з часовим резервуванням порушення працездатності об'єкта не обов'язково супроводжується відмовою системи навіть при послідовному з'єднанні елементів, оскільки є можливість відновити працездатність об'єкта за резервний час.

Відмова системи з часовим резервуванням (зрив функціонування або зрив виконання завдання) – це подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкта, яка має недопустимі наслідки або не може бути усунута за допустимий (резервний) час [9]. На основі цього загального визначення для кожного конкретного випадку використання резервного часу необхідно формулювати свої критерії відмови системи.

Таким чином, систему з часовим резервуванням (систему ОВ) можна розглядати як своєрідний перетворювач потоку відмов: вхідним є потік відмов об'єкта, а вихідним – потік відмов системи (рис. 1). За рахунок дії резерву часу вихідний потік системи містить у середньому меншу кількість відмов за одиницю часу, ніж вхідний потік, – відбувається розрідження вихідного потоку відмов. Ефект розрідження проявляється тим сильніше, чим більше виділяється і використовується резервного часу.

Аналіз результатів теоретичного дослідження окремих видів резервування, зокрема, структурного та часового, показав, що їм притаманна певна спільність [10]. Це дає можливість з деякими обмовками поширити існуючу класифікацію структурного резервування на часове резервування. Водночас, частина ознак класифікації специфічна тільки для часового резервування.

За способом поповнення розрізняють непоповнюваний, поповнюваний і комбінований резерв

часу. Непоповнюваний резерв часу t_p встановлюється заздалегідь, до початку роботи, і не зростає при виконанні завдання. При працездатному стані всіх елементів об'єкта поточне значення резерву не змінюється, а при відмовах може зменшуватися стрибкоподібно або у лінійній в залежності від часу при відновленні працездатності об'єкта.

Поповнюваний резерв часу t_d зростає за деяким законом у разі працездатного стану системи, а також у разі відновлення працездатності деяких елементів, що відмовили. Миттєво поповнюваний резерв поновлюється до вихідного рівня стрибком відразу ж після закінчення ремонту.

В одній і тій самій системі можуть бути обидва види резерву часу. У такому випадку його називають комбінованим резервом часу, причому поповнювана і непоповнювана складові загального резерву можуть певним чином між собою взаємодіяти.

Основним недоліком методів часового резервування є те, що покращення надійності функціонування супроводжується погіршенням деяких інших характеристик системи, зокрема, зменшенням реальної продуктивності, погіршенням точності, ускладненням алгоритмів функціонування, підвищенням вимог до обладнання контролю працездатності та пошуку дефектів, системи технічного обслуговування і ремонту.

Інформаційне резервування реалізується з застосуванням резервів інформації і широко використовується в сучасних автоматичних та автоматизованих системах управління, інформаційно-обчислювальних, інформаційно-вимірювальних та інших комплексах, пов'язаних з обробкою і передачею великих обсягів інформації. Існують різні способи введення та використання інформаційної надлишковості [11]. Зокрема, вона існує у вигляді надлишковості та внутрішньої інформаційної мови пристроїв обробки і передачі даних, а також у вигляді надлишковості завадостійких кодів; її вводять у масив вихідних даних і в структуру пам'яті КО.

Інформаційну надлишковість використовують для забезпечення достовірності даних, які найбільшою мірою впливають на нормальне функціонування комплексу програм і потребують значного часу для відновлення (для відновлення таких даних потрібне їхнє тривале накопичення та обробка). Інформаційне резервування сприяє не тільки виявленню спотворення даних, а й усуненню помилок і підвищенню точності обчислень. Дані захищають дво- і трикратним резервуванням з відповідною дисципліною контролю збереження та періодичним оновленням.

Таким чином, введення інформаційної надлишковості спрямоване на забезпечення нормального функціонування складної інформаційно-обчислювальної техніки в умовах впливу відмов і збоїв обладнання, спотворення інформації та інших агресивних чинників.

Крім того, використання інформаційного резервування в багатьох випадках сприяє підвищенню ефективності інших видів резервування: структурного, часового і функціонального.

Основними недоліками інформаційного резервування можна вважати ускладнення обладнання та алгоритмів функціонування, зниження продуктивності систем оброблення та передавання даних, а також збільшення вартості.

При функціональному резервуванні функції елемента, що відмовив, передаються іншому елементу об'єкта для якого вони не зовсім властиві. Однак надлишковість щодо виконуваних функцій, наявні в підмінюваному елементі, дає йому можливість одночасно (паралельно) виконувати протягом деякого допустимого часу свої та чужі функції з деяким погіршенням (в допустимих межах) виконуваної роботи. Отже, за рахунок перерозподілу функцій і більш інтенсивної роботи елемента, який виконує до відмови тільки свої основні функції, вдається забезпечити нормальне функціонування об'єкта при виникненні відмов окремих елементів. При цьому функціональний резерв є засобом, що забезпечує наявність у підмінюваного відмовившого елемента резерв часу, який використовується для відновлення його працездатності.

Зазвичай функціональний резерв існує і використовується в складних просторово рознесених системах за рахунок структурного і функціонального ускладнення і зв'язків між її елементами, а також шляхом раціональної організації застосування таких систем. Складнощі практичної реалізації функціонального резервування пов'язані з необхідністю у раді випадків додаткового перетворення формі інформації, погіршенням її точності та достовірності, зниженням пропускну здатності.

Проведений вище стислий аналіз показав, що кожен метод резервування окремо має певні переваги та недоліки, які необхідно враховувати під час вибору та обґрунтування методів підвищення надійності. Водночас дослідження показали

[8–11], що ефективність введення надлишковості, як методу підвищення надійності, може бути суттєво підвищена при комплексному використанні різних її видів. Об'єктивна можливість і доцільність практичної реалізації принципу комплексного використання надлишковості обумовлена такими причинами:

у багатьох технічних об'єктах реально існують різні види надлишковості, передбачені при проєктуванні і які володіють не тільки окремими, але і загальними властивостями щодо впливу на надійність; тому вивчення надлишковості, її видів, способів введення та використання, її ролі та місця в загальній програмі забезпечення надійності має проводитися комплексно з єдиних методологічних позицій;

у багатьох випадках один вид надлишковості (наприклад, структурна, інформаційна або навантажувальна) може слугувати засобом, що забезпечує наявність у системі іншого виду надлишковості (наприклад, часової);

спільне використання різних видів надлишковості дає можливість частково компенсувати недоліки, притаманні окремим видам, та посилити їх переваги, тобто такий шлях призводить до нових якісних і кількісних результатів, отримати які при іншому підході не вдається;

у разі комплексного використання надлишковості створюються найкращі умови для підвищення всіх основних показників надійності завдяки покращенню відновлюваності системи; а саме скорочення часу відновлення є тим головним чинником, який безпосередньо забезпечує ефективність усіх методів резервування.

Висновки. Проведений аналіз показав, що при практичній реалізації принципу комплексного використання надлишковості сумарний вигравш у надійності не є простою сумою вигравшів від використання кожного методу резервування окремо, а набагато більший. Наскільки більше – це залежить від кількості спільно використовуваних видів надлишковості та кратності резервування. Подальші дослідження будуть спрямовані на побудову моделей оцінки надійності об'єктів КО ЕКМ при сумісному використанні структурного, навантажувального і часового резервування, що містить поповнювальну і непоповнювальну складові резервного часу.

Список літератури:

1. Tandon N. , Patel N. An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment. *10th IEEE Intern. Conf. Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505.

2. Wentao Z., Mathaios P., Milanovic J. Reliability and vulnerability assessment of interconnected ict and power networks using complex network theory. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2018. P. 78–85. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586596.
3. Rafiee P., Latif Shabgahi G. Evaluating the reliability of communication networks (WAN) using their fuzzy fault tree analysis – a case study. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 2011. P. 262–270. DOI: 10.22436/jmcs.002.02.06.
4. Князева Н.О., Колумба І.В. Використання базових структурних характеристик мережі невизначеної топології для оцінки її структурної надійності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. С. 130–134. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_6_27.
5. Лемешко О.В. Поточкові моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість: посібник / О.В. Лемешко, О.С. Єременко, О.С. Невзорова, Харків, 2020. С. 308.
6. Сенів М., Роїк О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделі з урахуванням недосконалого відлагодження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 6. С. 87–91. DOI:10.36930/40310613.
7. ДСТУ 2860–94: Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996–01–01. *Держстандарт України*. 1994. С. 90. URL: http://www.ksv.biz.ua/publ/dstu/dstu_2470_94/3-1-0-196.
8. Ahmed, N. O., Bhargava, B. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020. No. 8(3), P. 847–860. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCC.2018.2814989>.
9. Єременко О.С., Мерсні А. Підвищення відмовостійкості елементів сучасних інфокомунікаційних мереж із застосуванням протоколів резервування шлюзу за замовчуванням. *Проблеми телекомунікацій*. 2020. № 2(27). С. 68–81. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>
10. Mogylevych D., Kononova I., Kredentser B., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. 2020. № 80. С. 39 – 47. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAR.2020.80.39-47>.
11. Mogylevych D., Kononova I. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer. 2018. P. 101–117. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.

Kononova I.V., Dubyna V.O. INTEGRATED USE OF REDUNDANCY TO IMPROVE THE RELIABILITY OF COMMUNICATIONS EQUIPMENT

Electronic communications networks are crucial for wartime governance and are critical to ensuring effective defense capabilities and coordination in wartime. Improving the reliability of communication equipment is a key task to ensure the efficiency and stability of modern electronic communication networks. The article is devoted to a theoretical study of the process of functioning of an electronic communication network under conditions of limited reliability of communication equipment with a view to analyzing modern methods of redundancy using various types of redundancy. The article substantiates the expediency of the integrated (joint) use of various types of redundancy to ensure the required values of the reliability indicators of the communication equipment of communication networks. It has been determined that structural redundancy in its traditional applications does not protect the system from failures, although in many cases the flow of failures is more intense than the flow of failures; in the case of time redundancy, the nature of the consequences of object failures during the performance of its tasks is taken into account; information redundancy exists in the form of redundancy and internal information language of data processing and transmission devices, as well as in the form of redundancy of noise immune codes; functional redundancy allows for the redistribution of functions and more integrated use of communication equipment.

It has been found that each redundancy method individually has certain advantages and disadvantages that should be taken into account when selecting and justifying methods for improving the reliability of communication equipment of an electronic communication network. It is determined that the effectiveness of introducing redundancy as a method of improving reliability can be significantly increased by the integrated use of its various types.

Key words: reliability models, communication equipment, failures, failures, redundancy.