

Сергій Щербовських¹, Тетяна Стефанович², Дарія Ребот³

¹ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: serhiy.v.shcherbovskykh@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-8535-733X

² Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: tetyana.o.stefanovych@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8577-4755

³ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: dariya.p.rebot@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3583-0800

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ТРИКРАТНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ТА ПОДВІЙНОЮ ОБОЛОНКОЮ

Отримано: травень 29, 2024 / Переглянуто: червень 03, 2024 / Прийнято: липень 10, 2024

© Щербовських С., Стефанович Т., Ребот Д., 2024

<https://doi.org/>

Анотація. Функціонування сучасних комп'ютерних систем є неможливим без обміну інформацією, який відбувається з використанням каналів зв'язку різноманітної фізичної природи. Вихід з ладу каналу зв'язку, особливо в системах, які відповідають за функціонування критичних об'єктів, може спричинити як матеріальні, так і людські втрати. Тому забезпечення надійності каналів зв'язку є актуальною проблемою. Дана публікація входить як складова в цикл публікацій, присвячених надійності каналів зв'язку. Її метою є розроблення методів та моделей для оцінювання надійності каналу зв'язку із трикратним резервуванням та подвійною захисною оболонкою. Для побудови математичних моделей на етапі формалізації використано блок-схеми та динамічні дерева відмов. З їх допомогою отримано діаграми станів та переходів, які стали основою для розроблення статичних та динамічних моделей. Статичні моделі записано за допомогою логіко-ймовірнісних виразів. Динамічні моделі отримано як системи диференціальних рівнянь з використанням марковського аналізу. Наявність в складі каналу трьох жил та подвійної захисної оболонки дозволяє сформувати шість різних структурних схем каналу, з яких три є симетричними, а три — несиметричними. Найбільш надійною є структура із окремими для кожної із трьох жил зовнішніми та внутрішніми оболонками, найменш надійною — коли три жили знаходяться в спільних зовнішній та внутрішній оболонках. Показники надійності для структур із різними комбінаціями кабельних оболонок набувають проміжних значень між цими крайніми випадками. Надійність таких структур зростає із збільшенням кількості роздільних оболонок. Показники надійності отримані з використанням статичних моделей є заниженими і менш точними у порівнянні з показниками, обчисленими за допомогою динамічних моделей. Однак в зв'язку з простішою побудовою статичних моделей, їх рекомендується використовувати для первинної оцінки показників надійності каналів зв'язку.

Удосконалено підхід для оцінювання надійності каналів зв'язку із багатократним резервуванням жил та довільною кількістю захисних оболонок, а саме отримано моделі для каналу зв'язку із трикратним резервуванням жил та подвійною захисною оболонкою. Запропонований підхід буде корисним для оцінювання надійності під час проектування сучасних технічних, зокрема й комп'ютерних, систем, особливо тих, які відповідають за функціонування критичних об'єктів, втрата працездатності яких може спричинити матеріальні збитки та становити небезпеку для обслуговуючого персоналу. Подальші дослідження полягатимуть у встановленні закономірностей в отриманих моделях. Знайдені закономірності ляжуть в основу спеціалізованого програмного забезпечення для

Оцінювання надійності каналу зв'язку із трикратним резервуванням...

автоматизованого оцінювання надійності для каналів зв'язку з довільною кількістю жил і захисних оболонок.

Ключові слова: модель надійності, канал зв'язку, кабельна оболонка, резервування, блок-схема надійності, динамічне дерево відмов.

Вступ

Обмін інформацією є невід'ємною складовою, яка забезпечує нормальне функціонування сучасних комп'ютерних систем. В його організації виділяють чотири обов'язкові складові: повідомлення — інформація, яка передається; відправник — система, яка передає повідомлення, одержувач — система, яка отримує повідомлення; канал зв'язку — засіб передавання інформації.

Підтримування каналу зв'язку в працездатному стані є запорукою того, що повідомлення буде доставлено до одержувача. Натомість вихід з ладу каналу зв'язку спричинить втрату повідомлення, а в системах, які відповідають за функціонування критичних об'єктів, така втрата може призвести до матеріальних збитків та людських жертв. Для запобігання цьому використовують різноманітні способи захисту каналів зв'язку. До таких способів належать резервування каналів та використання захисних оболонок. В загальному резервування полягає у введенні в систему елементів, які є надлишковими для виконання її функцій. Для провідного каналу зв'язку резервування виконується введенням додаткових жил. Використання оболонок передбачає повну ізоляцію жили від навколишнього середовища, що дозволяє захистити її від зовнішніх впливів.

Зі збільшенням кількості жил та введенням додаткових захисних оболонок зростає кількість їх можливих комбінацій, що в свою чергу веде до отримання різних структурних схем каналу зв'язку. Наприклад, для трикратного резервування жил та використання подвійної захисної оболонки отримуємо шість різних схем. Як результат, виникає проблема оцінювання показників надійності каналу зв'язку для кожної з цих схем з метою вибору найоптимальнішої.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

Літературний огляд виконано на основі джерел, пов'язаних із надійністю комунікаційних каналів зв'язку та електричних кабелів. Таке узагальнення є допустимим, оскільки з точки зору надійності процеси є подібними між собою. В сучасній літературі виділяємо кілька підходів до надійності кабельних систем.

В [1] автори показують, що однією з проблем, з якою стикаються електроенергетичні компанії, є оцінка стану та залишкового ресурсу кабельних мереж. На відміну від іншого обладнання, кабельні мережі підлягають лише коригувальному обслуговуванню. Для підтримки їх стану розроблено підхід на основі інтегрованих правил та знань щодо технічного обслуговування. Цей підхід виведено на основі лабораторних та польових досліджень.

В [2] показано, що у зв'язку зі зростаючою складністю електричних систем, методи діагностики кабелів набувають ще більшого значення. На атомних електростанціях для систем управління і вимірювальних приладів, зазвичай, використовують багатожилні кабельні структури, що підвищує надійність таких систем. Авторами запропоновано метод діагностики багатожилних кабельних структур на основі рефлектометрії. Діагностика пов'язана з класифікацією дефектних жил, які є одним з найслабших місць. Відбиті сигнали, отримані за допомогою рефлектометрії, перетворюються у зображення за допомогою вдосконаленого алгоритму обробки зображень, а зображення класифікуються за допомогою штучних нейронних мереж. Запропонований метод продемонстровано на експериментальних даних з використанням реальної багатожилної кабельної структури. В експерименті дефекти імітуються подібно до реальних дефектів за допомогою потенціометра.

В [3] розглянуто силові та комунікаційні підводні кабелі, які перебувають під ризиком зовнішнього механічного пошкодження. Зазвичай, джерелом такого ризику є корабельні якоря.

У публікації детально розглядаються динамічні процеси механічного руйнування підводного кабелю. З цією метою розроблено тривимірну нелінійну математичну модель на основі методу скінчених елементів. Автори проаналізували вплив пошкодження на підвісні ділянки та на ділянки, які занурені у ґрунт. Результати показали, що на підвісних ділянках механічне напруження концентрується в точці пошкодження і поширюється в обидві сторони спричиняючи значну деформацію кабелю. Занурені ділянки та використанням захисних оболонок обмежує руйнування лише місцем безпосереднього пошкодження, а деформація кабелю при цьому є незначною. На підставі результатів запропоновано методи підвищення надійності кабельних систем.

В [4] автори зосереджують увагу на надійності кабельних мереж в умовах впливу масштабних катастроф. Ця проблематика набирає актуальність впродовж останнього десятиліття. Зокрема, автори акцентують увагу на землетрусах, які є найменш передбачуваними, але найбільш руйнівними. Надійність кабельних систем визначено на основі методу імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки для оцінки стану елементів мережі після землетрусу. Цей підхід враховує сейсмічне джерело та рівняння, які моделюють ґрунти. Під час моделювання, відмови вузлів комунікаційної мережі прив'язані до руйнування будівель, а відмови кабельних систем залежать від інтенсивності відмов та додаткових коефіцієнтів навантаження. Розроблена модель враховує характеристики рельєфу та навантаженість комунікаційної мережі. Результати показали як кількісно знижується надійність зі зростанням довжини комунікаційної мережі.

В [5] проаналізовано динамічні бездротові мережі зв'язку. Складність такої задачі полягає у необхідності врахування впливу пристроїв зв'язку, фізики поширення радіохвиль, топології мережі та її поведінки. Для моделювання таких мереж використовують підхід на основі застосування динамічної байєсівської мережа. Автори удосконалили такий підхід шляхом врахування безперервного часового домену на основі таблиць умовних ймовірностей на основі двох станів. Хоча запропонований підхід далі залишається спрощеним, експериментальні дослідження показали достатню точність.

Окремо слід наголосити на підходах щодо визначення параметрів надійності кабелів.

В [6] представлено розробку адекватної системи прискореного старіння, призначену для визначення параметрів надійності силових кабелів постійного струму. Запропоновану систему перевірено експериментально. Система враховує комплексну імітацію довготривалих теплових, електричних та механічних навантажень. Точність контролю системи прискореного старіння оцінено чисельно. Таку оцінку виконано за струмом провідності та хімічними характеристиками постарілих зразків. Результати експерименту показують, що точність системи прискореного старіння становить 1% за 1 цикл. Струм провідності старого кабелю був збільшений більш ніж на 100% перед старінням, тим самим підтверджено ефективність такої системи прискореного старіння.

В [7] удосконалено підхід для оцінювання ресурсу та надійності силових кабелів, під дією типових добових та сезонних циклів. Дослідження враховує різні значення питомого теплового опору, а також зміну температури ґрунту. Результати кількісно показали, що найбільша частка ресурсу і надійності, втрачена ізоляцією кабелю, спостерігається впродовж літнього сезону.

Дана публікація є продовженням циклу статей, присвячених надійності резервованих кабельних систем із захисними оболонками. Автори дослідження пропонують виконувати аналіз надійності а основі використання марковських моделей. Зокрема, в [8] проаналізовано дубльовану кабельну систему зі спільною та роздільною оболонками. В [9] виконано оцінку надійності потрібної кабельної системи для спільної, роздільної та змішаної оболонок. В [10] подано підходи до аудиту надійності дубльованих кабельних систем з урахуванням армування, а в [11] розглянуто дубльовані кабельні системи із потрібним захисним армуванням.

Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є розроблення підходу для кількісного оцінювання показників надійності усіх можливих структурних схем для каналу зв'язку із трикратним резервуванням та подвійною захисною оболонкою.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких завдань:

1. побудова усіх можливих структурних схем каналу зв'язку;
2. формалізація надійності структурних схем за допомогою блок-схем та дерев відмов;
3. побудова математичних моделей, які дозволять виконати динамічний та статичний аналіз надійності каналу зв'язку для різних структурних схем.

Виклад основного матеріалу

Якщо канал складається з трьох жил та двох кабельних оболонок, то можна сформулювати шість різних його структур. Нарисуємо для кожного каналу його структуру. Опираючись на структури каналів, побудуємо блок-схеми надійності та динамічні дерева відмов для кожного випадку. Надійність визначимо як здатність каналу зберігати свою механічну цілісність та забезпечувати передачу сигналу, незважаючи на зовнішні руйнівні впливи.

Структура 1: спільна зовнішня оболонка і спільна внутрішня оболонка

Схема каналу наведена на рис. 1а. Канал складається з трьох жил 1, 2 та 3; спільної внутрішньої оболонки 4; спільної зовнішньої оболонки 5. Припускаємо, що жили 1, 2 та 3 зазнають одночасного і рівнозначного впливу та можуть бути зруйновані тільки після того, як буде зруйновано внутрішню оболонку 4. Внутрішня оболонка 4 зазнає руйнування тільки після того, як буде зруйновано зовнішню оболонку 5. Виходячи з цих припущень формуємо блок-схему надійності (рис. 1б) та динамічне дерево відмов (рис. 1в).

Непрацездатність каналу (блок «Top Event») настає після послідовного руйнування оболонок 5 (блок «Basic Event 5») і 4 (блок «Basic Event 4») та пошкодження усіх трьох жил 1, 2, 3 (блоки «Basic Event 1», «Basic Event 2», «Basic Event 3»). Припущення, що на внутрішню оболонку 4 не впливають зовнішні руйнівні фактори, поки зовнішня оболонка 5 є працездатною, задано першою логічною умовою (блок «Buffer 1»). Друга логічна умова (блок «Buffer 2») полягає в тому, що на жили 1, 2 та 3 не чинять вплив зовнішні руйнівні фактори, поки внутрішня оболонка 4 зберігає працездатність.

Структура 2: спільна зовнішня оболонка і комбінована внутрішня оболонка

Канал (рис. 2а) складається з жил 1, 2, 3; двох комбінованих внутрішніх оболонок 4 та 5; спільної зовнішньої оболонки 6. Сукупність жил 1, 2 та внутрішньої оболонки 4 називатимемо внутрішньою серцевиною, як і сукупність жили 5 та внутрішньої оболонки 5. Припускаємо, що жили 1 та 2 зазнають руйнування тільки після того, як буде зруйновано спільну внутрішню оболонку 4. З іншого боку, жила 3 може бути зруйнована тільки після руйнування внутрішньої оболонки 5. В свою чергу, внутрішні оболонки 4 та 5 руйнуються тільки після руйнування зовнішньої оболонки 6 (рис. 2б).

Непрацездатність каналу (блок «Top Event») настає, якщо зруйнованими є зовнішня оболонка 6 (блок «Basic Event 6») та обидві внутрішні серцевини. Це відображено на динамічному дереві відмов (рис. 2в). Перша серцевина стає непрацездатною, коли руйнується внутрішня оболонка 4 (блок «Basic Event 4») разом з жилами 1 та 2 (блоки «Basic Event 1» та «Basic Event 2»). Друга серцевина втрачає працездатність, коли руйнуються внутрішня оболонка 5 (блок «Basic Event 5») та жила 3 (блок «Basic Event 3»). Припущення, що на внутрішні оболонки 4 та 5 не впливають зовнішні руйнівні фактори, поки не зруйновано зовнішню оболонку 6, задано першою логічною умовою (блок «Buffer 1»). Блоком «Buffer 2» задається друга логічна умова, за якою жили 1 та 2 залишаються працездатними, поки внутрішня оболонка 4 не ушкоджена. Блоком «Buffer 3» задається третя логічна умова, за якою жила 3 залишається неушкодженою, поки внутрішня оболонка 5 є працездатною.

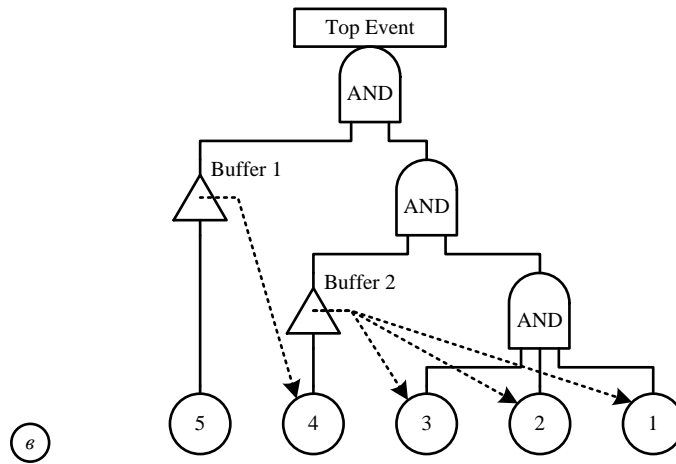
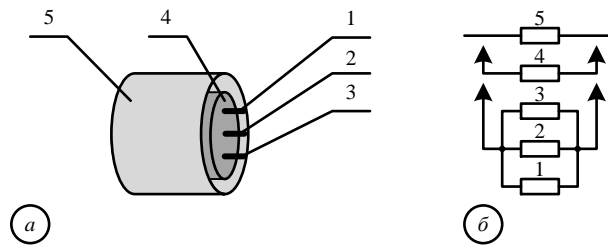


Рис. 1. Модель надійності каналу з трьома жилами та спільними зовнішньою і внутрішньою оболонками: а) структура каналу; б) блок-схема надійності; в) динамічне дерево відмов

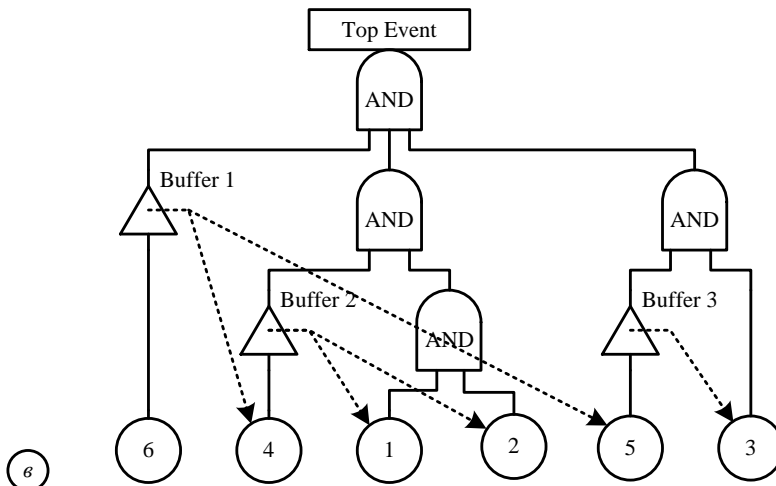
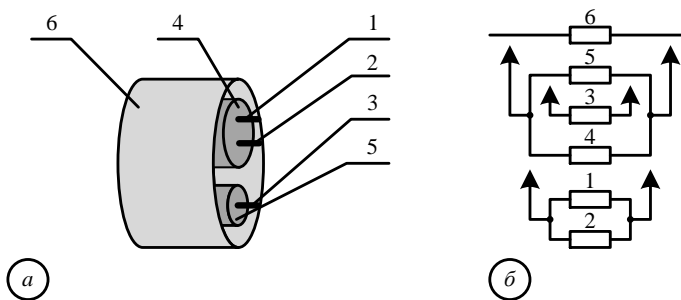


Рис. 2. Модель надійності каналу з трьома жилами та спільною зовнішньою і комбінованою внутрішньою оболонками: а) структура каналу; б) блок-схема надійності; в) динамічне дерево відмов

Структура 3: спільна зовнішня оболонка і роздільні внутрішні оболонки

Канал (рис. 3а) складається з трьох жил 1, 2, 3; трьох роздільних внутрішніх оболонок 4, 5, 6; спільної зовнішньої оболонки 7. Сукупність жили 1 та внутрішньої оболонки 4; жили 2 та внутрішньої оболонки 5; жили 3 та внутрішньої оболонки 6 називатимемо внутрішніми серцевинами. Отже, дана структура містить три ідентичні внутрішні серцевини та спільну зовнішню оболонку. Припускаємо, що жила 1 може бути зруйнована тільки після руйнування внутрішньої оболонки 4, жила 2 — після руйнування внутрішньої оболонки 5, жила 3 — після руйнування внутрішньої оболонки 6. Внутрішні оболонки 4, 5, 6 руйнуються тільки після руйнування зовнішньої оболонки 7 (рис. 3б).

Непрацездатність каналу (блок «Top Event») настає, якщо зруйновані зовнішня оболонка 7 (блок «Basic Event 7») і усі три внутрішні серцевини. Це відображено на динамічному дереві відмов (рис. 3в). Перша серцевина руйнується за умови руйнування внутрішньої оболонки 4 (блок «Basic Event 4») і жили 1 (блок «Basic Event 1»). Друга серцевина — за умови руйнування внутрішньої оболонки 5 (блок «Basic Event 5») і жили 2 (блок «Basic Event 2»). Третя — за умови руйнування внутрішньої оболонки 6 (блок «Basic Event 6») і жили 3 (блок «Basic Event 3»). Першою логічною умовою (блок «Buffer 1») введено припущення, що внутрішні кабельні оболонки 4, 5, 6 руйнуються тільки після руйнування спільної зовнішньої оболонки 7. Другою логічною умовою (блок «Buffer 2») введено припущення, що жила 1 руйнується тільки після втрати працездатності внутрішньою оболонкою 4; третьою логічною умовою (блок «Buffer 3») — що жила 2 руйнується тільки після втрати працездатності внутрішньою оболонкою 5; четвертою логічною умовою (блок «Buffer 4») — що жила 3 руйнується після втрати працездатності внутрішньою оболонкою 6.

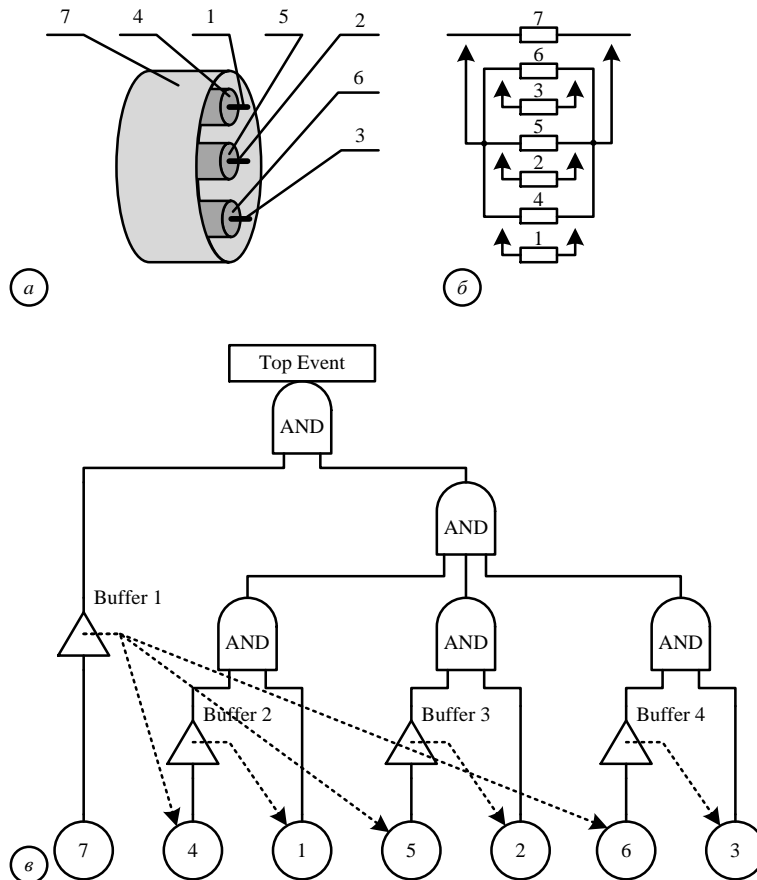


Рис. 3. Модель надійності каналу з трьома жилами та спільною зовнішньою оболонкою і роздільними внутрішніми оболонками: а) структура каналу; б) блок-схема надійності; в) динамічне дерево відмов

Структура 4: комбінована зовнішня оболонка і комбіновані внутрішні оболонки

Канал (рис. 4а) складається з трьох жил 1, 2, 3; двох комбінованих зовнішніх оболонок 4, 5; двох комбінованих внутрішніх оболонок 6, 7. Сукупність жил 1 та 2, внутрішньої оболонки 4, зовнішньої оболонки 6 називатимемо зовнішньою товстою серцевиною. Сукупність жили 3, внутрішньої оболонки 5, зовнішньої оболонки 7 — зовнішньою тонкою серцевиною. Припускаємо, що жили 1 та 2 можуть бути зруйнованими тільки після руйнування внутрішньої оболонки 4, як і жила 3 після руйнування внутрішньої оболонки 5. В свою чергу, внутрішня оболонка 4 може бути зруйнована після руйнування зовнішньої оболонки 6, а внутрішня оболонка 5 — після руйнування зовнішньої оболонки 7 (рис. 4б).

Непрацездатність каналу (блок «Top Event») настає, якщо зруйновані обидві серцевини. Це відображено на динамічному дереві відмов (рис. 4в). Товста серцевина руйнується, якщо руйнуються зовнішня оболонка 6 (блок «Basic Event 6»), внутрішня оболонка 4 (блок «Basic Event 4»), обидві жили 1 і 2 (блоки «Basic Event 1» і «Basic Event 2»). Тонка серцевина руйнується, якщо руйнуються зовнішня оболонка 7 (блок «Basic Event 7»), внутрішня оболонка 5 (блок «Basic Event 5»), жила 3 (блок «Basic Event 3»). Першою логічною умовою (блок «Buffer 1») введено припущення, що внутрішня оболонка 5 руйнується тільки після руйнування зовнішньої оболонки 7. Друга логічна умова (блок «Buffer 2») визначає, що жила 3 руйнується тільки після втрати працездатності внутрішньою оболонкою 5. Аналогічно, третя логічна умова (блок «Buffer 3») визначає, що внутрішня оболонка 4 руйнується тільки після втрати працездатності зовнішньою оболонкою 6, четверта логічна умова (блок «Buffer 4») — що жили 1 та 2 руйнуються після руйнування внутрішньої оболонки 4.

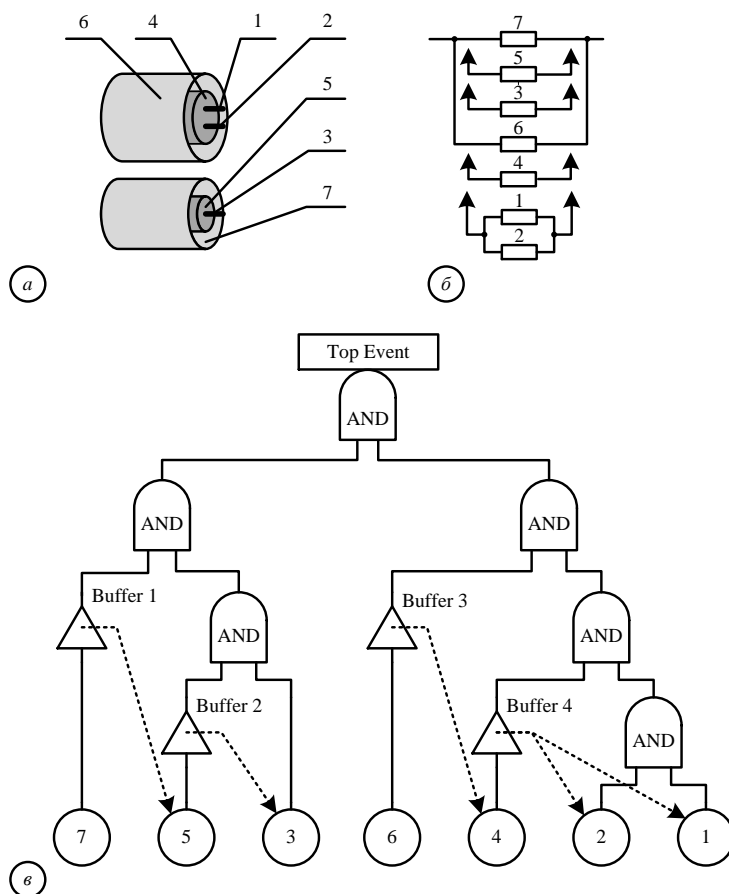


Рис. 4. Модель надійності каналу з трьома жилами та комбінованими зовнішньою оболонкою і внутрішньою оболонками: а) структура каналу; б) блок-схема надійності; в) динамічне дерево відмов

Структура 5: комбінована зовнішня оболонка і роздільні внутрішні оболонки

Канал (рис. 5а) складається з трьох жил 1, 2, 3; трьох роздільних внутрішніх оболонок 4, 5, 6; двох комбінованих зовнішніх оболонок 7, 8. Сукупність жил 1, 2; внутрішніх оболонок 4, 5; зовнішньої оболонки 7 називатимемо зовнішньою товстою серцевиною. Сукупність жили 3, внутрішньої оболонки 6, зовнішньої оболонки 8 називатимемо тонкою серцевиною. Припустимо, що жила 1 може бути зруйнована після руйнування внутрішньої оболонки 4, жила 2 — після руйнування внутрішньої оболонки 5, жила 3 — після руйнування внутрішньої оболонки 6 (рис. 5б).

Непрацездатність каналу (блок «Top Event») настає, якщо зруйновані обидві серцевини. Це відображено на динамічному дереві відмов (рис. 5в). Товста серцевина руйнується, якщо руйнуються зовнішня оболонка 7 (блок «Basic Event 7»), внутрішні оболонки 4 та 5 (блоки «Basic Event 4» і «Basic Event 5»), обидві жили 1 і 2 (блоки «Basic Event 1» і «Basic Event 2»). Тонка серцевина руйнується, якщо руйнуються зовнішня оболонка 8 (блок «Basic Event 8»), внутрішня оболонка 6 (блок «Basic Event 6»), жила 3 (блок «Basic Event 3»). Першою логічною умовою (блок «Buffer 1») введено припущення, що внутрішня оболонка 6 руйнується тільки після руйнування зовнішньої оболонки 8. Друга логічна умова (блок «Buffer 2») визначає, що жила 3 руйнується тільки після втрати працездатності внутрішньою оболонкою 6. Аналогічно, третя логічна умова (блок «Buffer 3») визначає, що внутрішні оболонки 4 та 5 руйнуються тільки після втрати працездатності зовнішньою оболонкою 7. Четверта логічна умова (блок «Buffer 4») визначає, що жила 1 руйнується після руйнування внутрішньої оболонки 4, а п'ята логічна умова (блок «Buffer 5»), що жила 2 руйнується тільки після руйнування внутрішньої оболонки 5..

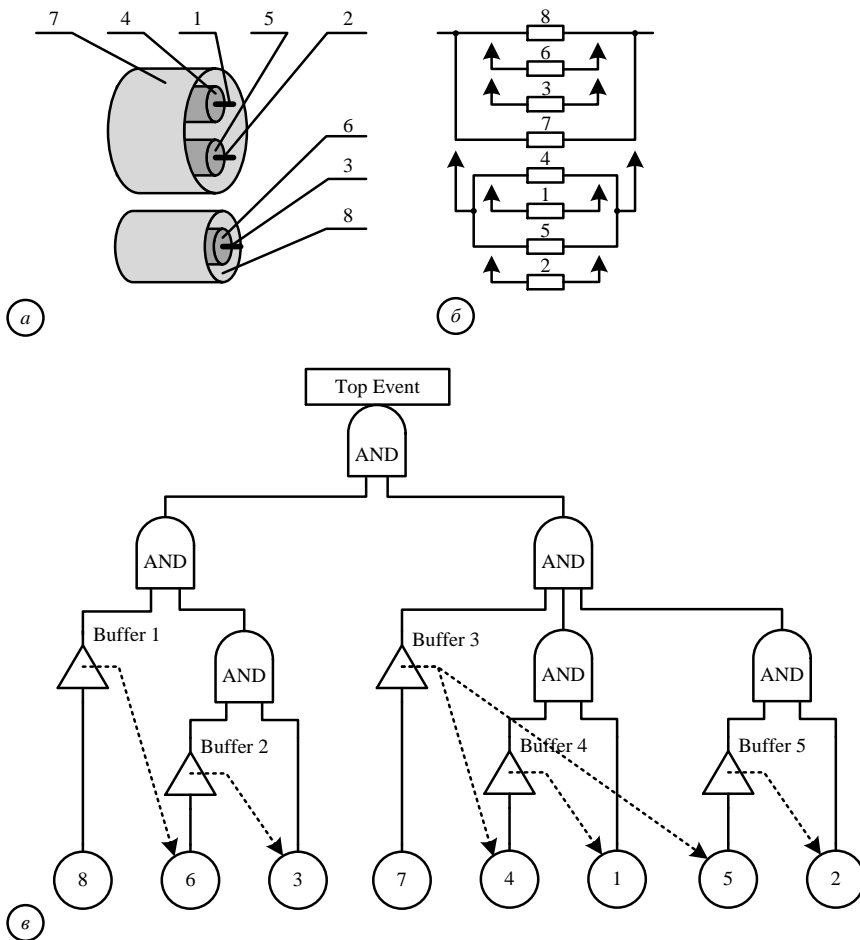


Рис. 5. Модель надійності каналу з трьома жилами та комбінованою зовнішньою оболонкою і роздільними внутрішніми оболонками: а) структура каналу; б) блок-схема надійності; в) динамічне дерево відмов

Структура 6: роздільні зовнішні оболонки і роздільні внутрішні оболонки

Канал (рис. 6а) складається з трьох жил 1, 2, 3; трьох роздільних внутрішніх оболонок 4, 5, 6; трьох роздільних зовнішніх оболонок 7, 8, 9. Сукупність жили 1, внутрішньої оболонки 4, зовнішньої оболонки 7; жили 2, оболонки 5 та 8; жили 3, оболонки 6 та 9 називатимемо серцевинами. Отже, канал складається з трьох однакових серцевин. Припустимо, що жила 1 може бути зруйнована після руйнування внутрішньої оболонки 4, жила 2 після руйнування внутрішньої оболонки 5, а жила 3 — внутрішньої оболонки 6. В свою чергу, внутрішня оболонка 4 може бути зруйнована тільки після руйнування зовнішньої оболонки 7, внутрішня оболонка 5 після руйнування зовнішньої оболонки 8, а внутрішня оболонка 6 — зовнішньої оболонки 9 (рис. 6б).

Непрацездатність каналу (блок «Top Event») настає, якщо зруйновані усі три серцевини. Це відображено на динамічному дереві відмов (рис. 6в). Перша серцевина руйнується після руйнування зовнішньої оболонки 7 (блок «Basic Event 7»), внутрішньої оболонки 4 (блок «Basic Event 4») і жили 1 (блок «Basic Event 1»). Друга серцевина руйнується після руйнування оболонок 8 та 5 (блок «Basic Event 8» і «Basic Event 5») і жили 2 (блок «Basic Event 2»). Третя — оболонок 9 та 6 (блок «Basic Event 9» і «Basic Event 6») і жили 3 (блок «Basic Event 3»). Першою логічною умовою (блок «Buffer 1»), третьою логічною умовою (блок «Buffer 3») і п'ятою логічною умовою (блок «Buffer 5») введено припущення, що внутрішня оболонка 6 руйнується тільки після руйнування зовнішньої оболонки 9, оболонка 5 після руйнування оболонки 8, а оболонка 4 після руйнування оболонки 7, відповідно. Другою логічною умовою (блок «Buffer 2»), четвертою логічною умовою (блок «Buffer 4») і шостою логічною умовою (блок «Buffer 6») введено припущення, що жила 3 руйнується тільки після руйнування внутрішньої оболонки 6, жила 2 після руйнування оболонки 5, жила 1 після руйнування оболонки 4, відповідно.

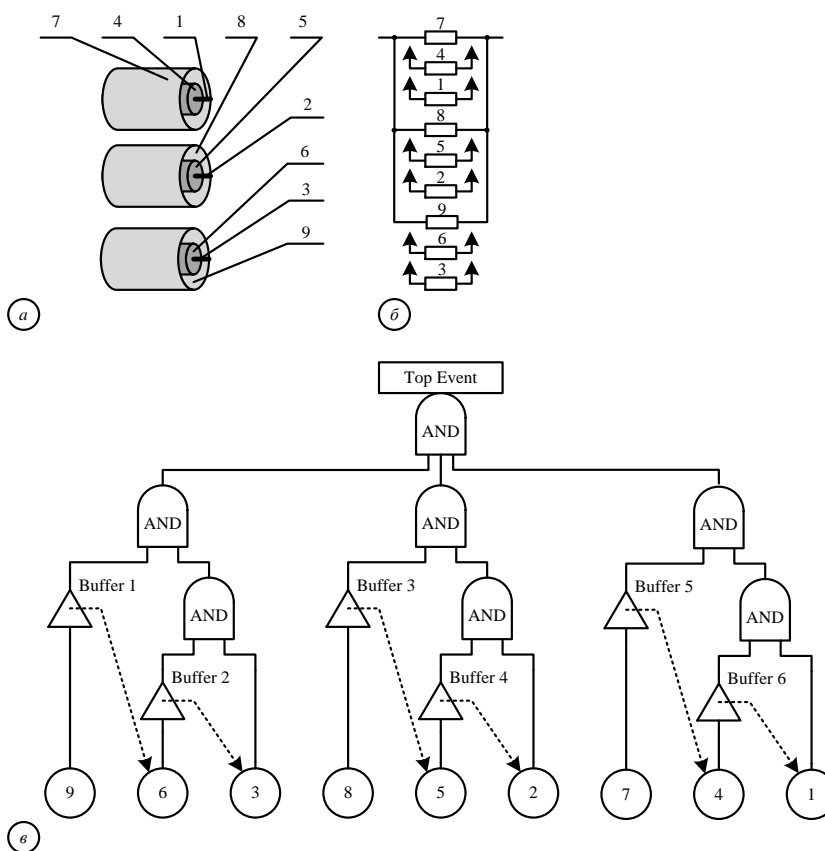


Рис. 6. Модель надійності каналу з трьома жилами та роздільними зовнішніми оболонками і роздільними внутрішніми оболонками: а) структура каналу; б) блок-схема надійності; в) динамічне дерево відмов

Результати та обговорення

Для виконання статичного та динамічного аналізу системи використано діаграми станів та переходів. Їх побудову виконано за поданими вище блок-схемами надійності і динамічними деревами відмов. Кількість станів в діаграмах мінімізовано, а інформацію про них для кожної із структур подано в табл. 1. Самі діаграми в роботі не наведено через їх значні розміри.

Таблиця 1

Аналіз станів для діаграм станів та переходів залежно від структури каналу

Структура	Кількість елементів в структурі	Кількість станів після мінімізації діаграм		
		всього	працездатні	непрацездатні
1	5	6	5	1
2	6	11	10	1
3	7	11	10	1
4	7	18	17	1
5	8	20	19	1
6	9	20	19	1

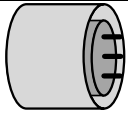
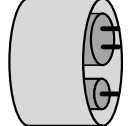
Як бачимо, кількість станів і, відповідно, складність моделей зростає із зростанням кількості складових у структурі каналу. Наприклад, для каналу із спільними зовнішньою та внутрішньою оболонками (структура 1), який складається з 5 елементів, кількість станів в діаграмі є мінімальною і рівною 6. В той час, як для каналу із роздільними зовнішніми та внутрішніми оболонками (структура 6), який складається із 9 елементів, кількість станів в діаграмі зростає максимально, а саме до 20.

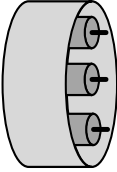
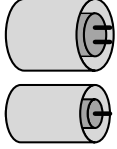
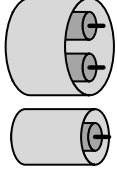
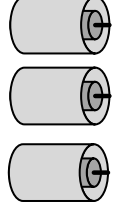
Щоб виконати статичний аналіз, потрібно записати для кожного із станів діаграм логіко-ймовірнісні вирази. Вважатимемо, що ймовірність працездатності зовнішньої кабельної оболонки становить p_3 , ймовірність працездатності внутрішньої кабельної оболонки — p_2 , а жили — p_1 . Відповідно, ймовірність пошкодження зовнішньої кабельної оболонки обчислимо як $q_3 = 1 - p_3$, внутрішньої — $q_2 = 1 - p_2$, жили $q_1 = 1 - p_1$. Щоб виконати динамічний аналіз дослідимо переходи між станами діаграм та визначимо параметри цих переходів. Позначимо інтенсивність пошкодження зовнішньої оболонки як λ_3 , внутрішньої оболонки — λ_2 , а інтенсивність пошкодження жили — λ_1 .

Порівняємо статичні ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку для кожної із шести структур. Розглянемо випадок, за якого ймовірності безвідмовної роботи жили та внутрішньої і зовнішньої кабельних оболонок підпорядковуються експоненціальному закону розподілу з інтенсивностями $\lambda_1 = 0.9$, $\lambda_2 = 0.5$, $\lambda_3 = 0.1$. Обчислення виконано за логіко-ймовірнісними виразами, які в роботі не наведено, а результати статичного аналізу зведено в табл. 2.

Таблиця 2

Статична оцінка працездатності каналу зв'язку залежно від його структури

Структура, i	Схема каналу зв'язку	Ймовірність працездатності каналу зв'язку для i -тої структури, P_i
1		0.372371
2		0.376600

3		0.380800
4		0.375016
5		0.608591
6		0.752582

З метою точнішої оцінки працездатності каналів зв'язку виконано динамічний аналіз та отримано графіки ймовірнісних характеристик для шести структур, які подано на рис. 7.

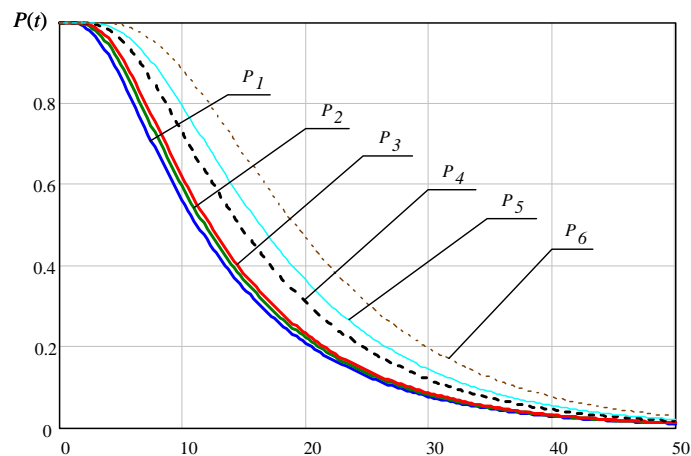


Рис. 7. Діаграма математичної функції

Отримані дані (рис. 7, табл. 2,) свідчать про перевагу роздільних кабельних оболонок у порівнянні із спільними та комбінованими. Із зростанням кількості роздільних оболонок у структурі каналу зв'язку ймовірність працездатності каналу зростає.

Висновки

Використання трикратного резервування та подвійної захисної оболонки дозволяє отримати шість різних структурних схем каналу зв'язку. Три із цих схем є симетричними, а три несиметричними. Для оцінювання надійності такого каналу зв'язку було розроблено методи та моделі. Математичні моделі побудовано за діаграмами станів та переходів, а самі діаграми отримано на основі блок-схем та динамічних дерев відмов. Статичні математичні моделі записано як логіко-ймовірнісні вирази, а динамічні моделі як системи диференціальних рівнянь з використанням марковського аналізу.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що надійність каналу зв'язку із

трикратним резервуванням та подвійною захисною оболонкою зростає із збільшенням кількості роздільних оболонок. Майбутні дослідження планується присвятити виявленню закономірностей у розглянутих в попередніх дослідженнях структурних схемах каналів зв'язку. Знайдені закономірності будуть використані для розробки спеціалізованого програмного забезпечення, яке автоматизує процес оцінювання надійності каналів зв'язку з будь-якою кількістю жил і захисних оболонок.

Перелік використаних джерел

- [1] E. Gulski and R. Jongen, "Condition Based Maintenance of Transmission Power Cables," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 3, pp. 1588-1597, June 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3092757.
- [2] S. S. Bang and Y. -J. Shin, "Classification of Faults in Multicore Cable via Time-Frequency Domain Reflectometry," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 5, pp. 4163-4171, May 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2920606.
- [3] T. Zhang et al., "Analysis of Three-Core Composite Submarine Cable Damage Due to Ship Anchor," in IEEE Access, vol. 10, pp. 93910-93920, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3203589.
- [4] D. Jiménez, J. Barrera and H. Cancela, "Communication Network Reliability Under Geographically Correlated Failures Using Probabilistic Seismic Hazard Analysis," in IEEE Access, vol. 11, pp. 31341-31354, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3255794.
- [5] Y. Shunqi, Z. Ying, L. Xiang, L. Yanfeng and H. Hongzhong, "Reliability analysis for wireless communication networks via dynamic Bayesian network," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 34, no. 5, pp. 1368-1374, October 2023, doi: 10.23919/JSEE.2023.000130.
- [6] S. -W. Lee, J. -W. Choe, I. -S. Kwon, B. -B. Park and H. -J. Kim, "Precision and Performance Evaluation of Accelerated Aging System for DC TP Power Cables," in IEEE Access, vol. 11, pp. 43424-43434, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3269799.
- [7] G. Mazzanti, "The Effects of Seasonal Factors on Life and Reliability of High Voltage AC Cables Subjected to Load Cycles," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 4, pp. 2080-2088, Aug. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2960618.
- [8] T. Stefanovych, S. Shcherbovskykh. "Reliability evaluation of wired duplicated control channel with common and separate cable jackets," Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation, vol 54, pp. 50-58, 2020, doi: 10.23939/istcipa2020.54.050. [In Ukrainian]
- [9] S. Shcherbovskykh, V. Bilas, T. Stefanovych, "Reliability evaluation of wired tripled control channel for common, separate, and mixed cable jackets," Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation, vol. 55, pp. 15-24, 2021, doi: 10.23939/istcipa2021.55.015. [In Ukrainian]
- [10] M. Lobur, S. Shcherbovskykh and T. Stefanovych, "Reliability Audit of the Duplicated Wired Channel with an Accounting of Reinforcement and Cable Jacket," 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Lviv, Ukraine, 2021, pp. 19-22, doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385256.
- [11] S. Shcherbovskykh, T. Stefanovych and P. Denysyuk, "Reliability Analysis of the Duplicated Wired Channels with Tripled Protective Reinforcement," 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana (Zakarpattya), Ukraine, 2022, pp. 89-92, doi: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002909.

Serhiy Shcherbovskykh¹, Tetyana Stefanovych², Dariia Rebot³

¹ Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, S. Bandery street 12, E-mail: serhiy.v.shcherbovskykh@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-8535-733X

² Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, S. Bandery street 12, E-mail: tetyana.o.stefanovych@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8577-4755

³ Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, S. Bandery street 12, E-mail: dariya.p.rebot@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3583-0800

RELIABILITY EVALUATION OF THE TRIPLED WIRED CHANNEL WITH DOUBLED PROTECTIVE REINFORCEMENT

Abstract. Modern computer systems rely heavily on the exchange of information through various physical communication channels. The failure of a communication channel, particularly in systems responsible for critical facilities, can result in significant material and human losses. Therefore, ensuring the reliability of communication channels is a pressing issue. This paper is part of a series of publications dedicated to evaluating the reliability of communication channels. The purpose is to develop methods and models for assessing the reliability of a communication channel with tripled wired redundancy and doubled protective reinforcement. Block diagrams and dynamic fault trees were used to create mathematical models during the formalization stage. These models were used to develop both static and dynamic models based on state and transition diagrams. The static models are expressed using logical-probabilistic expressions, while the dynamic models are represented as systems of differential equations using Markov analysis. The channel's structure can form six different schemes due to the presence of three cores and a double protective reinforcement. Three of these schemes are symmetrical, and the other three are asymmetrical. The most reliable structure is the one with separate outer and inner protective reinforcements for each of the three cores. The least reliable structure is when the three cores share common outer and inner reinforcements. Reliability indicators for structures with various combinations of cable reinforcements take intermediate values between the extreme cases. The reliability of such structures increases with an increase in the number of separate reinforcements. It is important to note that reliability indicators obtained using static models are underestimated and less accurate compared to indicators calculated using dynamic models. However, it is recommended to use static models for the initial assessment of the reliability indicators of communication channels due to their simpler construction.

Models have been developed to improve the reliability assessment of communication channels with multiple redundancies of cores and an arbitrary number of protective reinforcements. Specifically, models have been created for a communication channel with triple redundancy of cores and double protective reinforcement. The proposed approach will be useful for assessing reliability in the design of modern technical systems, particularly computer systems responsible for critical facility operations. Failure of these systems can result in material damage and endanger service personnel. Further research will involve establishing regularities in the obtained models. These regularities will form the basis of specialised software for automated reliability assessment of communication channels with any number of cores and protective reinforcements.

Keywords: reliability model, communication channel, cable protective reinforcement, redundancy, reliability block diagram, dynamic fault tree.