

ВРАХУВАННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ВІДНОВЛЮВАНИМИ КОМУНІКАЦІЙНИМИ КАНАЛАМИ СИСТЕМИ ІЗ ТРЬОХ З'ЄДНАНИХ ТРИКУТНИКОМ ІОТ-ПРИСТРОЇВ

© Щербовських С., Стефанович Т., 2019

Сформовано k-термінальне динамічне дерево відмов для системи з трьох ІоТ-пристроїв, з'єднаних трикутником. На основі дерева відмов згенеровано діаграму станів і переходів. Запропонована модель адекватно враховує ефекти перерозподілу навантаження між відновлюваними каналами зв'язку. На основі методу Монте-Карло розраховано характеристики доступності та характеристики причин відмов, проведено порівняльний аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: кібербезпека, інтернет речей, доступність, динамічне дерево відмов, моделювання методом Монте-Карло, перерозподіл навантаження.

Вступ

З кожним роком кількість ІоТ-пристроїв стрімко зростає. Такі пристрої стають невіддільною частиною усіх сфер сучасного життя. Вони збирають дані про навколишній світ, пересилають ці дані у хмару, одержують із хмари команди та виконують їх. Віднедавна ІоТ-пристрої стали об'єктами інтересу зловмисників. Низькопродуктивний контролер та мала оперативна пам'ять, відсутність єдиного стандарту безпеки, програмне забезпечення, яке вчасно не оновлюють розробники, не дозволяють розробити ефективні механізми проти зловмисників. Шкода від одного поломаного або недоступного ІоТ-пристрою може бути незначною. Однак масова недоступність таких пристроїв, особливо коли йдеться про промисловий інтернет речей, може становити значну загрозу здоров'ю та життя людей, а також навколишньому середовищу.

Постановка проблеми

У цій публікації розглянуто проблему доступності системи ІоТ-пристроїв під дією DDoS-атаки, тобто атаки на відмову в обслуговуванні. Зокрема досліджено, як врахувати вплив перерозподілу навантаження в комунікаційних каналах таких пристроїв на доступність усієї системи. Для моделювання обрано систему, яка складається із трьох ІоТ-пристроїв, які попарно взаємодіють між собою. Така система утворює логічний трикутник. Вона є найпростішою системою, в якій виникає перерозподіл навантаження. Зловмисники намагаються за допомогою DDoS-атак заблокувати канали зв'язку між окремими пристроями і зробити їх недоступними. Якщо у системі є три пристрої, то обмін інформацією між ними можна забезпечити щонайменше двома шляхами. Основний шлях полягає у безпосередній комунікації двох ІоТ-пристроїв. У випадку відмови основного шляху, дані передаються по колу із залучення сусіднього пристрою. Навантаження двох каналів, які утворили резервний шлях, зростає. Зростання навантаження зумовлено тим, що по цих каналах відбувається одночасне передавання основних та транзитних даних. Зростання навантаження на канал підвищує його вразливість для DDoS-атаки. Також розглянуто зворотний процес відновлення комунікаційних каналів у результаті вживання заходів щодо усунення DDoS-атаки.

Актуальність дослідження

Під час проектування систем, які складаються із великої кількості IoT-пристроїв, які взаємодіють між собою, важливо враховувати явища перерозподілу навантаження. За допомогою DDoS-атак зловмисники можуть руйнувати канали передавання інформації. В результаті зростає навантаження решти каналів, що призводить до зменшення показників доступності усієї системи. Важливо ще на етапі проектування передбачити ці явища та вжити адекватних заходів з застосуванням апаратних та програмних рішень.

Формулювання мети та завдань статті

Мета цього дослідження – удосконалили математичні засади для врахування зниження показників доступності систем, пов'язаних із зростанням навантаження відновлюваних каналів для передавання інформації між IoT-пристроями, які з'єднані трикутником.

Завданнями статті є

- формалізувати доступність системи на основі динамічного дерева відмов;
- сформувати простір станів системи;
- обчислити показники доступності системи методом Монте-Карло.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для аналізу доступності IoT- та IIoT-пристроїв під дією кібератак застосовують такі математичні моделі. В [1] автори використовують звичайну марковську модель для опису доступності пристроїв в мережі. Недолік такого підходу полягає у тому, що для опису ймовірнісних характеристик кібератак використовують експоненціальний розподіл. Вказане допущення не завжди є коректним. В [2, 3] використовують діаграми бінарного вибору та імітаційне моделювання методом Монте-Карло. Недоліком діаграм бінарного вибору є неможливість врахувати перерозподіл навантаження. У [4] використовують динамічне дерево відмов та метод Монте-Карло. Такий підхід є ефективним, але в статті не розглянуто питання застосування його до багатотермінальних систем. У [5–7] розглянуто питання перерозподілу навантаження, але з цією метою використовують динамічні дерева відмов та звичайні марковські моделі.

Виклад основного матеріалу

Опис системи

Для дослідження обрано систему, яка складається із трьох IoT-пристроїв А, В та С (рис. 1).

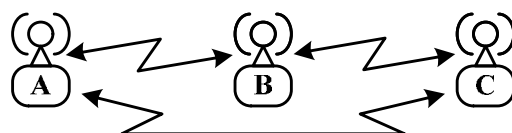


Рис. 1. Структура системи

Комунікація між пристроями здійснюється у двосторонньому режимі через канали АВ, ВС та АС. Ймовірність відмови каналів розподілена за Вейбулом із такими параметрами: канал АВ — $\{\alpha_{AB}; \beta_{AB}\}$, ВС — $\{\alpha_{BC}; \beta_{BC}\}$ та АС — $\{\alpha_{AC}; \beta_{AC}\}$. Ймовірність відновлення каналів розподілена експоненційно із такими параметрами: канал АВ — μ_{AB} , ВС — μ_{BC} та АС — μ_{AC} . У випадку відмови одного із каналів для передавання інформації між сусідніми IoT-пристроями залучається третій IoT-пристрій та два інших працездатних канали. Відповідно, навантаження цих каналів зростає.

Вважаємо, що перемикання між каналами здійснюється миттєво, а перемикальний пристрій не допускає помилок. Зокрема, якщо канал АВ відмовив, тоді дані передаються через канали АС та ВС. Коефіцієнт, який показує зростання навантаження для каналу ВС, становить k_{11} , а для каналу АС — k_{12} . Якщо канал ВС відмовив, тоді дані передаються через канали АВ-АС (ВА-АС) із коефіцієнтами навантаження k_{21} та k_{22} . Якщо канал АС відмовив, то через канали АВ-ВС із коефіцієнтами k_{31} і k_{32} .

У випадку відмови будь-яких двох каналів, один із IoT-пристроїв виявляється цілком недоступним для системи. Водночас два інших IoT-пристрої продовжують взаємодіяти між собою, а навантаження каналу між ними зменшується до початкового. У цій публікації ми вважаємо такі стани працездатними із погіршеними характеристиками. Тобто система є працездатною, проте виконує лише ті задачі, які не потребують даних від недоступного пристрою. Решта задач ставиться у чергу.

У випадку відмови усіх трьох комунікаційних каналів усі пристрої стають недоступними один відносно одного. Вважаємо, що система у такому стані стає непрацездатною.

Динамічне дерево відмов

Для математичного опису ризику відсутності доступу до даних сформуємо динамічне дерево відмов системи. Оскільки система містить три незалежних IoT-пристрої, які попарно взаємодіють між собою, то для опису застосовуємо k -термінальну модель. Така модель складається із трьох дерев відмов, які зв'язані між собою динамічними залежностями. Древа відмов визначають умови зв'язності між кожною парою IoT-пристроїв, а динамічні залежності враховують зміну навантаження каналів.

Відсутність зв'язку між пристроями А та В позначимо блоком “Top Event 1” (рис. 2). Така подія виникає, якщо комунікація між пристроями неможлива ні за основним шляхом, ні за резервним шляхом. Це описано операцією AND у блоці “Gate 1”. Комунікація за основним шляхом стає неможливою, якщо відбулась відмова каналу АВ, що описано блоком “Basic Event 1”. Комунікація за резервним шляхом неможлива, якщо відбулась відмова хоча б одного із його каналів. Це описано операцією OR у блоці “Gate 3”. Резервний шлях складено із каналів ВС і АС, відмови яких описано блоками “Basic Event 2” та блоком “Basic Event 3”.

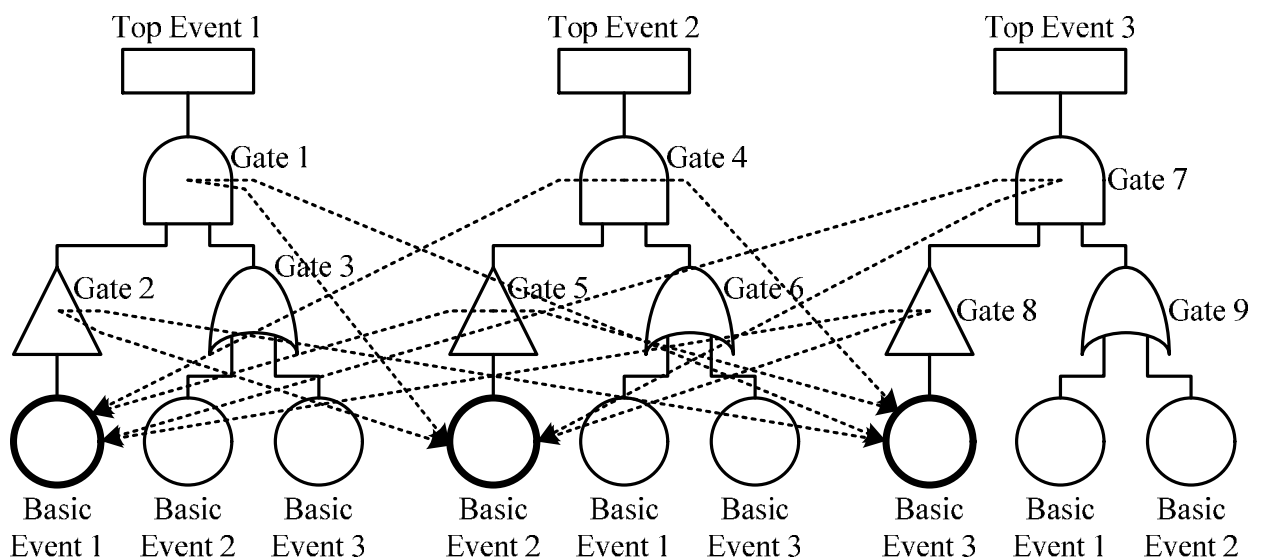


Рис. 2. Динамічне дерево відмов системи

У системі відбуваються два типи динамічних явищ, які полягають у перерозподілі навантаження каналів. Перший тип полягає у зростанні навантаження каналів, які формують резервний шлях. Другий тип полягає у поверненні навантаження каналів резервного шляху до початкового стану, якщо цей шлях перестав функціонувати.

У першому дереві для опису першого типу динамічних явищ у блоці “Gate 2”, який є повторювачем сигналу блока “Basic Event 1”, задано логічну умову. Якщо канал АВ непрацездатний, тобто із блока “Gate 2” надходить сигнал True, то навантаження каналу ВС зростає k_{11} раз, а навантаження каналу АС зростає в k_{12} раз. Для опису другого типу динамічних явищ у блоці “Gate 1” задано логічну умову. Якщо канал АВ непрацездатний і хоча б один із каналів ВС або АС також непрацездатний, тобто із блока “Gate 1” надходить сигнал True, то навантаження каналу ВС спадає в k_{11} раз, а навантаження каналу АС спадає в k_{12} раз.

Побудову другого та третього дерев відмов, а також опис відповідних динамічних явищ виконуємо за аналогією до першого дерева.

Діаграма станів та переходів системи

На підставі поданого вище k -термінального динамічного дерева відмов побудовано граф станів та переходів системи (рис. 3, табл. 1).

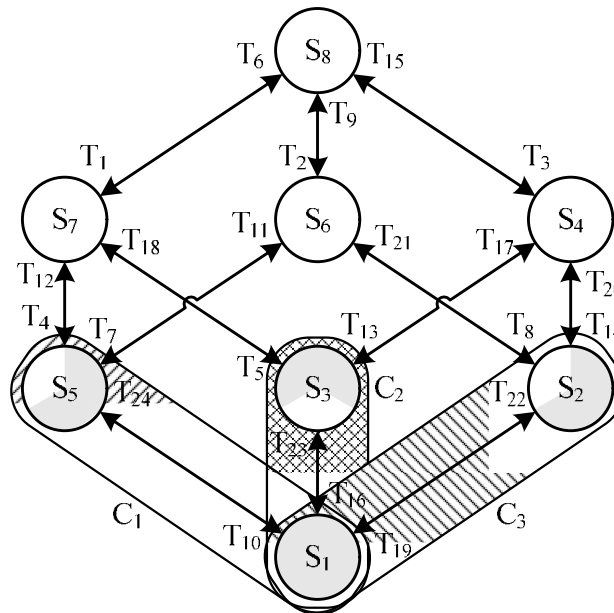








Рис. 3. Граф станів та переходів системи

Таблиця 1

Опис станів та переходів на графі системи

Назва	Піктограма	Стани						Переходи		
		Номер “Basic Event”			Номер “Top Event”			Назва	Номер “Basic Event”, яка закінчується	Назва кінцевого стану
AB	BC	AC	AB	BC	AC	9	10			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S ₈		1/4	2/5	3/6	1	2	3	T ₁	1	S ₇
		1/0	1/0	1/0	True	True	True	T ₂	2	S ₆
									T ₃	3
S ₇		0/1	$k_{11}/0$	$k_{12}/0$	True	True	True	T ₄	2	S ₅
								T ₅	3	S ₃
									T ₆	4

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S ₆		$k_{21}/0$	0/1	$k_{22}/0$	True	True	True	T ₇	1	S ₅
								T ₈	3	S ₂
								T ₉	5	S ₈
S ₅		0/1	0/1	1/0	False	False	True	T ₁₀	3	S ₁
								T ₁₁	5	S ₆
								T ₁₂	6	S ₇
S ₄		$k_{31}/0$	$k_{32}/0$	0/1	True	True	True	T ₁₃	1	S ₃
								T ₁₄	2	S ₂
								T ₁₅	6	S ₈
S ₃		0/1	1/0	0/1	False	True	False	T ₁₆	2	S ₁
								T ₁₇	4	S ₄
								T ₁₈	6	S ₇
S ₂		1/0	0/1	0/1	True	False	False	T ₁₉	1	S ₁
								T ₂₀	5	S ₄
								T ₂₁	6	S ₆
S ₁		0/1	0/1	0/1	False	False	False	T ₂₂	4	S ₂
								T ₂₃	5	S ₃
								T ₂₄	6	S ₅

У графі круг, який позначає стан системи, поділено на три сектори. Кожний сектор відповідає станам блоків Top Event. Зокрема, верхній правий сектор відповідає блоку “Top Event 1”, нижній сектор блоку “Top Event 2”, а верхній лівий сектор блоку “Top Event 3”. Якщо є зв’язок між IoT-пристроями за основним або за резервним шляхом, то відповідний сектор зафарбовано білим кольором, а якщо зв’язку немає, то сірим. Граф містить 8 станів, із яких 4 відповідають повній доступності пристроїв, 3 частковій доступності, в одному стані взаємний доступ між усіма пристроями відсутній. Переходи позначають відмови каналів зв’язку. Граф містить 24 переходи. Для аналізу причин недоступності IoT-пристроїв виокремлено три множини станів. Відсутність зв’язку між пристроями А і В характеризується множинами C_1 та C_2 . Відсутність зв’язку між пристроями В і С характеризується множинами C_1 та C_3 . Відсутність зв’язку між пристроями А і С характеризується множинами C_2 та C_3 . В множину C_1 входять стани S₅, S₁, в множину C_2 стани S₃ та S₁, а в множину C_3 містить стани S₂ і S₁. У таблиці подано детальний аналіз усіх станів та переходів системи.

Результати моделювання

Ґрунтуючись на графі станів та переходів системи, обчислено ймовірнісні характеристики системи. Оскільки розподіли суттєво відрізняються від експоненціального закону, то обчислення виконано на основі імітаційного моделювання методом Монте-Карло. Обчислення виконане в умовних одиницях часу, зокрема, кінцевий час розрахунку становить $t = 1$. Кількість ітерацій методу Монте-Карло було прийнято 1 000 000, а кількість інтервалів розбиття часової осі 100. Параметри розподілу для каналу АВ встановлюємо $\alpha_{AB} = 1$ та $\beta_{AB} = 1,5$. Якщо відмовив канал ВС, то навантаження каналу АВ зростає в $k_{21} = 2,2$ раз, а якщо відмовив канал АС, то в $k_{31} = 2,3$ раз. Параметри розподілу для каналу ВС встановлюємо $\alpha_{BC} = 0,75$ та $\beta_{BC} = 1,5$. Якщо відмовив канал АВ,

то навантаження каналу ВС зростає в $k_{11} = 2,1$ раз, а якщо відмовив канал АС, то в $k_{32} = 2,3$ раз. Параметри розподілу для каналу АС встановлюємо $\alpha_{AC} = 0,5$, $\beta_{AC} = 1,5$. Якщо відмовив канал АВ, то навантаження каналу АС зростає в $k_{12} = 2,1$ раз, а якщо відмовив канал ВС, то в $k_{22} = 2,2$ раз. Параметри розподілу для процесів відновлення усіх каналів становить $\mu_{AB} = \mu_{BC} = \mu_{AC} = 100$. Параметри відмов вибрано наближеними до значення умовної одиниці часу 1, а параметри відновлення вибрано, для прикладу, у 100 разів більше. Якщо відновлення роботи ще інтенсивнішим, то для забезпечення точності обчислення кількість ітерацій метод Монте-Карло треба суттєво збільшувати.

На рис. 4 сходинокми подано ймовірнісні характеристики системи залежно від часу. Зокрема, на рис. 4а подано характеристики доступності між IoT-пристроями, а на рис. 4б характеристики інтенсивності настання відмов каналів зв'язку між IoT-пристроями. На обох фрагментах АВ позначає ймовірнісні характеристики для пари пристроїв А та В, ВС для пари В та С, а АС для пари А та С. Як видно із рисунка, найпроблемнішим місцем у системі є забезпечення зв'язку між пристроями А та С.

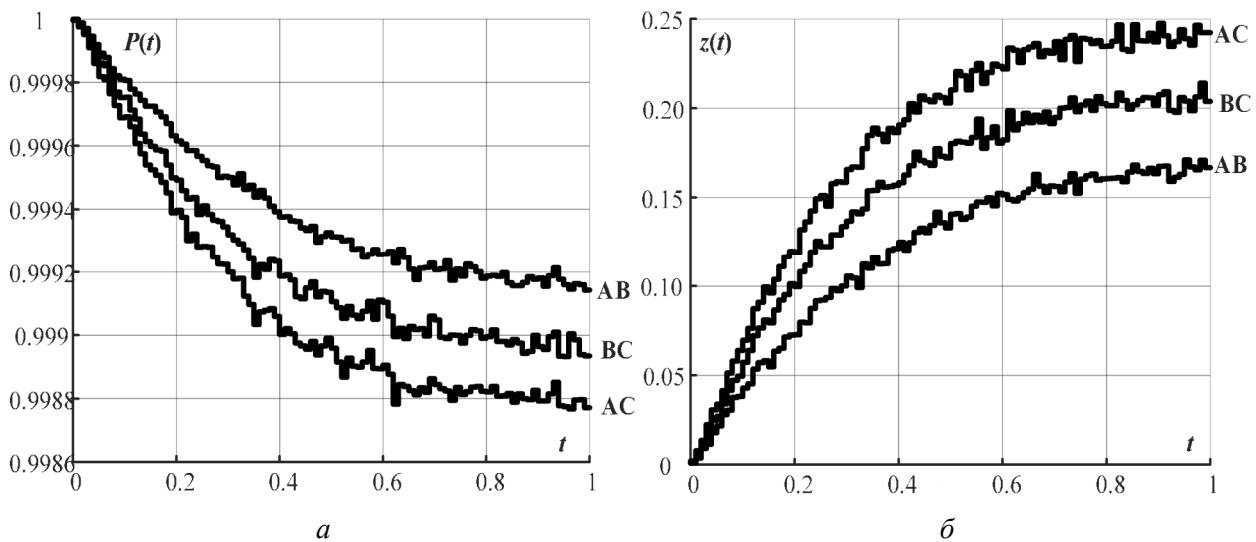


Рис. 4. Ймовірнісні характеристики системи:
 а – доступність; б – інтенсивність настання відмов

На рис. 5 сходинокми подано ймовірнісні характеристики причин відсутності передавання даних між IoT-пристроями.

Зокрема, на рис. 5, а подано ймовірності причин відсутності зв'язку між пристроями А та В. Таких причин є дві: одночасна непрацездатність каналів АВ і АС, та одночасна непрацездатність каналів АВ і ВС. Сума цих ймовірностей є більшою за одиницю, оскільки в них враховано ймовірність перебування системи у спільному непрацездатному стані S_1 . Після нормування співвідношення причин становить 0,59 до 0,41. На рис. 5, б подано ймовірності причин відсутності зв'язку між пристроями В та С. Таких причин є дві: одночасна непрацездатність каналів ВС і АС, та одночасна непрацездатність каналів ВС і АВ. Після нормування співвідношення причин становить 0,67 до 0,33. На рис. 5, в подано ймовірності причин відсутності зв'язку між пристроями А та С. Таких причин є дві: одночасна непрацездатність каналів АС і ВС, та одночасна непрацездатність каналів АС і АВ. Після нормування співвідношення причин становить 0,58 до 0,42.

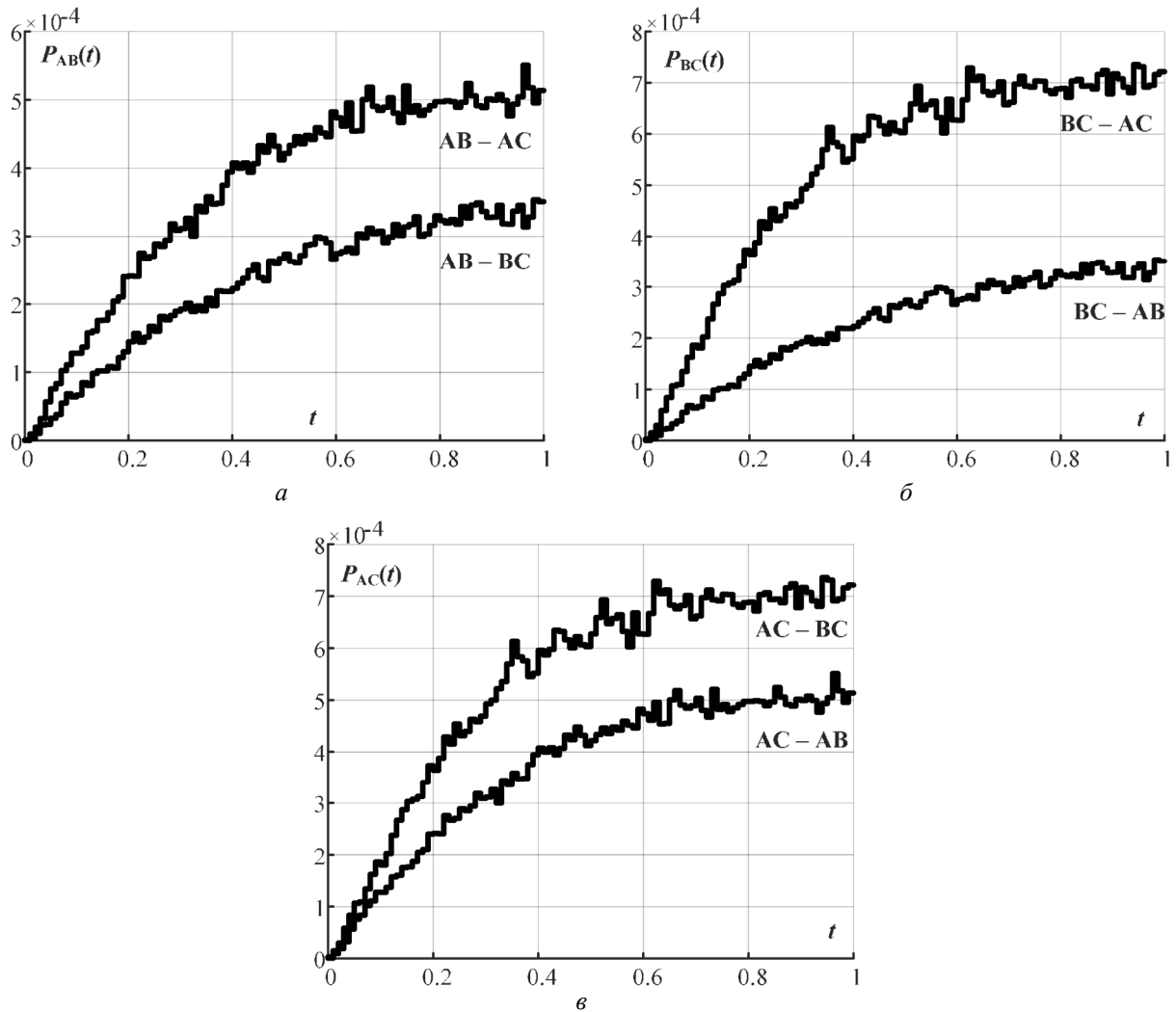


Рис. 5. Ймовірнісні характеристики причин недоступності каналів:
 а – для пари А-В; б – для пари В-С; в – для пари А-С

Висновки

У статті розроблено математичні засади для врахування ризиків, пов'язаних із зростанням навантаження каналів для передавання інформації по резервному шляху для відновлюваної системи із трьох IoT-пристроїв, сполучених трикутником. Доступність системи математично описано k -термінальним динамічним деревом відмов. У такому дереві описано динамічні явища, пов'язані із зростанням та спаданням навантаження для каналів зв'язку між IoT-пристроями. Сформовано граф системи, який містить 8 станів та 24 переходи. Ймовірнісні характеристики математичної моделі обчислено за допомогою методу Монте-Карло. Подано оцінку причин настання недоступності для кожної пари пристроїв із одночасним врахуванням пошкодження та відновлення каналів зв'язку.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження скеровані на розроблення математичної моделі для системи із чотирьох пристроїв та врахування відновлення каналів зв'язку.

Список використаних літературних джерел

1. Kolisnyk M., Kharchenko V. A. *Markov Model of IoT System Availability Considering DDoS Attacks, Patching and Energy Modes. Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Application. 2019, Vol. 171. pp. 185–207.*
2. Ramupillai Sudhesh, Savitha P. *Transient behaviour of three-heterogeneous servers queue with system disaster and server repair. RAIRO-Oper. Res. 2017, Vol. 51, No. 4. pp. 965–983.*
3. Yan-Hui Lin, Yan-Fu Li, Enrico Zio. *A Reliability Assessment Framework for Systems With Degradation Dependency by Combining Binary Decision Diagrams and Monte Carlo Simulation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2016, Vol. 46, No. 11, pp. 1556–1564.*
4. Peng Zhang, Ka Wing Chan. *Reliability Evaluation of Phasor Measurement Unit Using Monte Carlo Dynamic Fault Tree Method. IEEE Transactions on Smart Grid. 2012, Vol. 3, No. 3, pp. 1235–1243.*
5. Kosobutskyy P., Lobur M., Shcherbovskykh S., Stefanovych T. *Overlap estimation of two normally distributed systems based on Monte-Carlo simulation. Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2018), 2018, pp. 77–80.*
6. Shcherbovskykh S., Stefanovych T. *Reliability model developing for protective fittings taking into account load-sharing effect. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2015, Vol. 1, No. 3(73), pp. 37–44.*
7. Stefanovych T., Shcherbovskykh S. *Accounting of switching device errors for system with sliding redundancy based on dynamic fault tree. Technology audit and production reserves. 2018, Vol. 4, No. 2(42), pp. 24–30.*

S. Shcherbovskykh, T. Stefanovych
Lviv Polytechnic National University

**LOAD-SHARING ACCOUNTING BETWEEN THE RENEWABLE
COMMUNICATION CHANNELS OF THE SYSTEM OF THREE
IOT-DEVICES CONNECTED BY A TRIANGLE**

© Shcherbovskykh S., Stefanovych T., 2019

The k-terminal dynamic fault trees for a system of three IoT-devices connected by a triangle are formed. Based on the fault tree a state and transition diagram is generated. This model can take into account adequately) load-sharing effects between renewable communication channels. Availability characteristics and failure causes characteristics are calculated based on Monte-Carlo simulation and comparative analysis for obtained results is done.

Key words: cybersecurity, Internet of Things, availability, dynamic fault tree, Monte-Carlo simulation, load-sharing.