

В. М. Ткачов, А. А. Коваленко, Т. Г. Фесенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖНОГО АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ПІДВИЩЕНОЇ ЖИВУЧОСТІ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ НА ЕТАПІ ЇХ ПРОЕКТУВАННЯ

Анотація. В статті розглянуто особливості вибору мережного алгоритму та сформульовано задачу його оптимізації при проектуванні комп'ютерної мережі на мобільній платформі шляхом розробки критерію живучості зазначеного класу комп'ютерних мереж. **Метою** статті є розробка критерію живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі для подальшого його використання при проектуванні зазначеного класу мереж з метою забезпечення належного рівня живучості мережі. Отримані **результати** дозволяють продовжити розвиток методики оцінки живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі в умовах деструктивного зовнішнього впливу за необхідності перебудови її топології; вирішувати оптимізаційні задачі мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж на мобільній платформі на етапі їх синтезу. Дослідження дозволяють зробити **висновки**, що запропонований критерій може бути використаний на етапах проектування живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі, які характеризуються підвищеною живучістю та функціонують в умовах постійної перебудови схем маршрутизації даних, у тому числі за рахунок перебудови топології. Сформульовано напрями подальшої роботи, зокрема в частині проведення дослідження щодо введення в комп'ютерні мережі на мобільній платформі структурну збитковість з визначенням вузлів, які під час виконання мережею основної функції, стають уразливими, тобто захист яких необхідно підвищувати.

Ключові слова: живучість, комп'ютерна мережа на мобільній платформі, оптимізація, критерій.

Вступ

Постановка проблеми. Протягом останніх п'яти років технологічні передумови породили велику кількість модифікацій комп'ютерних мереж, вузлами якої виступають рухомі об'єкти, як то безпілотні літальні апарати, дрони, боти тощо [1-2].

Однак, на відміну від більшості технологічних рішень розважально-побутового характеру в означеній сфері, існують галузі застосування зазначеного класу мереж, пов'язані з пожежною безпекою, технологічними процесами на виробництві, військово-справою тощо [3-4].

Розробка методів забезпечення живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі в умовах деструктивного зовнішнього впливу та використання методики оцінки живучості на всіх етапах функціонування мережі є актуальною задачею [5-6]. Ця задача органічно входить до сімейства задач підвищення живучості технічних систем, над вирішенням яких працює ряд відомих наукових шкіл [7-8].

Однак при проектуванні реальних комп'ютерних мереж на мобільній платформі виникає прикладна задача, що полягає у розробці механізму врахування показників живучості як компонентів мережі, так і алгоритмічного забезпечення в цілому. Такі мережі також прийнято називати комп'ютерними мережами підвищеної живучості на мобільній мережі або високомобільними комп'ютерними мережами [9] Мірилом зазначеного показника є критерій живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі (КММП). З метою формалізації даного критерію, розглянемо такі сутності: множину координат X, Y, Z , координати вузлів комп'ютерної мережі, значення інтенсивностей потоків даних між ними, вимоги до якості та надійності передачі даних, інформація про

затрати на створення вузлів та каналів передачі даних між ними. Основним обмеженням є сумарне значення затрат створення КММП.

В такому випадку необхідно визначити оптимальне число, координати розміщення, ємність і продуктивність мережних вузлів, топологію та траєкторію її зміни, динаміку значення пропускної здатності каналів передачі даних.

Рішення задачі в загальному вигляді вимагає розробки складного математичного апарату, а отримання числових результатів – великого обсягу обчислень. Виходячи з динамічності руху вузлів в КММП та зміни показників, які входять в розрахунковий апарат, результат обчислень може буде отриманий для ситуації, яка докорінно змінилася в КММП з часом. Тому, в задачах проектування КММП вводяться додаткові обмеження, що дозволяє отримати максимально приближене значення для визначення наступного кроку у функціонуванні КММП (або траєкторії її поведінки у разі використання у якості вузлів інтелектуальних мобільних об'єктів).

Таким чином, актуальною є науково-прикладна проблема забезпечення заданого рівня живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі на етапі їх проектування шляхом розробки відповідного критерію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує ряд методів визначення показників живучості КММП, які можна покласти у якості підґрунтя для формулювання критерію живучості.

Наприклад, у роботі [10] розглянуто метод прямого перебору станів елементів та каналів високомобільних мереж. Він заснований на теорії Бернуллі для розрахунку ймовірності перебування мережі в стані, коли відмовила деяка кількість елементів або зв'язок між елементами порушено. Розрахо-

вані ймовірності пропонуються авторами у якості фундаменту для розробки математичного апарату для формулювання критерію живучості.

Недоліком даного методу є його низька практична застосовність: невиправдане витрачання часу на формування бінарного представлення станів вузлів та каналів між ними. Час обчислення станів каналів передачі даних вище, чим вузлів, але ці підходи рівні в оцінках однієї і тієї ж мережі. Область практичного застосування залежить від кількості вузлів мережі. При великих мережах з кількістю вузлів більше 50, ефективність методу падає [10]. Також важливо зазначити, що, власне, компоненти КММП, в зв'язку з обмеженим енергетичним запасом ходу, не можуть виконувати енергоємні розрахунки «на борту», тоді як час передачі службових даних для проведення розрахунків на платформі з більшим енергетичним ходом може спричинити надмірну циркуляцію службових даних, чим зменшити пропускну здатність КММП в умовах динаміки руху вузлів.

Також відома робота [11], у якій автори приводять у якості рішення проблеми алгоритм оптимального розміщення комунікаційно-керуючих центрів розглянутого класу мереж. Роль обчислювального центру для розрахунку критерію живучості та прийняття рішень для зміни траєкторії поведінки мережі виконує окремих вузол мережі – обчислювач.

Основним недоліком є зменшення гнучкості мережі та концентрація обчислювальних процедур на окремих вузлах, які необхідно резервувати. Однак відхід від децентралізованої схеми організації роботи КММП зменшує її живучість в умовах зовнішнього впливу на роботу мережі (наприклад, електромагнітне ураження тощо). Вихід з ладу вузла, який несе функції обчислювача траєкторії поведінки мережі може призвести до катастрофічної руйнації КММП.

Метою статті є розробка критерію живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі для подальшого його використання при проектуванні зазначеного класу мереж з метою забезпечення належного рівня живучості мережі.

Основна частина

Задачу проектування КММП [12] з урахуванням додаткових вимог по її живучості можна вирішити в два етапи. Спочатку одним із методів [12] визначається її структура, що відповідає вимогам передачі поточкових даних з заданою якістю. Потім визначаються необхідні параметри. Елементи структури КММП, отримані на першому етапі, мають відповідати показнику живучості не нижче мінімального рівня. Таким чином, мінімальним рівнем живучості КММП є такий рівень, при досягненні якого є можливим досягнення живучості КММП за рахунок зміни її структури. Сюди можна віднести додання резервних каналів передачі даних (низькошвидкісні канали для відділених вузлів), підвищення ступеню захисту вузлів від деструктивного впливу (шляхом деактивації деяких допоміжних функцій), обрання мережного алгоритму (маршрутизації),

зміна стратегії передачі службових даних, зміна в алгоритмах функціонування вузлів мережі тощо.

Мінімальний рівень для різних топологій КММП може бути неоднаковим. Наприклад, для розгалужених мереж така вимога до живучості, як ймовірність справності вузла $p(v)_{\min} = 0,5$. Припустимо, $p(v) \geq p(v)_{\min}$. Тоді критерій живучості можна визначити шляхом оптимізації мережного алгоритму Z функціонування КММП (і, при отриманні Z_{opt} , визначення ймовірності $p(E_j)$). Класична методика розробки подібного роду критеріїв [13] передбачає застосування комплексу заходів, однак, в межах введених обмежень в даній роботі, буде застосовано оптимістичний підхід, побудований на оптимізації стратегічної функції, якою задається траєкторія функціонування КММП.

Оптимізація мережного алгоритму функціонування КММП. Мережний алгоритм функціонування КММП – це сукупність обмежень по вибору маршрутів передачі даних між вузлами. Відповідно, необхідно оптимізувати допустимі ранг шляхів передачі даних та кількість стовпів адресної таблиці при розрахунку маршрутизації.

Збільшення кількості шляхів передачі даних між вузлами реєстрації інформації в мережі та шлюзами підвищує ймовірність $p(E)$, але, згідно [10], відомо, що основне значення мають маршрути, що не перетинаються, які складають множини \hat{M} . Збільшення допустимого рангу z_1 маршруту та допустимої кількості z_2 стовпів адресної таблиці маршрутизації призводить до збільшення кількості маршрутів опорної множини \hat{M} . Кількість маршрутів *route* може бути дуже великою, але зростання $p(E)$ обмежене зверху і, починаючи з деякого асимптотичного значення, збільшення кількості шляхів є недоцільним.

Отже, далі необхідно виконати оптимізацію обмежень z_1 та z_2 . Нехай Z_i – мережний алгоритм, при якому значення z_1 та z_2 приймають i -ту пару значень ($i = 0, 1, \dots, N$). Індексом i задається складність мережного алгоритму. Нехай Z_i є складнішим за алгоритм Z_k , якщо $i > k$. При цьому хоча б одне значення $z_1, z_2 \in Z_i$ більше $z_1, z_2 \in Z_k$. Тоді: алгоритм Z_0 дозволяє передачу даних тільки по одному маршруту в мережі; Z_1 – по одному з маршрутів $\mu \in \hat{M}$; Z_N – відсутні обмеження на кількість маршрутів. Таким чином, для оптимізації мережного алгоритму необхідно виконати оцінку залежності відношення (1) від укладення мережного алгоритму:

$$\delta(Z) = \frac{1 - p(E(Z_1))}{1 - p(E(Z_i))}, \quad (1)$$

де $p(E(Z_i))$ – ймовірність справності підсистеми двох вузлів, між якими відбувається обмін даними, при мережному алгоритмі Z_i («вузол реєстрації інформації» – «шлюз мережі») (далі - підсистема).

Для спрощення представлення підсистеми між двома вузлами, пропонується модель (рис. 1).

На рис. 1 чарунки s_1, s_2, s_3, s_4 – перетини підсистеми відносно її полюсів, їх ранг та ймовірність справності $p(s_i)$, які від укладення мережного алгоритму не залежать. Перетин s_5 відповідає магістральній ділянці мережі, тому на $p(s_5)$ впливає складність мережного алгоритму. Для зображеної моделі на рис. 1:

$$p(E(Z)) \approx p_s p(s_5(Z_i)) \quad (2)$$

де $p_s = \prod_{i=1}^4 p(s_i)$.

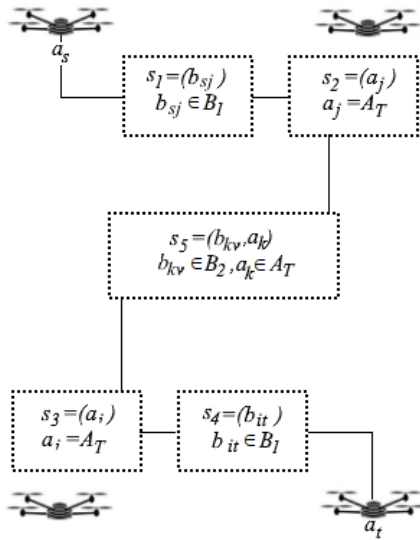


Рис. 1. Спрощена модель підсистеми між двома вузлами

При $i > 1$ за умови $p(E(Z_i)) \geq p(E(Z_1))$, тому $\delta(Z) \geq 1$. Підставляючи (2) в (1), додаючи до чисельника і вираховуючи з нього знаменник, після перетворення вигляд рівняння є таким:

$$\delta(Z) = 1 + p_s \frac{p(s_5^i) - p(s_5^1)}{1 - p(E(Z_i))} \quad (3)$$

Верхній індекс відповідає мережному алгоритму.

При великих ймовірностях справності вузлів мережі і доволі складного мережного алгоритму $p(s_5^i) \approx 1$. При мережному алгоритмі Z_1 , підсистема містить лише шляхи $\mu \in \hat{M}$ (їх кількість $route = r_a$, де r_a – мінімальний з рангів вузлів). Тоді:

$$p(s_5^i) = 1 - \sum_{k=1}^{r_a} (1 - p(e_k')) \quad (4)$$

Подія e_k' означає справність маршруту $\mu_k \in \hat{M}$, що містить магістральні вузли підсистеми в мережі. З урахуванням наведеного, верхня межа співвідношення (1):

$$\delta^+(Z) = 1 + \frac{p_s}{1 - p_s} \prod_{i=1}^4 p(1 - p(e_k')) \quad (5)$$

Область можливих значень $\delta(Z)$ при заданих $p(v)$ і динаміці підвищення рангу полюсів r_a показана на рис. 2. Далі необхідно визначити залежність $\delta(Z)$ від укладення мережного алгоритму за умови $p(s_5^i) < 1$ і будь-якому $i \leq N$.

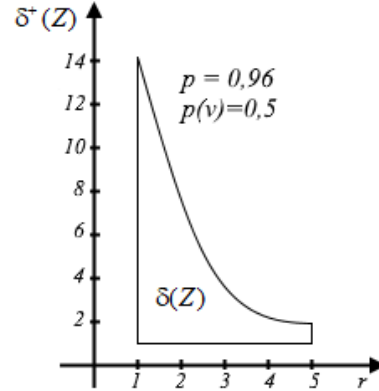


Рис. 2. Область ймовірного підвищення живучості за рахунок укладення мережного алгоритму

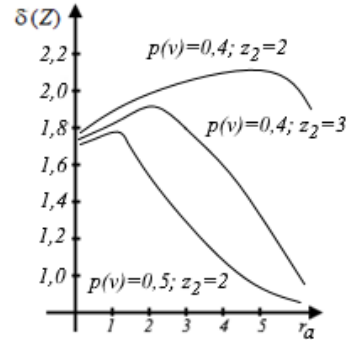


Рис. 3. Залежність співвідношення $\delta(Z)$ від зміни рангів полюсів підсистеми r_a

Ускладнення мережного алгоритму при малому ранзі полюсів підсистеми викликає значне підвищення чисельника у (3) у порівнянні з підвищенням її знаменника, що призводить до зростання $\delta(Z)$. Але з підвищенням ранга полюсів підсистеми, як видно з (3), $p(E(Z_i)) \rightarrow p_s$. Відповідно, знаменник (3) прямує до постійної величини $1 - p_s$. У той же час, зі зростанням рангу полюсів, чисельник (3) прямує до нуля, бо $p(s_5^1) \rightarrow p(s_5^i)$. Звідси виходить, що при заданих $p(v)$ існує максимум функції $\delta(Z) = f(r_a)$.

Застосовуючи графоаналітичний метод і при заданій структурі КММП, далі необхідно визначити оптимальний мережний алгоритм Z_{opt} .

На рис. 3 зображені залежності від мінімального із рангів полюсів r_a при різних $p(v)$ та z_2 . Графіки побудовано за результатами розрахунків (3).

Достовірність отриманих даних за (3) підтверджується графіками, отриманими в середовищі GS (рис. 4). Криві 2-5 показують залежність $p(E(Z_i))$ від $p(v)$ при $z_2 = 1, 2, 3, 4$ відповідно. При цьому $z_1 = 5$. Крива 1 характеризує залежність $p(E(Z_N))$ для тієї ж мережі без обмежень. З рис. 3 видно, що $p(E(Z_4)) \approx p(E(Z_N))$. Залежність $\delta(Z)$ від z_1 при фіксованому z_2 – аналогічна.

При оптимізованому мережному алгоритмі вибору маршрутів передачі даних суттєво знижується функціональна збитковість КММП без зниження її живучості. Так, в табл. 1 приведено кількість ребер, які входять в маршрути передачі даних в підсистемі «вузол реєстрації інформації - шлюз» при різних мережних алгоритмах.

Кожне ребро має містити деяку кількість каналів для передачі потоків даних даної підсистеми. Як видно з табл. 1, при мережному алгоритмі Z_5 сумарна кількість каналів підсистеми має бути в два рази вище, ніж при мережному алгоритмі Z_4 . Але відповідно до зображених на рис. 4 графіків, алго-

ритми Z_i при $i > 4$ фактично не призводять до підвищення значення ймовірності $p(E)$.

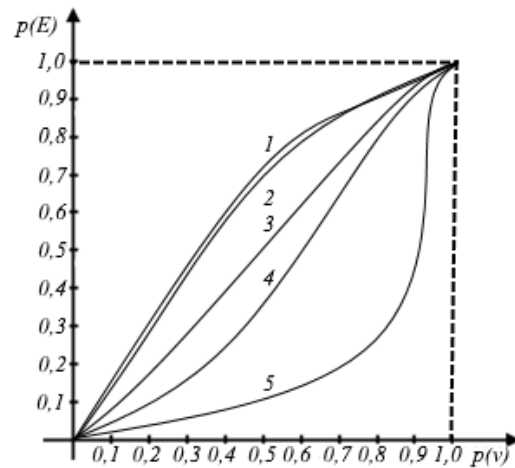


Рис. 4. Залежність живучості КММП від живучості її вузлів при $z_1 = 5$ і різних z_2 : крива 1 – обмежень в мережі немає; крива 2 – $z_2 = 4$; крива 3 – $z_2 = 3$; крива 4 – $z_2 = 2$; крива 5 – $z_2 = 1$

Таблиця 1 – Кількість ребер, що входять в підсистему підсистеми «вузол реєстрації інформації - шлюз» при різних мережних алгоритмах

Мережний алгоритм $z_i = \{z_1, z_2\}$	Кількість ребер, що входять в підсистему підсистеми «вузол реєстрації інформації - шлюз»						
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
$Z_0 = (3,1)$	4	3	4	3	4	3	3
$Z_1 = (4,1)$	10	10	10	9	10	6	8
$Z_2 = (3,2)$	14	17	10	12	11	7	9
$Z_3 = (4,3)$	19	21	16	15	16	14	13
$Z_4 = (5,4)$	24	24	23	18	24	24	19
$Z_5 = (6,5)$	38	41	35	29	36	38	29

Загальний вигляд критерію живучості. Враховуючи проведену оптимізацію та виходячи з того, що живучість окремо взятого вузла КММП можна оцінити як ймовірність його виживання, то критерій живучості КММП має вигляд інтегральний вид:

$$K_Z = \sum_{\forall \Gamma_i \in \Gamma} \Gamma_i - \sum_{\forall \Gamma_i, \Gamma_j \in C_1^2, i \neq j} \prod \Gamma_i \Gamma_j + \dots + (-1)^{\Gamma} \prod_{i=1}^{\Gamma} \Gamma_i \quad (6)$$

де Γ_i – фактори, що впливають на живучість КММП.

Однак дана варіація критерію обмежена умовами, що були поставлені на початку роботи. Тому, вводячи нові параметри, знімаючи обмеження, критерій ускладняється пропорційна складності введених умов забезпечення живучості. Згідно попередніх досліджень [5] та розрахунків [6], під час проектування КММП, заздалегідь може бути відомо, що наслідки дії деяких факторів на КММП або окремі вузли, з урахуванням заходів по забезпеченню безпеки, – несуттєві у порівнянні з іншими. Тоді такі фактори відносяться до розряду другорядних і з розрахунку критерію живучості (6) виключаються.

Розрахунок критерію (6) може бути диференційований також по окремим групам, наприклад по факторам зносу елементної бази (проблема «старіння») або зовнішнього ураження вузлів тощо.

Розрахунки, згідно математичного апарату, запропонованого вище, показують, що для доволі розгалужених мереж оптимізовані значення допустимого значення повторних прийомів $z_{1opt} \leq 6$ і допустимої кількості стовпців адресної таблиці маршрутизації $z_{2opt} \leq 5$, що у розрахунку критерію живучості відповідно складає 0,3 та 0,25.

Висновки

За результатами проведенної роботи з оптимізації мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх проектування успішно вирішена наукова задача розробки критерію живучості комп'ютерної мережі та встановлена доцільність його застосування при проектуванні зазначеного класу мереж з метою забезпечення належного рівня живучості мережі. Зокрема досягнуто такі основні результати:

- сформульована науково-прикладна задача розробки критерію живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі;

- отримала подальший розвиток методика оцінки живучості комп'ютерних мереж в умовах деструктивного зовнішнього впливу за необхідності перебудови її топології;

- вирішено оптимізаційну задачу мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх синтезу.

Запропонований підхід може бути застосованим на етапах проектування вказаного в роботі кла-

су комп'ютерних мереж з кількістю учасників більше 50 та розгалуженою мапою маршрутів передачі даних між вузлами реєстрації інформації та шлюзу мережі.

У якості подальшої роботи за даним напрямком пропонується виконати дослідження щодо введення в КММП структурну збитковість з визначенням вузлів, які під час виконання мережею основної функції, стають уразливими, тобто захист яких необхідно підвищувати [14]. Отримані теоретичні результати при визначенні критерію живучості пропонується перевести у площину практичної їх застосовності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Srivastava A., Prakash J. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues // *Computer Science Review*. – 2021. – Т. 39. – С. 100359.
2. Chriki A. FANET: Communication, mobility models and security issues // *Computer Networks*. – 2019. – Т. 163, 106877.
3. Orozco-Lugo A. G. et al. Monitoring of water quality in a shrimp farm using a FANET // *Internet of Things*. – 2020. – С. 100170.
4. Khan I. U. et al. Smart IoT control-based nature inspired energy efficient routing protocol for flying ad hoc network (FANET) // *IEEE Access*. – 2020. – Т. 8. – С. 56371-56378.
5. Churyumov, G., Tokarev, V., Tkachov, V., & Partyka, S. (2018, August). Scenario of interaction of the mobile technical objects in the process of transmission of data streams in conditions of impacting the powerful electromagnetic field. In 2018 IEEE second international conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP) (pp. 183-186). IEEE.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ-випромінювання [Текст]: вик. НДР (заключний звіт) / Харківський національний університет радіоелектроніки; керівн. Чурюмов Г.І., вик. Токарєв В.В., Ткачов В.М. – Х.: 2018. – № держреєстрації 018U000832.
7. А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. Живучесть информационных систем. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
8. Распределенная архитектура как средство повышения надежности и живучести бортовых информационно-управляющих систем / Н. П. Бородавка, Б. В. Остроумов, Н. Ф. Сидоренко, В. В. Тарасенко, В. С. Харченко, С. Я. Яценко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 6 (58). – С. 139-147
9. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі / В. М. Ткачов [та ін.] // *Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems*. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 159-165.
10. Bondarenko L. A. et al. Оценка живучести иерархических телекоммуникационных сетей военного назначения // *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. – 2018. – Т. 31. – №. 1. – С. 61-67.
11. Кусакина М. С., Нетес В. А. Проблемы обеспечения надежности программно-конфигурируемых сетей // *Телекоммуникации и информационные технологии*. – 2019. – Т. 6. – №. 1. – С. 39-43.
12. Ross K. W. *Multiservice loss models for broadband telecommunication networks*. – Springer Science & Business Media, 2012.
13. Проектирование и эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений / [Архипов М. Н., Захаров Г. П., Малиновский С. Т., Яновский Г. Г.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 360 с.
14. Tokariev V. Implementation of combined method in constructing a trajectory for structure reconfiguration of a computer system with reconstructible structure and programmable logic // *Selected Papers of the XIX Int. Scientific and Practical Conf. "Information Technologies and Security"(ITS 2019), Ukraine*. – 2019. – С. 71-81.

Received (Надійшла) 24.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

Optimization of the network algorithm for the operation of increased survivability computer networks on a mobile platform at the stage of their design

Vitalii Tkachov, Andriy Kovalenko, Tetiana Fesenko

Abstract. The article discusses the features of choosing a network algorithm and formulates the problem of its optimization when designing a computer network on a mobile platform by developing a survivability criterion for the specified class of computer networks. The **purpose** of the article is to develop a criterion for the survivability of a computer network on a mobile platform for its further use in the design of the specified class of networks in order to ensure an appropriate level of network survivability. The results obtained make it possible to continue the development of the methodology for assessing the survivability of computer networks on a mobile platform under conditions of destructive external influences when it is necessary to rebuild its topology; to solve optimization problems of the network algorithm for the functioning of computer networks on a mobile platform at the stage of their synthesis. The studies allow us to **conclude** that the proposed criterion can be used at the stages of designing the survivability of computer networks on a mobile platform, characterized by increased survivability and functioning under conditions of constant restructuring of data routing schemes, including by restructuring the topology. Directions for further work are formulated, in particular, in terms of conducting a study on introducing structural unprofitability into computer networks on a mobile platform with the identification of nodes that, when the network performs its main function, become vulnerable, that is, the protection of which must be increased.

Keywords: survivability, computer network on a mobile platform, optimization, criterion