

АЛЬ-ХАФАДЖІ АХМЕД ВАЛІД¹, Ю. Л. ПОНОЧОВНИЙ^{1,2},
В. С. ХАРЧЕНКО¹, Д. Д. УЗУН¹

¹ Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»

² Полтавська державна аграрна академія

ДОСЛІДЖЕННЯ МАРКОВСЬКОЇ МОДЕЛІ ГОТОВНОСТІ СИСТЕМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ З ДЕГРАДАЦІЄЮ ВНАСЛІДОК АТАК І АПАРАТНИХ ВІДМОВ

У статті досліджено марковську модель системи фізичного захисту (СФЗ). Актуальність зумовлена необхідністю забезпечення захисту самих СФЗ не лише від фізичних пошкоджень, а й від кібератак зловмисників. При побудові моделі прийнято припущення про властивості стаціонарності, ординарності і відсутності післядії потоків подій у системі, про низьку ймовірність відмов програмної компоненти та хмарних сервісів. Також враховано той факт, що акти вандалізму відбуваються на об'єкти першої зони, які знаходяться за межами периметра. Використано типовий алгоритм побудови марковської моделі на основі визначення множин станів і механізмів взаємодії. Оцінювання функціонування багатозонавої системи здійснено із врахуванням трьох ступенів деградації від справного стану до станів одночасної відмови усіх трьох зон. Верхній стан S1 відповідає справному стану системи без відмов. Стани S2, S3, S4 відповідають станам першого рівня деградації системи, при якому проявилася апаратна відмова в одній із зон. Стани S5, S6, S7 відповідають станам другого рівня деградації системи, при якому виявилися апаратні відмови в двох зонах. Стан S8 відповідає стану повної відмови всіх трьох зон системи. Для оцінювання функції готовності виконано розрахунок і дослідження марковської моделі для різних наборів вхідних даних. Як змінні параметри були обрані: інтенсивність відмов апаратних засобів, зумовлена фізичними та проектними дефектами ненавмисного характеру; інтенсивність відновлення апаратних засобів після відмови та коефіцієнт «агресії» зловмисників, що залежить від зовнішніх факторів. За результатами моделювання зроблено висновки про вплив параметрів інтенсивностей відмов і відновлень на значення показників готовності різних рівнів деградації та відношення між ними. Визначено, що при збільшенні вхідних параметрів - інтенсивності відмов апаратних засобів та коефіцієнта «агресії» зловмисників, стаціонарні коефіцієнти готовності всіх рівнів деградації зменшуються. Але при збільшенні інтенсивності відновлень апаратних засобів стаціонарні коефіцієнти готовності всіх рівнів деградації нелінійно збільшуються, а відношення між ними прямує до одиниці.

Ключові слова: система кіберфізичної безпеки; показники готовності; марковська модель; рівні деградації; багатозонава архітектура.

Вступ

У різні часи питанням забезпечення безпеки критичних об'єктів і систем фізичного захисту (СФЗ) приділяли багато уваги, і вони не втрачають актуальність і зараз. З розвитком процесів цифровізації та інтеграції, до сучасних СФЗ введені потужні цифрові компоненти, які для повноцінного функціонування вимагають постійного чи тимчасового підключення до відкритої мережі Internet. Якщо раніше існувала дилема забезпечення захисту самих СФЗ лише від фізичних пошкоджень, що зараз такі системи не тільки забезпечують заданий рівень кіберзахисту, а й самі є об'єктом для кібератак і фізичного вандалізму зловмисників.

Зональна архітектура СФЗ (англійською PSS, physical security systems), їх мультифункціональність

і функціонування в умовах агресивної зовнішнього середовища вимагають відповідного адекватного уявлення при побудові і аналізі моделей. Застосування математичного апарату марковського моделювання [1, 2], з одного боку, забезпечує безпосередню оцінку результуючого показника готовності, задовольняє вимогам стандартів і нормативних документів [3, 4].

Але, з іншого боку, марковські моделі обмежені припущеннями на найпростіші потоки подій [2, 5], а також схильні до проблеми збільшення розмірності при обліку великої кількості зовнішніх чинників. Застосування апарату багатофрагментного моделювання [6] дозволяє моделювати системи із змінними параметрами, але не вирішує проблему розмірності. У роботах [7-9] розглянуті марковські і багатофрагментні моделі апаратно-програмних комплексів різного призначення для конкретних архіте-

ктур. Однак, у відомих роботах не розглянуто вплив зональної архітектури на готовність системи з позиції як надійності, так і безпеки.

Метою даного дослідження є розроблення та аналіз класичної марковської моделі готовності трьохзонової PSS. Побудова моделі виконана на основі визначення множини станів і механізмів взаємодії та із врахуванням ступенів деградації. Оцінювання функцій готовності різних ступенів деградації виконано для різних наборів вхідних даних.

1. Вихідні положення

Система безпеки представлена сукупністю підсистем, кожна з яких розглядається як окрема «зона». Кожна підсистема містить складові елементи. У сукупності така ієрархія представлена на рис. 1 [10].

Кожна підсистема представлена просторами станів відмов апаратних компонент (HW, hardware) і програмних засобів / функцій (SW, software), які виникають внаслідок прояву фізичних дефектів (pf), проектних дефектів (df), помилок операторів (hf) і дефектів взаємодії (if).

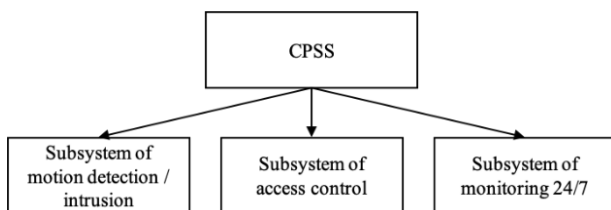


Рис. 1. Трьохзонова архітектура СФЗ

Врахування цих факторів впливає на розмірність моделі (обумовлює як кількість станів марковської моделі, так і кількість переходів між станами).

2. Розробка моделі M_{PSS03H}

Модель готовності трьохзонової системи фізичної безпеки є класичною марковською моделлю, яка враховує відмови апаратної компоненти всередині кожної зони.

Основними припущеннями моделі M_{PSS03H} є:

- потік подій, що переводить систему з одного функціонального стану в інший, має властивості стаціонарності, ординарності і відсутності післядії, відповідно вхідні параметри M_{PSS} приймаються постійними;

- ймовірність відмов функцій (SW) і хмарного сервісу дуже мала та ігнорується;

- акти вандалізму (γ_{hw}) відбуваються на об'єкти першої зони, які знаходяться за межами периметра.

Простір станів моделі має розмірність в 8 станів (рис. 2), згідно з комбінаціями відмов апаратної компоненти кожної із зон. Також на рис. 2 виділені чотири рівні деградації системи.

1	1h	2h	3h	0
2	1h	2h	3h	I
3	1h	2h	3h	
4	1h	2h	3h	
5	1h	2h	3h	II
6	1h	2h	3h	
7	1h	2h	3h	
8	1h	2h	3h	III

Рис. 2. Комбінації відмов зон, що визначають стани моделі M_{PSS03H} і рівні деградації

На рис. 3 представлений розмічений граф моделі M_{PSS03H} , який включає наскрізну нумерацію станів і побудований за допомогою модифікованої функції `grPlot_marker` [11].

При побудові графа моделі (див. рис. 3) була використана вертикальна ієрархія станів для відображення рівнів деградації. Верхній стан S1 відповідає справному стану системи без відмов. Стани S2, S3, S4 відповідають станам першого рівня деградації системи, при якому проявилася апаратна відмова в одній із зон. Стани S5, S6, S7 відповідають станам другого рівня деградації системи, при якому виявилися апаратні відмови в двох зонах. Стан S8 відповідає стану повної відмови всіх трьох зон системи.

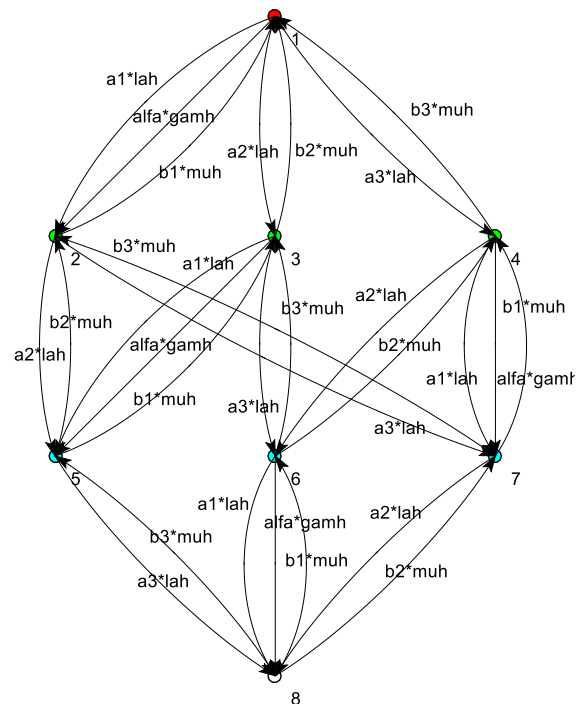


Рис. 3. Розмічений граф марковської моделі M_{PSS03H}

При розмітці графа і складанні системи диференціальних рівнянь для відмінності інтенсивностей відмов різних зон були використані вагові коефіцієнти ah_1, ah_2, ah_3 ; а для відмінності інтенсивностей відновлень – коефіцієнти bh_1, bh_2, bh_3 .

Система диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена, побудована за графом моделі Mps03H наступна:

$$\left\{ \begin{aligned} dP_1(t)/dt &= -((a_{H1} + a_{H2} + a_{H3})\lambda_H + \alpha\gamma_H)P_1(t) + \\ &+ b_{H1}\mu_H P_2(t) + b_{H2}\mu_H P_3(t) + b_{H3}\mu_H P_4(t), \\ dP_2(t)/dt &= -((a_{H2} + a_{H3})\lambda_H + b_{H1}\mu_H)P_2(t) + \\ &+ (a_{H1}\lambda_H + \alpha\gamma_H)P_1(t) + b_{H2}\mu_H P_5(t) + b_{H3}\mu_H P_7(t), \\ dP_3(t)/dt &= -((a_{H1} + a_{H3})\lambda_H + \alpha\gamma_H + b_{H2}\mu_H)P_3(t) + \\ &+ a_{H2}\lambda_H P_1(t) + b_{H1}\mu_H P_5(t) + b_{H3}\mu_H P_6(t), \\ dP_4(t)/dt &= -((a_{H1} + a_{H2})\lambda_H + \alpha\gamma_H + b_{H3}\mu_H)P_4(t) + \\ &+ a_{H3}\lambda_H P_1(t) + b_{H2}\mu_H P_6(t) + b_{H1}\mu_H P_7(t), \\ dP_5(t)/dt &= -(a_{H3}\lambda_H + (b_{H1} + b_{H2})\mu_H)P_5(t) + \\ &+ a_{H2}\lambda_H P_2(t) + (a_{H1}\lambda_H + \alpha\gamma_H)P_3(t) + b_{H3}\mu_H P_8(t), \\ dP_6(t)/dt &= -(a_{H1}\lambda_H + \alpha\gamma_H + (b_{H2} + b_{H3})\mu_H)P_6(t) + \\ &+ a_{H3}\lambda_H P_3(t) + a_{H2}\lambda_H P_4(t) + b_{H1}\mu_H P_8(t), \\ dP_7(t)/dt &= -(a_{H2}\lambda_H + (b_{H1} + b_{H3})\mu_H)P_7(t) + a_{H3}\lambda_H P_2(t) + \\ &+ (a_{H1}\lambda_H + \alpha\gamma_H)P_4(t) + b_{H2}\mu_H P_8(t), \\ dP_8(t)/dt &= -((b_{H1} + b_{H2} + b_{H3})\mu_H)P_8(t) + a_{H3}\lambda_H P_5(t) + \\ &+ (a_{H1}\lambda_H + \alpha\gamma_H)P_6(t) + a_{H2}\lambda_H P_7(t). \end{aligned} \right.$$

Система буде доповнена нормувальним відношенням:

$$\sum_{i=1}^8 P_i(t) = 1; P_1(0) = 1; \forall i \in [2...8] \Rightarrow P_i(0) = 0.$$

Для дослідження моделі було розроблено скрипт в середовищі Matlab. Для побудови матриці системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена використана функція matrixA [12]. Для рішення системи диференціальних рівнянь застосовано вбудований вирішувач Matlab ode15s [13]. Функції готовності для різних рівнів деградації визначаються як:

$$A^{(0)}(t) = P_1(t); A^{(I)}(t) = \sum_{i=1}^4 P_i(t); A^{(II)}(t) = \sum_{i=1}^7 P_i(t).$$

В ході проведення досліджень було використано значення і діапазон вхідних параметрів, зведені в таблицю 1.

Таблиця 1
Значення вихідних параметрів моделі

Параметр моделі	Позначення / од.виміру	Значення
Інтенсивність відмов HW, зумовлена фізичними та проектними дефектами ненавмисного характеру (pf і df)	λ_{HW} (1/годин)	$1 \cdot 10^{-3}$
Інтенсивність відновлення HW після відмови, в роботі проводиться усереднення і відновлення розглядається для всіх причин відмов (pf, df, hf, if)	μ_{HW} (1/годин)	1
Інтенсивність відмов HW, обумовлена діями навмисного характеру (if, вандалізм)	γ_{HW} (1/годин)	$1 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт «агресії» зловмисників, залежить від зовнішніх факторів	α	10
Кратні коефіцієнти інтенсивності відмов HW для різних зон	$ah_1...ah_3$	1...2
Кратні коефіцієнти інтенсивності відновлень HW для різних зон	$bh_1...bh_3$	1...2

Результати моделювання показані на рис. 4.

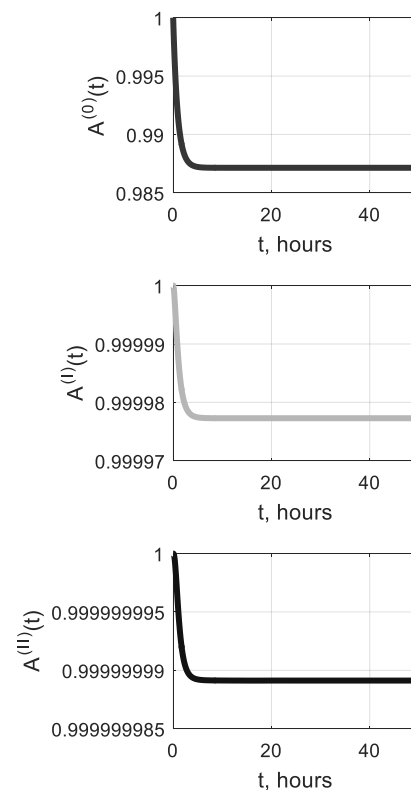


Рис. 4. Результати моделювання готовності трьохзонової PSS для різних рівнів деградації

Графіки моделі ілюструють типовий характер зміни функції готовності зі зменшенням до стаціонарного коефіцієнта протягом перших 10 годин експлуатації. Таким чином, при подальшому аналізі результатів необхідно враховувати значення трьох рівнів деградації готовності:

- $A^{(0)}_{M_{PSS03H}} = 0,987144407503175;$
- $A^{(I)}_{M_{PSS03H}} = 0,999977284800640;$
- $A^{(II)}_{M_{PSS03H}} = 0,999999989122013.$

3. Дослідження моделі M_{PSS03H} при зміні вихідних параметрів

У трьохзоновій системі, функції готовності при різних рівнях деградації прагнуть до стаціонарного значення за короткий часовий проміжок. Тому дослідження моделі доцільно проводити для результуючого показника - стаціонарного коефіцієнта готовності певного рівня деградації. Також певний інтерес представляє відношення між показниками готовності для різних рівнів деградації системи. Для моделі M_{PSS03H} були відібрані наступні параметри (табл. 2):

Таблиця 2

Значення змінних параметрів моделі

Параметр моделі	Діапазон зміни
λ_{HW}	$[10^{-4} \dots 10^{-2}]$ (1/годин)
μ_{HW}	$[0,1 \dots 10]$ (1/годин)
α	$[1 \dots 100]$

Для дослідження впливу зазначених параметрів були розроблені спеціальні циклічні програмні конструкції. Результати моделювання у вигляді графічних залежностей показані на рис. 5 - рис. 7.

Графіки на рис. 5 ілюструють зміну готовності PSS при різних значеннях параметрів інтенсивності відмов HW (в моделі одночасно і пропорційно змінюється інтенсивність відмов у всіх трьох зонах). Зі збільшенням інтенсивності відмов HW, стаціонарний коефіцієнт готовності $A^{(0)}$ для нульового рівня деградації зменшується лінійно, для першого і другого рівнів деградації ($A^{(I)}$ і $A^{(II)}$) - нелінійно. Збільшення інтенсивності відмов HW на 2 порядки зумовлює зменшення коефіцієнта готовності нульового рівня деградації $A^{(0)}$ на 2,99 %; першого рівня деградації $A^{(I)}$ на 0,048 %; зміна коефіцієнта готовності другого рівня деградації $A^{(II)}$ має порядок 10^{-5} . З ростом інтенсивності відмов HW відношення між коефіцієнтами готовності різних рівнів деградації системи зменшуються (показано на рис. 5, б).

На рис. 6 показано характер зміни готовності PSS при різних значеннях параметрів інтенсивності відновлень HW (інтенсивність відновлень одночасно і пропорційно змінюється у всіх трьох зонах). Зі збільшенням інтенсивності відновлень HW, стаціо-

нарні коефіцієнти готовності всіх рівнів деградації ($A^{(0)}$, $A^{(I)}$ і $A^{(II)}$) нелінійно збільшуються. Збільшення інтенсивності відновлення HW на 2 порядки обумовлює збільшення коефіцієнта готовності нульового рівня деградації $A^{(0)}$ на 11,57 %; першого рівня деградації $A^{(I)}$ на 0,204 %; зміна коефіцієнта готовності другого рівня деградації $A^{(II)}$ має порядок 10^{-6} . З ростом інтенсивності відновлень HW відношення між коефіцієнтами готовності різних рівнів деградації системи прагнуть до одиниці (рис. 6, б).

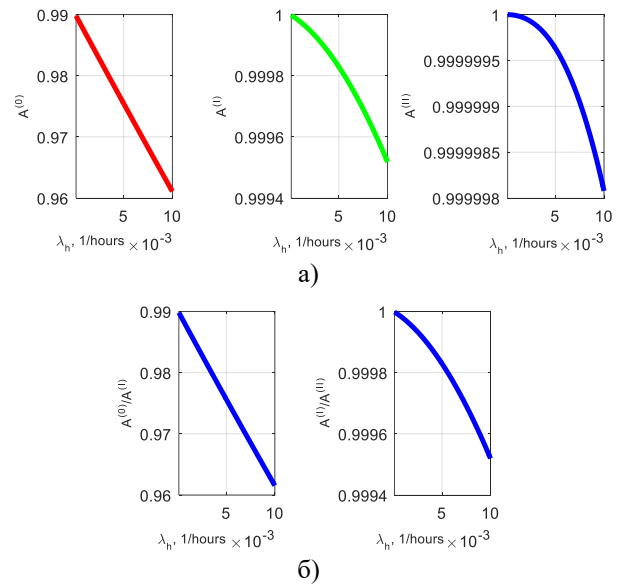


Рис. 5. Графіки зміни стаціонарних коефіцієнтів готовності (а) і їх відношення (б) для різних рівнів деградації моделі M_{PSS03H} при різних значеннях параметра λ_{HW}

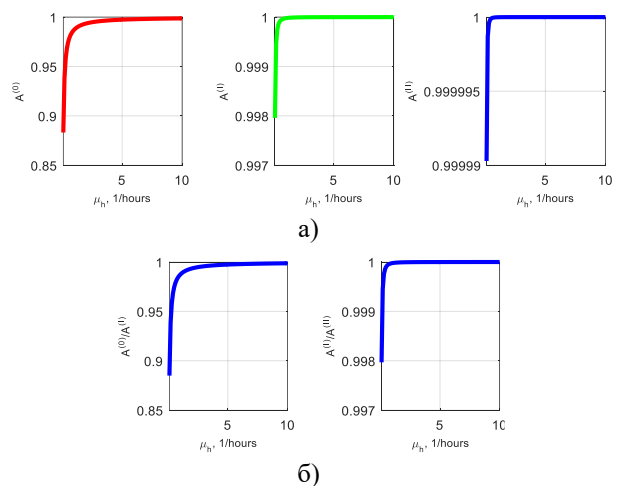


Рис. 6. Графіки зміни стаціонарних коефіцієнтів готовності (а) і їх відношення (б) для різних рівнів деградації моделі M_{PSS03H} при різних значеннях параметра μ_{HW}

Графіки на рис. 7 ілюструють зміну готовності PSS при різних значеннях параметра коефіцієнта «агресії» зловмисників (впливає на значення інтен-

сивності вандалних атак тільки в одній зоні CPSS). З ростом параметра α , стаціонарні коефіцієнти готовності всіх рівнів деградації ($A^{(0)}$, $A^{(I)}$ і $A^{(II)}$) лінійно зменшуються. Збільшення коефіцієнта «агресії» на 2 порядки зумовлює зменшення коефіцієнта готовності нульового рівня деградації $A^{(0)}$ на 9,8 %; першого рівня деградації $A^{(I)}$ на 0,018 %; зміна коефіцієнта готовності другого рівня деградації $A^{(II)}$ має порядок 10^{-7} . З ростом коефіцієнта «агресії» відношення між коефіцієнтами готовності різних рівнів деградації системи лінійно зменшується (рис. 7, б).

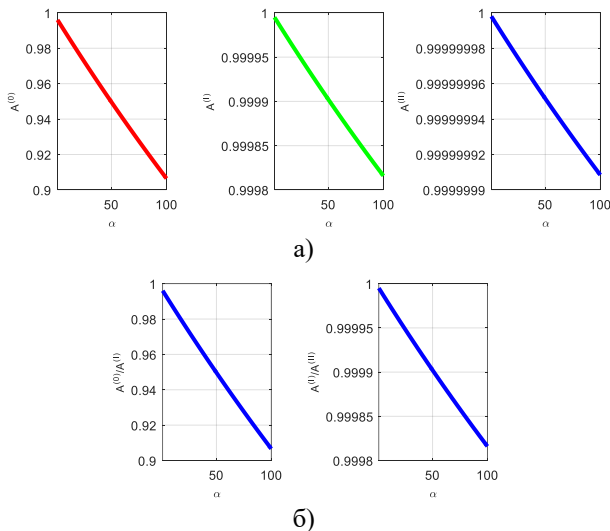


Рис. 7. Графіки зміни стаціонарних коефіцієнтів готовності (а) і їх відношення (б) для різних рівнів деградації моделі M_{PSS03N} при різних значеннях параметра α

Висновки

У статті розроблено марковську модель готовності трьохзонавої CPSS з урахуванням відмов апаратної компоненти. Аналіз результатів моделювання готовності CPSS для різних рівнів деградації показав, що:

а) при збільшенні на 2 порядки інтенсивностей відмов HW та коефіцієнту «агресії» α готовність нульового рівня $A^{(0)}$ зменшується відповідно на 2,99 % та 9,80 %;

б) при збільшенні інтенсивності відмов HW коефіцієнти готовності CPSS для першого і другого рівнів деградації нелінійно збільшуються на 11,57 % і 0,21 % відповідно, а різниця відношень між ними прямує до 1.

Подальші дослідження слід спрямувати на розроблення і дослідження як марковських, так і багатофрагментних моделей готовності PSS, у яких знімається допущення про високу безвідмовність програмних засобів та хмарного сервісу.

Література

1. Markov Regenerative Models of WebServers for Their User-Perceived Availability and Bottlenecks [Text] / Z. Zheng et al. // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. – 2017. – P. 1-1. DOI: 10.1109/TDSC.2017.2753803.
2. Dependability for the Internet of Things—from dependable networking in harsh environments to a holistic view on dependability [Text] / C. Boano et al. // *Elektrotechnik und Informationstechnik*. – 2016. – Vol. 133, no. 7. – P. 304-309. DOI: 10.1007/s00502-016-0436-4.
3. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements [Electronic resource]. – Access mode: <https://webstore.iec.ch/publication/5515>. – 01.11.2019.
4. IEC 60050-192:2015 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 192: Dependability [Electronic resource]. – Access mode: <https://webstore.iec.ch/publication/21886>. – 01.11.2019.
5. IEC 61703:2016 Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms [Electronic resource]. – Access mode: <https://webstore.iec.ch/publication/25646>. – 01.11.2019.
6. Multifragmentation Markov Modeling of a Reactor Trip System [Text] / V. Kharchenko et al. // *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. – 2015. – Vol. 1, no. 3. – Paper No: NERS-14-1037. DOI: 10.1115/1.4029342.
7. Model-based sensitivity analysis of IaaS cloud availability [Text] / B. Liu et al. // *Future Generation Computer Systems*. – 2018. – Vol. 83. – P. 1-13. DOI: 10.1016/j.future.2017.12.062.
8. Availability Models and Maintenance Strategies for Smart Building Automation Systems Considering Attacks on Component Vulnerabilities [Text] / V. Kharchenko et al. // *Advances in Dependability Engineering of Complex Systems*. – 2017. – P. 186-195. DOI: 10.1007/978-3-319-59415-6_18.
9. Markov's Modeling of NPP I&C Reliability and Safety: Optimization of Tool-and-Technique Selection [Text] / V. Kharchenko et al. // *2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO)*. – 2016. – P. 328-336. DOI: 10.1109/SMRLO.2016.61.
10. IoT-based physical security systems: Structures and PSMECA analysis [Text] / A. Waleed et al. // *2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. – 2017. – P. 870-873. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095211.
11. Iglın, S. grTheory - Graph Theory Toolbox - File Exchange - MATLAB Central [Electronic resource] / S. Iglın. – Access mode: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4266-grtheory-graph-theory-toolbox>. – 01. 11. 2019.
12. Kharchenko, V. Availability Assessment of Information and Control Systems with Online Software Update and Verification [Text] / V. Kharchenko,

Y. Ponochovnyi, A. Boyarchuk // *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*. – 2014. – P. 300-324. DOI: 10.1007/978-3-319-13206-8_15.

13. Solve stiff differential equations and DAEs – variable order method - MATLAB ode15s [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15s.html>. – 01.11.2019.

References

1. Zheng, Z., Trivedi, K., Wang, N., Qiu, K. Markov Regenerative Models of WebServers for Their User-Perceived Availability and Bottlenecks. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2017, pp. 1-1. DOI: 10.1109/TDSC.2017.2753803.

2. Boano, C., Römer, K., Bloem, R. at al. Dependability for the Internet of Things—from dependable networking in harsh environments to a holistic view on dependability. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2016, vol. 133, no. 7, pp. 304-309. DOI: 10.1007/s00502-016-0436-4.

3. IEC 61508-1:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/5515> (accessed 1.11.2019).

4. IEC 60050-192:2015 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 192: Dependability. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/21886> (accessed 1.11.2019).

5. IEC 61703:2016 Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/25646> (accessed 1.11.2019).

6. Kharchenko, V., Butenko, V., Odarushchenko, O., Sklyar, V. Multifragmentation Markov Modeling of a Reactor Trip System. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2015, vol. 1, no. 3, Paper No. NERS-14-1037. DOI: 10.1115/1.4029342.

7. Liu, B., Chang, X. at al. Model-based sensitivity analysis of IaaS cloud availability. *Future Generation Computer Systems*, 2018, vol. 83, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.future.2017.12.062.

8. Kharchenko, V., Ponochovnyi, Y., Abdulmunem, A., Andrashov, A. Availability Models and Maintenance Strategies for Smart Building Automation Systems Considering Attacks on Component Vulnerabilities. *Advances in Dependability Engineering of Complex Systems*, 2017, pp. 186-195. DOI: 10.1007/978-3-319-59415-6_18.

9. Kharchenko, V., Butenko, V., Odarushchenko, O., Odarushchenko, E. Markov's Modeling of NPP I&C Reliability and Safety: Optimization of Tool-and-Technique Selection. *2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO)*, 2016, pp. 328-336. DOI: 10.1109/SMRLO.2016.61.

10. Waleed, A., Kharchenko, V., Uzun, D., Solovyov, O. IoT-based physical security systems: Structures and PSMECA analysis. *2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2017, pp. 870-873. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095211.

11. Iglu, S. *grTheory - Graph Theory Toolbox - File Exchange - MATLAB Central*. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4266-grtheory-graph-theory-toolbox> (accessed 1.11.2019).

12. Kharchenko, V., Ponochovnyi, Y., Boyarchuk, A. Availability Assessment of Information and Control Systems with Online Software Update and Verification. *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*, 2014, pp. 300-324. DOI: 10.1007/978-3-319-13206-8_15.

13. Solve stiff differential equations and DAEs – variable order method - MATLAB ode15s. Available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15s.html> (accessed 1.11.2019).

Надійшла до редакції 12.12.2019, розглянута на редколегії 20.01.2020

ИССЛЕДОВАНИЕ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ С ДЕГРАДАЦИЕЙ ВСЛЕДСТВИЕ АТАК И ОТКАЗОВ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ

Аль-Хафаджи Ахмед Валид, Ю. Л. Поночовный, В. С. Харченко, Д. Д. Узун

В статье исследована марковская модель трехзоновой системы киберфизической безопасности. Актуальность обусловлена необходимостью обеспечения защиты самих систем безопасности не только от физических повреждений, но и от кибератак злоумышленников. При построении модели принято предположение о свойствах стационарности, ординарности и отсутствия последствия потоков событий в системе, о низкой вероятности отказов программной компоненты и облачных сервисов. Также учтен тот факт, что акты вандализма происходят на объекты первой зоны, которые находятся за пределами периметра. Использован типовой алгоритм построения марковской модели на основе определения множеств состояний и механизмов взаимодействия. Оценивание функционирования многозоновой системы осуществлено с учетом трех степеней деградации от исправного состояния до состояний одновременного отказа всех трех зон. Верхнее состояние S1 соответствует исправному состоянию системы без отказов. Состояния S2, S3, S4 соответствуют состояниям первого уровня деградации системы, при котором проявился аппаратный отказ в одной из зон. Состояния S5, S6, S7 соответствуют состояниям второго уровня деградации системы, при котором проявились аппаратные отказы в двух зонах. Состояние S8 соответствует состоянию полного отказа всех трех зон системы. Для оценки функций готовности выполнен расчет и исследования марковской модели для различных наборов входных данных. Как переменные параметры, были выбраны: интенсивность отказов аппаратных средств, обусловленная физическими и проектными дефектами непреднамеренного характера; интенсивность восстановления аппаратных средств после отказа и коэффициент «агрессии» злоумышленников, зависящий от внешних факторов. По результатам моделирования сделаны выводы о влиянии параметров

інтенсивностей отказов и восстановлений на значение показателей готовности различных уровней деградации и отношение между ними. Определено, что при увеличении входных параметров - интенсивности отказов аппаратных средств и коэффициента «агрессии» злоумышленников, стационарные коэффициенты готовности всех уровней деградации уменьшаются. Но при увеличении интенсивности обновлений аппаратных средств стационарные коэффициенты готовности всех уровней деградации нелинейно увеличиваются, а отношение между ними стремится к единице.

Ключевые слова: система киберфизической безопасности; показатели готовности; марковская модель; уровни деградации; многозоновая архитектура.

RESEARCH OF THE MARKOV AVAILABILITY MODEL OF THE PHYSICAL SECURITY SYSTEM WITH DEGRADATION CAUSED BY ATTACKS AND HARDWARE FAILURES

Al-Khafaji Ahmed Waleed, Y. L. Ponochovnyi, V. S. Kharchenko, D. D. Uzun

The Markov availability model of a physical security system is investigated. The actuality of research caused by the need to protect the physical security systems not only from physical failures, but also from cyber-attackers. When constructing the model, it is assumed that the properties of stationary, ordinariness and absence of aftereffects of event flows in the system, the low probability of failure of the software component and cloud services. It also takes into account the fact that acts of vandalism occur on objects of the first zone that are outside the perimeter. The typical algorithm of construction of the Markov model based on determination of sets of states and mechanisms of interaction is used. The evaluation of the functioning of the multi-zone system was carried out taking into account three degrees of degradation from the normal state to the states of simultaneous failure of all three zones. The top state of S1 corresponds to the normal state of the system without failures. The states S2, S3, S4 correspond to the states of the first level of degradation of the system, in which hardware failure occurred in one of the zones. The states S5, S6, S7 correspond to the states of the second level of degradation of the system, in which there were hardware failures in two zones. Condition S8 corresponds to the state of complete failure of all three zones of the system. To evaluate the availability functions, the Markov model was calculated and investigated for different sets of input data. The following parameters were chosen: hardware failure rate due to unintentional physical and design defects; the intensity of recovery of hardware after failure and the degree of "aggression" of the attackers, which depends on external factors. The results of the simulation conclude that the parameters of failure rates and recovery are affected by the availability values of the different degradation levels and the relationship between them. It is determined that with increasing input parameters - the failure rate of hardware and the coefficient of "aggression" of intruders, the stationary availability coefficients of all levels of degradation decrease.

Keywords: physical security system; availability indicators; Markov model; degradation levels; multi-zone architecture

Аль-Хафаджи Ахмед Валід – аспірант каф. комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Поночовний Юрій Леонідович – канд. техн. наук, ст. наук. сотр., доцент каф. інформаційних систем та технологій, Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна; докторант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Харченко Вячеслав Сергійович – заслужений винахідник України, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Узун Дмитро Дмитрович – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Al-Khafaji Ahmed Waleed – PhD student of the Department of Computer systems, networks and cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine e-mail: eng_ahmed.waleed@yahoo.com.

Ponochovnyi Yuriy Leonidovych – PhD, Senior researcher, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine; DrS student of the Department of Computer systems, networks and cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: yuriy.ponch@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-6856-2013, Scopus Author ID: 56446990700, ResearcherID: J-5732-2017, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=A4nhkGoAAAJ>.

Kharchenko Vyacheslav Sergijovych – Honored inventor of Ukraine, Doctor of Science on Engineering, Professor, Head of the Department of Computer systems, networks and cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: V.Kharchenko@csn.khai.edu. ORCID Author ID: 0000-0001-5352-077X, Scopus Author ID: 22034616000, ResearcherID: A-7719-2017.

Uzun Dmytro Dmytrovich – PhD, Associate professor Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: d.uzun@csn.khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-5574-550X.