

УДК 004.7

С.Г. Семенов, С.Ю. Гавриленко, Кассем Халіфе

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

## GERT-МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті проведено аналіз методів прогнозування параметрів функціональної безпеки технічних систем. Зроблено висновок про доцільність використання для цього GERT-моделей. Представлені результати дослідження методів аналізу технічних систем на основі випадкових стохастичних GERT-моделей. Розроблені стохастичні GERT-моделі різних типів. У результаті моделювання визначено, що введення додаткових умов моделювання (наприклад, врахування можливих порушень функціональної безпеки) підвищило точність результатів оцінки часових характеристик виконання моделей.

**Ключові слова:** GERT-модель, прогнозування, параметр функціональної безпеки.

### Вступ

#### Постановка завдання та аналіз літератури.

Одним з основних завдань контролю будь-якого технічного об'єкта є прогнозування його параметрів. Своєчасне реагування на можливі аномалії процесу їх функціонування сприяє забезпеченню функціональної безпеки систем і може запобігти аварійної ситуації.

Основним принципом прогнозування функціональної безпеки технічних об'єктів має бути системний підхід, що дозволяє враховувати особливості призначення виробу, його конструкції, можливості виробництва і умов експлуатації, досягнутий рівень функціональної безпеки комплектуючих виробів і матеріалів.

Рішення задач прогнозування функціональної безпеки об'єктів проводять на етапах розробки технічного завдання, технічного пропозиції, ескізного проекту, технічного проекту, виготовлення дослідних зразків (партії), настановних серій і серійного виробництва, послідовно уточнюючи прогнозовані значення параметрів функціональної безпеки (ПФБ) на кожному з зазначених етапів.

Таким чином, можна відзначити, що при проектуванні і розробці складних технічних систем дуже важливо використовувати ефективні засоби оцінки якості функціонування і прогнозування параметрів функціональної безпеки.

**Аналіз літератури** [1-7] показав, що на етапах розробки технічного завдання і технічної пропозиції для прогнозування ПФБ технічних систем часто використовується експертний метод або метод подібних виробів з урахуванням вимог директивних документів і досягнутого світового рівня функціональної безпеки апаратури.

На етапі розробки ескізного проекту апаратури здійснюють попереднє прогнозування функціональної безпеки технічної системи методом подібних

виробів або схем або методом графів, або щелементним методом розрахунку без урахування навантаження апаратури та ін.

На етапі розробки технічного проекту апаратури проводять детальне прогнозування тими ж методами з урахуванням складності виробу, найгірших реальних умов навколишнього середовища, конструктивних і функціональних змін, перспектив розвитку системи технічного обслуговування і ремонту виробу. Проведені дослідження та аналіз ряду робіт [2-5] показали, що в даний час для оцінки якості функціонування і прогнозування параметрів функціональної безпеки все більше застосовування знаходять так звані випадкові графи.

Проходженню заявки через множинну вершин графової моделі відповідає проходження деякої інформаційної одиниці (кадру, пакету, повідомлення) через множинну пристроїв (вузлів) технічної системи. Стан пристрою або вузла характеризується ймовірністю його функціонування. Якщо пристрій несправний, то інформаційна одиниця безповоротно втрачається або направляється в інший вузол.

При різних рівнях технічної готовності окремих частин система має певні рівні технічних можливостей, які можуть бути оцінені стохастичними характеристиками.

Для орієнтованих графів, що відображають функціонування технічних систем, такими характеристиками є ймовірність досягнення заявкою заданого стоку і функція розподілу часу його досягнення.

Аналіз технічних систем за допомогою застосування випадкових графів ускладнюється тим, що не розроблені ефективні та високоточні методи знаходження розподілів часу проходження моделі.

У статті розглядається метод аналізу технічних систем на основі випадкових стохастичних GERT-моделей, що дозволяють попереду знайти функції та щільність розподілу досліджуваних випадкових величин.

## Аналіз випадкових стохастичних GERT-моделей

Визначимо кілька типів випадкових GERT-мереж  $\bar{G}$ , що відрізняються між собою по виконуваних діях у разі отримання заявкою відмови в обслуговуванні через неготовність вузла: модель типу  $G_t$ , в якій заявка відправляється на вихід мережі; модель типу  $G_s$ , в якій заявка із затримкою  $T_s$  відправляється на вхід мережі  $S$ ; модель типу  $G_u$ , в якій заявка повторно із затримкою  $T_u$  відправляється на вхід вузла  $u$ .

Мережа типу  $G_t$  відображає функціонування технічних систем, в яких втрата інформаційних одиниць не приводить ні до якої зміни їх функціонування. Таке явище має місце в мережах телекомунікацій, наприклад, коли через переповнення вхідних буферів комунікаційних пристроїв вхідні пакети просто відкидаються.

Існує велика кількість систем, в яких від втрати заявок якість функціонування системи знижується, але створюється помилкове враження підвищення її швидкодії, так як час на подальшу обробку знижених заявок не витрачається. Застосування моделей  $G_t$ -типу, з одного боку, допомагає з великим ступенем імовірності виявити такі частини проектованої підсистеми, коректність роботи яких викликає сумнів. З іншого боку, ці моделі дозволяють оцінити ймовірнісно-часові характеристики такої недостатньо інтелектуальної системи. Крім того, моделі типу  $G_t$  можуть бути ефективним засобом дослідження телекомунікаційних систем, в яких допускається втрата певної частки інформації. Наприклад, в мережах Frame relay при передачі пакетів з втратами швидкодія каналів зв'язку підвищується із-за того, що передана звукова інформація володіє достатнім ступенем надмірності і може бути відновлена в пунктах прийому протоколами рівня користування телекомунікаційної мережі (ТКМ).

Моделі типу  $G_s$ , можуть бути використані, наприклад, для розрахунку характеристик ТКМ, в якій втрата інформації на каналному рівні виявляється з істотною затримкою протоколами більш високих рівнів і передається повторно. Це запізнення враховується в моделі типу  $G_s$ , константою  $T_s$ .

Модель типу  $G_u$  відрізняється від моделі типу  $G_s$ , тим, що заявка в разі виникнення аномальної ситуації (кібератака) і отримання відмови в обслуговуванні на лінії зв'язку відправляється не на вхід мережі, а з випадковою затримкою  $T_u$  повторно відправляється на вхід вузла  $u$  за іншим маршрутом. Величину  $T_u$  можна інтерпретувати як час відновлення функціональної безпеки вузла  $u$ .

Таким чином, найбільш адекватними з погляду прогнозування параметрів функціональної безпеки технічних систем є GERT-моделі типу  $G_u$ .

Випадкові GERT-мережі типу  $G_u$ . У мережі  $G_u$ -типу для кожного вузла обов'язково додатково з'являється фрагмент "дуга-петля".

Якщо в мережі типу  $G_u$  кожен з  $n$  вузлів може потрапити в стан "вимкнений", то в мережі обов'язково є петлі всіх порядків до  $2^n$  включно. Тому мережі типу  $G_u$  ще більш критичні до параметру обчислювальної трудомісткості, ніж мережі типу  $G_s$ .

## Розробка та дослідження стохастичних GERT-моделей

На рис. 1 наведена модель «найпростішої» GERT-мережі  $G$  технічної системи, а на рис. 2 – 4 – відповідні їй стохастичні GERT-мережі типів  $G_t$ ,  $G_s$ ,  $G_u$ .

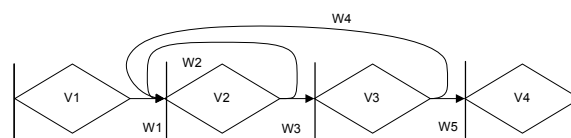


Рис. 1. Модель «найпростішої» GERT-мережі  $G$

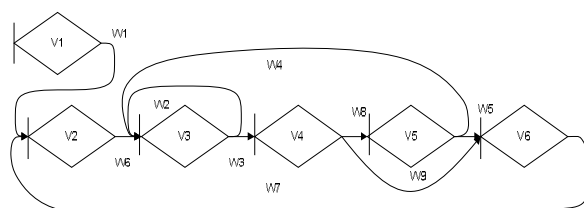


Рис. 2. Модель GERT-мережі  $G_t$

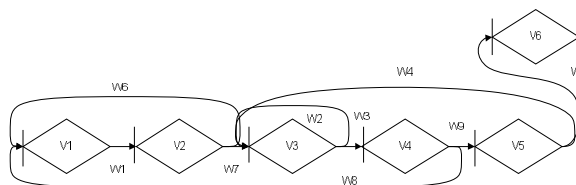


Рис. 3. Модель GERT-мережі  $G_s$

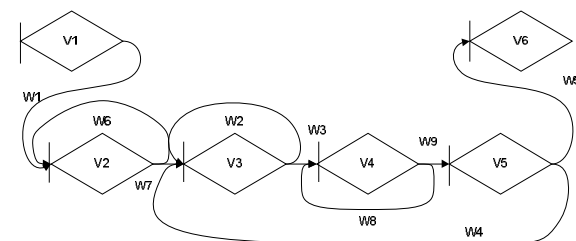


Рис. 4. Модель GERT-мережі  $G_u$

Параметри моделей наведені в табл.1. Ймовірності функціонально безпечного стану вузлів  $V1$  і  $V2$  рівні 0,8. У моделях  $G_s$  і  $G_u$  величина затримок  $T_s$  і  $T_u$  дорівнює 1.

Таблиця 1  
Характеристики дуг GERT-моделей

Перехід	Ймов.	Розподіл	Параметри
$W_1$	1	Нормальний	$n = 1; \sigma^2 = 2$
$W_2$	0,5	Експоненційний	$\lambda = 0,25$
$W_3$	0,5	Біноміальний	$p = 0,5; n = 2$
$W_4$	0,5	Постійна величина	1
$W_5$	0,5	Постійна величина	1
$W_6$	0,5	Постійна величина	1
$W_7$	0,5	Постійна величина	1
$W_8$	0,5	Постійна величина	1
$W_9$	0,5	Постійна величина	1

Використовуючи дані табл.1, а також методику розрахунку GERT-мереж [1 – 4] знайдемо еквівалентні W-функції часу виконання моделей:

$$W_3 = \frac{W_1 W_3 W_5}{1 - W_2 - W_3 W_5 W_4}; \quad W_3^{(t)} = \frac{W_1 W_3 W_5 W_6 W_8 + W_1 W_3 W_6 W_9}{1 - W_2 - W_3 W_4 W_8 - W_3 W_5 W_6 W_7 W_8 - W_3 W_6 W_7 W_9};$$

$$W_3^{(s)} = \frac{W_1 W_3 W_5 W_7 W_9}{1 - W_2 - W_1 W_6 W_7 - W_1 W_3 W_7 W_8 - W_3 W_4 W_9};$$

$$W_3^{(u)} = \frac{W_1 W_3 W_5 W_7 W_9}{1 - W_2 - W_6 - W_8 - W_3 W_4 W_9}.$$

На рис. 5 наведені графіки щільності розподілу часу проходження «найпростішої» GERT-мережі G і стохастичних GERT-мереж G<sub>t</sub>, G<sub>s</sub>, G<sub>u</sub>.

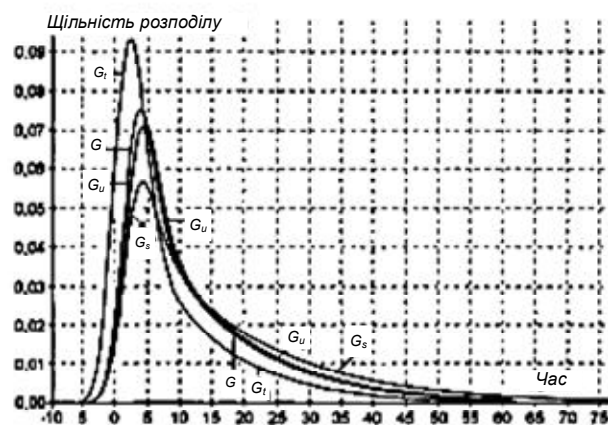


Рис. 5. Графіки щільності розподілу часу проходження «найпростішої» GERT-мережі G і стохастичних GERT-мереж G<sub>t</sub>, G<sub>s</sub>, G<sub>u</sub>.

Як видно з цих графіків введення в GERT-моделі додаткових уточнюючих умов можливого порушення функціональної безпеки, до 1,5 разів підвищує точність результатів оцінки часових характеристик (математичного сподівання) виконання моделей.

## Висновки

Таким чином, у статті представлені результати дослідження методів аналізу технічних систем на основі випадкових стохастичних GERT-моделей. Представлені стохастичні GERT-моделі типів G<sub>t</sub>, G<sub>s</sub>, G<sub>u</sub> з урахуванням емпірично отриманих параметрів проходження окремих гілок GERT-мережі.

У результаті моделювання визначено, що введення додаткових умов моделювання (наприклад, врахування можливих порушень функціональної безпеки) підвищило точність результатів оцінки часових характеристик виконання моделей.

## Список літератури

1. Липаев В.В. Надежность и функциональная безопасность комплексов программ реального времени / В.В. Липаев. – М.: 2013. – 176 с.
2. Семенов С.Г. Математическая модель мультисервисного канала связи на основе экспоненциальной GERT-сети / С.Г. Семенов, С.В. Мелешко, Я.В. Люшко // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2011. – № 3(27). – С. 64-67.
3. Семенов С.Г. Исследования вероятностно-временных характеристик мультисервисного канала связи с использованием математического аппарата GERT-сети / С.Г. Семенов, В.В. Босько, І.А. Березюк // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Т. 1, Вип. 3(101). – С. 139-142.
4. Семенов С.Г. Методика математического моделирования защищенной ИТС на основе многослойной GERT-сети / С.Г. Семенов // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 62 (968). – С. 173-181.
5. Шибанов А.П. Обобщенные GERT-сети для моделирования протоколов, алгоритмов и программ телекоммуникационных систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.13 / Шибанов Александр Петрович. – Рязань, 2003. – 307 с.
6. Pritsker A.A.V. Modelling and analysis using Q-GERT networks New York: Wiley : Distributed by Halsted Press, 1979.

Надійшла до редколегії 12.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## GERT-МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Г. Семенов, С.Ю. Гавриленко, Кассем Халифе

В статье проведен анализ методов прогнозирования параметров функциональной безопасности технических систем. Сделан вывод о целесообразности использования GERT-моделей. Представлены результаты исследования методов анализа технических систем на основе случайных стохастических GERT-моделей. Разработаны стохастические GERT-модели различных типов. В результате моделирования установлено, что введение дополнительных условий моделирования (например, учет возможных нарушений функциональной безопасности) повысило точность результатов оценки временных характеристик выполнения моделей.

**Ключевые слова:** GERT-модель, прогнозирование, параметр функциональной безопасности.

## GERT-FORECASTING MODEL PARAMETERS OF FUNCTIONAL SAFETY OF TECHNICAL SYSTEMS

S.G. Semenov, S.Yu. Gavrilenko, Kassem Khalife

The article analyzes the forecasting techniques of functional safety parameters of technical systems. It was concluded that the feasibility of using GERT-models. The results of the study of technical systems analysis methods based on random stochastic GERT-models. Developed stochastic GERT-models of various types. As a result, the simulation found that the introduction of additional simulation conditions (for example, the account of possible violations of the functional safety) increased the accuracy of the results of evaluation of the temporal characteristics of performance models.

**Keywords:** GERT-model forecasting, setting of functional safety.