

УДК [[517.444+519.876.5]::519.873]::623

М. О. СЛЮСАРЕНКО,*кандидат технічних наук**(Центральний науково-дослідний інститут**Збройних Сил України, м. Київ)*

Застосування методу згортки при моделюванні безвідмовності зразка військової техніки

Запропонований варіант застосування методу згортки при моделюванні безвідмовності зразка військової техніки за умови використання різних законів розподілу часу безвідмовної роботи комплектуючих.

Ключові слова: показники надійності; закони розподілу; схема надійності; імовірність безвідмовної роботи; елементи системи.

Предложен вариант применения метода свертки при моделировании безотказности образца техники, в том числе и военной, при условии использования разных законов распределения времени безотказной работы комплектующих.

Ключевые слова: показатели надежности; законы распределения; схема надежности; вероятность безотказной работы; элементы системы.

Активне впровадження науково-технічних досягнень у розвиток озброєння та військової техніки (ОВТ) дозволило створити нові сучасні зразки, а також засоби автоматизації, що значно збільшило бойові можливості військ (сил). Однак, разом з тим, виникла проблема забезпечення надійності, а саме безвідмовності ОВТ. Недостатня увага до безвідмовності військової техніки викликає серйозні наслідки для бойової здатності військ (сил).

Усі технічні об'єкти складаються з елементів. Елементи фізично можуть бути з'єднані між собою у різноманітний спосіб. Для наочного зображення з'єднань елементів використовують різного роду схеми: структурні, функціональні, принципів тощо. Кожна має своє призначення та дозволяє аналізувати функціонування того чи іншого виробу. Для того щоб проаналізувати рівень надійності та розрахувати її показники застосовуються структурні схеми надійності. Тобто наочне графічне уявлення умов, за яких працює або не працює досліджуваний елемент, об'єкт, зразок техніки. Але, зазвичай, вони дуже складні й тому не завжди є можливість коректного обчислення показників надійності (безвідмовності) складної системи. Для того щоб спростити ці схеми і все ж таки розрахувати основні показники безвідмовності застосовується метод згортки. Завдяки йому є можливість розподілити загальну схему на складові елементи та проводити розрахунки поетапно. Отже, дана стаття є актуальною.

Аналізом схем надійності займається багато вчених. Так, у [1] розглядається метод структурних схем для аналізу безвідмовності відносно простих систем. Автори не враховують фізичну природу відмов у системі, а беруть до уваги тільки статистичні характеристики потоку відмов. Автори у [2] розглядають системи з послідовним з'єднанням елементів для відновлюваних та невідновлюваних елементів та системи із складною структурою. Методи аналізу надійності технічних систем, структурна схема яких при формалізації не зводиться до послідовно-паралельної схеми, наводяться в [3]. Одним із важливих завдань проектування є створення такої системи, в якій відмови будь-якого елемента або групи елементів не впливали б на надійність, тобто не приводили до відмови інших елементів системи. Тому доволі часто для розрахунків розглядають випадок, коли відмови елементів вважаються незалежними. Саме такий варіант розглядають автори в [4]. У [5] проводиться обґрунтування потрібного рівня надійності нових розробок конкретного та загального призначення. Також розглядається необхідний рівень надійності серійних виробів. Однак автори для розрахунку показників безвідмовності доволі часто використовують однакові закони розподілу часу безвідмовної роботи. Але результати випробувань показують, що ці закони можуть відрізнятися.

Отже, **метою** статті є застосування методу згортки при моделюванні безвідмовності зразка військової техніки за умови використання різних законів розподілу часу безвідмовної роботи комплектуючих.

Для того щоб скласти структурну схему надійності, необхідно проаналізувати процес функціонування

об'єкта, вивчити функціональні зв'язки між елементами, види відмов та причини їх виникнення. Таке дослідження потребує високої інженерної та математичної ерудиції. Ступінь поділу об'єкта на елементи залежить від конкретної задачі розрахунків. Однакові з'єднання на принциповій схемі можуть мати зовсім різні з'єднання на структурній схемі надійності. Крім того, як вже наголошувалося, час безвідмовної роботи для різних комплектуючих може бути різним.

Елементи в схемі, зазвичай, з'єднуються послідовно чи паралельно. Найчастіше – це поєднання обох з'єднань у різних інтерпретаціях. Розглянемо такий варіант з погляду безвідмовності.

Наприклад, технічна система має n послідовно з'єднаних елементів (рис. 1).

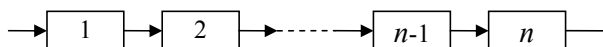


Рис. 1. Послідовна схема з'єднання елементів

У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи всієї системи $P(t)$ визначиться як добуток ймовірностей безвідмовної роботи $P_i(t)$ її елементів, якщо вважати, що події, пов'язані з відмовою кожного елемента, є незалежними (стосовно безвідмовності) [6]. У той же час, для відмови всієї системи з ймовірністю $Q(t)$ достатньо відмови будь-якого елемента системи. Події, що пов'язані з відмовою кожного елемента $Q_i(t)$, є, у загальному випадку, сумісними подіями. Тоді, за незалежного функціонування n послідовно з'єднаних елементів системи, ймовірність безвідмовної роботи всієї системи

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)) = 1 - Q(t), \quad (1)$$

за умови

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad (2)$$

де $P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента; $Q_i(t)$ – ймовірність відмови i -го елемента системи.

При цьому ймовірність відмови всієї системи в результаті виходу з ладу хоча б 1 елемента

$$Q(t) = Q(\tilde{T} < t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)), \quad (3)$$

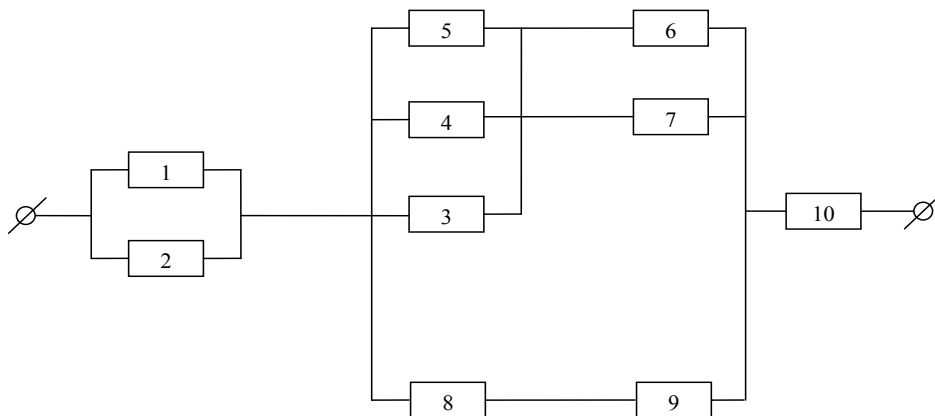


Рис. 3. Послідовно-паралельна схема з'єднання елементів

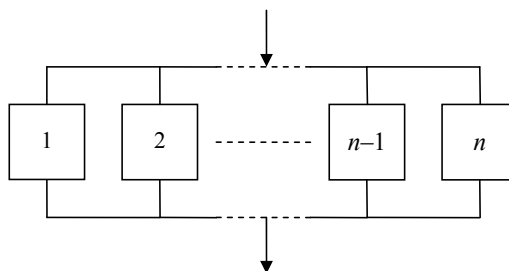


Рис. 2. Паралельна схема з'єднання елементів системи

де \tilde{T} – випадкова величина часу наробітку на відмову зразка техніки.

Якщо послідовна система має два елементи, то відмова всієї системи може статися за умови відмови одного з елементів або за відмови обох елементів одночасно. Отже, остаточна ймовірність відмови розраховується як ймовірність суми декількох подій, серед яких не виключені сумісні:

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) - Q_1(t)Q_2(t), \quad (4)$$

де $Q_1(t)$ – ймовірність відмови 1-го елемента; $Q_2(t)$ – ймовірність відмови 2-го елемента.

Але, згідно з (2), $Q_1(t) = 1 - P_1(t)$; $Q_2(t) = 1 - P_2(t)$, тому безвідмовність усієї системи

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - P_1(t) + 1 - P_2(t) - (1 - P_1(t))(1 - P_2(t)),$$

звідки

$$P(t) = P_1(t)P_2(t). \quad (5)$$

Формула (5) є виразом для послідовної системи з двох елементів стосовно сумісних подій.

У випадку, якщо система має n паралельно з'єднаних елементів (рис. 2), за умови незалежного функціонування елементів ймовірність її відмови [6]

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)). \quad (6)$$

Ймовірність безвідмовної роботи в цьому випадку

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)). \quad (7)$$

Але частіше за все використовують схеми з послідовно-паралельним або паралельно-послідовним з'єднанням. Саме в цьому випадку застосовують метод згортки. Його сутність полягає в послідовному перетворенні вихідної структури в більш прості, для яких нескладно отримати аналітичні вирази. Такі вирази можна використовувати для розрахунку надійності.

Метод згортки, зазвичай, складається з декількох етапів. Розглянемо послідовно-паралельну схему з'єднання (рис. 3), яка складається з 10 елементів.

При розрахунку безвідмовності часто вважається, що ймовірність часу безвідмовної роботи для всіх елементів однакова. Однак результати випробувань свідчать, що відмови комплектуючих можуть розподілятися за різними законами, оскільки при обробленні інформації про надійність технічних систем, які складаються з великої кількості елементів, причини відмов різні. Одні елементи можуть відмовляти через зносіві руйнування, інші – внаслідок порушень умов експлуатації, треті – з причини втомленого руйнування тощо. Автор у [7] досліджує розподіл наробітку до відмови таких систем та доводить, що зазначені розподіли відрізняються від

традиційних, типових для наробітку до відмови одного елемента. Тоді розподіл наробітку до відмови системи буде підпорядковуватися суперпозиції декількох розподілів. Для прикладу розглядається механічна система, в якій відбуваються зносіві руйнування. Оскільки при цьому причиною першої відмови є, частіше за все, один або декілька елементів, то розподіл наробітків до першої відмови таких систем близький до нормального. Після відмови відновлюють (або замінюють), зазвичай, тільки елемент, що відмовив. Це призводить до того, що кожний з елементів системи після усунення відмови буде знаходитися на різних стадіях зношування та може стати причиною відмови. У такій ситуації потік відмов може бути прийнятий пуасонівським. При цьому чим більше номер відмови, тим ближче розподіл наробітку до відмови наближається до експоненціального. При наробітках до другої та третьої відмов можна очікувати одночасної дії обох факторів, а розподіл наробітків – близьким до суперпозиції нормального та експоненціального законів. Автор підтверджує це дослідними даними про розподіл наробітку до першої, до другої, до

Таблиця 1. Величина частоти відмов елементів системи в ненавантаженому стані

№ за/п	Елемент системи	Кількість відмов за 10 ⁶ год знаходження в експлуатаційних умовах	№ за/п	Елемент системи	Кількість відмов за 10 ⁶ год знаходження в експлуатаційних умовах
1	Гідроциліндри	0,03	18	Паливні клапани	0,127
2	Кулькові підшипники	0,011	19	Гідравлічні клапани	0,99
3	Осьові вентилятори	0,125	20	Пневматичні клапани	0,214
4	Дизельні двигуни	0,898	21	Силові трансформатори	0,0012
5	Механічні фільтри	0,035	22	Акумуляторні свинцево-кислотні батареї	0,006
6	Гідравлічна арматура	2,77	23	Конденсатори змінні	0,025
7	Ущільнення	0,011	24	Конденсатори плівкові постійної ємності	0,45
8	Електронагрівальні прилади	0,355	25	Магнітні осердя-вкладиші	0,0002
9	Гнучкі шланги	1,74	26	Диск пам'яті	0,148
10	Механічні силові редуктори	0,146	27	Випрямлячі кремнієві регульовані	0,017
11	Муфти	0,441	28	Реле загального призначення	0,032
12	Електродвигуни постійного струму	0,22	29	Теплові реле	2,00
13	Електродвигуни змінного струму	0,499	30	Опори змінні загального призначення	0,02
14	Генератори змінного струму	0,796	31	Дротові змінні опори	0,163
15	Паливні насоси	0,114	32	Електромагніти	0,3
16	Гідравлічні насоси	0,043	33	Перемикачі загального призначення	0,021
17	Електромагнітні клапани	0,194	34	Транзистори кремнієві загального призначення	0,0011

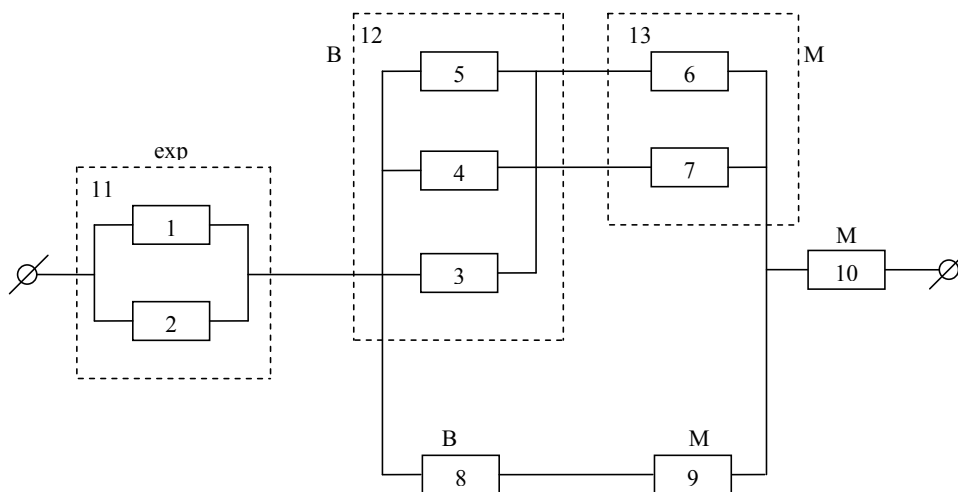


Рис. 4. Послідовно-паралельна схема з'єднання елементів з визначенням законів розподілу часу безвідмовної роботи

третьої, до четвертої та до п'ятої відмов двигунів пасажирських автобусів.

Також у [7] наводяться дані про частоту відмов окремих елементів системи (табл. 1). Якщо кожний елемент складної системи має різну кількість відмов за одиницю часу, значить і ймовірність безвідмовної роботи елементів різна. Але за таких значень ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента загальна система буде працювати і мати свою ймовірність безвідмовної роботи.

У даному дослідженні для прикладу візьмемо три закони розподілу часу безвідмовної роботи: експоненціальний (6), вейбулівський (7) та модель, яка враховує особливі негативні факторів, до яких можуть належати агресивні (особливі) умови експлуатації, вогневий вплив противника для військової техніки (8) [8]:

$$P_{exp}(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad (6)$$

$$P_B(t) = e^{-\lambda t^\alpha} = e^{-\frac{t^\alpha}{T_2}}, \quad (7)$$

$$P_M(t) = e^{-\left(\frac{t}{T_3} \alpha + \varepsilon\right) t}, \quad (8)$$

де T_1 – наробіток на відмову за експоненціального закону розподілу, год; T_2 – наробіток на відмову за вейбулівського закону розподілу, год; T_3 – наробіток на відмову за умови використання моделі, год; t – час безперервної роботи зразка техніки, год; λ – інтенсивність відмов зразка техніки, 1/год; α – параметр форми для вейбулівського закону розподілу; ε – коефіцієнт, який враховує особливі негативні фактори (вогневий вплив противника для військової техніки), 1/год.

Цілком зрозуміло, що чим більше факторів враховує модель, тим вона стає складнішою, набуває нових властивостей та дає інші результати. Так, якщо взяти однаковий наробіток на відмову для всіх виразів (6), (7), (8), то ймовірність безвідмовної роботи найвища буде для експоненціального закону, а найнижча – для моделі (8). Для того щоб ймовірність безвідмовної роботи не знижувалася з ускладненням закону розподілу, необхідно підвищувати наробіток на відмову.

Введемо такі вихідні дані: $T_1=120$ год, $T_2=150$ год та $T_3=180$ год; $t = 5$ год; параметр форми $\alpha = 1,4$ (що відповідає 70% витрачання ресурсу) [9]; $\varepsilon = 0,0063$ 1/год.

Виходячи з цього, знайдемо значення ймовірності безвідмовної роботи для усіх законів розподілу часу безперервної роботи: $P_{exp}(t) = 0,96$, $P_B(t) = 0,94$, $P_M(t) = 0,91$. Крім того, за даними випробувань визначають стосовно кожного елемента (або групи елементів) за якими законами розподілу розподіляються відмови. Приклад наведений у табл. 2.

Після того, як визначилися із законами розподілу часу безвідмовної роботи, можна переходити до поетапного розрахунку надійності.

1-й етап. Розглядаються всі паралельні з'єднання, що заміщуються еквівалентними елементами з відповідними показниками (характеристиками) надійності (рис. 4). Такими паралельними елементами в даному прикладі є 1, 2; 3, 4, 5; 6, 7. Тобто виділяємо три ділянки з характеристиками надійності $P_{11}(t)$, $P_{12}(t)$, $P_{13}(t)$. Крім того, відомо, що відмови розподіляються на ділянці 11 за експоненціальним законом, на ділянці 12 – за

Таблиця 2. Розподіл відмов між елементами системи

Закони розподілу відмов	Елементи									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Експоненціальний (exp)	+	+								
Вейбулівський (B)			+	+	+			+		
Модель (M)						+	+		+	+

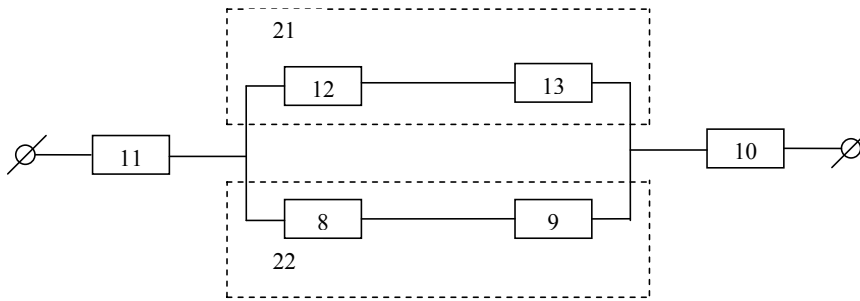


Рис. 5. Структура схеми після першого перетворення

вейбулівським, на ділянці 13 – за законом моделі, що враховує негативні фактори.

Характеристики надійності елементів у цьому випадку

$$P_{11}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - P_i(t)) = 1 - (1 - P_1(t))(1 - P_2(t)) = 0,998,$$

$$P_{12}(t) = 1 - \prod_{i=3}^5 (1 - P_i(t)) = 1 - (1 - P_3(t))(1 - P_4(t))(1 - P_5(t)) = 0,999,$$

$$P_{13}(t) = 1 - \prod_{i=6}^7 (1 - P_i(t)) = 1 - (1 - P_6(t))(1 - P_7(t)) = 0,991.$$

Після першого перетворення схема приймає вигляд, який показано на рис. 5.

2-й етап. Розглядаються всі послідовні з'єднання елементів, що заміщуються еквівалентними елементами. У схемі на рис. 5 такими елементами є 8, 9 та 12, 13. Обчислимо характеристики надійності ($P_{22}(t)$, $P_{21}(t)$) для даних елементів:

$$P_{21}(t) = \prod_{i=12}^{13} P_i = P_{12}P_{13} = 0,99,$$

$$P_{22}(t) = \prod_{i=8}^9 P_i = P_8P_9 = 0,85.$$

Після другого перетворення схема прийме вигляд, показаний на рис. 6.

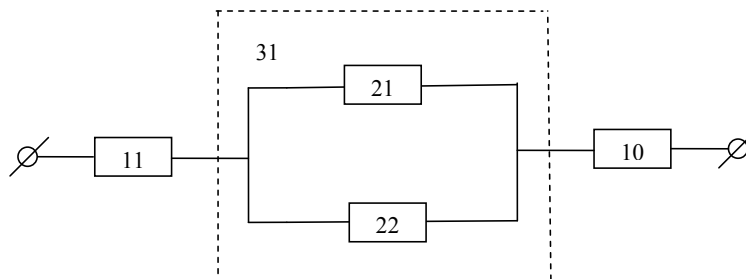


Рис. 6. Структура системи після другого перетворення

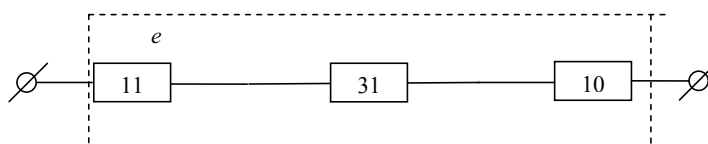


Рис. 7. Структура схеми після третього перетворення

3-й етап. Знову розглядаються всі паралельні з'єднання елементів 21 та 22 останньої схеми. Імовірність безвідмовної роботи еквівалентного елемента 31

$$P_{31}(t) = 1 - \prod_{i=21}^{22} (1 - P_i(t)) = 1 - (1 - P_{21}(t))(1 - P_{22}(t)) = 0,985.$$

Після третього перетворення вигляд схеми зображено на рис. 7.

4-й етап. У цьому випадку всі елементи (11, 31, 10) з'єднані послідовно. Характеристика надійності $P_e(t)$ даної схеми (рис. 7)

$$P_e(t) = \prod_i P_i = P_{11}P_{31}P_{10} = 0,89.$$

Кінцева структура системи показана на рис. 8.

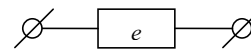


Рис. 8. Кінцева структура системи

Висновки. Таким чином, при моделюванні безвідмовності зразка військової техніки можна застосовувати метод згортки. За послідовного, поетапного перетворення вихідної структури в більш прості нескладно отримати аналітичні вирази для розрахунку безвідмовності складної системи. У даному дослідженні

використовувалася послідовно-паралельна схема з'єднання, що складається з 10-ти елементів. При застосуванні методу згортки схему було приведено до простої, яка складається з трьох послідовно з'єднаних елементів. Крім того, для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи використовувалися різні закони розподілу часу безвідмовної роботи, а саме: експоненціальний, вейбулівський та модель, що враховує особливі негативні фактори. Розрахунки показали, що надійність даної системи складає 0,89.

Однак метод згортки можна застосовувати не завжди. Наприклад, його неможливо використовувати для аналізу надійності структур, коли елементи з'єднуються між собою за «містковою» схемою. Тому предметом подальших досліджень буде розрахунок безвідмовності для інших структурних схем.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Мрыкин С. В., Вильчек М. И. Метод структурных схем и оценка безотказности системы. Саратов : СГАУ, 2010. – 29 с.
2. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности. М. : Сов. радио, 1966. 431 с.
3. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М. : Радио и связь, 1981. 266 с.
4. Надежность и эффективность в технике : справочник в 10 тт. Т. 5. Проектный анализ надежности / под ред. В. И. Патрушева, А. И. Рембезы. М. : Машиностроение, 1988. 320 с.
5. Дзиркал Э. В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. М. : Радио и связь, 1981. 176 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. пос. для вузов. М. : Наука, 1964. 576 с.
7. Кубарев А. И. Надежность в машиностроении. М. : Изд-во стандартов, 1989. 225 с.
8. Шуєнкін В. О., Слюсаренко М. О. Метод аналітичного моделювання процесу зміни безвідмовності засобів зенітних ракетних військ з урахуванням вогневого впливу противника // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : зб. наук. праць ХУПС. 2016. № 4 (25). С. 39–43. Інв. № 28641.
9. Креденцер Б. П., Троценко В. Г. Основы надежности и технического обеспечения радиоэлектронных средств РТВ ПВО. К. : КВИРТУ, 1983. 164 с.

Рецензент В. О. Шуєнкін, д-р техн. наук, проф., заслужений діяч науки і техніки України (Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України)