

УДК 623.4.017

С.М. Донцов, В.В. Лук'янчук, Д.В. Фоменко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗЕНІТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСУ (СИСТЕМИ) ПРИ СТРІЛЬБІ ПО ОДИНОЧНІЙ ЦІЛІ

Розглядається аналітична модель функціонування зенітного ракетного комплексу (зенітної ракетної системи) при стрільбі по одиночній цілі (перша ситуація застосування зенітних ракетних військ). Запропонована аналітична модель, на відміну від відомих, враховує надійність засобів, що застосовуються, можливість оперативного персоналу по веденню бойової роботи, резерви часу та поглиннанні резерву часу і надає можливість при різноманітних вихідних даних аналітично досліджувати вплив цих факторів на ефективність застосування зенітного ракетного комплексу (зенітної ракетної системи).

Ключові слова: модель функціонування, граф станів та переходів, надійність, оперативний персонал.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури.

Процес функціонування зенітного ракетного комплексу (ЗРК), зенітної ракетної системи (ЗРС), в різних умовах повітряної обстановки може бути представлений у вигляді технологічного процесу (послідовного, паралельного, послідовно-паралельного) виконання операцій бойової роботи операторами бойового розрахунку у визначених просторово-часових зонах відповідними бойовими засобами. Процес функціонування ЗРС, ЗРК по одиночній цілі характеризується впорядкованою послідовністю вирішуваних завдань, приведеною в [1, 2]. Залежно від поставленого бойового завдання по знищенню повітряної цілі (на дальній межі, в глибині зони ураження) певні операції бойової роботи повинні бути виконані у відповідних просторово – часових зонах (ПЧЗ) (у певних точках ПЧЗ).

Відомі математичні моделі функціонування ЗРС, ЗРК при стрільбі по одиночній цілі [2 – 4] не враховують надійність засобів, вживаних на певному етапі бойової роботи, можливості оперативного персоналу, виникаючі резерви часу у разі безпомилкового виконання операцій високопідготовленим оперативним персоналом при безвідмовному функціонуванні бойових засобів, поглиннанні резерву часу у разі помилок оперативного персоналу і відмов пристроїв.

Мета статті. Розробка математичної моделі функціонування ЗРК, ЗРС при стрільбі по одиночній цілі, яка враховує всі перелічені вище особливості функціонування ЗРК, ЗРС при стрільбі по одиночній цілі.

Основна частина

При аналізі і проектуванні систем і процесів часто використовують мережеві моделі, які побудовані на основі представлення процесу функціонування систем у вигляді направлених мереж із заданими характеристиками. Це дає можливість отримувати логіко – математичний опис процесу і алгорит-

мізувати розрахунок його основних параметрів: тривалості, трудомісткості, вартості та ін. При побудові стохастичної мережі враховуються можливі альтернативні варіанти процесу виконання етапів (робіт, операцій), можливість досягнення кінцевої мети декілька відмінного змісту, ніж це було сплановано. Стохастичний мережевий граф є достатньо адекватною моделлю алгоритмічного процесу, що представляє розгорнену в часі логічну послідовність виконання операцій, виконання яких приводить до досягнення мети з можливим різним змістом.

Будь-який процес, який розглядається, поетапно з випадковими результатами на окремих етапах, може бути представлений деяким орієнтованим графом, тобто перерахуванням вершин графа – операцій, що підлягають виконанню, і вказівкою послідовності переходу від однієї операції, що означає завдання ребер графа і вибір напрямів на них.

Одна з вершин графа відповідає початку робіт, інша – закінченню. Тоді реалізація процесу відповідає блуканням по графові, ведучим з початку в кінець. При цьому деякі задані вершини графа можуть володіти такими властивостями, що затримують, а деякі поглинаючою властивістю. Поглинання траєкторій у вершинах відповідає вичерпанню деякого запасу ресурсів (засобів, часу, виробів і так далі). У кожній вершині графа з L виходами з неї, задаються вірогідністю P_1, \dots, P_L виходів по відповідних напрямках, так що

$$P_1 + P_1 + \dots + P_L = 1.$$

При цьому передбачається, що величини P_i залишаються постійними в перебігу всього часу процесу блукання, якщо тільки не зміниться сам граф у разі поглинання або умовної зміни ребер.

“Шляхом” називають будь-яку лінію, яка може бути проведена на графі від початкової вершини по напрямку, визначеному орієнтацією ребер графа і відповідно до умовного завдання ребер. “Траєкторією” називають будь-який шлях, що закінчується погли-

наючою вершиною або кінцевою (успішною). Виходячи з цього доцільно процес функціонування засобів ЗРК, ЗРК при стрільбі по одиночній цілі представити двовимірним графом станів і переходів.

Кожен стан ЗРК (ЗРС) і цілі у певний момент часу описуватимемо двовимірним вектором (X, Y): перша компонента характеризує стан обслуговування цілі ЗРК (ЗРС), друга – стан цілі. Стан обслуговування цілі бойовим розрахунком ЗРК (ЗРС), яке визначається об'ємом виконаних робіт, залежить від рівня підготовки розрахунку, технічного стану і безвідмовності бойових засобів, що беруть участь в бойовій роботі.

Стан цілі характеризується її перебуванням в певних зонах обслуговування (ЗО), які є складовими частинами просторово-часових зон. Зміна стану по одній компоненті X характеризується зміною стану обслуговування цілі, яке пов'язане із завершенням виконання певного етапу обслуговування цілі і переходом до наступного етапу.

Зміна стану по одній компоненті Y характеризується зміною стану цілі, пов'язане з переходом її з однієї зони обслуговування в іншу, при незмінному стані обслуговування цілі ЗРК (ЗРС) у випадку, наприклад, помилкових дій оператора.

Зміна стану системи по двох координатах характеризується переходом цілі з однієї зони обслуговування в іншу і переходом до виконання операцій наступного етапу обслуговування даної цілі.

На рис. 1 зображені просторово-часові зони, зони обслуговування і етапи бойової роботи ЗРК (зони виконання операцій певного етапу (ЗВ)) за умови, що цілі рухається прямолінійно і з постійною швидкістю. На рис. 2 зображений відповідний заданому процесу функціонування граф станів і переходів.

Як видно з рис. 2:

$$\begin{aligned} S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_{j+1} &= S_{I\hat{a}\zeta}; \\ S_2 \cup S_3 \cup \dots \cup S_{j+1} \cup S_{j+2} &= S_{II\hat{a}\zeta}; \\ &\vdots \\ S_{j+1} \cup S_{j+2} \cup S_{j+3} \cup \dots \cup S_n &= S_{N\hat{a}\zeta}; \\ S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_n &= \emptyset, \end{aligned} \quad (1)$$

де $S_1 \dots S_n$ – зони обслуговування; $S_{I\hat{a}\zeta} \dots S_{N\hat{a}\zeta}$ – просторово-часові зони.

При цьому:

$$\begin{aligned} L_1 &= V_0 \times T_{\hat{n}0_1}; \\ &\vdots \\ L_j &= V_0 \times T_{\hat{n}0_j}; \\ L_{j+2} &= V_0 \times T_{\hat{m}in_2}; \\ &\vdots \\ L_n &= V_0 \times T_{\hat{m}in_n}; \\ L_{j+1} &= L_n - (L_{j+2} + L_{j+3} + \dots + L_n) = \\ &= L_1 - (L_1 + L_2 + \dots + L_j), \end{aligned} \quad (2)$$

де T_{cp_i} – середній час виконання i-го етапу бойової роботи; T_{min_i} – мінімальний час виконання i-го етапу бойової роботи, при якому ще забезпечується (можливо) ураження цілі на ближній межі зони поразки; L_j – відстань, яку проходить цілі на певній висоті з постійною швидкістю, за час виконання i-го етапу бойової роботи (протяжність зон обслуговування); $L_1 \dots L_n$ – протяжність просторово-часових зон.

Моделювання процесу функціонування ЗРК проведемо в три етапи:

- формалізований опис досліджуваного процесу;
- виведення математичних моделей для оцінки його ефективності;

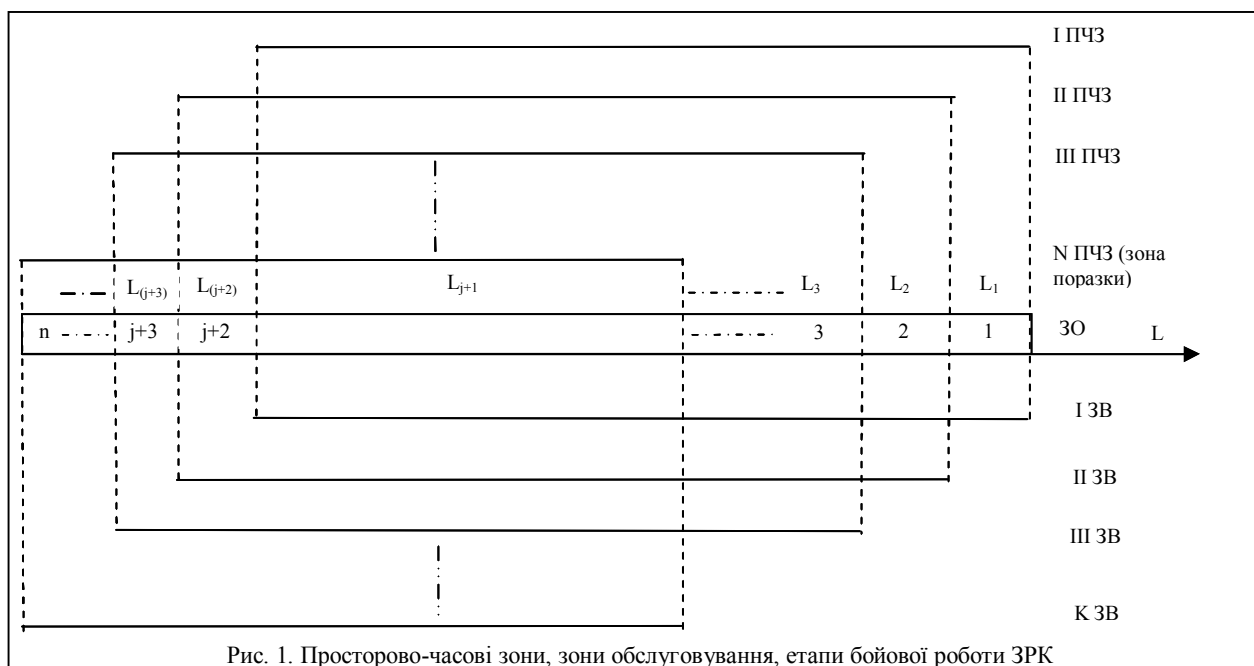
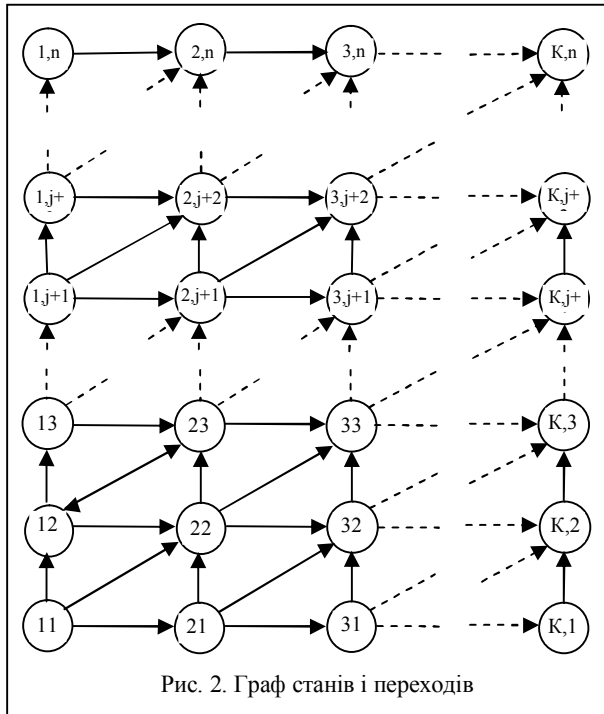


Рис. 1. Просторово-часові зони, зони обслуговування, етапи бойової роботи ЗРК



– оцінка ефективності даного процесу за вибраними показниками.

При формалізації процесу функціонування необхідно визначити основні етапи бойової роботи, їх взаємозв'язок і необхідні початкові дані.

При виконанні даного етапу можливі різні структурні реалізації в залежності від початкових даних. Окрім цього, при одному й тому ж структурному виді реалізації, у кожному конкретному випадку вони відрізняються результатом по успішності, часі.

Відмічене є наслідком стохастичного (імовірнісного) характеру досліджуваного процесу, внутрішня структура якого визначається послідовністю етапів (операцій) бойової роботи і імовірнісними характеристиками якості їх виконання. При певній постановці завдання зенітному ракетному дивізіону (знищення цілі на дальній межі зони поразки), в глибині зони поразки (до ближньої межі зони поразки, до певного рубежу) структура графа може змінюватися.

Розглянемо процес функціонування ЗРК, представлений у вигляді послідовності п'яти етапів бойової роботи:

- постановка завдання (видача цілевказівки) зенітному ракетному комплексу;
- пошук і захоплення цілі на супроводження;
- оцінка початкових даних і ухвалення рішення на обстріл цілі;
- пуск ракети (ракет);
- ураження цілі.

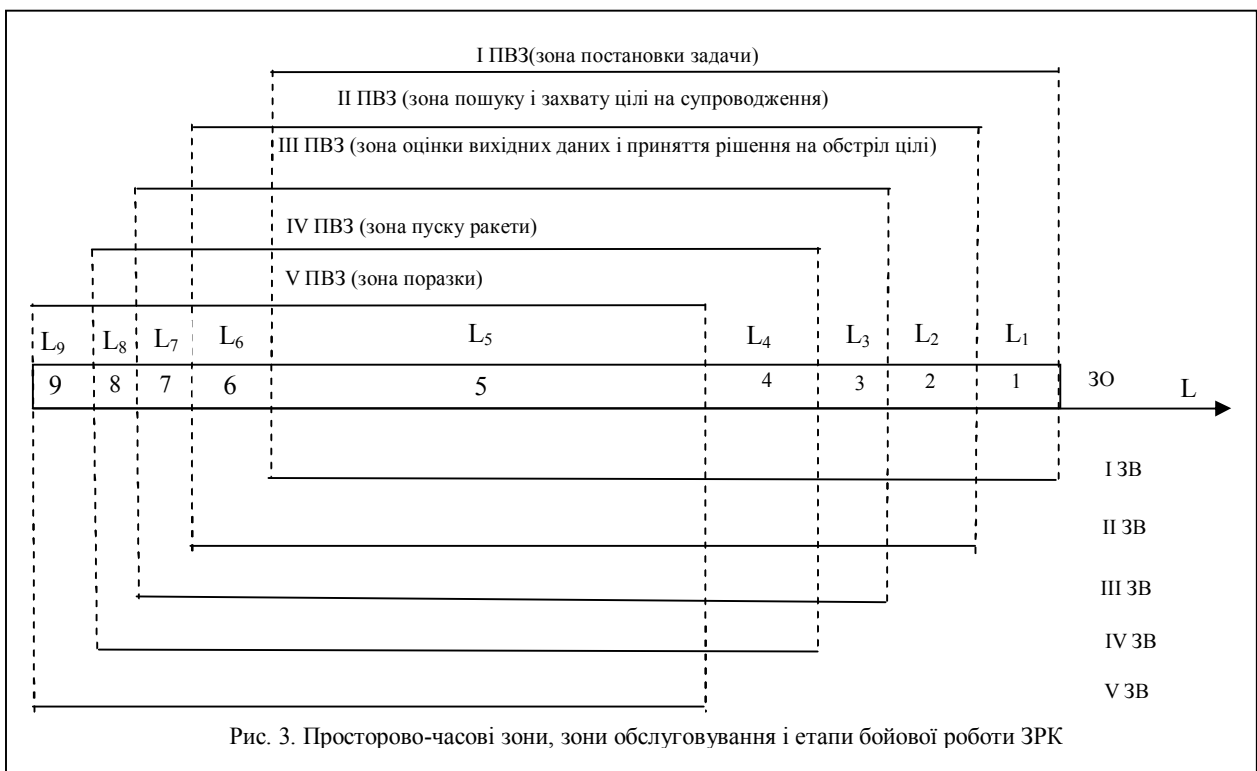
Порядок виконання і тривалість кожного з етапів залежить від умов стрільби (характеристик цілі, джерело цілевказівки).

На рис. 3 зображені просторово-часові зони, зони обслуговування і етапи бойової роботи ЗРК (зони виконання операцій певного етапу (ЗВ)) за даних умов.

На рис. 4 зображений відповідний заданому процесу функціонування граф станів і переходів.

Визначимо стани і переходи цього графа.

Стан $(i; j)$ означає, що i -й етап бойової роботи виконується в j -й зоні обслуговування при знахо-



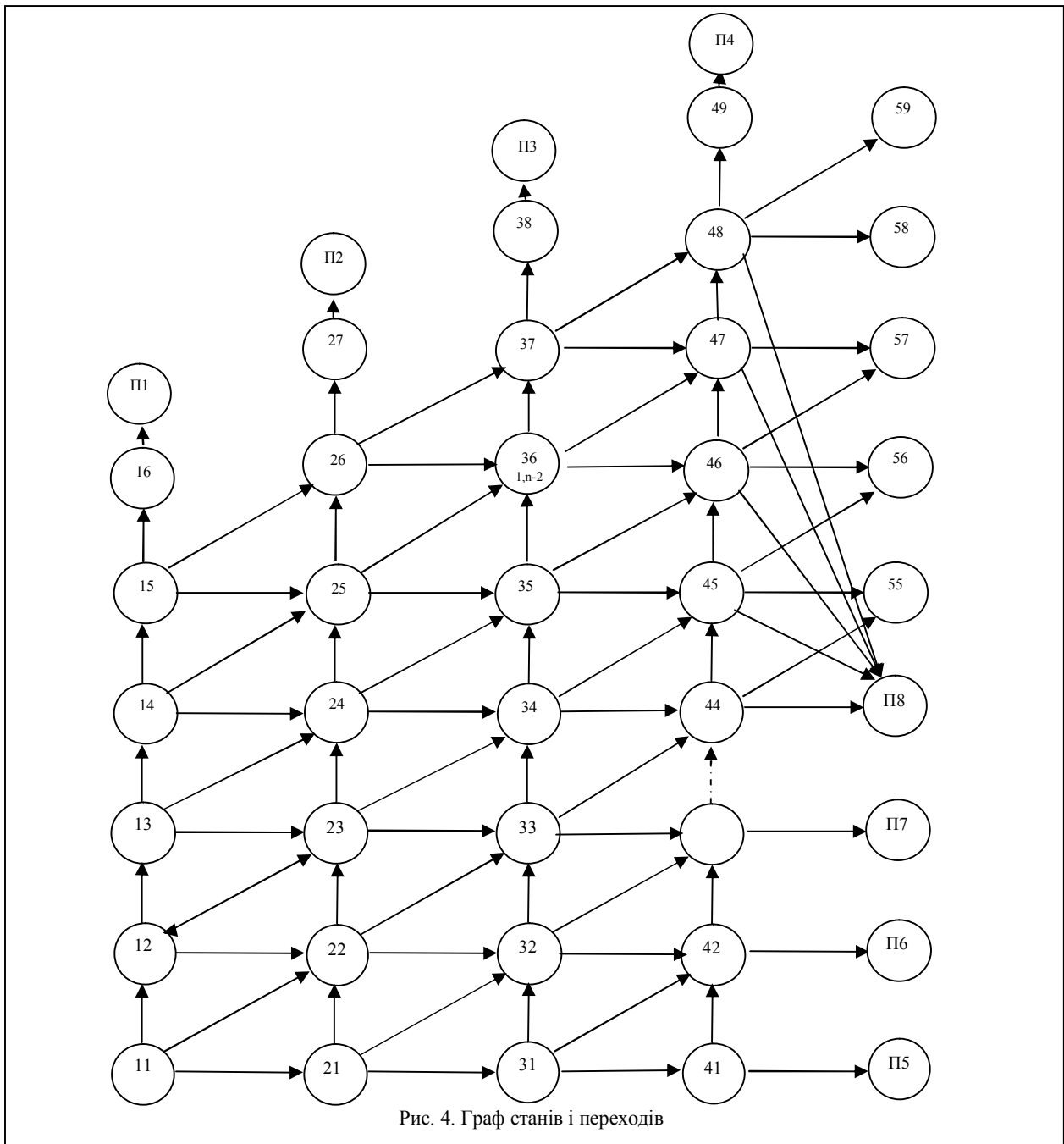


Рис. 4. Граф станів і переходів

дженні цілі в j -й зоні обслуговування. Перехід $(i; j) \rightarrow (i; j+1)$ означає, що i -й етап в j -й зоні обслуговування не виконаний і продовжує виконуватися в $j+1$ -й зоні обслуговування. Реалізація цього переходу відповідає процесу виконання операцій етапу за відповідну величину часового ресурсу, що розташовується, тобто поглинанню часового ресурсу і незавершенню операцій відповідного етапу. Переходи в стани П1, П2, П3, П4 відповідають повному витрачання часового ресурсу на обслуговування цілі та її неураження. Це відповідає низькому рівню підготовки бойового розрахунку, відмові (несправності) апаратури на відповідному етапі бойової роботи (до пускової фази). Так, стан П1 означає невиконання 1-го етапу бойової роботи (постановка

завдання ЗРК) за час прольоту ціллю послідовно з 1-ї по 5-у зони обслуговування.

Перехід $(i; j) \rightarrow (i+1; j)$ означає, що при знаходженні цілі в j -й зоні обслуговування завершилося виконання i -го етапу і почався виконуватися $i+1$ -й етап. Реалізація цього переходу відповідає передчасному виконанню бойовим розрахунком операцій етапу внаслідок високої підготовленості або ж внаслідок компенсації затримки в часі (поглинання часового ресурсу), отриману на попередніх етапах бойової роботи.

Стани (4;1), (4;2), (4;3), через які проходять шляхи $31 \rightarrow 41 \rightarrow 42 \rightarrow 43 \rightarrow 44$, $31 \rightarrow 42 \rightarrow 43 \rightarrow 44$ і так далі, можна назвати станами очікування, оскільки пуск ракети може бути проведений лише при вході цілі в IV-у зону обслуговування (зону пуску).

Природно, з'являється резервний (додатковий) час, який оперативний персонал використовує для уточнення повітряної обстановки, для захоплення на супроводження інших цілей у разі дії групи цілей, масованого нальоту засобів повітряного нападу противника.

Передчасне виконання пускової фази, тобто пуск ракети до входу цілі в зону пуску, приведе до невиконання бойового завдання. Ця ситуація відповідає переходу до поглинаючих вершин П5, П6, П7.

Поглинаюча вершина П8 означає неураження цілі внаслідок відмови (несправності) апаратури, задіяної в бойовій роботі з моменту пуску ракети.

Перехід $(i; j) \rightarrow (i+1; j+1)$ означає, що виконання операцій i -го етапу завершено в j -й зоні обслуговування і почато виконання $i+1$ -го етапу при вході цілі в $j+1$ -шу зону обслуговування. Цей перехід характеризується відсутністю поглинаючої властивості і відповідає виконанню етапів бойової роботи за середній час $T_{ср_i}$ (або визначений).

В даному випадку при постановці завдання по знищенню цілі на дальній межі зони поразки траєкторія $11 \rightarrow 22 \rightarrow 33 \rightarrow 44 \rightarrow 55$ є успішною з погляду відсутності поглинання ресурсу (якості і своєчасності). Разом з тим дана траєкторія не припускає появи раніше вказаного резерву часу. Розроблений вище типовий граф зручний для уявлення і аналізу суті досліджуваного процесу.

Для підготовки до виводу математичних моделей за оцінкою якості рішення задачі необхідно перейти до ймовірнісного графа подій. При необхідності його можна деталізувати, а в інших випадках, коли вірогідності подій малі або фізично не реалізуються, спростити. Траєкторій, що ведуть до кожної з кінцевих вершин (успішної та неуспішної), кілька. Тому для обчислення ймовірності визначеної події необхідно скласти ймовірності реалізацій кожної траєкторії, які закінчуються цією подією. Ймовірність реалізації окремої траєкторії дорівнює

помноженню ймовірностей переходів від початку до кінця цієї траєкторії. При цьому ймовірність переходів залежить від рівня підготовки оперативного персоналу, а також технічного стану засобів, які застосовуються на даному етапі бойової роботи.

Якщо при розрахунках, ймовірності переходів приймуть величину, яка менше від заданої, то такими переходами можна знехтувати і не враховувати їх при обчислюванні ймовірностей кінцевих подій.

Висновок

Запропоноване представлення процесу функціонування ЗРК надає можливість при різноманітних вихідних даних аналітично досліджувати вплив на ефективність застосування ЗРК таких факторів, як характеристики (можливості) оперативного персоналу, надійність засобів, які приймають участь у визначеному етапі застосування ЗРК. При цьому задачі дослідження визначають міру деталізації етапів бойової роботи ЗРК.

Список літератури

1. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенітними ракетами / Ф.К. Неупокоев. – М.: Воениздат, 1980. – 104 с.
2. Ковтуненко А.П. Основы теории построения и моделирования функционирования сложных систем вооружения (системы зенитного управляемого ракетного оружия) / А.П. Ковтуненко, Н.А. Шершнев. – Х.: ВИРТА, 1992. – 233 с.
3. Петухов С.И. Эффективность ракетных средств ПВО / С.И. Петухов, А.Н. Степанов. – М.: Воениздат, 1976. – 104 с.
4. Раскин Л.Г. Математические методы исследования операций и анализа сложных систем вооружения ПВО. Математическое моделирование функционирования сложных систем / Л.Г. Раскин. – Х.: ВИРТА, 1988. – 177 с.

Надійшла до редколегії 14.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, ст. наук. співр. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА (СИСТЕМЫ) ПРИ СТРЕЛЬБЕ ПО ОДИНОЧНОЙ ЦЕЛИ

С.Н. Донцов, В.В. Лук'янчук, Д.В. Фоменко

Рассматривается аналитическая модель функционирования зенитного ракетного комплекса (зенитной ракетной системы) при стрельбе по одиночной цели (первая ситуация применения зенитных ракетных войск). Предложенная аналитическая модель, в отличие от известных, учитывает надежность применяемых средств, возможности оперативного персонала по ведению боевой работы, резервы времени и поглощение резерва времени и предоставляет возможность при разнообразных исходных данных аналитически исследовать влияние этих факторов на эффективность применения зенитного ракетного комплекса (зенитной ракетной системы).

Ключевые слова: модель функционирования, граф состояний и переходов, надежность, оперативный персонал.

ANALYTICAL MODEL OF AIR DEFENSE MISSILE COMPLEX (SYSTEM) FUNCTIONING DURING FIRING ON SINGLE AIR TARGET

S.N. Dontsov, V.V. Lukjanchuk, D.V. Fomenko

The analytical model of functioning of air defense missile complex (of air defense missile system) is examined at firing on a single air target (first situation of application of of air defense missile forces). The offered analytical model, unlike known, reliability of the applied facilities, possibilities of operative personnel on the conduct of battle work, float times and absorption of float time, takes into account and gives possibility at various basic data analytically to probe influence of these factors on efficiency of application of air defense missile complex (of air defense missile system).

Keywords: model of functioning, count of the states and transitions, reliability, operative personnel.