

УДК 681.5.03.033

В.А. Васильєв, І.І. Сачук, О.О. Сосунов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## УТОЧНЕНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ РАДІОТЕХНІЧНОЇ СЛІДКУЮЧОЇ СИСТЕМИ ЗЕНІТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСУ

*Обґрунтування вимог до показників якості радіотехнічних слідкуючих систем на підставі припустимого зменшення потенційних показників вогневих можливостей є важливою практичною задачею. У роботі уточнена двофазна марківська модель масового обслуговування для обґрунтування вимог до показника якості радіотехнічної слідкуючої системи зенітного ракетного комплексу – імовірності стійкого супроводження, яка на відміну від існуючої моделі враховує залежність середнього часу пошуку та захоплення від кількості вільних каналів другої фази.*

**Ключові слова:** слідкуюча система, зенітний ракетний комплекс, імовірність стійкого супроводження.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У цей час основу вогневої потужності протиповітряної оборони становлять зенітні ракетні війська, що мають на озброєнні зенітні ракетні системи (ЗРС) середньої дальності. Незважаючи на те, що вони прийняті на озброєння у 70 – 80 роки минулого століття, закладені в них інженерні рішення дозволяють цим системам залишатися найважливішим вогневим засобом Повітряних Сил. Однак для успішної експлуатації та бойового застосування зазначених ЗРС у сучасних умовах потрібна їх модернізація, одним із перспективних шляхів якої є вдосконалення радіотехнічних слідкуючих систем зенітних ракетних комплексів (ЗРК), що дозволяє або підвищити точність супроводження цілей або підвищити стійкість супроводження (імовірність супроводження без зриву на етапі наведення зенітних керованих ракет) [1, 2].

**Аналіз літератури.** У роботі [2] для кількісного порівняння різних варіантів побудови радіотехнічних слідкуючих систем ЗРК запропонований показник якості – імовірність стійкого супроводження  $p_n$ . Цей показник [2] фізично являє собою ймовірність знаходження похибки до наступного радіоконтакту з ціллю в межах апертури еквівалентної характеристики дискримінатора, що уведена у [2] та відповідає дійсним дискримінаційним характеристикам систем супроводження ЗРК.

Імовірність стійкого супроводження дозволяє порівнювати якість функціонування різних варіантів слідкуючих систем, однак не менш важливим завданням є обґрунтування вимог до цього показника.

Виходячи із призначення ЗРК, найбільш важливою є задача оцінки впливу показника  $p_n$  на вогневі можливості зенітного ракетного дивізіону (зрдн), на озброєнні якого є багатоканальний ЗРК із часовим розподілом каналів (БК ЗРК ЧР). У [3] для обґрунтування вимог до показника  $p_n$  запропонована двофазна марківська модель масового обслуговування, однак у ній середній час пошуку й захопту

цілі на супроводження передбачався незалежним від кількості вільних каналів другої фази, що для БК ЗРК ЧР не відповідає дійсності.

**Ціль статті** – урахування у двофазній марківської моделі масового обслуговування, що запропонована у роботі [3], залежності середнього часу пошуку та захопту цілі на супроводження від кількості вільних каналів другої фази.

### Основна частина

**Вихідна модель та її уточнення.** Згідно з [4] узагальненим показником вогневих можливостей зрдн прийнято вважати математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу за удар заданої тривалості  $R_0$  або при вичерпанні певної кількості ракет, а частковими показниками – кількістю стрільб до заданого рубежу, щільність вогню на заданому рубежі, середню ефективність стрільб.

У двофазній марківській моделі зрдн, що запропонована у [3], перша одноканальна фаза реалізує етап пошуку та захопту цілі на супроводження, а друга многоканальна (по кількості цільових каналів) фаза реалізує етап обстрілу й аналізу результатів стрільби. Як узагальнений показник вогневих можливостей зрдн розглядається показник  $R_0$ , нормований до загальної кількості засобів повітряного нападу. Причому оскільки у моделі масового обслуговування не ураховується вогнева протидія засобів повітряного нападу, вона дозволяє оцінити вплив імовірності стійкого супроводження тільки на потенційний (максимально досяжний) узагальнений показник вогневих можливостей.

У вихідній моделі визначені стани  $S_{ij}$ , де  $i$  – кількість цілей на етапі пошуку та захопту (на першій фазі обслуговування);  $j$  – кількість цілей на етапі обстрілу та аналізу результатів стрільб (на другій фазі обслуговування). Відповідні інтенсивності вхідного потоку цілей, обслуговування на першій фазі, обслуговування на другій фазі та зриву супрово-

дження позначені як  $\lambda$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_0$ , причому інтенсивність пошуку й захвату  $\mu_1$  від кількості цілей на другій фазі вважалася незалежною.

В уточненій моделі збережемо всі допущення роботи [3], крім одного – інтенсивність пошуку й захвату цілей буде залежати від кількості цілей на етапі обстрілу та аналізу результатів стрільб  $\mu_1 = \mu_{1j}$ , тобто буде функцією другого індексу стану  $S_{ij}$ . Тоді граф переходів для уточненої двофазної марківської моделі із шістьма цільовими каналами буде мати вигляд, що наведений на рис. 1.

Як у [3] по складеному графу переходів записується система диференціальних рівнянь для ймовірностей станів. Для знаходження фінальних ймовірностей станів необхідно дорівняти нулю похідні. При цьому ранг системи буде на одиницю менше кількості рівнянь. Тому одне з рівнянь системи можна виключити з розгляду та доповнити систему рівнянням нормировки.

Остаточна система рівнянь для знаходження фінальних ймовірностей має такий вигляд

$$\begin{cases} 0 = \mu_2 P_{01} - \lambda P_{00}; \\ 0 = \lambda P_{00} + \mu_0 P_{01} + (\mu_0 + \mu_2) P_{11} - \mu_{10} P_{10}; \\ 0 = \mu_{10} P_{10} + 2\mu_2 P_{02} - (\mu_0 + \mu_2 + \lambda) P_{01}; \\ 0 = \lambda P_{01} + 2\mu_0 P_{02} + (2\mu_0 + 2\mu_2) P_{12} - \\ - (\mu_0 + \mu_2 + \mu_{11}) P_{11}; \\ 0 = \mu_{11} P_{11} + 3\mu_2 P_{03} - (2\mu_0 + 2\mu_2 + \lambda) P_{02}; \\ 0 = \lambda P_{02} + 3\mu_0 P_{03} + (3\mu_0 + 3\mu_2) P_{13} - \\ - (2\mu_0 + 2\mu_2 + \mu_{12}) P_{12}; \\ 0 = \mu_{12} P_{12} + 4\mu_2 P_{04} - (3\mu_0 + 3\mu_2 + \lambda) P_{03}; \\ 0 = \lambda P_{03} + 4\mu_0 P_{04} + (4\mu_0 + 4\mu_2) P_{14} - \\ - (3\mu_0 + 3\mu_2 + \mu_{13}) P_{13}; \\ 0 = \mu_{13} P_{13} + 5\mu_2 P_{05} - (4\mu_0 + 4\mu_2 + \lambda) P_{04}; \\ 0 = \lambda P_{04} + 5\mu_0 P_{05} + (5\mu_0 + 5\mu_2) P_{15} - \\ - (4\mu_0 + 4\mu_2 + \mu_{14}) P_{14}; \\ 0 = \mu_{14} P_{14} + 6\mu_2 P_{06} - (5\mu_0 + 5\mu_2 + \lambda) P_{05}; \\ 0 = \lambda P_{05} + 6\mu_0 P_{06} - (5\mu_0 + 5\mu_2 + \mu_{15}) P_{15}; \\ 1 = P_{00} + P_{10} + P_{01} + P_{11} + P_{02} + P_{12} + P_{03} + \\ + P_{13} + P_{04} + P_{14} + P_{05} + P_{15} + P_{06}. \end{cases} \quad (1)$$

При наявності цілей на етапі обстрілу кількість каналних інтервалів, які виділяються для пошуку та захвату цілей, зменшується пропорційно кількості цілей на етапі обстрілу. Тому інтенсивність пошуку та захвату  $\mu_{1j}$  можна оцінити відповідно до виразу

$$\mu_{1j} = \mu_{10} (1 - j/6), \quad 0 < j < 6. \quad (2)$$

**Порівняльне використання моделей.** Згідно методики, що викладена у [3], розраховані залежності нормованого показника  $R_0$  від середнього часу до

зриву супроводження  $\bar{t}_{зр}$ , які наведені на рис. 2 (суцільна лінія для вихідної моделі, пунктирна лінія для уточненої моделі). Допускаючи десятивідсоткове зниження потенційного значення (максимально досяжного при відсутності зриву супроводження та вогневої протидії) узагальненого показника вогневих можливостей зрдн (штрих пунктирна лінія рис. 2) може бути знайдений мінімально припустимий час до зриву супроводження  $\bar{t}_{зр\min}$ , при якому узагальнений показник, що розраховується з урахуванням зриву супроводження, не знижується нижче 10 % від максимального (потенційного) значення, що розраховується при відсутності зриву супроводження.

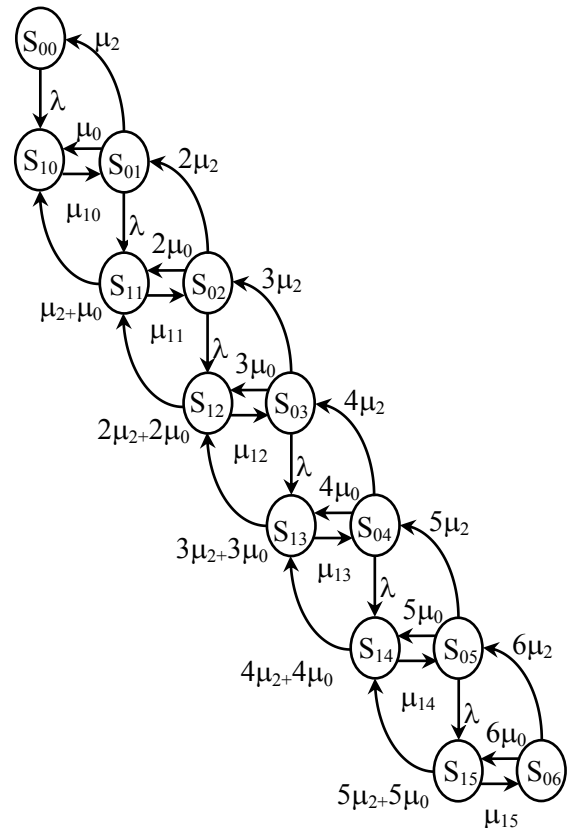


Рис. 1. Граф переходів уточненої двофазної марківської моделі

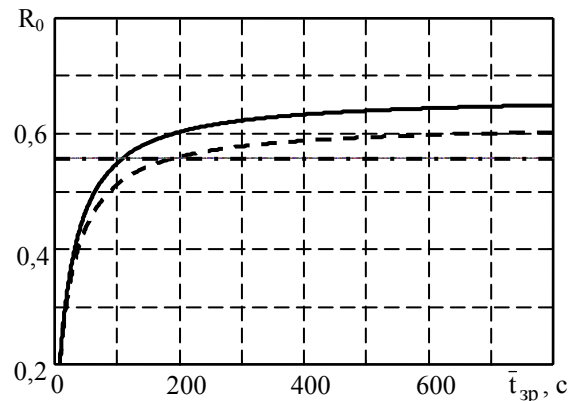


Рис. 2. Залежність узагальненого показника вогневих можливостей зрдн від середнього часу до зриву супроводження

При розрахунках були використані такі вихідні дані: середній час між цілевказівками  $\bar{t}_{цв} = 20$  с, середній час пошуку й захвату цілі при відсутності цілей на етапі обстрілу  $\bar{t}_{пз} = 1/\mu_{10} = 10$  с, середній час етапу обстрілу цілей й аналізу результатів стрільб  $\bar{t}_{соп} = 40$  с, період звертань до цілі  $T = 0,1$  с. Такий вибір вихідних даних обумовлений з однієї сторони їх типовими значеннями, а з іншого боку – можливістю провести порівняльний аналіз результатів, отриманих на основі вихідної моделі [5, 6] і запропонованої уточненої моделі.

Відповідно до рис. 2 вихідна модель дає занижене майже у два рази значення середнього часу до зриву супроводження  $\bar{t}_{зр}$ . При перерахуванні у імовірність стійкого супроводження  $p_n$  згідно з виразом [3]:

$$p_i = 1 - T/\bar{t}_{зр} \quad (3)$$

різниця виходить у другому знаку після коми. Проте, навіть така мала різниця показника  $p_n$  призводить до досить значних відмінностей в узагальненому показнику вогневих можливостей  $R_0$  (рис. 2), що також підтверджується в інших роботах [7, 8].

### Висновок

У статті уточнена вихідна двофазна марківська модель зрдн, на озброєнні якого є БК ЗРК ЧР, для обґрунтування вимог до показника якості радіотехнічної слідкуючої системи ЗРК (імовірності стійкого супроводження  $p_n$ ), виходячи із припустимого зниження потенційно можливої кількості знищених цілей. Крім цього, показано, що вихідна модель дає завищене на 10% значення узагальненого показника вогневих можливостей зрдн і, відповідно, занижене значення середнього часу до зриву супроводження, що призводить до необґрунтованого вибору параметрів слідкуючої системи.

### Список літератури

1. Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Многоальтернативные алгоритмы слежения за маневрирующим объектом // 36. науч. пр. ХВУ. – 2001. – Вып. 4 (34). – С. 92-95.
2. Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Оценка вероятности надежного сопровождения аэродинамических целей многоканальной радиолокационной станцией // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2001. – Вып. 22. – С. 24-28.
3. Кулинич И.А., Парфенов Ю.Э., Сосунов А.А. Модель для обоснования требований к показателю качества радиотехнической следящей системы // Системы обработки информации. – 2003. – Вып. 5. – С. 145-150.
4. Справочник офицера противовоздушной обороны / Под ред. Г.В. Зимины и С.К. Бурмистрова – М.: Воениздат, 1987. – 511 с.
5. Ковальчук А.А., Сосунов А.А., Хисматулин В.Ш. Оценка влияния отношения сигнал/шум на пропускную способность многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой при использовании квазинепрерывного сигнала // Системы обработки информации. – 2004. – Вып. 4. – С. 94-99.
6. Ковальчук А.А., Сачук И.И., Сосунов А.А. Оценка потенциальной пропускной способности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой для подсистемы автосопровождения по дальности // Системы обработки информации. – 2005. – Вып. 2. – С. 48-52.
7. Ковальчук А.А., Сачук И.И., Сосунов А.А. Оценка потенциальной пропускной способности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой для подсистемы автосопровождения по угловой координате // Системы обработки информации. – 2005. – Вып. 5. – С. 35-37.
8. Васильев В.А., Ковальчук А.А., Сосунов А.А. Сравнительная оценка показателя качества подсистем автосопровождения по радиальной скорости и дальности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой // Радиотехника. – Х.: ХНУРЕ. – 2007. – Вып. 147. – С. 5-8.

Надійшла до редколегії 26.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.В. Баранник, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кождуба, Харків.

### УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

В.А. Васильев, И.И. Сачук, А.А. Сосунов

Обоснование требований к показателям качества радиотехнических следящих систем на основании допустимого уменьшения потенциальных показателей огневых возможностей является важной практической задачей. В работе уточнена двухфазная марковская модель массового обслуживания для обоснования требований к показателю качества радиотехнической следящей системы зенитного ракетного комплекса – вероятности стойкого сопровождения, которая в отличие от существующей модели учитывает зависимость среднего времени поиска и увлечения от количества свободных каналов второй фазы.

**Ключевые слова:** следящая система, зенитный ракетный комплекс, вероятность стойкого сопровождения.

### MODEL IS SPECIFIED FOR GROUND OF REQUIREMENTS TO INDEX OF QUALITY OF RADIO ENGINEERING TRACKER SYSTEM OF ZENITHAL ROCKET COMPLEX

V.A. Vasil'ev, I.I. Sachuk, A.A. Sosunov

A ground of requirements to the indexes of quality of the radio engineering's tracker systems on the basis of the possible diminishing of potential indexes of fire possibilities is an important practical task. The diphase markovian model of mass service is in-process specified for the ground of requirements to the index of quality of the radio engineering tracker system of zenithal rocket complex – probability of proof accompaniment, which unlike an existent model takes into account dependence of mean time of search and fascination from the amount of the free ductings of the second phase.

**Keywords:** tracker system, zenithal rocket complex, probability of proof accompaniment.