

УДК: 623.4

DOI: 10.53816/20753608_2022_2_110

**МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ (СРЕДСТВОМ) РЭБ
ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ**

**CONTROL METHOD FOR COMPLEX (MEANS) OF ELECTRONIC WARFARE
FOR INDIVIDUAL PROTECTION FROM HIGH-PRECISION WEAPON**

По представлению академика РАН Г.А. Лавринова

О.Н. Неплюев

ЦНИИ ВКС МО РФ

O.N. Neplyuev

Предлагается метод управления комплексом (средством радиоэлектронной борьбы (РЭБ) индивидуальной защиты объектов от групповой атаки управляемых авиационных средств поражения класса «воздух–поверхность» с высокоточными системами наведения. Применение метода обеспечивает максимальную эффективность боевого применения комплекса (средства) РЭБ индивидуальной защиты объектов за счет определения оптимальных управляющих параметров в зависимости от складывающихся условий функционирования. При этом учитывается возможность постановки различных видов помех.

Ключевые слова: высокоточное оружие, средство поражения, комплекс (средство) РЭБ индивидуальной защиты.

Control method of the complex (means) of the electronic warfare for individual protection object from group attack of controlled aviation means for destruction of class “air — ground” with high-precision guidance systems is proposed. The use of the method ensures maximum effectiveness of the combat use of the complex (means) electronic warfare of individual protection of objects by determining the optimal control parameters depending on the prevailing operating conditions. At the same time, the possibility of setting various types of interference is taken into account.

Keywords: high-precision weapon, means for destruction, complex (means) of the electronic warfare for individual protection.

Преимущество в современных военных конфликтах достигается и будет достигаться в будущем за счет использования в составе пилотируемых и беспилотных ударных боевых авиационных комплексов (УБАК) управляемых авиационных средств поражения (СП) класса «воздух–поверхность» с высокоточными системами наведения — высокоточного оружия (ВТО) [1, 2].

В соответствии с [3–5] ВТО объединяет средства исполнительной разведки (средства

прицеливания, сопровождения) и высокоточные СП, которые обеспечивают поражение цели с вероятностью 0,7–0,8 и выше за один акт применения ВТО.

Активное и результативное применение ВТО в Сирии и Ливии, а затем — и в Нагорном Карабахе неопровержимо свидетельствует, что ВТО в военных конфликтах стало неотъемлемым и эффективным средством боевого применения. При этом изменяется тактика применения ВТО — все чаще вместо одиночных ударных

или барражирующих боеприпасов используются эшелонированные порядки УБАК (в т.ч. «рои» беспилотных УБАК), осуществляющие групповую атаку объекта высокоточными СП [6].

В этих условиях задача защиты объектов от ВТО существенно усложняется.

Одним из путей повышения эффективности защиты объектов от ВТО является применение комплекса (средства) радиоэлектронной борьбы индивидуальной защиты объектов (КСИЗ РЭБ). В состав КСИЗ РЭБ могут входить средства (модули) постановки помех различного диапазона длин волн, применение которых обеспечивает срыв наведения атакующих элементов ВТО на прикрываемый объект и увеличение промаха СП по нему [5].

В условиях групповой атаки ВТО, из-за ограничений на ресурсы, КСИЗ РЭБ не способны воздействовать на все атакующие средства ВТО одновременно. Оптимальное распределение пространственно-временных ресурсов КСИЗ РЭБ по атакующим средствам ВТО при изменяющейся обстановке в заданном временном цикле является задачей управления КСИЗ РЭБ. При этом управление КСИЗ РЭБ направлено на максимизацию эффективности его функционирования за счет нахождения оптимальных управляющих параметров в зависимости от складывающихся условий функционирования в каждом цикле управления.

Цель работы — разработать метод управления комплексами (средствами) РЭБ индивидуальной защиты объектов от групповой атаки ВТО, обеспечивающий максимальную эффективность боевого применения КСИЗ РЭБ за счет

определения оптимальных управляющих параметров.

Исходя из приведенного определения, критерием высокоточного СП является высокое значение вероятности поражения объекта $P_{\text{пор}}$, которая может определяться как вероятность попадания СП в приведенную зону поражения (ПЗП) объекта [3, 7, 8]. Размеры ПЗП рассчитываются из условия, что попадание СП в ПЗП приводит к поражению объекта с заданной вероятностью. ПЗП объекта может представляться прямоугольником со сторонами $[x_1^{\text{пзп}}, x_2^{\text{пзп}}]$, $[y_1^{\text{пзп}}, y_2^{\text{пзп}}]$, параллельными главным осям рассеивания, с центром в месте расположения объекта (рис. 1).

В теории стрельбы установлено, что процесс рассеивания СП, т.е. закон распределения случайных координат точек падения, на основании центральной предельной теоремы Ляпунова, соответствует нормальному закону (закону Гаусса) [5]. При условии, что рассеивание СП по координатам x и y является нормальным с среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_x и σ_y , вероятность попадания СП в ПЗП (в интервалы $[x_1^{\text{пзп}}, x_2^{\text{пзп}}]$, $[y_1^{\text{пзп}}, y_2^{\text{пзп}}]$) равна

$$P_{\text{пор}} = \int_{x_1^{\text{пзп}}}^{x_2^{\text{пзп}}} \int_{y_1^{\text{пзп}}}^{y_2^{\text{пзп}}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_{\text{пад}})^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_{\text{пад}})^2}{\sigma_y^2}\right]} dx dy, \quad (1)$$

где $x_{\text{пад}}$, $y_{\text{пад}}$ — координаты точки падения (подрыва) высокоточного СП.

С применением функции стандартного нормального распределения Φ^* вероятность (1) можно определить как [9]:

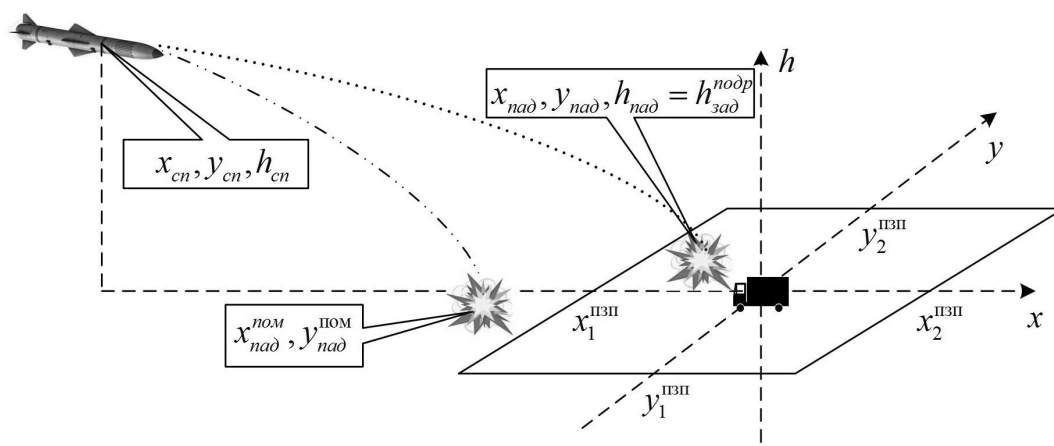


Рис. 1. Приведенная зона поражения объекта

$$P_{\text{пор}} = \left[\Phi^* \left(\frac{x_2^{\text{пзп}} - x_{\text{пад}}}{\sigma_x} \right) - \Phi^* \left(\frac{x_1^{\text{пзп}} - x_{\text{пад}}}{\sigma_x} \right) \right] \times \left[\Phi^* \left(\frac{y_2^{\text{пзп}} - y_{\text{пад}}}{\sigma_y} \right) - \Phi^* \left(\frac{y_1^{\text{пзп}} - y_{\text{пад}}}{\sigma_y} \right) \right]. \quad (2)$$

Координаты точки падения $x_{\text{пад}}, y_{\text{пад}}$ определяются из условия достижения СП высоты срабатывания взрывателя (его подрыва): $h_{\text{сп}} = h_{\text{пад}} = h_{\text{зад}}^{\text{подр}}$ (рис. 1). В частном случае наличия у СП контактного взрывателя может быть принято $h_{\text{зад}}^{\text{подр}} \approx 0$.

Для определения координат точки падения СП $x_{\text{пад}}, y_{\text{пад}}$ могут применяться методы экстраполяции данных, получаемых измерителем пространственных координат СП [5, 10–13]. Время экстраполяции t_3 выбирается исходя из условия $h_{\text{сп}}(t_3) = h_{\text{зад}}^{\text{подр}}$. Соответственно $x_{\text{пад}} = x_{\text{сп}}(t_3)$, $y_{\text{пад}} = y_{\text{сп}}(t_3)$.

Показателями качества методов экстраполяции являются значения СКО σ_x, σ_y ошибок экстраполяции продольной и поперечной координат точки падения СП. На рис. 2 приведены зависимости СКО ошибки полиномиальной экстраполяции продольной координаты точки падения СП σ_{x_3} от времени до встречи с целью t_d , полученные с использованием имитационной модели [12] для значений степеней интерполяционных полиномов $K^h = 3$, $K^{xy} = 2$ и размеров «скользящих» временных отрезков $\Delta t^{x,y} = 5$ с и $\Delta t^h = 5; 6; 7; 8; 9$ с, соответствующие кривым 1–5.

Анализ зависимостей, приведённых на рис. 2, показывает, что СКО ошибки экстраполя-

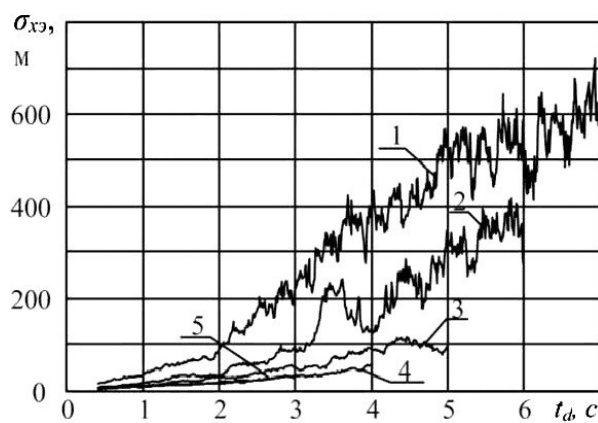


Рис. 2. Зависимости СКО ошибки полиномиальной экстраполяции продольной координаты точки падения СП от времени до встречи с целью

ции координат точки падения СП увеличиваются с ростом времени до встречи с целью (дальности до нее) и могут составлять 100–600 м. По мере накопления данных, получаемых измерителем пространственных координат, СКО ошибки экстраполяции снижается.

С учетом зависимости СКО ошибки экстраполяции координат точки падения СП от времени до встречи с целью и с использованием (2) построены зависимости вероятности поражения объекта от времени до встречи с целью для различных вариантов значений координат точки падения СП (рис. 3). На рис. 3 сплошным линиям соответствует случай, когда координаты точки падения СП принадлежат ПЗП, пунктирным — не принадлежат.

Помеховое воздействие КСИЗ РЭБ на систему наведения ВТО приводит к увеличению промаха СП по прикрываемому объекту и соответствующему изменению координат точки падения высокоточного СП $\{x_{\text{пад}}, y_{\text{пад}}\} \rightarrow \{x_{\text{пад}}^{\text{пом}}, y_{\text{пад}}^{\text{пом}}\}$ (рис. 1). Значение промаха СП зависит от времени начала T_b и длительности τ_b помехового воздействия на систему наведения ВТО [5].

Штрихпунктирной линией показана зависимость снижения вероятности поражения объекта $\Delta P_{\text{пор}} = P_{\text{пор}}(x_{\text{пад}}, y_{\text{пад}}) - P_{\text{пор}}(x_{\text{пад}}^{\text{пом}}, y_{\text{пад}}^{\text{пом}})$ в условиях помех от времени до встречи СП с целью. Как видно на рис. 4, существует время до встречи СП с целью ($t_d = 4$ с), для которого $\Delta P_{\text{пор}}$ принимает максимальное значение. Для заданных условий данное время является оптимальным временем начала постановки помех T_b определенной длительности τ_b .

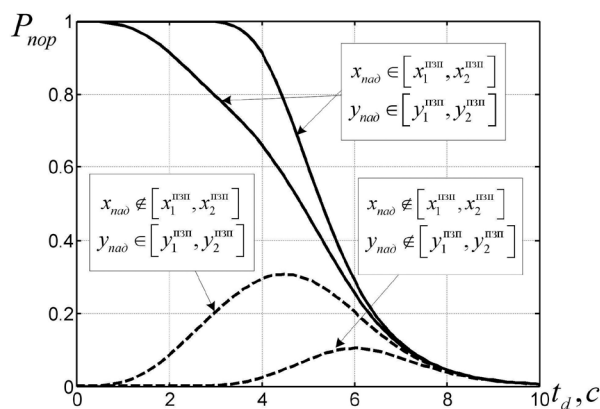


Рис. 3. Зависимости вероятности поражения объекта от времени до встречи СП с целью

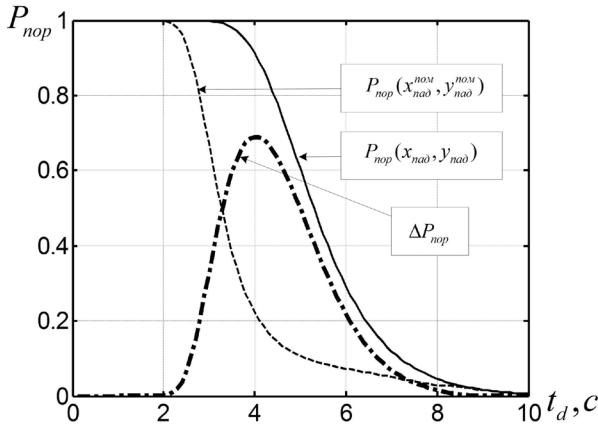


Рис. 4. Зависимости вероятности поражения объекта от времени до встречи СП с целью в условиях помех

Таким образом, в качестве показателя эффективности КСИЗ РЭБ целесообразно применить снижение вероятности поражения объекта при постановке помех $\Delta P_{\text{пор}} = f(T_{\text{в}}, \tau_{\text{в}})$.

При групповой атаке объекта прикрытия КСИЗ РЭБ должен обеспечить снижение вероятности поражения объекта каждым из атакующих СП. Показатель эффективности КСИЗ РЭБ в этом случае может определяться выражением:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_K(T_{\text{в}}, \Theta_{\text{в}}) &= \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{пор}i}(T_{\text{в}i}, \tau_{\text{в}i}), \\ T_{\text{в}i} &\in T_{\text{в}}, \tau_{\text{в}i} \in \Theta_{\text{в}}, \\ i &= \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (3)$$

где N — количество СП, участвующих в групповой атаке объекта; $T_{\text{в}i}$ и $\tau_{\text{в}i}$ — время начала постановки и длительность помех i -му СП.

Как следствие, управление КСИЗ РЭБ должно быть направлено на максимизацию показателя (3) за счет нахождения оптимальных управляющих параметров $T_{\text{в}}, \Theta_{\text{в}}$:

$$\begin{aligned} \langle T_{\text{в}}^*, \Theta_{\text{в}}^* \rangle &= \arg \max_{T_{\text{в}}, \Theta_{\text{в}}} \mathcal{E}_K(T_{\text{в}}, \Theta_{\text{в}}) = \\ &= \arg \max_{T_{\text{в}}, \tau_{\text{в}i}} \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{пор}i}(T_{\text{в}}, \tau_{\text{в}i}); \\ T_{\text{в}i} &\in T_{\text{в}}, \tau_{\text{в}i} \in \Theta_{\text{в}}. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом, помеховое воздействие длительности $\tau_{\text{в}i}$ должно обеспечиваться за время наведе-

дения i -го СП на объект $T_{\text{н}i}$, которое определяется по результатам экстраполяции координат точки падения СП исходя из условия $h_{\text{сп}i}(t_{\text{э}i}) = h_{\text{зад}}^{\text{подр}}$:

$$T_{\text{н}i} \geq \tau_{\text{в}i}, \quad T_{\text{н}i} = t_{\text{э}i} \mid h_{\text{сп}i}(t_{\text{э}i}) = h_{\text{зад}}^{\text{подр}}, \quad (5)$$

а время начала постановки помех i -му СП должно соответствовать условию:

$$T_{\text{в}i} \leq (T_{\text{н}i} - \tau_{\text{в}i}), \quad \forall i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Невозможность КСИЗ РЭБ воздействовать на все атакующие СП одновременно обуславливает следующее ограничение:

$$\begin{aligned} T_{\text{в}i} < T_{\text{в}j} &\Rightarrow T_{\text{в}i} + T_{\text{ин}i} \leq T_{\text{в}j}, \\ \forall i \neq j, i &= \overline{1, N}, j = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $T_{\text{ин}i}$ — время, затрачиваемое КСИЗ РЭБ на осуществление помехового воздействия по i -му СП.

По эффекту воздействия помехи КСИЗ РЭБ подразделяются на помехи с последствием и помехи без последствия [5]. Следовательно:

$$\begin{aligned} T_{\text{ин}i} &= \begin{cases} \tau_{\text{в}i} + T_{\text{ji}}^{\text{пер}} & \text{— помеха без последствия;} \\ T_{\text{ji}}^{\text{пер}} & \text{— помеха с последствием;} \end{cases} \\ \forall i \neq j, \end{aligned} \quad (8)$$

где $T_{\text{ji}}^{\text{пер}}$ — время перенацеливания («переключения») помехового воздействия с j -го СП на i -е СП (если $j \neq \overline{1, N}$, то это время перехода из начального состояния).

Для определения значений прямоугольных координат точки падения СП в условиях помех возможно использовать модель динамической системы самонаведения управляемого боеприпаса, которая представлена в стационарном виде с помощью метода сопряженных систем [14–16]. Координаты точки падения i -го СП $q_i(t)$ определяются в момент встречи его с целью $T_{\text{н}i}$ с помощью операции свертки сопряженной импульсной характеристики системы самонаведения (ССН) высокоточного СП $g_i^*(t_d)$ с измеренными ею координатами цели $q_i^z(t)$:

$$q_i(T_{\text{н}i}) = \int_0^{\infty} q_i^z(T_{\text{н}i} - t_d) g_i^*(t_d) dt_d, \quad i = \overline{1, N}.$$

Сопряженная импульсная характеристика ССН $g^*(t_d)$ представляет собой зависимость

отклика системы (координаты СП) в момент времени $t = T_n$ на δ -функцию, поданную на вход в момент времени $\xi = T_n - t_d$, где t_d — время, оставшееся до встречи СП с целью в момент подачи δ -функции [14, 15].

Сопряженная импульсная характеристика ССН $g^*(t_d)$ определяется с помощью обратного преобразования Лапласа сопряженной передаточной функции:

$$G^*(p) = 1 - \exp\left(-\int_p^\infty H(s)ds\right),$$

где $H(p) = K_n H_{\text{КВС}}(p) H_{\text{ФК}}(p) H_{\text{КСО}}(p) / p$; K_n — навигационная постоянная; $H_{\text{КВС}}(p)$, $H_{\text{ФК}}(p)$, $H_{\text{КСО}}(p)$ — передаточные функции контура углового сопровождения, фильтра команды и контура стабилизации ССН СП.

При постановке КСИЗ РЭБ маскирующих помех, временно исключая возможность измерения координат цели и приводящих к прерыванию команд управления в ССН СП, измеренная координата цели определена выражением:

$$q_i^z(t, T_{bi}, \tau_{bi}) = q^0(t) - \eta(t - T_{bi}) \times \\ \times (1 - \eta(t - T_{bi} - \tau_{bi})) q^0(t - T_{bi}),$$

где $q^0(t)$ — истинные координаты цели; $\eta(t)$ — функция Хэвисайда.

При формировании КСИЗ РЭБ помехи в виде вынесенной ложной цели, измеренная координата цели определена выражением:

$$q_i^z(t, T_{bi}, \tau_{bi}) = q^0(t) - \eta(t - T_{bi}) \times \\ \times (1 - \eta(t - T_{bi} - \tau_{bi})) q_i^{\text{лж}}(t),$$

где $q_i^{\text{лж}}(t)$ — координаты ложной цели i -му СП.

В случае если КСИЗ РЭБ применяет для постановки помех расходуемые средства с исходным количеством (боезапасом) $R_{\text{бз}}$, то необходимо принять решение об их оптимальном распределении по СП.

Пусть $x_i = 0, R_{\text{бз}}$ — количество расходуемых средств помех, выделенное для i -го СП ($R_{\text{бз}}$ и x_i — целые неотрицательные числа), и существует функциональная зависимость $\tau_{bi} = f(x_i)$ (например, линейная зависимость $\tau_{bi} = \tau_1 x_i$, где τ_1 — длительность воздействия единичного расходуемого средства помех). Тогда при постановке помех расходуемыми средствами формула (4) преобразуется к виду:

$$\langle T_b^*, X^* \rangle = \arg \max_{T_b, X} \Theta_K(T_b, X) = \\ = \arg \max_{T_{bi}, x_i} \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{пор}i}(T_{bi}, x_i); \\ T_{bi} \in T_b, x_i \in X \quad (9)$$

при ограничениях (5–8) и дополнительно

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq R_{\text{бз}}, x_i = \overline{0, R_{\text{бз}}}, \{x_i, R_{\text{бз}}\} \in Z_0, \quad (10)$$

где Z_0 — множество целых неотрицательных чисел.

Задачи (4)–(8) и (9), (5–8), (10) являются сложными оптимизационными задачами и могут быть решены численными методами.

Оценка повышения эффективности КСИЗ РЭБ за счет применения разработанного метода управления им проводилась на следующем примере. Параметры ПЗП $x_1^{\text{нзн}} = -30$ м, $x_2^{\text{нзн}} = 30$ м, $y_1^{\text{нзн}} = -30$ м, $y_2^{\text{нзн}} = 30$ м. КСИЗ РЭБ осуществляет постановку маскирующих помех без последствия. Максимальное значение ошибок экстраполяции σ_x, σ_y — 500 м. Время перенацеливания помехового воздействия с одного СП на другое 1 с. Количество СП, участвующих в групповой атаке объекта, $N = 4$. Направления на СП по азимуту 0; 90; 180 и 270 градусов, по углу места для каждого СП 1 градус. Для всех СП дальность их обнаружения 10000 м, скорость — 500 м/с, навигационная постоянная $K_n = 1$. Расчеты проводились по 100 реализациям, на каждой из которых начальные направления векторов скорости СП «зашумлялись» по нормальному закону с СКО $\sigma_v = 0,0001 \dots 0,002$ град² и осуществлялось нахождение значения показателя $\Theta_K(T_b^*, \Theta_b^*)$ для оптимальных управляющих параметров T_b, Θ_b . Оптимизация осуществлялась методами условной минимизации, реализованными в пакете Toolbox MATLAB. Для проведения сравнительного анализа на каждой реализации находилось значение показателя $\Theta_K(T_b^\Phi, \Theta_b^\Phi)$ для «фиксированных» значений $\tau_{bi} = (0,25T_{\text{нз}} - T^{\text{пер}})$ и $T_{b1} = 0, T_{b2} = 0,25T_{\text{нз2}}, T_{b3} = 0,5T_{\text{нз3}}, T_{b4} = 0,75T_{\text{нз4}}$. Далее полученные значения $\Theta_K(T_b^*, \Theta_b^*), \Theta_K(T_b^\Phi, \Theta_b^\Phi)$ усреднялись по всем реализациям.

На рис. 5 представлены зависимости показателя эффективности КСИЗ РЭБ от СКО σ_v при оптимальном и «фиксированном» управлении.

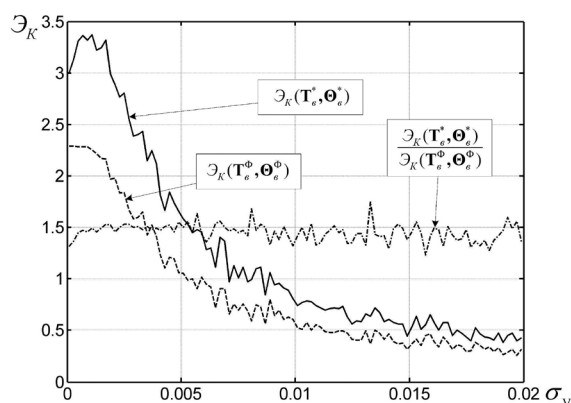


Рис. 5. Зависимости показателя эффективности КСИЗ РЭБ при оптимальном и «фиксированном» управлении

Анализ зависимостей показывает, что абсолютное значение показателя эффективности КСИЗ РЭБ снижается при росте рассеивания СП. При этом повышение эффективности КСИЗ РЭБ за счет применения разработанного метода управления им, в большинстве случаев около может составлять 50 %, а в отдельных случаях может достигать 75 %.

Литература

1. Онуфриенко В.В., Левшин Е.А. Современное состояние и перспективы развития оптико-электронных систем наведения высокоточного оружия класса «воздух-поверхность» и средств оценки их эффективности // Сборник научных статей по материалам докладов III Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР». В 2-х т. Т. 1. — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2016.
2. Семенов С.С. Зарубежные управляемые авиационные средства поражения малого и сверхмалого калибров класса «воздух-поверхность» // Аэрокосмическое обозрение. 2012. № 3. С. 32–38.
3. Буравлев А.И. К вопросу о критерии определения высокоточного оружия // Вооружение и экономика. 2011. № 4 (16). С. 13–20.
4. Война и мир в терминах и определениях / Под ред. Д.О. Рогозина. — М.: 2004. 623 с.
5. Юхно П.М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию. Монография. — М.: Радиотехника. 2017. 637 с.
6. БПЛА в боевых действиях в Нагорном Карабахе (доклад). [Электронный ресурс] // Belarus

Security Blog. 2021. URL: <https://bsblog.info/bplav-boevykh-dejstviyax-v-nagornom-karabaxe-doklad/> (дата обращения: 15.02.2022).

7. Мильграм Ю.Г., Ерохин В.А. Основы единой зонной методики оценки эффективности авиационных средств поражения по наземным (морским) объектам. — М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1985. 57 с.

8. Буравлев А.И. К вопросу определения приведенной зоны поражения объектов // Вооружение и экономика. 2018. № 2 (44). С. 11–16.

9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Высшая школа. 2006. 578 с.

10. Бляхман А.Б., Матюгин С.Н., Прохоров А.Г. О возможности применения обзорной радиолокационной станции для решения задач определения точек прицеливания (падения). Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2016; (2). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2016-2-13-19> (дата обращения: 15.02.2022).

11. Миндияров Д.В., Левшин Е.А. Способ помехозащиты перспективного высокоточного боеприпаса от воздействия оптических помех. «Воздушно-космические силы. Теория и практика». 2021. № 19. — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». С. 285–301.

12. Миндияров Д.В., Левшин Е.А., Яковенко А.Р. Комплекс полунатурного моделирования для испытаний многоспектральных комбинированных следящих систем на помехоустойчивость. Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки». — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2020. 450 с.

13. Аповорич В.А., Бондаренко Р.В. Экстраполяция методом притяжения при отождествлении траекторий и отметок в системе вторичной обработки радиолокационной информации. Доклады БГУИР. 2014. № 4 (82). С. 35–40.

14. Быков В.В., Сухоруков Ю.С. Точность радиолокационного самонаведения в условиях блужданий центра излучения и маневра цели // Радиотехника. 1994. № 9. С. 36–42.

15. Донцов А.А., Чернухо И.И. Исследование алгоритма управления помеховыми воздействиями, приводящими к прерыванию команд в системе самонаведения // Радиотехника. 2014. № 9. С. 26–29.