

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРОЯТНОСТИ СРЫВА
АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛИ
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ
ОПТИЧЕСКИМИ ОРГАНИЗОВАННЫМИ ПОМЕХОВЫМИ
СИГНАЛАМИ**

В.В. Кулалаев

(представил д.т.н., проф. В.И. Карпенко)

Представлена математическая модель расчета вероятности срыва сопровождения цели оптической системой на примере оптической головки самонаведения переносного зенитного ракетного комплекса (ОГС ПЗРК). Результаты могут быть использованы при разработке систем защиты объектов различного базирования от ПЗРК с ОГС.

Введение. На современном этапе развития вооружений и военной техники, по мнению зарубежных военных специалистов, главной задачей является решение проблемы противодействия оптическим электронным системам обнаружения и сопровождения объектов различного базирования [1]. Возможность применения ПЗРК с ОГС террористами делает данную проблему особенно актуальной при разработке систем защиты авиалайнеров гражданской, транспортной и специальной авиации [2]. Обзор рассматриваемой проблемы хорошо представлен в работах [3, 4]. До 1991 года научные работы данного направления выполнялись по Решениям Правительства СССР. В Украине исследования проблемы автор проводит по собственной инициативе при поддержке негосударственных структур, используя накопленный опыт работы в данном научном направлении с 1976 года.

Целью данной статьи является создание математической модели вероятности срыва рабочих процессов оптических систем самонаведения и сопровождения объектов различного назначения.

Для составления математической модели оценки вероятности срыва сопровождения цели ОГС рассмотрим схемы, представленные на рис. 1. Подробное описание принципа действия следящего координатора ОГС ЗУР за целью можно найти в работах [5, 6].

На основании анализа схем, представленных на рис. 1, проследим за влиянием помехового активного ИК-сигнала устройства противодейст-

вия (УП) на эффективность слежения координатора ОГС ЗУР за целью и определения углов рассогласования $\varphi_Y(\tau)$ и $\varphi_Z(\tau)$ с выделением соответствующих ошибок самонаведения $\Delta\varphi_Y^{\Pi}(\tau)$ и $\Delta\varphi_Z^{\Pi}(\tau)$.

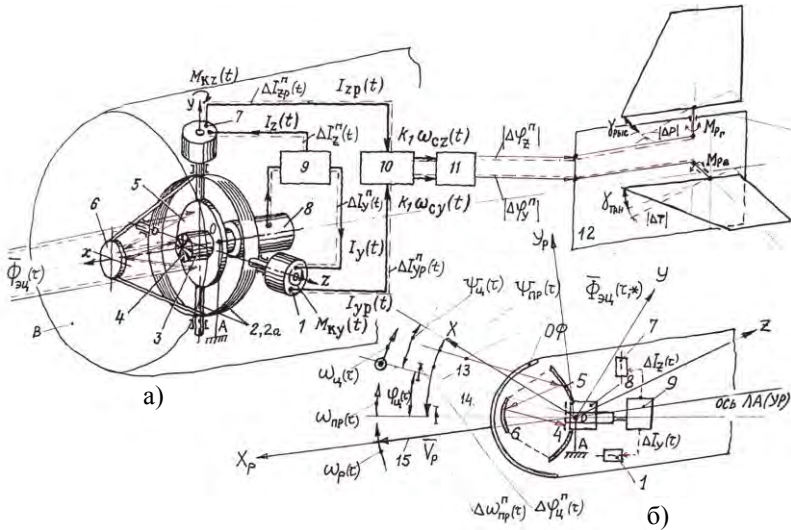


Рис. 1. Схемы оптико-электронного координатора ОГС с одногиростической системой с двухосной коррекцией:

а) 1 и 7 – датчики коррекционных моментов; 2, 2а – внешняя и внутренняя рамки гироскопа; 3 – ротор; 4 – модулирующий растр (или мозаичный ПЛЭ со сканирующим устройством); 5 – основное зеркало; 6 – контррефлектор; 8 – ПЛЭ; 9 – электронный блок (ЭБ); 10 – блок потенциометров; 11 – блок рулевых проводов; 12 – силовая рулевая машина; А – ось подвеса координатора ЗУР;

б) схема слежения за целью координатора ОГС: • – цель, пространственно совмещенная с УП; X, Y, Z – оси координат в абсолютном пространстве; X_p, Y_p – оси координат, жестко связанные с ЗУР; ОФ – оптический фильтр; 13 – линия цели; 14 – ось оптико-электронной системы и гироскопа; 15 – ось симметрии ЗУР

Для стабилизации оси оптико-электронной системы ОГС (поз. 14, рис. 1, б) в абсолютном пространстве плоскости Z0Y создаются коррекционные моменты системой гироскопа $M_{K_i}(\tau)$, где $i = y, z$, величина которых определяется электрическими управляющими сигналами (УС) электронного блока ЭБ (поз. 9), пропорциональными углам рассогласования цели по осям 0Z и 0Y. После анализатора изображения (поз. 4), обработанные оптические сигналы ПЛЭ формируют УС в ЭБ (поз. 9). Анализатор изображения модулирует растром (поз. 4) или обрабатывает без модуляции (МПЛЭ), суммарный лучистый поток от цели, совмещенной с УП в определенных диапа-

зонах длин волн пропускания ОФ, которые носят названия «цветности» ОГС. Современные ОГС ЗУР, как правило, двух или трехцветные, например, $\Delta\lambda_1$ – ультрафиолетовый, $\Delta\lambda_2$ – ближний инфракрасный, $\Delta\lambda_3$ – средний или дальний инфракрасный диапазоны, в дальнейшем обозначим их $\Delta\lambda_i$, где $i=1, 2, 3$. Коррекционные моменты $M_{K_i}(\tau)$, где $i=y, z$, создают вынужденную прецессию оси гироскопа с угловой скоростью $\omega_{\text{ГР}}(\tau)$ (рис. 1, б, поз. 14). Когда ЗУР направлена точно на цель и оси 13, 14, 15 совпадают с приемлемой заданной приборной точностью $[\Delta\omega_{\text{ГР}}]$, ($[\Delta\omega_{\text{ГР}}] \approx \xi_0$, где ξ_0 – паспортное значение точности определения угла рассогласования цели) при этом $\omega_K \cong 0$ (ω_K – угловая скорость оси координатора ОГС, совпадающая с осью системы гироскопов) процесс самонаведения заканчивается. Коррекционные токи $i_{\text{ГР}}^{\text{П}}(\tau)$ ($i=y, z$) из блока 9 подаются перекрестно: $i_{\text{ГР}}^{\text{П}}(\tau)$ пропорционально углу $\varphi_Z^{\text{П}}(\tau)$, а $i_{\text{ГР}}^{\text{П}}(\tau) - \varphi_Y^{\text{П}}(\tau)$.

Очевидно, что коррекционные моменты по осям координат управляются указанными токами и суммируются, т.е.

$$\overline{M}_K^{\text{П}}(\tau) = \overline{M}_K^{\text{П}}{}_y(\tau) + \overline{M}_K^{\text{П}}{}_z(\tau). \quad (1)$$

Если существует угол рассогласования цели $\varphi_{\text{Ц}}$, то суммарный коррекционный момент $\overline{M}_K^{\text{П}}(\tau)$ создает вынужденную прецессию оси гироскопа в направлении оси цели (рис. 1, б, поз. 13). Линейные системы управления [5], которые используют в современных ОГС ЗУР, работают по закону

$$\left| \overline{M}_K^{\text{П}}(\tau) \right| = K_K \varphi_{\text{Ц}}^{\text{П}}(\tau), \quad (2)$$

где K_K – коэффициент пропорциональности системы коррекции.

Таким образом, для управления рулями ЗУР (рис. 1, а, блок 12), определенные оптическими сигналами составляющие угловой скорости цели $\omega_{\text{Ц}}(\tau)$ по осям 0Y, 0Z могут быть переданы в виде электрических токов $I_{Z_1}^{\text{П}}(\tau)$ и $I_{Y_1}^{\text{П}}(\tau)$, которые пропорциональны величинам коррекционных токов, созданных в соответствующих моментных датчиках гиросистемы [5].

В методе пропорционального сближения ЗУР с целью используется зависимость [5, 6]:

$$\omega_P = K_{\omega} \omega_{\text{Ц}}, \quad (3)$$

где K_{ω} – коэффициент пропорциональности, характеризующий условия применения ЗУР с ОГС, ω_P – угловая скорость разворота вектора скорости ЗУР в

направлении к цели, $\omega_{Ц}$ – угловая скорость цели в абсолютном пространстве.

Выходные управляющие сигналы системы потенциометров (рис. 1, а, поз. 10) $K_1\omega_{PZ}(\tau)$ и $K_2\omega_{PY}(\tau)$ передаются в блок 11 и корректируют составляющие угловой скорости разворота ЗУР по осям координат и определяют отклонения рулей (блок 12) на соответствующие углы рыскания $\gamma_{РЫС}$ и тангажа $\gamma_{ТАН}$.

На схемах рис. 1 прохождение помехового сигнала обозначено пунктирной линией, а в формулах индекс П относится к помеховым сигналам управления ОГС.

Проследим его влияние на помеховые составляющие управляющих электрических сигналов в блоках управления ОГС ЗУР. Для удобства результаты сведем в табл. 1 (индекс П обозначает помеховые сигналы управления ЭБ ОГС).

Таблица 1

Влияние помехового сигнала УП
на сигналы управления ОГС ЗЗУР

Без помехового ИК-сигнала УП	С помеховым ИК-сигналом УП
$\Phi_{ЭО} = \text{const}; \Phi_{ПЭ} = 0;$ $K_{П} = 0; F_{П}(*, \tau) = 0$	$\Phi_{ЭО} = \text{const}; \Phi_{ПЭ} = \text{const}_1; K_{П} = \text{const}_2;$ $F(*, \tau) \in]0; 1]; * = x, y, z$
1. Оптический сигнал на ПЛЭ	
$\Phi_{ПЛЭ}(\tau) = \Phi_{ЭО} f_{ОГС}(\tau)$	$\Phi_{ПЛЭ}^{\text{П}}(\tau) = \Phi_{ЭО} [1 + K_{П} F_{П}(*, \tau)] f_{ОГС}(\tau)$
2. Управляющий сигнал на датчики коррекционных моментов от ПЛЭ (рис. 1, а, поз. 1, 7) из блока 9	
$I_i(\tau) = K_9 \Phi_{ЭО} f_{ОГС}(\tau),$ $i = y, z$	$i_1^{\text{П}}(\tau) = K_9 \Phi_{ЭО} f_{ОГС}(\tau) [1 + K_{П} F_{П}(\tau)];$ помеховая составляющая сигнала управления $\Delta i_1^{\text{П}}(\tau) = K_9 \Phi_{ЭО} K_{П} F_{П}(\tau) f_{ОГС}(\tau)$
3. Коррекционные моменты управления	
$ \overline{M}_{K_i}(\tau) = K'_9 I_i(\tau),$ $i = y, z$ $ \overline{M}_K(\tau) = k_K \Phi_{Ц}(\tau)$	$ \overline{M}_{K_i}^{\text{П}}(\tau) = K'_9 I_1^{\text{П}}(\tau);$ помеховая составляющая коррекционного момента управления и угла рассогласования $ \Delta \overline{M}_{K_i}^{\text{П}}(\tau) = K'_9 \Delta i_1^{\text{П}}(\tau); \Delta \varphi_{Ц_i}^{\text{П}}(\tau) = \frac{K'_9}{k_K} \Delta i_1^{\text{П}}(\tau)$

Без помехового ИК-сигнала УП	С помеховым ИК-сигналом УП
4. Управляющие токи потенциометров системы управления рулями (рис. 1, а, поз. 1, 7)	
$I_{iP}(\tau) = K_{1,7} \left \overline{M}_{K_i}(\tau) \right ,$ $i = y, z$	$I_{iP}^{\Pi}(\tau) = K_{1,7} \left \overline{M}_{K_i}^{\Pi}(\tau) \right $; помеховая составляющая токов управления рулевых систем $\Delta I_{iP}^{\Pi}(\tau) = K'_9 K_{1,7} \Delta I_i^{\Pi}(\tau).$
5. Выходные управляющие сигналы системы потенциометров (рис. 1, а, поз. 10)	
$\left \overline{P}_i(\tau) \right = K_1 \omega_{Pi}(\tau), \quad i = y, z$	$\left \overline{P}_i(\tau) \right _i^{\Pi} = \left[\omega_{Pi}(\tau) + \Delta \omega_{Pi}^{\Pi}(\tau) \right]$; помеховое усиление $\left \Delta \overline{P}_i^{\Pi}(\tau) \right = K_1 \Delta \omega_{Pi}^{\Pi}(\tau) = K'_9 K_{1,7} K \Delta I_i^{\Pi}(\tau) = k_K K_{1,7} K_1 \Delta \varphi_{i\Pi}^{\Pi}(\tau)$
6. Углы поворота рулей ЗУР	
$\gamma_{РЫС} = K_{PM} K_1 \omega_{PY}(\tau);$ $\gamma_{ТАН} = K_{PM} K_1 \omega_{PZ}(\tau).$	$\gamma_{РЫС}^{\Pi} = K_{PM} K_1 \omega_{PY}(\tau) + \Delta P;$ $\gamma_{ТАН}^{\Pi} = K_{PM} K_1 \omega_{PZ}(\tau) + \Delta T;$ помеховые составляющие углов поворота рулей ЗУР и угла рассогласования цели $\Delta P = \overline{K}_{PM} k_K K_{1,7} \Delta \varphi_Y^{\Pi}(\tau);$ $\Delta T = \overline{K}_{PM} k_K K_{1,7} \Delta \varphi_Z^{\Pi}(\tau),$ где $\overline{K}_{PM} = K_{PM} K_{11}$ $\Delta \varphi_i^{\Pi}(\tau) = \overline{K}_9 \frac{1}{k_K} \Phi_{ЭО} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau) f_{ОГС}(\tau), \quad i = y, z,$ $\Delta \varphi_i^{\Pi}(\tau) = \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta \tau_{\Pi}} \Phi_{ЭО} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau) f_{ОГС}(\tau)$

Максимальная ошибка отклонения рулей управления ЗУР, согласно анализу зависимостей, представленных в табл. 1, показывает, что помеховое отклонение рулей ЗУР с ОГС пропорционально линейным коэффициентам управления ЭБ (рис. 1, а, поз. 1, 7, 9, 10, 11), а также оптическим ИК-помеховым сигналам УП, прошедшим через систему ОФ и ЭБ ОГС (рис. 1, а, поз. 5, 6, 4). ОГС не производит оптическую селекцию активной помехи из-за идентичности ее «цветовых» характеристик излучения цели $\Delta \lambda_i^{\Pi} = \Delta \lambda_i$ [6].

Таким образом, справедливо соотношение для расчета помехового отклонения рулей ЗУР

$$\left| \Delta_i^{\Pi} \right| = K_{PM} K_{1,7} k_K K_{ЭБЗ} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau) f_{ОГС}(\tau)$$

или после преобразований

$$\left| \Delta_i \right| = \bar{K}_{ЭБ} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau) f_{ОГС}(\tau), \quad (4)$$

где $\bar{K}_{ЭБ}$ – приведенный коэффициент, определяющий характеристики электронного блока и силовой рулевой машины ЗУР с ОГС; $i = P$ – рыскание; T – тангаж в зависимости (4) и определяется формулой

$$\left| \Delta_i \right| \cong \bar{K}_{ЭБ} K_{\Pi} = \bar{K}_{ЭБ} \Phi_{ЭП} / \Phi_{ЭО}. \quad (5)$$

Частота оптической помехи $f_{\Pi}(\tau)$, которая определяется законом $F_{\Pi}(*, \tau)$, должна соответствовать частоте пропускания сигнала фильтрами электронного блока $\Delta f_{ОГС}$ ОГС ЗУР. При этом выполняется условие

$$F_{\Pi}(*, \tau) = 1 / f_{ОГС}(\tau), \quad (6)$$

вытекающее из соотношения (4), которое определяет максимальную величину $\left| \Delta_i \right|_{\max}$.

Так как закон $f_{ОГС}(\tau)$ в общей постановке является техническим и соответственно математическим «черным» ящиком, то проведем исследование зависимости (6) более подробно. После дифференцирования по времени зависимость (6) приводится к виду

$$\frac{dF_{\Pi}(*, \tau)}{d\tau} = -\frac{1}{f_{ОГС}^2(\tau)} \left(\frac{df_{ОГС}(\tau)}{d\tau} \right). \quad (7)$$

Анализ зависимости (7) показывает, что вероятность срыва сопряжения ОГС ЗУР возрастает (или возможна) при таких условиях, когда анализатор изображения цели, совмещенной с УП, воспринимает скорость изменения помехового сигнала, промодулированного по закону $F_{\Pi}(*, \tau)$ с обратным (противоположным) знаком изменения скорости закона обработки сигнала в анализаторе ОГС, т.е. скорости изменения по времени помехового и управляющего сигнала должны иметь обратные знаки. При возрастании интенсивности помехи по времени управляющий сигнал в анализаторе изображения ОГС должен уменьшаться. Таким образом, должны выполняться условия (6) и (7).

Вероятные случаи взаимодействия помехового сигнала и сигнала обработанного анализатором изображения в ОГС при максимальном воздействии помехи изображены на рис. 2. Из графиков на рис. 2 видно, что вероятностные случаи (события) выполнения условий (7) наступают в случаях, которые сведены в табл. 2. Анализ данных табл. 2 указывает

на то, что срыв сопровождения цели возможен во временных интервалах $\tau_1 < \tau_1^{\Pi} < \tau_2'$ и $\tau_2' < \tau_2^{\Pi} < \tau_2$ (рис. 2, а) или $\tau_1 < \tau_1^{\Pi} < \tau_2$ (рис. 2, б). При этом может быть совпадение частот $f_{\Pi} = f_{\text{ОГС}}$ только при условии сдвига помехового сигнала относительно основного на фиксированную помеховую фазу сигнала УП $\psi^{\Pi}(\tau)$, что вероятно при приборной независимости законов $F_{\Pi}(*, \tau)$ и $f_{\text{ОГС}}(\tau)$ (событие R₄).

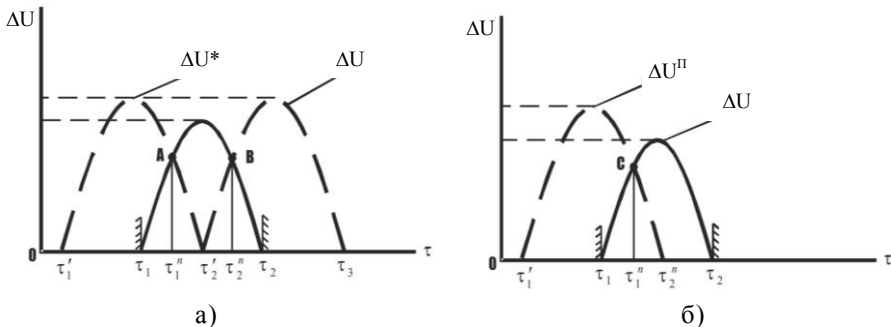


Рис. 2. Основные вероятностные случаи взаимодействия помехового ΔU^{Π} и основного (безпомехового) $\Delta \bar{U}$ управляющих сигналов в ОГС ($K_{\Pi} > 1,0$)

Таблица 2

Вероятностные события взаимодействия помехового и основного управляющих сигналов

№	Обозначение	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
	Описание события							
	Пересечение сигналов, когда возможен срыв сопровождения ОГС:							
1	в точках А и В (двукратно)	+		+	+	+	+	+
2	в точке С (однократно)		+	+	+	+	+	+
	Интервалы следования сигналов:							
3	совпадают $\tau_2' - \tau_1' = \tau_2 - \tau_1$	+	+	+		+	+	+
4	совпадают со сдвигом	+	+		+	+	+	+
5	не совпадают $\tau_2' - \tau_1' \neq \tau_2 - \tau_1$		+	+	+	+	+	+
	Коэффициент помехового оптического излучения K_{Π} :							
6	$K_{\Pi} \in]0; 1]$	+	+	+	+	+	+	+

7	$K_{\Pi} \in]1; N]$, где N – действительное число	+	+	+	+	+	+	+
---	--	---	---	---	---	---	---	---

Тогда вероятность прохождения помехового управляющего сигнала в ЭБ ОГС, рассчитанная по формуле «успеха» [7], составит $P_{\Pi} = 0,898$. Это значит, что из 1000 помеховых импульсов УП, 898 импульсов формируют помеховый сигнал управления рулями ЗУР при $\Delta\lambda_{\Pi_i} = \Delta\lambda_{\text{ОГС}_i}$.

Известно [5], что ОГС ЗУР любого типа имеет мгновенный узкий угол зрения при просмотре плоскости пространства предметов. При этом мгновенное значение электрических сигналов управления пропорционально соответствует мгновенному значению суммарного лучистого потока от цели и помехи. В электронный блок ОГС поступает сигнал управления с помеховой составляющей, которая определяет вероятность срыва сопровождения цели. Во входной зрачок ОГС попадает помеховое оптическое излучение цели, совмещенной с УП, модулированное по частоте помехи $F_{\Pi}(*, \tau)$ и по амплитуде $A_{\Pi}(\tau)$, которая определяется коэффициентом K_{Π} .

Результатом воздействия оптической помехи УП может быть несколько состояний ОГС ЗУР. Например, срыв или не срыв сопровождения цели, с промежуточным вероятностным состоянием «раскачки» координатора ОГС без срыва сопровождения. В рассматриваемом случае, для простоты рассуждения, последний вероятностный случай приравняем условно к нулю.

Если предположить, что проведено N независимых испытаний УП с различными законами $F_{\Pi}(*, \tau)$, при этом функция распределения событий срыва сопровождения цели положительна [6]:

$$F(\chi) = P(X \leq \chi) > 0,$$

где $F(\chi)$ – функция распределения событий срыва (да, нет) при вероятностных событиях R_i , где $i = 1...7$ (табл. 2).

Тогда при $N \rightarrow \infty$ $p(\chi) \rightarrow 0$ – плотность вероятности случайных величин

$$\frac{dF(\chi)}{d\chi} \rightarrow 0,$$

т.е. получаем конечную величину плотности вероятности pN , которую удобно аппроксимировать распределением Пуассона [6]:

$$p(\tau) = \exp(-\lambda),$$

где величина λ – безразмерный параметр, характеризующий время срывного сопровождения цели, которое при определенных событиях R_i ($i=1..7$) может привести к срыву сопровождения цели ОГС ЗУР.

Тогда вероятность срыва сопровождения цели при воздействии помехового сигнала УП определяется выражением

$$P_{\text{срв}}^{\text{УС}}(\tau) = \int_0^{\tau} p(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Для определения величины λ проведем более детальное исследование введенного ранее автором критерия срыва сопровождения цели при воздействии искусственного оптического помехового сигнала УП в виде

$$K_{\text{срв}}(\tau) = \frac{\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau)}{\varphi_{\Pi}(\tau)} = 1 + \frac{\Delta\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau)}{\varphi_{\Pi}(\tau)}, \quad (9)$$

где $\varphi_{\Pi}(\tau)$ – угол рассогласования цели, определяемый ОГС ЗУР в идеальном случае сопровождения цели без помехового сигнала УП.

Согласно рис. 2, б, в абсолютной системе координат XYZ можно записать

$$\Psi_{\text{ПР}}(\tau) + \left| \Delta\Psi_{\text{ПР}}^{\Pi}(\tau) \right| = \varphi_{\Pi}(\tau) + \left| \Delta\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau) \right| + \psi_{\Pi}(\tau), \quad (10)$$

обозначения зависимости (10) введены на рис. 2, б.

Входящие величины соотношения (10) непрерывны во времени, как в процессе самонаведения на цель, так и при ее сопровождении. После дифференцирования по времени зависимости (10) получаем

$$\omega_{\text{ПР}}(\tau) + \left| \Delta\omega_{\text{ПР}}^{\Pi}(\tau) \right| = \frac{d\varphi_{\Pi}(\tau)}{d\tau} + \frac{d\left| \Delta\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau) \right|}{d\tau} + \omega_{\Pi}(\tau), \quad (11)$$

где $\omega_{\text{ПР}}(\tau)$ – угловая скорость прецессии оси гироскопа; $\Delta\omega_{\text{ПР}}^{\Pi}(\tau)$ – помеховая составляющая угловой скорости $\omega_{\text{ПР}}(\tau)$; $\omega_{\Pi}(\tau)$ – угловая скорость цели в абсолютном пространстве, совмещенной с УП; $\Delta\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau)$ – помеховая составляющая угла рассогласования цели.

Из теории гироскопов [5, 6] запишем соотношение

$$\omega_{\text{ПР}}(\tau) + \left| \Delta\omega_{\text{ПР}}^{\Pi}(\tau) \right| = \frac{M_K(\tau) + \Delta M_K^{\Pi}(\tau)}{H_{\Gamma}} \sin \alpha, \quad (12)$$

где α – угол между кинематическим и коррекционными моментами гироскопа ($H_{\Gamma}; M_K(\tau)$).

При «захвате» или точном наведении на цель $\varphi_{\Pi}(\tau) \rightarrow 0$ угол α до-

полняется им до $\frac{\pi}{2}$, при очень малых $\varphi_{\Pi}(\tau) \rightarrow 0$; $\sin \alpha \sim \sin \frac{\pi}{2} = 1,0$, тогда зависимость (12) принимает вид

$$\omega_{\Pi P}(\tau) + \left| \Delta \omega_{\Pi P}(\tau) \right| = \frac{k_K}{H_{\Gamma}} \left[\varphi_{\Pi}(\tau) + \Delta \varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau) \right] = \frac{1}{\tau_{\Gamma}} \varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau), \quad (13)$$

где τ_{Γ} – постоянная времени электронной системы гироскопа (паспортная величина).

«Стандартный захват» цели в момент времени $\tau = \tau_0$ происходит по инструкции применения ЗУР с ОГС при угловой скорости $\omega_{\Pi}(\tau_0) = \omega_{0\Pi}$, известной заранее как паспортное значение, тогда можно записать уравнение (11) в преобразованном виде

$$\frac{d\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau)}{d\tau} - \frac{\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau)}{\tau_{\Gamma}} = \left| \omega_{0\Pi} \right|, \quad (14)$$

решение которого определяется зависимостью

$$\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau) = \left| \omega_{0\Pi} \right| \tau_{\Gamma} \left[1 - \exp \left(- \frac{\tau}{K_{\text{срв}} \tau_{\Gamma}} \right) \right]. \quad (15)$$

Общая приведенная ошибка решения уравнения (14) из-за принятого допущения $\omega_{\Pi}^{\Pi}(\tau) = \omega_{0\Pi}$, с учетом зависимости (9), составит

$$\Delta \omega_{\Pi}^{\Pi}(\tau)_{\Sigma} = \left(\frac{d\varphi_{\Pi}(\tau)}{d\tau} + \frac{d(\Delta \varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau))}{d\tau} \right) = K_{\text{срв}} \frac{d\varphi_{\Pi}(\tau)}{d\tau}.$$

Таким образом, помеховая составляющая определения угловой скорости линии пеленга (Р-Ц) определяется выражением

$$\Delta \omega_{\Pi}^{\Pi}(\tau) = \frac{d(\Delta \varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau))}{d\tau}. \quad (16)$$

Интегрируя (16) в интервале $\Delta \tau_{\text{срв}} \in [\tau_0; \tau_{\text{срв}}]$ и $\Delta \varphi_{\Pi}^{\Pi} \in [0; \Delta \varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau_{\text{срв}})]$ запишем

$$\Delta \omega_{\Pi}^{\Pi} = \frac{\Delta \varphi_{\Pi}^{\Pi}}{\Delta \tau_{\Pi}}, \quad (17)$$

где $\Delta \tau_{\Pi} = \tau_{\text{срв}} - \tau_0$ – время воздействия помехового сигнала УП на входной зрачок ОГС.

При $\tau/\tau_{\Gamma} \rightarrow \infty$ процесс самонаведения быстро затухает (см. зависи-

мость (15)), особенно при выборе $\tau_{\Gamma} = \alpha$, где α – малая величина. Тогда справедливо утверждение [5]:

$$\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau) \cong \tau_{\Gamma} \left| \omega_{0\Pi}^{\Pi} \right|. \quad (18)$$

С учетом зависимости (18) формула (17) приводится к виду

$$\Delta\varphi_{\Pi}^{\Pi}(\tau) \cong \tau_{\Gamma} \frac{\Delta\varphi_{\Pi\text{СРВ}}^{\Pi}(\tau)}{\Delta\tau_{\Pi}}. \quad (19)$$

Возвращаясь к определению (9), запишем

$$K_{\text{СРВ}}(\tau) = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{\Pi}} \frac{\Delta\varphi_{\Pi\text{СРВ}}^{\Pi}(\tau)}{\varphi_{\Pi}(\tau)}$$

или с учетом данных табл. 1 получим переменное значение интегрально-го критерия срыва в виде

$$K_{\text{СРВ}}(\tau) = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{\Pi}} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau). \quad (20)$$

Спектральный критерий срыва определяется зависимостью

$$K_{\text{СРВ}}(\tau)_{\lambda} = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{\Pi}} K_{\Pi\lambda} F_{\Pi}(*, \tau), \quad (21)$$

где $K_{\Pi\lambda} = \Phi_{\text{ЭП}\lambda} / \Phi_{\text{ЭО}\lambda}$ – спектральный коэффициент оптического излучения помехового сигнала УП.

Максимальное значение критерий срыва сопровождения цели принимает при условии $F_{\Pi}(*, \tau) = 1,0$:

$$\left(K_{\text{СРВ}} \right)_{\max} = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{\Pi}} K_{\Pi} \quad (22)$$

или его спектральное значение

$$\left(K_{\text{СРВ}} \right)_{\lambda \max} = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{\Pi}} K_{\Pi\lambda}. \quad (23)$$

Таким образом, величина $\lambda_{\text{СРВ}}$ принимает вид

$$\lambda_{\text{СРВ}} = \frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \sqrt{K_{\text{СРВ}} \max}, \quad (24)$$

где τ – текущее время, τ_{Γ} – постоянная времени ЭБ ОГС.

И наконец, условная вероятность срыва сопровождения цели самонаведения ОГС ЗУР при воздействии помехового оптического сигнала индивидуальной УП, с учетом зависимости (24), находится по формуле

$$P_{\text{срв}}^{\text{уc}}(\tau) = \int_0^{\tau} p\left(-\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \sqrt{K_{\text{срв}}}\right) d\tau = \int_0^{\tau} \exp\left\{-\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \sqrt{K_{\text{срв}}}\right\} d\tau .$$

С учетом зависимостей (8), (24) получим

$$P_{\text{срв}}(\tau) = P_{\Pi} \cdot P_{\text{срв}}^{\text{уc}}(\tau) = P_{\Pi} \int_0^{\tau} \exp\left\{-\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \sqrt{K_{\text{срв}}}\right\} d\tau = P_{\Pi} \left(1 - \exp\left\{-\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \sqrt{K_{\text{срв}}}\right\}\right), (25)$$

где $K_{\text{срв}}$ находится при $F_{\Pi}(*, \tau) = 1,0$.

Зависимость промежутка времени срыва сопровождения цели ОГС от постоянной времени ЭБ ОГС при различных значениях критерия $(K_{\text{срв}})_{\text{max}}$ представлена на рис. 3.

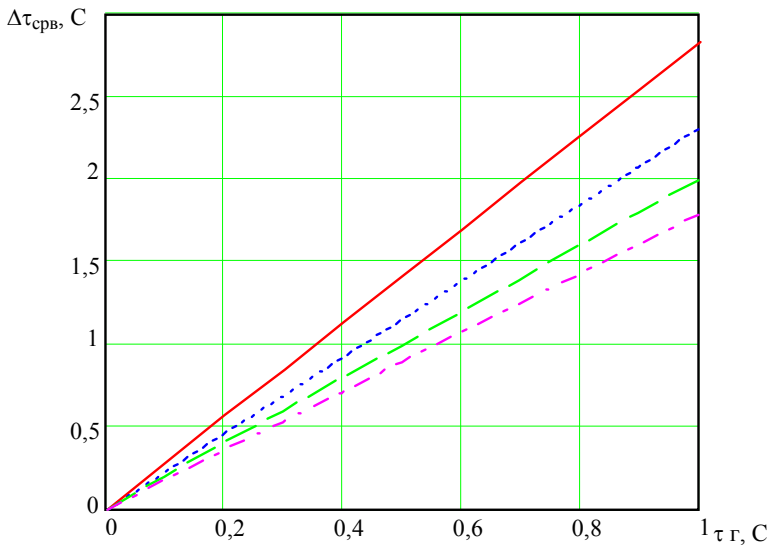


Рис. 3. Расчетные зависимости промежутка времени срыва процесса сопровождения цели ОГС ЗУР при воздействии помехового оптического сигнала УП от постоянной времени ЭБ ОГС τ_{Γ} , на графиках линии сверху вниз соответствуют расчетам при $K_{\text{срв}} = 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$; при $\Delta_p = 0,98$

Промежуток времени, при котором вероятность срыва сопровождения цели ОГС под воздействием помехового сигнала УП максимальна, находим по формуле, полученной из соотношения (25):

$$\Delta\tau_{\text{срв}} = \frac{\tau_{\Gamma}}{\sqrt{K_{\text{срв}}}} \ln \left(\frac{1}{1 - \Delta_p} \right), \quad (26)$$

где $\Delta_p = P_{\text{срв}} / P_{\Pi} < 1,0$ – заданная величина.

Выводы. 1. Разработана математическая модель вероятности срыва сопровождения цели ОГС ЗУР при воздействии искусственных модулированных оптических помех УП для индивидуальной защиты объектов различного назначения, расчетная формула (25).

2. Предложен критерий срыва сопровождения цели ОГС ЗУР, зависимости (20 – 23).

3. Показано, что оптическая модулированная помеха УП ОГС ЗУР наиболее эффективна при выполнении условий (6) и (7).

4. Для прохождения помехи во входной зрачок ОГС, она должна генерироваться УП в рабочем диапазоне ОГС ЗУР – $\Delta\lambda_{\Pi_i} = \Delta\lambda_{i_{\text{ОГС}}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольгин С. Проблемы оптоэлектронного противодействия (по взглядам зарубежных военных специалистов) // *Зарубежное военное обозрение*. – 2002. – № 9. – С. 35 – 40.
2. Семенов А. Защита гражданских самолетов от зенитных ракет // *Зарубежное военное обозрение*. – 2002. – № 12. – С. 35 – 37.
3. Каваносян С.В., Рудаков И.А., Черей Г.И. Анализ основных факторов, влияющих на развитие зарубежных ракетных комплексов (обзор). – М.: ЦНИИ-Маш, 1995, – 76 с.
4. Кулалаев В.В., Кулалаев А.В., Науменко П.О. Состояние и перспективы разработок системы защиты самолетов гражданской авиации от террористических пусков ракет с тепловыми головками самонаведения // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 40/5. – С. 13 – 18.
5. Лазарев Л.П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. Изд. 3-е, переработанное и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 568 с.
6. Физика и техника инфракрасного излучения / Дж.Э. Джемисон, Р.Х. Мак-Фи, Дж.Н. Пласс, Р.Г. Грубе, О.Дж. Ричардс, пер. с англ. под общ. ред. Н.В. Васильченко. – М.: Сов. радио, 1965. – 641 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике / Под ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1974. – 831 с.
8. Справочник по приборам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов, В.А. Волков, В.К. Вялов и др.: Под ред. Л.З. Криксунова. – К.: Техніка, – 1980. – 232 с.

Поступила 10.05.2004

КУЛАЛАЕВ Виктор Валентинович, к.т.н., доцент, докторант ХАИ. Окончил ХАИ в 1975 году. Область научных интересов – разработка систем противодействия устройствам оптического самонаведения.
