

Управление поражением цели в комплексе авиационного вооружения со случайным изменением структуры

А. М. Краснов

В статье рассматривается процесс управления поражением цели за счет целенаправленного изменения относительного положения средства поражения и цели. Предлагается математическое описание динамики вектора относительного положения авиационного средства поражения (АСП) и цели в процессе атаки как системы со случайным изменением структуры. Формулируются задачи прицеливания и наведения управляемых АСП и определяется их место в задаче поражения цели. Рассматривается вопрос анализа качества процесса прицеливания и формируются общий и частные показатели качества авиационной прицельной системы.

Ключевые слова: поражение; прицеливание; наведение; управление; случайная структура; показатель качества; вооружение.

Введение

Боевое применение авиационного вооружения (АВ) представляет собой сложный многогранный процесс, зависящий от множества самых разнообразных факторов. В основе этого процесса лежит взаимодействие авиационного средства поражения (АСП) и цели, развивающееся в определенной среде и направленное на поражение цели. При этом под средой понимается совокупность факторов, сопровождающих процесс взаимодействия АСП и цели. Важнейшими из этих факторов являются условия боевого применения, включающие условия отделения АСП от летательного аппарата (ЛА), характер движения АСП на траектории полета от ЛА до цели или другой намеченной точки (области), условия встречи АСП с целью и тому подобное. Из сказанного следует, что задача поражения цели полностью определяется состоянием тройки «АСП – цель – среда».

При заданном АСП, заданной цели и фиксированной среде исчерпывающей характеристикой взаимодействия АСП и цели при боевом применении АВ является так называемый

координатный закон поражения $G(\bar{r})$, характеризующий собой условную вероятность поражения цели (при условии, что вектор \bar{r} зафиксирован). Вектор \bar{r} представляет собой случайный вектор фазовых координат АСП и характеризует относительное положение АСП и цели в определенном фазовом пространстве. Важно заметить, что в задаче поражения АСП и цель рассматриваются в неразрывном единстве, поскольку поражающие свойства АСП не имеют смысла без свойств уязвимости цели. Следовательно, координатный закон поражения $G(\bar{r})$ является полной характеристикой взаимодействия пары «АСП – цель» при боевом применении АВ.

Случайный вектор фазовых координат АСП \bar{r} , как уже отмечалось, определяет относительное положение АСП и цели (в определенном фазовом пространстве) в процессе поражения. Его полной характеристикой является закон распределения, например, плотность вероятности $f(\bar{r})$. По существу в задаче поражения закон распределения $f(\bar{r})$ характеризует состояние среды, в которой функционирует пара «АСП – цель». Следовательно, функционирование тройки «АСП – цель – среда» можно характеризовать координатным законом поражения $G(\bar{r})$ и законом распределения вектора фазовых координат АСП $f(\bar{r})$.

Для удобства количественной оценки поражения цели часто применяется свертка указанных законов. В частности, при оценке поражения одиночных целей удобно пользоваться интегральной сверткой в виде вероятности поражения цели:

$$B^* = \int_{-\infty}^{\infty} G(\bar{r}) f(\bar{r}) d\bar{r}.$$

Анализ данной формулы показывает, что вероятность поражения цели функционально зависит от вектора \bar{r} . Поэтому для изучения задачи поражения цели в интересах управления процессом поражения необходимо знать закономерности изменения этого вектора. При этом важным является вопрос о том, какие именно фазовые координаты входят в состав \bar{r} . Предлагаются самые разнообразные представления данного вектора в зависимости от цели исследования и личных симпатий авторов.

На практике часто в качестве вектора \bar{r} рассматривают вектор ошибки попадания АСП в цель (ошибки боевого применения АСП), содержащий компонентами его проекции на оси специально выбираемой системы координат, начало которой совмещается с целью. В дальнейшем рассмотрим указанную трактовку и попытаемся выяснить закономерности изменения вектора \bar{r} . Рассмотрение целесообразно начать с момента отделения АСП от ЛА, когда абсолютная величина вектора \bar{r} как правило максимальна. Целью управления процессом поражения является сведение абсолютной величины вектора \bar{r} к минимуму.

1. Математическое описание динамики вектора относительного положения АСП и цели в процессе атаки

1.1. Постановка задачи

Пусть цель C движется по некоторой траектории 1 (рис.1.1). Атакующий ЛА движется по траектории 2. Предположим, что в момент t_0 в точке O с ЛА по цели применяется АСП. При этом точка O фиксируется относительно воздуха. В процессе полета АСП его положение определяется вектором $\bar{D}_c(\tau)$, а положение цели – вектором $\bar{D}_y(\tau)$. Тогда текущее отклонение АСП от цели будет характеризоваться вектором $\bar{r}(\tau)$:

$$\bar{r}(\tau) = \bar{D}_c(\tau) - \bar{D}_y(\tau), \quad (1.1)$$

где τ - текущее время полета АСП.

Требуется обеспечить попадание средств поражения в цель или другую намеченную область, то есть (в случае прямого попадания в цель) обеспечить, чтобы траектория цели и средства поражения пересеклись в некоторой точке в некоторый момент времени. Для этого надо знать законы движения АСП и цели после выстрела.

Дифференцируя выражение (1.1) по времени τ , получим дифференциальное уравнение для вектора $\bar{r}(\tau)$

$$\dot{\bar{r}}(\tau) = \bar{v}_c(\tau) - \bar{V}_y(\tau), \quad \bar{r}(\tau_0) = -\bar{D}_0, \quad (1.2)$$

где $\bar{v}_c(\tau)$, $\bar{V}_y(\tau)$ - векторы скоростей АСП и цели соответственно;

\bar{D}_0 - вектор дальности цели в момент предполагаемого пуска АСП.

Скорость АСП $\bar{v}_c(\tau)$ и скорость цели $\bar{V}_y(\tau)$ в уравнении (1.2) являются неизвестными. Характер их изменения может быть получен на основе методов механики. Далее воспользуемся этими методами, рассматривая движение лишь центров масс анализируемых объектов, что не снижает общности основных выводов и удобно с методической точки зрения.

Определение скорости АСП осуществляется на основе решения задачи внешней баллистики. При этом уравнения для определения $\bar{v}_c(\tau)$ в общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{v}}_c(t) &= \bar{a}_c(\bar{V}_c, \bar{D}_c, \bar{u}_c, \bar{\xi}_c, t), \bar{v}_c(t_0) = \bar{v}_{c0}, \\ \dot{\bar{D}}_c &= \bar{v}_c(\bar{v}_c, \bar{D}_c, t), \bar{D}_c(t_0) = \bar{D}_{c0}, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где $\bar{a}_c(\bullet), \bar{v}_c(\bullet)$ - известные нелинейные векторные функции;

\bar{u}_c - вектор управления АСП;

$\bar{\xi}_c$ - вектор случайных возмущений, действующих на АСП в полете.

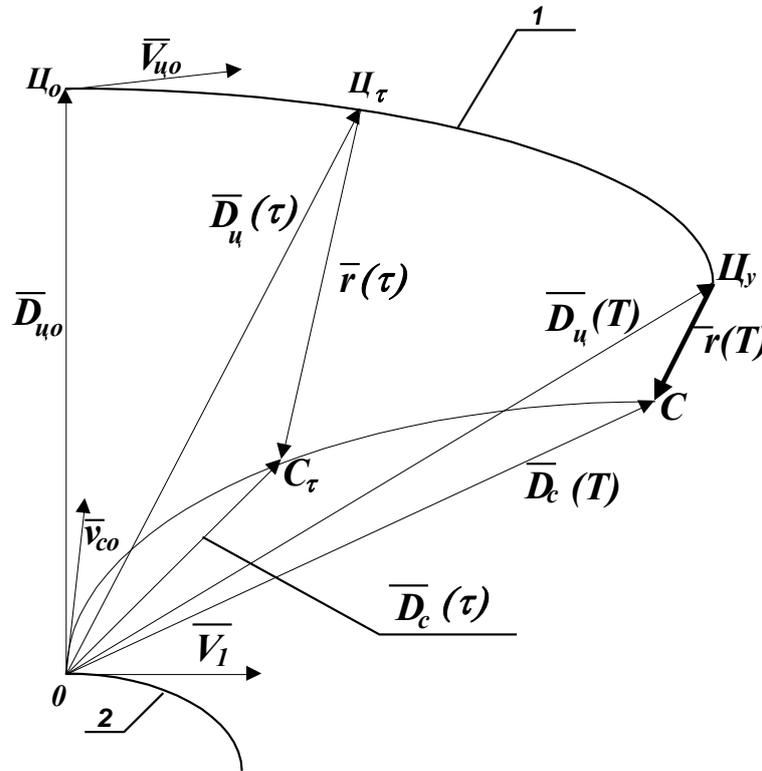


Рис. 1.1. Схема для определения отклонения АСП от цели

Движение цели также может быть описано на основе известных законов механики. В общем виде уравнения движения цели записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{V}}_y &= \bar{a}_y(\bar{V}_y, \bar{D}_y, \bar{u}_y, \bar{\xi}_y, \tau), \bar{V}_y(\tau_0) = \bar{V}_{y0}, \\ \dot{\bar{D}}_y &= \bar{V}_y(\bar{V}_y, \bar{D}_y, \tau), \bar{D}_y(\tau_0) = \bar{D}_{y0}, \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

где $\bar{a}_y(\bullet), \bar{V}_y(\bullet)$ - известные нелинейные векторные функции;

\bar{u}_y - вектор управления цели;

$\bar{\xi}_y$ - вектор случайных возмущений, действующих на цель в полете.

При заданных векторах случайных возмущений $\bar{\xi}_c$ и $\bar{\xi}_y$, векторе управления цели и АСП \bar{u}_c, \bar{u}_y и начальных условиях система уравнений (1.2-1.4) является замкнутой. В ре-

зультате ее решения получаем текущее значение вектора отклонения АСП от цели $\bar{r}(\tau)$ после предполагаемого выстрела.

Через некоторое время T после выстрела абсолютная величина $\bar{r}(\tau)$ становится минимальной. Необходимое условие минимума $|\bar{r}(\tau)|$ может быть записано в виде

$$\frac{\partial |\bar{r}(\tau)|}{\partial \tau} = 0. \quad (1.5)$$

Достаточное условие минимума $|\bar{r}(\tau)|$ записывается следующим образом:

$$\frac{\partial^2 |\bar{r}(\tau)|}{\partial \tau^2} > 0.$$

Данное условие по существу определяет область возможных атак (ОВА). Если ЛА находится в области возможных атак, то достаточное условие минимума абсолютной величины отклонения АСП от цели всегда выполняется. При этом минимум может быть определен на основе выполнения условия (1.5). Тогда это условие, по сути, является граничным при определении вектора \bar{r} . Значение текущего отклонения \bar{r} в момент выполнения граничного условия (1.5) обозначим $\bar{r}(T)$. Время T получило название времени полета АСП (время от момента предполагаемого выстрела до момента выполнения граничного условия (1.5)).

Для решения задачи (в случае прямого попадания) необходимо, чтобы величина $\bar{r}(T)$ была равна нулю. Тогда в качестве параметра управления целесообразно принять вектор (рис. 1.2):

$$\bar{\Delta}(T) = -\bar{r}(T). \quad (1.6)$$

Данный вектор часто называют вектором промаха. Схема для определения параметра управления показана на рис.1.2. Этот параметр определяет как величину, так и направление уменьшения отклонения $\bar{r}(T)$ на момент выполнения граничного условия (1.5) и является удобным для реализации на его основе управления ЛА и оружием.

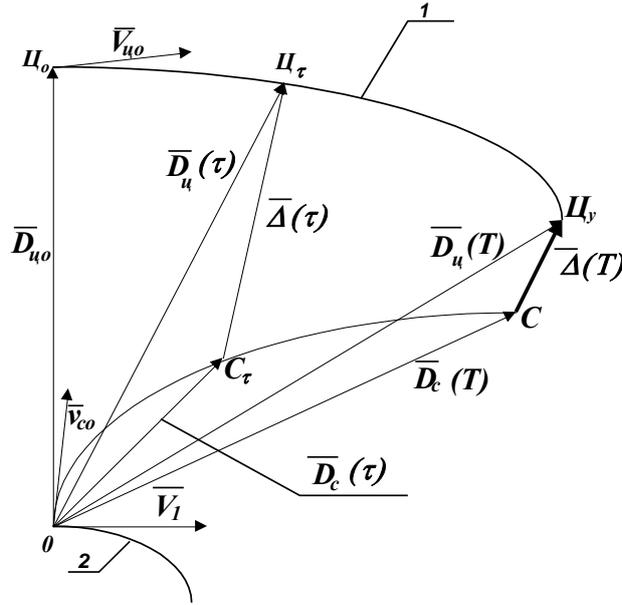


Рис. 1.2. Схема для определения параметра управления

С учетом выражения (1.6,1.2-1.4) можно записать систему дифференциальных уравнений, обеспечивающих определение векторного параметра управления, в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{\Delta}} &= \bar{V}_u - \bar{v}_c, \quad \bar{\Delta}(\tau_0) = \bar{D}_0, \\ \dot{\bar{v}}_c &= \bar{a}_c(\bar{v}_c, \bar{D}_c, \bar{u}_c, \bar{\xi}_c, \tau), \quad \bar{v}_c(\tau_0) = \bar{v}_{c0}, \\ \dot{\bar{D}}_c &= \bar{v}_c(\bar{v}_c, \bar{D}_c, \tau), \quad \bar{D}_c(\tau_0) = \bar{D}_{c0}, \\ \dot{\bar{V}}_u &= \bar{a}_u(\bar{V}_u, \bar{D}_u, \bar{u}_u, \bar{\xi}_u, \tau), \quad \bar{V}_u(\tau_0) = \bar{V}_{u0}, \\ \dot{\bar{D}}_u &= \bar{V}_u(\bar{V}_u, \bar{D}_u, \tau), \quad \bar{D}_u(\tau_0) = \bar{D}_{u0}. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Параметр управления определяется с помощью системы (1.7) в момент выполнения граничного условия

$$\frac{\partial |\bar{\Delta}(\tau)|}{\partial \tau} = 0. \quad (1.8)$$

Анализ системы уравнений (1.7) показывает, что задача управления изменением вектора относительного положения АСП $\bar{r}(T)$ может быть решена путем изменения начальных условий пуска АСП (изменения фазовых координат ЛА и оружия) и вектора управления АСП \bar{u}_c .

Если задача управления вектором \bar{r} предполагает изменение начальных условий пуска АСП, то ее называют *задачей прицеливания*. Если же задача управления вектором \bar{r} решается за счет управления АСП, то ее называют *задачей наведения АСП*. Как правило, ука-

занные задачи при применении управляемых АСП решаются совместно, и задача прицеливания предшествует задаче наведения АСП. При этом степень изменения вектора \bar{r} при решении задачи прицеливания определяется системой наведения управляемого АСП. При применении неуправляемых АСП решается только задача прицеливания.

Рассмотрим более подробно задачу прицеливания. В этом случае процесс управления вектором \bar{r} называют процессом прицеливания, а параметр управления $\bar{\Delta}(T)$ - параметром прицеливания.

По вычисленному параметру прицеливания $\bar{\Delta}(T)$ осуществляется управление ЛА и оружием. Но значения параметра прицеливания справедливы лишь для того момента времени, для которого они вычислены. Для управления же необходима непрерывная информация о параметре прицеливания. Следовательно, после выполнения граничного условия (1.8) и определения параметра прицеливания для некоторого момента времени, необходимо вновь начать решение системы (1.7), но уже при изменившихся за время предыдущего решения начальных условиях, и закончить его вновь по условию (1.8). И так далее. В качестве начальных условий для системы (1.7) при этом необходимо использовать значения соответствующих величин в текущем времени t решения задачи прицеливания. Тогда получается, что система (1.7) решается в своем времени τ , а управление самолетом и оружием осуществляется в текущем реальном времени t . Время τ , как правило, является ускоренным, поскольку необходимо обеспечить малый интервал дискретности получения информации о параметре прицеливания для того, чтобы процесс управления ЛА и оружием удовлетворял требованиям по точности и устойчивости.

В результате параметр прицеливания представляется последовательностью дискретных отчетов с интервалом дискретности равным реальному времени решения системы уравнений (1.7) на каждом шаге (от момента начала решения до момента выполнения граничного условия). В пределах интервала дискретности параметр прицеливания является постоянным. Если масштаб ускорения времени при решении системы (1.7) равен n_g , а реальное время ее решения (интервал дискретности) равно t_g , то реальное время полета АСП определяется по формуле

$$T = n_g t_g.$$

Таким образом, параметр прицеливания представляет собой кусочно-непрерывную функцию времени полета АСП и текущего времени прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$. Условие выполнения прицеливания может быть записано в виде

$$\bar{\Delta}(T, t) = 0. \quad (1.9)$$

Как уже отмечалось, для решения системы уравнений (1.7) необходимо знать начальные условия для параметра прицеливания, для уравнений характеризующих движение АСП и цели. В качестве этих начальных условий на борту ЛА используются измеренные с помощью бортовых средств текущие значения фазовых координат ЛА, оружия и цели. Изучение и исследование процесса прицеливания, таким образом, должно базироваться на единой математической модели, включающей математическую модель ЛА, модель цели, модели информационной системы и системы управления ЛА и оружием.

1.2. Общее математическое описание процесса прицеливания как динамической системы со случайным изменением структуры

Для изучения и исследования процесса прицеливания в динамике его математическую модель удобно представить в пространстве состояний. Для этого последовательно рассмотрим все его составляющие и запишем соответствующие им дифференциальные уравнения.

Общий вид уравнений для определения параметра прицеливания представлен системой (1.7). Что касается моделей ЛА и оружия, цели, то они должны быть имитационными, позволяющими наиболее точно воспроизводить характер движения ЛА, оружия и цели при прицеливании. Имитационная математическая модель ЛА и оружия в общем виде может быть представлена векторным уравнением

$$\dot{\bar{Y}}_n = \bar{\Phi}_n(\bar{Y}_n, \bar{u}_n, \bar{\xi}_n, t), \bar{Y}_n(t_0) = \bar{Y}_{n0}, \quad (1.10)$$

где \bar{Y}_n - вектор фазовых координат ЛА и оружия;

\bar{u}_n - вектор управления ЛА и оружия;

$\bar{\xi}_n$ - вектор возмущающих воздействий;

$\bar{\Phi}_n(\bullet)$ - известная нелинейная векторная функция.

Фазовые координаты ЛА и оружия измеряются с помощью бортовой информационной подсистемы о фазовых координатах ЛА и оружия, называемой информационно-навигационной подсистемой (ИНП) и содержащей множество измерителей различных фазовых координат. Условно эта подсистема может быть представлена в виде двух блоков: динамического преобразователя и безынерционного преобразователя (рис.1.3).

В процессе функционирования некоторые из измерителей ИНП могут отказать, что приводит к функциональным нарушениям в ней. Другими словами, ИНП в процессе функционирования случайным образом может менять свою структуру. Факт смены структуры

вследствие функциональных нарушений учитывается переменной $P = \{1, 2, \dots, p, \dots, N_n\}$ в динамическом преобразователе.

Математическая модель динамического преобразователя может быть представлена в виде

$$\dot{\bar{Y}}_{nu}^P = \bar{\Phi}_{nu}^P(\bar{Y}_n, \bar{Y}_{nu}^P, \bar{\xi}_{ng}, t), \quad \bar{Y}_{nu}^P(t_0) = \bar{Y}_{nuo}^P, \quad (1.11)$$

где $\bar{\xi}_{ng}$ - вектор возмущений, действующих на динамический преобразователь.

В безынерционном преобразователе осуществляется преобразование вида

$$\bar{Z}_n^P = \bar{\varphi}_n(\bar{Y}_{nu}^P, \bar{\xi}_{n\delta}), \quad (1.12)$$

где $\bar{\xi}_{n\delta}$ - вектор ошибок преобразования;

$\bar{\varphi}_n(\bullet)$ - известная нелинейная векторная функция.

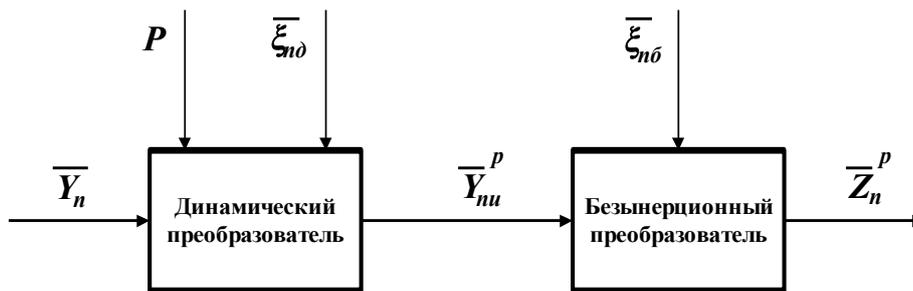


Рис. 1.3. Структура информационно-навигационной подсистемы

На выходе ИНП наблюдается сигнал \bar{Z}_n^P , используемый для формирования начальных условий системы уравнений (1.7).

Аналогичные рассуждения можно провести и по отношению к имитационной математической модели цели. Важно заметить, что эта модель должна как можно полнее имитировать реальное движение цели для того, чтобы воссоздать близкие к реальным условиям ее наблюдения и измерения фазовых координат. Она существенно сложнее той модели цели, которая применяется в системе (1.7) для вычисления параметра прицеливания. Уравнения движения цели в системе (1.7) получаются исходя из возможности определения закона движения цели на основе измерения ее фазовых координат на борту ЛА. Имитационная же модель формирует сами фазовые координаты цели. Другими словами, имитационная модель характеризует реальное движение цели, а модель в системе (1.7) - наше представление о нем на основе имеющейся на борту ЛА информации.

Векторное уравнение, описывающее изменение фазовых координат цели, представляется в виде

$$\dot{\bar{Y}}_ц = \bar{\Phi}_ц(\bar{Y}_ц, \bar{u}_ц, \bar{\xi}_ц, t), \quad \bar{Y}_ц(t_0) = \bar{Y}_ц0, \quad (1.13)$$

где $\bar{Y}_ц$ - вектор фазовых координат цели;

$\bar{u}_ц$ - вектор управления цели;

$\bar{\xi}_ц$ - вектор возмущений, действующих на цель;

$\bar{\Phi}_ц(\bullet)$ - известная нелинейная векторная функция.

Фазовые координаты цели измеряются находящейся на борту ЛА информационной подсистемой о фазовых координатах цели или, как ее еще называют, визирно-прицельной подсистемой (ВПП), содержащей множество измерителей различных фазовых координат.

Так же, как и ИНП визирно-прицельная подсистема может быть представлена в виде двух блоков: динамического и безынерционного преобразователей (рис.1.4).

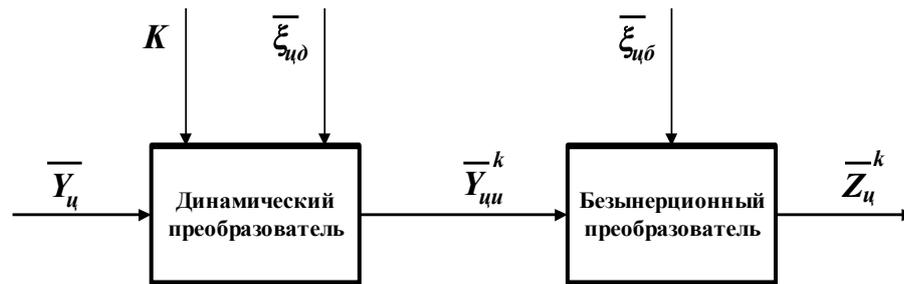


Рис. 1.4. Структура визирно-прицельной подсистемы

Возможная случайная смена структур ВПП вследствие функциональных нарушений учитывается переменной $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, N_g\}$ в динамическом преобразователе, математическая модель которого имеет вид

$$\dot{\bar{Y}}_цi^k = \bar{\Phi}_цi^k(\bar{Y}_ц, \bar{Y}_цi^k, \bar{\xi}_цg, t), \quad \bar{Y}_цi^k(t_0) = \bar{Y}_цi0, \quad (1.14)$$

где $\bar{\xi}_цg$ - вектор возмущений, действующих на динамический преобразователь.

В безынерционном преобразователе вектор $\bar{Y}_цi^k$ преобразуется в соответствии с выражением

$$\bar{Z}_ц^k = \bar{\varphi}_ц(\bar{Y}_цi^k, \bar{\xi}_ц\delta), \quad (1.15)$$

где $\bar{\xi}_ц\delta$ - вектор ошибок преобразования;

$\bar{\varphi}_y(\bullet)$ - известная нелинейная векторная функция.

Сигнал \bar{Z}_n^k с выхода ВПП используется в качестве начальных условий для системы уравнений (1.7).

Таким образом, начальные условия известны, и с помощью системы уравнений (1.7) может быть вычислен параметр прицеливания. Система (1.7) реализуется в бортовой вычислительно-коммутационной подсистеме (ВКП). Информация о параметре прицеливания обновляется на выходе ВКП с интервалом дискретности t_g и поступает на входы исполнительно-управляющей подсистемы (ИУП), включающей системы управления ЛА и оружия (СУЛА и СУО). В этих системах на основе параметра прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$ формируются управления ЛА и оружием в виде некоторых операторов

$$\bar{u}_{ла} = B_{ла} [\bar{\Delta}(T, t)], \quad (1.16)$$

$$\bar{u}_{ор} = B_{ор} [\bar{\Delta}(T, t)]. \quad (1.17)$$

Таким образом, вектор \bar{u}_n в уравнении (1.10) является составным вектором

$$\bar{u}_n^T = \|\bar{u}_{ла} : \bar{u}_{ор}\|. \quad (1.18)$$

1.3. Структурная схема процесса прицеливания

На основании выше изложенного структурная схема процесса прицеливания может быть представлена в виде, показанном на рис.1.5.

Схема процесса прицеливания представляет собой замкнутый контур, подверженный действию возмущений $\bar{\xi}_n, \bar{\xi}_y, \bar{\xi}_{ng}, \bar{\xi}_{n\delta}, \bar{\xi}_{yg}, \bar{\xi}_{y\delta}$, управления цели \bar{u}_y и дискретных случайных процессов P и K , характеризующих смену структур процесса прицеливания. Возмущения задаются на основе данных, полученных экспериментальным путем. Что касается управления \bar{u}_y , то в реальных условиях закон его изменения установить очень трудно. Поэтому при проведении анализа процесса прицеливания этот закон выбирается на основе изучения тактических приемов противника в различных ситуациях.

На структурной схеме пунктирной линией выделена часть, традиционно относящаяся к авиационной прицельно-навигационной системе (АПрНС). В некоторых случаях в АПрНС включают еще и системы управления ЛА и оружием. По-видимому, это оправдано, поскольку АПрНС относится к классу информационно-управляющих систем и должна содержать в

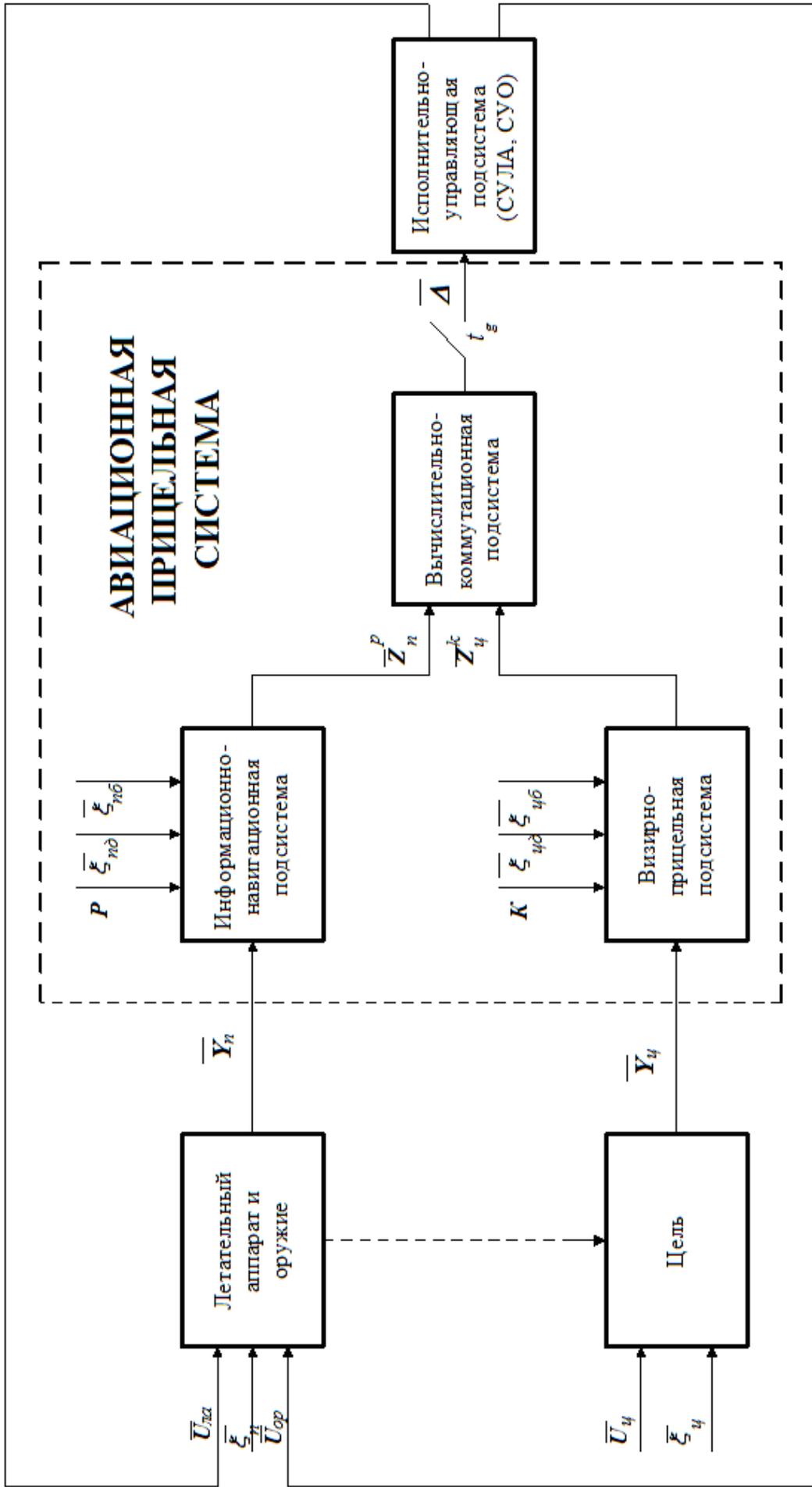


Рисунок 1.5 – Структурная схема процесса прицеливания

своем составе исполнительную подсистему. Такую объединенную систему иногда называют системой прицеливания и управления вооружением.

Параметр прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$, сформированный в вычислительно-коммутационной подсистеме, поступает в исполнительно - управляющую подсистему, где на его основе формируются управления $\bar{u}_{ла}$ и $\bar{u}_{ор}$, обеспечивающие управление ЛА и оружием в интересах обеспечения условия выполнения прицеливания (1.9). При этом условие выполнения прицеливания $\bar{\Delta}(T, t) = 0$ может быть обеспечено следующими путями: управлением летательным аппаратом; управлением оружием (при подвижном оружии); одновременным управлением ЛА и оружием. Следовательно, имеется несколько контуров управления, обеспечивающих достижение условия выполнения прицеливания $\bar{\Delta}(T, t) = 0$. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

1.4. Контур управления летательным аппаратом и оружием при прицеливании

Как уже отмечалось, исполнительно - управляющая подсистема включает систему управления ЛА (СУЛА) и систему управления оружием (СУО).

Система управления ЛА в качестве основных элементов включает в свой состав лётчика и систему автоматического управления полётом (САУ). Она формирует управление $\bar{u}_{ла}$. За счет этого управления изменяется пространственное положение ЛА относительно цели в интересах обеспечения условия выполнения прицеливания. При этом в зависимости от режима работы СУЛА (автоматический, полуавтоматический, ручной) управление $\bar{u}_{ла}$ формируется и реализуется по-разному.

В режиме автоматического управления $\bar{u}_{ла}$ формируется в САУ и затем передается на органы управления ЛА.

В режиме полуавтоматического (директорного) управления $\bar{u}_{ла}$ также формируется в САУ, затем индицируется лётчику, и он, воздействуя на органы управления ЛА, добивается обеспечения условия выполнения прицеливания.

В режиме ручного управления лётчику непосредственно в той или иной форме индицируется параметр прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$, и он по своему усмотрению путем воздействия на органы управления ЛА обеспечивает условие выполнения прицеливания.

Система управления оружием должна обеспечить, с одной стороны, управлением пространственным положением оружия, а с другой – управление отделением АСП от

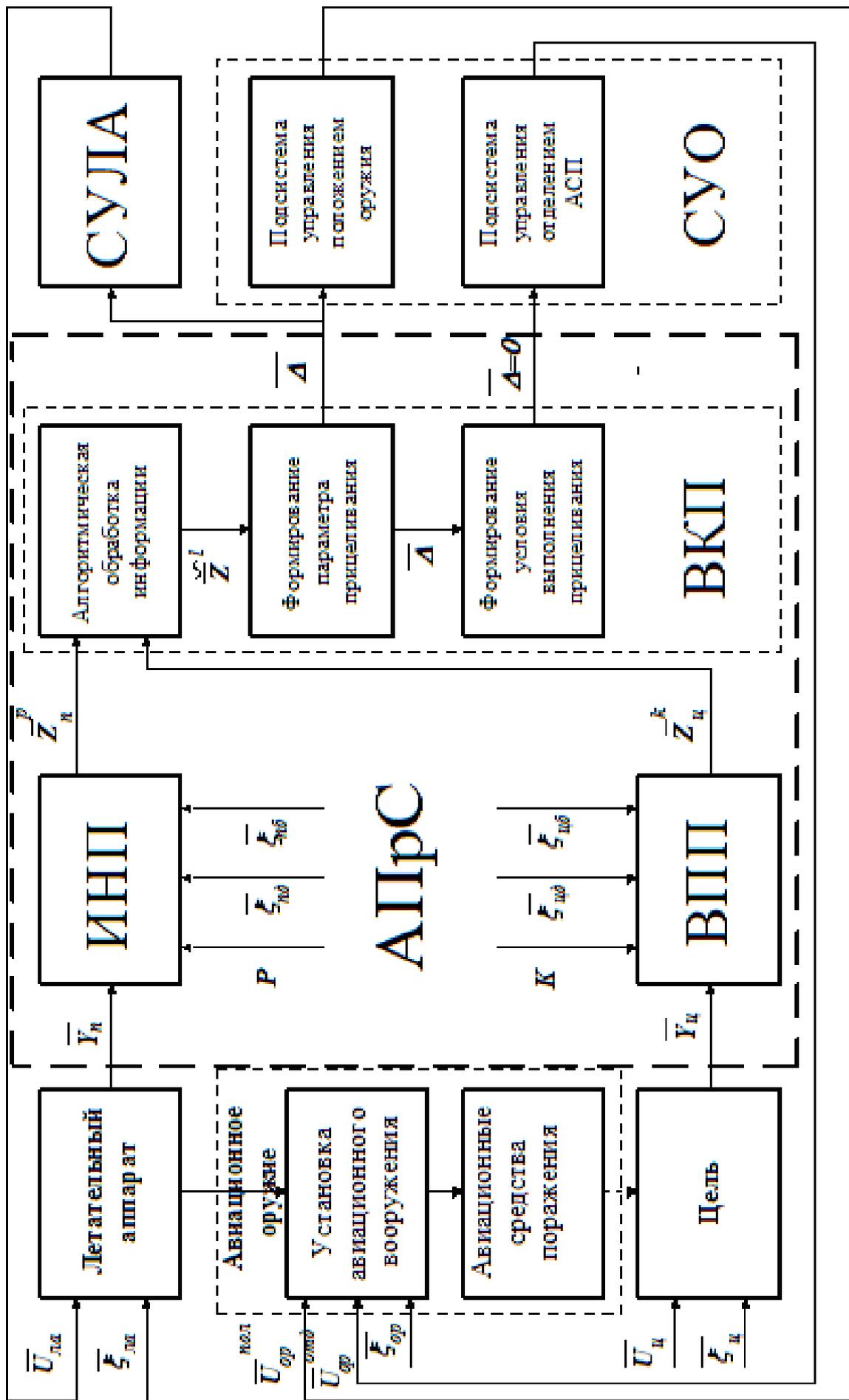


Рисунок 1.6 – Контуры управления летательным аппаратом и оружием при прицеливании

летательного аппарата. Поэтому в СУО можно условно выделить две подсистемы: подсистему управления положением оружия и подсистему управления отделением АСП.

Важно заметить, что в подсистему управления положением оружия из ВКП поступает параметр прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$, на основе которого формируется управление $\bar{u}_{op}^{пол}$, обеспечивающее изменение пространственного положения оружия в интересах обеспечения условия выполнения прицеливания. Это управление поступает в установку авиационного вооружения (УАВ) на привод оружия, который и осуществляет непосредственно изменение положения оружия относительно цели.

Подсистема управления отделением АСП формирует управление $\bar{u}_{op}^{омд}$, обеспечивающее отделение АСП от ЛА. Это управление поступает также в УАВ на соответствующие устройства отделения АСП. При этом управление $\bar{u}_{op}^{омд}$ выдаётся в УАВ лишь тогда, когда обеспечено условие выполнения прицеливания $\bar{\Delta}(T, t) = 0$. Это условие формируется в ВКП.

Таким образом, при прицеливании функционируют три контура управления ЛА и оружием:

- контур управления пространственным положением ЛА;
- контур управления пространственным положением оружия;
- контур управления отделением АСП от ЛА.

Структурная схема процесса прицеливания, учитывающая указанные контуры управления ЛА и оружием, представлена на рис. 1.6. Она является детализацией структурной схемы, показанной на рис. 1.5. Авиационное оружие представлено здесь в виде составных частей: установки авиационного вооружения (УАВ) и авиационных средств поражения. В вычислительно-коммутационной подсистеме условно выделены три элемента: блок алгоритмической обработки информации о фазовых координатах ЛА, оружия и цели, где осуществляются мероприятия по преобразованию различных систем координат и повышению точности информации, поступающей от измерителей ИНП и ВКП; блок формирования параметра прицеливания, реализующий систему уравнений типа (1.7); блок формирования условия выполнения прицеливания $\bar{\Delta}(T, t) = 0$. В СУО выделено две подсистемы: подсистема управления положением оружия и подсистема управления отделением АСП.

Анализ структурной схемы процесса прицеливания и контуров управления ЛА и оружием при боевом применении АСП позволяет выделить функциональную систему более высокого уровня, обеспечивающую решение задачи боевого применения авиационного воору-

жения в целом. Такая система получила название «*Комплекс авиационного вооружения (КАВ)*». На основе выше изложенного в состав КАВ должны быть включены следующие элементы:

- *авиационное оружие* (АО), включающее установку авиационного вооружения (УАВ) и авиационные средства поражения (АСП);
- *авиационная прицельно-навигационная система* (АПрНС), включающая информационно-навигационную, визирно-прицельную, вычислительно-коммутиационную и исполнительно-управляющую подсистемы (ИНП, ВПП, ВКП, ИУП) ;
- *система управления оружием* (СУО), включающая подсистему управления положением оружия и подсистему управления отделением АСП;
- *система управления летательным аппаратом* (СУЛА), включающая экипаж и систему автоматического управления полетом ЛА (САУ).

Заметим, что комплекс авиационного вооружения и летательный аппарат функционируют совместно как единая целенаправленная система (см. рис. 1.6). Следовательно объективно существует функциональная система еще более высокого уровня, включающая элементами КАВ и ЛА. Такая система получила название «*Авиационный боевой комплекс (АБК)*».

1.5. Математическая модель процесса прицеливания

При исследовании процесса прицеливания удобно представить его в виде обобщенных векторных уравнений. Так система уравнений (1.7) может быть записана в виде одного векторного уравнения следующим образом:

$$\dot{\bar{Y}}_{\Delta} = \bar{\Phi}_{\Delta}(\bar{Y}_{\Delta}, \bar{\xi}_{\Delta}, \bar{u}_{\Delta}, \tau), \quad \bar{Y}_{\Delta}(\tau_0) = \bar{Y}_{\Delta}(t), \quad (1.19)$$

где

$$\bar{Y}_{\Delta} = \begin{Bmatrix} \bar{\Delta} \\ \bar{v}_c \\ \bar{D}_c \\ \bar{V}_y \\ \bar{D}_y \end{Bmatrix}; \quad \bar{\Phi}_{\Delta}(\bar{Y}_{\Delta}, \bar{\xi}_{\Delta}, \tau) = \begin{Bmatrix} \bar{V}_y - \bar{v}_c \\ \bar{a}_c(\bar{V}_c, \bar{D}_c, \bar{\xi}_c, \tau) \\ \bar{\psi}_c(\bar{v}_c, \bar{D}_c, \tau) \\ \bar{a}_y(\bar{V}_y, \bar{D}_y, \bar{u}_y, \bar{\xi}_y, \tau) \\ \bar{\psi}_y(\bar{V}_y, \bar{D}_y, \tau) \end{Bmatrix}.$$

$$\bar{\xi}_{\Delta}^T = \begin{Bmatrix} 0 & \bar{\xi}_c & 0 & \bar{\xi}_y \end{Bmatrix}.$$

Аналогично, в виде одного обобщенного векторного уравнения могут быть представлены уравнения (1.10,1.11,1.13,1.14):

$$\begin{aligned} \dot{\bar{Y}}^l &= \Phi^l(\bar{Y}^l, \bar{u}, \bar{\xi}, t), \bar{Y}(t_0) = \bar{Y}_0 \\ (l &= 1, 2, \dots, l, \dots, N) \end{aligned} \quad (1.20)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{Y}^l &= \begin{pmatrix} \bar{Y}_n \\ \bar{Y}_{nu}^p \\ \bar{Y}_y \\ \bar{Y}_{yu}^k \end{pmatrix}; & \bar{\Phi}^l(\bar{Y}, \bar{u}, \bar{\xi}, t) &= \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_n(\bar{Y}_n, \bar{u}_n, \bar{\xi}_n, t) \\ \bar{\Phi}_{nu}^p(\bar{Y}_n, \bar{Y}_{nu}, \bar{\xi}_{ng}, t) \\ \bar{\Phi}_y(\bar{Y}_y, \bar{u}_y, \bar{\xi}_y, t) \\ \bar{\Phi}_{yu}^k(\bar{Y}_y, \bar{Y}_{yu}, \bar{\xi}_{ug}, t) \end{pmatrix}; \\ \bar{\xi} &= \begin{pmatrix} \bar{\xi}_n \\ \bar{\xi}_{ng} \\ \bar{\xi}_y \\ \bar{\xi}_{ug} \end{pmatrix}; & \bar{u} &= \begin{pmatrix} \bar{u}_n \\ 0 \\ \bar{u}_y \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Векторное уравнение для безынерционных преобразователей запишется в виде

$$\bar{Z}^l = \bar{\varphi}(\bar{Y}_u^l, \bar{\xi}_\delta), \quad (1.21)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{Z}^l &= \begin{pmatrix} \bar{Z}_n^p \\ \bar{Z}_y^k \end{pmatrix}; & \bar{\varphi}(\bar{Y}_u^l, \bar{\xi}_\delta) &= \begin{pmatrix} \bar{\varphi}_n(\bar{Y}_{nu}^p, \bar{\xi}_\delta) \\ \bar{\varphi}_y(\bar{Y}_{yu}^k, \bar{\xi}_{y\delta}) \end{pmatrix}; \\ \bar{Y}_u^l &= \begin{pmatrix} \bar{Y}_{nu}^p \\ \bar{Y}_{yu}^k \end{pmatrix}; & \bar{\xi}_\delta &= \begin{pmatrix} \bar{\xi}_{n\delta} \\ \bar{\xi}_{y\delta} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Рассмотренная математическая модель процесса прицеливания является стохастической и учитывает возможность случайной смены структур в процессе функционирования. В качестве основы формирования управления ЛА и оружием при решении боевых задач рассматривается параметр прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$. Формирование собственно управлений ЛА $\bar{u}_{ла}$ и оружия $\bar{u}_{ор}$ представлено в данной модели обобщенными операторами $B_{ла}$ и $B_{ор}$, как функциями от параметра прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$. Следует заметить, что конкретный вид указанных операторов может быть самый разнообразный. Например, перспективными являются управления, построенные с учетом как параметра прицеливания, так и его производных по текущему времени атаки цели. При этом целесообразно рассматривать процесс прицеливания как функционирование единой целенаправленной многоступенчатой динамической

системы со случайным изменением структуры. Математическое описание такой системы может рассматриваться как основа для построения интегрированных АПрС и дает необходимые предпосылки для создания унифицированного алгоритмического обеспечения.

2. Анализ качества процесса прицеливания

Понятие качества процессов управления, в том числе и процесса прицеливания, является одним из важнейших в инженерной практике. Введение этого понятия позволяет поставить задачу о количественной оценке свойств процесса, что является необходимым условием научного исследования.

Понятие качества процесса должно содержать описание свойств, характеризующих успешность решения поставленных задач в определенных условиях. Применительно к процессу прицеливания такими свойствами могут быть эффективность, надежность (безотказность), точность и другие.

Для количественной оценки качества процесса вводятся показатели (критерии) качества – числа, характеризующие в принятой системе единиц свойства процесса.

Оценка качества процессов составляет содержание задачи их анализа.

Определение процессов, для которых показатель качества принимает экстремальное значение (оптимальных процессов в смысле данного показателя качества), составляет задачу их синтеза.

Характерной особенностью задачи оценки качества процесса прицеливания является необходимость учета различных свойств, определяющих успешность боевого применения. В связи с этим понятие качества является, как правило, многогранным, включающим различные свойства. Поэтому качество процесса прицеливания в достаточно полной мере может быть отражено не одним, а совокупностью показателей качества.

Одним из важнейших свойств процесса прицеливания является точность применения АСП, которая характеризуется ошибкой \bar{r} попадания АСП в цель.

2.1. Структура ошибки попадания АСП в цель

В идеальном случае, когда в результате решения задачи прицеливания условие прицеливания $\bar{\Delta}(T, t) = 0$ выполнено, выпущенные с ЛА по цели АСП попадут в цель. В этом случае ошибка попадания отсутствует. Реально же, в силу влияния различных случайных факторов, указанная ошибка имеет место. При этом АСП, выпущенные в момент выполнения условия прицеливания (1.9), в цель не попадут, а отклонятся от нее на величину \bar{r} .

Действительно, с учетом различных случайных факторов выражение для параметра прицеливания $\bar{\Delta}(T, t)$ может быть записано следующим образом:

$$\bar{\Delta}(T, t) = \bar{\Delta}_u(T, t) + \bar{r}(T, t), \quad (2.1)$$

где $\bar{\Delta}_u(T, t)$ - истинное значение параметра прицеливания.

Анализ выражения (2.1) показывает, что при выполнении условия прицеливания (1.9) истинное значение параметра прицеливания $\bar{\Delta}_u(T, t)$ в нуль не обращается, а равняется ошибке попадания в цель, взятой с обратным знаком

$$\bar{\Delta}_u(T, t) = -\bar{r}(T, t). \quad (2.2)$$

Указанная ошибка может быть представлена в виде векторной суммы ошибок решения отдельных задач боевого применения АВ. В частности, ее можно представить так:

$$\bar{r} = \bar{r}_n + \bar{r}_u + \bar{r}_m, \quad (2.3)$$

где \bar{r}_n - ошибка решения задачи прицеливания (ошибка прицеливания);

\bar{r}_u - ошибка решения задачи наведения управляемых АСП (ошибка наведения);

\bar{r}_m - ошибка, вызванная техническим рассеиванием АСП.

В свою очередь ошибка решения задачи прицеливания \bar{r}_n включает ошибку формирования параметра прицеливания \bar{r}_ϕ и ошибку управления ЛА и оружием при прицеливании \bar{r}_y :

$$\bar{r}_n = \bar{r}_\phi + \bar{r}_y. \quad (2.4)$$

Ошибка формирования параметра прицеливания \bar{r}_ϕ зависит от методической ошибки связанной с различными допущениями, принимаемыми как на этапе математического описания, так и при реализации, от ошибки информационного обеспечения, связанной с погрешностями измерения фазовых координат ЛА, оружия и цели бортовыми измерителями, от ошибки вычисления параметра прицеливания. Она может быть представлена в виде

$$\bar{r}_\phi = \bar{r}_m + \bar{r}_u + \bar{r}_e \quad (2.5)$$

где $\bar{r}_m, \bar{r}_u, \bar{r}_e$ - методическая ошибка, ошибка информационного обеспечения и ошибка вычисления соответственно.

Ошибка управления ЛА и оружием при прицеливании \bar{r}_y обусловлена ошибкой системы управления оружием и привода оружия \bar{r}_{cyo} и ошибкой системы управления летательным аппаратом \bar{r}_{cyla} . Ошибка системы управления летательным аппаратом определяется

ошибками экипажа (при ручном управлении), ошибками системы автоматического управления полетом (при автоматическом управлении), ошибками экипажа и САУ (при директорном управлении). Следовательно, ошибка управления ЛА и оружием при прицеливании может быть записана в виде

$$\bar{r}_y = \bar{r}_{cyo} + \bar{r}_{сула}. \quad (2.6)$$

С учетом выражений (2.4) — (2.6) можно записать общее векторное выражение для ошибки решения задачи прицеливания:

$$\bar{r}_n = \bar{r}_m + \bar{r}_u + \bar{r}_в + \bar{r}_{cyo} + \bar{r}_{сула}. \quad (2.7)$$

Тогда выражение для ошибки боевого применения АСП примет следующий вид:

$$\bar{r} = \bar{r}_m + \bar{r}_u + \bar{r}_в + \bar{r}_{cyo} + \bar{r}_{сула} + \bar{r}_n + \bar{r}_m. \quad (2.8)$$

При необходимости может быть проведена дальнейшая детализация ошибок до необходимого уровня в интересах выяснения более тонкого механизма влияния различных факторов на задачу поражения цели.

2.2. Показатели качества процесса прицеливания

Ошибка \bar{r} непосредственно определяет эффективность боевого применения АСП, поэтому естественным является стремление к ее уменьшению. Это может быть достигнуто за счет повышения точности решения задач прицеливания и наведения, а также уменьшения ошибок, обусловленных техническим рассеиванием. Поскольку ошибка \bar{r} является случайной функцией, то исчерпывающей ее характеристикой является закон распределения, например, плотность вероятности $f(\bar{r})$. Однако, как отмечалось ранее, процесс прицеливания представляет собой систему со случайно изменяющейся структурой. При этом каждой из возможных структур будет соответствовать свой закон распределения ошибки \bar{r} . Следовательно, различным структурам процесса прицеливания будет соответствовать и различная точность применения АСП и их эффективность.

Если в качестве показателя эффективности рассмотреть вероятность поражения цели при нахождении процесса прицеливания в некоторой l -ой возможной структуре ($l=1,2,\dots,N$), то он может быть представлен в виде:

$$B_l = P_l W_l, \quad (2.9)$$

где P_l – вероятность того, что в течение заданного времени t процесс прицеливания находится в l -ой структуре;

W_l – условная вероятность поражения цели (при условии, что процесс прицеливания находится в l -ой структуре);

Условная вероятность поражения цели W_l определяется, как уже отмечалось, через закон поражения цели и закон распределения ошибки \bar{r} в l -й структуре процесса прицеливания:

$$W_l = \int_{-\infty}^{\infty} G(\bar{r}) f^l(\bar{r}) d\bar{r}, \quad (2.10)$$

где $f^l(\bar{r})$ – плотность вероятности ошибки боевого применения АСП в l -й структуре процесса прицеливания.

Поскольку смена структур процесса прицеливания определяется отказами входящих в его состав технических систем, то вероятность P_l является интегральной характеристикой надежности (безотказности) технических систем процесса прицеливания.

Поскольку заранее предугадать, в какой именно структуре будет находиться процесс прицеливания при атаке цели, практически невозможно, то для оценки эффективности поражения цели с учетом случайности структуры процесса прицеливания можно воспользоваться формулой полной вероятности:

$$B = \sum_{l=1}^N B_l = \sum_{l=1}^N P_l W_l, \quad (2.11)$$

где B – полная вероятность поражения цели с учетом того, что процесс прицеливания случайным образом может принять N возможных структур.

Весовой вклад β_l каждой возможной структуры процесса прицеливания в полную вероятность поражения цели определяется соотношением вида:

$$\beta_l = \frac{B_l}{B} = \frac{P_l W_l}{B}. \quad (2.12)$$

Анализ весовых вкладов позволяет оценить эффективность различных структур процесса прицеливания, сделать заключение о целесообразности той или иной структуры при функционировании технических систем, поставить вопрос о целесообразности включения в состав технических систем тех или иных устройств, наметить пути создания минимальной информационной избыточности процесса прицеливания.

Таким образом, за показатель качества процесса прицеливания можно принять обобщенный показатель эффективности вида (2.11), то есть полную вероятность поражения цели B . В этом показателе в неразрывном единстве рассматриваются такие важнейшие свойства

процесса прицеливания как точность и надежность (безотказность), являющиеся определяющими при боевом применении авиационного вооружения.

Заключение

Таким образом, в результате анализа процесса поражения цели есть достаточные основания полагать, что задача поражения является краеугольной в боевом применении авиационного вооружения. На ее основе целесообразно проводить построение любых функциональных систем, обеспечивающих боевое применение АВ. Совокупность взаимосвязанных функциональных систем, предназначенных для решения задач боевого применения авиационного вооружения в интересах поражения цели, представляет собой комплекс авиационного вооружения (КАВ). На основе выше изложенного КАВ должен включать в свой состав, по меньшей мере, следующие элементы:

- авиационное оружие (АО);
- авиационную прицельно-навигационную систему (АПрС);
- систему управления авиационным оружием (СУО);
- систему управления летательным аппаратом (СУЛА).

Заметим, что пока функции КАВ и его элементов рассмотрены лишь с точки зрения конечного и основного результата боевого применения АВ – поражения цели. Само же боевое применение АВ представляет собой сложный процесс, предполагающий решение множества задач на различных этапах. Следовательно, уточнение функционального назначения КАВ и его элементов должно базироваться на глубоком изучении процесса боевого применения в целом. При этом обоснование необходимости решения той или иной задачи комплексом авиационного вооружения и его элементами в процессе боевого применения целесообразно проводить на основе детального выявления факторов, влияющих на основной и главный результат боевого применения авиационного вооружения – поражение цели.

Библиографический список

1. Пашков В. И., Постников А. Г. Внешняя баллистика авиационных ракет и снарядов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1989.
2. Казаков И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. – М.: Наука, 1977.
3. Казаков И. Е., Мальчиков С. В. Анализ стохастических систем в пространстве состояний. – М.: Наука, 1983.

4. Краснов А. М. Основы анализа и синтеза авиационных прицельно-навигационных систем. – М.:ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010.
5. Балугев В. М., Козьменко В. И., Краснов А. М. Аналитическая оценка точности применения авиационных прицельных систем. Пособие по курсовому и дипломному проектированию. – М.:ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1988.
6. Краснов А. М. Вероятностный анализ прицельно-навигационного комплекса как системы со случайной структурой. Научно-методические материалы по прицельно-навигационным комплексам. – М.:ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1988.
7. Краснов А. М. Статистическая теория систем прицеливания и управления вооружением. – М.:ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2003.
8. Краснов А. М. Математическое описание задачи прицеливания с учетом функциональных нарушений в информационной подсистеме. Научно-методический сборник по эксплуатации и ремонту авиационной техники. Выпуск 1315. – ВВИА, 1990.
9. Краснов А. М., Донгаев Г. А., Пермяков Е. М., Щукин А. И., Шашков С. Н., Хисматов Р. Ф., Моисеев А. Г., Давыдов В. И., Сахаров Н. А. Авиационные прицельно-навигационные системы. – М.:ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006.

Сведения об авторе

Краснов Александр Маркелович , Главный конструктор ЗАО «Технологический парк космонавтики ЛИНКОС», профессор , д.т.н., тел.: 8-495-780-68-55,8-903-735-79-93,
e-mail: a_krasnov@inbox.ru