

В.Г. Найденов, доктор технических наук  
А.В. Бочкарев

## **Подход к математической формализации задач обоснования требований к воздушным мишеням и оценки показателей степени адекватности имитации ими летательных объектов при испытаниях сложных систем вооружения**

*В статье предложен новый подход к формализации задач обоснования требований к воздушным мишеням и оценки показателей степени адекватности имитации ими летательных объектов при испытаниях сложных систем вооружения, основанный на использовании математического аппарата функционального анализа. Это позволяет при решении задач такого типа представлять значения требований к мишеням и показателей их качества в виде точек в многомерных функциональных пространствах с метриками, значения которых могут характеризовать показатели степени сходства мишеней и целей. Данный подход может быть успешно применен для совершенствования научно-методического аппарата программно-целевого планирования развития средств мишенных комплексов полигонов, предназначенных для испытаний сложных систем вооружения.*

При испытаниях сложных систем вооружения, как правило, требуется создавать на полигонах специальную мишенную обстановку, которая позволяла бы оценивать тактико-технические характеристики (ТТХ) таких систем в условиях, адекватных условиям их боевого применения.

Для создания на полигонах адекватной мишенной обстановки при испытаниях сложных систем вооружения необходимо иметь методический аппарат обоснования требований к воздушным мишеням, а также оценки показателей степени адекватности (сходства) имитации такими мишенями различных летательных объектов (целей).

В научно-технической литературе освещению такого методического аппарата уделено очень ограниченное внимание.

Как правило, требования к тактико-техническим характеристикам воздушных мишеней задаются графически в прямоугольной системе координат, исходя из характеристик средств воздушного нападения противника, в виде областей, в которых показаны изменения высот полета мишеней в зависимости от дальности или от скорости их полета. Имеют

место и другие графические зависимости, связанные с изменениями перегрузок, действующих на мишени вдоль траекторий их полета, или с изменениями величины эффективной отражающей поверхности мишеней при их движении, а также используются другие графические изображения требований к мишеням в виде различных графиков и зон.

Однако задание в таком виде требований к тактико-техническим характеристикам воздушных мишеней носит графический и рамочный характер и не позволяет предъявлять требования к ТТХ мишеней, имитирующих конкретные траектории полета целей и, вообще, такой подход не позволяет провести понятную математическую формализацию процесса обоснования требований, которые предъявляются к мишеням.

Кроме того, в научно-технической литературе недостаточно полно рассмотрены вопросы, связанные с получением оценок показателей степени адекватности (сходства) имитации мишенями различных типов целей. Как правило, такие показатели носят точечный характер и строятся в виде отношений между значениями требований к мишеням и соот-

ветствующими показателями качества мишеней. При этом такие показатели строятся для граничных значений областей требований, предъявляемых к мишеням [1].

В данной статье предлагается новый подход к математической формализации задач обоснования требований к воздушным мишеням и оценки показателей степени сходства имитации ими целей при испытаниях сложных систем вооружения, основанный на применении математического аппарата функционального анализа, позволяющего при решении задач такого типа представлять значения требований к мишеням, а также показателей их качества в виде точек в многомерных функциональных пространствах с метриками, значения которых могут характеризовать показатели сходства мишеней и целей.

Известно, что основными показателями качества воздушных мишеней являются следующие [1,2]:

- показатель точности имитации воздушными мишенями параметров траекторий полета целей;
- показатель выполнения воздушными мишенями требований по допустимым перегрузкам на траекториях их полета;
- показатель точности имитации воздушными мишенями значений эффективной отражающей поверхности целей вдоль траекторий их полета по направлению к информационным средствам испытываемых систем вооружения.

Поскольку имитация целей воздушными мишенями происходит во времени и в ограниченной области пространства, то рассмотренные показатели качества воздушных мишеней можно рассматривать как набор непрерывных функций, заданных на временном интервале  $[0, T]$ .

С использованием математического аппарата функционального анализа возможно записать в компактной форме требования к воздушным мишеням, вытекающих из ТТХ имитируемых целей.

Так, в евклидовом пространстве вида  $L_2$  можно рассматривать многомерную функцию  $K_u(t)$  с интегрированным квадратом, описывающую изменение координат полета цели и имеющую следующую структуру:

$$K_u(t) = [x_u(t), y_u(t), z_u(t)]^T,$$

где  $\int_0^T K_u^2(t) dt \leq \infty$ ;

$x_u(t), y_u(t), z_u(t)$  – функции изменения на временном интервале  $[0, T]$  координат цели соответственно по осям  $X, Y, Z$  полигонной системы координат.

Для составляющих вектора скорости полета цели в пространстве  $L_2$  можно рассматривать многомерную функцию  $S_u(t)$  с интегрируемым квадратом на интервале  $[0, T]$  следующего вида:

$$S_u(t) = [\dot{x}_u(t), \dot{y}_u(t), \dot{z}_u(t)]^T,$$

где  $\dot{x}_u(t), \dot{y}_u(t), \dot{z}_u(t)$  – функции изменения составляющих вектора скорости цели по траектории полета на временном интервале  $[0, T]$  по осям  $X, Y, Z$  полигонной системы координат.

Многомерная функция  $G_u(t)$ , описывающая в пространстве вида  $L_2$  изменение на промежутке времени  $[0, T]$  перегрузок, действующих на цель, может быть записана в следующем виде:

$$G_u(t) = [g_{x_u}(t), g_{y_u}(t), g_{z_u}(t)]^T,$$

где  $g_{x_u}(t), g_{y_u}(t), g_{z_u}(t)$  – функции изменения перегрузок, действующих на цель в процессе ее полета на временном интервале  $[0, T]$ , соответственно по осям  $X, Y, Z$  полигонной системы координат.

Кроме того, необходимо рассматривать в пространстве  $L_2$  и функцию, описывающую изменение во времени величины эффективной отражающей поверхности цели  $\sigma_u(t)$  в направлении на информационные средства испытываемой системы вооружения.

Аналогичный набор функций в пространстве, характеризующих показатели качества мишеней, имитирующих соответствующую

щие цели, на временном интервале  $[0, T]$  включает:

- многомерную функцию  $K_m(t)$ , характеризующую изменение во времени координат полета мишени на том же временном интервале  $[0, T]$ ;
- многомерную функцию  $S_m(t)$ , характеризующую изменение составляющих вектора скорости мишени на временном интервале  $[0, T]$  по осям  $X, Y, Z$  полигонной системы координат;
- многомерную функцию  $G_m(t)$ , описывающую в пространстве вида  $L_2$  изменение на промежутке времени  $[0, T]$  значений перегрузок, действующих на мишень по осям  $X, Y, Z$  полигонной системы координат;
- функцию  $\sigma_u(t)$  в пространстве  $L_2$ , описывающую изменение во времени величины эффективной отражающей поверхности мишени в направлении на информационные средства испытываемой системы вооружения.

Учитывая, что при испытаниях конкретной системы вооружения набор функций, описывающих ТТХ целей, будет хотя и конечным, но достаточно большим и при этом проекции элементарных функций на плоскости  $XOZ, XOY, ZOY$  полигонной системы координат могут даже пересекаться, то и усложняется математическая формализация задачи обоснования требований к мишеням.

Для преодоления отмеченных трудностей при проведении математической формализации задачи обоснования требований к воздушным мишеням целесообразно применить математический аппарат функционального анализа [3, 4, 5].

В этом случае имеется возможность провести разложение реализаций функций, характеризующих ТТХ целей в многомерном евклидовом пространстве вида  $L_2$ , по системе линейно независимых ортогональных базисных функций и представить их в виде со-

вокупности точек, образующих область требований к воздушным мишеням.

Такой системой базисных функций в пространстве вида  $L_2$ , например, может быть линейно независимая ортогональная система тригонометрических базисов вида

$$\left\{ 1, \cos \frac{\pi kt}{T}, \sin \frac{\pi kt}{T} \right\}, \text{ где } k=1, 2, 3, \dots$$

Такое разложение функций представляет собой не что иное, как разложение в бесконечный ряд Фурье.

Так, ряд Фурье, например, для функции  $\varphi(t)$  в пределах временного интервала  $[0, T]$  запишется в следующем виде:

$$\varphi(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{\pi kt}{T} \right),$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \varphi(t) dt \quad (1)$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \varphi(t) \cos \frac{\pi kt}{T} dt, \quad k=1, 2, 3, \dots; \quad (2)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \varphi(t) \sin \frac{\pi kt}{T} dt, \quad k=1, 2, 3, \dots; \quad (3)$$

Ограничив длину ряда Фурье до члена  $k=M$ , при котором он с достаточной степенью точности описывает функцию  $\varphi(t)$  на временном интервале  $\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$ , можно вычислить коэффициенты, стоящие при базисных функциях  $\left\{ 1, \cos \frac{\pi kt}{T}, \sin \frac{\pi kt}{T} \right\}$ , где  $k=1, 2, \dots, M$ .

Поскольку эта система базисных функций является ортогональной, то найденные коэффициенты и будут координатами функции  $\varphi(t)$  в системе базисных функций

$$\left\{ 1, \cos \frac{\pi kt}{T}, \sin \frac{\pi kt}{T} \right\}, \text{ при } k=1, 2, \dots, M.$$

Таким образом, возможно функцию  $\varphi(t)$  представить в виде точки в функциональном

пространстве в приведенной системе базисных функций.

На рисунке 1 приведено изображение области требований к мишеням в пятимерном пространстве  $L_2$  с линейно независимым и

ортогональным тригонометрическим базисом для функций  $f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t), f_5(t)$ , описывающих в одной из плоскостей пять возможных траекторий полета целей на временном отрезке  $[0, T]$ .

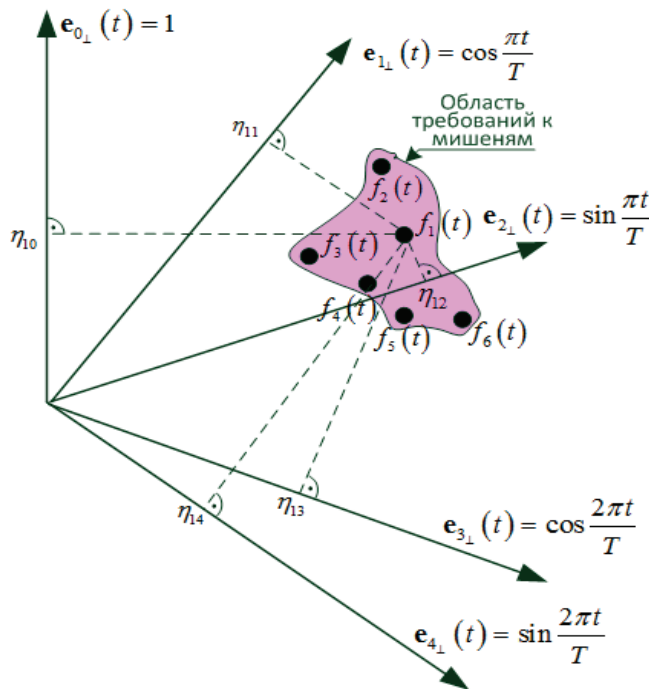


Рисунок 1 – Графическое изображение области требований к мишеням в пятимерном пространстве с ортогональным тригонометрическим базисом для функций, содержащих два члена ряда Фурье

На рисунке 1 символами  $\eta_{10}, \eta_{11}, \eta_{12}, \eta_{13}, \eta_{14}$  обозначены проекции функции  $f_1(t)$  на рассматриваемую ортогональную систему тригонометрических базисных функций.

Необходимо отметить, что, если координаты конкретной траектории полета цели на временном интервале  $[0, T]$  описываются тремя функциями  $x_u(t), y_u(t), z_u(t)$ , то в функциональном пространстве будут представлены три различные точки, принадлежащие этим функциям.

Предположим, что цели в зоне активных действий испытываемой системы вооружения на интервале времени  $[0, T]$  могут летать по ограниченному количеству траекторий  $P$ , тогда в функциональном пространстве вида  $L_2$  будет наблюдаться три группы точек по  $P$

штук в каждой. При этом каждая группа точек будет представлять собой область требований к воздушным мишеням по одной из координат траекторий полета мишеней. Тогда можно рассматривать три множества  $A_i (i=1,2,3)$ , определяющие требования к координатам полета мишеней, имитирующих соответствующие цели.

Аналогичным образом могут быть построены множества точек, определяющих требования к другим показателям качества применяемых мишеней, таким как параметры движения целей по составляющим вектора скорости, допустимые значения перегрузок, действующих на мишени на траекториях их полета, а также точности имитации значений эффективной отражающей поверхности целей.

Однако представление траекторий полета целей или мишеней в таком тригонометрическом базисе является затруднительным, поскольку для нахождения координат раскладываемых функций необходимо проводить достаточно громоздкие интегральные вычисления. Кроме того, при повышении точности разложения функции в ряд Фурье путем добавления новых членов ряда происходит удвоенное увеличение размерности системы базисных функций.

Необходимо отметить, что в некоторых случаях бывает удобнее проецировать функции, характеризующие требования к мишеням либо показатели качества мишеней, с неортогональной системой базисных функций в вычисленную заранее ортогональную систему базисных функций.

Так известно, что функции, описывающие изменения во времени значений параметров движения и перегрузок, действующих на цели и мишени, могут быть получены с использованием дискретных данных, получаемых с использованием средств траекторных и радиотелеметрических измерений.

Для получения непрерывных функций по соответствующим дискретным значениям на интервале времени  $[0, T]$  может применяться метод аппроксимации этих данных с использованием непрерывных полиномов следующего вида [6]:

$$\psi(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n t^n \quad (1)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициенты полинома;

$t$  – непрерывная ось времени;

$N$  – степень аппроксимирующего полинома.

Функции вида (4) могут рассматриваться в пространстве вида  $L_2$  как функции с интегрируемым квадратом и с линейно независимой, но неортогональной системой базисных функций вида:  $\mathbf{e}_0=1, \mathbf{e}_1=t, \mathbf{e}_2=t^2, \dots, \mathbf{e}_N=t^N$ .

Для функций вида (4) представляет сложность отыскание значений ее координат в функциональном пространстве вида  $L_2$ , что

затрудняет проводить сравнение требований, предъявляемых к мишеням, с показателями качества таких мишеней.

Для вычисления координат функций вида  $\psi(t)$  в пространстве вида  $L_2$  необходимо провести преобразование неортогональной системы базисных функций в ортогональную систему с использованием, например, процедуры ортогонализации Грама-Шмидта [5].

Так, имея функцию в системе линейно независимых, но неортогональных базисных функций  $\{t^n\}$  при  $n=0,1,2,\dots$  необходимо получить координаты этой функции в линейно независимой и ортогональной системе базисных функций  $\{\mathbf{e}_{n_i}(t)\}$  при  $n=0,1,2,\dots$ .

Согласно процедуре Грама-Шмидта ортогональные базисные функции  $\{\mathbf{e}_{n_i}(t)\}$  могут быть получены с использованием следующих выражений:

$$\mathbf{e}_{0_i}(t) = \mathbf{e}_0(t); \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_{n_i}(t) = \mathbf{e}_n(t) - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{n_i} \mathbf{e}_{i_i}(t); \quad (6)$$

$$\text{где } \lambda_{n_i} = \frac{(\mathbf{e}_n(t), \mathbf{e}_{i_i}(t))}{\|\mathbf{e}_{i_i}(t)\|^2} \quad (7)$$

В выражении (7) соотношение  $(\mathbf{e}_n(t), \mathbf{e}_{i_i}(t))$  представляет собой скалярное произведение  $n$ -ой базисной функции из неортогональной системы на  $i$ -тую базисную функцию искомого ортогонального системы, а выражение  $\|\mathbf{e}_{i_i}(t)\|^2$  – квадрат нормы базисной функции  $\mathbf{e}_{i_i}(t)$ .

Как правило, функции, характеризующие показатели качества мишеней и требования к ним, могут быть достаточно точно описаны полиномами третьей степени вида

$$\psi_3(t) = \sum_{n=0}^3 \alpha_n t^n.$$

Определим для этого случая значения соответствующей системы ортогональных базисных функций.

Так, имеем исходную систему неортогональных базисных функций вида  $\{1, t, t^2, t^3\}$ . При этом пусть первая базисная функция бу-

дет соответствовать элементу с номером 0, вторая базисная функция будет соответствовать номеру 1 и т. д.

Тогда нулевая базисная функция  $e_{0_1}(t)$  из новой ортогональной системы определяется как  $e_{0_1}(t)=1$ .

$$e_{1_1}(t) = t + \lambda_{10} e_{0_1}(t) = t - \frac{(t, 1)}{\|1\|^2} = t - \frac{\int_0^T t dt}{\int_0^T dt} = t - \frac{T}{2}.$$

Вторая базисная функция  $e_{2_1}(t)$  для интервала времени  $[0, T]$  может быть найдена по формуле:

$$e_{2_1}(t) = t^2 + \lambda_{21} e_{1_1}(t) + \lambda_{20} e_{0_1}(t) = t^2 - \frac{\left(t^2, t - \frac{T}{2}\right)}{\left\|t - \frac{T}{2}\right\|^2} \left(t - \frac{T}{2}\right) - \frac{(t^2, 1)}{\|1\|^2} = t^2 - T \cdot t + \frac{3T^3 - 4T}{6}.$$

Третья базисная функция  $e_{3_1}(t)$  для интервала времени  $[0, T]$  находится следующим образом:

$$e_{3_1}(t) = t^3 + \lambda_{32} e_{2_1}(t) + \lambda_{31} e_{1_1}(t) + \lambda_{30} e_{0_1}(t) = t^3 + \lambda_{32} \left(t^2 - T \cdot t + \frac{3T^3 - 4T}{6}\right) + \lambda_{31} \left(t - \frac{T}{2}\right) + \lambda_{30},$$

где  $\lambda_{32} = - \frac{(t^3, e_{2_1}(t))}{\|e_{2_1}(t)\|^2};$

$$\lambda_{31} = - \frac{(t^3, e_{1_1}(t))}{\|e_{1_1}(t)\|^2};$$

$$\lambda_{30} = - \frac{(t, e_{0_1}(t))}{\|e_{0_1}(t)\|^2}.$$

Подставляя в последние три формулы выражения для найденных значений базисных функций  $e_{2_1}(t)$ ,  $e_{1_1}(t)$  и  $e_{0_1}(t)$ , получим следующие выражения для коэффициентов  $\lambda_{32}$ ,  $\lambda_{31}$  и  $\lambda_{30}$ :

$$\lambda_{32} = - \frac{\int_0^T \left(t^5 - T \cdot t^4 + \frac{3T^3 - 4T}{6} t^3\right) dt}{\int_0^T \left(t^2 - T \cdot t + \frac{3T^3 - 4T}{6} t\right)^2 dt} = - \frac{45T^7 - 15T^6 - 60T^5}{90T^7 + 60T^6 - 108T^5 - 80T^4 + 160T^3};$$

$$\lambda_{31} = - \frac{\int_0^T \left(t^4 - \frac{T}{2} t^3\right) dt}{\int_0^T \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 dt} = - \frac{9T^2}{10}; \quad \lambda_{30} = - \frac{\int_0^T (t^3) dt}{\int_0^T dt} = - \frac{T^3}{4}.$$

После нахождения системы базисных функций  $\{e_{0_1}(t), e_{1_1}(t), e_{2_1}(t), e_{3_1}(t)\}$  в пространстве  $L_2$  можно найти координаты

$\xi_n$  ( $n=0,1,2,3$ ) функции  $\psi_3(t)$  на интервале времени  $[0, T]$  в новой системе базисов с использованием следующей известной формулы:

$$\xi_n = \frac{\left( \sum_{n=0}^3 \alpha_n t^n, \mathbf{e}_{n_1}(t) \right)}{\|\mathbf{e}_{n_1}(t)\|^2} = \frac{(\alpha_0, \mathbf{e}_{n_1}(t)) + (\alpha_1 t, \mathbf{e}_{n_1}(t)) + (\alpha_2 t^2, \mathbf{e}_{n_1}(t)) + (\alpha_3 t^3, \mathbf{e}_{n_1}(t))}{\|\mathbf{e}_{n_1}(t)\|^2},$$

где  $n=0,1,2,3$ .

Используя универсальный математический пакет Maple, были получены конкретные выражения для вычисления координат  $\xi_n$  ( $n=0,1,2,3$ ). Подставляя в данные выражения значения коэффициентов полиномов (функций), аппроксимирующих траектории полета целей и мишеней, а также значение предела интегрирования  $T$ , можно вычислить координаты рассматриваемых функций в найденной системе ортогональных базисных функций. Это позволит удобно проводить сравнение характеристик мишеней и имитируемых ими целей.

При увеличении степени аппроксимирующего полинома будет возрастать и размерность системы базисных функций и соответственно количество координат проецируемых в этой системе функций, которые описывают

характеристики целей и показателей качества имитирующих их мишеней.

Таким образом, с использованием математического аппарата функционального анализа можно оценить координаты функций, описывающих характеристики целей и показателей качества имитирующих их мишеней в линейно независимой ортогональной системе базисных функций, и тем самым формализовать задачу нахождения областей требований к мишеням и областей возможностей мишеней по имитации соответствующих целей.

На рисунке 2 показано графическое изображение области требований к мишеням и областей возможностей мишеней двух типов в ортогональной системе базисных функций для случая аппроксимации функций, описывающих характеристики целей и показатели качества имитирующих их мишеней, полиномом второй степени.

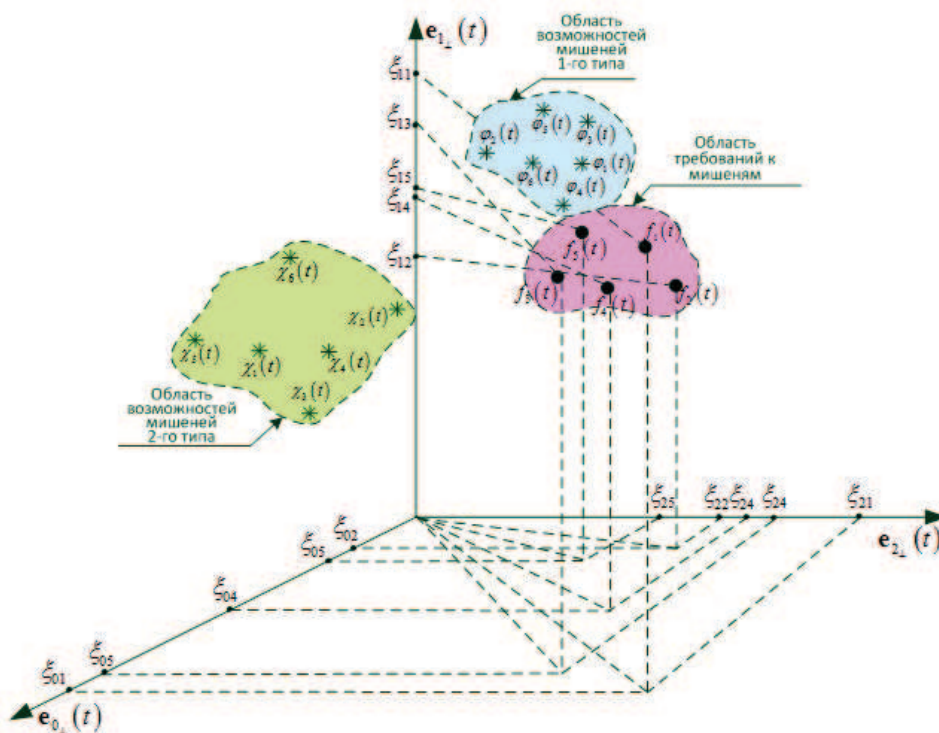


Рисунок 2 – Графическое изображение области требований к мишеням и областей возможностей мишеней двух типов в ортогональной системе базисных функций

Из рисунка 2 видно, что область возможностей мишеней 1-го типа лежит ближе к области требований к мишеням, чем область возможностей мишеней 2-го типа. Это означает то, что мишени 1-го типа будут в лучшей степени имитировать конкретную цель противника. Однако для проведения таких сравнительных операций необходимо иметь конкретные значения показателей, характеризующих степень адекватности (сходства) имитации мишенями конкретной цели противника.

В качестве таких показателей степени сходства имитации воздушной мишенью конкретной цели можно использовать метрику пространства  $L_2$  для рассмотренных ранее непрерывных функций с интегрируемым квадратом, определенных на временном отрезке  $[0, T]$ , следующего вида:

$$d_K[K_u(t), K_M(t)] = \left\{ \int_0^T [K_u(t) - K_M(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}};$$

$$d_S[S_u(t), S_M(t)] = \left\{ \int_0^T [S_u(t) - S_M(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (8)$$

$$d_G[G_u(t), G_M(t)] = \left\{ \int_0^T [G_u(t) - G_M(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}};$$

$$d_\sigma[\sigma_u(t), \sigma_M(t)] = \left\{ \int_0^T [\sigma_u(t) - \sigma_M(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}},$$

где  $d_K[K_u(t), K_M(t)]$  – векторный показатель степени сходства имитации цели мишенью по осям координат  $X, Y, Z$  вдоль траектории полета цели;

$d_S[S_u(t), S_M(t)]$  – векторный показатель степени сходства имитации цели мишенью по составляющим вектора скорости вдоль траектории полета цели;

$d_G[G_u(t), G_M(t)]$  – векторный показатель степени сходства имитации цели мишенью по значениям перегрузок, действующих на цель, по осям  $X, Y, Z$  полигонной системы координат вдоль траектории полета цели;

$d_\sigma[\sigma_u(t), \sigma_M(t)]$  – показатель степени адекватности имитации цели мишенью по эффективной отражающей поверхности вдоль траектории полета цели по направлению на информационное средство испытываемой системы вооружения.

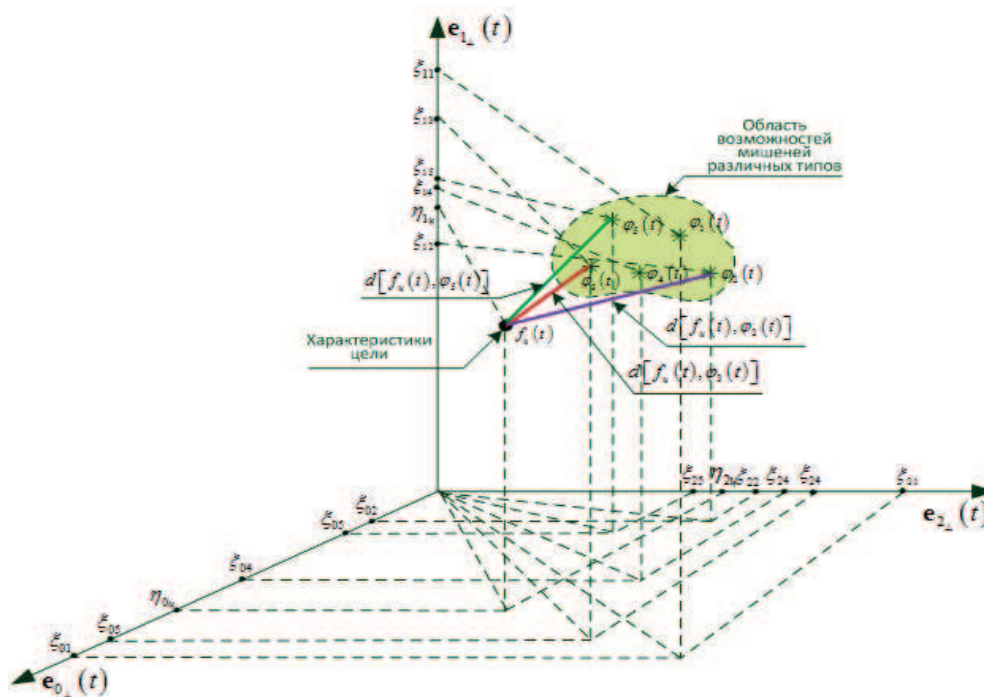


Рисунок 3 – Графическое изображение показателей степени адекватности имитации мишенями трех типов одной цели в ортогональной системе базисных функций



Первые три показателя, определяемые выражениями (8), представляют собой площади между проекциями рассматриваемых функций на плоскости  $XOZ, XOY, ZOY$  полигонной системы координат и удовлетворяют трем известным аксиомам метрики (аксиомам тождества, симметрии и треугольника).

Практическое использование рассмотренных показателей степени сходства имитации воздушной мишенью конкретной цели, описываемых выражениями (8), не позволяет получить достоверной оценки различия между характеристиками целей и мишеней. Это связано с тем, что можно вычислить на временном интервале  $[0, T]$  площади между проекциями соответствующих рассматриваемых функций на плоскости  $XOZ, XOY, ZOY$  полигонной системы координат, однако нет возможности оценить площадь между этими функциями по кратчайшему расстоянию между точками этих функций в пространстве.

Задачу оценки показателей степени сходства имитации воздушными мишенями

$$\Theta = d_x[f_u(t), \varphi_2(t)] + d_y[f_u(t), \varphi_2(t)] + d_z[f_u(t), \varphi_2(t)],$$

где  $d_x[f_u(t), \varphi_2(t)]$  и  $d_z[f_u(t), \varphi_2(t)]$  – метрики между функциями  $f_u(t)$  и  $\varphi_2(t)$  соответственно по координатам  $u$  и  $z$ .

В случае  $N$ -мерной ортогональной системы базисных функций метрика  $d^N[f_u(t), \varphi_2(t)]$  между функциями  $f_u(t)$  и  $\varphi_2(t)$  оценивается по следующей формуле:

$$d^N[f_u(t), \varphi_2(t)] = \left[ \sum_{n=1}^N (\eta_{u_n} - \xi_{m_n})^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

где  $\eta_{u_n}$  ( $n = \overline{1 \dots N}$ ) – координаты функции  $f_u(t)$ , описывающей траекторию полета цели в  $N$ -мерной ортогональной системе базисных функций;

$\xi_{m_n}$  ( $n = \overline{1 \dots N}$ ) – координаты функции  $\varphi_2(t)$ , описывающей траекторию полета мишени 2-го типа в  $N$ -мерной ортогональной системе базисных функций.

Отсюда видно, что, используя математический аппарат функционального анализа, мож-

конкретной цели достаточно легко можно решить путем разложения функций, описывающих показатели качества мишеней и характеристики цели в линейно независимой и ортогональной системе базисных функций. Так, на рисунке 3 показано в трехмерном пространстве графическое изображение показателей степени адекватности имитации мишенями трех типов одной цели в ортогональной системе базисных функций.

Так, например, показатель  $\Theta_x$  степени адекватности имитации мишенью 2-го типа траектории полета цели по координате  $x$  будет определяться соответствующей метрикой  $d_x[f_u(t), \varphi_2(t)]$  пространства  $L_2$ , т. е.

$$\Theta_x = d_x[f_u(t), \varphi_2(t)],$$

где  $f_u(t)$  и  $\varphi_2(t)$  – функции, описывающие на временном отрезке изменение координат траекторий полета соответственно цели и мишени 2-го типа.

Тогда обобщенный скалярный показатель  $\Theta$  степени адекватности имитации мишенью траектории полета цели запишется в виде:

но достаточно прозрачно формализовать задачу оценки показателей степени адекватности (сходства) имитации мишенями соответствующих целей противника и рассчитать их значения.

Таким образом, в статье предложен новый подход к формализации задач обоснования требований к воздушным мишеням и оценки показателей степени адекватности имитации ими летательных объектов при испытаниях сложных систем вооружения, основанный на использовании математического аппарата функционального анализа, позволяющего при решении задач такого типа представлять значения требований к мишеням и показателей их качества в виде точек в многомерных функциональных пространствах с метриками, значения которых могут характеризовать показатели степени сходства мишеней и целей.

Приведенный в статье подход может быть успешно применен для совершенствования

научно-методического аппарата программно-целевого планирования развития средств миссионных комплексов полигонов, предназна-

ченных для испытаний сложных систем вооружения.

#### **Список использованных источников**

1. Буренок В.М., Найденов В.Г. Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний вооружения, военной с специальной техники. – М.: Граница, 2006. – 264 с.
2. Гальцов Е.М. Методология обоснования задач испытаний и перспектив развития полигонного испытательного комплекса Министерства обороны Российской Федерации / Е.М. Гальцов, В.Н. Минаев, А.Т. Тунгуспаев. – М.: ФГУП «ВИМИ», 2007. – 258 с.
3. Пугачев В.С. Лекции по функциональному анализу. – М.: МАИ, 1996. – 744 с.
4. Федоров В.М. Лекции по функциональному анализу. – М.: Издательство механико-математического факультета МГУ, 2004. – 96 с.
5. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. 7-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 572 с.
6. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Советское радио, 1978. – 384 с.