

УДК 629.735.33

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О СООТНОШЕНИИ ФОРМАЛЬНОГО И НЕФОРМАЛЬНОГО ПРИ РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Л.Н. ЕЛИСОВ

В работе представлен авторский взгляд и некоторые замечания о проблеме решения оптимизационных задач в области авиационной безопасности, связанной с непреодолимыми трудностями формализации и математической интерпретации предметной области при постановке таких задач. Показано, что подавляющее большинство таких задач связано с решением конфликтных ситуаций. Теория конфликта дает аналитическое решение только в простейших случаях. Для остальных предлагается использовать эвристический подход.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, предметная область, авиационная безопасность, лингвистическое описание, математическая формализация, математические методы, теория принятия решений, эвристические алгоритмы.

Предметная область научной дисциплины «Авиационная безопасность» формируется в последние десятилетия и этот процесс далеко не завершен. Научные исследования в данной предметной области проводятся в инициативном порядке и не всегда соответствуют важности и сложности тех проблем и задач, которые здесь постепенно накапливаются и не находят своего решения. Это связано, прежде всего, с той спецификой предметной области, которая характерна для безопасности вообще и в частности для авиационной безопасности. Анализ этой специфики дает возможность обозначить некоторый перечень проблем, с которыми сталкивается исследователь, пытающийся оптимизировать процессы и процедуры в области авиационной безопасности.

1. Авиационная безопасность понимается как состояние защищенности гражданской авиации от несанкционированного вмешательства в ее деятельность. Если это так, то любое исследование в области авиационной безопасности предполагает анализ предметной области как некоторого состояния субъектов безопасности. Проблема состоит в том, что состояние как объект исследования в данном случае представляет собой достаточно сложное понятие, описание которого, даже лингвистическое, затруднено по следующим причинам: в основе понятия лежит конфликт, разрешение которого и есть искомое состояние; стороны конфликта как субъекты противостояния конфликтующих сторон представляют собой весьма сложные объекты с существенной неопределенностью в их описании; параметры конфликта достаточно многочисленны, имеют различную физическую природу, трудноопределимы и далеко не всегда подлежат идентификации; динамика конфликта относится к области слабоизученных дисциплин.

2. Управление авиационной безопасностью в подавляющем большинстве случаев понимается как процедура нормативного управления в системе государственного регулирования деятельности в области гражданской авиации. Проблема здесь в том, что оптимизировать процедуры управления в классическом понимании этого процесса не представляется возможным, поскольку критерии оптимизации достаточно размыты, практически не подлежат формализации и не отображаются в количественном эквиваленте.

3. Система обеспечения авиационной безопасности объектов гражданской авиации по своим функциям, составу и структуре относится к классу сложных систем в терминологии системотехники, т.е. ни одна часть системы не обладает системным свойством при любом способе ее членения. Такие системы уникальны, слабо предсказуемы, стационарны и целесообразны. Функциональное, морфологическое и информационное описание таких систем связаны с различными аспектами поведения ее входов и выходов в условиях, когда описание самого входа и выхода реализуется в условиях неопределенности и непредсказуемости.

Моделирование сложных систем связано с непреодолимыми трудностями методологии и формализации.

Представленный перечень проблем не может рассматриваться как исчерпывающий, однако для целей настоящей статьи более важно рассмотреть предметную сущность этих проблем.

В работе [1] сделана попытка создания теории конфликта. Авторы рассматривают абстрактный конфликт, отличающийся от реального определенными ограничениями на ресурсы сторон и на управления:

$$\begin{aligned} {}_1W &= {}_1H({}_1x(t), {}_1U(t), {}_1V(t), {}_1T) \leq {}_1W_*; \\ {}_2W &= {}_2H({}_2x(t), {}_2U(t), {}_2V(t), {}_2T) \leq {}_2W_*. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ${}_1W, {}_2W$ – множества различных используемых ресурсов сторон (систем ${}_1S, {}_2S$); ${}_1W_*, {}_2W_*$ – множества ограничений на ресурсы; ${}_1H, {}_2H$ – операторы; ${}_1U, {}_2U, {}_1V, {}_2V$ – области возможных управлений.

Если операторы ${}_1H, {}_2H$ – аналитические функции, то:

$$\begin{aligned} {}_1W({}_1x(t), {}_1u(t), {}_1v(t), {}_1T) &\leq {}_1W_*; \\ {}_2W({}_2x(t), {}_2u(t), {}_2v(t), {}_2T) &\leq {}_2W_*. \end{aligned} \quad (2)$$

Полное исследование конфликта предполагает совместное рассмотрение всех вариантов, на основании чего определяется ценность информации и целесообразность такого перераспределения сторонами своих ресурсов, при котором часть его тратится на получение дополнительной информации о ситуации. Это приводит к изменению операторов ${}_iH$, а уравнения изменяются следующим образом

$${}_iW = {}_iH^*({}_ix(t), {}_jx(t), {}_iU(t), {}_iV(t), {}_iT). \quad (3)$$

Однозначно сформулировать уравнения реального конфликта с помощью аналитических функций для сложных систем удается редко [2].

Универсальный способ выявления и исследования конфликта – обоснование и формирование системной модели ситуации. При наличии модели конфликт определяется достаточно точно, но все сложности как раз и сосредоточены в формировании модели. Многокритериальные конфликты оптимально неразрешимы.

Авторы предлагают типовые уравнения реального конфликта, предполагая наличие K конфликтующих сторон, каждая из которых обладает автономными ресурсами со своим функционалом эффективности (фрагмент):

$$\begin{aligned} {}_i\dot{x}(t) &= {}_if(t, \{ {}_ix(t) \}, \{ {}_iJ(t) \}, {}_iu(t, {}_i\tau_u, {}_iW(t), {}_iZ, \{ {}_jv(t, {}_j\tau_v, {}_jW(t), {}_jZ) \})), \quad j \neq i, i = \overline{1, K}; \\ {}_jZ &= {}_jZ({}_jX(t), {}_jT); \quad {}_i\mathcal{E} = {}_i\mathcal{E}({}_iZ({}_iT), {}_iT); \\ {}_ix &= \{ {}_ix_l \}; \quad l = \overline{1, n_i}; \quad x = \{ {}_ix \}; \quad {}_i\tau_u = {}_i\tau_u({}_iW(t)); \quad {}_j\tau_v = {}_j\tau_v({}_jW(t)). \end{aligned}$$

$${}_j\dot{x}(l) = {}_jf(t, \{ {}_jx(t) \}, \{ {}_jJ(t) \}, {}_ju(t, {}_j\tau_u, {}_jW(t), {}_jZ), \{ {}_sv(t, {}_s\tau_v, {}_sW(t), {}_sZ) \}), \quad s = \overline{1, r} \quad ({}_sv = {}_iv);$$

$${}_j\dot{x}(l) = {}_jf(t, \{ {}_jx(t) \}, \{ {}_jJ(t) \}, {}_ju(t, {}_j\tau_u, {}_jW(t), {}_jZ), \{ {}_sv(t, {}_s\tau_v, {}_sW(t), {}_sZ) \});$$

$${}_jZ = {}_jZ({}_jx(t), {}_jT); \quad {}_j\mathcal{E} = {}_j\mathcal{E}({}_jZ({}_jT), {}_jT);$$

$${}_jZ = {}_jZ({}_jx(t), {}_jT), \quad {}_j\mathcal{E} = {}_j\mathcal{E}({}_jZ({}_jT), {}_jT), \quad (4)$$

где ${}_ix = \{ {}_ix_R \}$, $R = \overline{1, K}$ – множество процессов в i -й системе; ${}_ix(t)$ – множество процессов во всех K конфликтующих системах; $\{ {}_iJ \}$ – множество функций ${}_iJ$ в K конфликтующих системах.

Выражение (4) достаточно наглядно показывает, что информационность такого подхода весьма ограничена, а аналитическое решение возможно только в простейших ситуациях.

Наиболее простой моделью конфликта, применяемой для исследования сложных систем, является модель парной антагонистической игры с нулевой суммой [3; 4]. В ней предполагается, что имеются две противоборствующие стороны, каждая из которых может пользоваться определенной стратегией, под которой понимается план действия стороны. Стратегией первой стороны является выбор варианта системы (X_i), стратегией второй стороны является выбор варианта противодействия (Y_j). В результате применения стратегий при многократном повторении игры первая сторона получает выигрыш $W_1 (X_i, Y_j)$, а вторая сторона – выигрыш $W_2 (X_i, Y_j)$. В рассматриваемых моделях игр с нулевой суммой $W_1 (X_i, Y_j) + W_2 (X_i, Y_j) = 0$ и, следовательно, $W_1 (X_i, Y_j) = - W_2 (X_i, Y_j)$. Обозначим через $w_{ij}, W_1 (X_i, Y_j) = \frac{1}{2}W_2 (X_i, Y_j)$. В качестве выигрыша выступает значение целевой функции.

Оптимальные стратегии сторон определяются на основе принципа разумного противника. Разумность противника означает, что в ответ на любую стратегию первой стороны он будет применять такую стратегию, при которой первой стороне обеспечивается минимальный выигрыш, т.е. максимально возможный гарантированный выигрыш для стороны 1 называется нижней ценой игры и определяется выражением

$$\alpha - \max_i \min_j w_{ij} . \tag{5}$$

Противник (сторона 2) выбирает свою оптимальную стратегию с учетом разумности стороны 1, при этом потери стороны 2 называются верхней ценой игры и определяются выражением

$$\alpha - \max_j \min_i w_{ij} . \tag{6}$$

При этом под выигрышем понимается его математическое ожидание. Если обозначить вероятности применения i -й стратегии P_i , то математическое ожидание выигрыша при применении противником некоторой стратегии Y_j определяется выражением

$$\sum_{i=1}^m w_{ij} P_i . \tag{7}$$

В соответствии с принципом разумного противника первая сторона может рассчитывать на то, что противник позволит получить лишь

$$\min \left(\begin{matrix} m & m & m \\ \sum_{i=1} w_{ij} P_i; & \sum_{i=1} w_{ij} P_i; & \dots, & \sum_{i=1} w_{ij} P_i \end{matrix} \right) . \tag{8}$$

Тогда математическое ожидание выигрыша стороны 1 равно

$$\max_{P_i} \left\{ \min \left(\begin{matrix} m & m & m \\ \sum_{i=1} w_{ij} p^*_i; & \sum_{i=1} w_{ij} p^*_i; & \dots, & \sum_{i=1} w_{ij} p^*_i \end{matrix} \right) \right\} , \tag{9}$$

где $p^* = \{p^*_1, p^*_2, \dots, p^*_i, \dots, p^*_m\}$ – оптимальная смешанная стратегия первой стороны; v^* – цена игры; $\sum_{i=1}^m p_i = 1$.

Аналогичное выражение можно записать и для второй стороны

$$\max_{q_i} \left\{ \min \left(\begin{matrix} m & m & m \\ \sum_{i=1} w_{ij} q^*_i; & \sum_{i=1} w_{ij} q^*_i; & \dots, & \sum_{i=1} w_{ij} q^*_i \end{matrix} \right) \right\} , \tag{10}$$

где $q^* = \{q^*_1, q^*_2, \dots, q^*_v, \dots, q^*_m\}$ – оптимальная стратегия второй стороны.

Таким образом, теория игр позволяет:

- структурировать задачу, представить ее в обозримом виде, найти области количественных оценок, упорядочений, предпочтений и неопределенности, выявить доминирующие стратегии, если они существуют;
- решить задачи, которые описываются стохастическими моделями;
- выявить возможность достижения соглашения и исследовать поведение систем, способных к соглашению.

Для реальных конфликтов этого совершенно недостаточно: теория игр как аппарат страдает концептуальной неполнотой. Теория игр ищет решение, оптимальное или рациональное в среднем, в то время как конфликты ситуационны и уникальны. Теория игр исходит из принципа минимума среднего риска, что совершенно неприемлемо для конфликта. Теория игр далеко не всегда дает достоверные результаты и не может быть применена в полной мере в силу довольно высокой степени формализации и ряда ограничений, вводимых в модели и недостаточно полно отражающих реальные ситуации.

В работе [1] рассмотрен конфликт в предположении, что стороны действуют только исходя из текущей ситуации, игнорируя предысторию. Тогда можно применить марковскую модель конфликта. Действие одной системы приводит к ответным изменениям свойств и последующему действию другой стороны. Каждое действие приносит некоторый (частный) выигрыш; из частных выигрышей складывается результирующий выигрыш (проигрыш). Количественная мера оценки состояний конфликта – плотность распределения вероятностей состояния частных и результирующего выигрышей. Данный подход предложен Ю.С. Сухоруковым и исследован автором в работах [5; 7].

Аналитически конфликт может быть описан на основе следующего общего соотношения для полумарковских процессов (фрагмент)

$$\tilde{B}_j(t) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \int_0^t \tilde{B}_i(\tau) w_{ij}(t-\tau) d\tau, \quad (11)$$

где $\tilde{B}_i, i = \overline{1, n}$ – плотность переходов в предыдущие состояния; P_{ij}, w_{ij} – соответственно переходная вероятность и плотность вероятностей времени перехода из состояния i в j . Введя преобразование Лапласа, получим операторное выражение

$$\tilde{B}_j(s) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \tilde{B}_i(s) W_{ij}(s), \quad (12)$$

где $B_j(s), B_i(s), W_{ij}(s)$ – преобразования Лапласа от функций $B_j(t), B_i(t), w_{ij}(t)$ соответственно; $W_{ij}(s)$ – вероятностная передаточная функция из состояния i в j .

Модель справедлива и по отношению к $\overline{B}_i(t)$ – среднему количеству переходов в состояние i

$$\overline{B}_i(t) = \int_0^t \tilde{B}_i(\tau) d\tau. \quad (13)$$

Для поглощающих состояний вероятность пребывания в нем равна среднему, $B_i(t) = \overline{B}_i(t)$, если i – поглощающее состояние. Для остальных состояний

$$B_i(t) = \int_0^t \left[1 - \sum_{r \neq i} P_{ir} W_{ir}(t-\tau) \right] \tilde{B}_i(\tau) d\tau, \quad (14)$$

где $W_{ir}(t) = \int_0^t w_{ir}(\tau) d\tau, \quad r = \overline{1, m}, r \neq i,$

отсюда
$$B_i(t) = \bar{B}_i(t) - \sum_{r=1}^m \bar{B}_{ir}(t), \quad (15)$$

где $\bar{B}_{ir}(t)$ – среднее количество переходов в состояние r через i .

В операторной форме

$$B_i(s) = \bar{B}_i(s) - \sum_{r=1}^m \bar{B}_{ir}(s) W_{ir}(s) = B_i(s) \left[1 - \sum_{r=1}^m W_{ir}(s) \right]. \quad (16)$$

Статистические характеристики P_{ij} и $w_{ij}(t)$ вычисляются на основании априорных данных.

Пусть конфликтуют две системы, А и Б, состоящие из подсистем (компонентов), способных на самостоятельные действия и имеющих свои целевые функции [6]. Исходной информацией являются статистические характеристики функционирования компонентов каждой системы на i -м этапе конфликта в виде плотности распределения вероятностей времени достижения ими цели $w^{A_{0,i}}(t)$, $w^{B_{0,i}}(t)$ и статистические характеристики начала действия также в виде плотности распределения вероятностей времени начала действия: $w^{A_{D,i}}(t)$, $w^{B_{D,i}}(t)$.

Плотность распределения вероятностей времен достижения цели компонентами А раньше, чем Б, равна

$$w_{0,i}^{AB} = w_{0,i}^A \left(1 - \int_0^t w_{D,i}^B(t) dt \right). \quad (17)$$

Для стороны Б соответственно

$$w_{0,i}^{BA} = w_{0,i}^B \left(1 - \int_0^t w_{D,i}^A(t) dt \right). \quad (18)$$

Соответствующие формулы для действий сторон:

$$w_{D,i}^{AB} = w_{D,i}^A \left(1 - \int_0^t w_{0,i}^B(t) dt \right); \quad w_{D,i}^{BA} = w_{D,i}^B \left(1 - \int_0^t w_{0,i}^A(t) dt \right). \quad (19)$$

Применив преобразование Лапласа, получим операторную модель в передаточных функциях. При этом:

$$B_i^A(s) = \frac{W_{0,i}^{AB}(s)}{1 - W_{D,i}^{BA}(s)W_{D,i}^{AB}(s)}; \quad B_i^B(s) = \frac{W_{0,i}^{BA}(s)W_{D,i}^{BA}(s)}{1 - W_{D,i}^{BA}(s)W_{D,i}^{AB}(s)}. \quad (20)$$

С помощью правил структурного преобразования передаточных функций операторная модель может быть приведена к элементарному по структуре виду. Однако аналитическое выражение для результирующих передаточных функций, как правило, оказывается сложным и трудным для точного количественного анализа.

Заключение

1. Формализованный подход к исследованию процессов и объектов в области авиационной безопасности, связанный с моделированием и решением оптимизационных задач, определяется практически непреодолимыми трудностями в выборе математического аппарата и идентификации параметров моделирования. Решение таких задач возможно только в простейших ситуациях, не имеющих практического применения.

2. Альтернативный подход в данной предметной области состоит в использовании возможностей теории принятия решений и эвристических алгоритмов, т.е. переход к неформальной логике. Возможным вариантом является замещение там, где это возможно, критериев оптимизации на комплексный критерий, которым может быть выбрана категория «качество». В таком случае весьма привлекательной альтернативой становится теория квалиметрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин В.В., Конторов Д.С. *Проблемы системологии (проблемы сложных систем)*. М.: Сов. радио, 1976. 296 с.
2. Елисов Л.Н. *Качество профессиональной подготовки авиационного персонала и безопасность воздушного транспорта*: монография. М.: ИЦППС, 2006. 244 с.
3. Елисов Л.Н., Баранов В.В. *Управление и сертификация в авиационной транспортной системе*: монография. М.: Воздушный транспорт, 1999. 352 с.
4. Елисов Б.П., Елисов Л.Н. *Системотехническое управление образовательными комплексами*: монография. М.: МГТУГА, 2012. 208 с.
5. Елисов Л.Н. К вопросу о точности эвристических алгоритмов при решении оптимизационных задач в эксплуатации // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2012. № 179. С. 123-125.
6. Николайкин Н.И. *Управление экологической безопасностью промышленно-транспортных и энергетических узлов*: монография. М.: МГУИЭ, 2007. 256 с.
7. Елисов Л.Н. Концепция управления авиационной безопасностью на основе квалиметрических оценок ее состояния // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2004. № 75(9). С. 107-113.

**SOME REMARKS ON THE RELATION OF FORMAL AND INFORMAL IN SOLVING
OPTIMIZATION PROBLEMS IN THE FIELD OF AVIATION SECURITY**

Elisov L.N.

The paper presents the authors view and some remarks on the problem of solving optimization problems in the field of aviation security related to insurmountable difficulties of formalization and mathematical interpretation of the domain formulation of such problems. It is shown that the vast majority of these problems is related to the solution of conflicts. The theory of conflicts gives analytical solution only in the simplest cases. For the rest the use of a heuristic approach is suggested.

Keywords: modeling, optimization, subject area, aviation security, linguistic description, mathematical formalization, mathematical methods, decision theory, heuristic algorithms.

REFERENCES

1. Druzhinin V.V., Kontorov D.S. *Problemy sistemologii (problemy slozhnyh sistem)*. M.: Sov. Radio. 1976. 296 p. (In Russian).
2. Elisov L.N. *Kachestvo professional'noj podgotovki aviacionnogo personala i bezopasnost' vozdušnogo transporta*: monografija. M.: ICPPS. 2006. 244 p. (In Russian).
3. Elisov L.N., Baranov V.V. *Upravlenie i sertifikacija v aviacionnoj transportnoj sisteme: monografija*. M.: Vozdushnyj transport. 1999. 352 p. (In Russian).
4. Eliseev B.P., Elisov L.N. *Sistemotehnicheskoe upravlenie obrazovatel'nymi kompleksami*: monografija. M.: MGTU GA. 2012. 208 p. (In Russian).
5. Elisov L.N. K voprosu o tochnosti jevrsticheskikh algoritmov pri reshenii optimizacionnyh zadach v jekspluatacii. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2012. № 179. Pp.123-125. (In Russian).
6. Nikolajkin N.I. *Upravlenie jekologicheskoy bezopasnost'ju promyshlennno-transportnyh i jenergeticheskikh uzlov*: monografija. M.: MGUIE. 2007. 256 p. (In Russian).
7. Elisov L.N. Konceptija upravlenija aviacionnoj bezopasnost'ju na osnove kvalimetriceskikh ocenok ee sostojanija. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2004. №75(9). Pp. 107-113. (In Russian).

Сведения об авторе

Елисов Лев Николаевич, 1945 г.р., окончил ППИ (1967), профессор, доктор технических наук, действительный член Петровской академии наук и искусств, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, автор около 200 научных работ, область научных интересов – системотехника, квалиметрия, проблемы безопасности воздушного транспорта, авиационный персонал, авиационная безопасность.