

УДК 629.7.072
УДК 681.513

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ В КОМПЛЕКСНЫХ ТРЕНАЖЕРАХ САМОЛЕТА

А.Н. АКИМОВ, А.Ф. КУЛАГИН

Описан алгоритм формирования конфликтной ситуации в комплексном тренажере самолета. Алгоритм вычисляет траекторию самолета-нарушителя, потенциально приводящую к столкновению с "уклоняющимся самолетом" - FFS. При наступлении опасного сближения, срабатывает система предупреждения столкновений TCAS, после чего экипаж тренируется по уводу самолета от столкновения.

Ключевые слова: комплексный тренажер самолета, конфликтная ситуация, увод от столкновения.

Введение

Под конфликтной ситуацией (КС) понимается наличие потенциальной угрозы взаимного столкновения 2-х и более воздушных судов, летящих на встречных, попутных или пересекающихся курсах.

В настоящее время наиболее совершенной является система предупреждения о движении и предупреждения столкновений TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System), в которой учитывается весь накопленный опыт и которая является дальнейшим развитием проведенных к настоящему времени работ. В соответствии с рис. 1 TCAS формирует три зоны:

- зону столкновения (Collision Area);
- зону предупреждения (Warning Area);
- зону повышенного внимания (Caution Area).

Размеры этих зон изменяются в зависимости от скорости сближения самолетов и высоты полета самолета.

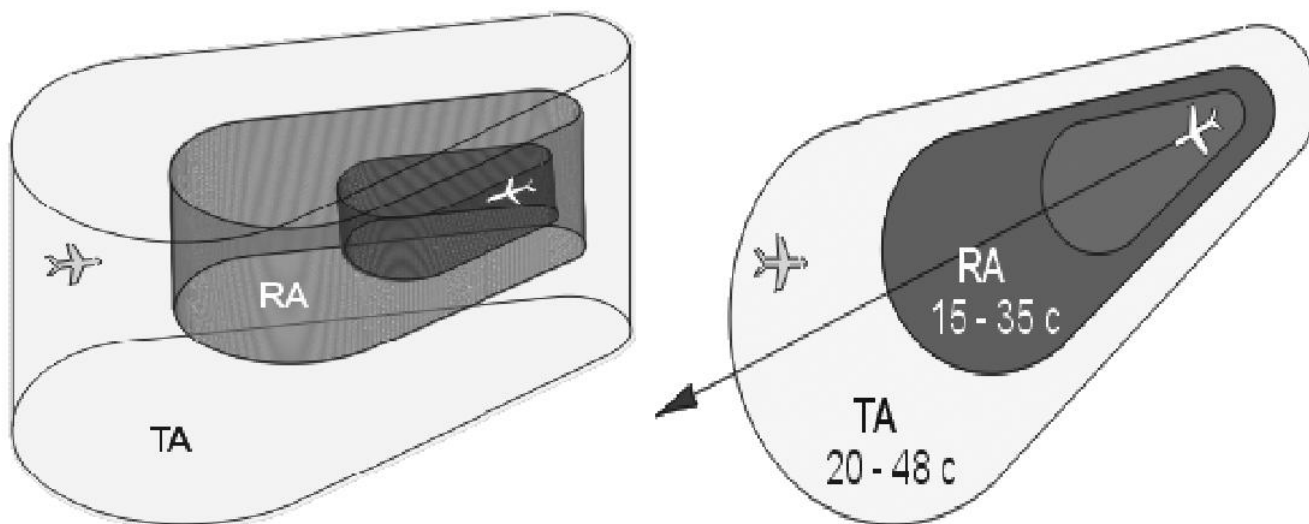


Рис. 1

TCAS, анализируя относительный пеленг опасных самолетов, их высоту относительно своего самолета, расстояние и скорость сближения, вычисляет временной интервал до вероятного вторжения в зону столкновения. Непрерывное сокращение расстояния (при постоянстве

направления на другой самолет) является для системы признаком возможной конфликтной ситуации. При этом TCAS вырабатывает информацию для экипажа двух типов:

- а) TA – сообщение о воздушной обстановке (Traffic Advisory);
- б) RA – рекомендации по устранению конфликта (Resolution Advisory) двух видов:
 - ограничивающие вертикальную скорость;
 - корректирующие вертикальную скорость.

Информация о воздушной обстановке и рекомендация по устранению конфликтной ситуации индицируются на указателе в кабине пилотов в виде специальных символов определенного цвета с указанием разности высот между самолетами (в сотнях футов). Если конфликтующий самолет находится в наборе высоты (снижении) с вертикальной скоростью выше 2,5 м/с, то на указателе дополнительно индицируется стрелка, показывающая направление его вертикального маневра.

Указания для пилота предельно ясны: выполняй команды TCAS. Даже абсолютно естественное неписаное правило, заключающееся в том, что командам диспетчера УВД необходимо следовать только до попадания в критическую ситуацию, указывает на преимущество TCAS перед диспетчером в критической ситуации. Такая логика поведения экипажа основана на том, что, если появляется предупреждение TCAS об опасности, то служба УВД не смогла по той или иной причине обеспечить безопасное расхождение и самолет находится в крайне опасной ситуации. Информация TCAS о близости другого самолета обновляется один-два раза в секунду (в зависимости от версии программного обеспечения).

Наиболее мощным и продвинутым средством подготовки экипажей ВС по обнаружению КС и действиям по их локализации по рекомендациям TCAS являются комплексные или полнополетные тренажеры самолета Full Flight Simulator (FFS).

Опыт создания FFS самолета Суперджет 100 показал, что создание КС произвольной конфигурации является нетривиальной задачей. Построение простых КС возможно только в рамках равномерного, прямолинейного движения конфликтующих воздушных судов. В работе рассмотрен алгоритм формирования КС любой произвольной конфигурации.

Принятые допущения

В данной работе демонстрируется методическая сторона предлагаемого подхода. С целью наглядности и упрощения последующих математических выкладок приняты следующие допущения:

- на выполнение экипажем тренажера учебно-тренировочной задачи не накладываются какие-либо специфические ограничения;
- на тренажере установлен полнофункциональный TCAS с системой индикации или имитатор с известным интерфейсом по входным и выходным сигналам;
- информационная часть TCAS моделируется;
- количество самолетов-нарушителей (СН) в принципе неограниченно, но рассмотрение проведем на примере одного, что не сужает общность подхода;
- динамика движения СН (intruder - англ.) описывается уравнениями движения материальной точки;
- известны текущие координаты СН и своего ВС в нормальной земной или иной системе координат.

Содержательная формулировка задачи построения модели КС

Экипаж тренажера выполняет один из этапов полета: взлет; набор высоты; крейсерский полет; снижение; заход на посадку; посадка.

Стимуляция КС выполняется инструктором со своего рабочего места (РМИ). При этом вводятся координаты СН, курс, скорость и угол наклона траектории (вертикальная скорость).

Модели СН с необходимой частотой "сообщаются" координаты и соответствующие параметры уклоняющегося самолета (УС) – тренажера.

В системе управления моделью СН необходимо циклично формировать такие управления, чтобы последующее её движение неизбежно привело к созданию КС вне зависимости от характера движения УС.

После того как летный экипаж УС (тренажера), получив информацию от TCAS, начал осуществлять корректирующие действия, дальнейшее формирование управлений в СН необходимо "заморозить". В противном случае, решая фактически задачу самонаведения, СН гарантированно столкнется с УС, что приведет к недоверию у обучаемого экипажа к эффективности TCAS.

Математическая модель самолета-нарушителя

Рассмотрим решение задачи управления пространственным движением СН как объекта траекторного анализа. Воспользуемся полученными для этих условий дифференциальными уравнениями пространственного движения самолета под действием указанных сил. В проекции на оси траекторной системы координат эти уравнения имеют вид:

$$\dot{V} = \mathbf{P} \cdot \cos\alpha - x_f - m \cdot g \cdot \sin\theta \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = [\cos\gamma \cdot \mathbf{P} \sin\alpha + Y_f - m \cdot g \cdot \cos\theta] / (m \cdot V) \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = - [\sin\gamma \cdot \mathbf{P} \sin\alpha + Y_f] / (m \cdot V \cdot \cos\theta) \quad (3)$$

Здесь и далее все обозначения приняты в соответствии с [1].

К уравнениям движения необходимо добавить кинематические уравнения, связывающие боковую, продольную дальности Z, L и высоту H со скоростью полета V и углами θ и φ :

$$\dot{L} = V \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi; \quad (4)$$

$$\dot{H} = V \cdot \sin\theta; \quad (5)$$

$$\dot{Z} = -V \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi, \quad (6)$$

В качестве управлений выбраны функции $\gamma(t)$, $\alpha(t)$ и $P(t)$. При этом вектор управления примет вид

$$u(t) = [P(t), \alpha(t), \gamma(t)]^T \quad (7)$$

Переменные, не входящие явно в состав управлений, образуют вектор фазовых координат

$$F(t) = [x(t), y(t)]^T, \quad (8)$$

где

$$\begin{cases} x(t) = [L(t), H(t), Z(t)]^T; \\ y(t) = [V(t), \theta(t), \varphi(t)]^T. \end{cases} \quad (9)$$

Его компоненты, а также компоненты вектора $u(t)$ должны удовлетворять накладываемым краевым условиям исходной задачи.

Воспользуемся операцией декомпозиции рассматриваемой ММ управляемого движения ЛА. В результате ее выполнения исходная ММ может быть представлена в виде следующей динамической системы

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, t); \\ \dot{y} = \Psi(y, u, t), \end{cases} \quad t \in [t_n, t_k], \quad (10)$$

где векторы f и Ψ образованы множествами $\{f_1, f_2, f_3\}$ и $\{\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3\}$ соответственно.

Начальные условия для модели СН при формировании КС зададим значениями фазовых координат и управлений:

$$x(t_n) = x_n = [L_n, H_n, Z_n]; \quad (11)$$

$$y(t_n) = y_n = [V_n, \theta_n, \varphi_n]; \quad (12)$$

$$u(t_n) = u_n = [P_n, \alpha_n, \gamma_n]. \quad (13)$$

Соответствующие значения в момент времени t_k составляют блок конечных условий. Эти конечные условия подвижные и соответствуют текущим значениям параметров движения УС (тренажера). Приведение модели СН в условия:

$$x(t_k, t_i) = x_k = [L_k, H_k, Z_k]; \quad (14)$$

$$y(t_k, t_i) = y_k = [V_k, \theta_k, \varphi_k]; \quad (15)$$

$$u(t_k, t_i) = u_k = [P_k, \alpha_k, \gamma_k] \quad (16)$$

будет означать факт столкновения СН с УС.

Совокупность динамической системы (10) и заданных краевых условий (11) ... (16) приводит к краевой задаче. Под данной задачей здесь понимается приведение НС в точку столкновения с УС за заданное время t_k . Сразу заметим, что время t_k может варьироваться инструктором тренажера при подготовке соответствующего упражнения. Для экономии времени на тренировку оно не должно превышать 60 с.

Алгоритм вычисления траектории самолета-нарушителя

Решение подобных задач является составной частью метода прямой оптимизации, предложенного в работах [2; 3; 4; 5]. Опуская обоснование и доказательства сходимости получаемых траекторий к конечным значениям, запишем выражения для вычисления управлений моделью СН

$$\begin{cases} \Delta y_i = 2 \cdot \left[\frac{\partial f}{\partial y} \right]_i^{\#} \cdot \left(\frac{x_k - x(t_i)}{t_k - t_i} - f(x_i, y_i, t_i) \right); \\ \Delta u_i = \left[\frac{\partial \Psi}{\partial u} \right]_i^{\#} \cdot \left(\frac{\Delta y_i}{h(t_i)} - \Psi(y_i, u_i, t_i) \right), \end{cases} \quad (17)$$

где $t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$ – текущее время от запуска процесса построения КС; $[\partial f / \partial y]_i^{\#}$ и $[\partial \Psi / \partial u]_i^{\#}$ – матрицы частных производных, вычисляемых на каждом i -м цикле формирования управлений; $\#$ – знак обобщенного обращения данных матриц, в том числе и при их вырожденности.

Положение элементов в матрицах общего вида определяется следующим образом:

$$\mathbf{f}/\partial y \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial y_1} & \frac{\partial f_n}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial y_n} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{\Psi}/\partial u \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_1}{\partial u_1} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial \Psi_1}{\partial u_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Psi_n}{\partial u_1} & \frac{\partial \Psi_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial \Psi_n}{\partial u_m} \end{bmatrix}.$$

С учетом введенных обозначений соответствующие составляющие матриц частных производных будут иметь следующий вид:

а) частные производные по координатам вектора y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} &= \cos\theta \cdot \cos\varphi; & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} &= -V \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi; & \frac{\partial f_1}{\partial y_3} &= -V \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi; \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} &= \sin\theta; & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} &= V \cdot \cos\theta; & \frac{\partial f_2}{\partial y_3} &= 0; \\ \frac{\partial f_3}{\partial y_1} &= -\cos\theta \cdot \sin\varphi; & \frac{\partial f_3}{\partial y_2} &= V \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi; & \frac{\partial f_3}{\partial y_3} &= -V \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi; \end{aligned}$$

б) частные производные по координатам вектора управления u :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_1}{\partial u_1} &= \frac{\cos\alpha}{m}; & \frac{\partial \Psi_1}{\partial u_2} &= -\frac{P \cdot \sin\alpha + \partial X_f / \partial \alpha}{m}; & \frac{\partial \Psi_1}{\partial u_3} &= 0; \\ \frac{\partial \Psi_2}{\partial u_1} &= \frac{\sin\alpha \cdot \cos\gamma}{m \cdot V}; & \frac{\partial \Psi_2}{\partial u_2} &= \frac{\mathbf{e} \cdot \cos\alpha + \partial Y_f / \partial \alpha}{m \cdot V} \cdot \cos\gamma; & \frac{\partial \Psi_2}{\partial u_3} &= -\frac{\mathbf{e} \cdot \sin\alpha - m \cdot g \cdot \cos\theta + Y_f}{m \cdot V} \cdot \sin\gamma; \\ \frac{\partial \Psi_3}{\partial u_1} &= -\frac{\sin\alpha \cdot \sin\gamma}{m \cdot V \cdot \cos\theta}; & \frac{\partial \Psi_3}{\partial u_2} &= -\frac{\mathbf{e} \cdot \cos\alpha + \partial Y_f / \partial \alpha}{m \cdot V \cdot \cos\theta} \cdot \sin\gamma; & \frac{\partial \Psi_3}{\partial u_3} &= -\frac{\mathbf{e} \cdot \sin\alpha + Y_f}{m \cdot V \cdot \cos\theta} \cdot \cos\gamma. \end{aligned}$$

Производные $\partial X_f / \partial \alpha$ и $\partial Y_f / \partial \alpha$ определяются из формул силы лобового сопротивления и подъемной силы соответственно либо численно.

Все элементы матриц определяются с использованием значений параметров СН, которые пересчитываются с каждым циклом формирования управлений, после чего производится обращение матриц.

$h(t_i)$ – в общем виде произвольная функция времени, определяющая интенсивность формируемых управлений. Для решения данной задачи это коэффициент, имеющий размерность времени и подбираемый при моделировании;

X_k – вектор (14);

$f_i(\cdot)$, $\Psi_i(\cdot)$ – векторные функции, соответствуют (10) и вычисляются на каждом i -м цикле формирования вектора приращения управлений Δu_i .

Полное управление модели СН соответствует выражению (индекс k опущен)

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i. \tag{18}$$

Управления вычисляются циклично с длительностью цикла $\Delta t_{\text{ц}} = 0.5-1$ с. Эти управления вводятся в модель СН и она интегрируется на величину $\Delta t_{\text{ц}}$. Затем модель останавливается, управления пересчитываются для новых начальных (НС) и конечных (УС) условий и т.д., пока TCAS тренажера не проинформирует о КС.

Как уже было сказано, реализация схемы (17), (18) в силу способа ее получения гарантирует сходимость параметров траектории модели СН к значениям краевых условий по координатам вектора состояния УС. Таким образом, траектории СН и УС пересекутся.

Сигналы о параметрах СН, необходимые для работы TCAS, преобразуются и с заданной частотой поступают в систему в необходимых форматах.

Потенциальные возможности алгоритма

Рассмотренный алгоритм может позволить сформировать банк КС, который может быть использован инструктором при тренировке пилотов управлению самолетом при различных конфигурациях КС [6].

Рекомендации по корректирующим сообщениям RA пилот должен выполнить в течение 5 с после их появления. При этом при изменении тангажа нет необходимости превышать перегрузку 0,25 g.

"Усиливающие" и изменяющие направление маневра рекомендации корректирующих сообщений RA пилот должен выполнить в течение 2,5 с. При этом предполагается изменение тангажа на величину $2^\circ - 3,5^\circ$ с перегрузкой 0,35 g. Маневры с большей перегрузкой не требуются, с меньшей перегрузкой могут оказаться недостаточными.

Необходимо избегать чрезмерной реакции пилота на сообщения RA, так как это может привести к конфликтной ситуации в отношении других воздушных судов. В горизонтальном полете правильные и точные действия при выполнении RA приводят к отклонению от заданной высоты на 300 - 700 ft.

Формируемые КС объединены со следующими речевыми сообщениями и предупреждениями [6]:

"TRAFFIC-TRAFFIC"

Это предупредительное сообщение ТА.

Не требует выполнения вертикального маневра.

TCAS прогнозирует, что нарушитель войдет в зону столкновения в пределах от 20 до 48 с.

"MONITOR VERTICAL SPEED"

Это предупредительное сообщение RA.

Необходимо выдерживать вертикальную скорость вне красной зоны на шкале указателя вертикальной скорости.

"CLIMB, CLIMB"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо выполнить набор с вертикальной скоростью в зеленой зоне на шкале указателя вертикальной скорости. При этом величина вертикальной скорости составит от 1500 до 2000 fpm.

"DESCEND-DESCEND"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо выполнить снижение с вертикальной скоростью вне красной зоны на шкале указателя вертикальной скорости.

При этом величина вертикальной скорости составит от 1500 до 2000 fpm.

"CLIMB, CROSSING CLIMB – CLIMB, CROSSING CLIMB"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо выполнить набор с вертикальной скоростью в зеленой зоне на шкале указателя вертикальной скорости.

Величина вертикальной скорости составит от 1500 до 2000 fpm.

Траектория УС будет пересекать высоту нарушителя.

"DESCEND, CROSSING DESCEND - DESCEND, CROSSING DESCEND"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо выполнить снижение с вертикальной скоростью вне красной зоны на шкале указателя вертикальной скорости.

Величина вертикальной скорости составит от 1500 до 2000 fpm.

Траектория УС будет пересекать высоту нарушителя.

"INCREASE CLIMB–INCREASE CLIMB"

Это корректирующее сообщение RA.

Скорость набора недостаточна, чтобы обеспечить безопасный интервал.

Потребуется увеличение вертикальной скорости и в зеленой зоне она составит от 2500 до 3000 fpm.

"ICREASE DESCEND - ICREASE DESCEND"

Это корректирующее сообщение RA.

Скорость снижения недостаточна, чтобы обеспечить безопасный интервал.

Потребуется увеличение вертикальной скорости и в зеленой зоне она составит от 2500 до 3000 fpm.

"CLIMB, CLIMB NOW! - CLIMB, CLIMB NOW!"

Это корректирующее сообщение RA.

Выдается вслед за выданным "DESCEND" RA, если по расчетам TCAS для создания безопасного интервала необходимо изменить направление вертикального маневра.

Величина вертикальной скорости в зеленой зоне составит от 1500 до 2000 fpm.

"DESCEND, DESCEND NOW - DESCEND, DESCEND NOW"

Это корректирующее сообщение RA.

Выдается вслед за выданным "CLIMB" RA, если по расчетам TCAS для создания безопасного интервала необходимо изменить направление вертикального маневра.

Величина вертикальной скорости в зеленой зоне составит от 1500 до 2000 fpm.

"ADJUST VERTICAL SPEED, ADJUST"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо скорректировать текущую вертикальную скорость набора или снижения соответственно до величины, которая соответствует зеленой зоне шкалы RA.

"MAINTAIN VERTICAL SPEED, MAINTAIN"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо выдерживать вертикальную скорость, которая соответствует зеленой зоне шкалы.

"MAINTAIN VERTICAL SPEED, CROSSING MAINTAIN"

Это корректирующее сообщение RA.

Необходимо выдерживать вертикальную скорость, которая соответствует зеленой зоне PFD. Траектория УС будет пересекать высоту нарушителя.

"CLEAR OF CONFLICT"

Сообщение подтверждает, что конфликтная ситуация разрешена, и интервал между конфликтующими ВС увеличивается. Необходимо вернуться к первоначальному плану полета.

Таким образом, за счет задания начальных условий СН (11), (12), (13) и УС (14), (15), (16) решается обратная задача - построение траекторий движения СН, гарантированно формирующих перечисленные сообщения.

Взаимодействуя информационно с TCAS, представленный алгоритм позволяет создавать всевозможные КС при самом широком спектре взаимного расположения конфликтующих ВС, представляя обучаемым различные сценарии развития КС.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения.
2. Акимов А.Н. Решение обратных задач динамики на основе псевдоинверсии матриц // Динамика полета боевых ЛА: научно-методические материалы. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1992.
3. Акимов А.Н., Андреев В.В. Численный метод прямой оптимизации в задачах оптимального управления // Теория и системы управления. - 1996. - №3.
4. Акимов А.Н., Андреев В.В. Метод прямой оптимизации. Основные положения и порядок применения. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1997.
5. Акимов А.Н. Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивых систем управления боевых летательных аппаратов: дисс. ... д-ра техн. наук. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1997.
6. Самолет RRJ-95В. Руководство по летной эксплуатации. - М.: ЗАО «ГСС», 2011.

THE ALGORITHM OF FORMATION OF CONFLICTING SITUATIONS FOR FULL FLIGHT SIMULATOR

Akimov A.N., Kulagin A.F.

An algorithm of formation of a conflicting situation for the Full Flight Simulator is described. The algorithm calculates the trajectory of the intruder that potentially can lead to the collision with "evading aircraft" - FFS. In case of near miss, traffic collision avoidance system (TCAS) triggers, after which the crew trains collision avoidance techniques.

Key words: Full Flight Simulator, conflicting situation, collision avoidance.

Сведения об авторах

Акимов Александр Николаевич, 1952 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (1981), доктор технических наук, профессор, начальник НИО технических средств обучения ЗАО «Гражданские самолеты Сухого», автор более 120 научных работ, область научных интересов – безопасность полетов, методы математического моделирования в задачах управления динамическими системами.

Кулагин Андрей Федорович, 1978 г.р., окончил МФТИ (2001), магистр, начальник отдела технических средств обучения филиала ОАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого»», автор 1 научной работы, область научных интересов – технические средства обучения, методы математического моделирования в задачах создания имитационных моделей ТСО.