Некоторые аспекты оценки адекватности авиационного тренажера летательному аппарату

А.И. Годунов, В.И. Мандриков (Пензенский государственный университет)

Рассмотрены вопросы использования дифференциально-геометрических инвариантов для оценки адекватности поведения реального объекта и его модели при инженерной проверке соответствия аэродинамических характеристик летательного аппарата и авиационного тренажера. Исследования проводятся путем построения подвижных канонических реперов различных геометрических образов.

Международная практика подтверждает, что одним из главных направлений развития авиационного тренажеростроения является совершенствование системы сертификации авиационных тренажеров и методик обучения на них, то есть создание необходимой нормативной базы. Именно создавая и внедряя стандарты качества авиационных тренажеров и методов обучения на них, можно обеспечивать требуемый уровень подготовки летного состава.

Ряд российских специалистов поддерживает мнение, что в целом любой новый стандарт качества авиационных тренажеров не должен отличаться от общепринятых международных стандартов ICAO и по существу должен их повторять, то есть призывают к прекращению всех исследований в этой области в России. На наш взгляд это не совсем верно.

Существующие методики оценки адекватности летательного аппарата (ЛА) и авиационного тренажера (АТ) в общем случае подразумевают, что адекватность рассматривается как предельный случай близости модели к объекту, а ее степень устанавливается путем сопоставления информации на выходе при одинаковых входных сигналах на АТ и ЛА и определяется следующим образом: при текущих значениях входных сигналов $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_k(t)$ в любой момент времени t выходные сигналы АТ $y_1^T(t)$, $y_2^T(t)$, ..., $y_l^T(t)$ не должны отклоняться от значений выходных сигналов ЛА $y_1^S(t)$, $y_2^S(t)$, ..., $y_l^S(t)$ больше, чем на заданные величины ε_i:

$$\left| y_i^T(t) - y_i^S(t) \right| \le \varepsilon_i,\ i = \overline{1,l}\,.$$

А как быть в случае, если входные сигналы априори неизвестны?

В работе [1] предлагается использовать для оценки соответствия характеристик устойчивости АТ и ЛА обобщенный параметр – алгебраический инвариант, который позволяет судить о соответствии характеристик модели эталонным характеристикам в любой момент времени и при произвольных входных воздействиях.

Вид математической модели системы определяет ограничения и взаимные связи между ее параметрами. Эти ограничения и связи могут иметь вид равенств или неравенств, быть голономными или неголономными. Наличие этих связей определяется структурными внутренними свойствами системы.

Те взаимоотношения между параметрами системы, которые не изменяются при эквивалентных преобразованиях, были названы инвариантами.

Концепция инвариантов является одной из важнейших в математике, поскольку изучение инвариантов непосредственно связано с задачами классификации объектов того или иного типа. По существу, целью всякой математической классификации является построение некоторой полной системы инвариантов (по возможности, наиболее простой), то есть такой системы, которая разделяет любые два неэквивалентных объекта из рассматриваемой совокупности.

Проблемы адекватности моделирования должны лежать именно в области инвариантов ЛА и АТ. Инварианты естественным образом могут быть использованы для оценки адекватности поведения реального объекта и его модели при инженерной проверке соответствия аэродинамических характеристик ЛА и АТ.

Здесь на базе инвариантов движения ЛА ($I^S(t)$) и АТ ($I^T(t)$) формируется некоторый скалярный косвенный диагностический параметр $\Delta I(t) = I^S(t) - I^T(t)$, который при отсутствии дефектов моделирования должен в любой момент времени удовлетворять условию:

$$\left| I(t) \right| \le \varepsilon,$$

где ε – величина допуска, рассчитываемая по величинам ε_i, $i = \overline{1,l}$ – с использованием аппарата теории чувствительности.

С начала своего становления дифференциальная геометрия использует понятие инварианта относительно той или иной группы преобразования пространства. Идеи дифференциальной геометрии можно распространить на определения инвариантов движения ЛА, которые могут быть использованы для оценки адекватности моделирования.

Число инвариантов зависит от структуры рассматриваемого элемента геометрического образа, элементом которого называется фигура, состоящая из конечного числа точек и прямых линий.

Методы исследования локальных свойств геометрических образов при помощи специально выбранных систем координат, ассоциированных с элементом геометрического образа, получил название метода подвижного репера [2]. Среди множества подвижных реперов особое значение имеют канонические, то есть реперы, строение которых полностью определяется самим геометрическим образом.

Движение ЛА в пространстве описывается шестью параметрами: тремя – движение центра масс и тремя – движение вокруг центра масс.

Локальные свойства движения центра масс могут быть исследованы с помощью репера Френе, для которого элементом является точка, а геометрическим образом (P_0) – однопараметрическое семейство точек (пространственная кривая). Дальнейшим усложнением исследований является рассмотрение локальных свойств ЛА как однопараметрического семейства прямых (I_0) (регулюс) [3] и однопараметрического семейства (LP), элементом которого является прямая и инцидентная ей точка.

Рассматриваемый геометрический образ можно задать системой уравнений:

$$\bar{R}(t) = \bar{r}(t) + \lambda \bar{e}(t), \tag{1}$$

где $\bar{R}(t)$ радиус-вектор переменной точки прямой, меняющейся с изменением параметра λ; $\bar{r}(t)$ радиус-вектор фиксированной точки на прямой относительно неподвижного начала координат; $e(t)$ – единичный вектор, параллельный прямой.

Воспользуемся известной [2] методикой построения канонического репера. Поместим начало координат в точку $\bar{r}(t)$ и примем за вектор $\bar{e}_3(t)$ репера вектор $\bar{e}(t)$, тогда деривационные формулы канонического репера семейства (LP) принимают вид:

$$\frac{d\bar{r}}{dS} = -\alpha^1\bar{e}_1 - \alpha^2\bar{e}_2 - \alpha^3\bar{e}_3,\quad \frac{d\bar{e}_1}{dS} = -\alpha_2^1\bar{e}_2 + \bar{e}_3,\quad \frac{d\bar{e}_3}{dS} = -e_1. \tag{2}$$

Таким образом, в общем случае семейство (LP) определяется заданием четырех функций одного аргумента $\alpha^1 = \alpha^1(S)$, $\alpha^2 = \alpha^2(S)$, $\alpha^3 = \alpha^3(S)$, $\alpha_2^1 = \alpha_2^1(S)$, с точностью до движения, то есть положения его относительно неподвижной системы координат. Эти функции являются основными метрическими инвариантами образа, а параметр S – его инвариантный параметр.

Деривационные формулы (2) в горловой точек совпадают с деривационными формулами регулюса. Откуда следует геометрический смысл элементов и инвариантов построенного нами репера.

Вектор $\bar{e}_3$ параллелен лучу, вектор $\bar{e}_2$ перпендикулярен асимптотической плоскости, вектор $\bar{e}_1$ параллелен касательной к сферической индикатрисе, описываемой вектором $\bar{e}_3$. S – длина дуги сферической индикатрисы.

Инвариант ($-\alpha^1(S)$) – координата горловой точки на луче, $\alpha^2(S)$ равен тангенсу поворота нормали касательной плоскости при смещении точки касания по лучу на единицу длины:

$$\alpha^3(S) = d\lambda/dS - \alpha^2 ctg\psi,$$

где ψ – угол между лучом и касательной к горловой линии.

$$\alpha_2^1(S) = \lim_{\varphi\to 0}\frac{\xi}{\zeta},$$

где ξ – угол между асимптотическими плоскостями, соответствующими двум близким лучам, угол между которыми ζ.

Вычислительные формулы. Пусть элемент рассматриваемого геометрического образа задан в виде (1) относительно некоторой неподвижной системы координат, причем вектор $\bar{r}$(t) и орт $\bar{e}(t)$ являются функциями некоторого параметра t.

Тогда для дуги S – сферической индикатрисы и инвариантов имеем:

$$S = \int_0^t \left|\frac{d\bar{e}(\tau)}{d\tau}\right| d\tau,$$

$$\alpha^1 = \left(\frac{d\bar{r}}{dt}, \frac{d\bar{e}}{dt}\right)\left|\frac{d\bar{e}}{dt}\right|^{-2},\quad \alpha^2 = \left(\frac{d\bar{r}}{dt}, \bar{e}, \frac{d\bar{e}}{dt}\right)\left|\frac{d\bar{e}}{dt}\right|^{-2}, \tag{3}$$

$$\alpha^3 = -\left|\frac{d\bar{e}}{dt}\right|^{-1}\left(\frac{d\bar{r}}{dt}, \bar{e}\right),\quad \alpha_2^1 = \left(\frac{d^2\bar{e}}{dt^2}, \frac{d\bar{e}}{dt}, \bar{e}\right)\left|\frac{d\bar{e}}{dt}\right|^{-3}.$$

Рассмотренный элемент в неподвижной системе координат можно задать в виде:

$$\frac{d\bar{r}(t)}{dt} = V_x(t)\bar{i} + V_y(t)\bar{j} + V_z(t)\bar{k}, \tag{4}$$

$$\bar{e}(t) = \bar{i}Cos\upsilon(t)Cos\psi(t) + \bar{j}Sin\upsilon(t) + \bar{k}Cos\upsilon(t)Sin\psi(t), \tag{5}$$

где V_x, V_y, V_z – проекции скорости движения центра масс относительно неподвижной системы координат на соответствующие оси; $\bar{i}$, $\bar{j}$, $\bar{k}$ – единичные векторы системы координат; υ, ψ – углы тангажа и рысканья, соответственно.

Используя (3-5) и учитывая, что рассматривается движение ЛА без учета вращения, т.е.

$$d\upsilon(t)/dt = W_z(t),\ d\psi(t)/dt = W_y(t)/cos\upsilon(t),$$

где Wz , Wy- соответствующие угловые скорости, получим вычислительные формулы для инвариантов канонического репера семейства (LP) в виде:

$$S(t) = \int_{t_0}^t (w_z^2(\tau) + w_y^2(\tau))^{1/2} d\tau,$$

$$\alpha^1(t) = (-V_x(w_zSin\upsilon Cos\psi + w_ySin\psi) + {}$$
$${} + V_yw_zCos\upsilon + V_z(w_zSin\upsilon Sin\psi - w_yCos\psi)) / (w_z^2 + w_y^2),$$

$$\alpha^2(t) = (V_x(w_zSin\psi - V_ySin\upsilon Cos\psi) + V_yw_yCos^2\psi Cos^{-1}\upsilon + {}$$
$${} + V_z(w_zCos\psi + w_ySin\upsilon Sin\psi)) / (w_z^2 + w_y^2),$$

$$\alpha^3(t) = (V_xCos\upsilon Cos\psi + V_ySin\upsilon - V_zCos\upsilon Sin\psi)/$$
$$(w_z^2 + w_y^2)^{1/2}, \tag{6}$$

$$\alpha_2^1(e) = (0.5(w_z^2 + w_y^2Cos^{-2}\upsilon)(1 - w_z)Cos\upsilon Sin^2\psi)/$$
$$(w_z^2 + w_y^2)^{3/2} + (w_yw_z2tg\upsilon(Cos^2\upsilon Sin^2\psi - Cos\upsilon Sin\psi - 2))/$$
$$(w_z^2 + w_y^2)^{3/2}) - (w_y(dw_z/dt)Sin^2\upsilon - w_zCos\upsilon + w_y2tg\upsilon)/$$
$$(w_z^2 + w_y^2)^{3/2}.$$

Рассмотрим движение летательного аппарата без вращения и рысканья. Из соотношений (6) имеем:

$$S(t) = \upsilon(t),\ \alpha_2^1(t) = 0,\ \alpha^2(t) = 0,$$

$$\alpha_2^1(t) = -(V_xSin\upsilon - V_yCos\upsilon)/w_z,$$

$$\alpha^3(t) = (V_xCos\upsilon + V_ySin\upsilon)/w.$$

В этом случае рассматриваемый геометрический образ вырождается в плоскость (что очевидно и геометрически) и его канонический репер принимает вид:

$$\frac{d\bar{r}}{dS} = -\alpha^1\bar{e}_1 - \alpha^3\bar{e}_3,\quad \frac{d\bar{e}_1}{dS} = \bar{e}_3,\quad \frac{d\bar{e}_3}{dS} = -\bar{e}_1.$$

Наличие погрешностей моделирования динамических характеристик ЛА в АТ приводит к тому, что канонические реперы геометрических образов, соответствующих функционированию систем "летчик-самолет" и "летчик-тренажер" не совпадают, но для обеспечения подобия моделирования должны быть неизменно связаны, т. е.

$$\bar{r}^{T}=\bar{r}^{S}+c^{i}\bar{e}_{i}^{S},\quad \bar{e}_{i}^{T}=c_{i}^{k}\bar{e}_{k}^{S},$$

где (по $i,k=1,2,3$ суммирование), $\bar{r}^{T}$, $\bar{r}^{S}$ – радиус-векторы движения центров масс тренажера и самолета, $\bar{e}_i^{T}$, $\bar{e}_i^{S}$ – векторы канонических реперов соответствующих геометрических образов полетов ЛА и АТ, c^i, c_k^i – функции погрешностей моделирования, которые при рассмотрении геометрических образов (LP) определяются из системы уравнений:

$$(dS^{\mathrm{T}}/dS^{\mathrm{S}})\alpha^{1}=c_1^1\beta^1+c_1^2\beta^2+c_1^3\beta^3+$$
$$+(c^2c_1^1-c^1c_1^2)\beta_2^1+c^2c_1^3-c^3c_1^2,$$
$$(dS^{\mathrm{T}}/dS^{\mathrm{S}})\alpha^{2}=c_2^1\beta^1+c_2^2\beta^2+c_2^3\beta^3+$$
$$+(c^2c_2^1-c^1c_2^2)\beta_2^1+c^2c_2^3-c^3c_2^2,$$
$$(dS^{\mathrm{T}}/dS^{\mathrm{S}})\alpha^{3}=c_3^1\beta^1+c_3^2\beta^2+c_3^3\beta^3+$$
$$+(c^2c_3^1-c^1c_3^2)\beta_2^1+c^2c_3^3-c^3c_3^2,$$
$$(dS^{\mathrm{T}}/dS^{\mathrm{S}})\alpha_2^{1}=(c_2^2c_1^1-c_2^1c_1^2)\beta_2^1+c_2^2c_1^3-c_2^3c_1^2,$$
$$dS^{\mathrm{T}}/dS^{\mathrm{S}}=(c_2^2c_3^1-c_2^1c_3^2)\beta_2^1+c_2^2c_3^3-c_2^2c_3^2,$$
$$(c_1^3c_2^1-c_2^3c_1^1)\beta_2^1+c_2^3c_3^1-c_3^3c_2^1=0,$$
$$\sum_{i=1}^{3}c_1^ic_2^i=0,\ \sum_{i=1}^{3}c_1^ic_3^i=0,\ \sum_{i=1}^{3}c_2^ic_3^i=0,$$
$$\sum_{i=1}^{3}(c_1^i)^2=1,\ \sum_{i=1}^{3}(c_2^i)^2=1,\ \sum_{i=1}^{3}(c_3^i)^2=1,$$

где α_k^i, β_k^i $(i=\overline{1,3};\ k=0,2)$ – метрические инварианты геометрических образов соответствующих систем "летчик-тренажер" и "летчик-самолет", S^{T}, S^{S} – соответствующие инвариантные параметры.

При анализе погрешностей следует учитывать, что в общем случае задача неизменной связи реперов имеет решение только при $c_i=0$, $c_i^k=\delta_{ik}$ – Кронекеров символ, т.е. при отсутствии погрешностей моделирования. При наличии погрешностей анализ следует проводить только для режимов, в которых продольная ось образует постоянный угол с некоторым постоянным вектором $\bar{m}=x\bar{e}_1^{\mathrm{S}}+y\bar{e}_2^{\mathrm{S}}+z\bar{e}_3^{\mathrm{S}}$, координаты которого определяются из системы дифференциальных уравнений:

$$dx/dS^{\mathrm{S}}-\beta_2^1y=0,\ dy/dS^{\mathrm{S}}+\beta_2^1x-z=0,\ dz/dS^{\mathrm{S}}+y=0.$$

Усложняя элемент геометрического образа, можно определить систему инвариантов первой дифференциальной окрестности элемента образа и полную систему инвариантов геометрического образа, элементом которого является пара точек А и В, т. е. инвариантные характеристики скалярных и векторных полей движения ЛА [4].

С возникновением и развитием многомерной дифференциальной геометрии между нею и классической динамикой была обнаружена глубокая связь. Эта связь состоит в том, что движение механической системы интерпретируется как "движение" точки в многомерном пространстве с определенной структурой, соответствующей данной системе, что, на наш взгляд, позволит использовать многие достижения многомерной дифференциальной геометрии в разработке нормативной базы сертификации АТ.

Следует отметить, что предложенный выше подход тривиальным образом распространяется на разработку методов оценки корректности принятия решения в ситуациях (в т. ч. игровых), возникающих в процессе тренировки летчика на тренажере.

Список литературы

1. *Деревянчук Д.М., Мандриков В.И.* Алгебраический инвариант как метод оценки соответствия характеристик устойчивости и управляемости авиационного тренажера и летательного аппарата // Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи. Сборник статей международной конференции. М.: ЦАГИ, 2003.
2. *Щербаков Р.Н.* О методе репеража многообразий // Геометрический сборник, вып.3 (Труды Томского университета, 168). Томск, 1963.
3. *Щербаков Р.Н.* Основы метода внешних форм и линейчатой дифференциальной геометрии. Томск. 1973.
4. *Мандриков В.И., Анцупова И.С.* К геометрии скалярных и векторных полей движения летательного аппарата. // Актуальные проблемы науки и образования. Труды междун. юбилейного симпозиума. Пенза. 2003.

***Годунов Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, проф., академик Международной академии информатизации, зав. кафедрой,*
***Мандриков Владимир Иванович** – канд. техн. наук, сотрудник кафедры "Компьютерные технологии управления" Пензенского государственного университета.*
Контактный телефон (8412) 36-82-85. E-mail: robot@stup.as.ru

На Надвоицком алюминиевом заводе сдана система управления качеством для лаборатории

В мае 2008 г. на Надвоицком алюминиевом заводе сдана в промышленную эксплуатацию система управления качеством, разработанная компанией ТоксСофт. Система управления качеством выполняет функции автоматизации управления производством в цехе контроля, измерений и анализа (ЦКИиА), что включает передачу результатов лабораторных испытаний производственному персоналу завода и представление этих результатов в удобном виде (сводки, отчеты, графики), а также выдачу сертификатов качества выпущенной продукции в конце производственного цикла. Внедрение этой системы нацелено на снижение производственных потерь и повышение производительности оборудования и персонала, что происходит за счет более точного управления качественными технологическими показателями производства в основных цехах.

Http://www.toxsoft.ru