

МЕТОДИКА КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК УСТОЙЧИВОСТИ, УПРАВЛЯЕМОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ

к.т.н. *Капитонов С.А.*, ОАО «ОКБ Сухого»

Предложена шкала оценивания качества переходных процессов при автоматическом управлении летательным аппаратом, позволяющая обоснованно и точно формулировать качественные оценки процессов управления по данным летного эксперимента.

Важность свойств устойчивости и управляемости при использовании систем автоматического управления (САУ) требует привлечения для их оценки наряду с количественными методами методы качественной оценки переходных процессов (ПП).

Существующие шкалы качественной оценки Цуварева, Купера-Харпера [1, 2] создавались для оценки режимов ручного управления, основанные на органолептической оценке [3] ПП летчиками по результатам только летных экспериментов. Они не учитывают в явном виде располагаемые характеристики устойчивости и управляемости, не обладают однозначностью. Применение указанных шкал может привести к значительному разбросу качественных оценок летчика одного и того же ПП, так как оценки формируются словесным образом безотносительно к некоторым граничным значениям параметров полета, определяемых характером решаемой задачи как обобщенные и могут содержать в себе достаточно широкий смысловой диапазон, либо относиться в равной степени к различным свойствам, на одном из которых каждый летчик-эксперт может акцентировать свое внимание.

С другой стороны, смысловая расшифровка словесной обобщенной формулировки, выработанной на основе шкал Цуварева и Купера-Харпера может вызвать неоднозначность представления об исследуемом ПП из-за возможного появления семантической генерализации [4], имеющей место при анализе близких по значению слов, так как любая, сколь угодно длинная фраза, лишь приблизительно отражает мысль. Кроме этого, формирование качественной оценки характеристик устойчивости, управляемости с использованием указанных шкал исключает из этого процесса специалистов по САУ и не может быть применено при интерпретации данных исследования САУ методами моделирования.

Источником «разнопонимания» при использовании указанных шкал оценки могут быть:

- недостаточная структуризация понятия качества ПП;
- неучет в явном виде реальных характеристик управляемости летательного аппарата (ЛА);
- различное понимание допустимости ПП или неучет целей управления;
- отсутствие «единого языка» для общения между различного рода экспертами (летчиками и специалистами-разработчиками САУ), так как опыт и интуиция не приводят сами по себе к единству мышления и понимания.

Поэтому, формирование практически используемой шкалы качественной оценки ПП, которая может быть использованы при экспериментальной оценке САУ по данным, как летных экспериментов, так и моделирования, а также при нормировании ПП и задании требований к САУ на предпроектной стадии, одновременно как летчиками, так и специалистами по САУ, следует осуществлять на основе привязки к некоторым эталонам ПП и создания неформального языка, близкого к естественному (типа *U*-языка [5]) и со специализированным словарным запасом, содержащим лингвистические переменные минимальной степени абстрактности, то есть с достаточно подробной степенью описания принятых эталонов ПП и их оценкой с точки зрения возможности решения задач управления ЛА.

С этой целью совокупность выходных реакций САУ на заданные наборы управлений (U), внешних возмущений (ξ), начальных условий ($X_{ок}$) необходимо разбить на классы эквивалентности, для каждого из которых определено свое эталонное представление качества ПП, в пределах которых параметры ПП находятся в некоторых заданных диапазонах и поэтому специалисты-эксперты могут считать ПП равноценными. При этом должна быть сформулирована шкала оценок относительно качества ПП для каждого класса эквивалентности с точки зрения их приемлемости при решении задач управления ЛА на данном этапе полета. Так как оптимальное для восприятия и мысленной обработки человеком является число градаций качества объекта исследования, равное 7 [4], целесообразно ввести 7 непересекающихся классов эквивалентности ПП $\{P_i\} (i \leq 7)$. В класс P_7 входят ПП оптимального качества, в класс P_1 входят ПП, совершенно неприемлемые с точки зрения безопасности полета, классы P_2, \dots, P_6 означают различные ступени качества ПП.

Формы кривых ПП (как правило, переходных функций), соответствующих различным классам эквивалентности, будут различаться для различных параметров полета:

- нормальной и боковой составляющих перегрузки - n_y, n_z ;
- углов крена, курса, тангажа - γ, Ψ, v ;
- углов атаки и скольжения - α, β ;
- приращений высоты и линейного бокового отклонения - $\Delta H, \Delta Z$.

Учитывая опыт проведения летных экспериментов по оценке САУ на самолетах, целесообразно сформулировать следующие положения по качественной оценке различных ПП:

- допустима колебательность для ПП с оценкой «хорошо» по параметрам: n_y, n_z, α, β - с числом колебаний $n_k \leq 3$;
- $\gamma, \Psi, v, \Delta H, \Delta Z$ - с $n_k \leq 1$, при этом перерегулирование σ не должно быть значительным. Приемлемое время t_n должно обеспечиваться рациональным использованием характеристик управляемости и маневренности ЛА - $|\dot{x}|_{\max}, |\ddot{x}|_{\max}$ (x - управляемый параметр полета), которые зависят от вида и состава рулевых органов и их быстродействия (схемы создания управляющих моментов и сил), которые могут быть определены расчетами или экспериментально.

Так как ЛА предназначен для решения задач управления различной степени сложности, то это необходимо учитывать при формировании требований к качеству ПП при автоматическом управлении. Исходя из этого следует различать:

- общие задачи управления (ОЗУ), для решения которых не используются режимы полета вблизи ограничений на параметры полета, наложенные на ЛА;
- задачи высокоточного управления (ЗВУ), для решения которых используются режимы полета вблизи вышеупомянутых ограничений, что обеспечивает достаточный диапазон траекторий полета (возможностей целевого применения ЛА) и максимальную эффективность применения ЛА.

Из теории оптимальных по быстродействию САУ [5] известно, что оптимальное управление достигается за счет максимального и рационального использования располагаемых управлений, обеспечиваемых максимальным по величине отклонением рулевого органа (РО). В простейшем случае материальной точки, величина отклонения РО определяет ее ускорение по заданной координате, а в более сложных случаях ускорение управляемой координаты приблизительно пропорционально на некоторых интервалах времени отклонению РО. Поэтому возможно на уровне общих представлений приближенное описание желаемого ПП $x_{жс}(t)$ квадратичными функциями времени вида с учетом ограничения по максимальной скорости \dot{x}_{\max} , которое будет иметь вид:

$$x_{жс}(t) = \begin{cases} \frac{\ddot{x}_{vax} t^2}{2} & \text{при } t \leq t_1 \\ \dot{x}_{vax} (t - t_1) + \frac{\ddot{x}_{max} t_1^2}{2} & \text{при } t_1 < t \leq t_2 \\ \dot{x}_{max} (t_2 - t_1) + \frac{\ddot{x}_{max} t_1^2}{2} + \dot{x}_{max} (t - t_2) - \frac{\ddot{x}_{max} (t - t_2)^2}{2} & \text{при } t_2 < t \leq t_3 \text{ ,дв,} \end{cases} \quad (1)$$

где t_1 - время достижения максимальной скорости \dot{x}_{max} ,

t_2 - время начала «торможения» до нулевой скорости на заданном конечном уровне желаемого ПП $x_{ж}(t)$.

Время $t_{n_{жс}}$ будет равно:

$$t_{n_{жс}} = 2 \cdot t_1 + (t_2 - t_1) = \frac{\dot{x}_m}{\ddot{x}_m} + \frac{x_m}{\dot{x}_m} \quad (2)$$

При отсутствии ограничения по максимальной скорости момент времени t_1 представляет собой время достижения половины заданного конечного уровня желаемого ПП $x_{ж}(t)$:

$$t_{n_{жс}} = 2 \cdot t_1 = 2 \sqrt{\frac{x_m}{\ddot{x}_m}} \quad (3)$$

Условия принадлежности ПП к классам эквивалентности P_i могут быть сформулированы в следующем виде, учитывающем пространственно-временной размах ПП:

$$\begin{aligned} P_7 &: (\sigma \leq 0,05) \cap (t_n \leq 1,4 \cdot t_{n_{min}}), \\ P_6 &: (\sigma \leq 0,1) \cap (t_n \leq 1,5 \cdot t_{n_{min}}) / P_7, \\ P_5 &: (\sigma \leq 0,2) \cap (t_n \leq 1,6 \cdot t_{n_{min}}) / P_6, \\ P_4 &: (\sigma \leq 0,3) \cap (t_n \leq 1,7 \cdot t_{n_{min}}) / P_5, \\ P_3 &: (\sigma \leq 0,4) \cap (t_n \leq 1,8 \cdot t_{n_{min}}) / P_4, \\ P_2 &: (\sigma \leq 0,5) \cap (t_n \leq 1,9 \cdot t_{n_{min}}) / P_3, \\ P_1 &: (\sigma \geq 0,5) \cap (t_n > 1,9 \cdot t_{n_{min}}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $t_{n_{min}}$ - оптимальное значение t_n , обеспечиваемое полным и рациональным использованием располагаемых управлений;

X/Y -множество элементов, образованное исключением из множества X элементов, одновременно принадлежащих множеству Y (т.е. из X «вычитается» Y).

Классам эквивалентности ПП P_7, \dots, P_1 может быть поставлена шкала баллов - 7... 1, или четырех бальная шкала качественной оценки: P_7, P_6 - отлично; P_5 - хорошо; $P_4 \dots P_2$ - удовлетворительно; P_1 - неудовлетворительно.

При жестких ограничениях на диапазон изменения t_n качество ПП может различаться только по виду кривой ПП, которая характеризуется поведением ПП на начальном его этапе, поведением ПП после первого прохождения заданного значения до завершения ПП. Обоснование требуемого значения t_n является важнейшим этапом в разработке методики оценивания ПП.

Предложенная шкала оценки качества ПП с учетом вышеупомянутого опыта экспериментальной оценки САУ имеет следующую смысловую интерпретацию:

- уровень 7 (превосходный) - ПП очень близкий по форме к оптимальному по быстродействию ПП для объекта второго порядка с передаточной функцией близкой к передаточной функции последовательного соединения двух интегрирующих звеньев. Может потребоваться в особых случаях ЗВУ, например, автоматическое управление самолетом при контакте с устройством дозаправки самолета-заправщика;

- уровень 6 (отличный) - ПП, близкий по к оптимальному по быстродействию ПП для объекта второго порядка с передаточной функцией близкой к передаточной функции последовательного соединения двух интегрирующих звеньев. Может потребоваться в большинстве случаев ЗВУ, например, автоматическое управление самолетом при полете в сомкнутом боевом порядке, стабилизация геометрической высоты при полете на предельно-малой высоте, при возможности может использоваться для решения ОЗУ;

- уровень 5 (хороший) - ПП, обеспечивающий только часть ЗВУ и все ОЗУ, например, автоматическое управление самолетом при заходе на посадку по первой и второй категориям ИКАО для автоматического захода на посадку, стабилизацию геометрической высоты при полете на малой высоте, при возможности может использоваться для решения ОЗУ;

- уровень 4 (удовлетворительный) - ПП, обеспечивающий решение только ОЗУ, например, автоматическое управление самолетом при полете на заданном эшелоне;

- уровень 3 (почти удовлетворительный) - ПП, обеспечивающий только часть ОЗУ, например, автоматическую стабилизацию заданного углового положения на высотах не менее установленных (безопасных);

- уровень 2 (неудовлетворительный) - ПП, не обеспечивающий ОЗУ по точности управления;

- уровень 1 (небезопасный) - ПП, не обеспечивающий безопасность полета при решении ОЗУ.

Применение предложенной шкалы оценки качества ПП полностью охватывает диапазон качественных оценок задач автоматического управления ЛА исходя из решаемых задач ЛА и может использоваться при нормировании и оценке качества автоматического управления, как по данным моделирования, так и летных экспериментов (ретроспективного анализа качества), а также при нормировании качества ПП САУ для различных этапов полета (перспективного планирования качества САУ).

Литература

1. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолета. Пространственное движение. - М.: Машиностроение, 1983.-320с.
2. Сильвестров М.М., Козиоров А.М., Пономаренко В.А. Автоматизация управления ЛА с учетом человеческого фактора. - М: Машиностроение, 1986 - 184 с.
3. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. -М.: Издательство стандартов, 2004 г. - 11с
4. Шапиро С.И. Вопросы генезиса структуры и функции обобщения в математическом мышлении. В сб. «Новые исследования в психологии», 1973, №1, с. 10 - 12.
5. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. -М.: Энергия, 1979 г. - 584с.