

УДК 629.7.018.3

*В.В. Бондарцев, А.Г. Федулова, А.А. Бордуков, М.Ю. Шумова, С.Г. Гуржин*

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА НАЗЕМНЫХ РЕЖИМАХ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

*Рассмотрены предпосылки, методические подходы и возможность создания автоматизированной системы оценки параметров движения летательного аппарата на наземных режимах эксплуатации на основе оптимизации показателей качества. Проведено сравнение двух подходов к созданию данной автоматизированной системы. Показана целесообразность создания системы оценки параметров движения летательного аппарата на наземных режимах эксплуатации на основе оптимизации показателей качества.*

**Ключевые слова:** наземные режимы эксплуатации летательного аппарата, автоматизированная система, экспертная система, система имитационного моделирования.

**Введение.** Одной из важнейших проблем проведения летных испытаний являются значительные финансовые и трудовые затраты.

**Цель работы** – создание автоматизированной системы оценки движения летательного аппарата на наземных режимах эксплуатации за счет оптимизации показателей качества путем снижения трудозатрат и повышения экономической эффективности эксперимента. Проанализировать работу создаваемой автоматизированной системы, выделить проблемы реализации и предложить возможные пути их решения.

**Постановка задачи. Теоретические и экспериментальные исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо разработать автоматизированную систему оценки параметров движения летательного аппарата на наземных режимах эксплуатации.

Под наземными режимами эксплуатации летательного аппарата понимаются разбег, пробег с режимом торможения, передвижение летательного аппарата по взлетно-посадочной полосе.

Каждый полет начинается с взлета. Взлет воздушного судна может быть с разбегом или вертикальным.

Взлетом называется ускоренное движение летательного аппарата от момента начала разбега до набора высоты 25 м.

Разбег – это начальный период взлета, представляющий собой ускоренное движение летательного аппарата по земле, необходимое для приобретения такой скорости, при которой кры-

ло создает подъемную силу, способную оторвать его от земли.

На современных воздушных судах разбег выполняется следующим образом. Перед разбегом летательный аппарат удерживается на месте с помощью тормозов главных колес шасси, плавно увеличивается тяга двигателей до максимальной, затем отпускаются тормоза, и воздушное судно начинает движение на всех колесах шасси. Когда скорость летательного аппарата достигнет такой величины, при которой руль высоты становится достаточно эффективным, взятием ручки на себя увеличивается угол атаки крыла и отрывается от земли носовое колесо. Дальнейшее движение воздушного судна до отрыва происходит на главных колесах шасси.

Отрыв носового колеса необходим для придания летательному аппарату взлетного угла атаки. В процессе разбега скорость воздушного судна увеличивается от нуля до скорости отрыва. Следовательно, разбег представляет собой прямолинейное ускоренное движение под действием внешних неуравновешенных сил [1].

На летательный аппарат при разбеге действуют следующие силы:

- сила тяги двигательной установки  $P$ ; в начале разбега ее величина максимальна, а затем по мере увеличения скорости постепенно уменьшается;
- сила веса воздушного судна  $G$ ; по величине неизменна, направлена вниз;
- подъемная сила  $Y$ ; в начале разбега равна

нулю, а в конце разбега, при отрыве, достигает величины веса воздушного судна;

– сила лобового сопротивления  $Q$ ; возрастает по мере разбега от нуля до некоторого значения (в зависимости от угла атаки, скорости, высоты полета);

– нормальная сила реакции земли  $N$ ; в начале разбега равна весу воздушного судна, а по мере нарастания скорости и увеличения подъемной силы уменьшается до нуля при отрыве;

– сила трения пневматиков о грунт  $F$ ; зависит от коэффициента трения колес о землю  $f$  и от силы  $N$  [2]:

$$F = N \cdot f.$$

Уравнение движения центра тяжести летательного аппарата при разбеге будут иметь вид:

$$P - Q - F = \frac{G}{g} i_x; \quad (1)$$

$$Y - G + N = 0,$$

где  $i_x = \frac{dV}{dt}$  – ускорение движения;  $g$  – ускорение свободного падения.

Из уравнения следует, что в направлении движения действует неуравновешенная сила, равная разности сил  $P - (Q + F)$  и вызывающая ускорение движения. Нарастание скорости на разбеге будет происходить тем быстрее, чем больше величина этой неуравновешенной силы.

Сила трения колес о землю равна

$$F = f \cdot N = f(G - Y).$$

Из формулы видно, что сила трения в конце пробега обращается в нуль, так как при отрыве  $G = Y$ .

Ускорение при разбеге согласно уравнению (1) может быть выражено

$$i_x = g \frac{P - [Q + f(G - Y)]}{G}$$

или

$$i_x = g \frac{P - (Q + F)_{cp}}{G}.$$

Ввиду того, что сила тяги в процессе разбега изменяется незначительно, а сила лобового сопротивления  $Q$  при увеличении скорости увеличивается примерно в такой же мере, в какой уменьшается сила  $P$ , ускоряющая сила на разбеге изменяется также незначительно.

Из сказанного следует, что ускорение при разбеге сохраняется постоянным ( $i_x = const$ ), т.е. разбег является равноускоренным движением.

В реальных условиях среднее ускорение сильно зависит от величины коэффициента трения, который изменяется в зависимости от со-

стояния взлетно-посадочной полосы.

Для расчетов можно принять

$$f^1 = \frac{(Q + F)_{cp}}{G},$$

где  $f^1$  – осредненная величина коэффициента трения, зависящая от состояния поверхности взлетно-посадочной полосы.

Рассматривая разбег летательного аппарата как равноускоренное движение с ускорением  $i_{cp}$ , можем записать (при отсутствии ветра): среднее время разбега

$$t_{cp} = \frac{V_{cp}}{i_{cp}},$$

средняя скорость

$$V_{cp} = \frac{V_{omp}}{2},$$

но так как

$$L_{разб} = V_{cp} \cdot t,$$

то получим

$$L_{разб} = \frac{V_{omp}^2}{2i_{cp}}.$$

Как следует из последнего выражения, длина разбега зависит в основном от скорости отрыва и величины среднего ускорения на разбеге.

Для приближенной оценки влияния отдельных параметров можно воспользоваться следующей формулой:

$$L_{разб} = \frac{V_{omp}^2}{2g \left( \frac{P_{cm}}{G} - f \right)},$$

где  $P_{cm}$  – тяговооруженность самолета.

Выясним влияние различных эксплуатационных и конструктивных факторов на длину разбега летательного аппарата.

Влияние величины силы тяги силовой установки. С увеличением силы тяги  $P$  увеличивается ускоряющая сила  $P - (Q + F)$ , вследствие чего увеличивается ускорение и летательный аппарат быстрее (на меньшем отрезке пути) набирает скорость, равную скорости отрыва. С этим связано использование того или иного режима работы двигателя.

Влияние взлетного веса на длину разбега сказывается двояко. Увеличение его повышает скорость отрыва (нужна большая подъемная сила), и уменьшается ускорение (воздушное судно становится инертнее и несколько повышается сопротивление). И то и другое увеличивает длину разбега.

Влияние состояния поверхности взлетно-посадочной полосы связано с наличием силы трения колес о ее поверхность. При рыхлом,

мягком грунте сила трения возрастает, а ускоряющая сила  $[P - (Q + F)]$  уменьшается, в результате чего уменьшается ускорение, а длина разбега увеличивается. Сила трения, выраженная коэффициентом трения  $f$ , зависит от нагрузки на колеса и состояния поверхности аэродрома.

Чем меньше коэффициент трения, тем меньше сила трения  $F$ , а ускоряющая сила возрастает, что сокращает длину разбега. Поэтому применение взлетно-посадочных полос с твердым покрытием является одним из способов уменьшения длины разбега.

Влияние механизации крыла. Перед взлетом на большинстве современных летательных аппаратов выпускаются щитки (или закрылки) во взлетное положение, чтобы увеличить максимальное значение коэффициента подъемной силы самолета.

При этом подъемная сила, необходимая для отрыва, возникает на меньшей скорости. Для достижения меньшей скорости требуется и меньшая длина разбега.

Влияние направления и скорости ветра. Скорость, при которой создается необходимая подъемная сила, представляет собой скорость летательного аппарата относительно воздушной массы. При встречном ветре скорость отрыва складывается из скорости воздушного судна относительно земли и скорости ветра.

Следовательно, разбег выгодно совершать против ветра, так как в этом случае скорость воздуха относительно летательного аппарата будет больше, чем скорость его относительно земли. И отрыв произойдет раньше.

При взлете по ветру длина разбега увеличивается ввиду того, что воздушная скорость воздушного судна в этом случае равна разности между путевой скоростью и скоростью ветра.

Поэтому с целью сокращения длины разбега летательного аппарата старт разбивают таким образом, чтобы взлет совершался против ветра.

Влияние давления и температуры воздуха. От величины давления и температуры атмосферного воздуха зависят скорость отрыва и сила тяги двигательной установки. С уменьшением давления увеличивается скорость отрыва, а сила тяги уменьшается, что ведет к увеличению длины разбега. При увеличении температуры наружного воздуха длина разбега увеличивается, так как увеличивается скорость отрыва и уменьшается сила тяги. Это происходит из-за уменьшения массовой плотности при повышении температуры.

Наклон взлетной полосы. Если взлетная полоса имеет угол наклона, то ускорение на разбеге будет отличаться от ускорения при горизонтальном разбеге [3].

Угол наклона полосы на скорость отрыва не влияет и сказывается только на ускорении, следовательно, и на длине разбега.

Рассмотренные параметры, характеризующие разбег, могут быть отнесены и к другим режимам движения по взлетно-посадочной полосе (пробег и передвижение летательного аппарата по взлетно-посадочной полосе). Разрабатываемая автоматизированная система должна учитывать все факторы, влияющие на движение летательного аппарата, и вмещать в себя оценку по всем показателям качества.

Для проектирования автоматизированной системы оценки движения летательного аппарата необходимо провести анализ существующих подходов, наиболее приемлемых к решению поставленной задачи. При проведении анализа возможности создания такой автоматизированной системы выявлено два наиболее целесообразных подхода. Это подход создания экспертной системы с полным содержанием базы знаний по параметрам движения летательного аппарата на наземных режимах эксплуатации с использованием готового математического аппарата и программного обеспечения (оболочки). И второй – это подход создания системы имитационного моделирования.

Для проведения анализа необходимо описать принцип построения этих систем.

Подход с использованием экспертных систем. Само понятие экспертной системы включает в себя некоторое программное обеспечение (готовую оболочку или специально разработанное под решение той или иной задачи), которое с помощью созданной базы знаний, заданных начальных условий к эксперименту и решателя (продукционных правил) вырабатывает рекомендации или решение поставленного вопроса. Схематично экспертная система изображена на рисунке 1.

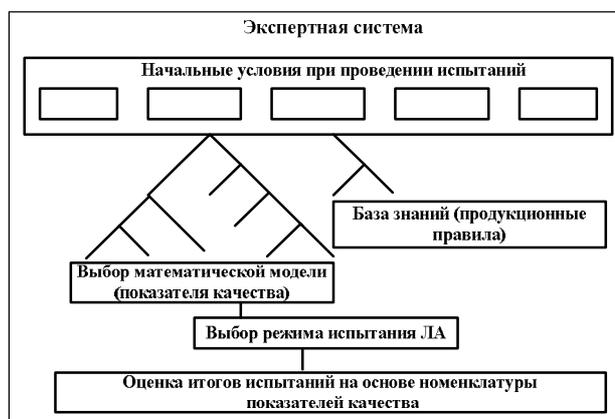


Рисунок 1 – Экспертная система

Системе задаются начальные условия для проведения испытаний, как правило, они диктуются техническим заданием и параллельно указываются в программе летных испытаний летательного

аппарата. Начальные условия испытаний – это те показатели, которые обязательно должны учитываться, и без них эксперимент не состоится.

С учетом начальных условий в созданной базе знаний и разработанных производственных правил выбирается математическая модель. Выбор математической модели, а также заданные начальные условия диктуют выбор режима, на котором будет испытываться летательный аппарат (разбег, пробег, движение по рулевой полосе). Далее по результатам выбора на экране появляются итоги проведения эксперимента, выраженные показателями качества. Так как планируется использовать полную номенклатуру показателей качества испытываемого объекта, то итоговый результат должен быть достаточно информативен.

Для высокой продуктивности работы создаваемой системы необходима детальная проработка отдельных составляющих. Задаваемые начальные условия должны подразумевать тот режим, по которому будет испытываться летательный аппарат. Но в создаваемой системе должна иметь место и возможность широкого разброса задаваемых параметров. Для этого в начале проектирования системы необходимо предусмотреть этот фактор и учитывать его при проектировании.

База знаний в системе должна предусматривать возможность хранения долгосрочных данных, охватывающих решаемую задачу. В базу знаний должны войти все параметры и факторы, влияющие на летательный аппарат, испытываемый на изучаемых режимах эксплуатации.

Решатель (производственные правила), используя начальные условия, а также данные прошлых экспериментов, находящиеся в рабочей памяти, и знания из базы знаний, реализует последовательность решений, которые будут совместимы с заданными начальными условиями и приведут к правильному выбору используемой математической модели и грамотному решению задачи.

Также в экспертной системе должны присутствовать: компонент приобретения знаний, объяснительный компонент и диалоговый компонент. Компонент приобретения знаний позволит дополнять созданную систему новыми знаниями, что, в свою очередь, обеспечит гибкость экспертной системы и позволит ведущему инженеру по летным испытаниям летательного аппарата решать задачи «неклассического» типа. Объяснительный компонент позволит ведущему инженеру по летным испытаниям получить развернутый ответ о том, почему система пришла к такому решению или эксперимент не удался, какие знания из базы знаний она использовала и какими производственными правилами пользовалась. Таким образом, данный компонент пред-

ставляет собой некое тестирование системы.

Диалоговый компонент вводится для более комфортного общения ведущего инженера по летным испытаниям с системой в период проведения эксперимента в процессе сбора знаний и получения результатов решения поставленной задачи. Математические модели, которые будут выбираться системой в ходе решения, использованы в виде готовых уравнений движения летательного аппарата, в зависимости от режима испытаний.

Номенклатура показателей качества будет создана на основе норм летной годности и с учетом параметров воздействия на летательный аппарат на том или ином режиме испытаний, главными из которых являются надежность и экономические показатели. Оценка показателей качества будет осуществляться с учетом квалиметрических шкал.

Как показывает практика, создание экспертной системы состоит из шести этапов: идентификация, концептуализация, формализация, выполнение, тестирование, опытная эксплуатация. Рассмотрим каждый этап. Этап идентификации – постановка задачи, цели разработки, определение круга пользователей. Этап концептуализации – анализ предметной области, уточнение понятий и их взаимосвязей, определение метода решения задачи. Этап формализации – принятие решения по поводу используемого программного обеспечения (вновь создаваемое или готовая оболочка), определение способов представления знаний, моделирование работы системы. На основе этого этапа осуществляется оценка адекватности системы. Этап выполнения – создание полной базы знаний, с учетом теоретических представлений и опыта ведущих инженеров по летным испытаниям.

Анализируя все выше сказанное, можно сделать вывод о том, что экспертная система работает в определенной области, заданной базой знаний и производственными правилами, которые уже накоплены в результате предыдущих летных испытаний, и использует их для решения задач ограниченной специфики.

Вторым подходом является подход с использованием систем имитационного моделирования. Само понятие системы имитационного моделирования подразумевает способ изучения сложных многокомпонентных систем, которые подвержены изменениям с течением времени. При проектировании берутся во внимание причинно-следственные взаимосвязи между заданными параметрами системы, причем уделяется особое внимание обратной связи между ними. У данной системы имеется возможность симуляции числовых показателей (в нашем случае числовых значений показателей качества, заданных с помощью квалиметрических шкал и норм летной годности),

с помощью которой в виде графика или таблицы будет показано поведение системы. При этом важным аспектом является то, что разработанная модель не только должна вести себя как реальный исследуемый объект, но и выполнять поставленные задачи с учетом тех причин, которые существуют в реальности (например, внешние воздействующие факторы). В работе планируется создание количественной модели с помощью системы имитационного моделирования. Эта модель как раз имеет возможность симуляции числовых показателей. В количественной модели принято использовать определенные элементы. Элементы представлены в таблице.

#### Элементы модели системы имитационного моделирования

Название	Описание
Резервуар (англ. <i>stock</i> )	Элемент, который аккумулируется или уменьшается с течением времени
Поток (англ. <i>flow</i> )	Элемент, влияющий на состояние резервуара (уменьшает, увеличивает, оставляет неизменным)
Переменная (англ. <i>variable</i> )	Элемент, который изменяется мгновенно, не аккумулируется
Соединение (англ. <i>connection</i> )	Элемент, указывающий связи между резервуарами, потоками, переменными

Таким образом, данный подход позволяет учесть основное взаимодействие между параметрами системы, временные изменения в динамике ее развития, что позволяет более структурированно рассматривать проблемные моменты и пути их решения.

Рассмотрим наглядный пример. Длина разбега при взлете летательного аппарата зависит от множества факторов. Наиболее наглядными и понятными являются сила тяги двигательной установки (соответственно, чем выше этот показатель, тем меньше длина разбега) и сила трения колес шасси о поверхность взлетно-посадочной полосы (чем ниже этот показатель, тем меньше длина разбега). В этом случае «резервуаром» будет служить длина разбега летательного аппарата при взлете, а два показателя, влияющие на нее, будут являться «потоками». Таким образом, модель примет следующий вид (рисунок 2):

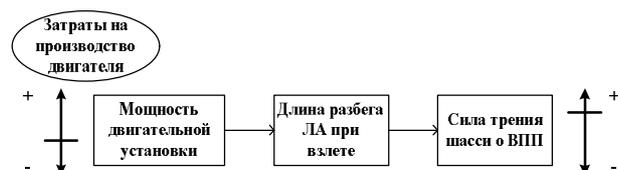


Рисунок 2 – Пример имитационной модели

Логически сила тяги двигательной установки имеет большее значение, нежели сила трения

колес шасси о поверхность взлетно-посадочной полосы, тогда (см. график):

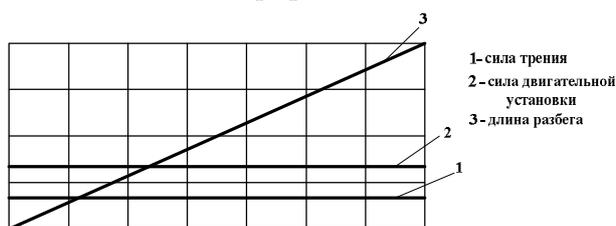


График – Зависимости имитационной модели

Из полученного графика видно, что сила тяги двигательной установки оказывает большее влияние на длину разбега летательного аппарата, чем сила трения колес шасси о взлетно-посадочную полосу.

**Заключение.** Для снижения трудозатрат и повышения экономической эффективности разработка автоматизированной системы оценки движения летательного аппарата является достаточно актуальной. Для достижения поставленной цели наиболее целесообразно будет создать интегрированную автоматизированную систему, в которую должны войти экспертная система и система имитационного моделирования. В большинстве случаев экспертные системы и системы имитационного моделирования применяют для решения различного рода задач, но часто возникает необходимость их интегрированного применения для достижения одной цели. Экспертные системы обладают высоким быстродействием. Это связано с тем, что в них запрограммирован опыт решения типовых задач. При возникновении аналогичных задач экспертные системы тоже достаточно эффективны, но в нестандартных случаях (новых условиях) они уступают системам имитационного моделирования.

При небольшом количестве параметров системы имитационного моделирования показывают высокую производительность, которая сочетается с высокой точностью.

Создание интегрированной системы, включающей возможности экспертной системы и системы имитационного моделирования, на основе оптимизации показателей качества позволит значительно расширить круг решаемых задач, увеличить быстродействие и точность.

#### Библиографический список

1. Гудков А.И., Лешаков П.С., Райков Л.Г. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. – М.: Оборонгиз, 1963. – 480 с.
2. Кокунина Л.Х. Основы аэродинамики. – М.: Транспорт, 1976. – 208 с.
3. Макаревский А.И. Прочность самолета. – М.: Машиностроение, 1975. – 281 с.