



УДК 656.7.052

© 2018 г. **Н.И. Сельвесюк**, д-р техн. наук

(Государственный НИИ авиационных систем, Москва),

С.С. Кананадзе, канд. техн. наук,

Г.Н. Лебедев, д-р техн. наук,

А.П. Москалев

(Национальный исследовательский университет «МАИ», Москва)

ЗАДАЧА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗЛЕТА ПРИ РАЗБЕГЕ БЕСПИЛОТНЫХ И ПИЛОТИРУЕМЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ*

Предложены подходы для решения задачи автоматического контроля безопасности взлета летательного аппарата при разбеге ограниченной длины. Путем моделирования получены эмпирические формулы расчета безопасных параметров взлета, содержащие текущий измеряемый пройденный путь и скорость пробега. Получена формула определения коэффициента опасности разбега внутри найденного окна ожидаемого успешного взлета. Это позволяет избежать влияния человеческого фактора путем формирования сигналов предупредительной и аварийной тревоги.

Ключевые слова: автоматический взлет, безопасность разбега, минимальный риск, летательный аппарат, безопасность полета.

DOI: 10.22250/isu.2018.58.52-59

Введение

Одним из наиболее ответственных этапов полета летательного аппарата (ЛА) является взлет, при котором присутствует ряд неблагоприятных факторов: повышенная сила трения колес шасси при разбеге; сила лобового сопротивления; высокая удельная сила бокового ветра. Для пилотируемых ЛА к ним добавляются недостатки действий экипажа как при пробеге, так и после отрыва от земли [1, 2]. В данной работе предлагается подход к автоматизации контроля безопасности разбега на основе оценки ряда рисков, имеющих место на этом этапе.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №18-08-00463, №18-08-00079.

Эти риски связаны, с одной стороны, с недостаточным ускорением разбега при появлении ряда препятствий на взлетно-посадочной полосе (ВПП), увеличивающих силу трения (снег, песок и т.п.) и приводящих к недостаточной скорости разбега. С другой стороны, при ограниченной длине разбега возникают условия, при которых уже нельзя остановиться при необходимости прекратить взлет за счет экстренного торможения на оставшемся участке пути [3].

Сущность предлагаемого подхода состоит в обеспечении автоматизации непрерывного контроля разбега самолета путем вычисления специального коэффициента опасности в реальном времени и сравнения его с заданными порогами с целью формирования сигналов предупредительной и аварийной тревоги.

Постановка задачи

Движения самолета по взлетно-посадочной полосе при разбеге с известными параметрами описываются следующим уравнением:

$$\dot{V} = P - fg - a(1 - Kf)V^2, \quad (1)$$

где V – скорость разбега самолета; P – удельная тяга двигателя, приходящаяся на единицу массы; f – коэффициент сухого трения; g – ускорение силы тяжести; a – удельный аэродинамический коэффициент лобового сопротивления; K – коэффициент аэродинамического качества.

Параметры P , K и a для соответствующих типов ВС известны. Так, для легких беспилотных летательных аппаратов (БЛА) традиционной аэродинамической схемы они лежат в пределах:

$$1,5 \leq P_1 \leq 2; 6 < K_1 < 8; a_1 \geq 3 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

а для пилотируемых ВС самолетного типа (ПЛА) – в пределах:

$$2,5 \leq P_2 \leq 3; 3 < K_2 < 5; a_2 \geq 4 \cdot 10^{-4}. \quad (3)$$

Принимаются заданными ограничения на скорость взлета ВС $V_{\text{в}}$ в момент отрыва от земли, которые имеют для БЛА и ПЛА соответствующие значения:

$$V_{\text{в}} = V_1 \geq 30 \text{ м/с}; V_{\text{в}} = V_2 \geq 50 \text{ м/с}. \quad (4)$$

Также считаются заданными ограничения на максимальную скорость V_{max} горизонтального полета после отрыва от земли, равные для БЛА и ПЛА соответственно

$$V_{\text{max}} = V_3 \leq 70 \text{ м/с}; V_{\text{max}} = V_4 \leq 200 \text{ м/с}. \quad (5)$$

С учетом указанных ограничений (2) – (5) и предварительных вычислений ускорений $a_p = \dot{V}$ при разбеге принимается, что последним слагаемым в уравнении (1) можно пренебречь. Поэтому в дальнейших расчетах ускорение при разбеге a_p считается постоянным и вычисляется по формуле

$$a_p = \left(P - fg \right) \left(1 - \frac{V_B^2}{V_{\max}^2} \right). \quad (6)$$

При этом путем моделирования установлено, что для БЛА погрешность расчета коэффициента опасности не превышает 5%, для ПЛА – 15%.

Считается, что коэффициент трения при экстренном торможении достигает значения $f = 0,5$. При разбеге значение коэффициента трения лежит в пределах

$$0,05 \leq f \leq 0,15. \quad (7)$$

Это позволяет приближенно оценить постоянное ускорение при торможении:

$$a_T = P - 0,5g. \quad (8)$$

Предложенный приближенный подход на основе гипотезы о равноускоренных процессах разбега и торможения обоснован тем, что он позволяет аналитически получить необходимые оценки риска в простой алгебраической форме. Кроме того, для технической реализации алгоритмов удобным является возможность непосредственного измерения самих ускорений a_p и a_T при разбеге, между тем как фактическое значение тяги P не измеряется, а дифференциальное квадратичное уравнение (1) аналитически не решается [4].

На основании приведенных исходных данных требуется:

провести компьютерное моделирование процессов разбега при взлете пилотируемых и беспилотных ВС для эмпирического формирования алгоритмов определения параметров участка пробега по земле, гарантирующего безопасный взлет либо его экстренное прекращение при заданной общей длине разбега S_0 ;

предложить математическую модель количественной непрерывной оценки коэффициента опасности разбега в реальном времени с целью оперативного принятия необходимых решений о продолжении пробега или его прекращении.

Алгоритмы определения параметров безопасного участка разбега

Рассмотрим возможный набор альтернатив при разбеге: A_1 – успешное выполнение разбега и взлета; A_2 – аварийное прекращение разбега; A_3 – безопасное прекращение разбега.

Альтернатива A_1 характеризуется условием достижения ВС скорости $V \geq V_B$ на длине пробега, не превышающей S_0 .

Альтернатива A_2 характеризуется следующими условиями:

невозможность из-за действия неблагоприятных факторов достижения ВС скорости $V \geq V_B$ на участке оставшегося пути $(S_0 - x_1)$:

$$V + \frac{a_p(S_0 - x_1)}{V} < V_B, \quad (9)$$

где x_1 – координата пройденного пути при разбеге;

невозможность остановки при торможении на участке оставшегося пути ($S_0 - x_1$), когда нужно выполнить команду прекратить взлет ВС.

Альтернатива A_3 характеризуется наличием условия (9) и дополнительно возможностью остановки при торможении на участке оставшегося пути ($S_0 - x_1$), когда нужно выполнить команду прекратить взлет ВС:

$$V^2 < 2a_T(S_0 - x_1). \quad (10)$$

Таким образом, среди перечисленных условий есть участок разбега, соответствующий альтернативе A_3 , когда будет обеспечен безопасный взлет. Для определения границ этого участка проведено компьютерное моделирование в среде Simulink этапа разбега с использованием уравнения (1) для трех режимов:

$r = 1$ – разбег (возможны все три альтернативы);

$r = 2$ – отрыв от ВПП и набор высоты после успешного разбега (альтернатива A_1);

$r = 0$ – торможение при прекращении разбега (альтернативы A_2 или A_3).

Выполнено моделирование альтернативы A_1 для легкого БЛА со следующими параметрами движения: $a_T = 10 \text{ м/с}^2$; $a_p = 4 \text{ м/с}^2$; $a_B = 4,5 \text{ м/с}^2$; $V_B = 30 \text{ м/с}$; $S_0 = 250 \text{ м}$ в идеальных условиях при $f = 0$.

На рис. 1 представлены результаты моделирования разбега, наглядно демонстрирующие наличие «безопасного окна» ($r = 2$), внутри которого разрешен взлет. Местоположение и размер этого «окна» зависят от существующих в условиях взлета ускорений при разбеге и торможении с учетом наличия или отсутствия препятствий (снег, песок и т.п.).

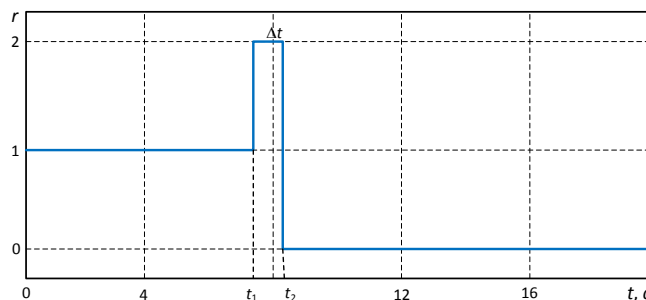


Рис. 1. График автоматического выбора режимов r_i .

Путем моделирования проведено исследование поведения «окна» при изменении характеристик ЛА и свойств взлетно-посадочной полосы, характеризующихся различными значениями коэффициента трения. Рассматривались два типа ЛА: тяжелый БЛА, рассчитанный на длительный полет со скоростью не более 70 м/с; пилотируемый ЛА с более низкими аэродинамическими характеристиками. Рассматривались два состояния ВПП: хорошее, с низким коэффициентом трения $f = 0,05$; плохое, с высоким коэффициентом трения $f = 0,12$. Параметры «окна» ($r = 2$) характеризуются его положением на временной оси этапа разбега и взлета ($t_1, t_2, \Delta t$). Здесь Δt – располагаемое время возможного разрешения на взлет.

Исходные данные и результаты моделирования сведены в таблицу.

| | Параметры ЛА | | Параметры движения | | | | Параметры ВПП | | Результаты моделирования | | |
|-----|--------------|------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|------|--------------------------|-----------|----------------|
| | P | K | V_B , м/с | a_T , м/с ² | a_P , м/с ² | a_B , м/с ² | S_0 , м | f | t_1 , с | t_2 , с | Δt , с |
| БЛА | 2 | 6 | 30 | 1,5 | 1 | $3 \cdot 10^{-4}$ | 1000 | 0,05 | 31,5 | 38,3 | 6,8 |
| | | | | 1,5 | 0,75 | $3 \cdot 10^{-4}$ | 1000 | 0,05 | 41 | 44,5 | 3,5 |
| ПЛА | 2,6 | 3,54 | 50 | 3 | 2 | $4 \cdot 10^{-3}$ | 2000 | 0,12 | 25 | 39 | 14 |
| | | | | 2 | 1 | $4 \cdot 10^{-3}$ | 2000 | 0,12 | 50 | 53 | 3 |

Сравнение полученных результатов моделирования показывает, что размер разрешенного «окна» взлета сокращается пропорционально увеличению коэффициента трения. При ухудшении качества покрытия ВПП возможности быстрого разбега снижаются. Результаты сравнения полученных «окон» также указывают на линейную зависимость их размера от коэффициента трения f .

Это позволяет использовать нашедшую экспериментальное подтверждение гипотезу о равноускоренном движении и записать следующие формулы.

Левая граница S_H «окна безопасности», выраженная в метрах пройденного пути в начале разбега, равна

$$S_H = \frac{V_B^2}{2a_P}. \quad (11)$$

Правая граница S_K «окна безопасности» с учетом заданной общей длины разбега S_0 определяется следующим образом:

$$S_K = S_0 - \frac{V_B^2}{2a_P} - \frac{V_B^2}{2|a_T|}. \quad (12)$$

Соответственно, располагаемое время Δt возможного разрешения на взлет можно заранее рассчитать для любого значения коэффициента трения f при разбеге, если воспользоваться дополнительными эмпирическими формулами:

$$a_P = P - fg, \quad |a_T| = f_{\max}g - P,$$

где f_{\max} – максимальное ускорение при торможении колес шасси.

Тогда располагаемое время Δt будет равно

$$\Delta t = \frac{S_K - S_H}{V_B} = \frac{S_0}{V_B} - \frac{V_B g f_{\max}}{2P(g f_{\max} - P)} - \frac{V_B g f}{2P^2}. \quad (13)$$

Формула (13) очевидно указывает, что при увеличении значения коэффициента трения f за счет ухудшения качества грунта время Δt для успешного выполнения команды взлета неотвратно сокращается, а первые два слагаемых формулы определяют максимально располагаемое «идеальное» время.

С использованием формулы (13) приведем следующие примеры расчета времени Δt для различных типов ЛА.

Пусть при взлете БЛА имеются следующие исходные данные: $S_0 = 700$ м; $V_B = 30$ м/с; $P = 2$; $f_{\max} = 0,5$. Тогда располагаемое время на взлет $\Delta t \cong 10 \div 40f$.

Пусть при взлете ПЛА имеются другие данные: $S_0 = 1800$ м; $V_B = 50$ м/с; $P = 3$; $f_{\max} = 0,5$. Тогда согласно формуле (13) получим $\Delta t \cong 15 \div 35f$.

Полученные результаты показывают, что с ухудшением условий пробега по ВПП ошибка по задержке взлета становится все опаснее. Вместе с тем дополнительным признаком необходимости взлета является неуклонное нарастание подъемной силы при разбеге и последующий отрыв от земли переднего колеса шасси, что подтверждает необходимость отклонения руля высоты на нужную величину.

Определение коэффициента опасности взлета при ограниченном времени разрешения на взлет

При выборе математической модели оценки опасности в работе используется тот факт, что по мере увеличения времени задержки в начале взлета при попадании в «окно» у оператора возникает ощущение нарастания тревоги. Этот процесс количественно можно аппроксимировать коэффициентом опасности $P_{\text{взл}}$, изменяющимся от нуля до единицы внутри «окна» [5, 6].

В качестве одной из простых моделей нарастания тревоги предлагается использовать экспоненциальную модель вида

$$P_{\text{взл}} = 1 - e^{-\frac{3(t-t_1)}{t_2-t_1}} = 1 - e^{-\frac{3(\sqrt{x_1} - \sqrt{S_n})}{\sqrt{S_k} - \sqrt{S_n}}}, \quad (14)$$

где t_1 – момент начала разрешенного взлета; t_2 – момент конца разрешенного взлета; S_n и S_k – значения, вычисляемые соответственно по формулам (11) и (12).

В формуле (14) используется измеряемое текущее значение x_1 пройденной длины разбега, а также измеряемое ускорение a_p разбега, применяемое для вычисления S_n и S_k .

Этой формуле соответствует схема моделирования в среде Simulink, представленная на рис. 2.

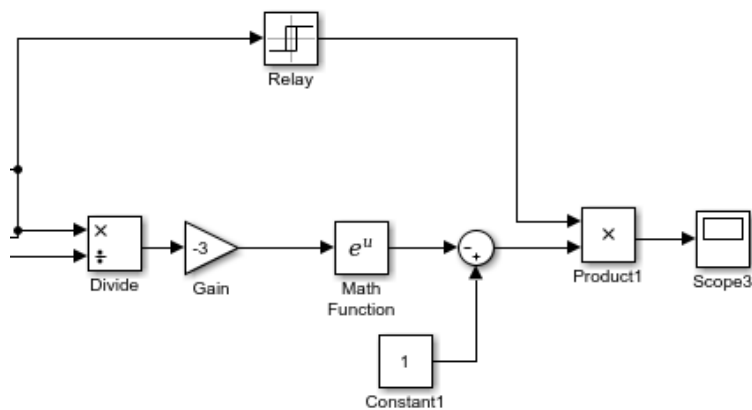


Рис. 2. Блок-схема оценки коэффициента опасности при разбеге.

Эта схема обеспечивает равенство нулю коэффициента опасности в начале разбега и ее возрастание в «окне». Для воспроизведения работы схемы на ее входе использовалась модель самого разбега, как показано на рис. 3.

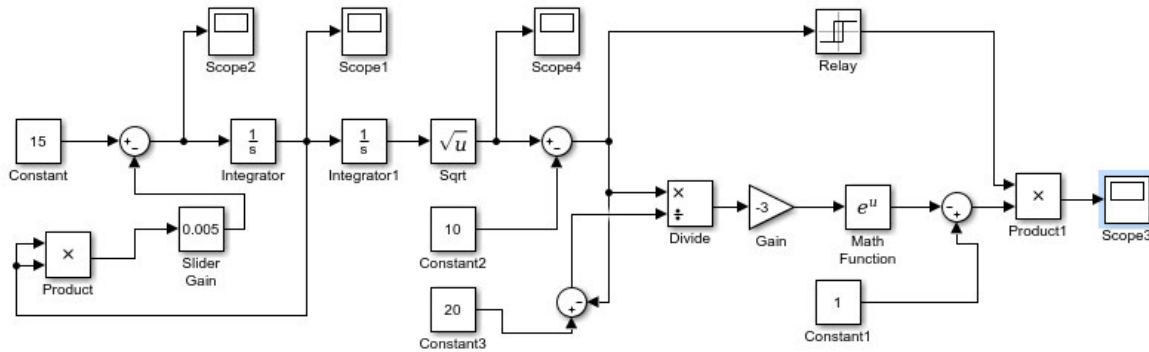


Рис. 3. Блок-схема моделирования процессов разбега и вычисления коэффициента опасности.

В результате моделирования получен показанный на рис. 4 график, иллюстрирующий динамику нарастания опасности в «окне» из-за неоправданной задержки в начале разрешенного взлета (чем больше опоздание, тем опаснее).

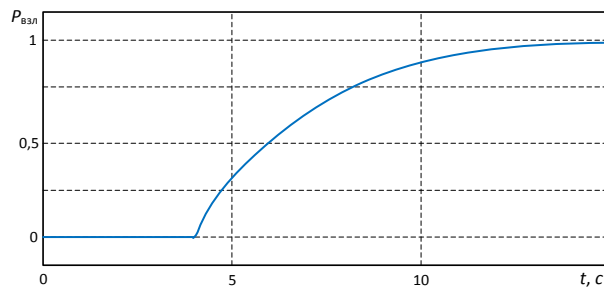


Рис. 4. График изменения коэффициента опасности в «окне» разрешенного взлета в интервале 4 – 12 с, при отсутствии препятствий.

График на рис. 4 показывает, что к концу интервала разрешенного взлета опасность достигает максимума, а все события значимого по опасности процесса происходят в течение 8 с.

Во втором случае наличия препятствий при взлете, когда максимальное ускорение при разбеге становится меньше, можно получить новый график оценки коэффициента опасности, показанный на рис. 5.

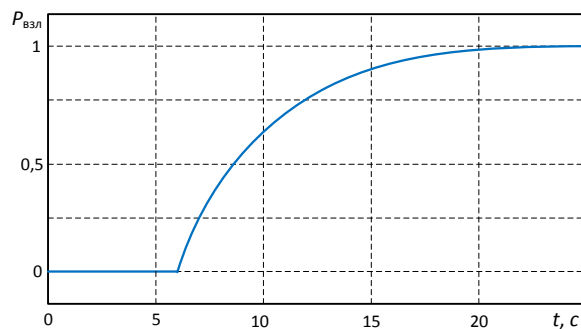


Рис. 5. График изменения коэффициента опасности в «окне» разрешенного взлета в интервале 6 – 12 с, при наличии препятствий.

Из графика видно, что размер «окна» возможного взлета сужается и равен 6 с, в отличие от первого случая, а коэффициент опасности нарастает с большей скоростью. Отметим, что расчет коэффициента опасности может потребовать для оценки с большей точностью использования текущих измерений по положению x_1 и ускорению разбега a_p , а также априорных данных о значениях S_0 , V_v и a_p .

Заключение

Получены формулы определения границ «окна» успешного взлета, гарантирующего минимальный риск. Показано, что при ухудшении качества ВПП размеры этого «окна» пропорционально уменьшаются.

Для участка разбега при взлете получена формула определения коэффициента опасности, учитывающая риск недостаточного времени для достижения нужной скорости взлета из-за ограниченной допустимой длины разбега.

Показано, что ненулевые значения коэффициента опасности при разбеге возникают в узком «окне» ожидаемого успешного взлета, когда при попадании в это «окно» существует неоправданная задержка в начале взлета. По мере увеличения этой задержки максимальный коэффициент опасности достигается в конце «окна».

Полная автоматизация контроля безопасности взлета позволит избежать влияния человеческого фактора из-за несвоевременных действий при разбеге самолета.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Котик М.Г.* Динамика взлета и посадки самолетов. – М.: Машиностроение, 1984.
2. *Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С.* Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1973.
3. Современное состояние и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов ведущих стран мира. – М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2016.
4. *Ефремов А.В., Захарченко В.Ф., Овчаренко В.Н. и др.* Динамика полета: учебник для вузов по профилю «Динамика и управление движением ЛА», под ред. Г.С. Брюшгенса. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Машиностроение-Полет, 2017.
5. *Yechout T.R.* Introduction to Aircraft Flight Mechanics. – Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
6. *Hull D.G.* Fundamentals of Airplane Flight Mechanics. – New York: Springer, 2007.

E-mail:

Сельвесюк Николай Иванович – selvesyk@yandex.ru;

Кананадзе Сергей Сергеевич – kananadze@ya.ru;

Лебедев Георгий Николаевич – kaf301@mail.ru;

Москалев Алексей Павлович – moskalev-alex@mail.ru.