

УДК 629.7.05

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ САМОЛЁТА

Ю.Б. Кулифеев, Ю.Н. Афанасьев

### Аннотация

Статья посвящена рассмотрению задачи автоматического управления продольным движением летательного аппарата самолетного типа для обеспечения автоматизации посадки. Задача решается за счет управления поворотным стабилизатором и изменения тяги силовой установки. Произведена оценка работоспособности и эффективности предложенного алгоритма

### Ключевые слова

алгоритмы автоматической посадки самолёта; вычисление заданных перегрузок; вычисление заданного угла отклонения стабилизатора; вычисление заданной тяги силовой установки

### Введение

Автоматическое управление должно обеспечить полную посадку вплоть до остановки самолёта на ВПП. При разработке алгоритмов управления потребуем, чтобы параметры движения самолёта при автоматической посадке практически соответствовали параметрам, предписанным инструкцией лётчику.

Снижение самолёта после выхода в створ ВПП происходит по прямой глиссаде. Прямой участок глиссады может быть реализован как физическим способом с использованием радиотехнических средств, так и виртуальным способом. В последнем случае в память бортовой ЭВМ должны быть записаны пространственные координаты глиссады с привязкой их к конкретному аэродрому посадки. Положение самолёта относительно виртуальной глиссады будет известно, если известны координаты его пространственного движения, определяемые, например, с помощью спутниковой навигационной системы.

Участок посадки при выравнивании в режиме ручного пилотирования обеспечивается лётчиком. При автоматической посадке траектория движения самолёта при выравнивании будет задаваться в виде пространственной виртуальной кривой.

Таким образом, требуемая траектория посадки, задаваемая как виртуальная глиссада, будет состоять из прямого участка снижения с углом наклона  $\theta_{гд}$  и кривой выравнивания.

Участок глиссады прямолинейного снижения определяется высотой входа в глиссаду  $H_{\text{гл.вх.прям}}$  и углом наклона прямого участка глиссады  $\theta_{\text{гл}}$ .

Переход с прямого участка глиссады на траекторию выравнивания происходит на заданной высоте начала выравнивания.

### Постановка задачи

В работе [1] предлагается кривую выравнивания при автоматической посадке задавать экспонентой следующего вида:

$$H_{\text{гл.выр}} = H_{\text{н.выр}} \exp\left(-\frac{tg\theta_{\text{гл}}}{H_{\text{н.выр}}} s\right), \quad (1)$$

где  $H_{\text{н.выр}}$  – заданная высота начала выравнивания,  $s$  – пройденный путь вдоль оси ВПП в процессе выравнивания, то есть при условии  $H_{\text{гл}} = H_{\text{н.выр}}$  полагается  $s = 0$ .

Таким образом, экспоненциальная кривая выравнивания задаётся только точкой в начале процесса выравнивания и определяется двумя параметрами: углом наклона глиссады  $\theta_{\text{гл}}$  и высотой начала выравнивания  $H_{\text{н.выр}}$ .

При условии, что угол  $\theta_{\text{гл}} = const$ , единственным варьируемым параметром является высота  $H_{\text{н.выр}}$ . При малых значениях вертикальной скорости самолёта в момент касания точка касания колёсами поверхности ВПП будет значительно удалена от начала ВПП, а при приземлении ближе к началу ВПП будет большая по модулю вертикальная скорость касания  $V_{\text{у.кас}} < 0$ .

С учетом указанного выше недостатка экспоненциального выравнивания, кривую выравнивания будем задавать в виде полинома третьего порядка, определяющего зависимость высоты полёта от пройденного пути  $s$  вдоль оси ВПП:

$$H_{\text{гл.выр}} = \sum_{k=0}^3 a_k s^k. \quad (2)$$

Для определения четырёх коэффициентов полинома используем краевые условия, налагаемые на траекторию выравнивания. Кривая выравнивания будет начинаться в точке начала выравнивания с высотой  $H_{\text{н.выр}}$  и иметь угол наклона  $\theta_{\text{гл}}$ . В этой точке будем полагать значение  $s = 0$ . Заканчиваться кривая выравнивания должна на высоте  $H_{\text{кас}}$  в точке

касания колёсами основных стоек шасси поверхности ВПП при значении координаты  $s_{\text{кас}}$ , определяемом выражением:

$$s_{\text{кас}} = s_1 - s_{\text{гл}} + s_{\text{зад}}, \quad (3)$$

где  $s_1 = \frac{H_{\text{н.выр}}}{\text{tg}\theta_{\text{гл}}}$ ,  $s_{\text{гл}} = 50...60$  метров,  $s_{\text{зад}}$  – заданное расстояние точки касания от

начала ВПП. Формулу (3) поясняет рис. 1.

Наконец, в качестве четвертого условия для определения кривой выравнивания потребуем, чтобы в точке касания угол наклона траектории был равен нулю:

$$\frac{\partial H_{\text{гл.выр}}}{\partial s}(s_{\text{кас}}) = 0. \quad (4)$$

Таким образом, кривая выравнивания заканчивается в точке касания на высоте  $H_{\text{кас}}$  при выполнении условия(4).

Два начальных и два конечных условия определяют коэффициенты кривой выравнивания:

$$a_0 = H_{\text{н.выр}}, \quad a_1 = -\text{tg}\theta_{\text{гл}}, \quad a_2 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad a_3 = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где

$$\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21},$$

$$\Delta_1 = b_1a_{22} - b_2a_{12},$$

$$\Delta_2 = b_2a_{11} - b_1a_{21},$$

$$a_{11} = s_{\text{кас}}^2, \quad a_{12} = a_{11}s_{\text{кас}}, \quad a_{21} = 2s_{\text{кас}}, \quad a_{22} = 3a_{11},$$

$$b_1 = \text{tg}\theta_{\text{гл}}s_{\text{кас}} - H_{\text{н.выр}} + H_{\text{кас}}, \quad b_2 = \text{tg}\theta_{\text{гл}}.$$

Таким образом, для построения траектории выравнивания должны быть заданы четыре параметра:  $\theta_{\text{гл}}$ ,  $H_{\text{н.выр}}$ ,  $H_{\text{кас}}$  и  $s_{\text{кас}}$ .

Высота  $H_{\text{кас}}$  – это расстояние центра тяжести самолёта от поверхности ВПП в момент касания основными колёсами ВПП. Она определяется геометрическими параметрами самолётного шасси и углом тангажа (атаки) в момент касания ВПП. Величина посадочного угла атаки при одном и том же значении скорости будет в свою очередь зависеть от массы самолёта на момент посадки.

Таким образом, заданная траектория полной посадки будет состоять из траектории

прямолинейного снижения по глиссаде и криволинейного участка выравнивания, заданного полиномом (2).

Если глиссада имеет виртуальный характер, то признаком входа в глиссаду и начала снижения по прямому её участку будет сигнал достижения самолётом оставшейся дальности

$D_{\text{вход}}$  до начала ВПП:

$$D_{\text{вход}} = H_{\text{гл.вх.прям}} / \operatorname{tg} \theta_{\text{гл}} - S_{\text{гл}}.$$

В процессе посадки с уменьшением высоты происходит также и уменьшение скорости полёта.

Задача автоматического управления состоит в реализации в процессе посадки заданной с помощью виртуальной глиссады высоты полета и заданной скорости полёта. Будем полагать, что заданная скорость в ходе посадки меняется в зависимости от пройденного пути по линейному закону от значения  $V_{\text{гл.вх.прям}}$  до значения  $V_{\text{кас}}$  в момент касания основных колес поверхности ВПП.

Для управления высотой полёта используется поворотный стабилизатор (или руль высоты), а заданная скорость полета реализуется через автомат тяги силовой установки.

Кроме непрерывного управления стабилизатором и тягой силовой установки в процессе посадки выдаются также дискретные сигналы управления механизацией крыла, выпуском шасси, а также сигналы включения тормозной системы колёс шасси.

В качестве метода для синтеза алгоритмов автоматического управления использовался метод обратных задач динамики [2]. Рассмотрим особенность применения этого метода к задаче автоматической посадки самолёта на наземный аэродром.

### **Алгоритмы автоматического управления высотой и скоростью в процессе полной посадки самолёта**

Автоматическое управление высотой полёта на посадке сводится к задаче отслеживания виртуальной глиссады, высота которой жёстко привязана к расстоянию до начала ВПП. При этом управление скоростью заключается в отслеживании некоторой программы изменения скорости полета в процессе снижения самолёта по глиссаде.

Эти две задачи управления самолетом на посадке решаются одновременно и на траекторном и на пилотажном уровнях.

На траекторном уровне определяются требуемые перегрузки по скоростным осям самолета, необходимые для реализации заданных значений высоты и скорости полёта на посадке.

ке.

На пилотажном уровне осуществляется реализация требуемых перегрузок с помощью изменения угла поворота стабилизатора и тяги двигателей силовой установки самолёта. Необходимое изменение тяги осуществляется автоматом тяги, перемещающим рычаги управления двигателями силовой установки самолета.

### **Апробация алгоритмов автоматической посадки методом математического моделирования**

В целях проверки работоспособности алгоритма автоматической посадки было выполнено численное моделирование посадки на ВПП самолёта типа МиГ-29. Предварительно самолёт был выведен на высоту 250 метров и совершал установившийся горизонтальный полёт со скоростью 320 км/час.

Предварительно самолёт был выведен на высоту 250 метров и совершал установившийся горизонтальный полёт со скоростью 320 км/час. Точка касания основными колёсами поверхности ВПП была задана на расстоянии 100 метров от начала ВПП.

Отсчет времени полёта  $t$  и пройденного пути  $X_g$  будем вести от точки выхода самолёта на траверс ВПП. Процесс полёта до этой точки маршрута рассматривать не будем. На рис. 2 показано изменение скорости и высоты полета в процессе полной посадки. Поясним приведенные на этом рисунке графики.

При значении времени  $t = 60$  [с] и  $X_g = 4800$  [м] произведен выпуск носков и закрылков. Реакцией на это было увеличение высоты полета на 6,5 метров ( $5000 < X_g < 6000$  м), которое далее было устранено. В точке выхода на прямой участок глиссады ( $t = 75$  [с],  $X_g = 6160$  [м]) самолет имел заданные параметры полёта:  $V = 320$  км/час и  $H = 250$  метров.

По прямому участку глиссады снижение производилось до точки начала выравнивания с постепенным уменьшением скорости полёта. Выравнивание началось на высоте 10 метров при скорости 250 км/час, при этом  $t = 140$  [с] и  $X_g = 11300$  [м], а угол тангажа имел значение 10,3 градусов. Таким образом, снижение по прямой происходило на участке длиной 5140 метров.

Процесс выравнивания закончился в точке касания ( $X_g = 11650$  м) и длился по времени 5 секунд. Высота центра массы самолёта над поверхностью ВПП составляла 1,74 м.

После касания основными колесами за счёт управления стабилизатором производилось опускание носа самолёта до контакта носового колеса с поверхностью ВПП, уборка носков и закрылков, а также перевод двигателей на режим малого газа. Торможение начиналось автоматически при значении скорости 235 км/час.

Весь наземный участок качения самолёта по ВПП до его остановки составил 1350 метров ( $X_g = 13000$  м), что соответствует данным приводимым в инструкции лётчику для самолёта данного типа.

На рис. 3 показан график изменения вертикальной скорости самолета при снижении на последнем участке прямой глиссады, на участке выравнивания и в момент касания самолётом ВПП.

Как видно из графика, при снижении на последнем участке прямой глиссады вертикальная скорость была равна  $-3,3$  [м/с], а в точке касания ( $X_g = 11650$  м) вертикальная скорость имела значение  $-0,2$  [м/с]. При таком плавном касании ВПП вертикальная перегрузка  $n_{ya}$  была больше единичного значения на величину  $0.13e.p.$

На рис. 4 представлен график изменения угла атаки самолёта в процессе полной посадки.

Как видно из графика, при  $t = 75$  с начался процесс перехода из горизонтального полёта на участок снижения по прямой глиссаде, что и привело к колебанию угла атаки в этом процессе. При снижении по глиссаде угол атаки постепенно увеличивался, компенсируя уменьшение скорости полёта с 320 км/час до значения 250 км/час, и достигал максимального значения 14 градусов.

В процессе выравнивания траектории угол атаки монотонно уменьшался и в точке касания имел значение 9,3 град. ( $t = 145$  с). На рис. 5 показано изменение угла поворота стабилизатора в процессе выравнивания траектории и качения по ВПП.

Интенсивная работа стабилизатора наблюдается в момент, предшествующий касанию ВПП, и в момент опускания носовой стойки.

Работа привода стабилизатора не моделировалась, но ограничивалась максимальной скоростью поворота стабилизатора значением  $30^\circ$  в секунду при ограничении углов поворота диапазоном ( $-35^\circ \dots +15^\circ$ ).

На рис. 6 показано изменение угла поворота РУД и соответствующее изменение тяги силовой установки в процессе посадки.

Активная работа автомата тяги наблюдается при выходе на посадочную глиссаду, а также при завершении режима выравнивания. На участке торможения при постоянном значении угла поворота РУД ( $\delta_{\text{РУД}} = 20^\circ$ ) наблюдается незначительный рост тяги, обусловленный падением скорости самолёта при его торможении. Остановка самолета происходит за счёт его удерживания тормозами основных колёс шасси.

Выводы:

1. Результаты моделирования подтверждают работоспособность рассмотренных в отчёте алгоритмов, предназначенных для управления автоматической посадкой самолёта в продольном канале.
2. Для оценки эффективности данных алгоритмов при посадке в условия ветровых возмущений необходимо дополнительно синтезировать алгоритмы управления в боковом канале.

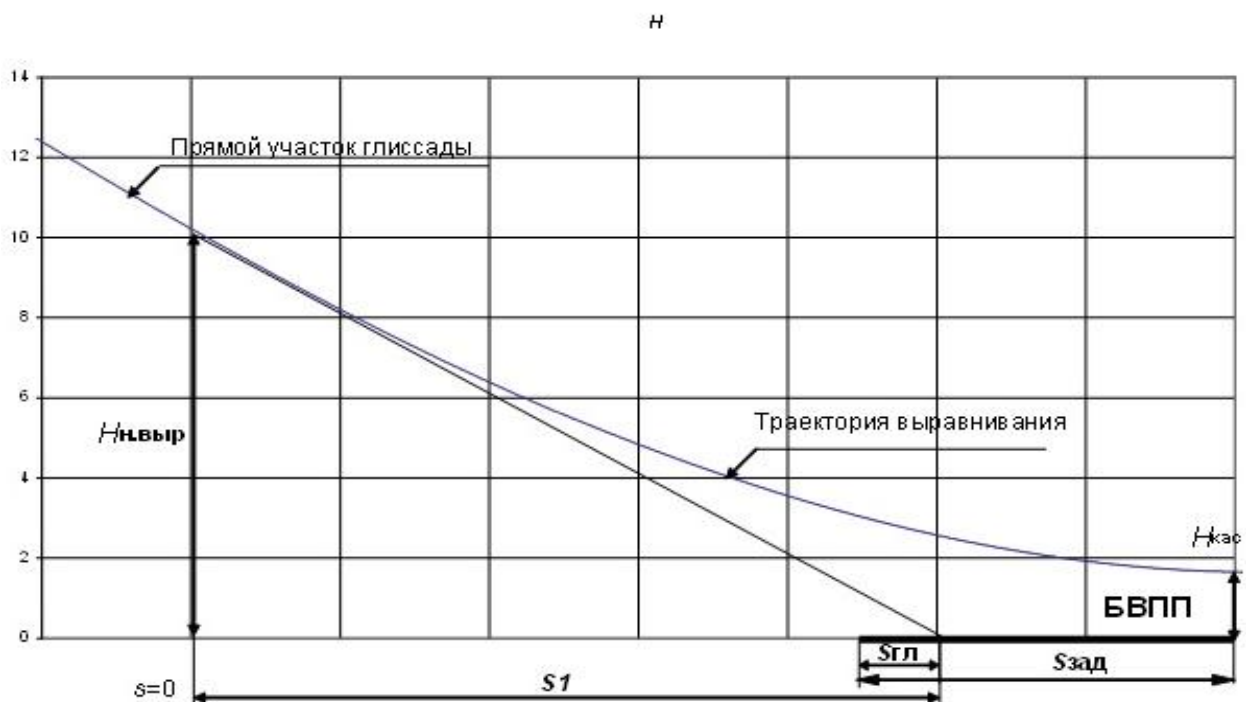


Рис. 1. Заданная траектория выравнивания

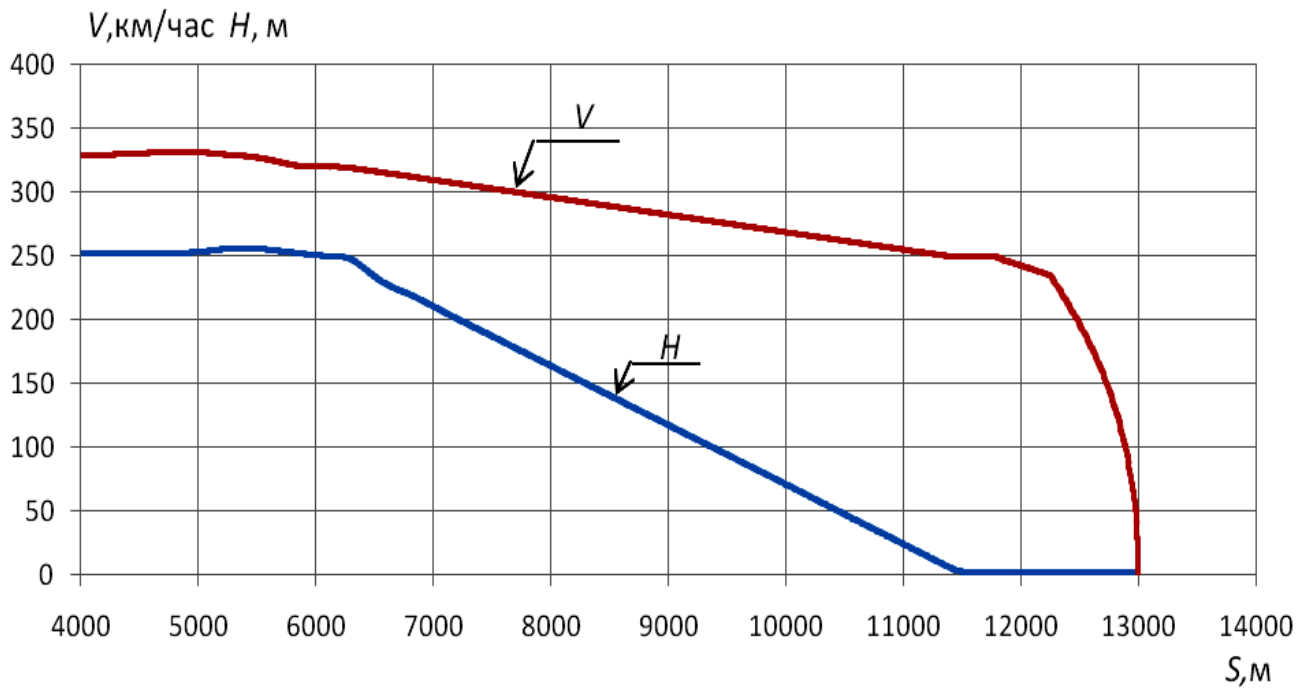


Рис. 2. Изменение скорости и высоты полета в процессе полной посадки

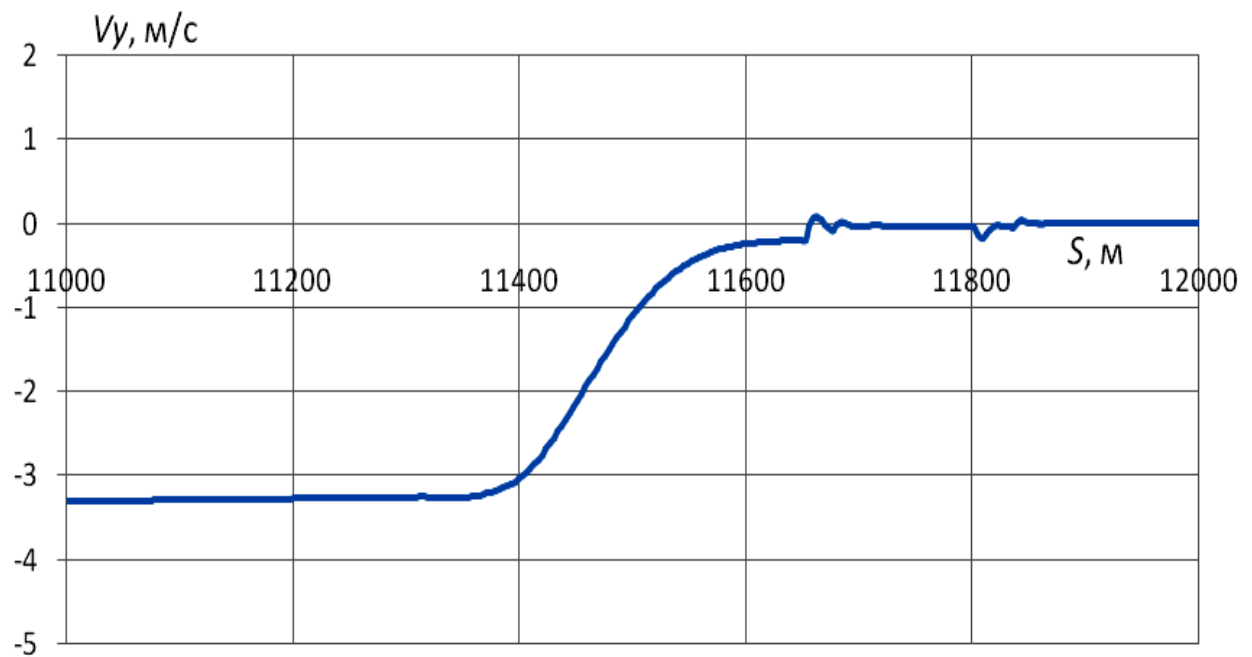


Рис. 3. Изменение вертикальной скорости на участке выравнивания



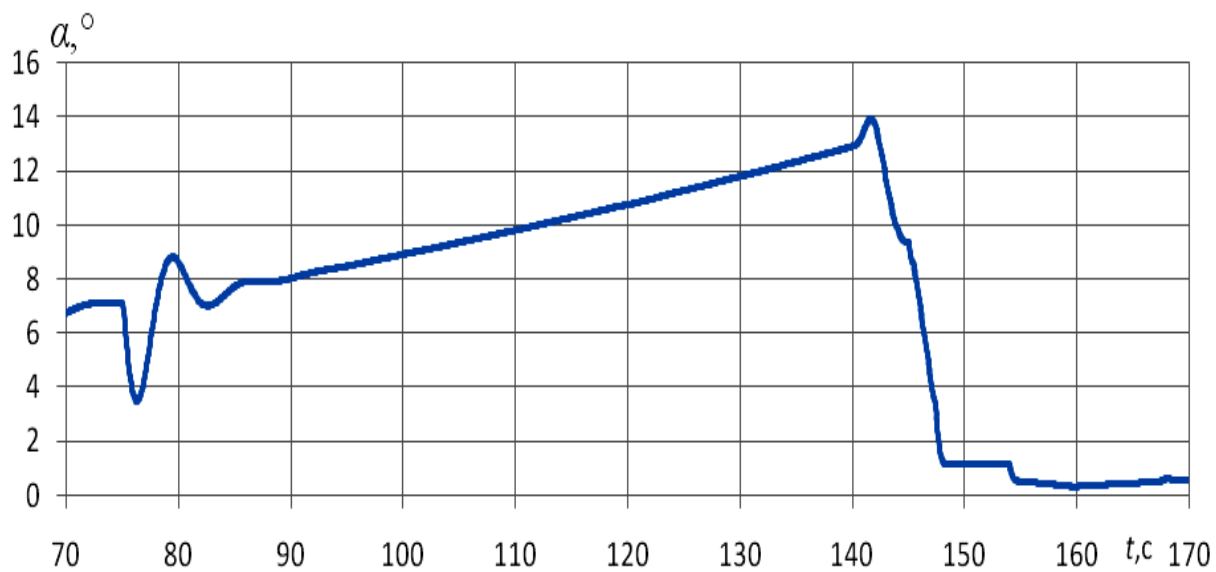


Рис. 4. Изменение угла атаки в процессе полной посадки

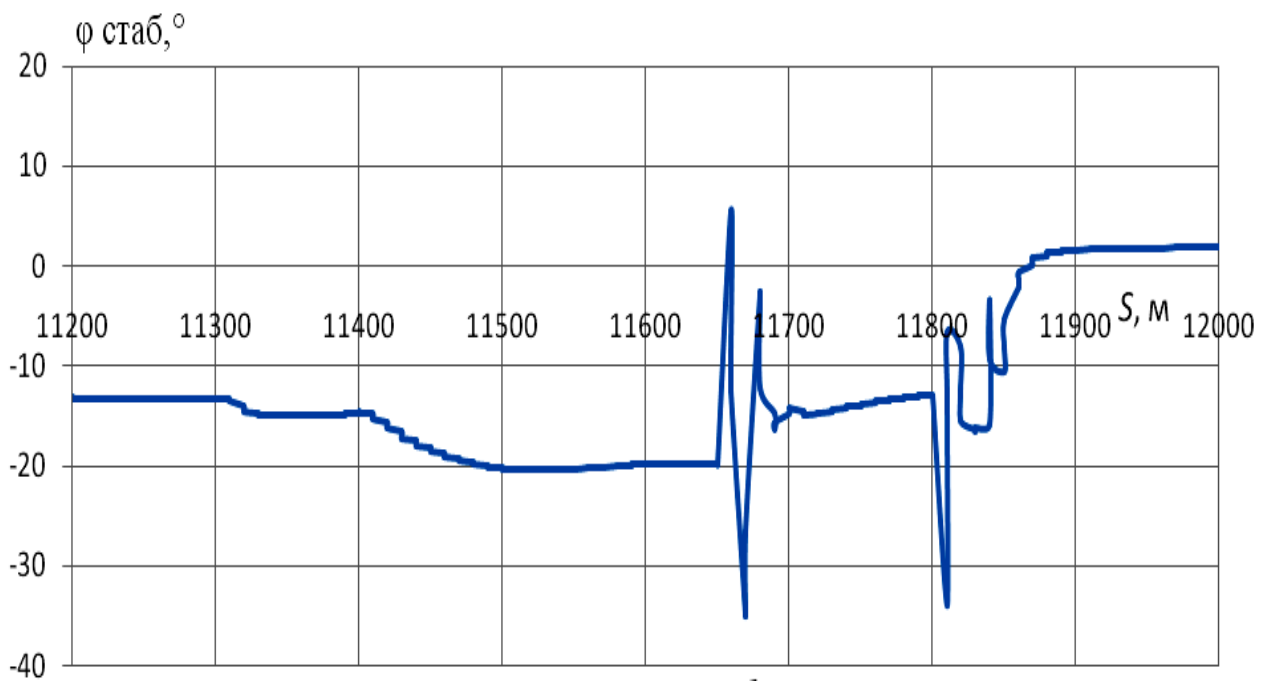


Рис. 5. Изменение угла поворота стабилизатора на участке выравнивания и качения по ВПП

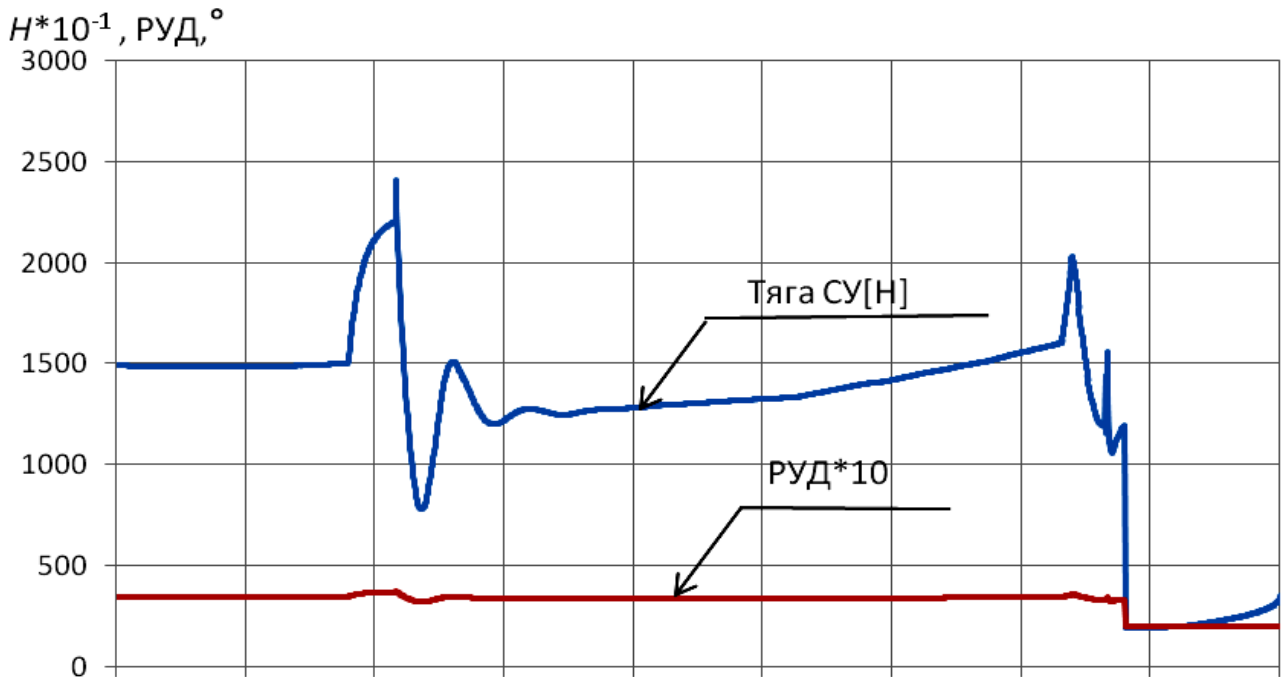


Рис. 6. Изменение угла поворота РУД и тяги СУ в процессе посадки

### Библиографический список

1. Котик М.Г. Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984.
2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1987.
3. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов./ Под общ. ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Наука. Физматлит, 1998.

### Сведения об авторе

КУЛИФЕЕВ Юрий Борисович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: +7-916-813-15-22

АФАНАСЬЕВ Юрий Николаевич, адъюнкт ВУНЦ ВВС «Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

г. Воронеж;

тел.: +7-910-346-91-01; e-mail: [yurifanasiev@mail.ru](mailto:yurifanasiev@mail.ru)