

УДК 681.5

## **Терминальное управление посадкой пассажирского самолета**

Маркин Н.Н., Чистов М. С.

### **Аннотация**

Интенсивность эксплуатации взлетно-посадочных полос современных аэродромов существенно ограничена требованиями к безопасному пространственно-временному разделению воздушных судов. Рассматривается решение задачи посадки самолета в заданное время при выполнении требований к безопасному интервалу движения между воздушными судами. Прибытие самолета в зону аэродрома по коридору захода на посадку требует от системы управления воздушным движением указание времени и номера взлетно-посадочной полосы. Для обеспечения посадки самолета рассматривается решение задачи терминального управления в целях согласования последовательности посадок самолетов на взлетно-посадочную полосу.

### **Ключевые слова:**

самолет, аэродром, время посадки, безопасный интервал, терминальное управление.

### **Введение**

Интенсивность использования взлетно-посадочных полос аэродрома определяется числом взлетов и посадок в единицу времени [1,2,3]. В настоящее время этот показатель достигает уровня от 1 до 2 посадок и взлетов за минуту. Интервал движения воздушных судов определяется с учетом требований безопасности к пространственно-временному разделению самолетов [3].

Рассматривается управление самолетом в зоне маневра аэродрома (рис. 1). Несколько разнотипных самолетов заходят на посадку по указанным зонам подхода. Каждый самолет

прибывает по расписанию без превышения отклонений за допустимые временные рамки. Возможное время посадки каждого самолета выбирается на ограниченном интервале. Нижняя граница интервала соответствует минимальной по времени схеме захода на посадку. Верхняя граница интервала определяется максимальным временем полета для заданной зоны маневра без использования зоны ожидания. На рисунке 1 представлены схемы маневрирования самолетов в зонах подхода, ожидания и маневрирования. Рассматривается управление маневром самолета в зоне аэродрома между точкой входа  $S_0$  и контрольной точкой  $S_k$  над обрезаем взлетно-посадочной полосы (рис. 1).

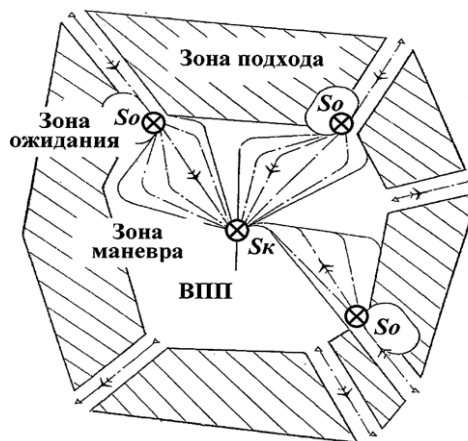


Рис. 1 Маневрирование самолетов в зоне аэродрома.

Управление посадкой самолетов включает определение очередности посадок воздушных судов в отведенные временные рамки, указание каждому самолету номера взлетно-посадочной полосы, расчетного времени посадки, схемы захода.

Выбранное решение определяет траекторию захода на посадку. Построение траектории полета включает выбор профиля полета для снижения с начальной высоты до момента прохода над обрезаем ВПП (рис. 2).

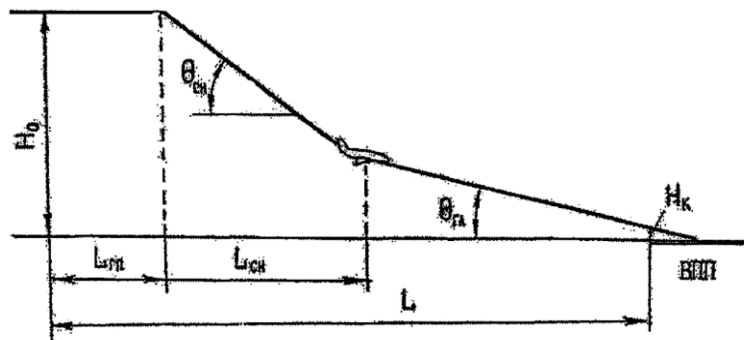


Рис. 2 Профиль полета при маневрировании в зоне аэродрома.

Выбор маршрута полета осуществляется методом последовательных приближений. На первом этапе расчетов по заданному времени посадки определяются координаты точки промежуточного поворота маршрута. На втором этапе время посадки уточняется на основе моделирования углового и траекторного движения самолета. На третьем этапе вносятся поправки на координаты точки поворота маршрута для посадки в заданное время.

## 1. Постановка задачи

Отклонение времени прибытия самолета от расписания внутри допустимых временных рамок в результате метеорологических и других случайных условий полета приводит к формированию случайного входного потока самолетов в зоне аэродрома. В зоне маневра случайный входной поток самолетов должен быть преобразован в регулярный поток. Каждому самолету необходимо назначить программу движения, обеспечивающую его прибытие в конечную точку над торцом ВПП в точно установленное время. Причем, программа движения каждого самолета должна строиться таким образом, чтобы обеспечить минимальный расход топлива всем самолетам при требуемом уровне безопасности к пространственно-временному разделению воздушных судов.

В общем случае задача терминального управления самолетом рассматривается в следующей постановке [4-6]:

1. Для самолета с индексом  $i$ , движение которого описывается дифференциальным уравнением:  $\dot{x}_i = f_i(t, x, u)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $t \in [t_1^-, t_1^+]$ ;

2. при заданном начальном значении вектора координат:  $x(\tau) = x_\tau$ ;

3. при ограничениях на область возможных значений вектора координат и вектора управления:  $x(t) \in V_x(t)$ ,  $u(t) \in V_u(x(t))$ ,

4. синтезировать траекторию захода на посадку и посадки  $x^0(t)$

5. по критерию оптимальности

$$J(\tau, x, u(t)) = F(x(t_1)) + \int_{\tau}^{t_1} f_0(t, x(t), u(t)) dt.$$

Критерий оптимальности учитывает следующие факторы:

1. Затраты топлива самолета, совершающего посадку на ВПП [4,6];
2. Пропускную способность ВПП [3];
3. Выполнение условий безопасности на интервале движения между воздушными судами по времени и расстоянию [2,3].

Траекторные расчеты для всех самолетов позволяют оперативно планировать посадку воздушных судов:

1. Определять оптимальную очередность посадок и вычислять время полета каждого самолета до ВПП.
2. Определять для каждого самолета программную траекторию, обеспечивающую посадку в заданное время.

Решение данной задачи в общем случае сопряжено с большими затратами машинного времени. Для оперативного планирования посадок воздушных судов используется построение траектории из прямолинейных отрезков, сопряженных дугами окружностей, радиус которых определяется характеристиками правильного виража с учетом ограничения угла крена на рассматриваемой скорости полета [7,8,9]. Траектория маневра в зоне аэродрома включает три точки поворота маршрута (рис. 3).

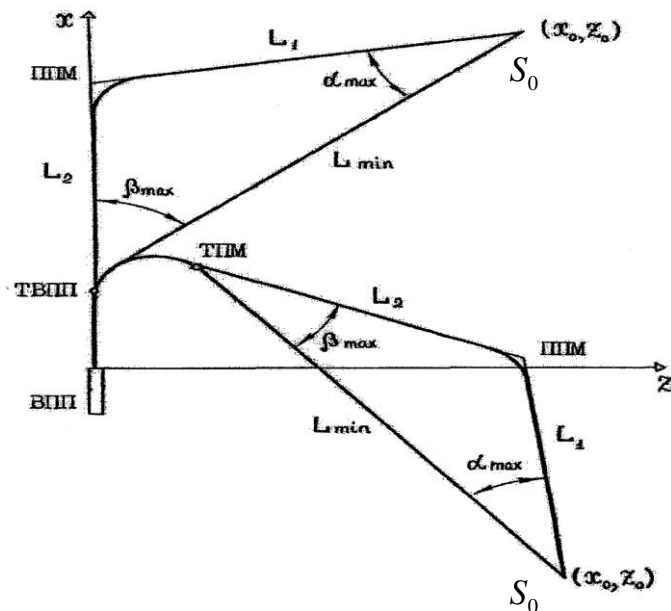


Рис. 3. Траектории захода на посадку самолета в зоне УВД.

Начальная точка поворота маршрута  $S_0$  находится в узловой точке на границе зоны маневра. Контрольные точки на этапе завершения захода на посадку включают:

1. Точку пересечения торца ВПП;
2. Точку входа в глиссаду на посадочной прямой  $ТВПП$ ;
3. Конечную точку поворота маршрута  $ППМ$  для входа в глиссаду.

Решение задачи терминального управления состоит в определении промежуточной точки поворота маршрута  $ППМ$  из условия посадки самолета в заданное время с требуемой точностью и осуществляется следующими методами:

1. Геометрическими расчетами при постоянной скорости полета и мгновенном повороте вектора скорости в точках поворота маршрута [1];
2. Методом последовательных приближений для учета ветра, профиля изменения скорости полета по высоте и характеристик виража самолета [8];
3. Выбором точки *ППМ* на основе численного моделирования динамики бокового углового и траекторного движения с учетом изменения скорости полета по высоте [7].

## 2. Исходные данные для расчета

В рассматриваемом примере минимальная дальность полета до обреза ВПП для всех коридоров полета принята равной 60 км (рис. 3). Координаты самолета определяются в системе осей с началом над обрезом ВПП. Ось *OX* направлена вдоль оси ВПП, ось *OZ* перпендикулярна оси ВПП. Выбор промежуточной точки поворота маршрута *ППМ* определяет необходимые углы разворота угла пути  $\alpha_{\max}$  и  $\beta_{\max}$  в начальной точке с координатами  $(x_0, y_0)$  и в точке поворота маршрута на взлетно-посадочную полосу *ТВПП*.

Решение задачи выполняется для гипотетических исходных данных [1,3,7,8], учитывающих существенное влияние типа самолета на его посадочные характеристики. Рассматриваемые воздушные суда обладают различной скоростью захода на посадку (таблица 1) и в начальный момент времени находятся на границе зоны подхода к аэродрому.

Таблица 1.

Эксплуатационные скорости при заходе на посадку

Тип самолета	Скорость подхода	Скорость круга	Посадочная скорость
	км/час	км/час	км/час
Як-40, Ан-24	450 ÷ 400	300 ÷ 250	220 ÷ 210
Ту-154, В-737	715 ÷ 525	400 ÷ 340	260 ÷ 240
Ил-62, В-747	770 ÷ 500	400 ÷ 320	280 ÷ 255
Ил-86, А-310	613 ÷ 450	400 ÷ 320	260 ÷ 250

Минимальное располагаемое время  $T_{\min}$  захода на посадку определяется для полета по траектории минимальной дальности  $L_{\min}$ . Максимальная дальность захода на посадку в зоне маневра с учетом переходных участков вычисляется по формуле:

$$L_{\max} = 1.5 \cdot L_{\min}.$$

Максимальное располагаемое время захода на посадку  $T_{\max}$  вычисляется для максимальной дальности полета  $L_{\max}$ . Задача оперативного планирования посадки самолета состоит в указании номинального расчетного времени посадки  $T_{НОМ}$ , удовлетворяющего условию:

$$T_{\min} \leq T_{НОМ} \leq T_{\max}.$$

Выбор расчетного времени посадки самолета осуществляется на основе определения очередности посадок воздушных судов [5] при выполнении требований к безопасному интервалу движения и правил производства полетов [2]. Для решения задачи о выборе очередности посадок самолетов, взлетно-посадочных полос и расчетных значений времени посадки каждого самолета используются методы сетевого планирования [3,8,10]

### 3. Расчет программ захода на посадку

Для каждого самолета определяем диапазон допустимых высот и скоростей полета при заходе на посадку с учетом минимальных часовых и километровых расходов топлива [6,7,9], ограничений допустимой приборной скорости по безопасности полета и допустимой приборной скорости УВД в зоне аэродрома. На рис. 4 представлена область возможных полетов самолета в зоне аэродрома для среднемагистрального пассажирского самолета.

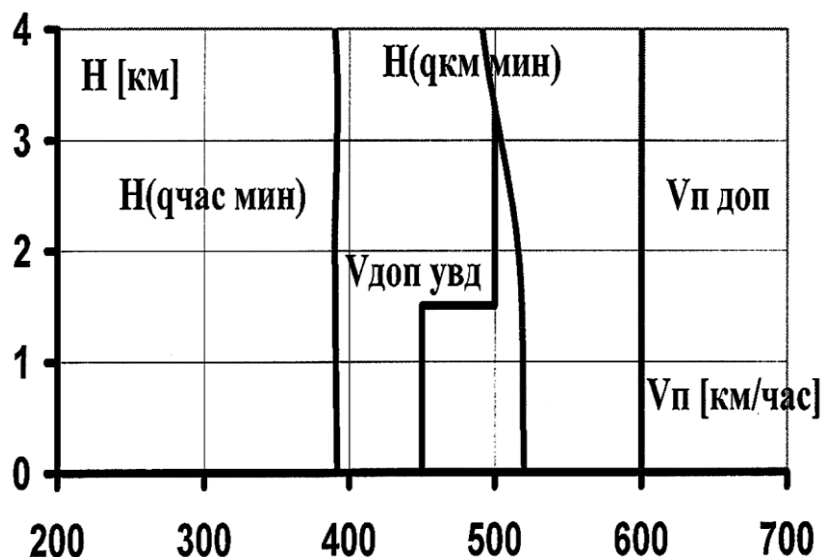


Рис. 4. Область возможных полетов самолета в зоне аэродрома.

Расчет времени полета осуществляется по величине путевой скорости. Значение путевой скорости при заданной приборной скорости существенно зависит от изменения

плотности воздуха по высоте полета, высоты аэродрома и метеорологических условий. Для минимальной и максимальной дальности полета в зоне маневра вычисляем минимальное и максимальное время полета к обреза ВПП. Расчеты выполняются для скоростей полета с минимальной, максимальной приборной скоростью и номинальной скорости полета. Результаты расчета для типичных программ снижения среднемагистрального самолета представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Характеристики программ захода на посадку для среднемагистрального самолета

Программа захода на посадку	$V_{ЗАХ}$	$L_{\min}$	$L_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{НОМ}$
	км/час	км	км	с	с	с
Оптимальный режим по часовому расходу топлива	400	60	90	540	<b>810</b>	
Оптимальный режим по километровому расходу топлива	425	60	90	508	762	<b>632</b>
Максимальная средняя скорость полета	475	60	90	<b>455</b>	682	

Определяем номинальное время захода на посадку  $T_{НОМ}$  в середине коридора располагаемого для посадки времени. В рассматриваемом примере номинальное время полета на режиме минимального километрового расхода топлива составляет 632 с.

Обозначим  $T_0$  текущее значение времени. Возможные моменты посадки лежат на интервале минимального времени прибытия  $T_{но} = T_0 + \min_i \tau_{\min i}$  по траектории минимальной протяженности и максимального времени прибытия самолета  $T_{нк} = T_0 + \max_i \tau_{\max i}$ . Максимальное время прибытия определяется по траектории максимальной протяженности с минимальной скоростью захода на посадку без полета в зоне ожидания.

При шаге дискретности  $\Delta T$  между посадками на интервале времени  $[T_{но}; T_{нк}]$  определяем контрольные отметки времени прибытия

$$T_n = T_0 + T_{noc} + T_{\Gamma\Lambda} + T_{\min 3AX} + \Delta T \cdot n; \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Здесь

$T_0$  - номинальное время освобождения ВПП после достижения скорости руления самолетом, завершающим посадку в текущий момент времени,

$T_{ГЛ}$  - номинальный интервал времени с момента входа в глиссаду до пролета над обрезами ВПП,

$T_{noc}$  - затраты времени на посадку и торможение до скорости руления с момента пролета над обрезами ВПП,

$T_{\min 3AX}$  - минимальный интервал времени полета от точки входа в зону аэродрома до точки входа в глиссаду,

$\Delta T$  - шаг дискретности по времени между посадками воздушных судов,

$N$  - максимальное число возможных вариантов времени посадки при выбранном шаге дискретности.

Для воздушного судна решаем следующие задачи:

1. Определение минимального времени пролета над обрезами ВПП -  $T_{\min}$ ,
2. Определение максимального времени пролета над обрезами ВПП -  $T_{\max}$ ,
3. Определение номинального времени пролета над обрезами ВПП -  $T_{НОМ}$ .

В рассматриваемом примере шаг дискретности  $\Delta T$  между посадками равен 1 минуте. Контрольное время снижения по глиссаде до касания ВПП выбрано равным 3 минутам. Интервал времени с момента входа в глиссаду до момента выруливания на рулежную дорожку (освобождение ВПП) принят равным 4 минутам.

#### 4. Выбор очередности посадок воздушных судов

Для трех гипотетических вариантов воздушных судов определяем располагаемое время полета до момента входа в глиссаду (таблица 2). На интервале допустимых значений времени посадки каждого самолета выбираем отметки времени в классе решетчатых функций с интервалом 60 с. Варианты располагаемых значений времени входа в глиссаду представлены в таблице 3. Отсчет времени выполнен от момента входа в зону маневра. Принято допущение, что моменту входа в зону аэродрома соответствует освобождение ВПП завершающим посадку самолетом. Возможные варианты прибытия без полета в зоне ожидания с учетом ограничения зоны маневра обозначены символом  $P$ . Символ  $E$



соответствует варианту прибытия в контрольную точку на режиме полета, близком к минимальному километровому расходу топлива. Выбранное время посадки для пространственно-временного разделения воздушных судов обозначено символом  $E^*$ . Выбор времени посадки самолетов произведен на дискретном множестве допустимых значений отметок времени при заданном шаге дискретности между посадками  $\Delta T$ .

Таблица 3.

Располагаемое время полета до момента входа в глиссаду самолетов различных типов

$n$	$T_{3AX} \text{ [с]}$	Скорость захода на посадку $V_{3AX}$ , км/час		
		400	425	475
1	480			$P$
2	540	$P$	$P$	$E^*$
3	600	$E^*$	$E$	$E$
4	660	$E$	$E^*$	$P$
5	720	$P$	$P$	
6	780	$P$		

Выбор очередности посадок самолетов произведен из условий полета на режиме, близком к минимальному километровому расходу топлива, выполнения требований к безопасному пространственно-временному интервалу движения между воздушными судами, располагаемой пропускной способности взлетно-посадочной полосы.

Вычисленный интервал времени между моментом входом в зону маневра и моментом входа в глиссаду для каждого самолета используется для решения задачи посадки самолета в заданное время с требуемой по времени точностью. Выполняются необходимые расчеты контрольных отметок времени прохода над обрезаем ВПП и освобождения ВПП после выруливания на рулежную дорожку.

Для каждого самолета расчетное время пролета над обрезаем ВПП и время прибытия вычисляется с учетом затрат времени на снижение по глиссаде, посадку, пробег по ВПП и выруливание на рулежную дорожку (таблица 4). Курсивом выделены данные для среднемагистрального самолета.

Таблица 4.

Расчетные значения времени прохода на обрезаем ВПП и завершения посадки

Номер самолета, $n$		1	2	3
Скорость захода на посадку $V_{ЗАХ}$	км/час	400	<b>425</b>	475
Расчетное время входа в глиссаду $T_{ЗАХ}$ [с]	с	600	<b>660</b>	540
Расчетное время над обреза ВПП	с	780	<b>840</b>	720
Расчетное время прибытия $T_{пр}$ [с]	с	840	<b>900</b>	780

#### 4. Расчет траекторий маневрирования в зоне аэродрома

Траектория маневрирования при заходе на посадку определяется методом последовательных приближений [7,8].

На первом этапе расчетов по заданному времени полета определяется протяженность маршрута и схема захода на посадку при постоянной средней путевой скорости [1]. Схема захода на посадку определяет необходимые изменения угла пути  $\alpha_{\max}$  и  $\beta_{\max}$  (рис. 3) относительно направления полета при входе в зону аэродрома (рис. 1). Протяженность маршрута и угловые маневры определяют координаты точек промежуточного поворота маршрута  $ППМ$  (рис.3) и начала разворота на ВПП  $ТПМ$  с учетом расположения точки пролета над обреза ВПП на высоте 15 метров ( $ТВПП$ ).

На втором этапе выполняется расчет времени прибытия с учетом изменения профиля скорости по высоте полета, скорости ветра (рис. 5) и затрат времени на виражи для сопряжения прямолинейных участков полета (рис. 6).

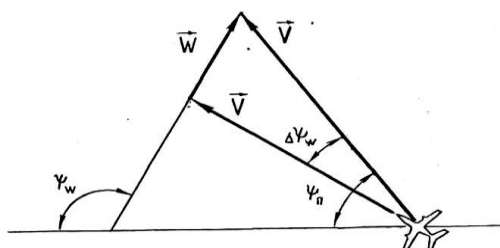


Рис. 5. Расчет поправок на углы разворота с учетом ветра.

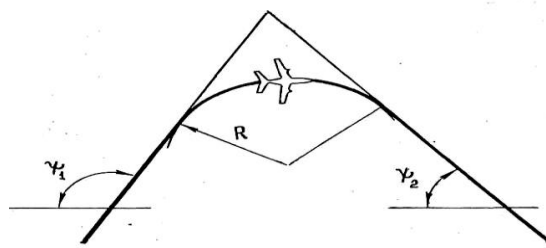


Рис. 6. Сопряжение прямолинейных участков.

Второй этап расчетов позволяет уточнить маршрут полета. Методом последовательных приближений определяется протяженность маршрута полета, необходимые изменения углов пути в точках поворота для обеспечения посадки в заданное время с требуемой точностью.

При выполнении данной работы использованы геометрические параметры задачи, представленные на рисунках 1,2,3,5,6. Расчет времени посадки осуществлялся численным интегрированием уравнений бокового углового и траекторного движения. Математическая модель задачи учитывает изменение путевой скорости по высоте полета, направление и скорость ветра, ограничения максимального значения угла крена, характеристики контура управления угловым движением самолета. На рисунках 7 и 8 представлены изменения угла крена и нормальной перегрузки при маневрировании.

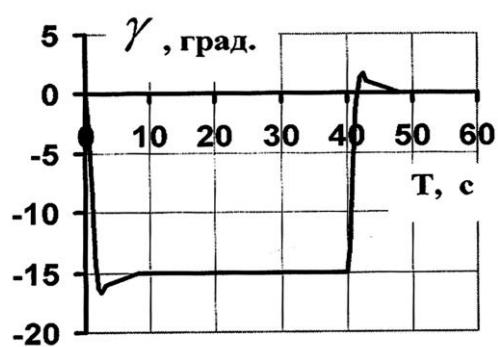


Рис. 7. Управление углом крена при изменении угла пути.

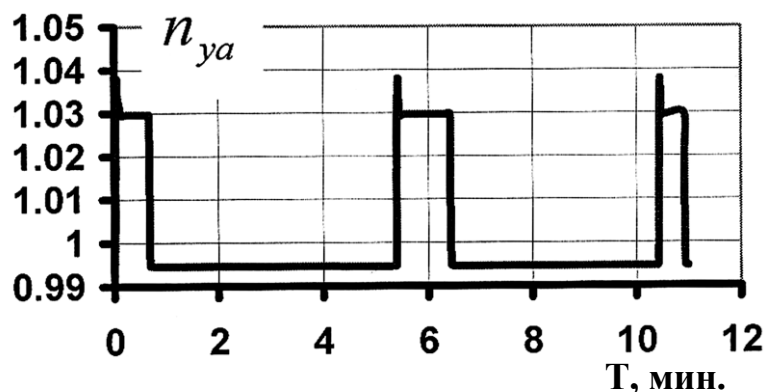


Рис. 8. Зависимость нормальной перегрузки от времени при маневрировании.

Уравнения траекторного движения самолета интегрируются с учетом переходных процессов в канале управления углом крена (рис. 7) и в продольном канале управления нормальной перегрузкой (рис. 8). Программы настройки систем управления продольным и боковым движением выбраны из условия обеспечения желаемых значений пилотажных характеристик самолета с автопилотом.

На рисунке 9 представлена зависимость угла пути от времени при заходе на посадку. Моменты начала третьего и четвертого разворотов варьировались для обеспечения точности вычисления времени посадки 5 секунд. Пунктиром изображена программа изменения угла пути, полученная в первом приближении без учета динамики углового движения самолета в канале крена.

На рисунке 10 представлена траектория маневрирования в зоне аэродрома для пролета контрольной точки над обрезаем ВПП в заданное время, вычисленная на основе интегрирования уравнений углового и траекторного движения [8].

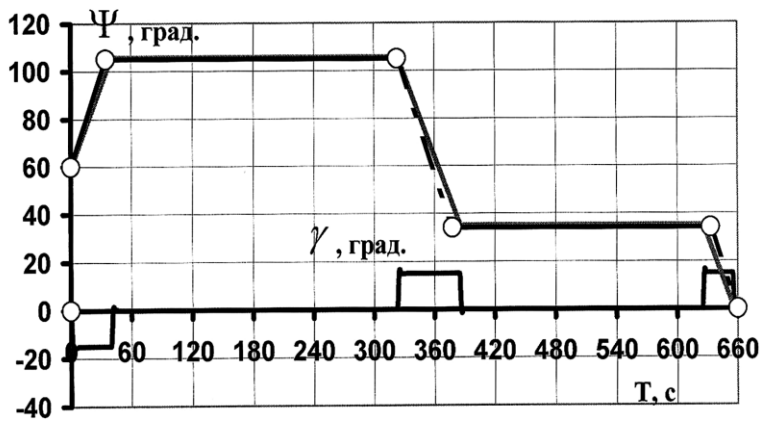


Рис. 9. Зависимость угла пути от времени при маневрировании.

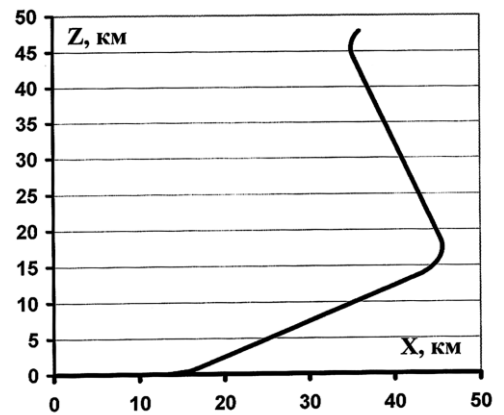


Рис. 10. Траектория маневрирования.

В качестве входного параметра модели используется координата точки промежуточного поворота маршрута *ППМ*, вычисленная методом геометрических построений для полета с постоянной путевой скоростью. Результаты интегрирования на экране монитора отображают траекторию полета и значения времени в контрольных точках маршрута. Интерактивный режим работы на ПЭВМ позволяет с помощью курсора перемещать расчетную точку *ППМ* для контроля времени посадки и получения решения с необходимой точностью. При решении данного примера рассматривалось перемещение в интерактивном режиме одной и двух точек поворота маршрута.

### Заключение

Аналитический расчет полета по маршрутам минимальной и максимальной протяженности использован для оперативного планирования очередности посадок воздушных судов и выбора схемы захода на посадку для каждого самолета по заданному времени прохода над обрезами ВПП.

Численное моделирование динамики углового и траекторного движения самолета обеспечивает определение времени пролета над контрольной точкой обреза ВПП с ошибкой не более 5 секунд, что удовлетворяет нормативу ИКАО к расчету программной траектории движения. В математической модели учитываются изменения скорости полета по высоте, характеристики ветра и системы управления угловым и траекторным движением. Решение с требуемой точностью обеспечивается выбором координат точек поворота маршрута в интерактивном режиме с использованием компьютерной графики.

### Библиографический список

1. Белгородский С. Л. Автоматизация управления посадкой самолета. - М.: Транспорт, 1972. - 352с.
2. Производство полетов воздушных судов. Дос 8168. OPS/611. Правила аэронавигационного обслуживания. Том I. Правила производства полетов. Издание пятое – 2006: [www.aerohelp.ru/data/432/8168\\_v1\\_cons\\_ru.pdf](http://www.aerohelp.ru/data/432/8168_v1_cons_ru.pdf) (дата обращения 25.10.2010)
3. Dirk Briskorn, Raik Stolletz Aircraft landing problems with aircraft classes. [www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2010/05/2620.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2010/05/2620.pdf) - May 2010. - 23p.
4. Крыжановский Г. А., Солодухин В. А. Методы оптимизации процессов управления воздушным движением. - М.: Транспорт, 1978. - 152с.
5. Новиков П. П. Принятие решений в авиационных системах управления. - М.: Воздушный транспорт, 1980. - 350с.
6. Скрипниченко С. Ю. Оптимизация режимов полета самолета. - М.: Машиностроение, 1975. - 191с.
7. Унгурян С. Г., Маркович Е. Д., Волевач А. И. Анализ и моделирование систем управления воздушным движением. - М.: Транспорт, 1980. - 205с.
8. Dear R.G. The Dynamic Scheduling of Aircraft in the Near Terminal Areas. -FTL Report T. 76, 9 M.I.T., Cambridge, AGARD CP-401, November 1986. P.66. Mass. [www.stormingmedia.us/66/6625/A662522.pdf](http://www.stormingmedia.us/66/6625/A662522.pdf)
9. Скрипниченко С. Ю. Экономичность полетов самолетов. - М.: Транспорт, 1982. - 206с.
10. Dear R.G. and Sherif Y.S. The dynamic scheduling of aircraft in high density terminal areas Management Science, SBAE, California State University, Fullerton, CA 92634, U.S.A. [Microelectronics and Reliability Volume 29, Issue 5](#), 1989, Pages 743-749

## **Сведения об авторах**

Маркин Николай Николаевич , доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; e-mail: [markinniknik@mail.ru](mailto:markinniknik@mail.ru)

Чистов Михаил Сергеевич , студент Московского авиационного института (государственный технический университет)

e-mail: [falx2005@.ru](mailto:falx2005@.ru)