

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

Технологические процессы
управления воздушным движением

Методические указания
по выполнению курсового проекта на тему:
**“Регулирование воздушных судов
и оценка эффективности УВД на круге полета”**
для студентов КФ и ЗФ специализации ОрВД

Санкт - Петербург

2008

Одобрено и рекомендовано к изданию
Методическим Советом Университета

Ш 87 (03)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ: Методические указания по выполнению
курсового проекта на тему: «Регулирование воздушных судов и оценка
эффективности УВД на круге полета» /Университет ГА. С. - Петербург,
2008.

Издаются в соответствии с программой дисциплины
“Технологические процессы УВД” (объемом 90 ч, V и VI семестры)
Предназначены для студентов КФ и ЗФ специализации ОВД.
Илл. 28. Табл. 7. Прилож. 6. Библ. 4 назв.

Составитель В.Г. Кизько канд. техн. наук доц.

Рецензент О.А. Евтушенко канд. техн. наук доц.

© Университет гражданской авиации

2008

1. Методические указания

1.1. Цель курсовой работы - приобрести первичные навыки графического и аналитического моделирования движения воздушных судов на круге полета.

1.2. Расчеты должны выполняться с учетом процедур и ограничений, принятых на аэродроме, указанном в задании на КУП.

1.3. Курсовой проект оформляется в соответствии с принятыми в Университете требованиями. Он должен включать следующие позиции:

- оглавление;
 - задание на курсовую работу;
 - описание инфраструктуры ВПП и схемы снижения и захода на посадку;
 - инженерные расчеты и графические материалы:
- расчет пропускной способности ВПП для заданного режима обслуживания ВС и расчетные позиции ВС для ситуации «посадка – посадка» или «взлет – посадка»;
 - определение пропускной способности предпосадочной прямой и расчетные позиции ВС в точке начала предпосадочной прямой при заходе с прямой для различных направлений схемы подхода воздушных судов;
 - расчет минимально допустимых интервалов обслуживания ВС в точке третьего разворота и расчетные позиции воздушных судов на круге полета, а также для маршрутов подхода к точке третьего разворота;
 - оценки воздушной ситуации для различных вариантов захода на посадку и безопасных интервалов между ВС;
 - оценки эффективности УВД в смысле принятых критериев;
 - варианты или способы увеличения пропускной способности зоны взлета и посадки;
 - литературу, документы, использованные в курсовом проекте.

Расчеты необходимо выполнять полностью, без сокращений. На рисунках показать исходные и промежуточные положения для всех ВС на момент выполнения третьего разворота для каждого из них и на каждый момент освобождения ВПП предыдущим ВС.

1.4. Курсовой проект защищается перед комиссией, назначаемой кафедрой. Оценка защиты и качество выполнения КУП определяются полнотой проведения эксперимента и глубиной проработки задания.

2. Порядок проведения эксперимента

По принятым ограничениям время обслуживания ВПП начинается с момента пролета *i*-м ВС ТВПР и продолжается до момента освобождения ВПП. Следовательно, время обслуживания ВПП ВС складывается из двух интервалов: времени полета на этапе «точка ВПР – торец ВПП» и времени нахождения на ВПП, т.е. $t_{\text{ипос}} = t_{\text{ивпр}} * t_{\text{ивпп}}$, где * - свертка (композиция) интервалов времени распределения. Длительность обслуживания ВПП при посадке ВС зависит от скорости приземления, посадочной массы, наличия скоростных РД, состояния поверхности ВПП и покрышек, направления и скорости ветра и т.д. Начало действия каждого фактора, сила и продолжительность действия не известны. Поэтому время обслуживания ВПП – случайная величина.

В аэропорту прохождения производственной практики выбираются два типа наиболее часто эксплуатируемых воздушных судов разного класса скоростей. Обозначим: t_1 – время полета Ан-24 от точки ВПР до торца ВПП; t_2 – время пробега на ВПП Ан-24 после приземления до момента освобождения ВПП; t_3 – время полета Ту-154 от точки ВПР до торца ВПП; t_4 – время пробега на ВПП Ту-154 после приземления до момента освобождения ВПП; σ - соответствующие среднеквадратические отклонения.

Для каждого типа ВС собирается статистика времени полета «точка ВПР – торец ВПП» и времени занятости ВПП при взлете и посадке ВС.

Для прилетающих ВС:

- БПРМ - торец ВПП;
- торец ВПП - момент освобождения ВПП.

Для вылетающих ВС:

- предварительный - исполнительный старт;
- исполнительный старт;
- начало разбега - набор высоты ВС 15 м.

Длительность времени полета и времени занятости ВПП определяется с помощью секундомера. По каждому типу ВС выполняется не менее *шестидесяти* замеров. Опытные данные заносятся в табл. 1. Эта совокупность чисел будет использована для нахождения закона времени обслуживания ВПП в режимах «посадка» и «взлет» для каждого типа ВС.

Порядок обработки экспериментальных данных описан в [1, с. 41-53]. Построим штриховую таблицу (табл. 2). Обращаемся к табл. 1. Рассматриваем

первый столбец $t_{\text{впр-впп}}$ табл. 1. Подсчитываем число измерений N , допустим, что $N = 45$. Находим максимальное $\max(t_1) = 20$ и минимальные значения $\min(t_1) = 14$ $t_{\text{впр-впп}}$. Приближенное число столбцов определяется по правилу $k \approx 1 + 3,2 \cdot \log N = 1 + 3,2 \cdot \log 45 \approx 6$. Строим таблицу, состоящую из четырех строк и

Таблица 1

Экспериментальные данные по ТУ - 154

Номер п/п	Посадка		Взлет		
	$T_{\text{впр-впп}}$	$T_{\text{впп}}$	$T_{\text{руления}}$	$T_{\text{исполн}}$	$T_{\text{разбега}}$
1	14	62	72	36	44
2	16	58	54	0	47
3	15	64	48	58	43
.
.
.
60	17	67	67	45	45

Таблица 2

Штриховая таблица

t_1, c	14	15	16	17	...	Σ
1	2	3	4	5	6	7
Штрихи				
			
n	3	2	1

семи столбцов. В первый столбец вписываем обозначения. В первой строке вписываем значения $t_{\text{впр-впп}}$, начиная с минимального до максимального значения $t_{\text{впр-впп}}$. Более подробно описано ниже (см. Пример 1). Затем каждое значение $t_{\text{впр-впп}}$ табл. 1 переносим в виде штриха в колонку табл. 2, соответствующей значению переносимой цифры. Например, в столбце $t_{\text{впр-впп}}$ табл. 1 первое значение $t_1 = 14$. Это значение переносим в виде штриха в столбец 2 табл. 2 со значением 14. Следующее измерение $t_1 = 16$ (табл. 1) переносим в виде штриха в табл. 2 в колонку 4 (значение которой 16), и т.д.

Закон времени обслуживания ВС на ВПП находится с помощью методов математической статистики с использованием таблиц приложения 1 - 4. Все расчеты желательно выполнять с использованием программ Mathcad.

Пример 1. Время обслуживания ВС на ВПП

На аэродроме по каждому типу ВС было выполнено по 45 замеров (рис. 1). С учетом размера страницы экспериментальные данные были разбиты на два вектора столбца.

1. Введем векторы наблюдений:

Обозначения: t_{11} , t_{12} - время планирования Ан-24 от точки ВПР до торца ВПП; t_{21} , t_{22} - время пробега на ВПП Ан-24 после посадки до момента освобождения; t_{31} , t_{32} - время планирования Ту-154 от точки ВПР до торца ВПП; t_{41} , t_{42} - время пробега на ВПП Ту-154 после посадки до момента освобождения; σ - соответствующие среднеквадратические отклонения.

$t_{11} :=$	19 18 16 18 16 17 18 17 16 16 16 16 16 15 15 17 16 16 17 16 16 17 16 16 17 16 16 20 17 18 14	$t_{12} :=$	18 16 18 15 17 18 17 16 16 17 16 16 15 15 17 16 16 15 15 17 16 16 16 16 16 16 17 15	$t_{21} :=$	51 54 49 53 47 52 50 51 51 50 52 50 51 48 49 51 49 48 47 48 48 51 50 48 49 52 54	$t_{22} :=$	51 46 51 52 53 49 53 44 50 51 49 53 52 51 50 54 51 49 51 47
-------------	--	-------------	--	-------------	--	-------------	--

$$\begin{array}{l}
 t31 := \begin{pmatrix} 13 \\ 11 \\ 13 \\ 12 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 13 \\ 14 \\ 13 \\ 14 \\ 13 \\ 14 \\ 12 \\ 12 \\ 13 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 12 \\ 13 \\ 13 \\ 14 \\ 12 \\ 13 \\ 13 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 t32 := \begin{pmatrix} 12 \\ 14 \\ 12 \\ 13 \\ 12 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 13 \\ 14 \\ 13 \\ 13 \\ 13 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 14 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 t41 := \begin{pmatrix} 73 \\ 75 \\ 70 \\ 71 \\ 73 \\ 73 \\ 73 \\ 75 \\ 74 \\ 74 \\ 70 \\ 74 \\ 74 \\ 71 \\ 77 \\ 72 \\ 74 \\ 71 \\ 76 \\ 73 \\ 72 \\ 70 \\ 70 \\ 68 \\ 75 \\ 72 \\ 73 \\ 75 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 t42 := \begin{pmatrix} 69 \\ 75 \\ 74 \\ 73 \\ 71 \\ 73 \\ 77 \\ 72 \\ 68 \\ 70 \\ 70 \\ 71 \\ 72 \\ 71 \\ 67 \\ 66 \\ 70 \\ 68 \\ 74 \\ 72 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

2. Объединим векторы столбцы

$$t1 := \text{stack}(t11, t12)$$

$$t2 := \text{stack}(t21, t22)$$

$$t3 := \text{stack}(t31, t32)$$

$$t4 := \text{stack}(t41, t42)$$

В работе придерживаются стилю отображения информации в Mathcad.

3. Построим график экспериментальных данных

t_1 - время полета Ан-24 от точки ВПР до торца ВПП; t_2 - время пробега на ВПП Ан-24 после посадки до момента освобождения; t_3 - время полета Ту-154 от точки ВПР до торца ВПП; t_4 - время пробега на ВПП Ту-154 после посадки до момента освобождения.

Для построения гистограммы на панели инструментов войдите в **Insert**, затем **Graph, X-Y Plot**. Задайте переменные по осям. Двойным щелчком мышки на графике войдите в функцию **Traces** и в поле **Type** (Тип) установить соответственно **bar** (столбцы) и **lines** (линии). Здесь на рис. 1 устанавливается **lines**.

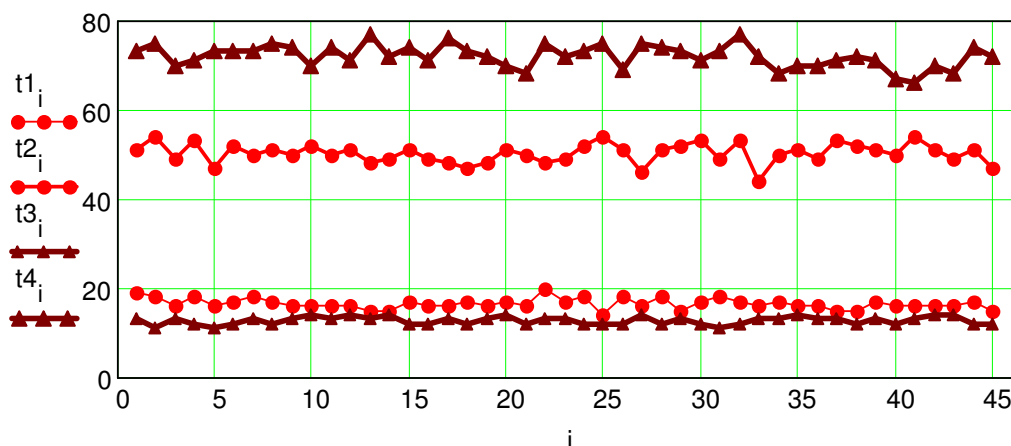


Рис. 1. Экспериментальные данные

4. Обработка данных выполняется в следующем порядке:

- подсчитывается объем N выборки измеряемого признака;
- определяется число разрядов (интервалов, классов) по одному из правил:

$$k \approx \sqrt{N}, \quad k \approx 1 + 3,2 \lg N;$$

- вычисляется величина интервала h

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}.$$

Величина h должна выбираться постоянной для всех интервалов;

- строится первичная таблица распределения. Все значения между x_{\max} и x_{\min} заносятся в виде штрихов в соответствующую строчку таблицы распределения. Каждый пятый штрих – горизонтальный. В интервал (столбец) входят значения чисел «слева» включительно, «справа» - исключительно. После разбивки на

интервалы определяют абсолютные частоты каждого интервала, подсчитывая количество измерений по количеству штриховых отметок.

– строится гистограмма или полигон частот, или многоугольник распределения (эмпирическая кривая распределения);

– вычисляют среднее значение, чаще всего рассчитывают среднее арифметическое \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{N};$$

– рассчитывают дисперсию по формуле

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \cdot (\sum x_i^2 n_i - N\bar{x}^2);$$

– высказывается гипотеза о нормальном распределении случайной величины. Дается оценка параметрам распределения.

Проверка гипотезы по критерию хи-квадрат. Вычисление теоретических частот по правилу $n_{0i} = N \cdot P_i$.

– Расчет $\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n_{0i})^2}{n_{0i}}$.

– Гипотеза принимается, если $P(\chi_T^2 \geq \chi_0^2) = 0,01$.

5. Выполним обработку данных вектора t1:

• Количество опытных данных равно $N = 45$.

• Число разрядов определим по формуле $k \cong k \approx 1 + 3,2 \lg(45) \approx 6$.

• Величина интервала $h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} = 1$, $x_{\max} = 20$, $x_{\min} = 14$. $h \approx 1$.

• Заполним первичную таблицу (см. табл. 2) и по ней построим гистограмму распределения времени полета Ан-24 от «точки ВПР до торца ВПП»

Таблица 3

Распределение t1

t_1	14	15	16	17	18	>19
Штрихи	I		 	 I	 	
n_i	1	6	18	11	7	2

По данным табл. 3 в модуле Mathcad построим график распределения случайной величины t_1 . Для этого данные табл. 3. отобразим в векторном представлении и вычислим статистики:

$$j := 1..6 \quad N := 45$$

$$mt1 := \frac{\sum_{j=1}^6 (t_{1j} \cdot n_j)}{N}$$

$$Dt1 := \frac{\sum_{j=1}^6 [(t_{1j})^2 \cdot n_j] - N \cdot mt1^2}{N-1}$$

$$st1 := \sqrt{Dt1}$$

$$t_1 := \begin{pmatrix} 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \end{pmatrix} \quad n := \begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 18 \\ 11 \\ 7 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$mt1 = 16.511 \quad Dt1 = 1.256$$

$$st1 = 1.121$$

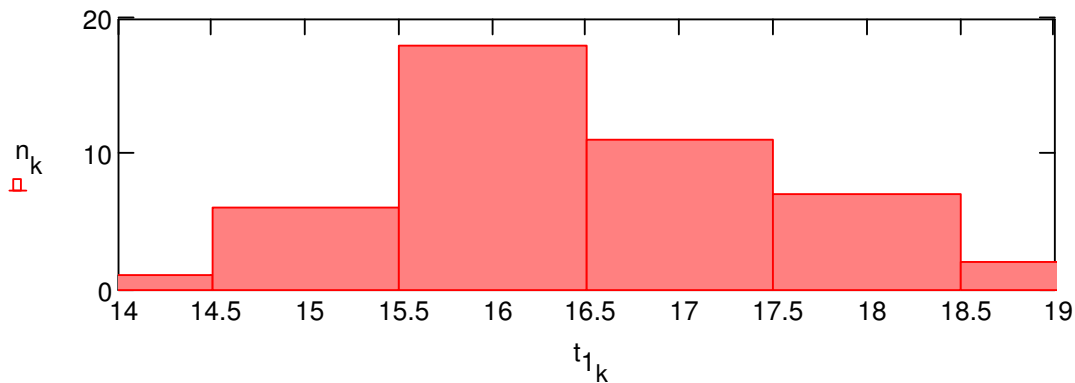


Рис. 2. Распределение t_1

По виду гистограммы можно предположить, что случайную величину t_1 можно описать нормальным законом.

6. Все расчетные данные можно получить с помощью встроенных функций Mathcad 13 (либо других модификаций Mathcad).

Вставку рассмотренных статистических функций в программу удобно осуществлять с помощью диалогового окна **Insert Function** (Вставка функции). Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- Установить курсор на место вставки функции в документе.

- Вызвать диалоговое окно **Insert Function** нажатием кнопки **f(x)** на стандартной панели инструментов, или командной меню **Insert / Function** (Вставка / функция), или нажатием клавиш <Ctrl>+<E>.

- В списке **Function Category** (Категория функции) выбрать одну из категорий статистических функций, в нашем случае выбрать категорию **Statistics**.

- В списке **Function Name** (Имя функции) выбрать необходимые функции **mean(■, ■, ■, ■)**, **stdev(■, ■, ■, ■)**, **histogram** и др.

- Нажать кнопку **OK** для вставки функции в документ.

Найдем среднее, дисперсию и среднеквадратическое отклонение:

$a1 := \text{mean}(t1)$	$a2 := \text{mean}(t2)$	$a3 := \text{mean}(t3)$	$a4 := \text{mean}(t4)$
$a1 = 16.533$	$a2 = 50.244$	$a3 = 12.667$	$a4 = 72.956$
$\text{var}(t1) = 1.405$	$\text{var}(t2) = 4.762$	$\text{var}(t3) = 0.854$	$\text{var}(t4) = 11.865$
$\sigma1 := \text{stdev}(t1)$	$\sigma2 := \text{stdev}(t2)$	$\sigma3 := \text{stdev}(t3)$	$\sigma4 := \text{stdev}(t4)$
$\sigma1 = 1.166$	$\sigma2 = 2.182$	$\sigma3 = 0.843$	$\sigma4 = 3.445$

7. Построение теоретических частот.

Принимаем гипотезу о нормальном распределении длительности $t1$ на этапе полета "ВПР - торец ВПП" с параметрами $a1 = 16.533$, $\sigma=1 = 1,166$. По встроенным функциям "Random Numbers"__ $\text{rnorm}(N, a1, \sigma1)$ и "Statistics" __ $\text{histogram}(\mathbf{■}, \mathbf{■})$ найдем теоретические $x1$ частоты длительности полета Ан-24 на этапе "ВПР - торец ВПП".

$N := \text{length}(t1)$	$N = 45$	bin - число сегментов (задаем самостоятельно)
$\text{bin} := 6$	$j := 1..6$	N - число замеров (наблюдений)
$x1 := \text{rnorm}(N, a1, \sigma1)$	$x1$ - вектор нормального распределения с параметрами $a1 = 16,533; \sigma1 = 1,166$.	
$f1 := \text{histogram}(\text{bin}, x1)$		

Выводим матрицу **f1**. Первый столбец – варианты значений величин $t1$. Второй частоты появления признака $t1$. По данным $f1$ построим график распределения случайной величины $t1$ (рис. 3).

$$f1 = \begin{pmatrix} 13.852 & 1 \\ 14.848 & 6 \\ 15.843 & 14 \\ 16.839 & 11 \\ 17.834 & 8 \\ 18.83 & 5 \end{pmatrix}$$

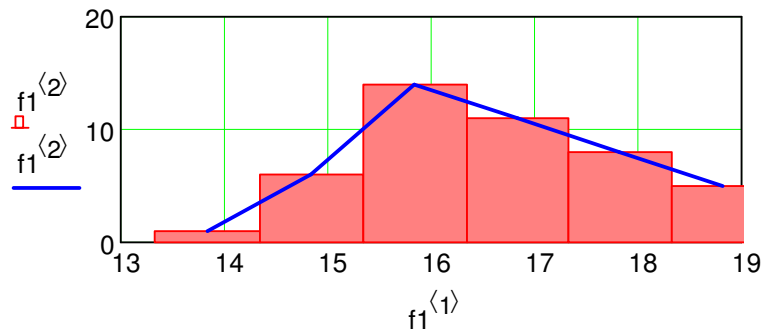


Рис. 3. Нормальное распределение t1

	1
1	15.991
2	15.706
3	15.95
4	15.383
5	14.513
6	16.563
7	16.368
8	17.171
9	19.109
10	17.47
11	17.679
12	17.533
13	17.597
14	17.309
15	15.273
16	16.593

	1
17	15.615
18	17.337
19	16.296
20	15.747
21	15.654
22	15.899
23	17.173
24	16.221
25	16.617
26	18.007
27	15.675
28	16.513
29	17.824
30	17.569
31	13.072
32	13.954

	1
30	17.569
31	13.072
32	13.954
33	16.755
34	15.781
35	15.091
36	16.629
37	17.425
38	16.874
39	16.525
40	15.605
41	16.026
42	15.712
43	16.354
44	17.718
45	16.725

Сравниваем табл. 3 (опытное распределение t1), вектор **n** с матрицей **f1** (теоретическое распределение случайной величины t1). Между ними находим некоторую разницу значений величин «n». Значимые они или нет, проверим по критерию хи-квадрат.

8. Проверка статистических гипотез.

Проверка по критерию хи-квадрат. Критерий согласия является тем правилом, которое дает возможность, опираясь на установленный закон распределения определенного вида или функции отклонений между теоретическими и наблюдаемыми данными, установить, когда полученное в действительности указанное отклонение следует признать несущественным, случайным, а когда существенным, неслучайным.

В качестве меры расхождения теоретического и эмпирического (опытного) рядов можно взять величину

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - f_{1j,2})^2}{f_{1j,2}}.$$

Схема применения критерия согласия хи-квадрат:

8.1. На основании опытных данных и вида гистограммы (рис. 2) предполагаем, что случайную величину t_1 можно описать нормальным законом.

8.2. Определим теоретические частоты (вектор f_1).

8.3. Вычислим значение $\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_{1j} - f_{1j,2})^2}{f_{1j,2}}.$

8.4. Определим число степеней свободы $df = k - s$. Для нормального закона $s = 3$. $df = 6 - 3 = 3$.

8.5. По табл. приложения 4 по полученным степени свободы df и по принятому уровню значимости $p = 0,001$ определим табличное значение $\chi_T^2 = 16,27$.

8.6. Проверяется условие $P(\chi_{\text{табл}}^2 \geq \chi_{\text{опыт}}^2) = 0,001$. Если табличное значение хи-квадрат больше хи-квадрат, вычисленному по экспериментальным данным, то имеющиеся расхождения между опытными и теоретическими частотами случайны, а предположение о том, что распределение СВ можно описать нормальным распределением хорошо согласуется с наблюдениями.

Выполним вычисления хи-квадрат для опытного распределения t_1 :

$$\chi_{1\text{кв}} := \sum_j \frac{(n_j - f_{1j,2})^2}{f_{1j,2}} \quad \chi_{1\text{кв}} = 3,068$$

Табличное значение хи-квадрат $\chi_T^2 = 16,27$ (см. п. 8.6).

Проверяем условие $P(\chi_T^2 = 16,27 > \chi_0^2 = 3,068) = 0,001$.

Табличное значение хи-квадрат больше хи-квадрат, вычисленному по экспериментальным данным, поэтому имеющиеся расхождения между опытными и теоретическими частотами случайны, следовательно распределение t_1 можно описать нормальным распределением с параметрами $a_1 = 16,533$ и $\sigma_1 = 1,166$.

9. Выполним обработку данных вектора t2:

- Количество опытных данных равно $N = 45$.
- Число разрядов определим по формуле $k \cong k \approx 1 + 3,2 \lg(45) \approx 6$.
- Величина интервала: $x_{\max} = 55, x_{\min} = 45. h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} \approx 2, h \approx 2$.
- Заполним первичную таблицу (см. табл. 2) и по ней построим гистограмму распределения времени пробега Ан-24 от момента приземления до освобождения ВПП».

Таблица 4

Распределение t2

t ₂	44-46	46-48	48-50	50-52	52-54	54-56
Штрихи			— — 	— — — 	— 	
n _i	1	4	11	17	9	3

$N2 := \text{length}(t2)$

$N2 = 45$

$j := 1..6$

$$t_2 := \begin{pmatrix} 45 \\ 47 \\ 49 \\ 51 \\ 53 \\ 55 \end{pmatrix} \quad n_2 := \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 11 \\ 18 \\ 8 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$mt2 := \frac{\sum_{j=1}^6 (t_{2j} \cdot n_{2j})}{N2}$$

$$Dt2 := \frac{\sum_{j=1}^6 [(t_{2j})^2 \cdot n_{2j}] - N2 \cdot mt2^2}{N2 - 1}$$

$Dt2 = 4.962$

$st2 := \sqrt{Dt2}$

$st2 = 2.227$

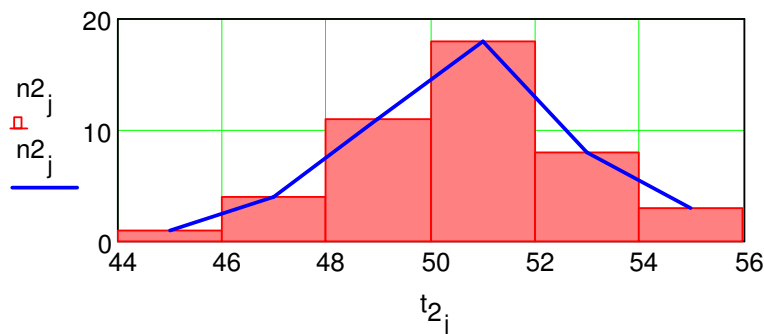


Рис. 4. Опытное распределение t2

10. Построение теоретических частот и гистограмму t2.

$N2 := 45$ $bin2 := 6$ $x2 := rnorm(45, a2, \sigma2)$ $j := 1..6$

$x1$ - вектор нормального распределения с параметрами $a2 = 50,244$; $\sigma2 = 2,182$.

$f2 := histogram(bin2, x2)$

$f2 =$

44.997	2
46.898	3
48.8	10
50.702	18
52.604	8
54.506	4

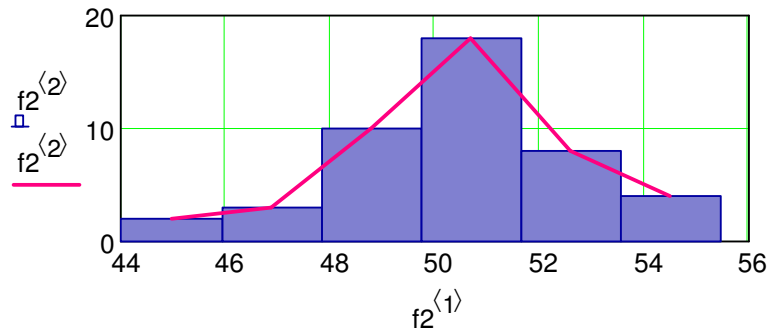


Рис. 5. Теоретическое распределение t2

$x2 =$

	1
1	51.365
2	51.859
3	50.209
4	50.853
5	50.598
6	51.179
7	49.207
8	48.727
9	56.896
10	49.619
11	47.451
12	51.902
13	49.387
14	47.618
15	47.982
16	50.202

$x2 =$

	1
17	50.314
18	50.823
19	51.317
20	50.765
21	48.751
22	46.72
23	53.324
24	52.365
25	47.722
26	50.558
27	53.948
28	49.546
29	45.812
30	47.165
31	47.352
32	49.116

$x2 =$

	1
30	47.165
31	47.352
32	49.116
33	50.38
34	48.944
35	49.523
36	51.421
37	50.722
38	51.128
39	47.722
40	47.833
41	47.837
42	49.356
43	47.378
44	44.046
45	53.029

11. Проверка по критерию хи-квадрат.

- По табл. приложения 4 по полученным степени свободы df и по принятому уровню значимости $p = 0,001$ определим табличное значение хи-квадрат для $k = 6$; $s = 3$; $df = 6 - 3 = 3$; $alpha = 0,001$:

$$\chi_T^2 = 16,27.$$

- Вычислим опытное значение хи-квадрат:

$$\chi^2_{\text{квад2}} := \sum_{j=1}^6 \frac{(n_{2j} - f_{2j,2})^2}{f_{2j,2}} \quad \chi^2_{\text{квад2}} = 1.183$$

- Проверяем условие $P(\chi^2_T = 16,27 > \chi^2_0 = 6,564) = 0,001$.

Табличное значение хи-квадрат больше хи-квадрат, вычисленному по экспериментальным данным, поэтому имеющиеся расхождения между опытными и теоретическими частотами случайны, следовательно распределение t_2 можно описать нормальным распределением с параметрами $\mu_2 = 50,244$ и $\sigma_2 = 2,182$.

12. Выполним обработку данных вектора t_3 :

- Количество опытных данных равно $N = 45$.
- Число разрядов определим по формуле $k \cong k \approx 1 + 3,2 \lg(45) \approx 6$.
- Величина интервала: $x_{\max} = 14, x_{\min} = 11, h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} \approx 0,5, h \approx 1$.
- Заполним первичную таблицу (см. табл. 2) и по ней построим гистограмму распределения времени полета Ту-154 от БПРМ до торца ВПП.

Таблица 5

Распределение t_3

t_3	11	12	13	14
штрихи		 	 	
n	3	18	16	8

$$N_3 := \text{length}(t_3)$$

$$N_3 = 45$$

$$j := 1..4$$

$$t_3 := \begin{pmatrix} 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \end{pmatrix}$$

$$n_3 := \begin{pmatrix} 3 \\ 18 \\ 16 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$mt_3 := \frac{\sum_{j=1}^4 (t_{3j} \cdot n_{3j})}{N_3}$$

$$mt_3 = 12.644$$

$$st3 := \sqrt{Dt3}$$

$$st3 = 0.857$$

$$Dt3 := \frac{\sum_{j=1}^4 [(t_{3j})^2 \cdot n_{3j}] - N3 \cdot mt3^2}{N3 - 1}$$

$$Dt3 = 0.734$$

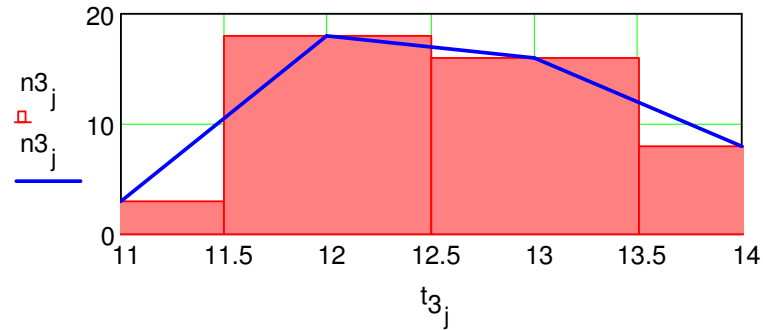


Рис. 6. Опытное распределение t_3

13. Построение теоретических частот и гистограмму t_3 .

$$N3 := 45 \quad bin3 := 4 \quad x3 := \text{rnorm}(45, 12.7, \sigma3) \quad j := 1..4$$

x_3 - вектор нормального распределения с параметрами $a_3 = 12,667$; $\sigma_3 = 0.843$.

$$f3 := \text{histogram}(4, x3)$$

$$f3 = \begin{pmatrix} 10.925 & 4 \\ 12.167 & 23 \\ 13.408 & 16 \\ 14.65 & 2 \end{pmatrix}$$

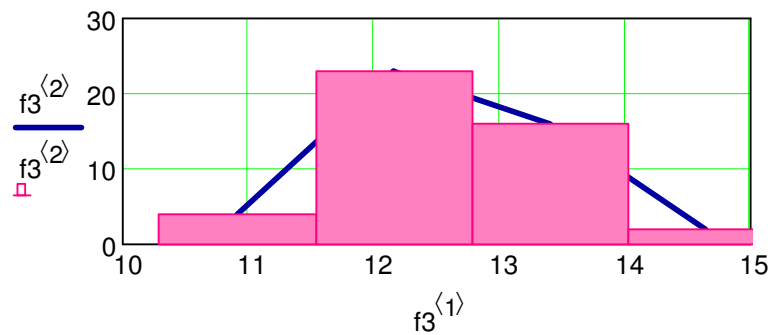


Рис. 7. Теоретическое распределение t_3

$x_3 =$

	1
1	12.354
2	13.437
3	12.22
4	11.933
5	11.968
6	13.625
7	11.837
8	11.645
9	13.227
10	12.078
11	13.156
12	13.26
13	13.138
14	12.823
15	12.657
16	12.966

$x_3 =$

	1
17	12.91
18	12.556
19	12.318
20	12.948
21	12.827
22	11.912
23	13.368
24	13.304
25	13.58
26	13.384
27	13.22
28	12.493
29	12.628
30	13.277
31	13.367
32	13.002

$x_3 =$

	1
30	13.277
31	13.367
32	13.002
33	12.522
34	12.569
35	12.815
36	13.429
37	14.351
38	12.758
39	13.176
40	13.17
41	14.295
42	13.947
43	10.765
44	13.259
45	12.328

14. Проверка по критерию хи-квадрат.

• По табл. приложения 4 по полученным степени свободы df и по принятому уровню значимости $p = 0,001$ определим табличное значение хи-квадрат для $k = 4$; $s = 3$; $df = 6 - 3 = 1$; $\alpha = 0,001$:

$$\chi_T^2 = 10,83.$$

• Вычислим опытное значение хи-квадрат:

$$\chi_{\text{Зквад2}} := \sum_{j=1}^4 \frac{(n_{3j} - f_{3j,2})^2}{f_{3j,2}} \quad \chi_{\text{Зквад2}} = 9,146$$

• Проверяем условие $P(\chi_T^2 = 10,83 > \chi_0^2 = 9,146) = 0,001$.

Табличное значение хи-квадрат больше хи-квадрат, вычисленному по экспериментальным данным, поэтому имеющиеся расхождения между опытными и теоретическими частотами случайны, следовательно распределение t_3 можно описать нормальным распределением с параметрами $a_3 = 12,756$ и $\sigma_3 = 0,821$.

15. Выполним обработку данных вектора t_4 :

- Количество опытных данных равно $N = 45$.
- Число разрядов определим по формуле $k \approx k \approx 1 + 3,2 \lg(45) \approx 6$.
- Величина интервала: $x_{\max} = 78$, $x_{\min} = 66$. $h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} \approx 2$, $h \approx 2$.

• Заполним первичную таблицу (см. табл. 2) и по ней построим гистограмму распределения времени пробега Ту-154 от момента приземления до освобождения ВПП.

Таблица 6

Опытное распределение t_4

t_4	66-68	68-70	70-72	72-74	74-76	76-78
Штрихи	I	IIII	—III— —III— II	—III— —III— IIII	—III— IIII	III
n_{4j}	2	4	12	14	9	4

$$N_4 := \text{length}(t_4)$$

$$N_4 = 45$$

$$j := 1..6$$

$$t_4 := \begin{pmatrix} 67 \\ 69 \\ 71 \\ 73 \\ 75 \\ 77 \end{pmatrix}$$

$$n_4 := \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 12 \\ 14 \\ 9 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$mt_4 := \frac{\sum_{j=1}^6 (t_{4j} \cdot n_{4j})}{N_4}$$

$$mt_4 = 72.6$$

$$Dt_4 := \frac{\sum_{j=1}^6 [(t_{4j})^2 \cdot n_{4j}] - N_4 \cdot mt_4^2}{N_4 - 1}$$

$$Dt_4 = 6.291$$

$$st_4 := \sqrt{Dt_4}$$

$$st_4 = 2.508$$

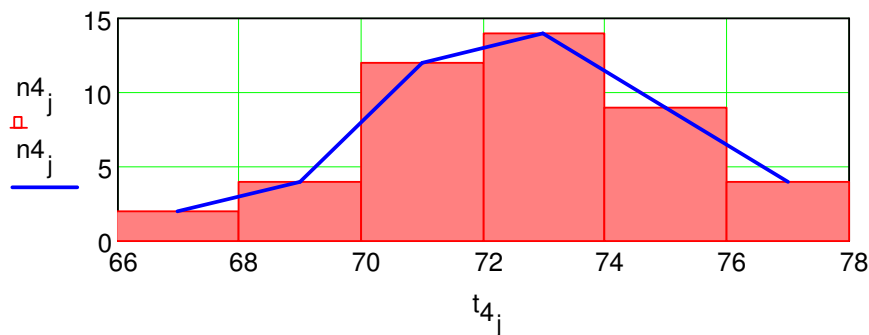


Рис. 8. Опытное распределение t_4

16. Построение теоретических частот и гистограмму t4.

$N4 := 45$ $bin4 := 6$ $x4 := rnorm(N4, a4, \sigma4)$ $j := 1..6$

$x4$ - вектор нормального распределения с параметрами $a4 = 72.067$; $\sigma4 = 2.525$.

$f4 := histogram(bin4, x4)$

$f4 =$

66.263	1
68.418	6
70.573	14
72.728	11
74.883	8
77.038	5

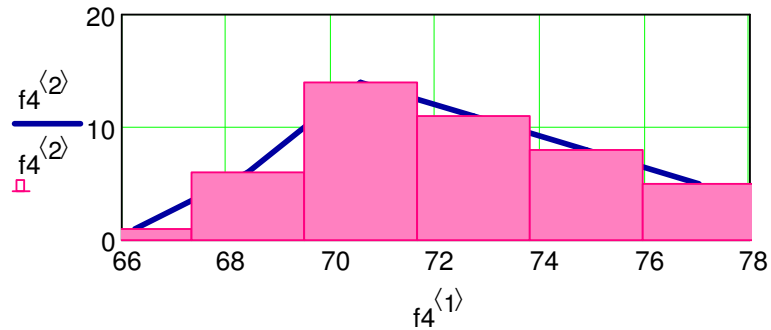


Рис. 9. Теоретическое распределение t4

$x4 =$

	1
1	70.871
2	72.291
3	70.303
4	72.943
5	69.858
6	76.864
7	65.185
8	74.264
9	77.568
10	74.806
11	75.035
12	69.614
13	68.088
14	73.238
15	75.789
16	75.009

$x4 =$

	1
1	70.871
2	72.291
3	70.303
4	72.943
5	69.858
6	76.864
7	65.185
8	74.264
9	77.568
10	74.806
11	75.035
12	69.614
13	68.088
14	73.238
15	75.789
16	75.009

$x4 =$

	1
1	70.871
2	72.291
3	70.303
4	72.943
5	69.858
6	76.864
7	65.185
8	74.264
9	77.568
10	74.806
11	75.035
12	69.614
13	68.088
14	73.238
15	75.789
16	75.009

17. Проверка по критерию хи-квадрат.

- По табл. приложения 4 по полученным степени свободы df и по принятому уровню значимости $p = 0,001$ определим табличное значение хи-квадрат для $k = 6$; $s = 3$; $df = 6 - 3 = 3$; $\alpha = 0,001$:

$$\chi_T^2 = 16,27.$$

- Вычислим опытное значение хи-квадрат:

$$\chi_{4\text{квад}2} := \sum_{j=1}^6 \frac{(n_{4j} - f_{4j,2})^2}{f_{4j,2}} \quad \chi_{4\text{квад}2} = 3.096$$

- Проверяем условие $P(\chi_T^2 = 16,27 > \chi_0^2 = 3,096) = 0,001$.

Табличное значение хи-квадрат больше хи-квадрат, вычисленному по экспериментальным данным, поэтому имеющиеся расхождения между опытными и теоретическими частотами случайны, следовательно распределение t_4 можно описать нормальным распределением с параметрами $a_4 = 72,067$ и $\sigma_4 = 2,525$.

3. Условия обеспечения безопасности полетов

Безопасность полетов на круге полетов обеспечивается, если:

- воздушные суда на схеме рассредоточены на интервалы не менее принятых норм продольного эшелонирования;
- выполняются правила обслуживания ВС на ВПП;
- учитывается время «догона» на схеме захода на посадку из-за эксплуатации ВС разного класса скоростей;
- учитывается вероятность ухода ВС на второй круг из-за занятости ВПП;
- учитываются погрешности выдерживания параметров полета ВС на схеме захода;
- учитываются ошибки диспетчера в формировании интервала посадки.

Принятые ограничения по спутной струе ξ в курсовой работе не учитываются, но в общей формуле формирования интервала посадки показано данное ограничение.

Порядок расчета времени обслуживания для различных режимов работы ВПП представлен в [1]. Расчет минимально допустимых интервалов полета между ВС на схеме снижения и захода на посадку показан в [2].

С учетом принятых ограничений минимально допустимые интервалы между ВС в точке третьего разворота определяются по формуле:

$$t_{3R_{i,j}} = \max(\tau_j, \max(\tau_j + q\sigma_{i,j}; t_{i \text{ пос}}) + \Delta t_{i,j}, \xi),$$

где t_{3R} – время обслуживания ВС в точке третьего разворота; ξ - временная величина, учитывающая ограничения по спутной струе (в дальнейшем в расчетах не учитывается).

$$t_{\text{пос}} := t1_i + t2_i + q \cdot \sqrt{(\sigma1_i)^2 + (\sigma2_i)^2},$$

где $t_{\text{пос}}$ - время обслуживания ВПП в режиме «посадка», $t1$ – время полета от БПРМ до торца ВПП, $t2$ – время занятости ВПП после посадки, $\sigma1$ – среднеквадратическое отклонение времени полета от БПРМ до торца ВПП, $\sigma2$ – среднеквадратическое отклонение времени занятости ВПП.

$$\tau_i := \frac{d}{V3_i},$$

где τ - временной интервал продольного эшелонирования, d – линейная норма продольного эшелонирования, $V3$ – скорость ВС на круге полета.

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{\sigma_{\text{пп},i,j}^2 + \sigma_{34,i,j}^2 + \sigma_{\text{увд}}^2};$$

$\sigma_{\text{пп}}$ – среднеквадратическое отклонение выдерживания интервала между ВС на прямой; σ_{34} - среднеквадратическое отклонение выдерживания интервала между ВС на участке между третьим и четвертым разворотом; $\sigma_{\text{увд}}$ – погрешность в формировании интервала посадки между ВС.

$\Delta t_{i,j} = \Delta t_{\text{пп},i,j} + \Delta t_{34,i,j}$ – величина догона соответственно на предпосадочной прямой и на участке между третьим и четвертым разворотами.

Среднее время обслуживания на участке третий разворот – ВПП определяется по формуле:

$$t_{c_{i,j}} = \sum_i \sum_j t_{i,j} p_{i,j}.$$

Расчетные позиции ВС в точке третьего разворота определяются по формуле:

$$S3R_{i,j} = V3_j \cdot t3_{i,j}.$$

Теоретическая пропускная способность участка «третий разворот – ВПП» находится по формуле:

$$\mu = \frac{3600 \cdot s}{t_{c_{i,j}}}.$$

4. Формирование интервала посадки между ВС

При УВД диспетчер круга неосознанно решает две задачи:

- очередность посадки ВС,
- формирование интервала посадки между двумя ВС.

Последний момент регулирования и уточнения интервала между самолетами возможен только в точке третьего разворота **прямоугольного** маршрута (или

подход **под 45⁰** к предпосадочной прямой). Надо помнить, что в зависимости схемы захода расчетные формулы задержки ВС несколько различаются. Рассмотрим заход ВС по **прямоугольному** маршруту. Пусть первое, *i*-е ВС, находится впереди и первым заходит на посадку. Когда оно находится в точке третьего разворота, диспетчер уточняет интервал между *i*-м и *j*-м ВС. Необходимость задержки в точке третьего разворота второго, *j*-го ВС, и её величину диспетчер определяет по формуле (все эти действия диспетчер выполняет интуитивно, без расчетов):

$$S_i \text{ задержки} = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{3_{i,j}} - S_{\phi} \leq 0, \text{ когда } i\text{-е первым заходит на посадку,} \\ \frac{S_{3_{i,j}} - S_{\phi}}{2}, & \text{если } S_{3_{i,j}} - S_{\phi} > 0, \text{ когда } i\text{-е первым заходит на посадку,} \\ \max(d, \frac{S_{3_{i,j}} + S_{\phi}}{2}), & \text{если } i\text{-е выполняет посадку вторым за } j\text{-м.} \end{cases}$$

Или

$$t_j \text{ задержки} = \begin{cases} 0, & \text{если } t_{3_{i,j}} - t_{\phi} \leq 0, \text{ когда } i\text{-е первым заходит на посадку,} \\ \frac{t_{3_{i,j}} - t_{\phi}}{2}, & \text{если } t_{3_{i,j}} - t_{\phi} > 0, \text{ когда } i\text{-е первым заходит на посадку,} \\ \max(d, \frac{t_{3_{i,j}} + t_{\phi}}{2}), & \text{если } i\text{-е ВС выполняет посадку вторым за } j\text{-м,} \end{cases}$$

где $t_{\phi} = s_{\phi} / v_j$, s_{ϕ} – фактическое расстояние между *i*-м и *j*-м ВС, когда первое находится в точке третьего разворота.

Когда *j*-е (второе) планируется первым на посадку, то задержка выполнения третьего разворота *i*-м ВС рассчитывается по формуле:

$$S_i \text{ задержки} = \max\left(d, \frac{S_{3_{i,j}} + S_{\phi}}{2}\right),$$

$$t_i \text{ задержки} = \max\left\{\tau_i, \frac{t_{3_{i,j}} + t_{\phi}}{2}\right\},$$

где $\tau_i = d / v_{i \text{ круга}}$, d – норма продольного эшелонирования.

При заходе на посадку по схеме малого прямоугольного маршрута ВС от точки третьего разворота последовательно проходит этапы полета «разворот – прямая – разворот – предпосадочная прямая – ВПП». Безопасность полетов будет обеспечена, если при формировании интервалов посадок диспетчер круга будет учитывать:

- продольное эшелонирование между ВС;
- погрешности выдерживания скорости полета.

- ошибки диспетчера при формировании интервала посадки между ВС в точке третьего разворота;
- время обслуживания ВПП;
- догон (отставание) при заходе на посадку ВС разного класса скоростей.

Рассмотрим влияние каждого фактора на интервал полета между ВС.

1. Временная норма продольного эшелонирования в точке третьего разворота и в начале предпосадочной прямой равна величине:

$$\tau_{4j} = \frac{d}{v_{1j \text{ пр. прямой}}}; \quad \tau_{3j} = \frac{d}{V_{3j \text{ круга}}}.$$

2. Рассчитаем погрешность выдерживания интервала полета между i-м и j-м ВС на предпосадочной прямой:

$$\sigma_{4i,j} = (L_{pp} - 1000) \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta v_i}{V_{1i}^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta v_j}{V_{1j}^2}\right)^2}.$$

3. Определим интервал догона между ВС на предпосадочной прямой:

$$t_{4i,j} = \frac{(L_{pp} - 1000) \cdot (V_{1j} - V_{1i})}{V_{1i} \cdot V_{1j}}.$$

4. Определим время обслуживания, расчетные позиции ВС в точке начала предпосадочной прямой:

$$t_{4R_{i,j}} = \max(\tau_{4j}, \max(\tau_{4j} + q \cdot \sigma_{4i,j}, t_{\text{пос}_i}) + t_{4i,j});$$

$$S_{4R_{i,j}} = V_{4j} \cdot t_{pp_{i,j}}.$$

5. Среднеквадратическое отклонение интервала полета между i-м и j-м ВС на этапе «третий – четвертый развороты» составит величину:

$$\sigma_{3i,j} = L_{34} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta v_{4i}}{V_{4i}}\right)^2 + \left(\frac{\delta v_{4j}}{V_{4j}}\right)^2}.$$

5. С учетом ошибки диспетчера в формировании интервала посадки среднеквадратическое отклонение интервала полета между i-м и j-м ВС на этапе полета «третий разворот – ВПП» определяется по формуле:

$$\sigma_{5i,j} = \sqrt{\sigma_{4i,j}^2 + \sigma_{3i,j}^2 + \sigma_{\text{увд}}^2}.$$

6. Интервал догона (отставание) на этапе полета «третий разворот – точка ВПР» определяется по формуле:

$$t5_{i,j} = t4_{i,j} + \frac{L_{34}(V4_j - V4_i)}{V4_i \cdot V_j}.$$

7. С учетом принятых ограничений минимальный интервал посадки между i-м и j-м ВС в точке третьего разворота составит величину

$$t3R_{i,j} = \max(\tau3_j; \max(\tau3_j + q \cdot \sigma3_{i,j}; t3_{\text{ипос}}) + t5_{i,j}).$$

8. Расчетные позиции ВС в точке третьего разворота определяются по правилу:

$$S3R_{i,j} = V3_j \cdot t3_{i,j}.$$

При заходе на посадку двух ВС возможны два варианта их посадки на ВПП.

1. Первым производит посадку первое ВС, за ним – второе.
2. Первым производит посадку второе ВС, вторым – первое.

Пусть первое (i-е) ВС находится в точке третьего разворота. Второе (j-е) позади первого на расстоянии s_{ϕ} . Фактический временной интервал между ВС в точке третьего разворота равен величине $t_{\phi} = s_{\phi}/V_j$.

Когда первое (i-е) ВС находится в точке третьего разворота и выполняет третий разворот либо его задержка в точке третьего разворота определяются по правилу:

$$S_{\text{задер}} = \begin{cases} 0, & \text{если } S3_{i,j} - S_{\phi} \leq 0, \text{ когда } i\text{-е первым заходит на посадку,} \\ \frac{S3_{i,j} - S_{\phi}}{2}, & \text{если } S3_{i,j} - S_{\phi} > 0, \text{ когда } i\text{-е первым заходит на посадку,} \\ \max\left(d, \frac{S3_{i,j} + S_{\phi}}{2}\right), & \text{когда } i\text{-е вторым заходит на посадку.} \end{cases}$$

Пример 2. Формирование интервалов посадки двух ВС

С вероятностью 0,95 не нарушения правил УВД определить необходимый интервал посадки и задержки ВС в точке третьего разворота. Ширина прямоугольного маршрута равна 8 км, длина предпосадочной прямой равна 13 км. Среднеквадратическая ошибка диспетчера в формировании интервала между ВС равна 10 с. Первое ВС находится в точке третьего разворота, второе – позади первого на удалении $L = 7$ км. Крен разворотов 25° . Параметры полета ВС приведены в исходных данных.

Решение задачи с применением MathCAD

Определить с вероятностью 0,95 не нарушения правил УВД время обслуживания ВС в точке начала предподсадочной прямой и в точке третьего разворота. ВПП работает в режиме посадка. Длина прямой равна $L_{пп} = 13$ км. Ширина прямоугольного маршрута - $L_{34} = 8$ км. Скорость планирования ВС $V_{11} = 300$ км/ч; $V_{12} = 240$ км/ч; средние скорости полета ВС между 3 и 4 разворотами соответственно равны $V_{41} = 360$ км/ч; $V_{42} = 270$ км/ч. Скорости полета ВС на круге полета равны $V_{31} = 400$ км/ч; $V_{32} = 300$ км/ч. Погрешности выдерживания скорости полета равны $\delta_1 = 5.4$ kph, $\delta_2 = 2$ м/с. Норма продольного эшелонирования $d = 5000$ м. Погрешность диспетчера $\sigma_{УВД} = 10$ с. Для упрощения расчетов ВС заходят по одной схеме.

Расчетные формулы и исходные данные:

$$i := 1..2 \quad j := 1..2 \quad d := 5000 \cdot m \quad L_{бпрм} := 1000 \cdot m \quad L_{12} := 7000 \cdot m$$

$t_{1i} :=$	$t_{2i} :=$	$\sigma_{1i} :=$	$\sigma_{2i} :=$	$P_i :=$	$L_{пп} := 13000 \cdot m$
12.7·s	73·s	0.8·s	3.4·s	0.6	
16.5·s	50·s	1.2·s	2.8·s	0.4	$L_{34} := 8000 \cdot m$

$V_{1i} :=$	$V_{4i} :=$	$V_{3i} :=$	$\delta_i :=$	$\sigma_{увд} := 10 \cdot s$
300·kph	360·kph	400·kph	5.4·kph	
240·kph	270·kph	300·kph	7.2·kph	

1. Найдем значение q : $q := qnorm(0.95, 0, 1) \quad q = 1.6$

2. Вычислим $P_{i,j} := p_i \cdot p_j \quad P = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 \end{pmatrix}$

3. Время обслуживания ВПП в режиме посадка определяется по формуле:

$$t_{посi} := t_{1i} + t_{2i} + q \cdot \sqrt{(\sigma_{1i})^2 + (\sigma_{2i})^2} \quad t_{пос} = \begin{pmatrix} 91.4 \\ 71.5 \end{pmatrix} s$$

4. Определим временную норму продольного эшелонирования в начале предподсадочной прямой τ_4 и на кругу полета τ_3 :

$$\tau_{4i} := \frac{d}{V_{4i}} \quad \tau_4 = \begin{pmatrix} 50 \\ 66.7 \end{pmatrix} s \quad \tau_{3i} := \frac{d}{V_{3i}} \quad \tau_3 = \begin{pmatrix} 45 \\ 60 \end{pmatrix} s$$

5. Определим среднеквадратическую ошибку выдерживания интервала полета между ВС на предподсадочной прямой:

$$\sigma_{1i,j} := (L_{пп} - L_{бпрм}) \cdot \sqrt{\left[\frac{\delta_i}{(V_{1i})^2}\right]^2 + \left[\frac{\delta_j}{(V_{1j})^2}\right]^2} \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 3.7 & 6 \\ 6 & 7.6 \end{pmatrix} \text{ s}$$

6. Вычислим интервал догона на предпосадочной прямой:

$$\Delta t_{пп,i,j} := \frac{(L_{пп} - L_{бпрм}) \cdot (V_{1j} - V_{1i})}{V_{1i} \cdot V_{1j}} \quad \Delta t_{пп} = \begin{pmatrix} 0 & -36 \\ 36 & 0 \end{pmatrix} \text{ s}$$

7. Определим время обслуживания и расчетные позиции ВС в начале предпосадочной прямой (рис. 10 - 12):

$$t_{4R_{i,j}} := \max(\tau_{4j}, \max(\tau_{4j} + q \cdot \sigma_{1i,j}, t_{пос})) + \Delta t_{пп,i,j}$$

$$S_{4R_{i,j}} := V_{4j} \cdot t_{4R_{i,j}}$$

$$S_{4R} = \begin{pmatrix} 9.1 \times 10^3 & 5 \times 10^3 \\ 1.1 \times 10^4 & 5.9 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ m} \quad t_{4R} = \begin{pmatrix} 91.4 & 66.7 \\ 107.5 & 79.2 \end{pmatrix} \text{ s}$$

8. Определим среднеквадратическую ошибку выдерживания интервала полета между ВС на этапе полета от третьего до четвертого разворота:

$$\sigma_{4i,j} := L_{34} \cdot \sqrt{\left[\frac{\delta_i}{(V_{4i})^2}\right]^2 + \left[\frac{\delta_j}{(V_{4j})^2}\right]^2} \quad \sigma_4 = \begin{pmatrix} 1.7 & 3.1 \\ 3.1 & 4 \end{pmatrix} \text{ s}$$

9. Определим среднеквадратическую ошибку выдерживания интервала полета между ВС на этапе полета от третьего до ВПР:

$$\sigma_{3i,j} := \sqrt{(\sigma_{1i,j})^2 + (\sigma_{4i,j})^2 + \sigma_{увд}^2} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 10.8 & 12.1 \\ 12.1 & 13.2 \end{pmatrix} \text{ s}$$

10. Рассчитаем интервал догона от третьего до четвертого разворота

$$\Delta t_{4i,j} := \frac{L_{34} \cdot (V_{4j} - V_{4i})}{V_{4i} \cdot V_{4j}} \quad \Delta t_4 = \begin{pmatrix} 0 & -26.7 \\ 26.7 & 0 \end{pmatrix} \text{ s}$$

11. Вычислим интервал догона от третьего разворота до БПРМ

$$\Delta t_{i,j} := \Delta t_{пп,i,j} + \Delta t_{4i,j} \quad \Delta t = \begin{pmatrix} 0 & -62.7 \\ 62.7 & 0 \end{pmatrix} \text{ s}$$

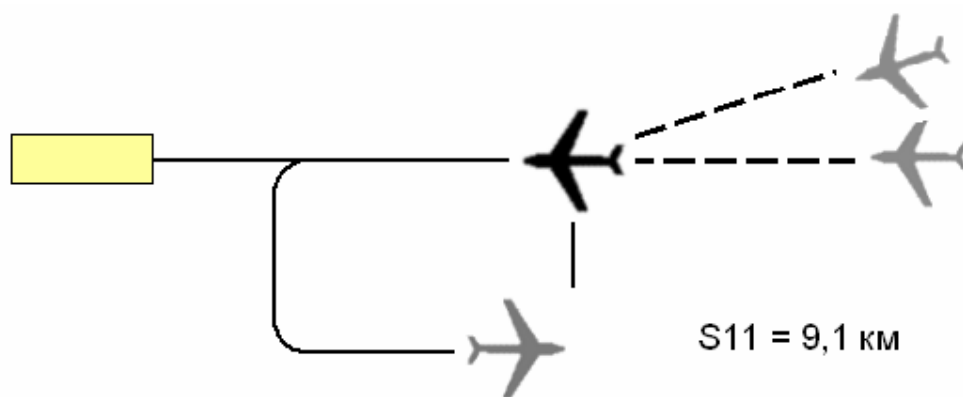


Рис. 10. Заход с прямой. Вариант посадки 11.
 Положение второго ВС, когда первое в начале предпрямой

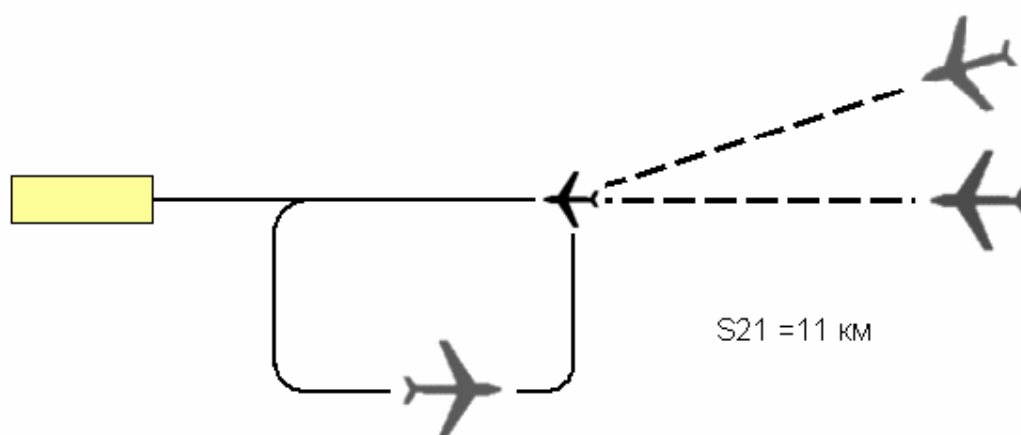


Рис. 11. Заход с прямой. Вариант посадки 21.
 Положение второго ВС, когда первое в начале предподсадочной прямой

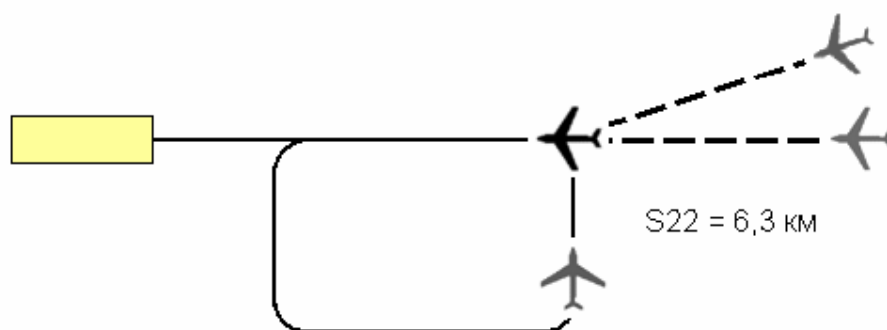


Рис. 12. Заход с прямой. Вариант посадки 22.
 Положение второго ВС, когда первое в начале предпрямой

Вариант захода 12 на рисунках не показан.

12. Время обслуживания ВС в точке третьего составит величину:

$$t_{3R_{i,j}} := \max(\tau_{3j}, \max(\tau_{3j} + q \cdot \sigma_{3i,j}, t_{\text{пос}}) + \Delta t_{i,j})$$

$$t_{3R} = \begin{pmatrix} 91.4 & 60 \\ 134.2 & 81.7 \end{pmatrix} \text{ s}$$

13. Расчетные дистанции между ВС в точке третьего разворота:

$$S_{3R_{i,j}} := V_{3j} \cdot t_{3R_{i,j}} \quad S_{3R} = \begin{pmatrix} 1 \times 10^4 & 5 \times 10^3 \\ 1.5 \times 10^4 & 6.8 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ m}$$

14. Средняя величина обслуживания ВС в точке третьего разворота составит величину:

$$t_{3R_{\text{сред}}} := \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (t_{3R_{i,j}} \cdot P_{i,j}) \quad t_{3R_{\text{сред}}} = 92.6 \text{ s}$$

15. Пропускная способность участка схемы "Третий разворот - ВПП" равна:

$$\mu := \frac{1 \cdot \text{hr}}{t_{3R_{\text{сред}}}} \quad \mu = 38.9$$

Вариант 1. Посадка 12.

1.1. Извлечем расчетную дистанцию и временной интервал между ВС в точке третьего разворота:

$$S_{3R_{1,2}} = 5 \times 10^3 \text{ m} \quad t_{3R_{1,2}} = 60 \text{ s}$$

1.2. Фактическое расстояние и временной интервал между ВС (рис. 13)

$$L_{12} = 7 \times 10^3 \text{ m} \quad t_{12\phi} := \frac{L_{12}}{V_{32}} \quad t_{12\phi} = 84 \text{ s}$$

1.3. Определим интервал задержки второго ВС в точке третьего разворота:

$$S_{z12} := \frac{S_{3R_{1,2}} - L_{12}}{2} \quad S_{z12} = -1 \times 10^3 \text{ m}$$

Так как фактическое расстояние между ВС больше расчетной позиции, то ВС заходят друг за другом строго по схеме (рис. 14).

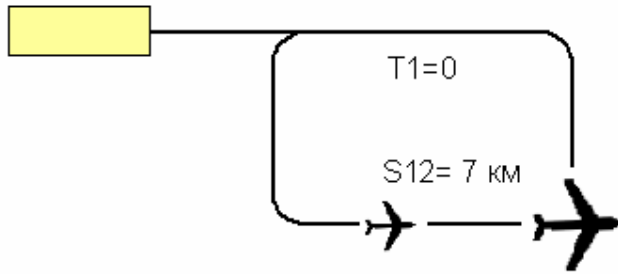


Рис. 13. Вариант 1. Посадка ВС 12

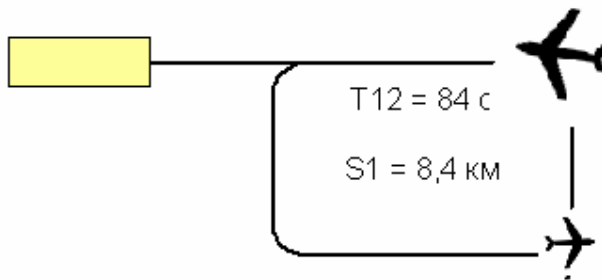


Рис. 14. Вариант 1. Второе ВС выполняет третий разворот

T12 – цифра один означает первый вариант, цифра два – второе ВС.

1.4. Время начала выполнения вторым ВС третьего разворота

$$T12 := t12\phi \quad T12 = 84 \text{ s}$$

1.5. Местоположение первого ВС на момент T12:

$$S1_{T12} := V4_1 \cdot t12\phi \quad S1_{T12} = 8.4 \times 10^3 \text{ m}$$

Вариант 2. Посадка 11. $L11 := 7 \cdot \text{km}$

2.1. Извлечем расчетную дистанцию и временной интервал между ВС в точке третьего разворота:

$$S3R_{1,1} = 1 \times 10^4 \text{ m} \quad t3R_{1,1} = 91.4 \text{ s}$$

2.2. Фактическое расстояние и временной интервал между ВС (рис. 14)

$$L11 = 7 \times 10^3 \text{ m} \quad t21\phi := \frac{L11}{V3_1} \quad t21\phi = 63 \text{ s}$$

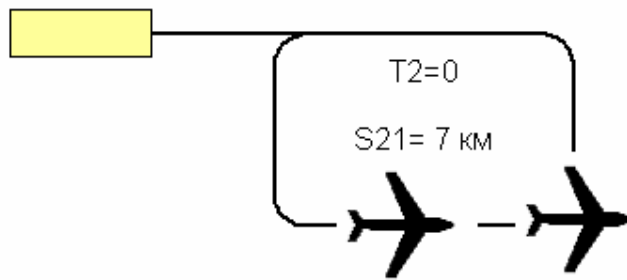


Рис. 15. Вариант 2. Посадка ВС 11

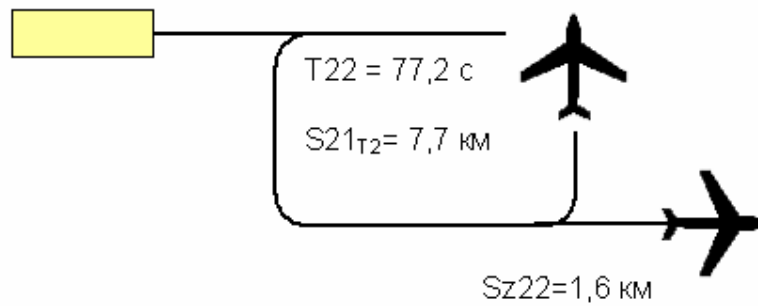


Рис. 16. Вариант 2. Второе ВС выполняет 3 разворот

S_{21T_2} – положение первого ВС на момент начала выполнения третьего разворота вторым ВС; S_{z22} – расстояние задержки второго ВС.

2.3. Определим интервал задержки второго ВС в точке третьего разворота:

$$S_{z21} := \frac{S_{3R_{1,1}} - L_{11}}{2} \quad S_{z21} = 1.6 \times 10^3 \text{ m}$$

$$t_{z21} := \frac{t_{3R_{1,1}} - t_{21\phi}}{2} \quad t_{z21} = 14.2 \text{ s}$$

2.4. Время начала выполнения вторым ВС третьего разворота (рис. 15)

$$T_{21} := t_{21\phi} + t_{z21} \quad T_{21} = 77.2 \text{ s}$$

2.5. Местоположение первого ВС на момент T_{22} :

$$S_{21} := V_{41} \cdot (t_{21\phi} + t_{z21}) \quad S_{21} = 7.7 \times 10^3 \text{ m}$$

Вариант 3. Посадка 21

$$L21 := 7 \cdot \text{km}$$

3.1. Извлечем расчетную дистанцию и временной интервал между ВС в точке третьего разворота:

$$S3R_{2,1} = 1.5 \times 10^4 \text{ m} \quad t3R_{2,1} = 134.2 \text{ s}$$

3.2. Фактическое расстояние и временной интервал между ВС (рис. 17)

$$L21 = 7 \times 10^3 \text{ m} \quad t31\phi := \frac{L21}{V31} \quad t31\phi = 63 \text{ s}$$

3.3. Определим интервал задержки второго ВС в точке третьего разворота:

$$Sz32 := \frac{S3R_{2,1} - L21}{2} \quad Sz32 = 4 \times 10^3 \text{ m}$$

$$tz32 := \frac{t3R_{2,1} - t31\phi}{2} \quad tz32 = 35.6 \text{ s}$$

3.4. Время начала выполнения вторым ВС третьего разворота (рис. 18)

$$T32 := t31\phi + tz32 \quad T32 = 98.6 \text{ s}$$

3.5. Местоположение первого ВС на момент T32:

$$S31 := V4_2 \cdot (t31\phi + tz32) \quad S31 = 7.4 \times 10^3 \text{ m}$$

Вариант 4. Посадка 22

$$L22 := 7 \cdot \text{km}$$

4.1. Извлечем расчетную дистанцию и временной интервал между ВС в точке третьего разворота:

$$S3R_{2,2} = 6.8 \times 10^3 \text{ m} \quad t3R_{2,2} = 81.7 \text{ s}$$

4.2. Фактическое расстояние и временной интервал между ВС (рис. 19).

$$L22 = 7 \times 10^3 \text{ m} \quad t42\phi := \frac{L22}{V32} \quad t42\phi = 84 \text{ s}$$

4.3. Определим интервал задержки второго ВС в точке третьего разворота:

$$Sz42 := \frac{S3R_{2,2} - L22}{2} \quad Sz42 = -94.7 \text{ m}$$

$$tz42 := \frac{t3R_{2,2} - t42\phi}{2} \quad tz42 = -1.1 \text{ s}$$

ВС заходят друг за другом по схеме (рис. 20).

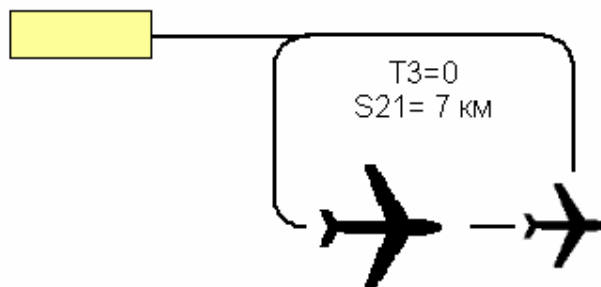


Рис. 17. Вариант 3. Посадка ВС 21

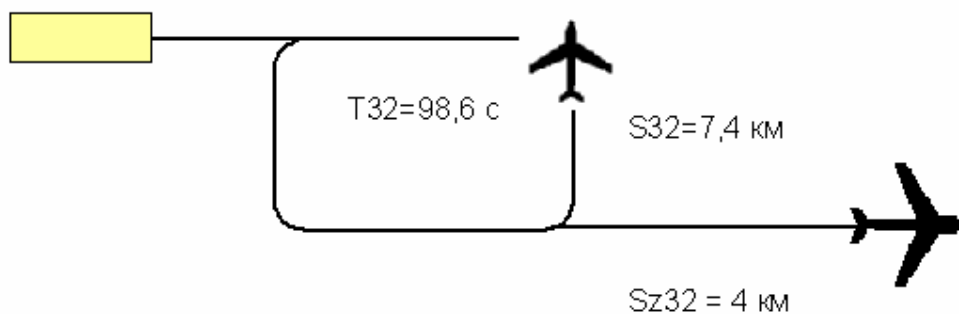


Рис. 18. Вариант 3. Второе ВС выполняет 3 разворот

$Sz32$ – расстояние задержки второго ВС, $S32$ – расстояние первого ВС на момент начала выполнения третьего разворота вторым ВС.

4.4. Время начала выполнения вторым ВС третьего разворота, так как фактическое и расчетное расстояния совпадают.

$$T42 := t42\phi + tz42 \quad T42 = 82.9 \text{ s}$$

4.5. Местоположение первого ВС на момент $T42$:

$$S41 := V42 \cdot T42 \quad S41 = 6.2 \times 10^3 \text{ m}$$

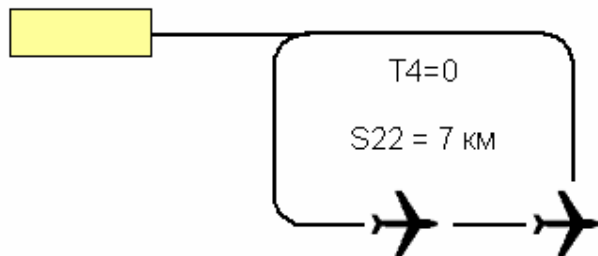


Рис. 19. Вариант 4. Посадка ВС 22

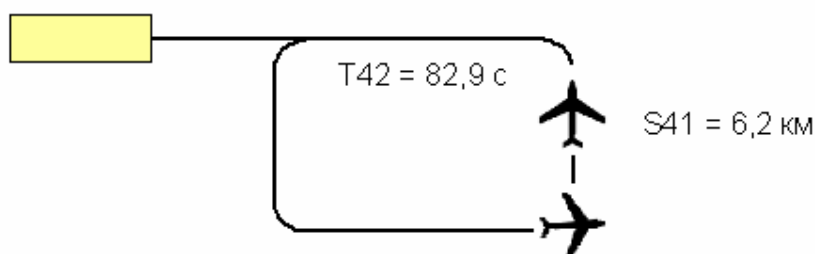


Рис. 20. Вариант 4. Второе ВС выполняет 3 разворот

S41 – Положение первого ВС на момент выполнения третьего разворота вторым ВС.

Пример 3. Формирование интервалов посадки трех ВС

Если в аэропорту эксплуатируется три ВС разного класса скоростей, то только для трех ВС (разного класса скоростей) возможны 27 вариантов посадки ВС (воздушных ситуаций) [3]. Вы помните норму загруженности диспетчера круга? Сколько ВС одновременно может находиться под его управлением?

Конечно, управлять однородным потоком проще, чем потоком ВС разного класса скоростей. Поэтому упростим решение задачи. Зафиксируем одну из 27 воздушных ситуаций на круге полета. Итак, на круге полета находятся конкретно три ВС разного класса скоростей (одна из 27 реализаций). Для этой реализации три ВС можно посадить шестью способами [2]. Обозначим ВС первого класса скоростей цифрой 1, второго класса - цифрой 2, третьего – 3. Тогда множество возможных посадок разного класса скоростей можно представить так: {123, 132, 213, 231, 312,

321} (в общем случае множество возможных посадок для трех ВС составит величину $3 \times 3 \times 3 = 27$). Естественно, ВС входят в круг полета в случайном порядке. Но для диспетчера это конкретная реализация воздушной ситуации. Диспетчер может завести на посадку ВС в том порядке, как они вошли в круг полета (предпочтительный вариант), либо ином другом варианте (при определенных обстоятельствах). Опыт диспетчера предопределяет его готовность выполнить любой вариант посадки ВС.

Рассмотрим реализацию {321}.

С вероятностью 0,95 не нарушения правил УВД определить время обслуживания ВС в точке третьего разворота трех ВС. Длина предпосадочной прямой равна $L_{пп} = 13$ км. Ширина прямоугольного маршрута с учетом 3-го и 4-го разворотов - $L_{34} = 8$ км. Скорость планирования ВС $V_{11} = 300$ км/ч; $V_{12} = 270$ км/ч; $V_{13} = 240$ км/ч. Средние скорости полета ВС между 3 и 4 разворотами равны $V_{41} = 360$ км/ч; $V_{42} = 300$ км/ч, $V_{43} = 270$ км/ч. Скорости полета ВС на круге полета равны $V_{31} = 400$ км/ч; $V_{32} = 360$ км/ч; $V_{33} = 300$ км/ч. Ошибка диспетчера в формировании интервала полета между ВС равна $\sigma = 10$ с. Погрешности выдерживания скорости полета равны $\sigma_1 = 5,4$ км/ч, $\sigma_2 = 6$ км/ч, $\sigma_3 = 7,2$ км/ч. Норма продольного эшелонирования $d = 5000$ м. t_1 - время полета от ВПР до ВПП; t_2 - время занятости ВПП после посадки до её момента освобождения; σ - соответствующие среднеквадратические отклонения. ВС заходят на посадку по одной схеме прямоугольного маршрута. ВС третьего класса скоростей находится в точке третьего разворота $L_3 = 0$ км, ВС второго класса скоростей позади на удалении 7 км, $L_{32} = 6$ км, ВС первого класса скоростей находится позади самолета второго класса на удалении 7 км, $L_{21} = 7$ км (рис. 25).

Расчетные формулы и исходные данные

$i := 1..3$	$j := 1..3$	$d := 5000 \cdot m$			$L_{пп} := 13000 \cdot m$															
$t_{1i} :=$	$t_{2i} :=$	$\sigma_{1i} :=$	$\sigma_{2i} :=$	$p_i :=$	$L_{34} := 8000 \cdot m$															
<table border="1"><tr><td>12.7·sec</td></tr><tr><td>15·sec</td></tr><tr><td>16.5·sec</td></tr></table>	12.7·sec	15·sec	16.5·sec	<table border="1"><tr><td>73·sec</td></tr><tr><td>55·sec</td></tr><tr><td>50·sec</td></tr></table>	73·sec	55·sec	50·sec	<table border="1"><tr><td>0.8·sec</td></tr><tr><td>2·sec</td></tr><tr><td>1.2·sec</td></tr></table>	0.8·sec	2·sec	1.2·sec	<table border="1"><tr><td>3.4·sec</td></tr><tr><td>3·sec</td></tr><tr><td>2.8·sec</td></tr></table>	3.4·sec	3·sec	2.8·sec	<table border="1"><tr><td>0.2</td></tr><tr><td>0.3</td></tr><tr><td>0.5</td></tr></table>	0.2	0.3	0.5	$L_{бпрм} := 1000 \cdot m$
12.7·sec																				
15·sec																				
16.5·sec																				
73·sec																				
55·sec																				
50·sec																				
0.8·sec																				
2·sec																				
1.2·sec																				
3.4·sec																				
3·sec																				
2.8·sec																				
0.2																				
0.3																				
0.5																				
					$P_5 := 0.95$															

$V1_i :=$	$V4_i :=$	$V3_i :=$	$\delta_i :=$	$L3 := 0 \cdot \text{km}$
$300 \cdot \text{kph}$	$360 \cdot \text{kph}$	$400 \cdot \text{kph}$	$5.4 \cdot \text{kph}$	$L32 := 6 \cdot \text{km}$
$270 \cdot \text{kph}$	$300 \cdot \text{kph}$	$360 \cdot \text{kph}$	$6 \cdot \text{kph}$	$L21 := 7 \cdot \text{km}$
$240 \cdot \text{kph}$	$270 \cdot \text{kph}$	$300 \cdot \text{kph}$	$7.2 \cdot \text{kph}$	$\sigma_{\text{увд}} := 10 \cdot \text{sec}$

1. Найдем значение q :

$$q := \text{qnorm}(0.95, 0, 1) \quad q = 1.6$$

2. Вычислим:

$$P_{i,j} := p_i \cdot p_j$$

$$P = \begin{pmatrix} 0.04 & 0.06 & 0.1 \\ 0.06 & 0.09 & 0.15 \\ 0.1 & 0.15 & 0.25 \end{pmatrix}$$

3. Время обслуживания ВПП в режиме посадка определяется по формуле:

$$t3_{\text{пос}_i} := t1_i + t2_i + q \cdot \sqrt{(\sigma1_i)^2 + (\sigma2_i)^2} \quad t3_{\text{пос}} = \begin{pmatrix} 91.4 \\ 75.9 \\ 71.5 \end{pmatrix} \text{ s}$$

4. Определим временную норму продольного эшелонирования на кругу полета $\tau3$ и в начале предпосадочной прямой $\tau4$:

$$\tau3_i := \frac{d}{V3_i} \quad \tau3 = \begin{pmatrix} 45 \\ 50 \\ 60 \end{pmatrix} \text{ s} \quad \tau4_i := \frac{d}{V4_i} \quad \tau4 = \begin{pmatrix} 50 \\ 60 \\ 66.7 \end{pmatrix} \text{ s}$$

5. Определим среднеквадратическую ошибку выдерживания интервала полета между ВС на предпосадочной прямой:

$$\sigma4_{i,j} := (L_{\text{пп}} - L_{\text{бпрм}}) \cdot \sqrt{\left[\frac{\delta_i}{(V1_i)^2} \right]^2 + \left[\frac{\delta_j}{(V1_j)^2} \right]^2} \quad \sigma4 = \begin{pmatrix} 3.7 & 4.4 & 6 \\ 4.4 & 5 & 6.5 \\ 6 & 6.5 & 7.6 \end{pmatrix} \text{ s}$$

6. Вычислим интервал догона на предпосадочной прямой:

$$t4_{i,j} := \frac{(L_{\text{пп}} - L_{\text{бпрм}}) \cdot (V1_j - V1_i)}{V1_i \cdot V1_j} \quad t4 = \begin{pmatrix} 0 & -16 & -36 \\ 16 & 0 & -20 \\ 36 & 20 & 0 \end{pmatrix} \text{ s}$$

7. Определим расчетные позиции и время обслуживания ВС в точке начала предпосадочной прямой (рис. 21 - 24):

$$t4R_{i,j} := \max(\tau4_j, \max(\tau4_j + q \cdot \sigma4_{i,j}, t3_{\text{пос}_i})) + t4_{i,j} \quad S4R_{i,j} := V4_j \cdot t4R_{i,j}$$

$$S4R = \begin{pmatrix} 9.1 \times 10^3 & 6.3 \times 10^3 & 5 \times 10^3 \\ 9.2 \times 10^3 & 6.3 \times 10^3 & 5 \times 10^3 \\ 1.1 \times 10^4 & 7.6 \times 10^3 & 5.9 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ m} \quad t4R = \begin{pmatrix} 91.4 & 75.4 & 66.7 \\ 91.9 & 75.9 & 66.7 \\ 107.5 & 91.5 & 79.2 \end{pmatrix} \text{ s}$$

8. Определим среднеквадратическую ошибку выдерживания интервала полета между ВС на этапе полета от третьего до четвертого разворота:

$$\sigma_{3i,j} := L34 \cdot \sqrt{\left[\frac{\delta_i}{(V4_i)^2}\right]^2 + \left[\frac{\delta_j}{(V4_j)^2}\right]^2} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1.7 & 2.3 & 3.1 \\ 2.3 & 2.7 & 3.4 \\ 3.1 & 3.4 & 4 \end{pmatrix} \text{ s}$$

9. Определим среднеквадратическую ошибку выдерживания интервала полета между ВС на этапе полета от третьего до ВПР:

$$\sigma_{5i,j} := \sqrt{(\sigma_{3i,j})^2 + (\sigma_{4i,j})^2 + \sigma_{\text{увд}}^2} \quad \sigma_5 = \begin{pmatrix} 10.8 & 11.2 & 12.1 \\ 11.2 & 11.5 & 12.4 \\ 12.1 & 12.4 & 13.2 \end{pmatrix} \text{ s}$$

10. Рассчитаем интервал догона от третьего до четвертого разворота:

$$t_{3i,j} := \frac{L34 \cdot (V4_j - V4_i)}{V4_i \cdot V4_j} \quad t_3 = \begin{pmatrix} 0 & -16 & -26.7 \\ 16 & 0 & -10.7 \\ 26.7 & 10.7 & 0 \end{pmatrix} \text{ s}$$

11. Вычислим интервал догона от третьего разворота до БПРМ:

$$t_{5i,j} := t_{3i,j} + t_{4i,j} \quad t_5 = \begin{pmatrix} 0 & -32 & -62.7 \\ 32 & 0 & -30.7 \\ 62.7 & 30.7 & 0 \end{pmatrix} \text{ s}$$

12. Расстояния и время обслуживания ВС рассчитываются только и только в **точке третьего разворота**:

$$t_{3Ri,j} := \max\left(\tau_{3j}, \max\left(\tau_{3j} + q \cdot \sigma_{5i,j}, t_{3\text{пос}j}\right)\right) + t_{5i,j}$$

$$S_{3Ri,j} := V_{3j} \cdot t_{3Ri,j}$$

$$S3R = \begin{pmatrix} 1 \times 10^4 & 5.9 \times 10^3 & 5 \times 10^3 \\ 1.2 \times 10^4 & 7.6 \times 10^3 & 5 \times 10^3 \\ 1.5 \times 10^4 & 1 \times 10^4 & 6.8 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ m} \quad t_{3R} = \begin{pmatrix} 91.4 & 59.4 & 60 \\ 107.9 & 75.9 & 60 \\ 134.2 & 102.2 & 81.7 \end{pmatrix} \text{ s}$$

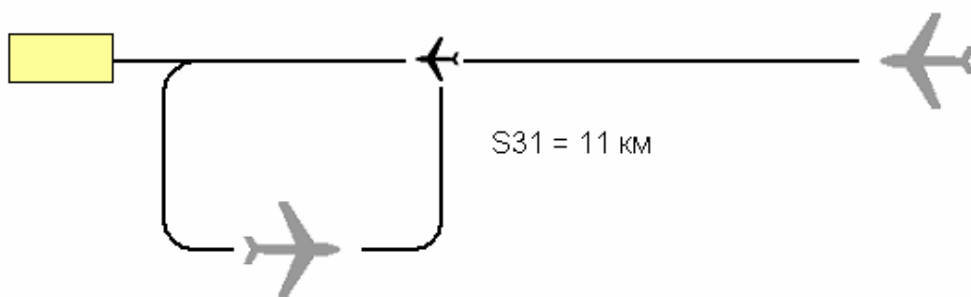


Рис. 21. Заход с прямой. Посадка ВС 31

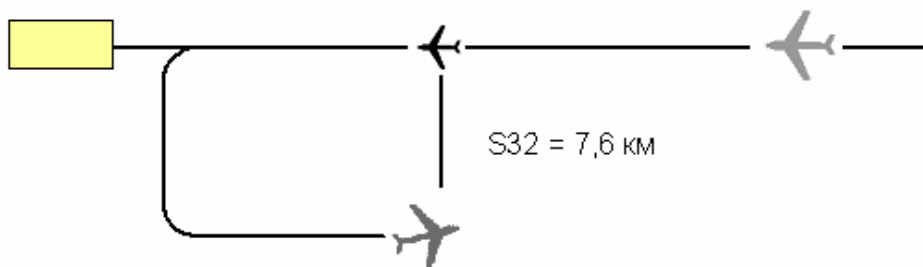


Рис. 22. Заход с прямой. Посадка ВС 32

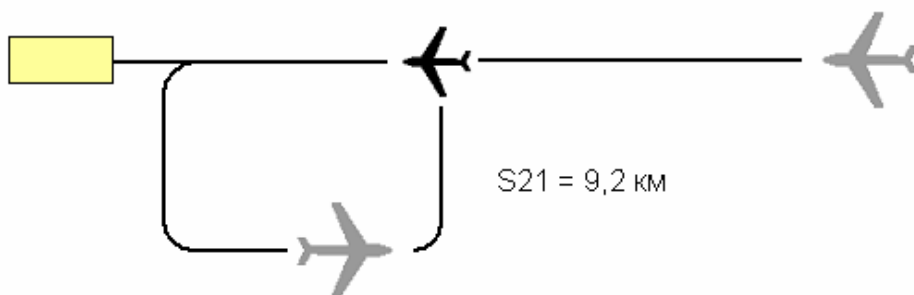


Рис. 23. Заход с прямой. Посадка 21

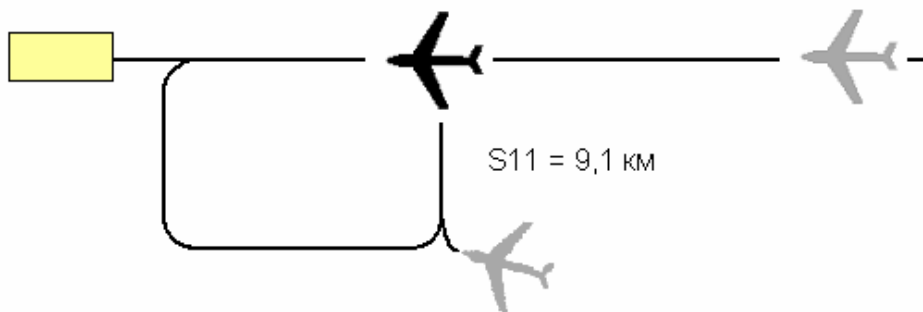


Рис. 24. Заход с прямой. Посадка ВС 11

Первое ВС находится в начале предпосадочной прямой. Второе ВС должно находиться на расчетной позиции на маршруте подхода утвержденной схемы. Третий самолет не рассматривался.

13. Средняя величина обслуживания ВС в точке третьего разворота составит величину:

$$t_{3R_{\text{сред}}} := \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (t_{3R_{i,j}} \cdot P_{i,j}) \quad t_{3R_{\text{сред}}} = 84.7 \text{ s}$$

14. Пропускная способность участка схемы "Третий разворот - ВПП" определяется по формуле:

$$\mu_{10} := \frac{3600 \cdot \text{sec}}{t_{3R_{\text{сред}}}} \quad \mu_{10} = 42.5$$

15. На круге полета находится три ВС разного класса скоростей. Исходное положение ВС показано на рис. 25. Извлечем нормативное расстояние и временной интервал между ВС второго и ВС первого класса скоростей в точке третьего разворота:

$$S_{3R_{3,2}} = 1 \times 10^4 \text{ m} \quad t_{3R_{3,2}} = 102.2 \text{ s}$$

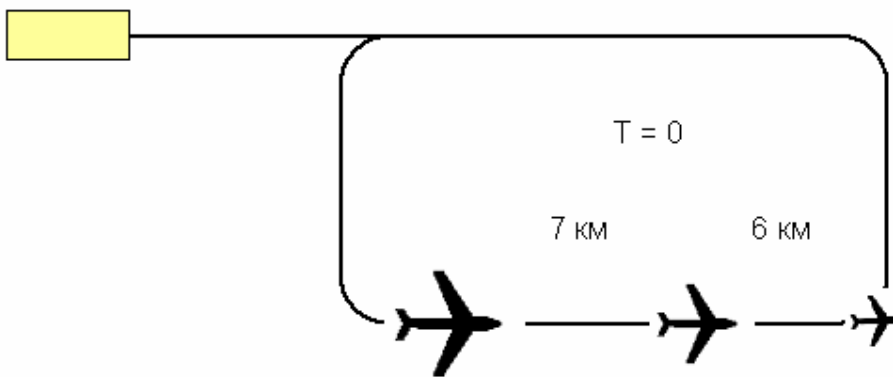


Рис. 25. Исходное положение ВС

16. Определим расстояние и время задержки ВС второго класса скоростей в точке третьего разворота (рис. 26):

$$S_{2_{\text{зад}}} := \frac{S_{3R_{3,2}} - L_{32}}{2} \quad S_{2_{\text{зад}}} = 2.1 \times 10^3 \text{ m}$$

$$t_{2_{\text{факт}}} := \frac{L_{32}}{V_{32}} \quad t_{2_{\text{факт}}} = 60 \text{ s}$$

$$t_{2_{\text{зад}}} := \frac{t_{3R_{3,2}} - t_{2_{\text{факт}}}}{2} \quad t_{2_{\text{зад}}} = 21.1 \text{ s}$$

$$T_{2R} := t_{2_{\text{факт}}} + t_{2_{\text{зад}}} \quad T_{2R} = 81.1 \text{ s}$$

17. Определим местоположение ВС первого класса скоростей на момент T2R начала выполнения ВС второго класса скоростей третьего разворота (рис. 26):

$$S_{21_{T2R}} := L_{21} + (V_{32} - V_{31}) \cdot (t_{2_{\text{факт}}} + t_{2_{\text{зад}}}) \quad S_{21_{T2R}} = 6.1 \times 10^3 \text{ м}$$

18. Определим местоположение ВС третьего класса скоростей на момент T2R:

$$S_{3_{T2R}} := V_{43} \cdot (t_{2_{\text{факт}}} + t_{2_{\text{зад}}}) \quad S_{3_{T2R}} = 6.1 \times 10^3 \text{ м}$$

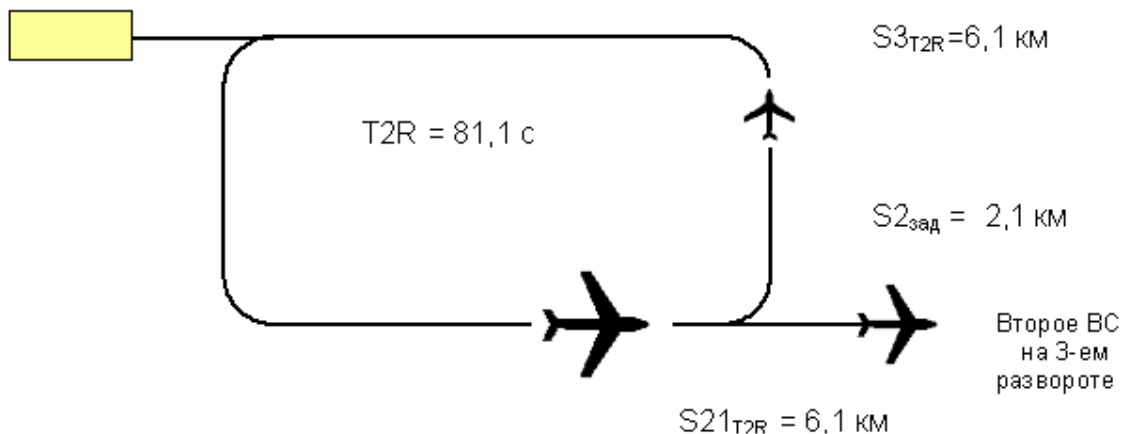


Рис. 26. Положение ВС на момент выполнения 3R вторым ВС

19. Определим расстояние и время задержки ВС первого класса скоростей в расчетной точке третьего разворота (рис. 27). Извлечем расчетные позиции и временной интервал между ВС в точке третьего разворота:

$$S_{3R_{2,1}} = 1.2 \times 10^4 \text{ м} \quad t_{3R_{2,1}} = 107.9 \text{ с}$$

20. Определим расстояние и время задержки ВС первого класса скоростей в расчетной точке третьего разворота (рис. 27):

$$S_{1_{\text{зад}}} := \frac{S_{3R_{2,1}} - S_{21_{T2R}}}{2} \quad S_{1_{\text{зад}}} = 2.9 \times 10^3 \text{ м}$$

21. Определим момент времени начала выполнения третьего разворота ВС первого класса скоростей:

$$T_{1R} := T_{2R} + \frac{S_{21_{T2R}} + S_{1_{\text{зад}}}}{V_{31}} \quad T_{1R} = 162.5 \text{ с}$$

22. Определим местоположение ВС третьего и второго класса скоростей на момент T1R (рис. 27):

$$S_{3_{T1R}} := V_{13} \cdot \frac{S_{21_{T2R}} + S_{1_{\text{зад}}}}{V_{31}} \quad S_{3_{T1R}} = 5.4 \times 10^3 \text{ м}$$

$$S_{2_{T1R}} := V_{42} \cdot \frac{S_{21_{T2R}} + S_{1_{\text{зад}}}}{V_{31}} \quad S_{2_{T1R}} = 6.8 \times 10^3 \text{ м}$$

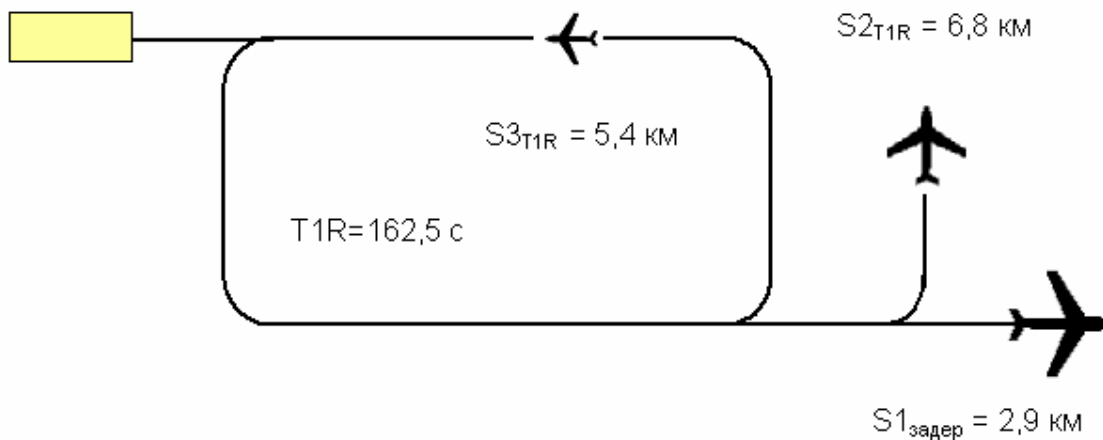


Рис. 27. Положение ВС на момент выполнения 3R третьим ВС

5. Оценка эффективности УВД на участке “третий разворот - ВПП”

По заданию некоторые ВС заходят на посадку от точки третьего разворота. Последовательно соединенные участки схемы захода: “третий - четвертый развороты - предпосадочная прямая - ВПП” можно рассматривать как элементы схемы массового обслуживания. Случайный входящий поток в ЗВП и интервал между ВС, формируемый диспетчером круга, приводят к образованию случайного процесса УВД. Если известны законы поступления ВС и времени обслуживания, то анализируемый сектор захода вместе с ВПП можно рассматривать как систему массового обслуживания (СМО). По классификации Кэндалла система массового обслуживания характеризуется следующим способом: $M/E_1/1$, где M - пуассоновский закон поступления ВС; E_1 - показательный закон обслуживания ВС, 1 - одна ВПП. Кроме того, используются следующие символы: E_n - распределение Эрланга n -го порядка; N - нормальное распределение; D - детерминированное распределение; G - произвольное распределение (табл.3).

Оценим эффективность УВД на конкретном примере. Пусть задана система массового обслуживания ЗВП как $M/N/1$. Пропускная способность участка “третий разворот - ВПП” равна $\mu = 40,7$ ВС/ч. По условию задания требуется найти зависимость числа ВС в секторе захода от интенсивности входящего потока в ЗВП.

График зависимости характеристик эффективности УВД на этапе захода «третий разворот – ВПП» от интенсивности входящего потока ($\lambda = 12 - 36$) показан на рис. 22.

Инженер отличается от специалиста среднего уровня тем, что он может планировать, ставить и решать задачу, анализировать её решение и делать выбор на инженерном уровне. Известно, что пропускная способность системы из последовательно соединенных элементов равна наихудшему из них. К тому же, пропускная способность каждого элемента системы зависит от многих факторов. Например, пропускная способность ВПП зависит от правил обслуживания, наличия скоростных РД, скорости и места приземления ВС, её тормозных возможностей, состояния покрышек колес шасси и т.д.

Таблица 7

Характеристики СМО

Характеристики	СМО		
	M/E ₁ /1	M/N/1	M/D/1
Среднее время затягивания 3-го разворота – tz (мин)	$\frac{\psi \cdot 60}{\mu(1-\psi)}$	$\frac{1,1 \cdot \psi \cdot 60}{2\mu(1-\psi)}$	$\frac{\psi \cdot 60}{2\mu(1-\psi)}$
Среднее время нахождения ВС на этапе «3R-ВПП» - τ (мин)	$\frac{1 \cdot 60}{\mu(1-\psi)} + \frac{60}{\mu}$	$\frac{1,1 \cdot 60}{2\mu(1-\psi)} + \frac{60}{\mu}$	$\frac{60}{2\mu(1-\psi)} + \frac{60}{\mu}$
Среднее число ВС, задержанных в точке 3R - n	$\frac{\psi^2}{1-\psi}$	$\frac{1,1 \cdot \psi^2}{2(1-\psi)}$	$\frac{\psi^2}{2(1-\psi)}$
Среднее число ВС на этапе «3R-ВПП» - N	$\frac{\psi^2}{1-\psi} + \psi$	$\frac{1,1 \cdot \psi^2}{2(1-\psi)} + \psi$	$\frac{\psi^2}{2(1-\psi)} + \psi$

Пропускная способность предподсадочной прямой зависит от её длины, угла наклона глиссады, точности выдерживания параметров полета, рассредоточения ВС из-за спутной струи, и т.д. Не все факторы равнозначны, но с Вашей профессиональной точки зрения Вы должны выделить наиболее значимый и указать в работе.

Решение задачи с применением MathCAD показано ниже.

На графике (см. рис. 28) видно, что при интенсивности полетов $\lambda = 30$ вс/ч средняя задержка ВС на круге полета и на ВПП составляет $\tau = 5$ минут. Средняя время задержки ВС в точке третьего разворота равна $t \cong 4$ минут. Экономисты полагают, что при задержке более четырех минут ВС в зоне ожидания экономически выгодно ввести в строй новую ВПП или аэропорт.

$$\lambda := \begin{pmatrix} 12 \\ 15 \\ 18 \\ 21 \\ 24 \\ 27 \\ 30 \\ 33 \\ 36 \end{pmatrix} \quad \mu := 42.5$$

$$\psi_i := \frac{\lambda_i}{\mu} \quad t_i := \frac{\psi_i \cdot 60}{\mu \cdot (1 - \psi_i)} \quad n_i := \frac{(\psi_i)^2}{1 - \psi_i}$$

$$N_i := \frac{(\psi_i)^2}{1 - \psi_i} + \psi_i \quad \tau_i := \frac{\psi_i \cdot 60}{\mu \cdot (1 - \psi_i)} + \frac{60}{\mu}$$

$\psi =$	$t =$	$n =$	$N =$	$\tau =$
$\begin{pmatrix} 0.282 \\ 0.353 \\ 0.424 \\ 0.494 \\ 0.565 \\ 0.635 \\ 0.706 \\ 0.776 \\ 0.847 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.555 \\ 0.77 \\ 1.037 \\ 1.379 \\ 1.831 \\ 2.459 \\ 3.388 \\ 4.904 \\ 7.819 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.111 \\ 0.193 \\ 0.311 \\ 0.483 \\ 0.733 \\ 1.107 \\ 1.694 \\ 2.697 \\ 4.691 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.393 \\ 0.545 \\ 0.735 \\ 0.977 \\ 1.297 \\ 1.742 \\ 2.4 \\ 3.474 \\ 5.538 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.967 \\ 2.182 \\ 2.449 \\ 2.791 \\ 3.243 \\ 3.871 \\ 4.8 \\ 6.316 \\ 9.231 \end{pmatrix}$

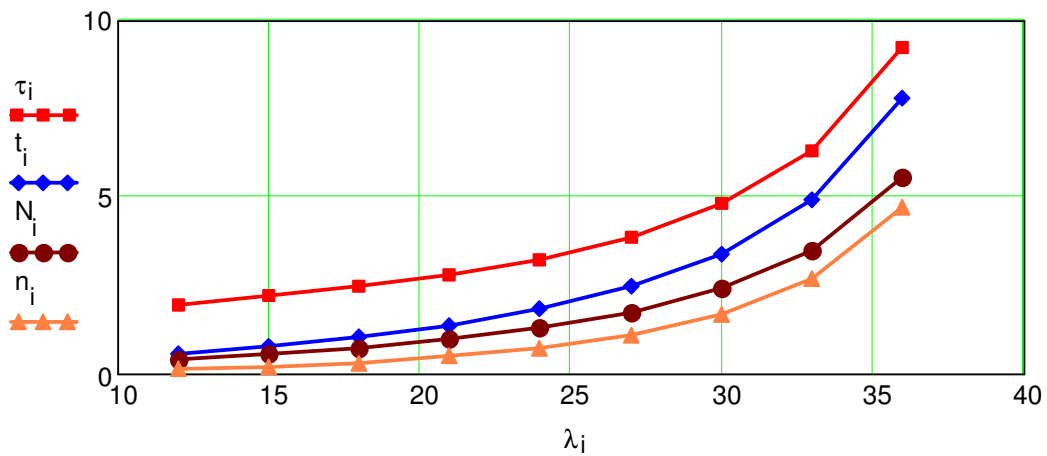


Рис. 28. Зависимость параметров от интенсивности

Литература

1. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 1. /Академия ГА С.-Петербург, 2003.
2. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 2. /Академия ГА С.-Петербург, 2003.
3. Кизько В.Г. Задачи УВД в MathCAD. /Университет ГА. – СПб., 2003.
4. Кизько В.Г. Решение задач УВД с применением MathCAD. / Университет ГА. – СПб., 2008.

Значение нормальной функции распределения

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Аргумент	Сотые доли x									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41308	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48779	48809	48840	48870	48899
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861
3,0	49865									
3,5	49977									
4,0	49997									
4,5	499997									
5,0	4999997									

Значение функции $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

x	Сотые доли x									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,39894	39892	39886	39876	39862	39844	39822	39797	39767	39733
0,1	39695	39654	39608	39559	39505	39448	39387	39322	39253	39181
0,2	39104	39024	38940	38853	38762	38667	38568	38466	38361	38251
0,3	38139	38023	37903	37780	37654	37524	37391	37255	37115	36973
0,4	36827	36678	36526	36371	36213	36053	35889	35723	35553	35381
0,5	35207	35029	34849	34667	34482	34294	34105	33912	33718	33521
0,6	33322	33121	32918	32713	32506	32297	32086	31874	31659	31443
0,7	31225	31006	30785	30563	30339	30114	29887	29658	29430	29200
0,8	28969	28737	28504	28269	28034	27798	27562	27324	27086	26848
0,9	26609	26369	26129	25888	25647	25406	25164	24923	25681	24439
1,0	24197	23955	23713	23471	23230	22988	22747	22506	22265	22025
1,1	21785	21546	21307	21069	20831	20594	20357	20121	19886	19652
1,2	19419	19186	18954	18724	18494	18265	18037	17810	17585	17360
1,3	17137	16915	16694	16474	16256	16038	15822	15608	15395	15183
1,4	14973	14764	14556	14350	14146	13943	13742	13542	13344	13147
1,5	12952	12758	12566	12376	12188	12001	11816	11632	11450	11270
1,6	11092	10915	10741	10567	10396	10226	10059	09893	09728	09566
1,7	09405	09246	09089	08933	08780	08628	08478	08329	08183	08038
1,8	07895	07754	07614	07477	07341	07206	07074	06943	06814	06687
1,9	06562	06438	06316	06195	06077	05959	05844	05730	05618	05508
2,0	05399	05292	05186	05082	04980	04879	04780	04682	04586	04491
2,1	04398	04307	04217	04128	04041	03955	03871	03788	03706	03626
2,2	03547	03470	03394	03319	03246	03174	03103	03034	02965	02898
2,3	02833	02768	02705	02643	02582	02522	02463	02406	02349	02294
2,4	02239	02186	02134	02083	02033	01984	01936	01888	01842	01797
2,5	01753	01709	01667	01625	01585	01545	01506	01468	01431	01394
2,6	01358	01323	01289	01256	01223	01191	01160	01130	01100	01071
2,7	01042	01014	00987	00961	00935	00909	00885	00861	00837	00814
2,8	00792	00770	00748	00727	00707	00687	00668	00649	00631	00613
2,9	00595	00578	00562	00545	00530	00514	00499	00485	00470	00457

Вероятности распределения Пуассона

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

<i>k</i>	λ							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493
1	0,0905	0,1637	0,2222	0,2681	0,3033	0,3293	0,3476	0,3595
2	0,0045	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988	0,1217	0,1438
3	0,0002	0,0011	0,0033	0,0072	0,0126	0,0198	0,0284	0,0383
4		0,0001	0,0003	0,0007	0,0016	0,0030	0,0050	0,0077
5				0,0001	0,0002	0,0004	0,0007	0,0012
6							0,0001	0,0002

<i>k</i>	λ							
	0,9	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
0	0,4066	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498	0,3020	0,0183
1	0,3659	0,3679	0,3347	0,2707	0,2052	0,1494	0,1507	0,0733
2	0,1647	0,1839	0,2510	0,2707	0,2565	0,2240	0,1850	0,1465
3	0,0494	0,0613	0,1255	0,1804	0,2138	0,2240	0,2158	0,1954
4	0,0111	0,0153	0,0471	0,0902	0,1336	0,1680	0,1888	0,1954
5	0,0020	0,0031	0,0141	0,0361	0,0668	0,1008	0,1322	0,1563
6	0,0003	0,0005	0,0035	0,0120	0,0278	0,0504	0,0771	0,1042
7		0,0001	0,0008	0,0034	0,0099	0,0216	0,0385	0,0595
8			0,0001	0,0009	0,0031	0,0081	0,0169	0,0298
9				0,0002	0,0009	0,0027	0,0066	0,0132
10					0,0002	0,0008	0,0023	0,0053
11						0,0002	0,0007	0,0019
12						0,0001	0,0002	0,0006
13							0,0001	0,0002
14								0,0001

Граничные значения для χ^2 с f степенями свободы

f	5%	1%	0,10%
1	3,841	6,635	10,830
2	5,991	9,210	13,820
3	7,815	11,340	16,270
4	9,488	13,280	18,470
5	11,070	15,090	20,510
6	12,590	16,810	22,460
7	14,070	18,480	24,320
8	15,510	20,090	26,130
9	16,920	21,670	27,880
10	18,310	23,210	29,590
11	19,680	24,720	31,260
12	21,030	26,220	32,910
13	22,360	27,690	34,530
14	23,680	29,140	36,120
15	25,000	30,580	37,700
16	26,300	32,000	39,250
17	27,590	33,410	40,790
18	28,870	34,810	42,310
19	30,140	36,190	43,820
20	31,410	37,570	45,310
21	32,670	38,930	46,800
22	33,920	40,290	48,270
23	35,170	41,640	49,730
24	36,420	42,980	51,180
25	37,650	44,310	52,620
26	38,890	45,640	54,050
27	40,110	46,960	55,480
28	41,340	48,280	56,890
29	42,560	49,590	58,300
30	43,770	50,890	59,700

ЗАДАНИЕ

на курсовой проект по дисциплине
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
 для студентов заочного и командного факультета
 специализации ОрВД

- Студенту _____ Группа (Шифр) _____ Вариант _____ . Соответствует двум последним цифрам номера зачетки, кратным двадцати пяти, вариант 01 соответствует шифру 01, 26, 51, 76 (см. методические указания по КУП, Приложение 6).
 - Аэропорт _____
 В работе описать:
 - Постановку задачи и выбор метода решения.
 - Характеристику ВПП и схему снижения и захода на посадку.
 - Провести эксперимент. Выбрать два наиболее часто эксплуатируемых ВС в данном аэропорту. Определить закон времени обслуживания ВС на ВПП в режиме “взлет” и “посадка”.
 - Режим обслуживания ВПП _____
 - Погрешности выдерживания скоростей полета ВС _____
 - .Воздушная обстановка: I ВС, тип _____ находится в _____ км от точки третьего разворота; II ВС, тип _____ находится в _____ км от точки третьего разворота; III ВС, тип _____ находится в _____ км от точки третьего разворота.
 - Вариант посадки _____
 - Определить расчетные позиции ВС в точках начала предпосадочной прямой и третьего разворота, время «задержки» ВС в точке третьего разворота, определить среднее время обслуживания ВС и теоретическую пропускную способность схемы захода “третий разворот - ВПП”.
- Расчеты выполнять без сокращений, последовательно выполнять вычислительные операции, без пропусков и сокращений.
- На рисунках показать положения всех ВС на момент начала выполнения каждым самолетом третьего разворота, а также соответствующие положения между смежными ВС на моменты их выхода на предпосадочную прямую, пролета БПРМ и освобождения ВПП.
 - Тип системы массового обслуживания _____
 - Оценить эффективность УВД в ЗВП по всем четырем критериям.
 - Дать выводы и рекомендации по повышению эффективности УВД в зоне взлета и посадки.

Литература

1. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 1 – 4. /Академия ГА С.-Петербург, 2003.
2. Кизько В.Г. Задачи УВД в MathCAD. /Университет ГА. – СПб., 2003.
3. Кизько В.Г. Решение задач УВД с применением MathCAD. / Университет ГА. – СПб., 2007.

Приложение 6

Вариант	BC	t _{ВПР, с}	σ _{ВПР, с}	t _{ВПП, с}	σ _{ВПП, с}	P _{ненарушения}	% BC	σ _{увд, с}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	18	3	50	7	0,8613	15	12
	2	15	2	40	6		70	
	3	18	3	50	7		15	
2	1	20	5	62	9	0,9625	20	14
	2	16	4	43	4		40	
	3	16	4	43	4		40	
3	1	17	6	65	6	0,998	20	15
	2	15	3	44	3		60	
	3	17	6	65	6		20	
4	1	22	7	55	8	0,9332	60	8
	2	14	4	35	4		20	
	3	14	4	35	4		20	
5	1	19	6	56	7	0,9292	50	11
	2	15	2	40	3		25	
	3	15	2	40	3		25	
6	1	22	5	65	10	0,9981	10	15
	2	16	3	41	6		80	
	3	22	5	65	10		10	
7	1	20	4	60	11	0,9418	30	14
	2	15	2	39	6		35	
	3	15	2	39	6		35	
8	1	19	5	70	9	0,9929	25	10
	2	15	2	40	5		50	
	3	19	5	70	9		25	
9	1	18	6	66	8	0,8962	40	20
	2	13	4	43	4		30	
	3	13	4	43	4		30	
10	1	18	4	68	10	0,9713	40	17
	2	15	3	45	7		20	
	3	18	4	68	10		40	
11	1	21	5	72	12	0,9032	70	18
	2	16	3	60	6		15	
	3	16	3	60	6		15	
12	1	23	4	64	9	0,9452	60	14
	2	17	2	45	4		20	
	3	17	2	45	4		20	
13	1	17	6	75	10	0,9963	20	13
	2	11	4	47	6		40	
	3	11	4	47	6		40	
14	1	24	5	65	12	0,9452	15	15
	2	16	3	43	8		70	
	3	24	5	65	12		15	
15	1	22	6	74	11	0,9744	40	19
	2	13	4	46	7		30	
	3	13	4	46	7		30	
16	1	20	5	72	9	0,9505	30	17
	2	14	2	39	5		35	
	3	14	2	39	5		35	
17	1	21	7	66	8	0,9938	40	12
	2	14	3	46	4		30	
	3	14	3	46	4		30	

Продолжение приложения 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	1	19	4	68	10	0,9999	30	11
	2	19	4	68	10		30	
	3	13	2	43	4		40	
19	1	21	5	71	15	0,9773	30	14
	2	14	3	45	8		35	
	3	14	3	45	8		35	
20	1	24	7	68	11	0,8849	5	16
	2	16	3	41	8		90	
	3	24	7	68	11		5	
21	1	22	6	74	12	0,9878	50	14
	2	16	3	42	6		25	
	3	16	3	42	6		25	
22	1	20	5	60	10	0,9641	45	18
	2	14	2	42	5		10	
	3	20	5	60	10		45	
23	1	23	6	65	9	0,8849	40	15
	2	17	4	47	6		30	
	3	17	4	47	6		30	
24	1	21	7	67	9	0,9868	30	19
	2	14	5	41	5		35	
	3	14	5	41	5		35	
25	1	19	6	74	8	0,9963	40	10
	2	19	6	74	8		40	
	3	13	3	45	6		20	