

УДК 633.746:355.424.4.001

А.В. Никифоров

## МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПАРКОВ АВИАЦИОННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОЛЁТОВ В АВИАЦИОННОЙ ЧАСТИ

Предложена модель прогнозирования состояний парков авиационной техники (АТ) и технических средств наземного обеспечения (СНО) полётов при проведении полётов в авиационной части. Модель построена на основе аппарата теории случайных процессов с дискретными состояниями объекта. Показано, что для процессов годового планирования в авиационной части состояния технических парков адекватно моделируются системами уравнений Колмогорова для стационарного случая. На основе решения данной системы уравнений получены аналитические выражения для оценки величин вероятностей нахождения технических единиц парков АТ и СНО в установленных дискретных состояниях в зависимости от планируемой интенсивности полётов и объёмов материально-технического обеспечения авиационной части. Выражения могут использоваться как модель состояния парков АТ и СНО при постановке и решении экстремальных задач по планированию лётной подготовки.

**Ключевые слова:** процесс принятия решения, формализация, модель состояния, критерий оптимальности.

### Введение

Одним из возможных методов поддержки принятия решений руководящего состава авиационных частей при планировании мероприятий боевой подготовки является метод формализации процедур принятия решений соответствующих должностных лиц в виде задач оптимизации с декомпозицией критериев оптимальности [1, 2]. Для постановки таких задач оптимизации необходимо наличие математических моделей, позволяющих прогнозировать состояние объекта управления в зависимости от используемого закона управления (параметров управления как функций от времени).

**Постановка задачи и цель статьи.** Целью данной статьи является получение математической модели прогнозирования технического состояния парков АТ и СНО в зависимости от планируемой интенсивности полётов и объёмов материально-технического обеспечения процессов эксплуатации АТ и СНО.

### Основной материал

Состояние парков АТ и СНО при планировании мероприятий боевой подготовки в авиационной части достаточно полно характеризуется величинами коэффициентов исправности техники. Данные величины должны зависеть от параметров, которые определяют управление или формируемый на следующий учебный год план боевой подготовки. Такими управляющими параметрами, применительно к прогнозированию состояний парков АТ и СНО, могут быть:

- общий объём налёта, который планируется выполнить в авиационной части по периодам года;
- периодичность и размеры партий поставки в авиационную часть расходных материалов, запас-

ных частей и агрегатов, необходимых для проведения регламентных работ на АТ (периодических технических обслуживаний на СНО);

- уровни целевых запасов запасных частей и агрегатов на складах авиационно-технического и аэродромно-технического имущества;

- пропускные возможности технико-эксплуатационной части и отдельного батальона аэродромно-технического обеспечения относительно выполнения мероприятий, связанных с эксплуатацией АТ и СНО, соответственно;

- пропускные способности предприятий, за которыми закреплена авиационная часть и которые осуществляют капитальный ремонт авиационной техники и средств наземного обеспечения полётов.

Для вычисления значений коэффициентов исправности используется модель динамики средних с дискретными состояниями, которая применяется отдельно для каждого типа техники. С помощью этой модели можно вычислять вероятности нахождения в исправном состоянии произвольно взятой технической единицы (летательного аппарата, специального средства наземного обеспечения, автомобильного шасси, на котором размещено данное средство). Коэффициент исправности парка АТ при этом будет равняться вероятности нахождения в исправном состоянии произвольно взятого летательного аппарата (ЛА):

$$k_i^{AT} t = P_i^{AT} t, \quad (1)$$

где  $P_i^{AT} t$  – вероятность нахождения в исправном состоянии произвольно взятого ЛА.

Коэффициент исправности парка СНО – как произведение вероятностей нахождения в исправном состоянии произвольно взятого средства наземного обеспечения и автомобильного шасси, на кото-

рых размещены наземные средства

$$k_{и}^{CHO} t = P_{и}^{CHO} t \cdot P_{и}^{АШ} t, \quad (2)$$

где  $P_{и}^{CHO} t, P_{и}^{АШ} t$  – соответственно вероятности нахождения в исправном состоянии произвольно взятого средства наземного обеспечения и автомобильного шасси, на которых размещены данные средства. Таким образом, для оценки коэффициентов исправности парков АТ и СНО следует рассматривать три процесса эксплуатации и ремонта: процесс эксплуатации и ремонта АТ, эксплуатации и ремонта СНО и автомобильных шасси. Для описания каждого из названных процессов используются дискретные состояния, которые показаны на рис. 1.

То есть рассматриваемые единицы техники могут находиться в одном из четырех состояний:

- в исправном состоянии;
- в состоянии выполнения периодических работ (регламентных работ, технического обслуживания);
- в состоянии мелкого ремонта и устранения последствий отказов и поломок;
- в состоянии выполнения капитального ремонта, проводимого силами специализированных ремонтных предприятий и заводов.

Возможные переходы из одного состояния в другое показаны на рис. 1. Поскольку процессы эксплуатации названных технических парков в авиационной части зависят от множества факторов, которые невозможно прогнозировать детерминировано, поэтому события, означающие переход из одного состояния техники в другое, являются случайными. Априорно зная интенсивности переходов между отмеченными состояниями, можно оценить вероятности нахождения техники в них, используя для этого уравнения Колмогорова [3], т.е.:

$$\begin{cases} \dot{P}_{и} = -\lambda_{PP} t + \lambda_{отк.} t + \lambda_{KP} t \cdot P_{и} t + \\ + \mu_{PP} t P_{PP} t + \mu_{ус.отк.} t P_{отк.} t + \\ + \mu_{KP} t P_{KP} t, \\ \dot{P}_{PP} = \lambda_{PP} t P_{и} t - \mu_{PP} t P_{PP} t, \\ \dot{P}_{отк.} = \lambda_{отк.} t P_{и} t - \mu_{ус.отк.} t P_{отк.} t, \\ \dot{P}_{KP} = -\dot{P}_{и} - \dot{P}_{PP} - \dot{P}_{ус.отк.}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\lambda_{PP} t$  – интенсивность потока техники, отходящей в регламентные работы (техническое обслуживание);  $\lambda_{отк.} t$  – интенсивность потока отказов;  $\lambda_{KP} t$  – интенсивность потока техники, отходящей в капитальный ремонт;  $\mu_{PP} t, \mu_{ус.отк.} t, \mu_{KP} t$  – интенсивности выполнения регламентных работ, устранения последствий отказов (поломок) техники и выполнения капитального ремонта, в авиационном ремонтном предприятии.

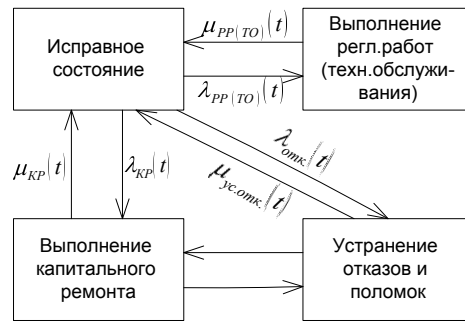


Рис. 1. Схема дискретных состояний при моделировании процессов эксплуатации и ремонта технических парков в авиационной части

Величины отмеченных интенсивностей определяются исходя из запланированного объема налёта авиационной части и известных соотношений и норм по организации технической эксплуатации техники соответствующего типа. Так для АТ интенсивность её отхода в регламентные работы вычисляется как

$$\lambda_{PP} t = \frac{U t \cdot \Phi_{доп.}}{T_{PP}}, \quad (4)$$

где  $U t$  – интенсивность налёта авиационной части, выполняемого на момент времени  $t$ ;

$\Phi_{доп.}$  – коэффициент, учитывающий дополнительный налёт АТ на каждый запланированный час налёта. Дополнительный налёт – это налёт на разведку погоды, облёт АТ, после регламентных работ и замен агрегатов, облёт наземных средств радиотехнического обеспечения полётов;

$T_{PP}$  – установленный межрегламентный ресурс АТ в часах налёта.

Интенсивность отхода АТ в состояние мелкого ремонта из-за возникновения отказов и поломок вычисляется с помощью выражения

$$\lambda_{отк.} t = \frac{U t \cdot \Phi_{доп.}}{T_{отк.}}, \quad (5)$$

где  $T_{отк.}$  – наработка в часах налёта на один отказ (поломку) АТ.

Определение интенсивности отхода в капитальный ремонт осуществляется с помощью выражения

$$\lambda_{KP} t = \frac{U t \cdot \Phi_{доп.}}{T_{KP}}, \quad (6)$$

где  $T_{KP}$  – межремонтный ресурс АТ в лётных часах.

Интенсивности выполнения всех видов работ оцениваются, исходя из величин пропускных способностей соответствующих подразделений авиационной части относительно выполнения работ рассматриваемого вида. Величина пропускной способности подразделения определяется соотношением нормативных трудозатрат на выполнение рассматриваемых работ и располагаемого бюджета рабочего

времени в соответствующих подразделениях. При этом учитывается уровень материального обеспечения мероприятий по эксплуатации и ремонту техники, определяемый наличием запасных частей (агрегатов) и расходных материалов на складах. Например, интенсивность выполнения регламентных работ в технико-эксплуатационной части (ТЭЧ) может быть вычислена как:

$$\mu_{PP} t = \frac{B_{TЭЧ}}{B_{PP}} \cdot P_{PP}^{MTO} t, \quad (7)$$

где  $B_{TЭЧ}$  – располагаемый бюджет трудозатрат ТЭЧ, приходящийся на единицу астрономического времени (месяц, неделю, рабочий день);

$B_{PP}$  – нормативные трудозатраты на выполнение регламентных работ на одном ЛА;

$P_{PP}^{MTO} t$  – вероятность гарантированного материально-технического обеспечения (МТО) проведения регламентных работ. Величина этой вероятности определяется с помощью модели теории массового обслуживания для одноканального устройства обслуживания с отказами [4]. При этом интенсивность обслуживания заявок в этом устройстве определяется размерами и периодичностью поступления партий расходных материалов, необходимых для проведения регламентных работ:

$$P_{PP}^{MTO} t = 1 - \frac{\lambda_{PP} t}{\lambda_{PP} t + \frac{N_n^{PP} t}{T_n^{PP} t}}, \quad (8)$$

$N_n^{PP} t$ ,  $T_n^{PP} t$  – размеры партий и периодичность снабжения авиационной части расходными материалами, необходимыми для выполнения регламентных работ.

Интенсивность устранения последствий отказов может быть оценена как

$$\mu_{ус.отк.} t = \frac{1}{\bar{T}_{ус.отк.}} \cdot P_{ус.отк.}^{MTO} t, \quad (9)$$

где  $\bar{T}_{ус.отк.}$  – средняя длительность устранения последствий отказов (поломок) без учёта ожидания необходимых запасных частей и агрегатов;

$P_{ус.отк.}^{MTO} t$  – вероятность наличия на складе необходимых запасных частей и агрегатов. Её величина вычисляется с помощью модели теории массового обслуживания для многоканального устройства обслуживания с отказами [4].

Количество каналов обслуживания равняется минимально допустимому количеству комплектов ЗИП на складе авиационной части, по достижении которого отправляется заявка в органы снабжения на пополнение запасов этих ЗИП. Событие простоя техники по поводу отсутствия на складе соответствующей запасной части (агрегата) возникает при

условии расходования установленного минимально допустимого количества комплектов ЗИП соответствующего типа (занятие всех каналов обслуживания устройства) за время, меньшее, чем время выполнения заявки на их пополнение (время освобождения канала устройства).

Вероятность гарантированного обеспечения мероприятий восстановления исправности техники при отказах и поломках запасными частями и агрегатами или исключения вынужденных простоев техники из-за отсутствия запасных частей на складе может быть вычислена как

$$P_{ус.отк.}^{MTO} t = 1 - \frac{T_{д.ЗИП} \cdot \lambda_{отк.} t \cdot N_{ЗИП}^{мин.доп.} t}{(N_{ЗИП}^{мин.доп.} t)!} \times \frac{1}{1 + \sum_{l=1}^{N_{ЗИП}^{мин.доп.} t} \frac{T_{д.ЗИП} \cdot \lambda_{отк.} t}{l!}}, \quad (10)$$

где  $N_{ЗИП}^{мин.доп.} t$  – минимально-допустимое количество ЗИП на складе, по достижении которого в органы снабжения направляется заявка на их пополнение;

$T_{д.ЗИП}$  – продолжительность выполнения органами снабжения заявки авиационной части на пополнение ЗИП установленного типа.

Интенсивность выполнения капитальных ремонтов определяется как

$$\mu_{КР} t = \frac{1}{T_{КР}}, \quad (11)$$

где  $T_{КР}$  – установленная для авиационной части периодичность отправки на ремонтные предприятия эксплуатируемой техники.

Для примера рассмотрим динамику изменения состояния АТ для случая, когда:

– налёт в авиационной части выполнялся с переменной интенсивностью: с первого по третий месяцы по 50 часов в месяц, с третьего по пятый месяцы по 400 часов в месяц, с пятого по восьмой – 450 часов в месяц и с восьмого по двенадцатый – 200 часов в месяц (рис. 2);

– на складе авиационно-технического имущества, на случай возникновения отказов, хранилось по два комплекта запасных частей и агрегатов, при этом период доставки нового комплекта в часть составлял десять дней;

– снабжение расходными материалами, необходимыми для обеспечения регламентных работ на АТ, выполнялось партиями по 15 комплектов с периодичностью одна партия на полмесяца в весенне-летний период и в осенне-зимний период – по 10 комплектов с периодичностью полмесяца;

– межрегламентный ресурс АТ составлял 100 часов налета;

- наработка на один отказ АТ, приводящий к замене агрегатов – 250 часов;
- межремонтный ресурс АТ – 2000 часов;
- расчётный бюджет трудозатрат ТЭЧ на неделю – 2000 человеко-часов;
- трудозатраты, необходимые на выполнение регламентных работ на одном самолете – 300 человеко-часов;
- среднее время устранения последствий отказов и поломок, без учёта времени ожидания необходимых запасных частей – 2-3 дня;
- периодичность отправки АТ в капитальный ремонт – не более 2 ЛА в месяц.

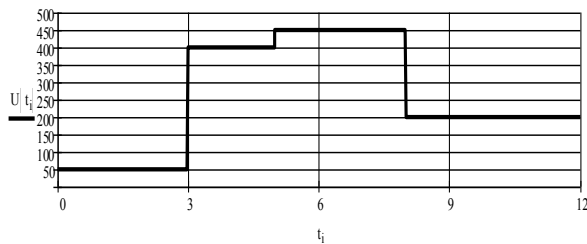


Рис. 2. Распределение месячного налёта авиационной части

На рис. 3 показано изменение вероятностей нахождения АТ в различных состояниях в зависимости от времени.

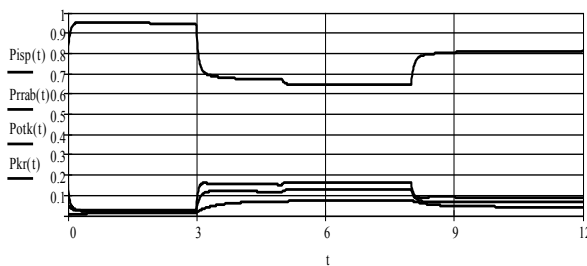


Рис. 3. Состояние парка авиационной техники

Здесь  $P_{isp} t$  – вероятность пребывания АТ в исправном состоянии;  $P_{rrab} t$  – вероятность пребывания в состоянии выполнения регламентных работ;  $P_{otk} t$  – вероятность пребывания в состоянии устранения последствий отказов и поломок;  $P_{kr} t$  – вероятность пребывания в состоянии ожидания отправки в капитальный ремонт или его выполнения.

Как видно, предложенная математическая модель (3) позволяет прогнозировать состояние парков специальной и авиационной техники с учётом динамики переходных процессов при нестационарных параметрах организации лётной подготовки и материально-технического обеспечения мероприятий эксплуатации АТ и СНО. Как видно из графика, относительная доля переходных процессов в сравнении с участками, на которых характеристики рас-

сматриваемых процессов постоянны, относительно небольшая. Отсюда, при постановке и решении задач оптимизации, можно исходить из посылки о стационарности характеристик организуемых процессов. То есть для достаточно больших периодов планирования, при рассмотрении продолжительных интервалов времени, на которых управляющие параметры задаются как постоянные величины, справедливо записать

$$\begin{cases} -\lambda_{PP_i} + \lambda_{отк_i} + \lambda_{КР_i} \cdot P_{и_i} + \mu_{PP_i} P_{PP_i} + \\ + \mu_{ус.отк_i} P_{отк_i} + \mu_{КР_i} P_{КР_i} = 0, \\ \lambda_{PP_i} P_{и_i} - \mu_{PP_i} P_{PP_i} = 0, \\ \lambda_{отк_i} P_{и_i} - \mu_{ус.отк_i} P_{отк_i} = 0, \\ P_{и_i} + P_{PP_i} + P_{ус.отк_i} + P_{КР_i} = 1, \end{cases} \quad (12)$$

где  $i$  – индекс, характеризующий номер участка времени, на которые разбит рассматриваемый период планирования.

Система уравнений (12) является линейной относительно вероятностей нахождения АТ (СНО) в установленных дискретных состояниях. Следовательно, её (систему) можно решить в аналитическом виде, используя один из известных методов решения систем линейных уравнений. Воспользуемся методом Крамера [5], считая, что  $\lambda_{PP_i}$ ,  $\lambda_{отк_i}$ ,  $\lambda_{КР_i}$ ,  $\mu_{ус.отк_i}$ ,  $\mu_{PP_i}$  и  $\mu_{КР_i}$  – известные постоянные величины. То есть вероятность нахождения произвольно взятого ЛА (СНО) в исправном состоянии для  $i$ -го периода времени может быть вычислена как

$$P_{и_i} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & \mu_{PP_i} & \mu_{ус.отк_i} & \mu_{КР_i} \\ 0 & -\mu_{PP_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_{ус.отк_i} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\lambda_{PP_i} + \lambda_{отк_i} + \lambda_{КР_i} & \mu_{PP_i} & \mu_{ус.отк_i} & \mu_{КР_i} \\ \lambda_{PP_i} & -\mu_{PP_i} & 0 & 0 \\ \lambda_{отк_i} & 0 & -\mu_{ус.отк_i} & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}. \quad (13)$$

После преобразований выражение (13) примет вид

$$P_{и_i} = \mu_{PP_i} \mu_{ус.отк_i} \mu_{КР_i} \cdot (\lambda_{PP_i} \mu_{КР_i} \mu_{ус.отк_i} + \mu_{PP_i} \lambda_{КР_i} \mu_{ус.отк_i} + \mu_{PP_i} \mu_{КР_i} \lambda_{отк_i} + \mu_{PP_i} \mu_{ус.отк_i} \mu_{КР_i})^{-1}. \quad (14)$$

Для  $P_{PP_i}$  и  $P_{отк_i}$  по аналогии можно записать

$$P_{PP_i} = \lambda_{PP_i} \mu_{ус.отк_i} \mu_{KP_i} \cdot (\lambda_{PP_i} \mu_{KP_i} \mu_{ус.отк_i} + \mu_{PP_i} \lambda_{KP_i} \mu_{ус.отк_i} + \mu_{PP_i} \mu_{KP_i} \lambda_{отк_i} + \mu_{PP_i} \mu_{ус.отк_i} \mu_{KP_i})^{-1}, \quad (15)$$

$$P_{отк_i} = \mu_{PP_i} \lambda_{отк_i} \mu_{KP_i} \cdot (\lambda_{PP_i} \mu_{KP_i} \mu_{ус.отк_i} + \mu_{PP_i} \lambda_{KP_i} \mu_{ус.отк_i} + \mu_{PP_i} \mu_{KP_i} \lambda_{отк_i} + \mu_{PP_i} \mu_{ус.отк_i} \mu_{KP_i})^{-1}. \quad (16)$$

Для  $P_{KP_i}$ , исходя из того, что случайные события нахождения технических единиц в рассматриваемых состояниях образуют полную группу, справедливо

$$P_{KP_i} = 1 - P_{и_i} - P_{PP_i} - P_{отк_i}. \quad (17)$$

Выражения (14) – (17), являясь решением системы линейных уравнений (12), полученной для стационарной модели процессов эксплуатации технических парков, позволяют значительно упростить запись и постановку экстремальных задач по оптимизации планов лётной подготовки, где учитывается техническое состояние парков АТ и СНО.

Приведенные выражения позволяют прогнозировать техническое состояние парков АТ или СНО в зависимости от планируемых на установленные периоды времени объемов налёта авиационной части, способов организации работы ТЭЧ и отдельного батальона АТО, а также организации материально-технического обеспечения авиационной части.

Для корректности использования выражений (14) – (17) продолжительность устанавливаемых промежутков времени, для которых управляющие параметры считаются неизменными, должна быть достаточно большой – не менее 1 – 2 месяцев.

Приведенные в данной статье научные результаты целесообразно использовать при постановке и формализации задач оптимизации лётной подготовки в авиационной части на период более полугода.

## Список литературы

1. Никифоров А.В. Система задач и алгоритм принятия решения командиром авиационной части при выработке замысла годового плана лётной подготовки / А.В. Никифоров // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2005. – Вип. 1(1). – С. 41-51.
2. Никифоров О.В. Обрис перспективної автоматизованої системи оптимального планування льотної підготовки як засобу підвищення ефективності процесу організації бойової підготовки авіаційній частині / О.В. Никифоров // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 1(1). – 120 с. С.111 – 113;
3. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Сов. радио, 1977. – 387 с.
4. Таха Х. Введение в исследование операций. В 2-х кн.; пер. с англ. / Х. Таха. – М.: Мир, 1985. Кн. 1. – 484 с., кн. 2. – 496 с.
5. Корн Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров: Изд. четвертое / Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, Гл. редакция физ. мат. литературы, 1977. – 831 с.

Поступила в редколлегию 17.08.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. О.Б. Леонтьев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ПАРКІВ АВІАЦІЙНОЇ І СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПОЛЬОТІВ В АВІАЦІЙНІЙ ЧАСТИНІ

О.В. Никифоров

*Запропоновано модель прогнозування стану парків авіаційної техніки (АТ) і технічних засобів наземного забезпечення (СНО) польотів при проведенні польотів в авіаційній частині. Модель побудована на основі апарату теорії випадкових процесів з дискретними станами об'єкту. Показано, що для процесів річного планування в авіаційній частині стан технічних парків адекватно моделюються системами рівнянь Колмогорова для стаціонарного випадку. На основі вирішення даної системи рівнянь отримані аналітичні вирази для оцінки величин ймовірності знаходження технічних одиниць парків АТ і СНО у встановлених дискретних станах залежно від планованої інтенсивності польотів і об'ємів матеріально-технічного забезпечення авіаційної частини. Вирази можуть використовуватися як модель стану парків АТ і СНО при постановці і вирішенні екстремальних задач з планування льотної підготовки.*

**Ключові слова:** процес прийняття рішення, формалізація, модель стану, критерій оптимальності.

## MODEL OF PROGNOSTICATION OF THE STATE OF PARKS OF AVIATION AND SPECIAL TECHNIQUE DURING THE LEADTHROUGH OF FLIGHTS IN AN AIR-UNIT

A.V. Nikiforov

*The model of prognostication of the states of parks of aerotechs (AT) and facilities of the ground providing (FGP) of flights during the leadthrough of flights in an air-unit is offered. A model is built on the basis of theory of casual processes with the discrete states of object. It is retined that for the processes of the annual planning in the air-unit of the state of technical parks adequately designed the systems of equalizations of Kolmogorov for a stationary case. On the basis of decision of this system of equalizations analytical expressions are got for the estimation of sizes of probabilities of finding of technical units of parks of AT and FGP in the set discrete states depending on the planned intensity of flights and volumes of logistical support of air-unit. Expressions can be used as a model of the state of parks of AT and FGP at raising and decision of extreme tasks on planning of flying preparation.*

**Keywords:** decision-making process, formalization, model of the state, criterion of optimality.