

В содержательном плане пребывание воздушного судна в состоянии C_2 является целевым, а процесс сертификации летной годности воздушного судна во время его пребывания в состоянии C_1 – обслуживающим, предназначенным для контроля летной годности. Состояние C_4 возникает как следствие отсутствия возможности или необходимости нахождения воздушного судна в состояниях C_1 и C_2 , является по отношению к ним пассивным и определяется совокупностью факторов, которые обобщенно можно назвать «спросом на летную годность», формируемым потребностями и возможностями (например, финансовыми, техническими) сертифицированных эксплуатантов в поддержании летной годности воздушного судна.

Исходя из особенностей протекания переходов и пребываний во множестве состояний $\{C\}$ модели по шкале календарного времени их можно разделить на две взаимосвязанные группы:

- группу состояний $\{C_2, C_4\}$, последовательность переходов и пребываний воздушного судна на которых отображает изменение статуса воздушного судна как объекта эксплуатации.

- группу состояний $\{C_0, C_1, C_3\}$, которые протекают параллельно переходам и пребываниям в состояниях группы $\{C_2, C_4\}$ и отображают собственно процесс сертификации летной годности.

Последовательность переходов и пребываний в состояниях группы C_2, C_4 образует процесс, который можно назвать процессом регенерации сертификации летной годности. Состояния C_2 и C_4 не пересекаются во времени между собой и образуют замкнутую группу состояний BC , находящихся в реестре.

В случае нахождения в состоянии C_1 статус воздушного судна определяется его предыдущим состоянием. Например, если воздушное судно находилось в состоянии C_2 и перешло в состояние C_1 , то оно продолжает находиться в состоянии C_2 , т.к. переход из состояния C_2 в C_1 обусловлен подачей предварительной заявки, которая рассматривается и удовлетворяется в пределах оставшегося времени его пребывания в состоянии C_2 . Поэтому состояние C_1 пересекается во времени с состояниями C_2 и C_4 . Переходы и пребывания в состояниях $\{C_0, C_1, C_3\}$ образуют самостоятельную группу состояний, которые порождают потребность в осуществлении установленных процедур сертификации летной годности экземпляра воздушного судна и выделения ресурсов и персонала государственной авиационной администрации.

В математической постановке укрупненная модель процесса сертификации летной годности реестрового парка воздушных судов (рис. 1), не учитывающая эффекты пересечения процессов, может быть описана марковским процессом [4] в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_0}{\partial t} = -\lambda_0(t)P_0; \\ \frac{\partial P_1}{\partial t} = -\lambda_1(t)P_1 + \lambda_0(t)P_0 + \delta_2(t)\lambda_2(t)P_2 + \lambda_4(t)P_4; \\ \frac{\partial P_2}{\partial t} = -\lambda_2(t)P_2 - \lambda'_2(t)P_2 + \lambda_1(t)P_1; \\ \frac{\partial P_3}{\partial t} = \lambda'_2(t)P_2; \\ \frac{\partial P_4}{\partial t} = -\lambda_4(t)P_4 + (1 - \delta_2(t))\lambda_2(t)P_2, \end{cases}$$

где P_i ($i = \overline{0,4}$) – вероятность пребывания в состояниях $C_0 \dots C_4$; $\lambda_i(t)$ ($i = \overline{0,4}$) – соответствующие интенсивности выхода из i -х состояний; $\lambda'_2(t)$ – интенсивность выхода из реестра; $\delta_2(t)$ – делитель потока D после состояния C_2 .

Состояние C_0 является истоком, через него в модель поступают воздушные суда. Состояние C_3 является поглощающим, через него воздушные суда уходят из модели.

Анализ статистических данных по процессу сертификации летной годности реестрового парка воздушных судов Украины показал, что условия переходов и пребывания во множестве состояний $\{C\}$ являются неоднородными. Поэтому для обеспечения адекватности рассматриваемой модели необходимо дополнительно описать динамику времени пребывания в подмножестве состояний $\{C_1, C_2, C_4\}$.

В качестве моделей, описывающих продолжительность пребывания в состояниях C_2 и C_4 , можно предложить ленточные структуры в виде простых цепей Маркова (рис.2), имеющих конечное число (соответственно n и m) фазовых состояний θ_i . Смена фазовых состояний θ_i происходит дискретно. При этом для всех воздушных судов начальным является состояние θ_0 . Из каждого i -го фазового состояния имеется два выхода: переход в следующее $(i+1)$ -е фазовое состояние или выход из состояний C_2 или C_4 . Таким образом, последующее состояние зависит только от того, в каком состоянии находилось воздушное судно непосредственно в предшествующий момент времени и вероятностей перехода в следующие состояния, что свойственно марковским процессам, которые являются процессами без последствия [4].

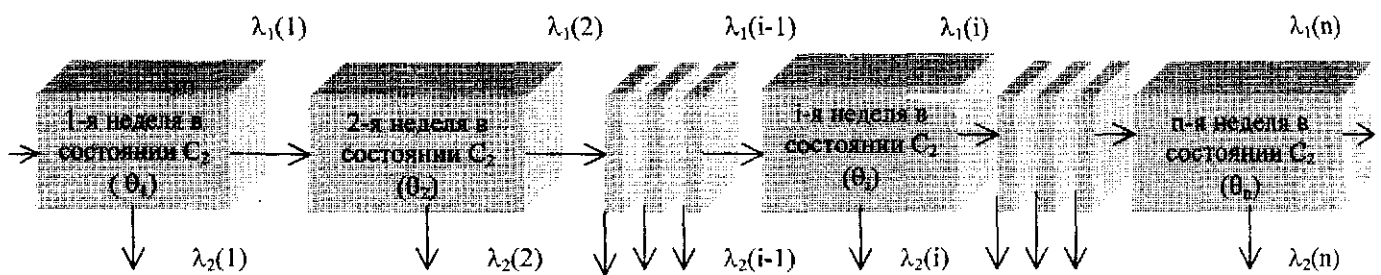


Рис. 2. Схема модели пребывания в состоянии C_2 (C_4)

Изменяя интенсивности переходов из фазовых состояний θ_i , можно моделировать различные функции распределения времени нахождения в состояниях C_2 и C_4 . Минимальное время нахождения в фазовом состоянии (интервал дискретизации процесса) определяет количество фазовых состояний для C_2 и C_4 , т.е. значения n и m соответственно.

Математическое описание модели времени пребывания в состоянии C_2 , выполненное на базе марковской цепи, имеет вид:

$$P_{2,1}(t+1) = -\lambda_1(1)P_{2,1}(t) - \lambda_2(1)P_{2,1}(t) + \lambda_1(t)P_1(t);$$

...

$$P_{2,i}(t+1) = -\lambda_1(i)P_{2,i}(t) - \lambda_2(i)P_{2,i}(t) + \lambda_1(i-1)P_{2,i-1}(t), \quad i = \overline{2, n};$$

$$P_2(t+1) = \sum_{i=1}^n P_{2,i}(t);$$

$$P_2'(t+1) = \sum_{i=1}^n \lambda_2(i)P_{2,i}(t) + \lambda_1(n)P_{2,n}(t);$$

$$m_{\theta}(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^n iP_{2,i}(t+1)}{P_2(t+1)}; \quad m_{\theta,2}(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^n i^2 P_{2,i}(t+1)}{P_2(t+1)};$$

$$\sigma_{\theta}(t+1) = \sqrt{m_{\theta,2}(t+1) - m_{\theta}^2(t+1)},$$

где $P_{2,i}(t)$ – вероятность пребывания в i -м фазовом состоянии θ_i в момент времени t ; $\lambda_1(i)$ – интенсивность перехода из i -го фазового состояния в $(i+1)$ -е фазовое состояние; $\lambda_2(i)$ – интенсивность выхода из состояния C_2 при условии, что воздушное судно находится в i -м фазо-

вом состоянии; $\lambda_1(i) + \lambda_2(i) = 1$ – условие нормировки; $\lambda_1(t)P_1(t)$ – входной поток; $P_2(t+1)$ – суммарная вероятность пребывания в состоянии C_2 в момент времени $t+1$ на $(t+1)$ -й неделе; $P_2'(t+1)$ – суммарный выходной поток из состояния C_2 в момент времени $t+1$; $m_\theta, m_{\theta,2}, \sigma_\theta$ – соответственно первый, второй начальные моменты и среднее квадратическое отклонение продолжительности пребывания в состоянии C_2 ; n – число фазовых состояний для модели C_2 .

Аналогичное математическое описание имеет модель времени пребывания в состоянии C_4 , которое отличается только входным потоком и числом m фазовых состояний модели. При этом вероятность пребывания в 1-м фазовом состоянии описывается уравнением

$$P_{4,1}(t+1) = -\mu_1(1)P_{4,1}(t) - \mu_2(1)P_{4,1}(t) + (1 - \delta_2(t))\lambda_2(t)P_2(t),$$

где $P_{4,i}(t)$ – вероятность пребывания в i -м фазовом состоянии \mathcal{S}_i в момент времени t ; $\mu_1(i)$ – интенсивность перехода из i -го фазового состояния в $i+1$ фазовое состояние; $\mu_2(i)$ – интенсивность выхода из состояния C_4 для i -го фазового состояния; $\mu_1(i) + \mu_2(i) = 1$ – условие нормирования; $(1 - \delta_2(t))\lambda_2(t)P_2(t)$ – входной поток в модель C_4 ; m – число фазовых состояний для модели C_4 .

Анализ содержания действующих авиационных правил Украины позволяет предложить следующую структуру модели состояния C_1 (рис. 3).

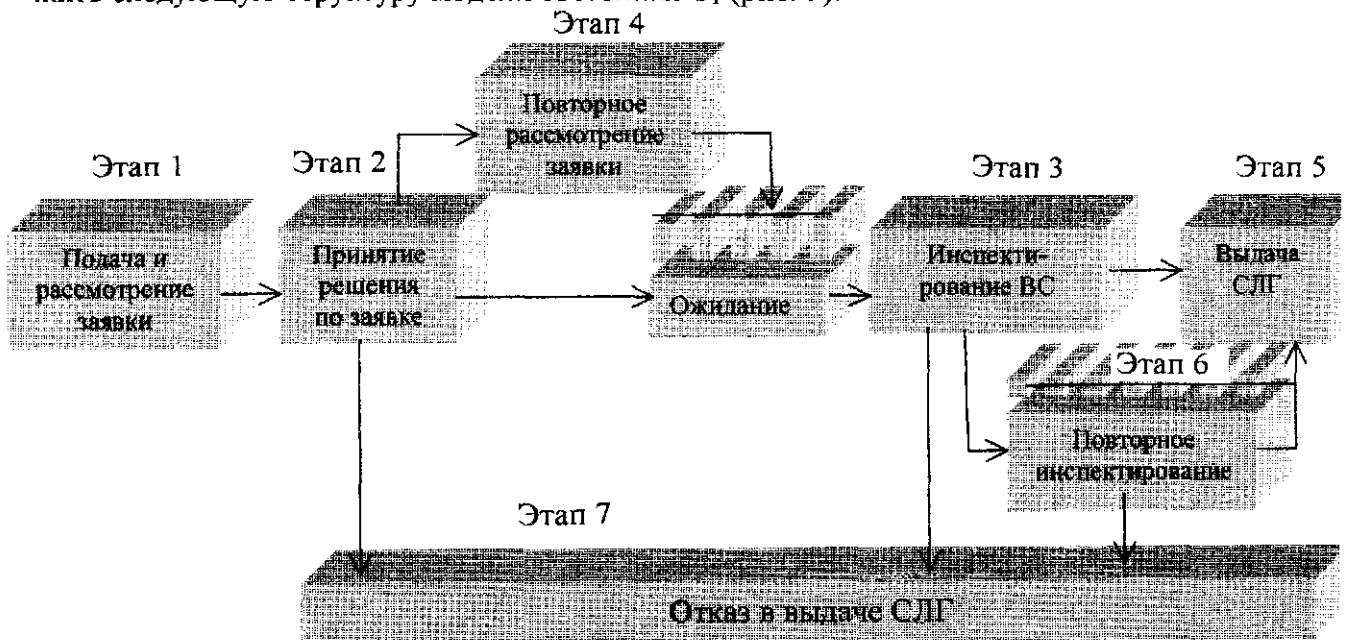


Рис. 3. Схема модели состояния C_1 :

ВС - воздушное судно, СЛГ - сертификат летной годности

Процесс сертификации летной годности в состоянии C_1 начинается с подачи и рассмотрения заявки (этап 1). На этапе 2 принимают решение по заявке и, если заявка удовлетворяет установленным требованиям, принимают решение о назначении инспектирования (этап 3). Если оформление документов не соответствует с требованиями, то назначается повторное рассмотрение заявки (этап 4). Если же поток заявок превышает располагаемые возможности инспекторов, то процесс инспектирования (этап 3) переносится до появления свободных инспекторов (время дополнительного ожидания $t_{ож}$). При этом заявку помещают в очередь, в которой заявки рассматривают в порядке их поступления. Допущение о дисциплине удовлетворения заявок достаточно адекватно отражает сложившуюся практику их рассмотр-

рения в Укравиадии и принцип незаинтересованности и непредвзятости органа сертификации. При положительных результатах инспектирования производится выдача сертификата летной годности (этап 5). В противном случае назначается повторное инспектирование (этап 6), которое должно быть проведено не позднее последующих трех месяцев. Как показывает практика, продолжительность пребывания заявки на этапе 6 является стохастической величиной, математическую модель которого целесообразно представить аналогично моделям состояний C_2 (C_4) в виде цепочки фазовых состояний. Если в результате рассмотрения заявки или инспектирования устанавливается наличие неустрашимых несоответствий, то следует отказ в выдаче сертификата летной годности (этап 7), который может наступить после этапов 2, 3 и 6.

Математическая модель пребывания в состоянии C_1 , выполненная в виде марковской цепи, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P_{1,1}(t+1) &= -v_1(1)P_{1,1}(t) + \lambda_0(t)P_0(t) + \lambda_5(t)\lambda_2(t)P_2(t) + \lambda_4(t)P_4(t); \\
 P_{1,2}(t+1) &= -v_1(2)P_{1,2}(t) - v_2(2)P_{1,2}(t) + v_1(1)P_{1,1}(t); \\
 P_{1,3}(t+1) &= -v_1(3)P_{1,3}(t) - v_2(3)P_{1,3}(t) + v_1(2)P_{1,2}(t) + v_1(4)P_{1,4}(t); \\
 P_{1,4}(t+1) &= -v_1(4)P_{1,4}(t) + v_1(2)P_{1,2}(t); \\
 P_{1,5}(t+1) &= -v_1(5)P_{1,5}(t) + v_1(3)P_{1,3}(t) + P'_{1,6}(t); \\
 P_{1,6,1}(t+1) &= -v_1(6,1)P_{1,6,1}(t) + v_1(3)P_{1,3}(t); \\
 &\dots \\
 P_{1,6,i}(t+1) &= -v_1(6,i)P_{1,6,i}(t) - v_3(6,i)P_{1,6,i}(t) + v_1(6,i-1)P_{1,6,i-1}(t), \quad i = \overline{2, k}; \\
 P_{1,6}(t+1) &= \sum_{i=1}^k P_{1,6,i}(t); \\
 P'_{1,6}(t+1) &= \sum_{i=1}^k v_3(6,i)P_{1,6,i}(t); \\
 P''_{1,6}(t+1) &= v_1(6,k)P_{1,6,k}(t); \\
 P_{1,7}(t+1) &= v_2(2)P_{1,2}(t) + v_2(3)P_{1,3}(t) + P''_{1,6}(t+1),
 \end{aligned}$$

где $P_{1,i}(t)$ – вероятность пребывания на i -м этапе состояния C_1 в момент времени t ; $v_1(i)$ – интенсивность потока из i -го этапа в следующей $(i+1)$ -й этап; $v_2(i)$ – интенсивность выхода из i -го этапа на этап 7; $v_3(6,i)$ – интенсивность выхода с из i -й фазы этапа 6; $\lambda_0(t)P_0(t) + \lambda_5(t)\lambda_2(t)P_2(t) + \lambda_4(t)P_4(t)$ – входной поток в состояние C_1 ; $P_{1,6}(t+1)$ – суммарная вероятность пребывания на этапе 6 в момент времени $t+1$; $P'_{1,6}(t+1)$ – суммарный выходной поток из этапа 6 в момент времени $t+1$; $P''_{1,6}(t+1)$ – часть потока, переходящего на этап 7 из этапа 6 в момент времени $t+1$; k – число фазовых состояний в модели этапа 6.

Идентификация параметров модели процесса сертификации летной годности реестрового парка воздушных судов выполнена на основе статистических данных по парку воздушных судов Украины за 1993-1998 годы, которые получены в рамках ограничений действующей системы учета событий процесса сертификации летной годности экземпляра воздушного судна. В качестве основных исходных данных для идентификации параметров модели используют: поток заявок на выдачу сертификата летной годности, средние вероятности пребывания в i -х фазовых состояниях моделей C_2 и C_4 , оценку частоты разделения потока после состоя-

ния C_2 , потоки на входе и выходе из реестра (состояния C_0 и C_3), средние продолжительности пребывания на этапах состояния C_1 .

Задание потока заявок на выдачу сертификата летной годности позволяет упростить модель сертификации летной годности реестрового парка воздушных судов, т. к. исключаются нерегулярные потоки, связанные с этапом 7 «Отказ в выдаче сертификата летной годности» (все заявки считаются принятыми), и смешиваются все потоки, поступающие на вход модели состояния C_1 .

Расчет параметров потока заявок на выдачу сертификата летной годности производят по формуле

$$P_i = K_{BC} (D_{j,i}^H / 100) (D_j^r / 100),$$

где K_{BC} – общее число воздушных судов, прошедших сертификацию летной годности за 1993-1998 годы; $D_{j,i}^H$ – процентное (понедельное) распределение заявок на выдачу сертификата летной годности в j -м году, ($i = \overline{1,52}$, $j = \overline{1,6}$); D_j^r – процентное распределение количества заявок по годам с 1993 по 1998 годы ($j = \overline{1,6}$).

На рис. 4 показана динамика потока заявок на выдачу сертификатов летной годности в количественном представлении. В первые три года поток заявок – существенно нестационарный и неравномерный. В последующие три года наблюдается определенная годовая цикличность, которая указывает на возможность прогнозирования основных параметров входного потока на будущий период.

Заявка

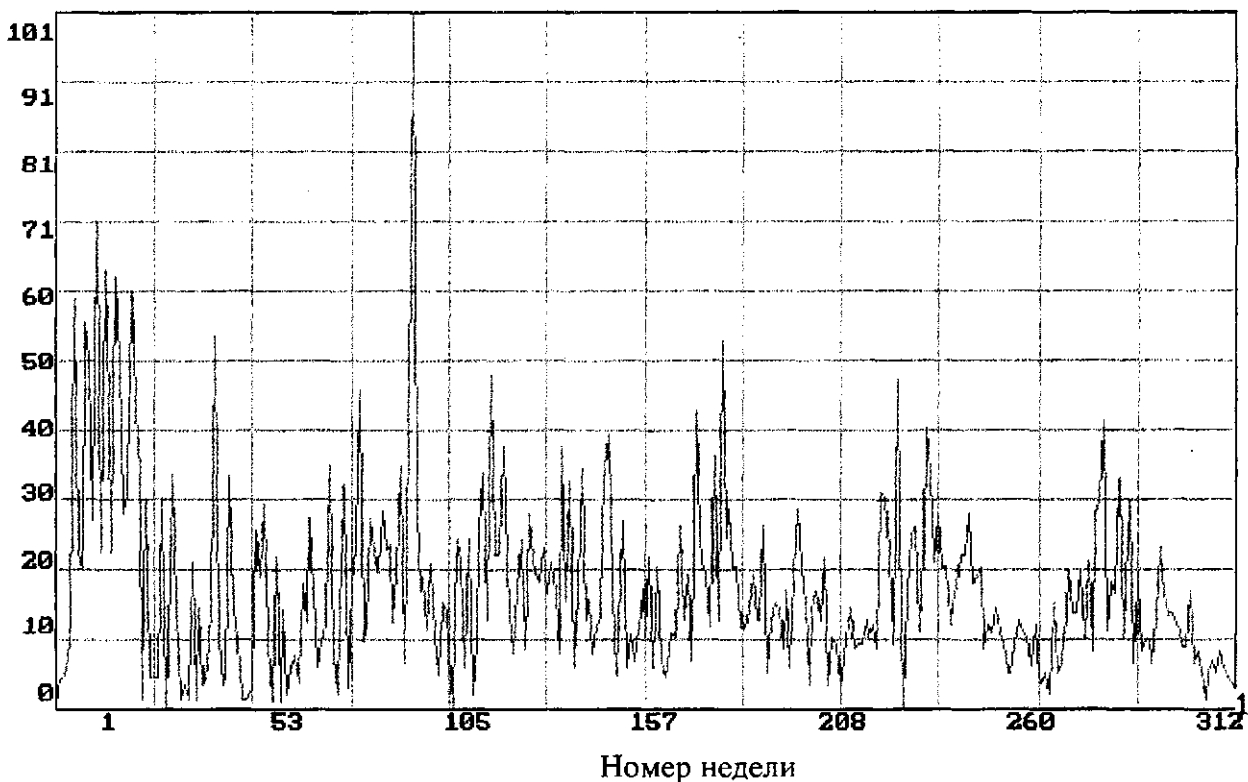


Рис. 4. Поток заявок на сертификацию летной годности за 1993 - 1998 годы

Усредненная по годам вероятность пребывания в фазовых состояниях модели C_2 (C_4) длительностью i -недель определялась как доля воздушных судов, вышедших из этого состояния за подконтрольный период относительно всех воздушных судов, прошедших через модель состояния C_2 (C_4). В качестве исходных данных для оценки параметров модели C_2 (C_4) использовали упорядоченные в порядке возрастания продолжительности пребывания воздушного судна в этом состоянии, на основании которых построено распределение воздушного судна по продолжительности (гистограмма) с интервалом дискретизации одна неделя G_i^H ($i = \overline{1,52}$). При этом параметры модели – интенсивности переходов из i -го в $(i+1)$ -е фазовое состояние $\lambda_1(i)$ и выхода из i -х фазовых состояний $\lambda_2(i)$ (рис. 5) – определяли по формулам:

$$\lambda_2(i) = \frac{G_i^H}{K_{BC}^G - \sum_{j=1}^{i-1} G_j^H}, \quad \lambda_1(i) = 1 - \lambda_2(i),$$

где G_i^H – количество воздушных судов, пребывавших в состоянии C_2 i недель; $K_{BC}^G = \sum_{i=1}^{52} G_i^H$ – общее количество воздушных судов, прошедших через состояние C_2 .

Если шаг гистограммы статистических данных распределения воздушных судов по продолжительности не равен одной неделе, то приведение распределения с другим интервалом дискретизации к недельному шагу можно получить, используя следующие преобразования:

$$G_i^H = \begin{cases} G_{i2+1}^M \frac{n_M}{n_H}, & \text{если } i2 = i3; \\ G_{i2+1}^M (i3 - i0) + G_{i3+1}^M (i1 - i3) & \text{если } i2 \neq i3, \end{cases}$$

где $i0 = \frac{(i-1) * (n_M/n_H)}$; $i1 = i * (n_M/n_H)$; $i2 = \varepsilon(i0)$; $i3 = \varepsilon(i1)$; $\varepsilon(\bullet)$ -знак целой части числа; G_i^M ($i = \overline{1, n_M}$) – гистограмма распределения воздушных судов по продолжительности пребывания в состоянии C_2 с шагом 10, 15, 30 или 45 дней; n_H , n_M – число недель и шагов распределения в году.

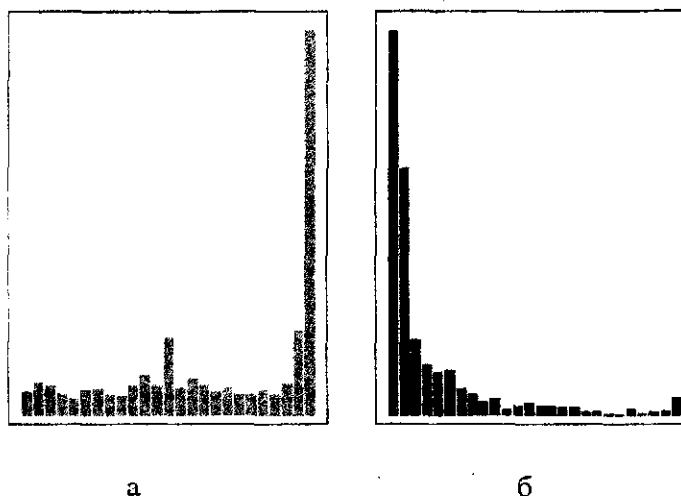


Рис. 5. Гистограммы распределений времени пребывания воздушного судна в состояниях C_2 и C_4 :
 а – сроки действия сертификата льотной годности (состояние C_2);
 б – простои без сертификата льотной годности (состояние C_4)

На рис. 5 показаны гистограммы распределения продолжительности пребывания воздушных судов в фазовых состояниях C_2 с интервалом дискретизации 15 дней и распределения простоя воздушных судов в фазовых состояниях C_4 с интервалом дискретизации 45 дней. Последние столбцы гистограмм определяют долю воздушных судов, срок действия или простоя которых достигает предельных значений – (одного или трех лет).

На рис. 6 показаны графики расчетных интенсивностей выхода из фазовых состояний моделей для C_2 (линия 1) и C_4 (линия 2) – $\lambda_2(\bullet)$ и $\mu_2(\bullet)$.

На рис. 7 показана расчетная динамика изменения состава выданных сертификатов летной годности по типам, которая достаточно хорошо согласуется с имеющимися статистическими данными.

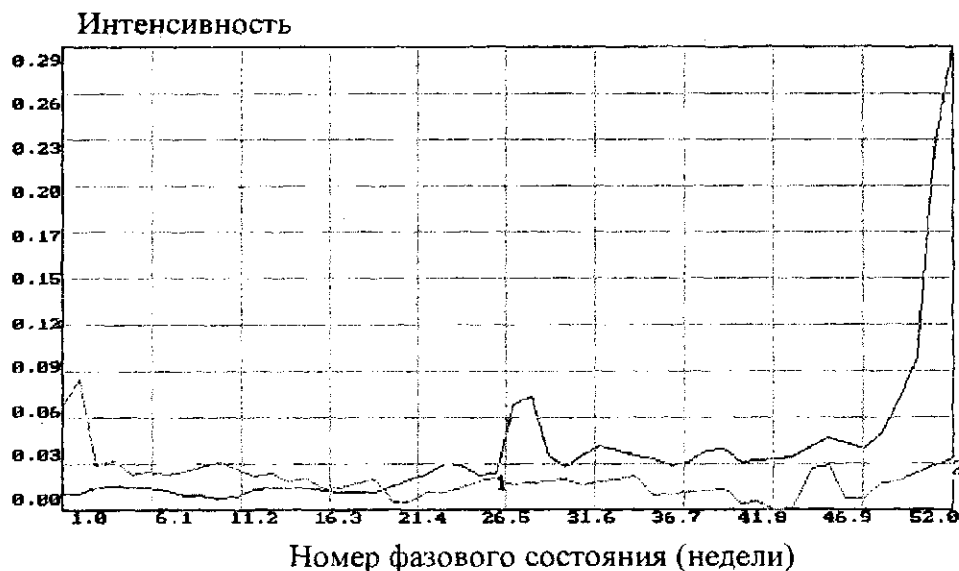


Рис. 6. Интенсивности выхода из фазовых состояний моделей для C_2 и C_4

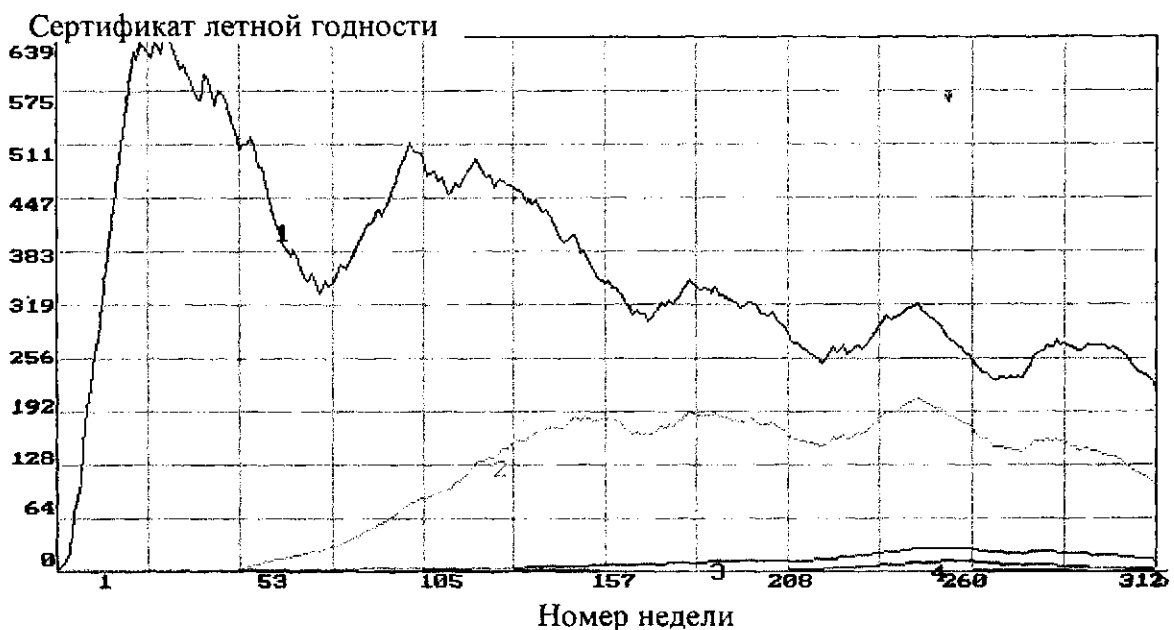


Рис. 7. Изменение выданных сертификатов летной годности по типам:
1 - первый тип; 2 - третий тип; 3 - четвертый тип; 5 - шестой тип

Состояния, отражающие переходный период реального процесса, имеют различную продолжительности периодов наполнения. Среднее количество воздушных судов, покидающих состояния C_2 и C_4 , достаточно устойчиво по календарному времени. Средняя продолжительность и среднее квадратическое отклонение времени пребывания в состоянии C_2 имеют существенные колебания по календарному времени, в то время как для состояния C_4 после периода наполнения наблюдается сравнительная стабилизация значений и некоторая тенденция роста.

На рис. 8 представлены относительные показатели пребывания в состоянии C_1 (линии 1, 2) и C_2 , C_4 (линия 3). Характер изменений отношения средних времен пребывания в состояниях C_4 и C_2 (линия 3) показывает, что в рамках процесса регенерации сертификатов летной годности наблюдается тенденция увеличения времени пребывания воздушных судов без сертификатов летной годности, что обусловлено «зависанием» определенной части реестрового парка воздушных судов в состоянии C_4 . Динамика линии 1 указывает на достаточно устойчивую долю затрат времени на этапе 3 (см. рис. 3) в состоянии C_1 . Однако изменения отношения потребных затрат времени на этапе 3 к располагаемому фонду времени для инспектирования воздушных судов (линия 2) указывает на наличие существенной неравномерности в потребных ресурсах. Это является следствием неравномерности входного потока заявок на выдачу сертификатов летной годности (см. рис. 4). Неритмичность загрузки инспекторов, наличие периодов перегрузки оказывают негативное влияние на полноту и качество инспектирования летной годности воздушных судов.

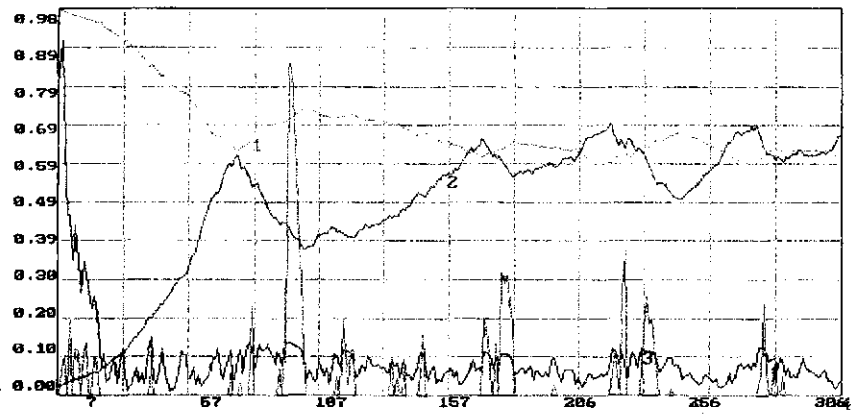


Рис. 8. Относительные показатели количества воздушных судов, находящихся в состояниях C_1 , C_2 и C_4 :

1 — отношение количества воздушных судов на этапе 3 к количеству воздушных судов, находящихся в состоянии C_1 ; 2 — отношение фактического времени инспектирования воздушных судов к располагаемому времени; 3 — отношение среднего времени пребывания воздушных судов в состоянии C_4 к среднему времени пребывания в состоянии C_2 .

На рис. 9 показана динамика изменения доли воздушных судов, имеющих сертификаты летной годности, в общем количестве реестрового парка воздушных судов (линия 1), количества воздушное судно без сертификатов летной годности, приходящихся на одно воздушное судно, имеющее сертификате летной годности (линия 2), доли воздушных судов, находящихся на этапе 3 состояния C_1 (см. рис. 3) в общем количестве реестрового парка воздушных судов (линия 3) для случая, когда располагаемый фонд времени для инспектиро-

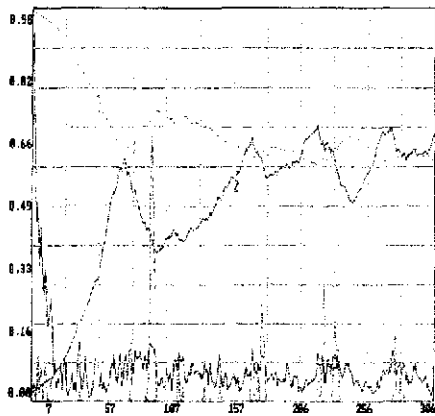
Удельный показатель



Номер недели

а

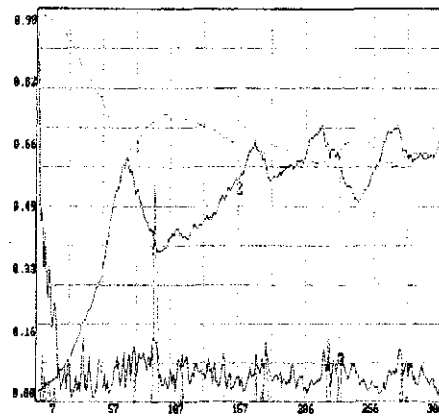
Удельный показатель



Номер недели

б

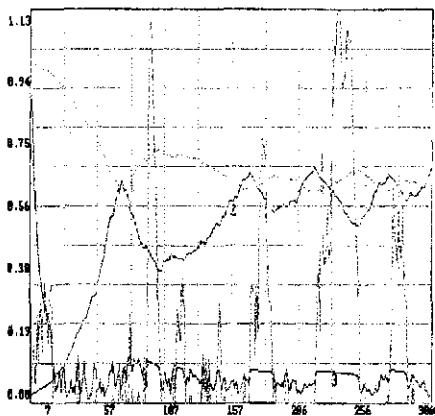
Удельный показатель



Номер недели

в

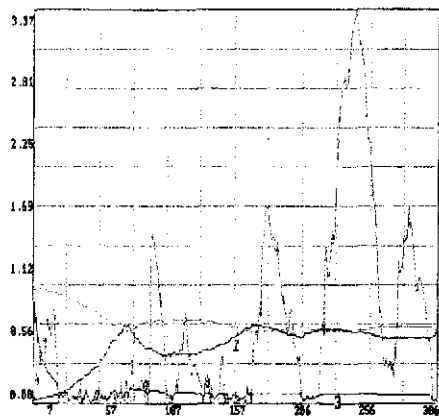
Удельный показатель



Номер недели

г

Удельный показатель



Номер недели

д

Рис. 9. Значения удельных показателей количества воздушных судов в состояниях C_1 , C_2 и C_4 :
а - случай 1; б - случай 2; в - случай 3; г - случай 4; д - случай 5

вания воздушных судов не меньше потребного. На рис. 9,б, в, г, д, показана динамика тех же удельных показателей для расчетных случаев, различающихся отношением располагаемого и потребного фонда времени для инспектирования воздушных судов (случаи 2 и 3 соответствуют избытку в восьми и четырех инспекторах, а случаи 4 и 5 – дефицит в четырех и восьми инспекторах).

Сравнительный анализ этих зависимостей показывает, что снижение количества инспекторов ведет к возрастанию продолжительности задержек инспектирования, но более равномерной их загрузке. Таким образом, увеличение количества инспекторов лишь снижает продолжительность пребывания в состоянии C_1 , однако не снимает проблемы неритмичности их загрузки. Процесс сертификации летной годности экземпляра воздушных судов как объекта управления не всегда обеспечивает требуемых результатов государственного регулирования поддержания летной годности в целом в связи со спецификой условий конкретного государства.

Применительно к действующим авиационным правилам Украины для снижения неравномерности загрузки инспекторов в качестве синтезируемой совокупности управляющих воздействий на поддержания летной годности реестрового парка воздушных судов можно предложить нормирование количества инспекторов, нормирование продолжительности состояния C_1 , увеличение срока продления действующего сертификата летной годности воздушного судна без проведения инспекции; комплексное планирование инспекций по двум направлениям государственного регулирования поддержания летной годности: сертификации летной годности экземпляра воздушного судна и сертификации эксплуатанта, за которым оно закреплено.

Таким образом, описанная модель процесса сертификации летной годности реестрового парка воздушных судов достаточно адекватно отражает основные факторы, определяющие его динамику по календарному времени и позволяет решать ряд актуальных практических задач государственного регулирования поддержания летной годности в условиях Украины.

Список литературы

1. *Руководство по сохранению летной годности*. Дос. 9642-AN/941.
2. *Система поддержания летной годности гражданских воздушных судов России: Анализ состояния и перспективы развития*// Федеральная авиационная служба России: Инженерно-авиационный вестник: нормативные документы, информационные материалы.–М.: - 1999. - №3 (21).
3. *Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С.* Основы концепции поддержания летной годности воздушных судов России// Проблемы безопасности полетов. - М.: ВИНТИ, 1998. - № 12. – С.11-19.
4. *Тихонов В.И., Миронов М.А.* Марковские процессы. – М.: Сов.радио, 1977.- 488 с.

Стаття надійшла до редакції 7 жовтня 1999 року.