

УДК 629.735.083(075.8)

А.Г. Кучер, д-р техн. наук, проф.  
 Мустафа А.С. Мустафа, асп. (Ирак)

## ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ АВИАКОМПАНИЙ

*Рассмотрены результаты анализа процессов системы снабжения авиационными двигателями на основании планирования заказа и прогнозирования потребности в авиационных двигателях парка воздушных судов авиакомпаний с использованием методов имитационного моделирования.*

*Розглянуто результати аналізу процесів системи постачання авіаційних двигунів на підставі планування замовлення та прогнозування потреби в авіаційних двигунах парка повітряних суден з використанням методів імітаційного моделювання.*

*The questions of air-engines supply system processes analysis on the basis of order planning and air-engine demand forecasting of airline's air fleet with the use of imitating simulation methods are considered.*

### Введение

Обеспечение потребностей авиакомпаний (АК) в различных материальных средствах (двигателях, запасных частях, комплектующих деталях, расходных материалах и т.п.) включает в себя три фазы:

- планирование;
- производство;
- распределение.

Как правило, к моменту реализации поставки данные, положенные в основу заявки, оказываются устаревшими и объем поставки уже не соответствует фактической потребности.

Для предотвращения остановки эксплуатации авиационной техники (АТ) в случае недостаточности поставок комплектующих в АК в системе снабжения создаются запасы [1]. Формально система снабжения авиационными двигателями (АД) должна выдавать заявки отделу снабжения в сроки, обеспечивающие своевременное размещение заказов среди поставщиков.

От правильного определения потребности в двигателях, запасных частях, агрегатах, материалах и оборудовании во многом зависит эффективность эксплуатации АТ.

### Система снабжения авиационными двигателями

Система снабжения АД – это межведомственная система, обосновывающая долгосрочные и текущие планы производства, ремонта АД и поставок их потребителю. Система снабжения АД включает в себя подсистемы информационного, методического и организационного обеспечения работ по формированию заказов и планированию поставок АД.

В системе снабжения АД объектом управления являются процессы поставок АД в эксплуатацию и формирования парка АД.

Целью управления заказами и поставками АД является обеспечение:

- бесперебойной эксплуатации парка воздушных судов (ВС) при минимальных затратах на производство и ремонт АД;
- необходимого уровня безопасности полетов и готовности парка ВС.

Система управления снабжения АД относится к классу слабоструктурированных систем (систем с нечетко выраженной структурой), отдельные подсистемы которых функционируют практически в отрыве друг от друга. Поток информации в системе не регламентированы.

Структура системы снабжения и управления поставками АД показана на рис.1 [2].

Основным звеном управляющей системы является система подготовки управленческих решений, включающая в себя подсистемы:

- информационного обеспечения;
- формирования прогноза потребных объемов выпуска и ремонта АД.

### Планирование снабжения авиационными двигателями

Основными показателями для составления плана-заказа и снабжения авиационными двигателями являются данные о потребности в них АК и источники покрытия этой потребности [3]:

$$P_d = \frac{C D T_d}{P_d} + O_f - O_n,$$

где  $C$  – число самолетов, которые будут летать в плановом периоде;

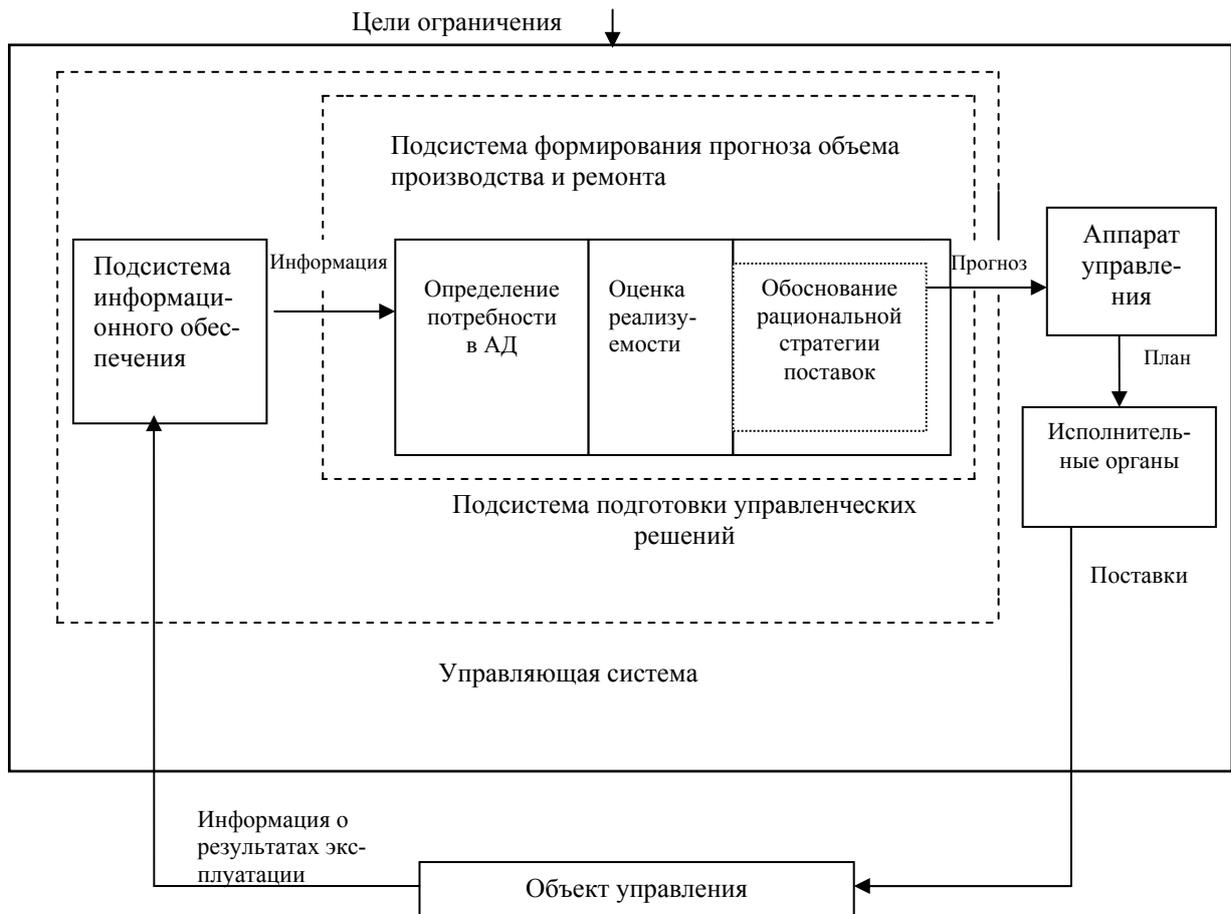


Рис. 1. Структура системы снабжения АД

$D$  – число двигателей на одном самолете;  
 $T_d$  – наработка, приходящаяся на один двигатель (моторное гнездо) в течение планового периода;  
 $P_d$  – ресурс двигателя, установленный для данного типа, ч;  
 $O_\phi$  – оборотный фонд двигателей, установленный для данного типа двигателя, шт.;  
 $O_n$  – ожидаемое число двигателей в данной АК, хранящихся на складах и предполагаемых к поступлению из ремонтных предприятий.  
 Предположим, что в плановом году прогнозируется налет (наработка) самолетов Ил-76 на один двигатель  
 $T_d = 525$  ч.  
 Назначенный ресурс для его модификаций 9000 и 6500 ч.  
 Межремонтный ресурс двигателя  
 $P_d = 4000$  (3000) ч.  
 Число двигателей, установленных на одном самолете:  
 $D = 4$ .  
 Число самолетов в плановом году  
 $C = 24$  (14, 10).

Потребность в оборотном фонде на пополнение и замену списываемых АД

$$O_\phi = 8(6).$$

Ожидаемое число АД на начало планового года

$$O_n = 10(7).$$

Тогда ежегодная потребность в АД:

$$P_d = \frac{14 \cdot 4 \cdot 525}{3000} + 8 - 10 + \frac{10 \cdot 4 \cdot 525}{4000} + 6 - 7 = 7,8 + 4,25 = 12,05$$

$$P_d = \frac{14 \cdot 4 \cdot 184}{1540} + 8 - 10 + \frac{10 \cdot 4 \cdot 184}{1540} + 6 - 7 = 4,69 + 3,78 = 8,47.$$

Прогнозируемое число лет до выработки назначенного ресурса в часах и циклах при планируемой наработке соответственно равно

$$P_{k1} = \frac{6500}{525} = 12,3;$$

$$P_{k2} = \frac{9000}{525} = 17,1;$$

$$P_{kcl} = \frac{3375}{184} = 18,3;$$

$$P_{кс2} = \frac{4600}{184} = 25.$$

После расчета потребности в АД в плановом периоде определяют источники ее обеспечения.

Ими являются:

- фактический ресурс АД, поступающих с самолетами;
- ресурс двигателей из имеющегося оборотного фонда;
- поставки новых АД.

### **Прогнозирование потребности в авиационных двигателях**

Эффективность системы снабжения сложными техническими системами определяется степенью удовлетворения потребностей заказчиков в этих системах. В основе действующих систем управления снабжения техническими системами лежат методы долгосрочного прогнозирования потребности в них, основанные на современных научных представлениях о закономерностях процессов функционирования, восстановления и обновления парков технических систем.

Условно работы в этой области можно разделить на два направления:

- применение нормативных методов, а также методов, основанных на показателях удельной потребности, среднестатистических показателей;
- имитационное моделирование на ЭВМ процессов эксплуатации и воспроизводства парков технических систем.

Нормативные методы, использующие стабильные нормативы списания машин, отхода в ремонт, продления ресурсов, пополнения оборотного фонда, целесообразно применять при планировании производства и ремонта недорогих изделий, высоконадежных и имеющих длительный срок службы [4].

Применение таких методов для АД, являющихся дорогостоящими изделиями, комплектующими самолет, с динамичными характеристиками надежности и ресурса, нерационально, так как это приводит к завышенным оценкам потребного объема их производства и ремонта и снижает эффективность их использования.

Наиболее эффективными являются методы прогнозирования потребности в АД, основанные на моделировании на ЭВМ процессов эксплуатации и воспроизводства парков ВС и АД.

Принципы моделирования какого-либо объекта или процесса определяются:

- особенностями самого объекта или процесса;
- особенностями метода моделирования;

– целью моделирования.

Процесс эксплуатации парка АД представляет собой последовательную во времени смену состояний объектов эксплуатации (самолетов, двигателей) в соответствии с принятой стратегией управления (технического обслуживания, ремонта).

Основными состояниями процесса эксплуатации самолетов и двигателей являются:

- использование по назначению (полеты);
- транспортирование;
- хранение;
- техническое обслуживание, в т.ч. опробование двигателей, и ремонт;
- ожидание поступления в каждое состояние.

Поскольку двигатель является изделием, комплектующим самолет, закономерности функционирования парка АД, поставок их в эксплуатацию во многом определяются закономерностями эксплуатации парка самолетов. Это обуславливает необходимость системного подхода к исследованию и моделированию процесса эксплуатации АД, т.е. рассмотрения этого процесса в конкретных условиях эксплуатации парка самолетов [5].

Изменение численности эксплуатируемых самолетов и АД характеризуется соотношением ввода (пополнения) и вывод самолетов и АД из эксплуатации.

Пополнение парка ВС происходит за счет планового ввода новых ВС, а также поступивших из ремонта, вывод ВС – за счет списания и отправки ВС в ремонт.

Списание и отправка в ремонт АД характеризует процессы вывода их из эксплуатации, а поступление их с заводов или из запаса – процесс размещения.

Формирование парка самолетов и двигателей описывается следующими балансовыми рекуррентными соотношениями:

– самолеты в летной эксплуатации :

$$N_{t+1}^c = N_t^c + N_{Вt}^c - N_{спt}^c - N_{pt}^c + N_{отрт}^c ;$$

– самолеты в ремонте:

$$N_{ремt+1}^c = N_{ремt}^c + N_{pt}^c - N_{отрт}^c ;$$

– двигатели в эксплуатации на самолетах:

$$N_{t+1}^д = N_t^д + N_{Вt}^д - (N_{ит}^д + N_{р.сt}^д + N_{pt}^д + N_{спt}^д) + N_{зt} ;$$

$$N_{t+1}^д = N_{Вt}^д n_{д} ;$$

$$N_{р.сt}^д = N_{pt}^д n_{д} ;$$

$$N_{p_t}^D = N_{д.в.р_t} + N_{д.с.д_t};$$

– запасные двигатели:

$$N_{зап_{t+1}}^D = N_{зап_t}^D + N_{отр_t}^D + N_{и_t}^D - N_{з_t}^D + N_{н_t}^D;$$

– двигатели в ремонте:

$$N_{рем_{t+1}}^D = N_{рем_t}^D + N_{p_t}^D - N_{отр_t}^D,$$

где  $N_t$  – число изделий в момент времени  $t$ ;

$p_d$  – число двигателей на самолете;

$c$  – самолеты;

$v$  – плановый ввод изделий в эксплуатацию;

$сп$  – списанные изделия;

$p$  – поступление изделий в ремонт;

$отр$  – отремонтированные изделия;

$рем$  – изделия, находящиеся в состоянии ремонта;

$д$  – двигатели;

$и$  – изъятие изделий из эксплуатации в связи с выработкой самолетами назначенного ресурса;

$з$  – изделия, поступающие из запаса;

$д.в.р$  – двигатели, выработавшие межремонтный ресурс;

$д.с.д$  – досрочно снятые двигатели;

$зап$  – изделия, находящиеся в запасе;

$н$  – новые изделия, поставляемые в запас.

Прогнозирование вероятностных составляющих балансов потоков ВС и АД может осуществляться различными методами моделирования случайных величин (событий, процессов). Различают аналитические и имитационные модели.

Наиболее существенными признаками аналитических моделей, отличающими их от имитационных, являются:

– способ описания связей между входом и выходом модели (в аналитических моделях – это математические соотношения, допускающие проведение исследования модели на основе математических выкладок);

– вычислительные эксперименты на ЭВМ для ситуационного моделирования и др.

Формирование парка ВС, находящихся в эксплуатации, производится по следующей схеме. Пригодность ВС к эксплуатации определяется его состоянием.

Если ресурс до ремонта не выработан, то ВС считается годным и продолжает оставаться в эксплуатации.

Если ресурс до ремонта выработан, то ВС выбывает из эксплуатации на время ремонта.

Если же выработан назначенный ресурс, то ВС списывается.

Наиболее адекватными методами моделирования процессов эксплуатации и воспроизводства парка АД являются имитационные модели, основанные на моделировании событий жизненного цикла двигателей путем продвижения по дискретному времени с постоянным шагом либо по временам наступления значимых модельных событий.

Общая схема оборота двигателей модульной конструкции в жизненном цикле состоит из процессов производства, эксплуатации, ремонта, списания двигателей и их модулей, дополненных состояниями ожидания ремонта, эксплуатации и транспортирования (рис. 2).

Состояние ожидания эксплуатации (запаса) двигателей формируется за счет поставок как ремонтируемых, так и новых АД или модулей. Его уровень определяется объемом резерва, необходимым для компенсации досрочного съема двигателей.

Состояние ожидания ремонта определяется производительностью авиационно-ремонтных заводов (АРЗ).

Уровень запаса исправных модулей позволяет снизить запас исправных двигателей, так как часть неустранимых отказов переводится в разряд устранимых на авиационно-технической базе (АТБ). Процессы транспортирования можно объединить с состояниями ожидания в связи с тем, что они предшествуют этим состояниям и составляют небольшую долю времени состояния ожидания.

Основное отличие предлагаемой имитационной модели, приближенной по возможности к реальным процессам, происходящим в АК, состоит в принципах регламентации событий и процессов во времени, и базирующийся на следующих допущениях.

1. Модель строится для одного типа ВС и АД.
2. Воздушные суда вводятся в эксплуатацию на основе плана развития АК двумя потоками: с производства ВС и установленные на них АД поступают с нулевой наработкой.
3. В аренду и после ремонта ВС и АД вводятся с текущими наработками.
4. Процесс моделирования начинается с любого заданного момента времени, где в качестве начальных условий задается исходное распределение наработок и ресурсов ВС и АД.
5. Выработка ресурса для всех ВС и АД, находящихся в эксплуатации, происходит с одинаковой интенсивностью.

- 6. В блоке хранения осуществляется учет поступивших двигателей и модулей, а также учет их выбывания из запаса и транспортирования.
- 7. Замена снятых двигателей производится из числа запасных (находящихся в состоянии ожидания эксплуатации) в порядке их поступления в это состояние.
- 8. В ремонт АД поступают двумя потоками: плановым по выработке установленного межремонтного ресурса и случайно в связи с отказами, не устранимыми в эксплуатации.
- 9. В блоке ремонта выделено состояние ожидания ремонта, в котором моделируется занесение двигателей в очередь, продвижение очереди во времени и перевод их в состояние ремонта по мере освобождения ремонтных мощностей, с сохранением наработки, с которой они поступили в

ремонт. При отсутствии очереди двигатели поступают в ремонт, сразу же после транспортирования, минуя состояние ожидания ремонта.

10. Системным временем модели (шагом) является месяц или квартал.

В модели может быть реализован принцип планомерного учета жизненного цикла каждого экземпляра ВС и АД, что существенно повышает адекватность модели.

Формализация заложенных требований в имитационной модели, построенной по принципу отслеживания жизненного цикла каждого двигателя, выдвигает четырехшаговую стратегию моделирования:

- задание начальных распределений объектов во всех состояниях (эксплуатации, ремонта, хранения);

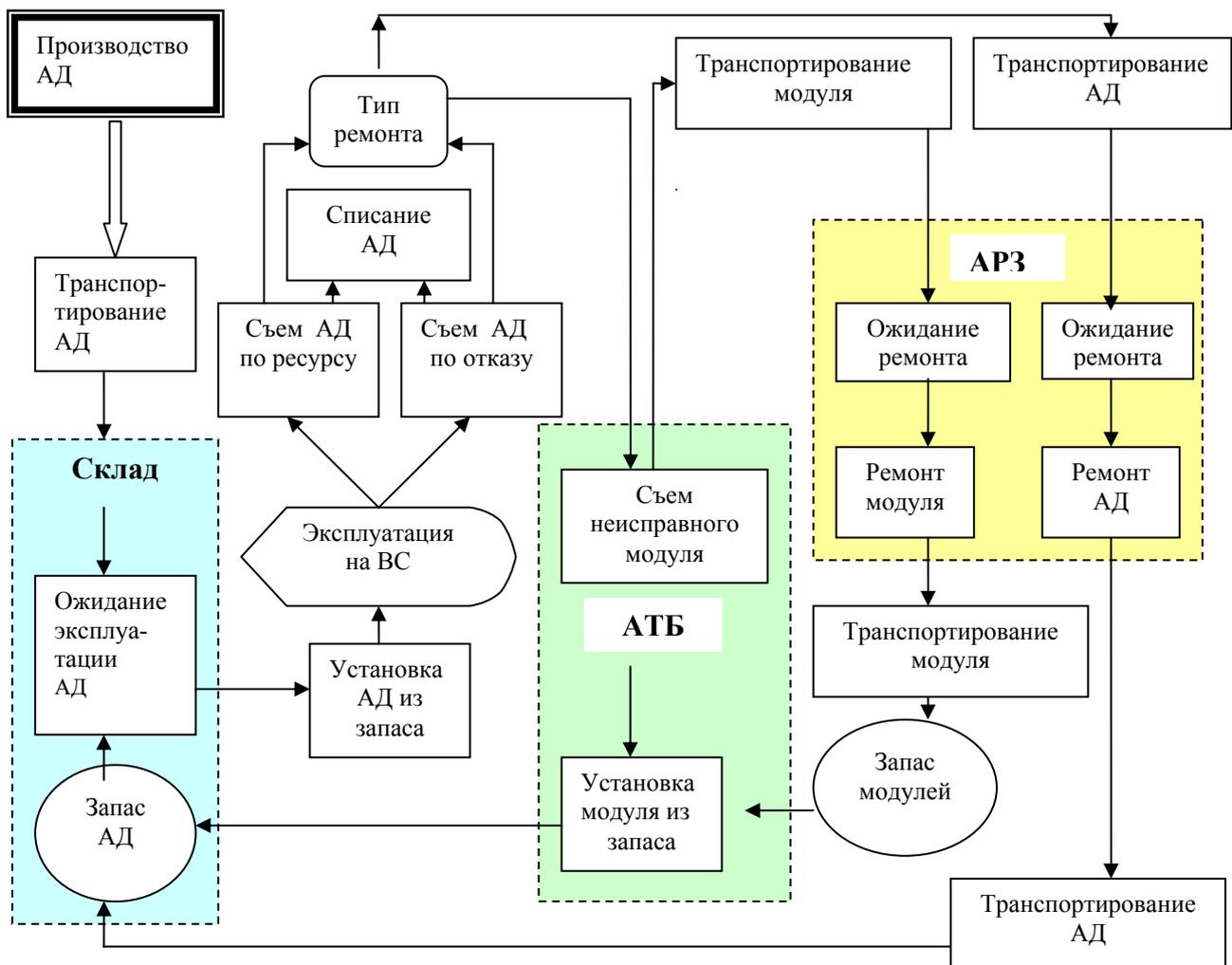


Рис. 2. Схема жизненного цикла двигателей

- продвижение системного времени и накопление изменений во всех элементах системы;
- анализ изменений в каждом элементе;
- принятие решений по каждому элементу системы в соответствии с выбранной стратегией эксплуатации.

Для реализации этой стратегии все состояния жизненного цикла ВС и АД разбиты на  $n$  внутренних состояний, отвечающих соответствующим  $i$ -м значениям наработки – от нулевой до предельной, равной назначенному ресурсу двигателя.

Расширенная структура процесса эксплуатации двигателя, учитывающая также и случайные внеплановые выходы в ремонт, при этом имеет вид треугольной матрицы или более универсальную форму параллелограмма, в которой первая строка определяет процесс технической эксплуатации по ресурсу, а остальные – процесс эксплуатации после ремонта, вызванного случайным отказом.

Переход в следующее состояние соответствует увеличению наработки на заданную постоянную величину  $H_0$ , равную, например, 300 ч.

После отработки межремонтного ресурса из  $m$ -го состояния ( $m = R_m / H_0$ ) объекты проходят состояния ожидания ремонта, ремонта и ожидания эксплуатации и возвращаются в первое после ремонта состояние с наработкой  $H_{m+1}$ , проходя все состояния по наработке до выработки назначенного ресурса в  $n$ -м состоянии ( $n = R_n / H_0$ ) и списания.

В случае отказа происходит переход из  $i$ -го состояния с наработкой  $H_i$  после соответствующего ремонтного цикла в  $(i+1)$ -ю строку  $(i+1)$ -го состояния с наработкой  $H_{i+1}$ . В этой строке это первое состояние межремонтного цикла, т.е. до выработки межремонтного ресурса здесь также нужно пройти  $m$  состояний.

При использовании матрицы в форме параллелограмма после первого ремонта из первой строки переходят в первое состояние  $(m+1)$ -й строки, отражающее продолжение основного цикла эксплуатации по ресурсу и после  $k$ -го ремонта в первое состояние  $k*(m+1)$ -й строки и так до списания.

Математическое описание модели процесса эксплуатации, выполненное на базе дискретной марковской цепи, имеет вид дифференциальных

уравнений Колмогорова – Чепмена:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_{2,1}(t) = -\lambda_1'(1)P_{2,1}(t) - \lambda_2(1)P_{2,1}(t) + \lambda_1(t)P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_{2,i}(t) = -\lambda_1'(i)P_{2,i}(t) - \lambda_2(i)P_{2,i}(t) + \lambda_1(i-1)P_{2,i-1}(t), \\ i = \overline{2, n} \end{cases}$$

где  $\lambda_1(i)$ ,  $\lambda_2(i)$  – интенсивности выхода / входа (–/+ из состояния эксплуатации  $C_2$  соответственно по ресурсу и по отказу;

$P_{2,i}(t)$  – вероятность нахождения в  $i$ -м состоянии эксплуатации  $C_2$  с наработкой  $H_i$ .

Для решения системы дифференциальных уравнений можно использовать различные методы численного интегрирования: Кутта – Менсона 2–3-го порядка, Рунге – Кутта 4–5-го порядка, Гира. Однако достаточно применения метода Эйлера 1-го порядка, позволяющего с необходимой точностью и относительно небольшим объемом вычислений получить значение вероятностей  $P_{2,i}(t)$ . В этом случае путем замены

производных приращениями

$$\Delta P_{2,i} / \Delta t = (P_{2,i}(t+1) - P_{2,i}(t)) / 1,$$

систему уравнений относительно  $P_{2,i}(t+1)$ ,  $i = \overline{1, n}$  при

$$\lambda_i(i) = 1 - \lambda_1'(i)$$

в дискретном времени можно представить в виде:

$$\begin{cases} P_{2,1}(t_{j+1}) = -\lambda_1(1)P_{2,1}(t_j) - \lambda_2(1)P_{2,1}(t_j) + \lambda_1(t_j)P_1(t_j); \\ \dots \\ P_{2,i}(t_{j+1}) = -\lambda_1(i)P_{2,i}(t_j) - \lambda_2(i)P_{2,i}(t_j) + \lambda_1(i-1)P_{2,i-1}(t_j), \\ i = \overline{2, n}; \end{cases}$$

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

$$P_2'(t_{j+1}) = \sum_{i=1}^n \lambda_2(i)P_{2,i}(t_j) + \lambda_1(n)P_{2,n}(t_j);$$

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

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

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

где  $P_{2,i}(t_j)$  – вероятность пребывания в  $i$ -м фазовом состоянии  $\theta_i$  с наработкой  $H_i$  в момент времени  $t_j$ ;

$\lambda_1(i)$  – интенсивность перехода из  $i$ -го фазового состояния в  $(i+1)$ -е фазовое состояние по выработке части ресурса;

$\lambda_2(i)$  – интенсивности выхода из состояния по отказу при условии, что АД находится в  $i$ -м фазовом состоянии с наработкой  $H_i$ ;

$\lambda_1(i) + \lambda_2(i) = 1$  – условие нормировки для  $i$ -го фазового состояния;

$\lambda_1(t)P_1(t)$  – входной поток в состоянии эксплуатации  $C_2$ ;

$P_2(t_{j+1})$  – суммарная вероятность пребывания в состоянии  $C_2$  в момент времени  $t_{j+1}$ ;

$P_2'(t_{j+1})$  – суммарный выходной поток из состояния  $C_2$  в момент времени  $t_{j+1}$ ;

$m_\theta, m_{\theta,2}, \sigma_\theta$  – соответственно первый, второй начальные моменты и среднее квадратичное отклонение продолжительности пребывания в состоянии  $C_2$ ;

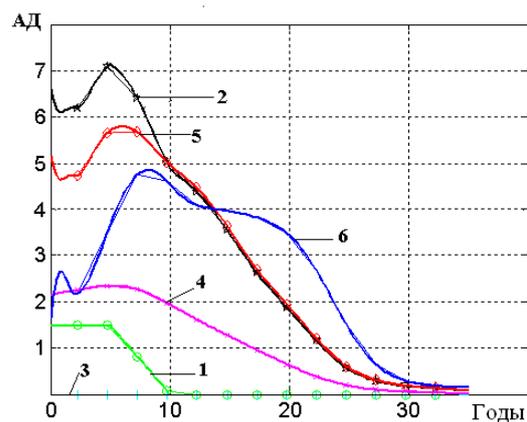
$n$  – число фазовых состояний для модели  $C_2$ ;

$\Delta t = 1$  – шаг по времени, равный времени дискретизации (1 квартал).

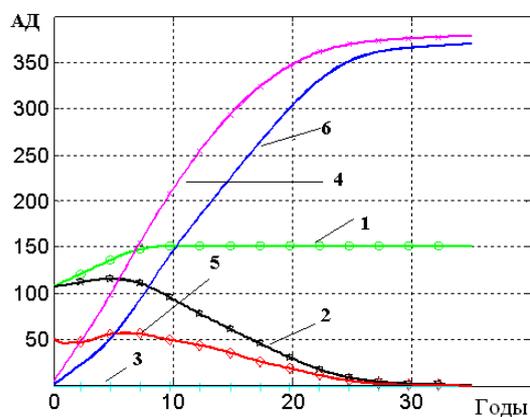
Состояние ожидания ремонта представляет собой прямоугольную матрицу, строки которой имеют  $n$  элементов по количеству состояний с наработками  $H_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а столбцы  $l$  элементов, определяющих очередность поступления двигателей в это состояние. Переход в состояние ремонта осуществляется по мере освобождения состояний ремонта в той же последовательности, в какой заполнялись строки предшествующего состояния. Состояние ремонта также имеет структуру прямоугольной матрицы с  $n$  элементами в строке по числу состояний с наработками  $H_i$  и  $r$  элементами в столбце по числу этапов ремонта для согласования модельного времени.

Сведения о начальном ресурсном состоянии парка ВС и АД, наработках на начало прогнозирования, темпах изменения налета парка, учитывающие сезонность колебаний за последние два года, получены в рамках системы эксплуатационной надежности АТ. Один из вариантов такого расчета в виде интегральных характеристик результатов моделирования для двигателей Д-30КП самолетов Ил-76ТД (Ил-76МД) показаны на рис. 3.

Рассмотренный алгоритм имитационной модели является одним из вариантов методов системной динамики, преимущество которого заключается в наглядности модели и возможности оперировать с обыкновенными дифференциальными моделями первого порядка, учитывать начальное состояние системы (распределение наработок на начало прогнозирования), определять ресурсное состояние парка ВС и потребности в АД в любой календарный момент времени.



а



б

Рис. 3 Характеристики жизненного цикла АД:  
а – ежеквартальные:

- 1 – выпущено за квартал;
  - 2 – поступили в эксплуатацию за квартал;
  - 3 – ожидание ремонта;
  - 4 – досрочно снятые двигатели, поступившие в ремонт за квартал;
  - 5 – в ремонте за квартал;
  - 6 – списано за квартал;
- б – интегральные:
- 1 – выпущено;
  - 2 – в эксплуатации;
  - 3 – в ожидании ремонта;
  - 4 – прошли ремонт;
  - 5 – в ремонте;
  - 6 – списаны

**Выводы**

Рассмотренная система управления заказами и поставками АД на основе методов имитационного моделирования процессов жизненного цикла двигателей позволяет обосновать долгосрочные и текущие планы производства, ремонта АД и поставок их потребителям согласно плану развития АК.

**Литература**

1. *Диагностирование* и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования/ Под. ред. И. М. Синдеева. – М.: Транспорт, 1984. – 191 с.
2. *Никонова И. А., Шепель В.Т.* Технико-экономическая эффективность авиационных ГТД в эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
3. *Организация* и планирование материально-технического снабжения в гражданской авиации: Учеб. для вузов / Под ред. Е.Ф.Бусалова. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.
4. *Надежность* технических систем: Монография // Е. Переверзев, А. Алпато, Ю. Даниев, П. Новак. – Д.: Пороги, 2002. – 396 с.
5. *Технология* эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учеб. пособие/Под ред. Ю. С. Елисеева. – М.: Высш. шк., 2002. – 355 с.

Стаття надійшла до редакції 23.10.07.