

И.А. МАЧАЛИН

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТРАТЕГИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ АВИОНИКИ

Abstract: A detailed analysis of the breakdown maintenance strategy (BMS) of modern avionics products is presented. Three different variants of the BMS implementation are considered. The mathematical equations are given for modeling each BMS variant. A criterion of optimizing the number of spare parts is offered. The spare part system is modeled by the Markovian discrete process. Some considerations for choosing the best BMS variant are finally outlined.

Key words: avionics, maintenance, models, optimization.

Анотація: У статті наведені та детально проаналізовані стратегії технічного обслуговування (ТО) сучасних систем авіоники. Розглянуті три варіанти використання стратегій ТО. Розроблені математичні моделі для аналізу стратегій. Запропоновані критерії оптимізації об'єму запасних частин систем. Математичні моделі побудовані на основі використання Марковських дискретних процесів. Результатом є вибір оптимального варіанта стратегії ТО.

Ключові слова: авіоніка, обслуговування, моделі, оптимізація.

Аннотация: В статье предложены и детально проанализированы стратегии технического обслуживания (ТО) современных систем авионики. Рассмотрены три варианта применения стратегий ТО. Разработаны математические модели для их анализа. Предложены критерии оптимизации объемов запасных изделий систем. Математические модели построены на основе применения Марковских дискретных процессов. Результатом является выбор оптимального варианта стратегии ТО.

Ключевые слова: авионика, обслуживание, модели, оптимизация.

1. Введение

Эффективная эксплуатация новых воздушных судов (ВС), которыми в настоящее время оснащаются авиакомпании, возможна только при условии минимизации затрат на их техническое обслуживание (ТО). Поэтому актуальной является задача научно-обоснованного выбора стратегии ТО авиационной радиоэлектроники (авионики), поскольку эти системы являются дорогостоящими и в значительной мере влияют на безопасность и регулярность полетов ВС.

Для выбора оптимальной стратегии ТО необходимо разработать математические модели, описывающие процесс эксплуатации ВС. Существующие модели не учитывают влияние на эксплуатационные затраты такой важной составляющей, как объем обменного фонда легкосъёмных блоков (ЛСБ) авионики. При большом объеме обменного фонда обеспечивается регулярность полетов, так как снижаются простои ВС. Однако при этом велики затраты на закупку ЛСБ. Для снижения объема обменного фонда необходимо использовать стратегию ТО с применением в базовом аэропорту наземной автоматизированной системы контроля (НАСК), но это также требует больших капитальных вложений. Очевидно, что необходимо осуществлять минимизацию эксплуатационных затрат при обеспечении заданного уровня безопасности и регулярности полетов. Поэтому настоящая статья посвящена разработке математических моделей различных вариантов стратегий ТО, позволяющих оптимизировать объем обменного фонда, рассчитывать эксплуатационные затраты для каждого варианта и производить выбор оптимальной стратегии ТО.

2. Классификация систем технического обслуживания

В настоящее время радиоэлектронные системы (РЭС) большинства типов ВС соответствуют международным требованиям ARINC 700. Примерами являются В-767, В-777, А-340, Ан-140, системы которых представляют собой комплекс резервированных ЛСБ. В свою очередь, каждый

ЛСБ состоит из набора съемно-сборочных единиц (ССЕ) и имеет встроенную систему контроля (ВСК), осуществляющую контроль его работоспособности на борту. Можно выделить три уровня ТО [1].

Первый уровень заключается в ТО РЭС в полете или на стоянке ВС. Здесь с помощью ВСК производится контроль работоспособности ЛСБ. Забракованный по результатам контроля ЛСБ поступает на второй уровень ТО.

Второй уровень предусматривает ТО демонтированных ЛСБ, которое может осуществляться на заводе-изготовителе или в центре ТО. На этом уровне контроль работоспособности и поиск места отказа в ЛСБ производятся с помощью НАСК. Поиск места отказа в ЛСБ осуществляется с глубиной до ССЕ. Восстановление работоспособности отказавших ЛСБ производится путем замены забракованных ССЕ.

Третий уровень – это восстановление ССЕ на заводе-изготовителе или в центре ТО. Для контроля работоспособности и поиска места отказа в ССЕ с глубиной до одного или нескольких элементов также применяется НАСК.

Перечисленные выше уровни ТО нового поколения РЭС позволяют сформировать несколько вариантов построения системы ТО, которые классифицируются по следующим признакам: a – наличие гарантии завода-изготовителя у ЛСБ; b – наличие НАСК в центре ТО; c – место восстановления демонтированного ЛСБ. Поскольку между признаками классификации существует отношение подчинения, используем иерархическую классификацию с порядковой регистрацией отдельных значений признаков.

Признак a принимает такие значения: $a = 1$ – у ЛСБ есть гарантия завода-изготовителя; $a = 2$ – нет гарантии завода-изготовителя. При наличии гарантии демонтированный блок восстанавливается за счет завода. При отсутствии гарантии завода-изготовителя восстановление происходит за счет авиакомпании.

Итак, на первой ступени классификации множество вариантов системы ТО (W_0) подразделяется на два класса: W_1 и W_2 , т. е. $W_0 = W_1 \cup W_2$.

Признак b принимает следующие значения: $b = 1$ – НАСК отсутствует; $b = 2$ – есть НАСК, осуществляющая только контроль работоспособности ЛСБ (обозначим такой тип НАСК как НАСК0); $b = 3$ – есть НАСК, осуществляющая контроль работоспособности ЛСБ и поиск отказа с глубиной до ССЕ- (НАСК1); $b = 4$ – есть НАСК1 и система контроля, осуществляющая контроль работоспособности ССЕ и поиск места отказа с глубиной до элемента (обозначим такую систему контроля через НАСК2).

При $b = 1$ НАСК в центре ТО отсутствует. Поэтому восстанавливать ЛСБ в центре ТО невозможно. При $b = 2$ в центре ТО есть НАСК 0, осуществляющая контроль работоспособности демонтированных ЛСБ. Такую систему контроля целесообразно использовать для перепроверки демонтированных ЛСБ или монтируемых на борт самолета. Поскольку поиск места отказа в ЛСБ с глубиной до ССЕ с помощью НАСК0 невозможен, то отказавшие ЛСБ могут восстанавливаться только на заводе-изготовителе. При $b = 3$ в центре ТО используется НАСК1. Восстановление

отказавших ЛСБ производится путем замены забракованных ССЕ на заведомо работоспособные. Ремонт отказавших ССЕ также производится на заводе-изготовителе.

При $b = 4$ внешние средства контроля в центре ТО включают НАСК1 и НАСК2. С помощью НАСК2 производится входной контроль работоспособности забракованных ССЕ и поиск места отказа в них с глубиной до элемента. Восстановление ССЕ осуществляется путем замены отказавших элементов.

Итак, на второй ступени классификации класс W_0 разделяется на подклассы W_{11} и W_{12} , а класс W_2 на подклассы W_{2b} ($b = \overline{1,4}$), т.е. $W_1 = W_{11} \cup W_{12}; W_2 = \bigcup_{b=1}^4 W_{2b}$.

Признак c принимает следующие значения: $c = 1$ – восстановление ЛСБ производится на заводе-изготовителе; $c = 2$ – восстановление ЛСБ производится в центре ТО путем замены отказавших ССЕ, а восстановление ССЕ происходит на заводе-изготовителе; $c = 3$ – восстановление ЛСБ и ССЕ производится в центре ТО.

От места восстановления ЛСБ зависят функции НАСК и структура обменного фонда в центре ТО. При $c = 1$ единственной функцией НАСК является контроль работоспособности, который выполняется с целью не допустить отправки на завод-изготовитель ложно снятые ЛСБ. Обменный фонд в центре ТО формируется только из ЛСБ. При $c = 3$ НАСК должна осуществлять контроль работоспособности и поиск места отказа в ЛСБ с глубиной до ССЕ. Поэтому в центре ТО устанавливается НАСК I. Обменный фонд формируется из ЛСБ и ССЕ. При $c = 3$ НАСК должна выполнять функции контроля работоспособности ЛСБ и ССЕ, а также поиск места отказа в них с глубиной элемента. Поэтому в центре ТО устанавливаются НАСК1 и НАСК2, а обменный фонд состоит из ЛСБ, ССЕ и запасных элементов для восстановления ССЕ.

Как видно, признак c находится в отношении строгого подчинения с признаком b . Поэтому на третьей ступени классификации подклассы W_{11}, W_{12}, W_{1b} подразделяются на следующие группы:

$$W_{11} = W_{111}; W_{12} = W_{121}; W_{21} = W_{211}; W_{22} = W_{221}; W_{23} = W_{232}; W_{24} = W_{243}.$$

3. Показатели эффективности систем технического обслуживания

Процесс эксплуатации РЭС представляется как последовательность смены ее различных состояний. Поэтому поведение РЭС на интервале эксплуатации $(0, \infty)$ задается случайным

процессом $L(t), t \geq 0$ с конечным пространством состояний $E = \bigcup_{i=1}^n E_i$. Процесс $L(t)$ изменяется

только скачкообразно, причем каждый скачок обусловлен переходом РЭС в одно из возможных состояний. При этом предполагается, что $L(t)$ – регенерирующий случайный процесс, имеющий свойство всегда возвращаться в точку регенерации, начиная с которой дальнейшее развитие процесса не зависит от его поведения в прошлом и является вероятностной копией процесса $L(t)$, начавшегося в момент $t = 0$. Точками регенерации являются моменты окончания “правильных” и “ложных восстановлений” РЭС. В результате статистического анализа отказов 68% изделий

авионики было установлено, что время распределения отказов достаточно точно описывается экспоненциальным законом распределения [2].

Для регенерирующих случайных процессов доля времени, которую проводит РЭС в любом из состояний, равна отношению среднего времени, проведенного в этом состоянии за цикл между точками регенерации к средней длительности этого цикла. Поэтому для определения любого из показателей эффективности требуется знание средних продолжительностей пребывания РЭС в состояниях, существенно влияющих на эффективность системы ТО.

Как при отсутствии контроля в полете, так и при его наличии, определяющим для демонтажа ЛСБ с борта самолета является решение о неработоспособности, принимаемое ВСК либо переносным измерительным прибором (ПИП) в базовом аэропорту. По результатам контроля работоспособности ЛСБ с помощью ВСК (ПИП) в базовом аэропорту могут приниматься следующие решения:

– допустить ЛСБ к использованию по назначению до следующего момента контроля, если он признан работоспособным;

– демонтировать ЛСБ с борта самолета, если он признан неработоспособным, и установить на борт ВС работоспособный ЛСБ из обменного фонда, а демонтированный отправить для восстановления (“правильного” или “ложного”) на завод-изготовитель или в центр ТО.

Таким образом, ТО ЛСБ полностью основано на решениях, принимаемых по результатам контроля с помощью ВСК (ПИП) на стоянке самолета в базовом аэропорту.

Из описания процесса эксплуатации следует, что в произвольный момент времени t ЛСБ может находиться в одном из следующих состояний:

– E_1 , если в момент t ЛСБ использовался по назначению и находился в работоспособном состоянии;

– E_2 , если в момент t ЛСБ использовался по назначению, но находился в неработоспособном состоянии;

– E_3 , если в момент t ЛСБ не использовался по назначению и проводился контроль работоспособности с помощью ВСК (ПИП) на стоянке ВС в базовом аэропорту;

– $L(t) = E_4$, если в момент t ЛСБ не использовался по назначению и проводился его демонтаж или монтаж на борту ВС;

– E_5 , если в момент t забракованный ЛСБ внепланово простаивал на борту ВС в базовом аэропорту из-за неудовлетворения заявки на запасной ЛСБ из обменного фонда;

– E_6 , если в момент t проводилось “ложное восстановление” ЛСБ на заводе-изготовителе или в центре ТО;

– E_7 , если в момент t проводилось “правильное восстановление” ЛСБ на заводе-изготовителе или в центре ТО.

Состояния $E_1 - E_5$ характеризуют первый, а состояния $E_6 - E_7$ второй и третий уровни ТО.

Обозначим S_i – случайное время нахождения ЛСБ в состоянии $E_i (i=1,7)$ за случайный цикл регенерации S_0 ; MS_i – среднее значение S_i за средний цикл регенерации MS_0 .

Приведем выражения для расчета $\overline{MS_1}, \overline{MS_7}$ при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа. Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_1 определяется по формуле

$$MS_1 = \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda(1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n})}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность внезапных отказов ЛСБ; α – условная вероятность "ложного отказа" при контроле работоспособности ЛСБ с помощью ВСК на стоянке ВС в базовом аэропорту.

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_2 определяется по формуле

$$MS_2 = \frac{1}{1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n}} \left[\frac{t_n(1 - \beta \cdot e^{-\lambda t_n})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda} \right], \quad (2)$$

где β – условная вероятность "необнаруженного отказа" при контроле работоспособности ЛСБ с помощью ВСК на стоянке ВС в базовом аэропорту.

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_3 определяется по формуле

$$MS_3 = \frac{t_{kp}(1 - \beta \cdot e^{-\lambda t_n})}{(1 - \beta)[1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda t_n}]}, \quad (3)$$

где t_{kp} – средняя продолжительность контроля работоспособности ЛСБ с помощью ВСК на стоянке ВС в базовом аэропорту.

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_4 определяется по формуле

$$MS_4 = t_d + t_m, \quad (4)$$

где t_d и t_m – средняя продолжительность демонтажа и монтажа ЛСБ на борту ВС.

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_5 определяется по формуле

$$MS_5 = \sigma(\Delta t_{zum} + t_{kp} + t_d + t_m - t_c), \quad (5)$$

где Δt_{zum} – среднее время задержки при удовлетворении требования на запасной ЛСБ в базовом аэропорту; t_c – средняя продолжительность стоянки ВС в базовом аэропорту при выполнении типового маршрута.

$$\sigma = \begin{cases} 0 & \text{при } t_c \geq (\Delta t_{zum} + t_{kp} + t_d + t_m) \\ 1 & \text{при } t_c < (\Delta t_{zum} + t_{kp} + t_d + t_m) \end{cases}.$$

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_6 определяется по формуле

$$MS_6 = \frac{t_{лв}\alpha \cdot e^{-\lambda t_n}}{1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n}}, \quad (6)$$

где $t_{лв}$ – средняя продолжительность "ложного восстановления" ЛСБ на заводе-изготовителе или в центре ТО.

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии E_7 :

$$MS_7 = \frac{t_{ns} (1 - e^{-\lambda t_n})}{1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n}}, \quad (7)$$

где t_{ns} – средняя продолжительность “правильного восстановления” ЛСБ на заводе-изготовителе или в центре ТО.

Рассмотрим три варианта стратегии ТО. Первый вариант (W_{21}) – самый простой для авиакомпании, но и самый дорогой. Все ЛСБ, признанные неработоспособными, отправляются на завод-изготовитель для восстановления. При этом авиакомпания не имеет НАСК, однако должна иметь большое количество ЛСБ для обеспечения регулярности полетов. В этом варианте на завод-изготовитель отправляются ЛСБ, которые содержат как неисправные ССЕ, так и исправные. При этом затраты определяются затратами на ремонт всего ЛСБ. С момента окончания гарантийного срока эксплуатации авиакомпания должна будет оплачивать все расходы, связанные с восстановлением ЛСБ [1]. Вследствие чего авиакомпания может понести убытки в связи с большими экономическими затратами. В этом случае полные экономические затраты PZ_1 могут быть представлены в следующем виде:

$PZ_1 = \text{Затраты на обслуживание ЛСБ до отказа} + \text{Затраты на доставку ЛСБ} + \text{Затраты на восстановление ЛСБ на заводе-изготовителе} + \text{Затраты на запасные ЛСБ}.$

Очевидно, что авиакомпания будет стремиться к минимизации PZ_1 . Следует заметить, что PZ_1 не включают в себя затраты в гарантийный период эксплуатации и определяются, с учетом (1) – (7), как

$$PZ_1 = mN \left[C_E + (C_d + C_M) + C_{TR} + C_B \right] \frac{T}{MSI} + (F + MF)C_0, \quad (8)$$

где m – порядковый номер ЛСБ на борту ВС; N – порядковый номер обслуживаемого ВС; C_E – затраты на эксплуатацию ЛСБ до наступления отказа; C_d – затраты на демонтаж; C_M – затраты на монтаж; C_{TR} – среднее время на доставку ЛСБ для восстановления; C_B – средние затраты на восстановление; T – время эксплуатации ЛСБ без учета гарантийного периода; F – планируемое количество запасных ЛСБ; MF – незапланированное количество запасных ЛСБ; C_0 – стоимость одного ЛСБ.

Во втором варианте (W_{22}) предполагается, что авиакомпания имеет НАСК, который может проверять отказавшие ЛСБ в аэропорту, но не может осуществлять поиск отказавшего ССЕ. При этом ЛСБ, признанные неработоспособными, отправляются на завод-изготовитель для восстановления. Ошибочно демонтированные ЛСБ будут возвращены в обменный фонд. При этом

$PZ_2 = \text{Затраты на обслуживание до отказа} + \text{Затраты на доставку ЛСБ} + \text{Затраты на восстановление ЛСБ на заводе-изготовителе} + \text{Затраты на контроль с помощью НАСК} + \text{Затраты на запасные ЛСБ}.$

Полные экономические затраты PZ_2 можно представить в следующем виде:

$$Z_2 = mN \left[\left(C_{TR} + C_R \right) P_{RF} + C_B + (C_0 + C_{KR} + C_M) \right] \times T / MSI + C_{ATE} / M + (F + MF)C_0, \quad (9)$$

где P_{RF} – условная вероятность правильного признания неработоспособного ЛСБ неработоспособным по результатам контроля с помощью НАСК; C_{ATE} – затраты на эксплуатацию и закупку НАСК; M – количество типов ЛСБ.

В третьем варианте (W_{23}) авиакомпания имеет НАСК, который позволяет не только осуществлять контроль работоспособности ЛСБ, но и производить поиск неисправности с глубиной до одного и более ССЕ. Восстановление ЛСБ при этом осуществляется после замены модулей, восстановленных на заводе-изготовителе. Составляющие затрат PZ_3 можно представить в таком виде:

$PZ_3 = \text{Затраты на обслуживание до отказа} + \text{Затраты на доставку ЛСБ} + \text{Затраты на восстановление модулей на заводе-изготовителе} + \text{Затраты на контроль с помощью НАСК} + \text{Затраты на запасные ССЕ.}$

Математическое описание затрат PZ_3 следующее:

$$Z3_3 = mN\{[C_{TRM} + C_{RM} + C_B + (C_{PO} + C_{BM})]P_{RF} + C_E + (C_\delta + C_{KR} + C_M)\} \frac{T}{MSI} + \frac{C_{ATE}}{M} + (F + MF)C_0 + \sum_{j=1}^n C_j F_j, \quad (10)$$

где C_{TRM} – усредненные затраты на доставку ССЕ на завод-изготовитель; C_{RM} – средние затраты на восстановление модуля; C_{PO} – среднее время поиска отказа; C_{BM} – среднее время на восстановление отказавшего модуля; C_j – затраты на восстановление j -го ССЕ; F_j – планируемое количество запасных ССЕ j -го типа, n – общее число модулей в ЛСБ.

4. Оптимизация обменного фонда ЛСБ

Из (8) – (10) следует, что полные экономические затраты для каждой стратегии ТО являются функциями как планируемого (F), так и непланируемого (MF) количества запасных ЛСБ в обменном фонде базового аэропорта. Оптимальное количество запасных ЛСБ (F) может быть найдено по критерию [3]

$$\min\{BST - (t_\delta + MWT(F) + t_M + t_{BN})\}, \quad (11)$$

где BST – планируемое время стоянки воздушного судна в базовом аэропорту; t_{BN} – время восстановления ЛСБ с помощью НАСК; $MWT(F)$ – время доставки запасного ЛСБ из обменного фонда. Как следует из критерия (5), если $BST \geq (t_\delta + WT + t_M + t_{BN})$, то нарушения регулярности полетов не будет, где WT – время поступления ЛСБ из обменного фонда. С другой стороны, если $BST < (t_\delta + WT + t_M + t_{BN})$, то будет наблюдаться нарушение регулярности полетов. Для определения оптимального количества запасных ЛСБ требуется разработать математическую модель системы обеспечения базового аэропорта запасными блоками. Работа такой системы была описана с помощью Марковских дискретных случайных процессов. Оптимальное количество

запасных модулей для j -го типа было определено как минимальное целое число, удовлетворяющее условию

$$1 - P(Q_j) > \frac{(Q_j \lambda_j T_{Bj})^{(F_j+1)}}{(F_j+1)!} \exp(-Q_j \lambda_j T_{Bj}), \quad (12)$$

где $Q_j = mN + F_j$ – общее количество ССЕ j -го типа; $P(Q_j)$ – вероятность того, что все ЛСБ оснащены модулями j -го типа; T_{Bj} – время восстановления ССЕ j -го типа.

Очевидно, что количество запасных ЛСБ зависит от числа эксплуатируемых ВС. Так, например, для первого варианта ТО (в базовом аэропорту отсутствует НАСК) зависимость значения F для различных значений N при $\alpha=0,01$ и $\alpha=0,001$, при фиксированном значении λ , приведена в табл.1.

Таблица 1. Зависимость количества запасных ЛСБ от числа эксплуатируемых ВС

N	1	2	3	4	5	6	7	8
$F(\alpha = 0,01)$	4	6	6	6	7	8	8	9
$F(\alpha = 0,001)$	3	3	4	4	4	4	6	6

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Функция $F(N)$ является целочисленной возрастающей функцией. Снижение точности контроля (увеличение α) ведет к существенному увеличению числа запасов ЛСБ. При малых значениях α функция $F(N)$ менее чувствительна к количеству ВС в базовом аэропорту. Все это показывает, что достоверность НАСК оказывает существенное влияние на эффективность ТО и всей системы обеспечения запасными ЛСБ.

5. Выбор оптимального варианта системы технического обслуживания

Рассмотрим пример определения наилучшего варианта ТО для доплеровского измерителя скорости (DME). На самолете устанавливается вдвойный комплект DME ($m = 2$). Предположим что DME установлен на среднемагистральном B737. Выбранный DME имеет модульную конструкцию и состоит из трех ССЕ: передатчика (TM), приемника (RM), электронного блока управления и питания (EPSM). В табл. 2 представлены основные параметры для каждого j -го типа ССЕ: λ_i – интенсивность отказов (1/час); C_j – затраты на восстановление (у.е.); T_{RSj} – время восстановления (час); TFD_j – время замены (час).

Таблица 2. Основные параметры ССЕ доплеровского измерителя скорости

Тип ССЕ	λ_j	C_j	T_{RSj}	TFD_j	C_{RMj}	TRM_j
TM ($j = 1$)	0,00013	2500	120	0,25	250	0,25
RM ($j = 2$)	0,00005	5200	120	0,25	52	0,08
EPSM ($j = 3$)	0,00002	300	120	0,25	30	0,08

Остальные параметры одинаковы для всех вариантов стратегии обслуживания:

$$N = 8; C_{TR} = 100 \text{ у.е.}; C_0 = 8000 \text{ у.е.}; C_B = 10 \text{ у.е./ч}; T = 40000 \text{ ч}; \tau = 4 \text{ ч}; t_0 = t_M = 0,25 \text{ ч};$$

$$\lambda = 2 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}; t_{KR} = 0,25 \text{ ч}; \alpha = 0,005; BST = 1 \text{ ч}.$$

Среднее время доставки T_{ND} запасного блока DME с завода-изготовителя составляет 40ч. Средние затраты на восстановление блока на заводе-изготовителе C_B были определены из условия, что они составляют 10% от C_0 , т.е. $C_B = 800$ у.е. Для второго и третьего вариантов СОБО было рассчитано, что $C_{НАСК} = 300000$ у.е., $M = 25$, $C_{TRM} = 15$ у.е. и $C_{RM} = 296$ у.е. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры различных вариантов стратегий ТО

Вариант ТО	$MS1$ (ч)	F (шт)	MF (шт)	PZ (у.е.)
1	690	6	1	88700
2	690	3	0	14300
3	690	1	0	6800

Планируемое количество запасных модулей было рассчитано с вероятностью $P(Q_j) = 0,995$ ($j = 1, 2, 3$). Используя неравенство (5), мы получили $F_1 = 2$ (два запасных TMS) и $F_2 = F_3 = 1$ (один запасной RM и один запасной EPSM).

Из табл. 3 следует, что третий вариант СОБО является наилучшим. Он предусматривает один запасной DME, два запасных TMS, один запасной RM и один запасной EPSM.

6. Выводы

Таким образом, в данной статье были предложены математические модели для описания различных вариантов стратегий технического обслуживания изделий современной авионики. Впервые разработаны математические модели, которые включают в себя, кроме основных технических и экономических показателей, оптимальное количество запасных ЛСБ, рассчитываемое из условия обеспечения заданной регулярности полетов. Система обеспечения запасов смоделирована с использованием теории Марковских дискретных случайных процессов. Данные результаты позволяют на практике производить расчет оптимальных запасов не только для эксплуатируемого парка ВС, но и с учетом планируемых поставок ВС для авиакомпании. Кроме того, предложенные модели позволяют оценить целесообразность использования встроенных, переносных либо базовых средств контроля для конкретного аэропорта. Все это позволит выбрать наиболее оптимальную стратегию технического обслуживания ВС и получить максимальную прибыль для авиакомпании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДСТУ 3372-96. Організація гарантійного обслуговування авіаційної техніки. Основні положення. Чинний від 1997.07.01.

2. Мачалин И.А., Конахович Г.Ф., Ткалич О.П. Аппроксимация одного класса случайных процессов в задачах контроля радиоэлектронных систем // Материалы IV МНТК "АВИА-2002". – Киев. – 2002. – С. 67–69.
3. Ulanskyi V., Machalin I. Modern avionics breakdown maintenance strategy and total lifetime operating costs // Материалы VI МНТК "Авіа-2004". – Киев. – 2004. – Т. 2. – С. 27–30.