

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СОТРУДНИКОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ДОРАБОТКИ НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЁТОВ

Марон А.И. *, Марон М.А. **, Липатников А.Ю. ***

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия*

** e-mail: amaron@hse.ru*

*** e-mail: mmaron@hse.ru*

**** e-mail: alipatnikov@hse.ru*

Статья поступила в редакцию 09.06.2019

Актуальность исследования обусловлена тем, что цифровизация управления воздушным движением увеличивает число проектов доработки наземных средств радиотехнического обеспечения полётов воздушных судов (средств РТОП). Цель статьи — предложить легко реализуемый метод расчёта количества сотрудников для реализации проектов доработки в установленные сроки, в котором будет учтено, что эти же сотрудники обеспечивают оперативное восстановление исправности средств РТОП. Классические методы расчёта систем массового обслуживания, основанные на расчёте вероятностей пребывания системы в различных состояниях, практически не применимы из-за размерности данной задачи. В статье поставленная задача решена с помощью метода динамики средних. Разработана программа для проведения в MathCAD PRIME расчётов требуемого количества сотрудников. Материалы статьи представляют практическую ценность для руководителей служб эксплуатации радиотехнического обеспечения полётов и связи и менеджеров, уполномоченных осуществлять планирование проектов доработки.

Ключевые слова: наземные средства радиотехнического обеспечения полётов, техническое обслуживание, доработка, планирование проекта.

Введение

Средства связи и навигации с земли являются важной компонентой наземной авиационной техники [1, с. 19-24, 2, 3]. Правила их эксплуатации чётко регламентированы во всём мире [4]. В России Федеральные авиационные правила [5] (далее Правила) устанавливают в пункте 3.1, что радиотехническое обеспечение полётов воздушных судов и авиационная электросвязь осуществляются посредством организации технической эксплуатации объектов и средств РТОП и связи. Техническую эксплуатацию осуществляет служба эксплуатации радиотехнического обеспечения полётов и связи (далее — ЭРТОС). Мероприятия по проведению доработок средств РТОП и связи являются одной из составляющих технической эксплуатации. Доработка средств проводится в целях улучшения их характеристик, включая пока-

затели безотказности и ремонтпригодности [6, 7]. Доработка конкретного средства, экземпляры которого размещены на объектах РТОП и связи, входящих в зону ответственности центра организации воздушного движения (ОВД), представляет собой проект. Этот проект инициируется бюллетенем, который составляет предприятие-разработчик и вводит в действие Росавиация.

Рассмотрим проект доработки, который, согласно типу бюллетеня, должен быть выполнен силами крупного центра ОВД, в структуру которого входит служба ЭРТОС. Проект представляет собой модернизацию заданного средства РТОП путём замены определённого количества его элементов на более совершенные. Известно, что модернизируемое средство входит в состав большого числа объектов РТОП, рассредоточенных на местности, в силу чего и количество экземпляров

средства, в которых необходимо произвести замену элементов, и время модернизации каждого экземпляра велики. Так, только одно из подразделений службы ЭРТОС Санкт-Петербургского центра ОВД — участок навигации и радиоретрансляционных пунктов (УН и РТРП) — осуществляет техническую эксплуатацию оборудования радиоретрансляционных пунктов в зоне от Приозёрска до Н. Новгорода [8]. В дальнейшем будем называть множество экземпляров модернизируемого средства *системой*. Для выполнения проекта необходимо сформировать проектную команду из сотрудников службы ЭРТОС в количестве, достаточном для его реализации в заданный срок. При этом обязательно надо учесть, что и в период модернизации необходимо осуществлять плановое техническое обслуживание (ТО), а также текущие и плановые ремонты. Плановые мероприятия по ТО и ремонту регламентированы, и соответствующие им трудозатраты фиксированы. Текущий же ремонт согласно п. 3.40 Правил производится как для восстановления при отказах, так и для устранения неисправностей. Соответственно, время между текущими ремонтами системы является случайной величиной. Нарботка на отказ современных средств РТОП и связи достигает десятков тысяч часов. Это обеспечивается как резервированием, так и ТО [6, 9]. Вместе с тем дефекты, вызывающие переход средства из исправного в неисправное работоспособное состояние, возникают значительно чаще, чем дефекты, приводящие к неработоспособности. Они требуют оперативно-го устранения, так как увеличивают вероятность возникновения отказа [10]. Так, средство, имеющее 100%-ный резерв, при отказе полуккомплекта остаётся работоспособным, но становится средством без резервирования и требует проведения текущего ремонта. Трудозатраты, связанные с проведением текущих ремонтов, могут занимать значительную часть рабочего времени сотрудников службы ЭРТОС, назначенных на проект модернизации. Для служб ЭРТОС типичной является функциональная организационная структура со специализацией подразделений по эксплуатируемым средствам. Соответственно, модернизируемое средство обслуживается сотрудниками одного определённого подразделения. Совершенно не факт, что в данном подразделении есть количество сотрудников, имеющих допуск к самостоятельной работе по ТО и ремонту модернизируемого средства, достаточное для того, чтобы сформировать только из них команду, которая выполнит модернизацию в заданный срок. Более того, интуитив-

но понятно, а далее это будет подтверждено расчётами, что если численность таких сотрудников минимально достаточна только для эксплуатации исходной (немодернизированной) системы, то они не смогут в приемлемые сроки осуществить модернизацию. Придётся привлечь к работам дополнительных сотрудников. Это вызовет затраты, даже если это будут сотрудники из других отделов службы ЭРТОС, что возможно только после соответствующего обучения. Естественно поэтому стремление минимизировать затраты за счёт точного расчёта минимально необходимого дополнительного количества сотрудников.

В настоящее время эта проблема не решена. Классические методы расчёта систем массового обслуживания, основанные на расчёте вероятностей пребывания системы в различных состояниях [11, 12], практически не применимы из-за размерности данной задачи. Методы имитационного моделирования описывают частные случаи и без найденных аналитически начальных приближений к искомой численности персонала не гарантируют решения задачи [13]. В работе [14] с помощью метода динамики средних получены формулы для расчёта минимальной численности персонала и количества запасных элементов, при которых в большой системе, состоящей из подсистем, удалённых от центра обслуживания, не возникают очереди на ремонт и замену. Модернизация системы в этой работе не рассматривалась. Из вышесказанного следует, что задача определения количества персонала для модернизации средств РТОП и связи является актуальной. Её решение впервые приводится в данной статье.

Постановка задачи

Система состоит из N экземпляров определённого средства РТОП, которые в дальнейшем будем называть *элементами системы* или просто *элементами*. Принято решение модернизировать систему. Будем называть исходные элементы системы элементами типа 1, модернизированные элементы будем называть элементами типа 2. Модернизация считается завершённой, когда модернизированы все элементы. Проект модернизации должна осуществить команда из r сотрудников. Эти же сотрудники осуществляют текущий ремонт (ТР) при возникновении дефектов, приводящих к отказам или неисправностям элементов. Отказ элемента не приводит к отказу системы, но существенно ухудшает её работу. ТР одного элемента выполняет один сотрудник. Модернизацию одного элемента выполняет один сотрудник. ТР име-

ет более высокий приоритет, чем модернизация, и тогда, когда он требуется для восстановления работоспособности элемента, и тогда, когда он требуется для устранения неисправности. Среднее время между ТР элемента типа 1 равно T_1 . Среднее время между ТР элемента типа 2 равно T_2 . Среднее время ТР элемента типа 1 равно T_{r1} . Среднее время ТР элемента типа 2 равно T_{r2} . Среднее время модернизации одного элемента равно T .

Требуется определить зависимость времени выполнения проекта модернизации t_d от r .

Метод решения и принятые допущения

Количество экземпляров модернизируемого средства в зоне ответственности службы ЭРТОС крупного центра ОВД может быть достаточно велико, что даёт возможность применить для решения задачи метод динамики средних. Будем предполагать, что случайные величины: время между ТР элемента типа 1, время между ТР элемента типа 2, время ТР элемента типа 1, время ТР элемента типа 2 и время модернизации одного элемента подчинены экспоненциальным законам распределения вероятностей с параметрами (интенсивностями) $\lambda_1, \lambda_2, \beta_1, \beta_2, \mu$, которые обратно пропорциональны средним значениям указанных времён.

Обозначим исправные состояния элементов типа 1 и типа 2 через S_1 и S_2 соответственно. Неисправные состояния элементов типа 1 и типа 2 обозначим через S_3 и S_4 соответственно. Среднюю численность (количество) элементов, находящихся в состоянии S_1 в момент времени t , обозначим через $m_1(t)$. Аналогичные характеристики состояний S_2, S_3, S_4 обозначим через $m_2(t), m_3(t), m_4(t)$.

Граф возможных переходов элементов из одного состояния в другое приведен на рис. 1. На этом же рисунке приведены и обозначения интенсивности переходов.

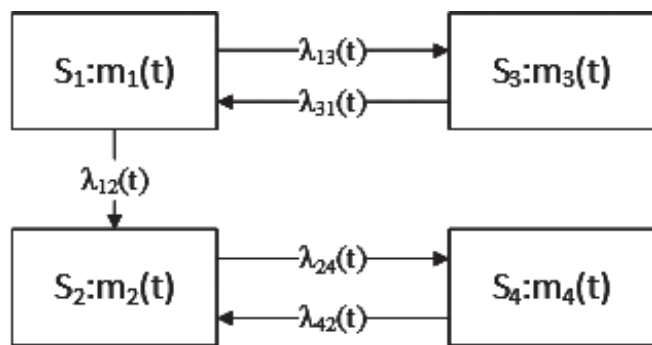


Рис. 1. Граф возможных переходов элементов

Изменение средних численностей элементов, находящихся в различных состояниях, задаётся системой дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с методом динамики средних:

$$\begin{cases} \frac{dm_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}(t)m_1(t) - \lambda_{13}(t)m_1(t) + \lambda_{31}(t)m_3(t); \\ \frac{dm_2(t)}{dt} = \lambda_{12}(t)m_1(t) - \lambda_{24}(t)m_2(t) + \lambda_{42}(t)m_4(t); \\ \frac{dm_3(t)}{dt} = \lambda_{13}(t)m_1(t) - \lambda_{31}(t)m_3(t); \\ \frac{dm_4(t)}{dt} = \lambda_{24}(t)m_2(t) - \lambda_{42}(t)m_4(t). \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия:

$$m_1(0) = N; m_2(0) = m_3(0) = m_4(0) = 0. \quad (2)$$

Одна из искоемых функций в системе (1) может быть выражена через другие, поскольку в любой момент времени

$$m_1(t) + m_2(t) + m_3(t) + m_4(t) = N. \quad (3)$$

Определим интенсивности переходов. В соответствии с принципом квазирегулярности метода динамики средних интенсивность перехода элемента из состояния S_i в S_j рассчитывается как отношение суммарной интенсивности потока событий, переводящих элементы из S_i в S_j , к среднему числу элементов, находившихся в S_i [15, с. 300—314]. Применяв это правило, получим:

$$\begin{cases} \lambda_{13} = \lambda_1; \\ \lambda_{24} = \lambda_2. \end{cases} \quad (4)$$

Действительно, суммарная интенсивность потока отказов, переводящих элемент первого типа из состояния S_1 в S_3 , равна произведению $m_1(t)$ на λ_1 . Разделив на $m_1(t)$, получим выражение формулы (4) для λ_{13} . Аналогичным образом получено выражение для λ_{24} . Только эти коэффициенты системы уравнений (1) не зависят от времени. Так, суммарная интенсивность потока модернизации определяется количеством сотрудников $r_u(t)$, которые не заняты восстановлением элементов, находящихся в состояниях S_3 и S_4 :

$$r_u(t) = r - m_3(t) - m_4(t). \quad (5)$$

Если все сотрудники заняты восстановлением, то модернизация не производится и интенсивность перехода $\lambda_{12} = 0$. Если $r_u(t)$ не меньше, чем $m_1(t)$, то одновременно модернизируются $m_1(t)$ элементов. Если же $r_u(t)$ меньше, чем $m_1(t)$, то только $r_u(t)$ объектов модернизируются в момент времени t . Имеем

$$\lambda_{12}(t) = \begin{cases} 0, & r \leq m_3(t) + m_4(t); \\ \mu(t), & r - m_3(t) - m_4(t) > m_1(t); \\ \mu \frac{r - m_3(t) - m_4(t)}{m_1(t)}, & r - m_3(t) - m_4(t) \leq m_1(t). \end{cases} \quad (6)$$

Определим $\lambda_{31}(t)$. При этом будем считать, что модернизированные элементы имеют более высокий приоритет на ТР, чем исходные элементы. Учитывая, что ТР имеет более высокий приоритет, чем модернизация, и рассуждая аналогично тому, как это было сделано выше, получим

$$\lambda_{31}(t) = \begin{cases} 0, & r \leq m_4(t); \\ \beta_1, & r - m_4(t) > m_3(t); \\ \beta_1 \frac{r - m_4(t)}{m_3(t)}, & r - m_4(t) \leq m_3(t). \end{cases} \quad (7)$$

Найдем $\lambda_{42}(t)$. Её значение полностью определяется соотношением между r и $m_4(t)$ и может быть записано в виде

$$\lambda_{42}(t) = \beta_2 \frac{\min(r, m_4(t))}{m_4(t)}. \quad (8)$$

Решение системы (1) с учётом начальных условий и указанных значений коэффициентов определяет искомую зависимость времени модернизации t_d от r .

Расчёт количества сотрудников для проекта модернизации

Службе ЭРТОС необходимо реализовать проект модернизации средства РТОП. В зоне ответственности на объектах РТОП находится $N = 55$ экземпляров средства.

Наработка на отказ исходного средства $T_{01} = 20\,000$ ч. Наработка на отказ модернизирован-

ного средства $T_{02} = 28\,000$ ч. Среднее время ТР исходного (немодернизированного) средства $T_{r1} = 6$ ч.

ТР средства производится на объекте его расположения и может включать в себя замену составных частей или их ремонт.

Среднее время складывается из среднего времени следования к объекту РТОП, на котором размещено средство, и среднего времени выполнения на объекте указанных операций. Среднее время следования от модернизации не зависит и остаётся значительным для рассредоточенной системы, в силу чего среднее время ТР модернизированного средства мало отличается от исходного. Вместе с тем средние затраты времени на выполнение работ по ТР для модернизированного средства должны быть меньше, чем для исходного. По крайней мере не больше, поскольку в противном случае происходит явная дискредитация модернизации в глазах персонала [16]. В нашем случае $T_{r2} = 5$ ч. Модернизация должна быть выполнена не более чем за $T_p = 15$ дней. Требуется определить количество сотрудников r , необходимое для реализации проекта в установленный срок, при условии, что период модернизации оперативность ТР не должна снижаться.

Прежде всего определим значения среднего времени между ремонтами для исходного средства РТОП и для модернизированного. Для этого обратимся к Правилам. В пункте 3.40 записано: «Текущий ремонт производится после выявления или предпосылок к возникновению неисправностей и/или отказов, обнаруженных в процессе эксплуатации средств РТОП и связи». Неисправность средства выявляется в результате оперативного контроля. Если нет системы автоматического диагностирования, способной сообщать данные о состоянии средства в центр технической эксплуатации, то основным мероприятием оперативного контроля является оперативное техническое обслуживание (ТО-1). Согласно пункту 6.2 Правил время между ТО-1 равно корню квадратному из удвоенной наработки средства на отказ. Получаемое значение можно считать средним временем между ТР. Это отражает тот факт, что дефекты, вызывающие переход средства РТОП из исправного в неисправное работоспособное состояние, возникают значительно чаще, чем дефекты, приводящие к неработоспособности. В нашем случае имеем: $T_1 = 200$ ч., $T_2 = 237$ ч. Блок решения и результат расчёта времени выполнения проекта модернизации t_d при количестве сотрудников $r = 6$ приведены на рис. 2.

Добавочное слагаемое, которое обеспечивает ненулевые знаменатели $\varepsilon := 0.01$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ СРЕДНИХ

$$m_1'(t) = - \left(\mu \cdot \frac{\text{if}(r \leq (m_3(t) + m_4(t)), 0, \text{if}(r - m_3(t) - m_4(t) > m_1(t), m_1(t), r - m_3(t) - m_4(t)))}{m_1(t) + \varepsilon} \right) \cdot (m_1(t) + \varepsilon) \downarrow$$

$$- \lambda_1 \cdot m_1(t) + \left(\beta_1 \cdot \frac{\text{if}(r \leq m_4(t), 0, \text{if}((r - m_4(t)) > m_3(t), m_3(t), r - m_4(t)))}{m_3(t) + \varepsilon} \right) \cdot (m_3(t) + \varepsilon)$$

$$m_2'(t) = \left(\mu \cdot \frac{\text{if}(r \leq (m_3(t) + m_4(t)), 0, \text{if}(r - m_3(t) - m_4(t) > m_1(t), m_1(t), r - m_3(t) - m_4(t)))}{m_1(t) + \varepsilon} \right) \cdot (m_1(t) + \varepsilon) \downarrow$$

$$- \lambda_2 \cdot m_2(t) + \left(\beta_2 \cdot \frac{\min(m_4(t), r)}{m_4(t) + \varepsilon} \right) \cdot (m_4(t) + \varepsilon)$$

$$m_3'(t) = \lambda_1 \cdot m_1(t) - \left(\beta_1 \cdot \frac{\text{if}(r \leq m_4(t), 0, \text{if}((r - m_4(t)) > m_3(t), m_3(t), r - m_4(t)))}{m_3(t) + \varepsilon} \right) \cdot (m_3(t) + \varepsilon)$$

Общая численность объектов не меняется -

$$m_4(t) = N - (m_1(t) + m_2(t) + m_3(t))$$

Начальные значения

$$m_1(0) = N \quad m_2(0) = 0 \quad m_3(0) = 0 \quad m_4(0) = 0$$

РЕШЕНИЕ

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} := \text{odesolve} \left(\begin{bmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ m_3(t) \\ m_4(t) \end{bmatrix}, 1000 \right) \quad f(t) := M_1(t) - 0.4$$

Время модернизации [день]; [неделя]

$$t_d := \text{root}(f(t), t, 0, 500) = 13.167 \quad [\text{день}] \quad t_w := \frac{t_d}{7} = 1.881 \quad [\text{неделя}]$$

Время модернизации, без затрат времени на восстановление [день]; [неделя]

$$T_d := T \cdot \frac{N}{24 \cdot r} = 9.167 \quad ; \quad T_w := T \cdot \frac{N}{24 \cdot 7 \cdot r} = 1.31$$

Увеличение времени модернизации из-за затрат времени на восстановление

$$T_{da} := t_d - T_d = 4 \quad ; \quad T_{wa} := t_w - T_w = 0.571$$

Изменение время модернизации при специализации сотрудников [день]

$$T_{sp} := T \cdot \frac{N}{24 \cdot (r - r_1)} = 13.75 \quad T_{asp} := T_{sp} - t_d = 0.583$$

Рис. 2. Решение системы (1) в MathCAD PRIME 4.0 (фрагмент программы)

Несмотря на то, что это жёсткая система нелинейных дифференциальных уравнений, MathCAD PRIME обеспечивает необходимую точность численного решения [17]. Определяя количество сотрудников, надо иметь в виду, что минимальное количество сотрудников, обеспечивающее отсутствие очередей на восстановление исходной системы, равно:

$$r_1 = \left\lceil \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \beta_1} N \right\rceil. \quad (9)$$

Эту формулу можно получить из уравнения Колмогорова–Чепмена для марковской модели надёжности восстанавливаемого элемента [11], также она является частным случаем формул расчёта минимальной численности персонала и количества запасных элементов, для восстановления и ремонта распределённой системы, каждая под-

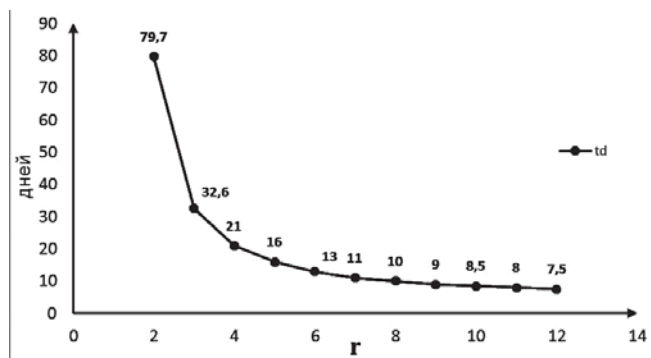


Рис. 3. Зависимость времени модернизации от количества сотрудников

система которой состоит из определённого числа элементов с независимыми отказами [14]. В нашем случае $r_1 = 2$. Расчёты показали, что если не увеличить количество сотрудников относительно r_1 , то длительность проекта модернизации будет недопустимо большой. Зависимость времени t_d выполнения проекта модернизации от количества сотрудников r представлена на рис. 3.

Как видно, добавление одного сотрудника к минимальному их количеству, необходимому для оперативного восстановления, резко снижает длительность проекта модернизации системы. Далее эта длительность убывает с ростом r по кривой, подобной экспоненте в отрицательной степени с определёнными коэффициентами. В результате имеем, что проект будет выполнен за 13 дней. Это укладывается в плановый срок, если будет работать команда из $r = 6$ сотрудников.

Возникает вопрос целесообразно ли разделить команду, поручив $r_1 = 2$ сотрудникам осуществлять восстановление, остальным $r_a = 4$ — модернизацию. Ответ отрицательный. Расчёт показывает, что такая специализация не приведёт к уменьшению длительности проекта (см. рис. 2). На рис. 4 показано, как при реализации проекта модернизации системы изменяются средние значения численности элементов, находящихся в различных состояниях.

Среднее количество работоспособных элементов в модернизированной системе будет равно

$$m_2 = \frac{\beta_2}{\lambda_2 + \beta_2} N. \quad (10)$$

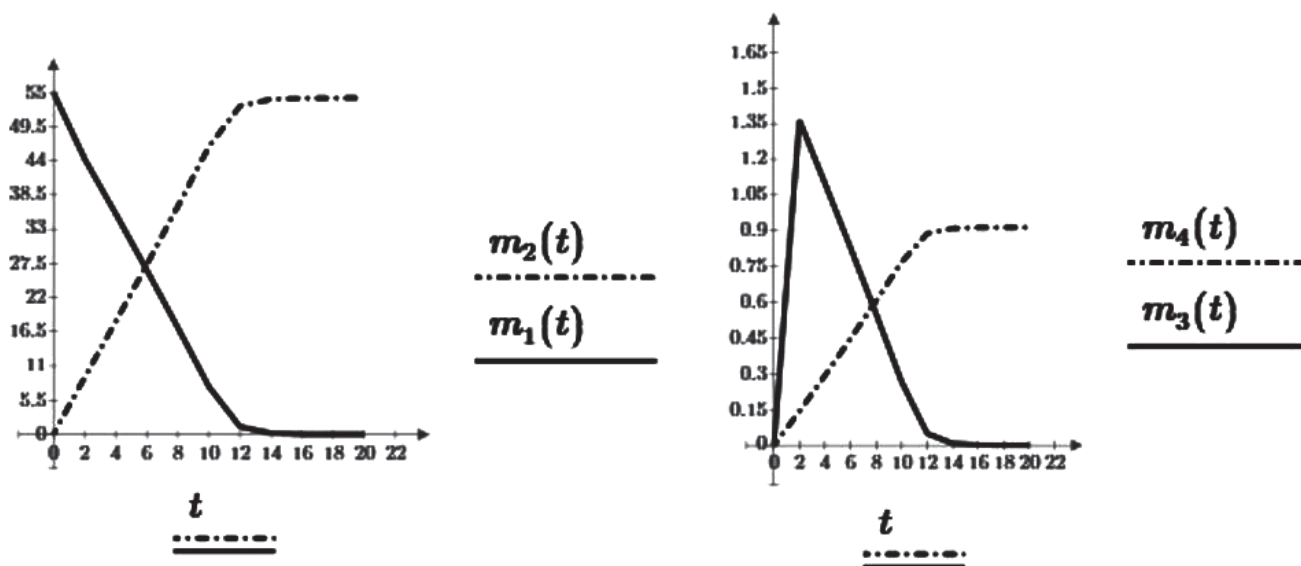


Рис. 4. Изменение количества исправных и неисправных исходных элементов $m_1(t)$, $m_3(t)$ и модернизированных элементов $m_2(t)$, $m_4(t)$ при доработке системы РТОП

Соответственно, среднее количество неработоспособных элементов в модернизированной системе будет равно

$$m_4 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \beta_2} N. \quad (11)$$

В нашем случае: $m_2 = 54,09$; $m_4 = 0,91$. Результаты расчётов, представленные графиками на рис. 4, подтверждают данный факт. Для обеспечения этого наилучшего режима эксплуатации модернизированной системы достаточно будет выделить $r_2 = 1$ сотрудника. Это количество находится по формуле, аналогичной (9). Конечно, значительную часть рабочего времени сотрудников занимают плановые техническое обслуживание и ремонты. Простейший способ учесть это состоит в том, чтобы увеличить численность сотрудников обратно пропорционально доле времени, свободного от плановых работ в их общем балансе рабочего времени. Учёт некруглосуточной работы сотрудников можно осуществить добавлением определённых слагаемых к времени ТР и времени модернизации аналогично тому, как это сделано в работе [14]. Если же необходимо более точно учитывать затраты времени на плановые мероприятия, то придётся применить методы имитационного моделирования [18], поскольку процесс не будет марковским из-за наличия последствия.

Анализ полученных результатов

Предположение о том, что время между отказами объекта подчинено экспоненциальному закону распределения, является существенным, хотя метод динамики средних даёт приемлемые результаты и тогда, когда на элементы системы действует нестационарный пуассоновский поток событий. Заметим, что для современных электронных элементов предположение об экспоненциальном законе распределения времени между отказами, как правило, выполняется. Время восстановления и время модернизации объектов в реальных системах часто не являются экспоненциально распределённым. Это особенно характерно для систем, в которых объекты рассредоточены. Однако, как показал имитационный эксперимент, зависимость времени модернизации системы от числа сотрудников, рассчитанная предложенным методом, не сильно отличается от той, которую даёт имитационная модель. Совпадение особенно близкое при треугольном распределении времени восстановления объекта и времени его модернизации. Эти

распределения наиболее часто подходят для реальных систем, особенно распределённых, для которых важной составляющей является время следования к объекту. В любом случае результаты, основанные на решении системы (1), являются хорошим начальным приближением к искомой численности сотрудников. Бессмысленно пытаться с помощью имитационного моделирования детально учесть конкретные особенности восстановления и модернизации конкретных систем, не имея начального приближения [13]. Для их нахождения служат аналитические методы теории массового обслуживания, с помощью одного из которых и получены результаты, представленные в данной работе. Точные аналитические методы [11, 12, 19] основаны на уравнениях Колмогорова, позволяющих рассчитать изменение во времени вероятностей нахождения системы в возможных состояниях. Зная вероятности, можно рассчитать любые характеристики системы, в том числе и искомые средние численности (математические ожидания) элементов. Однако эти методы предполагают рассмотрение всех состояний именно системы, а не элемента. Таких состояний в нашем случае будет N^4 . Очевидно, что при $N > 10$ если и удастся решить систему уравнений Колмогорова, то результат всё равно будет необозримым. Именно поэтому был применён метод динамики средних, который позволил сразу найти искомые средние численности, решив систему всего лишь из четырёх дифференциальных уравнений. Заметим, что при применении метода динамики средних сложность решения не увеличивается с ростом числа элементов, а точность результатов повышается. В работах, посвящённых резервированию и парированию отказов, основная проблема состоит в том, какие элементы системы и в каком количестве надо резервировать, чтобы обеспечить требуемые показатели безотказности [11, 12, 20–22]. Работы, посвящённые парированию отказов, получили значительное развитие в связи с внедрением распределённых вычислительных сетей [23, 24]. Расчёту периодичности ТО авиационной техники и автоматизации его планирования посвящены работы [25, 26]. Большое число исследований по данной проблеме проведено и для железнодорожного транспорта. Основной сложностью в данных исследованиях является корректный учёт роста интенсивности отказов от длительности эксплуатации транспортных средств и её снижение в результате ТО и плановых ремонтов. В работах, посвящённых расчёту персонала и ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности) [6, 12],

рассматриваются, в первую очередь, системы, в которых отказ элемента приводит к отказу системы, а резервирование как бы откладывает отказ на определённое время, в течение которого отказавший элемент надо заменить. При этом численность персонала обычно считается определённой ранее и достаточной. В работе [14] рассматривается нерезервированная распределённая система, состоящая из одинаковых подсистем, в которой отказ подсистемы не приводит к отказу всей системы, но ухудшает качество её функционирования. Предложен подход к расчёту минимальной численности персонала и ЗИП, при которой не возникает очередей на замену и ремонт. При этом считается, что каждая подсистема состоит из определённого количества различных элементов, одинаково необходимых для его работоспособности, и предполагается, что отказы элементов независимы.

Задача определения численности персонала для модернизации с учётом того, что эти же сотрудники осуществляют восстановление объектов при отказах, решена впервые в данной работе. Предложенный метод даёт практически точные результаты, когда количество экземпляров средств РТОП, которые надо модернизировать, составляет два десятка или больше. Если их меньше, то полученную численность сотрудников следует уточнить с помощью имитационного моделирования, используя метод системной динамики. При этом граф модели в AnyLogic или PowerSim будет подобен рис. 1, а система дифференциальных уравнений, по которой осуществляются расчёты, аналогична системе (1). Разница состоит в том, что в знаменателях для интенсивностей переходов будут стоять не средние, а текущие значения численности элементов. Именно это — отказ от принципа квазирегулярности — позволяет при имитационном моделировании уточнить результаты, полученные на основе метода динамики средних.

Выводы

На основании исследования, результаты которого изложены в данной статье, можно сформулировать следующие выводы и рекомендации.

- Впервые предложен метод решения задачи расчёта количества сотрудников для выполнения проектов доработки наземных средств РТОП, в котором учтено, что эти же сотрудники должны обеспечивать оперативное восстановление исправности средств и во время реализации проектов. Теоретической базой решения является метод динамики средних.

- Разработана программа для расчётов в MathCAD PRIME требуемого количества сотрудников.

- Полученные результаты рекомендуется использовать при планировании проектов, доработки наземных средств РТОП и связи. Они позволяют точно и своевременно определить количество сотрудников, необходимых для реализации проекта в заданные сроки. Это даёт время руководству службы ЭРТОС для того, чтобы или провести обучение дополнительных сотрудников на право проведения работ с модернизируемым средством, или нанять по временному контракту внешних специалистов, уже имеющих соответствующий допуск.

Библиографический список

1. *Сяляков В.А., Красюк В.Н.* Системы авиационной радиосвязи: Учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2004. — 160 с.
2. *Nolan M.S.* Fundamentals of Air Traffic Control. — Boston: Cengage Learning, 2015. — 688 p.
3. *Тин П.Ч.* Автоматизация оперативного распределения воздушных судов между трассами захода на посадку в московском аэроузле при внезапном изменении метеоусловий // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 128-140.
4. *Kabashkin I., Kundler J.* Benchmarking of maintenance and service processes in air traffic control systems // Aviation. 2013. Vol. 17. No. 2, pp. 80-90. DOI: 10.3846/16487788.2013.805871
5. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь в гражданской авиации»: Приказ Министерства транспорта РФ от 20 октября 2014 г. N 297 // Российская газета. 2015. 21 января. № 9/1 (специальный выпуск).
6. *Макаровский И.М.* Основы технической эксплуатации и диагностики авиационной техники. — Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2004. — 116 с.
7. *Величко А.П.* Разработка наземных средств дистанционного контроля атмосферы // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 116-123.
8. Санкт-Петербургский центр обслуживания воздушного движения (ОВД). URL: <http://atcspb.ru>
9. *Kundler J.* Multidimensional meta-modelling for air traffic management service processes // Computer Modelling and New Technology. 2010. Vol. 14. No. 2, pp. 50–57.
10. Standard SAE JA1012 «A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard». — SAE International, 24 January 2002, — 57 p.
11. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. — М.: URSS, 2019. — 584 с.

12. *Кашинов В.А., Медведев А.И.* Теория надежности сложных систем. — М.: Физматлит, 2010. — 608 с.
13. *Kelton W.D., Sadowski R.P., Zupick N.B.* Simulation with Arena. — N.Y.: McGraw Hill, 2014. — 668 p.
14. *Лохманов В.М., Марон А.И.* Определение экономически обоснованной численности персонала и ЗИП для сложных систем в электроэнергетике // Вестник Московской академии рынка труда и информационных технологий. 2002. № 4. С. 18–22.
15. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972. — 552 с.
16. *Писаренко В.Н.* Управление контролепригодностью при эксплуатации объекта // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 1. С. 67–75.
17. *Воскобойников Ю.Е., Задорожный А.Ф.* Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD PRIME. — СПб.: Лань, 2016. — 224 с.
18. *Исаев Д.В.* Моделирование реализации проектов внедрения аналитических информационных систем // Аудит и финансовый анализ. 2014. № 6. С. 416–422.
19. *Баранов Н.А., Васильев И.В., Полянский В.В., Семенов И.М.* Марковские модели для оценки показателей безопасности функционирования сложных авиационных систем // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 5. С. 5–12.
20. *Ramirez-Marquez J.E., Coit D.W., Konak A.* Redundancy allocation for series-parallel systems using a max-min approach // IIE Transactions. 2004. Vol. 36. No. 9, pp. 891–898. DOI: 10.1080/07408170490473097
21. *Onishi J., Kimura S., James R.J.W., Nakagawa Y.* Solving the redundancy allocation problem with a mix of components using the improved surrogate constraint method // IEEE Transactions on Reliability. 2007. Vol. 56. No. 1, pp. 94–101. DOI: 10.1109/TR.2006.884602
22. *Sahoo L., Bhunia A.K., Roy D.* A Genetic Algorithm Based Reliability Redundancy Optimization for Interval valued Reliabilities of components // Journal of Applied Quantitative Methods. 2010. No. 5, pp. 270–287.
23. *Haken H.* Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems. — Berlin: Springer, 2000. — 258 p. DOI: 10.1119/1.15809
24. *Saifullah A.M., Tsin Y.H.* A Self-stabilizing Algorithm For 3-Edge-Connectivity // Stojmenovic I., Thulasiram R.K., Yang L.T., Jia W., Guo M., de Mello R.F. (eds) Parallel and Distributed Processing and Applications. ISPA 2007. Lecture Notes in Computer Science. Vol 4742. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74742-0_4
25. *Ямпольский С.М., Рубинов В.И., Головин В.Я.* Расчет периодичности работ по техническому обслуживанию и ремонту изделия авиационной техники с учетом характеристик и места комплектующих его элементов в структурно-логической схеме надежности // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 4. С. 94–99.
26. *Ямпольский С.М., Головин В.Я., Рубинов В.И.* Модель функционирования перспективной системы для автоматизированного планирования мероприятий инженерно-авиационного обеспечения // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 3. С. 19–26.

DEFINING THE NUMBER OF EMPLOYEES FOR PROJECT REALIZATION OF GROUND-BASED RADIO ENGINEERING FLIGHT SUPPORT MEANS UPGRADE

Maron A.I.* , Maron M.A. , Lipatnikov A.Yu.*****

*National Research University “Higher School of Economics”,
20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russia*

** e-mail: amaron@hse.ru*

*** e-mail: mmaron@hse.ru*

**** e-mail: alipatnikov@hse.ru*

Abstract

The study relevance is stipulated by the fact that at present the number of projects for ground-based flight support radio engineering means (REFSM) is increasing. The REFSM upgrade represents a project. Such project is associated with a large number of works to be performed. Thus, just one division of the

St. Petersburg Center for the of Air Traffic Organization performs technical operation of retranslation stations equipment in the area from Priozersk to Nizhni Novgorod. It is required defining the number of employees for the project completion in the specified time. It should be noted herewith that

the same employees ensure operative runability restoring of equipment. The error-free running time of modern REFSM means is tens of thousands hours. It is ensured by both redundancy and technical servicing. At the same time, the defects causing the unit transfer from the operation condition to the fault operable state occur more frequently than the defects leading to inoperability. Such defects require operative elimination since they increase the failure occurrence probability. This problem has not been resolved up to now. Classical methods for queuing systems computing are based on computing probabilities of the system being in various states. They are practically inapplicable due to the dimensionality of the problem under consideration. Simulation methods describe special cases only. They do not guarantee the solution of the problem without analytically found initial approximations to the required number of personnel. The presented article solves the problem by the mean dynamic method. It presents the program for performing computations of the required number of employees in MathCAD Prime. The example of the number of employees computation is given. The proposed method gives practically exact results when the number of units to be upgraded is a couple of dozen or more. In case they are less in number, the obtained number of employees should be refined by simulation. The values obtained by the proposed method herewith will be the initial approximations. The materials of the article are of practical value for the managers of the flight support and communication REFSM services while the upgrading projects planning.

Keywords: flight supporting ground-based radio engineering means, technical servicing upgrading, project planning.

References

1. Silyakov V.A., Krasnyuk V.N. *Sistemy aviatsionnoi radiosvyazi* (Aviation radio communications systems), St. Petersburg, GUAP, 2004, 160 p.
2. Nolan M.S. *Fundamentals of Air Traffic Control*. Boston, Cengage Learning, 2015, 688 p.
3. Tin P.Ch. Automation of aircrafts operational distribution among landing approach traces at Moscow terminal control area in sudden change of weather conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 128-140.
4. Kabashkin I., Kundler J. Benchmarking of maintenance and service processes in air traffic control systems. *Aviation*, 2013, vol. 17, no. 2, pp. 80-90. DOI: 10.3846/16487788.2013.805871
5. Ob utverzhdenii Federal'nykh aviatsionnykh pravil "Radiotekhnicheskoe obespechenie poletov vozdukhnykh sudov i aviatsionnaya elektrosvyaz' v grazhdanskoi aviatsii": Prikaz Ministerstva transporta RF ot 20 October 2014. No 297 (On approval of the Federal Aviation Regulations "Radio technical support of aircraft flights and aviation telecommunications in civil aviation": Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of October 20, 2014 N 297). Moscow, *Rossiiskaya gazeta*. 21 January 2015, no. 9/1 (special issue).
6. Makarovskii I.M. *Osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii i diagnostiki aviatsionnoi tekhniki* (Fundamentals of aviation equipment technical operation and diagnostics), Samara, Samarskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet, 2004, 116 p.
7. Velichko A.P. Development of ground-based remote monitoring of the atmosphere. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 116-123.
8. *Sankt-Peterburgskii tsentr obsluzhivaniya vozdušnogo dvizheniya (OVD)*. URL: <http://atcspb.ru>
9. Kundler J. Multidimensional meta-modelling for air traffic management service processes. *Computer Modelling and New Technology*, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 50-57.
10. *Standard SAE JA1012 "A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard"*. SAE International, 24 January 2002, 57 p.
11. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* (Mathematical methods in reliability theory), Moscow, URSS. 2019, 584 p.
12. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh system* (Reliability theory of complex systems), Moscow, Fizmatlit, 2010, 608 p.
13. Kelton W.D., Sadowski R.P., Zupick N.B. *Simulation with Arena*. N.Y., McGraw Hill, 2014, 668 p.
14. Lokhmanov V.M., Maron A.I. *Vestnik Moskovskoi akademii rynka truda i informatsionnykh tekhnologii*, 2002, no. 4, pp. 18-22.
15. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii* (Operations research), Moscow, Sovetskoe radio, 1972, 552 p.
16. Pisarenko V.N. Testability management while an object operation. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 67-75.
17. Voskoboynikov Yu.E., Zadorozhnyi A.F. *Osnovy vychislenii i programmirovaniya v pakete MathCAD PRIME* (Fundamentals of computing and programming in MathCAD PRIME software), St. Petersburg, Lan', 2016, 224 p.
18. Isaev D.V. *Audit i finansovyi analiz*, 2014, no. 6, pp. 416-422.
19. Baranov N.A., Vasilyev I.V., Poliansky V.V., Semenov I.M. Markov models to estimate safety performance functioning of complex aircraft systems. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 5, pp. 5-12.

20. Ramirez-Marquez J.E., Coit D.W., Konak A. Redundancy allocation for series-parallel systems using a max-min approach. *IIE Transactions*, 2004, vol. 36, no. 9, pp. 891-898. DOI: 10.1080/07408170490473097
21. Onishi J., Kimura S., James R.J.W., Nakagawa Y. Solving the redundancy allocation problem with a mix of components using the improved surrogate constraint method. *IEEE Transactions on Reliability*, 2007, vol. 56, no. 1, pp. 94-101. DOI: 10.1109/TR.2006.884602
22. Sahoo L., Bhunia A.K., Roy D. A Genetic Algorithm Based Reliability Redundancy Optimization for Interval valued Reliabilities of components. *Journal of Applied Quantitative Methods*, 2010, no. 5, pp. 270-287.
23. Haken H. *Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Berlin, Springer, 2000, 258 p. DOI: 10.1119/1.15809
24. Saifullah A.M., Tsin Y.H. A Self-stabilizing Algorithm For 3-Edge-Connectivity. In: Stojmenovic I., Thulasiram R.K., Yang L.T., Jia W., Guo M., de Mello R.F. (eds) *Parallel and Distributed Processing and Applications. ISPA 2007. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 4742. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74742-0_4
25. Yampol'skii S.M., Rubinov V.I., Golovin V.Ya. Management of maintenance service and repair of aviation technics during carrying out of the analysis logistical support. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 94-99.
26. Yampol'skii S.M., Golovin V.Ya., Rubinov V.I. Model of functioning of perspective system for the automated planning actions of engineering-aviation maintenance. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 19-26.