

УДК 681.5. 015

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА

Н.А. СЕВЕРЦЕВ¹

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
г. Москва, Россия

В данной статье рассматривается сложная система специального назначения, процесс обслуживания которой является процессом Маркова. Приведены два условия для процесса работы исследуемой системы. Сделан вывод, что весь процесс работы исследуемой системы по обслуживанию заявок, поступивших после некоторого момента времени, не зависит от того, как проходила работа нашей системы по обслуживанию до этого момента времени. Перечислены критерии, являющиеся важными для исследования системы. Рассмотрены критерии, учитывающие экономический фактор функционирования исследуемой системы. Определены отдельные виды обслуживания с точки зрения экономической эффективности работы исследуемой системы. Рассмотрена экономическая эффективность системы с учетом потерь из-за отказов предприятиям-заказчикам, простоя летательных аппаратов, расходов на работу системы. Определена функция стоимости потерь системы с отказами заказчику на выполнение работы. Приведена формула для критерия экономической эффективности исследуемой системы как системы массового обслуживания. Рассмотрены основные требования и формульные зависимости расчета эффективности обслуживания требований заявок на исследуемую систему. Представлены математические методы расчета критериев, учитывающих экономическую эффективность исследуемой системы, которые характеризуют степень хода операции выполнения поставленной задачи.

Ключевые слова: безопасность, экономический эффект, сложная техническая система, критерий эффективности, коэффициент занятости, условная вероятность.

ВВЕДЕНИЕ

Трудность проблемы управления обеспечением безопасности любой сложной системы состоит в том, что она не относится ни к какой определенной области науки и знаний. Поэтому успех в этом деле не может быть достигнут путем сосредоточения усилий в какой-то одной области. Основные трудности лежат в области правильного понимания проблем управления безопасностью конкретным ответственным лицом, а не безликим коллективным органом. Собственно проблема состоит в несоответствии между желаемым представлением и действительным состоянием дела. На современном этапе управления безопасностью характерно присутствие больших и сложных проблем. Эти проблемы ощущаются как несоответствие между желаемым и действительным множеством безопасности (опасности) в жизни людей. Комплексные проблемы (опасности) состоят из множества отдельных проблем (опасностей), сложным образом взаимосвязанных, и могут ощущаться людьми (особенно чиновниками) различным, иногда противоречивым образом [1]. В качестве примера упомянем теракт в январе 2011 г. в аэропорту Домодедово. Если представление о проблеме безопасности неправильное (необоснованное), то вся деятельность будет сводиться к официальным разговорам. Такая деятельность оказывается вредной и только препятствует эффективному решению проблемы обеспечения безопасности жизнедеятельности. Такой подход создает ложное представление проблемы. Здесь и проявляется первостепенная роль проблемного системного анализа.

В настоящее время особо актуален вопрос безопасности на транспорте, да и для других промышленных объектов необходимо создание организации управления особого типа – целевого управления, концентрирующего все усилия именно на достижении решения проблемы обеспечения безопасности.

Система обеспечения безопасности – это то, что нам нужно знать о данном объекте (субъекте) для того, чтобы решить конкретную задачу; ее цель – знание об охраняемом объекте

и выявление несанкционированного проникновения и воздействия субъекта-террориста на данный объект или захват приглянувшегося здания или территории. Важно подчеркнуть, что элемент системы представляет собой не только отдельную часть, но и элементарное соотношение, причем элементы качественно характеризуются через отношение друг к другу. Часть элементов исследуемой системы безопасности принимается в качестве независимых так же, как и их отношения с другими элементами. Элементы системы безопасности взаимосвязаны между собой, и каждое изменение в очередном элементе влечет за собой изменения в связанных с ним элементах. Часть элементов системы безопасности связана не только с элементами данной системы, но и с посторонними объектами, со средой системы безопасности. Такие элементы называют входами или выходами системы безопасности в зависимости от того, воздействует ли на них среда или они воздействуют на среду. Из этого небольшого числа простых, логически взаимосвязанных компонентов: элемент, переменная, вход, выход, отношение элементов – состоит система безопасности в любой сфере человеческой деятельности.

АКСИОМЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Объективность мышления при решении проблемы безопасности определяется за счет дисциплины мышления, правил работы с системой обеспечения безопасности. Эта дисциплина мышления обеспечивается рядом научно доказанных правил, которые должны применяться при построении системы безопасности. В этих правилах, аксиомах должен отражаться опыт, накопленный развитием научных исследований и подтвержденный далее практической реализацией.

Целесообразно привести некоторые из аксиом, определяющих свойства системы безопасности.

1. Целостность: комплекс объектов, рассматриваемых в качестве системы, представляет собой определенную общность, обладающую общими свойствами и поведением.

2. Делимость: для того чтобы представлять собой систему, целостный объект должен допускать расчленение на элементы.

3. Изолированность: комплекс объектов, образующих систему безопасности, а связь между ними можно изолировать от их окружения.

4. Относительность изолированности: изолированность системы безопасности является относительной, поскольку комплекс объектов, образующих систему безопасности, общается со средой через входы и выходы.

5. Определенность: каждая составная часть системы безопасности может быть отделена от других составляющих.

6. Множественность: каждый элемент системы безопасности обладает собственным поведением и состоянием, отличным от поведения и состояния других элементов и системы в целом.

Система безопасности является недостаточно эффективной из-за многих причин.

Главными из них являются следующие.

1. Отсутствие системы безопасности, разработанной на сугубо научных принципах и критериях.

2. Нет требуемой организации системы безопасности, ответственных руководителей и контроля за обеспечением безопасности с учетом современной действительности.

3. Принцип контроля государством деятельности различных промышленных компаний, департаментов по критерию необходимости обеспечения безопасности, в особенности транспортной, не работает.

4. Отсутствует научно обоснованная методика оценки угроз и построения системы управления безопасностью рисками на транспорте.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сложную техническую систему специального назначения мы будем рассматривать как систему, состоящую из подсистем, предназначенных для решения задач обеспечения безопасности по различным направлениям (безопасность территорий, безопасность в чрезвычайных ситуациях – наводнение, пожаротушение, безопасность сельхозугодий от биологических вредителей, ликвидация незаконных бандформирований и пр.). Сложную систему мы будем рассматривать как систему, состоящую из летательных аппаратов (ЛА) различных типов. Процесс обслуживания такой сложной технической системы является процессом Маркова. Этот процесс относится к классу случайных процессов, который определяется:

- моментами окончания операций по обслуживанию заявок, выполняемых в моменты времени t_0 ;
- моментами поступления новых заявок;
- длительностью обслуживания заявок, поступивших после t_0 .

Предположим:

– время выполнения работ нашей исследуемой системой распределено по показательному закону. Время окончания работ системой по обслуживанию заявок зависит от того, сколько времени эти работы выполнялись до момента t_0 , т. е. предысторию этого процесса во внимание не принимаем;

– поток заявок на обслуживание системой простейший, т. е. требования, поступившие до момента t_0 не влияют на число и порядок поступления новых заявок благодаря наличию условий стационарности и отсутствию последствия.

Из двух условий следует, что весь процесс работы исследуемой системы по обслуживанию заявок, поступивших после момента t_0 , не зависит от того, как проходила работа нашей системы по обслуживанию до момента t_0 . Заметим, что в теории случайных процессов процессы без последствия, для которых будущее развитие зависит только от достигнутого в данный момент t_0 состояния и не зависит от того, как происходило развитие процесса до этого времени, называются Марковскими процессами. Таким образом, процесс работы исследуемой системы по обслуживанию, в случае простейшего входящего потока и показательного закона распределения времени выполнения работы по обслуживанию, может рассматриваться как процесс Маркова [2].

В исследованиях этого процесса важную роль играют переходные вероятности. Вероятностью перехода (переходной вероятностью) называется условная вероятность $P_{ik}(t)$ того, что через время t_i будет занято « k » летательных аппаратов, если вначале (в момент времени t_0) было занято i летательных аппаратов. Обозначим $P_i(t_0)$ – вероятность того, что в момент времени t_0 занято i летательных аппаратов. Если $i = 0, 1, 2, \dots, n$, то вероятность того, что в момент времени $(t_0 + t_1)$ в нашей системе занято « k » летательных аппаратов, определяется из формулы полной вероятности:

$$P_k(t_0 + t_1) = \sum_{i=0}^n P_i(t_0)P_{ik}(t_1).$$

Или если в момент времени t_0 в системе занято i летательных аппаратов с вероятностью $P_i(t_0)$, где $i = 0, 1, 2, \dots, n$, а условная переходная вероятность « k » занятых летательных аппаратов через промежуток времени t_1 равна $P_{ik}(t_1)$, ($i = 0, 1, 2, \dots, n$), то полная вероятность того, что в момент времени $(t_0 + t_1)$ занято « k » летательных аппаратов, равна сумме произведений $P_i(t_0)P_{ik}(t_1)$ по всем возможным i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$).

Рассмотрим основные требования и формульные зависимости расчета эффективности обслуживания требований заявок на исследуемую систему, а именно [3]:

1. Вероятность того, что обслуживание в нашей системе занято ровно « k » ЛА, P_k , где $k = 0, 1, 2, \dots, n$.

2. Среднее число занятых ЛА по выполнению заявок $\sum_{k=0}^n kP_k$, где $k = \frac{N_3}{n}$ – коэффициент занятости ЛА. Эта величина характеризует среднюю долю времени, которую ЛА занят обслуживанием (выполнением) заявок.

3. Среднее число ЛА, свободных от обслуживания $N_0 = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k)P_k$.

4. Коэффициент простоя ЛА – $k_{\Pi} = \frac{N_0}{n}$. Этот коэффициент характеризует среднюю долю времени, которую обслуживающий ЛА простаивает в ожидании заявки. Будем иметь в виду $N_0 + N = n$; $k_3 + k_{\Pi} = 1$.

5. Относительная пропускная способность системы будет определяться как $\Pi_0 = 1 - P_n$, а абсолютная пропускная способность $\Pi = \lambda \Pi_0$. Эта вероятность равна вероятности того, что в исследуемой системе с потерями все ЛА заняты обслуживанием (обозначим эту вероятность $P_{отк}$).

6. Среднее время ожидания требований до начала обслуживания, если в системе имеется n аппаратов, $t_{ож} = M [T_{ож}] = \int_0^{\infty} t dP_1(T_{ож} > t)$.

7. Вероятность того, что время пребывания в очереди на обслуживания продлится больше определенной величины $P_1(T_{ож} < t) = \sum_{k=0}^n P_k (T_{ож} > t)$ или меньше определенной величины

$P_2(T_{ож} < t) = \sum_{k=n}^{\infty} P_k (T_{ож} < t)$, где $P_k(T_{ож} < t)$ – условная вероятность того, что время ожидания $T_{ож} < t$, при условии, что в момент поступления требования в систему ею уже обслуживалось « k » требований.

8. Средняя длина очереди $M_{ож} = \sum_{k=n+1}^{\infty} (k-n)P_k$ при $k \geq n$.

9. Среднее число заявок, находящихся в системе для обслуживания, равно $m = \sum_{k=1}^{\infty} kP_k$.

10. Вероятность того, что число требований в очереди, которые ожидаются в начале обслуживания, больше m , будет $P > m = \sum_{k=m+1}^{\infty} P_k$.

Перечисленные критерии являются важными для исследования системы. Далее рассмотрим критерии, учитывающие экономический фактор функционирования исследуемой системы. Функция стоимости потерь для системы с отказами выполнения заявок может быть представлена в виде

$$G_{\Pi} = (g_k N_3 + g_y P_n \lambda + g_{nk} N_0) T,$$

где T – рассматриваемый интервал времени;
 g_k – стоимость эксплуатации одного ЛА системы в единицу времени;
 g_y – стоимость убытков в результате отказа требований заявок на работу системы.

Поскольку исследуемая система состоит из различных ЛА, приведем функцию стоимости потерь для системы:

$$G_{\Pi} = (g_{nk} N_0 + g_{ож} m_{ож} + g_y P_n \lambda + g_k N_3) T.$$

Тогда критерий экономической эффективности исследуемой системы как системы массового обслуживания определяется по формуле

$$E = P_{обс} \lambda CT - G_{п},$$

где C – экономический эффект, полученный при обслуживании каждого требования;
 $P_{обс}$ – вероятность обслуживания заявок.

Имея данные критерии, можно определять отдельные виды обслуживания с точки зрения экономической эффективности работы исследуемой системы.

Вероятность того, что в системе все ЛА заняты обслуживанием, определяется по формуле Эрланга (выражающей вероятность отказа для систем обслуживания с потерями):

$$P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{1/n} \frac{1}{n!}}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}},$$

где $\frac{\lambda}{\mu}$ – нормированная интенсивность входного потока; $n = k$ – количество заявок на ЛА;
 $i! = 1, 2, \dots, n$.

Пусть хотя бы один ЛА в момент поступления заявки свободен. Тогда относительную и абсолютную пропускную способность системы можно определить, соответственно как: $\Pi_0 = 1 - P_n$, $\Pi = \lambda$, $\Pi_0 = \lambda(1 - P_n)$. Среднее число занятых ЛА и коэффициент занятости определяются по известной формуле $N_3 = \sum_{k=1}^3 kP_k$, $k_3 = \frac{N_3}{n}$.

Считаем, что процесс функционирования нашей исследуемой системы установившийся. Условно будем считать, что система может одновременно выполнять в течение определенного времени (например, семи дней) требования трех заказчиков тремя ЛА. Среднее время работы системы для одного предприятия-заказчика равно условно три часа. Интенсивность поступления заявок на выполнение оптимальных планов равна 0,25 1/ч. Если исследуемая система одновременно занята выполнением оптимальных планов для трех заказчиков и отказывает вновь поступающему заказу, тогда

$$n = 3; \lambda = 0,25 \text{ 1/ч}; t_{обс} = 3 \text{ ч}; \underline{\lambda} = \frac{1}{t_{cp}};$$

$$P_k = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}; P_{отк} = P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{1/n} \frac{1}{n!}}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}};$$

$$P_n = \frac{\gamma^n \frac{1}{n!}}{\sum_{i=0}^n \gamma^i \frac{1}{i!}} = \frac{(0,25 \cdot 3)^3}{3!} \approx 0,033 \left(\gamma = \frac{0,25}{1/3} \right) \approx 0,75;$$

$$\Pi_0 = 1 - P_n = 0,967; \Pi = \lambda \Pi_0 = 0,25 \cdot 0,967 = 0,242 \text{ 1/ч}.$$

Рассмотрим экономическую эффективность системы с учетом потерь из-за отказов предприятиям-заказчикам, простоя летательных аппаратов, расходов на работу системы. При этом имеем в виду, что другие заявки не берутся. Допустим, что простой ЛА в течение одного часа рабочего времени приносит убыток в 100 руб., каждая заявка на работу недельного плана приносит прибыль 300 руб. в час. Стоимость одного часа работы ЛА обходится системе в 30 руб. Решение: в принятых нами обозначениях $P_0 = 0,967$; $g_k = 30$ руб.; $g_y = 300$ руб.; $\lambda = 0,25$ 1/ч; $T = 25$ рабочих дней.

Определим функцию стоимости потерь системы с отказами заказчику на выполнение работы – $G_{\text{п}}$, а также данные $N_0, N_3, E, k_3, k_{\text{п}}$:

$$N_0 = \sum_{k=0}^2 (3-k)P_n = 3P_0 + 2P_1 + P_2, \text{ имеем в виду: число занятых ЛА и коэффициент за}$$

нятости рассчитываются по формулам $N_3 = \sum_{k=0}^n kP_k$; $k_3 = \frac{N_3}{n}$. Среднее число летательных аппара-

ратов, свободных от работ $N_0 = \sum_{k=0}^{n-1} (n-k)P_k$; $k_{\text{п}} = \frac{N_0}{n}$.

$$\text{В нашем конкретном примере: } P_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^3 (\gamma)^i \frac{1}{i!}} = \frac{1}{1 + 0,75 + 0,28125 + 0,07032} = 0,48.$$

Для определения P_1 и P_2 , полагая $k = 1$ и $k = 2$, соответственно получим:

$$P_1 = \frac{0,75}{2,102} = 0,36; P_2 = \frac{1/2 \cdot 0,75^2}{2,102} = 0,13; N_0 = 1,44 + 0,72 + 0,13 = 2,29; k_{\text{п}} = \frac{2,29}{3} = 0,76;$$

$$N_3 = \sum_{k=1}^3 kP_k = P_1 + 2P_2 + 3P_3 = 0,36 + 0,26 + 0,099 + 0,72 \text{ (заметим, что } P_3 = P_n = 0,033);$$

$$k_3 = \frac{0,72}{3} = 0,24.$$

Определим средние потери (функция стоимости потерь системы):

$$G_{\text{п}} = (30 \cdot 0,72 + 300 \cdot 0,033 \cdot 0,25 + 100 \cdot 2,29) \cdot 25 \cdot 8 = (21,6 + 2,48 + 229) \cdot 200 = 50616 \text{ руб.}$$

Проведем анализ цифр в скобках: 21,6 руб. – удельная стоимость работы одного летательного аппарата, 2,48 руб. – часовые потери системы из-за отказа заявок, 229 руб. – потери системы в результате простоя ЛА – эти потери самые большие из-за того, что в среднем из трех ЛА 2,29 простаивают. При таких условиях работы системы экономическая эффективность будет определяться:

$$E = P_{\text{обс}} \lambda CT - G_{\text{п}} = P_0 \lambda g_y T - G_{\text{п}} = 0,967 \cdot 0,25 \cdot 300 \cdot 200 - 50616 = -36100 \text{ руб.}$$

Следовательно, при заданных условиях система будет нуждаться в дополнительной дотации, равной 36100 руб. в месяц. Ее работу нельзя считать эффективной. Для экономической эффективности следовало бы принять больший поток заявок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрена общая методология исследования эффективности функционирования технической системы специального назначения на основе марковского процесса.

В работе приведены следующие важные результаты:

- 1) перечислены критерии, являющиеся важными для исследования системы;
- 2) рассмотрены критерии, учитывающие экономический фактор функционирования исследуемой системы;
- 3) определена функция стоимости потерь системы с отказами заказчику на выполненные работы.

Представленная научная работа вносит полезный вклад в становление теории безопасности на формализованной основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северцев А.Н. Безопасность и защита сложных систем. М.: Вычислительный центр имени А.А. Дородницына РАН, 2014.
2. Катулев А.Н., Северцев Н.А. Исследование операций и принципы принятия решений в обеспечении безопасности. М.: Физматлит, 2000. 306 с.
3. Северцев Н.А., Бецков А.В. Системный анализ теории безопасности. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Северцев Николай Алексеевич, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Лауреат Государственной премии СССР, премии Правительства РФ в области науки и премии Правительства РФ в области образования, профессор, доктор технических наук, заведующий отделом нелинейного анализа и проблем безопасности Вычислительного центра им А.А. Дородницына РАН, электронный адрес: fvi2014@list.ru.

RESEARCH OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING TECHNICAL SYSTEM SPECIAL APPOINTMENTS ON THE BASIS OF MARKOVSKY PROCESS

Nikolay A. Severtsev

Computer center of the name A.A. Dorodnicina of Russian Academy of sciences
Moscow, Russia, fvi2014@list.ru

ABSTRACT

The article deals with the complex system of a special purpose which is serviced by Markov's process. Two conditions for process of work of the researched system are given. The conclusion is made that all process of work of the researched system on servicing of the requests which have arrived after some timepoint does not depend on the process of our service before. The essential criteria for research of the system are listed. The criteria considering the economic factor of the system functioning are named. Separate types of servicing from the point of view of the researched system cost efficiency are determined. The cost efficiency of the system is determined, considering the losses from customers aircraft downtime, system operation expenses. Function of the cost of system losses with customers refusals in the process is determined. The author gives the formula for the criterion of the researched system cost efficiency as mass servicing system. The main requirements and formula dependences of service efficiency calculation of requests for the researched system are considered. Mathematical methods of calculation of the criteria considering economic efficiency of the researched system which characterize a degree of a given task performance course of operation are presented.

Key words: safety, economic benefit, complex technical system, criterion of efficiency, employment factor, conditional probability.

REFERENCES

1. **Severtsev A.N.** Safety and protection of difficult systems. M.: Computer center of A.A. Dorodnizyna RAN [Vychislitelnyj centr imeni A.A.Dorodnicyna RAN], 2014.
2. **Katulev A.N., Severtsev N.A.** Operations research and the principles of decision making in safety. M.: Fizmatlit [Physical and mathematical literature], 2000. 306 pages.
3. **Severtsev N.A., Betskov A.V.** System analysis of the theory of safety. M.: MGU im. M.V. Lomonosova [Lomonosov Moscow State University], 2009.