

Р.А. ХУРОДЗЕ

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ПОДХОДЫ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Проводится анализ современного состояния проблемы надежности инфокоммуникационных систем. Описывается математический подход к надежному планированию этих систем. Вводится экономический критерий оптимизации многокомпонентной резервированной системы с отдельным обслуживанием очередей замещений и восстановлений, ставится соответствующая задача математического программирования. Анализируется длительность простоя резервированных систем, как важный показатель надежности, обсуждаются некоторые аспекты ее вероятностного анализа.

Ключевые слова: надежность, обслуживание, очередь, замещение, восстановление, оптимизация, простой.

Введение. Создание надежных систем является стратегической целью любого индустриального общества. Характерно, что надежность стала отдельной научно-технической дисциплиной с начала второй мировой войны. Проблемы, которые возникали в армии США, а далее при осуществлении космических программ США и СССР, привели к осознанию определяющего значения надежности систем [1]. С самого начала в задачах обеспечения надежности сложных технических систем плодотворно применялись математические методы, которые в настоящее время составляют важную часть общей теории надежности. При этом математическая теория надежности развивается в соответствии с теми тенденциями, которые проявляются в ведущих областях техники и технологий.

Современные тенденции в теории и практике надежности наиболее полно и ярко проявляются в задачах планирования, проектирования, эксплуатации и модернизации компьютерных и телекоммуникационных систем и сетей (инфокоммуникационных систем).

Инфокоммуникация является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей техники и экономики во всех странах мира, создает ведущую производственную инфраструктуру общества и является основой глобальной информационной инфраструктуры. Вместе с тем, в настоящее время общепризнано, что решающим фактором формирования и эффективного функционирования производственной инфраструктуры является свободная конкуренция. В этом отношении инфокоммуникация занимает особое место среди других отраслей науки и техники, вследствие чего она считается одним из наиболее интересных объектов исследования компонентов качества, в том числе надежности, в аспекте экономических факторов.

Суть вопроса заключается в следующем. В развитых странах мира накоплены большое теоретическое знание и практический опыт создания и развития производственной инфраструктуры различного вида (энергетика, транспорт и др.) в условиях рыночной экономики. Постсоциалистические страны в настоящее время интенсивно осваивают упомянутый опыт. Это означает, что управляющие решения,

как правило, принимаются на основе экономических интересов. В этом смысле в телекоммуникации и информатике опыт развитых стран значительно мал по следующим причинам.

Информатика - новая область, и ее роль и место в жизни общества пока еще не определены. Она находится на стадии становления, развивается бурно, но без единой методологии, и пока далека от четко поставленных целей и задач. Поэтому пока трудно говорить об установившихся тенденциях ее дальнейшего развития.

Что касается телекоммуникации, она имеет вековую историю и четко поставленные проблемы, которые решаются на основе хорошо продуманной теории высококвалифицированными специалистами. Однако, вследствие своей особой специфики, телекоммуникация, даже в западных странах, не развивалась в условиях свободной конкуренции. До 80-х годов прошлого века во всех индустриальных странах Европы телекоммуникация была монополизирована государством [2]. Только в 1984 году начался процесс либерализации и демополизации в телекоммуникации Великобритании, а затем и в других европейских странах. В 1984 г. Еврокомиссия выпустила "Зеленую книгу", в которой было определено, что монополия в телекоммуникации в странах Евросоюза максимально ограничивается. В США, начиная с 20-х годов прошлого века, монополистом в телекоммуникации был знаменитый гигант - компания AT&T. Раньше такая монополия по некоторым специфическим причинам была фактором развития, однако с 70-х годов прошлого века она уже сдерживала развитие телекоммуникационной инфраструктуры США. В 1984 г. по решению Министерства юстиции США компания AT&T была реорганизована и потеряла право на эксплуатацию местных телефонных сетей. Ответственность за это стали нести семь региональных компаний, и тем самым создавалась среда свободной конкуренции [3-5].

Такова природа проблемы, с которой мы имеем дело – инфокоммуникация в индустриальных странах мира стала развиваться по законам рыночной экономики в течение последних 10-15 лет, и проблемы в этой области теперь решаются на основе этих законов, в том числе проблема обеспечения высокой надежности компьютерных и телекоммуникационных сетей и их компонентов.

В рамках данной статьи в качестве объекта исследования мы рассматриваем инфокоммуникационные сети и системы, их подсистемы и созданные на их основе различные системы управления. Все они, как правило, являются многофункциональными сложными системами, и достижение высокого качества их функционирования становится основным фактором финансового и рыночного успеха как производителей оборудования, так и поставщиков инфокоммуникационных услуг (операторов) [4,5].

Заметим, однако, что модели анализа и оптимизации, разработанные нами, пригодны для исследования многих других технических систем и тем самым являются, в определенном смысле, универсальными. Такая универсальность основывается на изоморфизме процессов, протекающих в системах различной природы, абстрактным процессам в их математических моделях. Подтверждением тому служит вся долгая история приложений математических методов в научных исследованиях.

Вместе с тем, среди компонентов качества функционирования вышеозначенных технических систем надежность - один из основных. Поэтому обеспечение надежности является неотъемлемой составной частью управления качеством или, по современной терминологии, менеджмента качества ("quality management") [2-4].

Экономические и математические аспекты надежного планирования. Несмотря на то, что качество элементной базы технических систем, особенно инфокоммуникационных, в течение последних десятилетий непрерывно повышается, проблема их надежности остается острой проблемой современности. Одной из самых важных причин этого обстоятельства является то, что требования к надежности систем возрастают быстрее, чем надежность элементной базы [3,7,8].

В этих условиях, в рамках теории надежности, возникают новые направления, которые более адекватно отражают такие факторы развития в области инфокоммуникации, как открытость рынка услуг, обострение конкуренции между операторами, повышение требований к качеству услуг со стороны пользователей и др. [2-5]

Суть вопроса состоит в следующем. Низкая надежность грозит операторам инфокоммуникационных услуг не только возможной потерей пользователей, но непосредственно влияет на экономические показатели. Отказ пользователям в предоставлении услуг вследствие неработоспособности применяемых средств (технических, программных и др.) - это упущенный доход и часто прямые убытки из-за штрафных санкций, предъявляемых пользователями в результате низкого качества предоставляемых услуг [3,4].

Для разрешения означенной проблемы по поручению Международного Союза Электросвязи (МСЭ) шведские специалисты разработали рекомендацию E.862 "Надежное планирование телекоммуникационных сетей", которая была окончательно одобрена в 1992 г. В ней отмечается, что при планировании, проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании телекоммуникационных сетей и систем необходимо учитывать экономические потери вследствие ненадежности, которые несут как операторы телекоммуникационных услуг, так и пользователи [2-6].

Не вдаваясь в подробности англо-русских терминологических соответствий, заметим, что русская "надежность" переводится на английский язык как "reliability" или "dependability". При этом английским эквивалентом научно-технического термина "надежность" традиционно считается "reliability", а "dependability" - более широкое понятие, включающее в себя надежность в традиционном (узком) смысле, а также "безопасность" и (иногда) "живучесть". В нашем изложении термин "надежность" нужно понимать именно в смысле английского "dependability", т.е. в широком смысле.

Среди важнейших направлений надежного планирования выделяется задача определения оптимального количества резервных элементов и средств (органов) технического обслуживания для случаев, когда элементы системы ненадежны, т.е. подвергаются отказам и теряют работоспособность.

В наиболее общей форме задача формулируется следующим образом.

Техническая система состоит из основных и резервных ненадежных, восстанавливаемых элементов. Основные элементы несут рабочую нагрузку, и требуется поддержание всех основных элементов в работоспособном состоянии, а в случае их меньшего количества система несет потери. В случае отказа основного элемента он замещается одним из резервных элементов, а сам передается на восстановление. Резервные элементы тоже отказывают, после отказа восстанавливаются и остаются в резерве.

Поскольку отказы элементов, операции их замещения и восстановления имеют стохастический характер, то весь процесс технического обслуживания резервированной системы означенного типа является стохастическим, и его исследование проводится в рамках теории массового обслуживания. В частности, моделями процессов замещений и восстановлений являются замкнутые системы массового обслуживания (СМО) весьма специального вида.

Если система содержит ненадежные восстанавливаемые элементы - как основные, так и резервные, то отказ основного элемента порождает два требования: замещение отказавшего основного элемента резервным и восстановление отказавшего элемента. При этом считается, что длительность замещения незначительна и ею можно пренебречь. Однако, когда отдельные элементы, в свою очередь, представляют собой сложные устройства и системы, то операция замещения становится достаточно сложной, и пренебрегать ее длительностью нельзя. Отметим, что замещение, как правило, подразумевает подготовку резервного элемента для работы, его переключение и приведение к такому состоянию, чтобы он мог нести рабочую нагрузку. Поэтому в сложных системах замещение выделяется в самостоятельную операцию (независимую от восстановления), которая часто выполняется отдельным органом замещения (ОЗ).

Таким образом, получается, что в сложных системах описанного типа организуется система обслуживания очередей замещений и восстановлений, при этом количество органов восстановления (ОВ) и замещения может быть произвольным. Анализ таких систем, а также определение оптимального количества органов обслуживания (восстановления и замещения, когда они разделены), как и оптимального количества резервных элементов по экономическим критериям, является актуальной проблемой теории и практики надежности.

Общая модель анализа и оптимизации с отдельным обслуживанием замещений и восстановлений. Рассмотрим резервированную систему, в которой m – количество основных элементов, n – число резервных элементов, k – количество ОВ, l – число ОЗ. Элементы системы (как основные, так и резервные) отказывают с интенсивностями α и β соответственно, восстанавливаются с интенсивностью μ и замещаются в случае надобности с интенсивностью λ .

Процесс функционирования рассматриваемой системы описывается функциями $P(i, j, t) = \{P \text{ в момент времени } t \text{ число недостающих основных элементов равно } j; \text{ число неработоспособных элементов системы равно } i\}$, где $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n + j}$.

Обозначим $P(i, j) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(i, j, t)$.

В качестве целевой функции вводится показатель экономической эффективности системы:

$$F(m, n, k, l) = (r_1 - c_1) E_1 + (r_2 - c_2) E_2 - \sum_{k=3}^7 c_k E_k. \quad (1)$$

Здесь r_1 и r_2 - доходы в единицу времени, соответственно, от одного работоспособного (РС) основного элемента и одного РС резервного элемента; $c_1 - c_7$ - затраты в единицу времени, соответственно, на: одного РС основного элемента; на одного РС резервного элемента; одного неработоспособного (НРС) резервного элемента; одного работающего ОВ; одного неработающего ОВ; одного работающего ОЗ; одного неработающего ОЗ.

Обозначим $E_i = E_i(m, n, k, l)$, где $E_1 - E_7$ - соответственно среднее количество основных элементов; РС резервных элементов; НРС резервных элементов; работающих ОВ; неработающих ОВ; работающих ОЗ; неработающих ОЗ.

Пусть $p(j) = \sum_{i=0}^{n+j} p(i, j)$. Тогда

$$\begin{aligned} E_1 &= \sum_{j=0}^m (m-j)p(j); \quad E_2 = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} (n-i)p(i, j); \quad E_3 = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} (i+j)p(i, j); \\ E_4 &= \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^k ip(i, j) + \sum_{j=0}^m \sum_{i=k+1}^{n+j} kp(i, j); \quad E_5 = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^k (k-i)p(i, j); \\ E_6 &= \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} jp(i, j)(\delta_1(i, j) + \delta_2(i, j)) + \\ &+ \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} (n+j-i)p(i, j)(\delta_3(i, j) + \delta_4(i, j)) + \\ &+ \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^{n+j} lp(i, j)(\delta_5(i, j) + \delta_6(i, j)); \quad E_7 = l - E_6. \end{aligned}$$

Здесь $\delta_k(i, j) = \{1, \text{если } A_k(i, j) - \text{истинное предложение}; 0 - \text{в противном случае}\}.$

$(k = \overline{1, 6}, j = \overline{0, m}, i = \overline{0, n+j})$, где

$$A_1 = (j \leq n+j-i \leq l); \quad A_2 = (j \leq l < n+j-i); \quad A_3 = (n+j-i < j \leq l);$$

$$A_4 = (n+j-i < l \leq j); \quad A_5 = (l < j \leq n+j-i); \quad A_6 = (l < n+j-i < j).$$

В рамках теории массового обслуживания и надежности исходные экономические характеристики π_i ($i=1,2$) и c_i ($i=1,2,\dots,7$) считаются заданными. Вероятностные характеристики $p(i, j)$ можно определить аналитическими, численными или компьютерными методами в зависимости от исходной модели обслуживания. В задачах экономического анализа они также считаются заданными, и в этих условиях формулируется задача математического программирования (оптимизационная задача): при фиксированном m функция F зависит от трех аргументов: n, k, l . Для

заданного значения m требуется найти тройку (n, k, l) , которая придает функции F максимальное значение.

Построение и исследование моделей для определения $p(i,j)$ только начинается (9-11), и можно надеяться, что в ближайшее время ведущие специалисты обратят на эту проблему более пристальное внимание.

О простое резервированных систем. В течение последних 10-15 лет одним из самых важных показателей надежности технических систем, особенно инфокоммуникационных, становится длительность простоя [3-6]. В работах [3-5,7] проводится системный анализ технических, организационных и социально-экономических факторов, приводящих к такому положению. Там же указываются возможные направления дальнейших исследований.

В США для оценки надежности элементов и подсистем телекоммуникационных сетей применяют три характеристики: первая характеризует снижение качества обслуживания на сети; вторая – продолжительность периода неработоспособности (время простоя); третья – широту распространения влияния отказа на сеть [2,4,5]. Японские специалисты также считают, что время простоя (продолжительность периода неработоспособности) – важный показатель надежности [5,11]. Они отмечают, что особенно нежелательны для пользователей длительные перерывы связи в сетях. Поэтому предлагают ввести некоторый временной порог. Простой продолжительностью более этого порога считаются длительными. Предполагается, что после таких простоев потери (убытки) операторов сетей связи резко и скачкообразно возрастают вследствие предъявленных пользователями штрафных санкций.

Для иллюстрации важности длительности простоя, как показателя надежности, рассмотрим пример. В современных телекоммуникационных сетях на основе одной системы SDH (Synchronous Digital Hierarchy) уровня STM-16 (Synchronous Transfer Mode) можно организовать до 30240 основных цифровых каналов. Очевидно, насколько значительными будут убытки сети даже в случае одного отказа, если его длительность окажется существенно большей [4-5].

Кроме того, для многих объектов управления в современных АСУ важно обеспечить определенное время простоя управляющей системы (УС). Частые отказы в таких системах, в принципе, не ухудшают характеристики объекта управления, если длительности соответствующих прерываний не будут превышать определенных (случайных или постоянных) величин. Добавим также, что важно обеспечить не только малую среднюю длительность простоя, но также и малый разброс этой длительности вокруг ее среднего значения.

Тем самым становится очевидной актуальность точного вероятностного анализа длительности простоя отказавших технических систем и их компонентов [2-5].

Несмотря на вышеизложенное, к настоящему времени в научно-технической литературе мало публикаций, посвященных непосредственно анализу простоя систем, в том числе резервированных.

К числу причин такого положения можно отнести следующие:

- процесс осмысления теоретических и методологических аспектов задач, возникающих на практике под воздействием вышеперечисленных факторов, как правило, протекает медленно;

- в отличие от задач по анализу стандартных показателей надежности, не сложилась еще традиция постановки и решения задач по анализу простых систем, особенно сложных систем;

- построение и исследование моделей анализа простых систем требуют привлечения более тонких эвристических и аналитических средств по сравнению с традиционными.

Известны несколько работ, посвященных анализу простых резервированных систем [8,9,12-16]. В [8, 12] проводится исчерпывающий вероятностный анализ простой дублированной системы, сначала в предположении экспоненциального распределения длительностей безотказной работы основного и резервного элементов [8], а затем в предположении произвольных распределений всех исходных временных характеристик [12].

Там же устанавливается интересный и важный во многих отношениях факт, что длительность простой рассматриваемой системы зависит от длительности ее безотказной работы. Таким образом, получается, что последовательность случайных длительностей безотказной работы (наработки) и восстановлений системы образует альтернирующий процесс восстановления с зависимыми компонентами.

В работах [14,16] изучаются некоторые аспекты простой тройрованной системы. В [14] два основных элемента (вычислительные машины) в качестве скользящего резерва используют третий, который может находиться в любом режиме по нагрузке (ненагруженный, облегченный, нагруженный).

При этом все исходные временные характеристики (длительности безотказной работы элементов, длительности восстановления), кроме времени переключения, распределены экспоненциальным законом.

Отметим также, что в [14] вероятностная характеристика длительности простой не представляет собой самостоятельный интерес – она используется лишь для сведения дублированной системы к одноканальной и тройрованной системы – к дублированной.

Анализ простой тройрованной системы в довольно общих предположениях относительно исходных статистических характеристик проводится в [16]. Что касается многоканальных систем, проблема анализа их проста находится только на начальной стадии своего решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability. Abstracts Book. Bordeaux. - France, 2000.
2. **Hank Intern, Jeremy Oliver, Edgardo Sepulveda.** Telecommunication Regulation Handbook. - Washington. The World Bank, 2000.
3. **Хуродзе Р.А.** О новых подходах в теории и практике надежности резервированных систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2001. - №3,
4. Handbook on Quality of Service and Network Performance // CCITT. - Geneva, 1993.

5. **Нерес В.А.** Надежность сетей связи: тенденции последнего десятилетия // Электросвязь. - 1998. - №1.
6. ITU-T Recommendation E.862. Dependability planing of telecommunication networks. - Geneva, 1992.
7. **Хуродзе Р.А.** Надежность аналоговых устройств систем управления. - М.: Наука, 2000.
8. **Какубава Р.В., Хуродзе Р.А.** Вероятностный анализ простоя дублированной системы с восстановлением и переключением // Автоматика и телемеханика. - 2000. - №9.
9. **Хуродзе Р.А., Какубава Р.В.** О надежностном планировании технических систем: математический подход // Вестник Российской Академии Естественных наук. - 2003. - №4.
10. **Khurodze R., Kakubava I., Svanidze N.** Analysis of closed queueing system with consideration of extra-system delays of service facility // Bulletin of the Georg. Acad. Sci. - 2003. - №2. - P. 168.
11. **Kakubava R., Chkhaidze N., Svanidze N.** Analysis of closed queueing system with consideration of extra-system delays of service facility// Bulletin of the Georg. Acad. Sci. - 2003.- №1. - P. 169.
12. **Какубава Р.В.** Длительность простоя – важный показатель надежности: о простое дублированных систем // Надежность. - М.: Технологии, 2003. - №3. – P. 169
11. **Khurodze R., Kakubava R., Chumburidze T.** Model of the analysis of duplicated system downtime with inspection // Bulletin of the Georg. Acad. Sci. - 2003. - №3.
12. **Вишне夫斯基 В.М., Ребортович Б.И., Тимохова Г.А.** Анализ вариантов организации многомашинных вычислительных центров в автоматизированных системах массового обслуживания с учетом надежности // Автоматика и телемеханика. - 1977. - №9.
13. **Какубава Р.В., Микадзе И.С.** Система обслуживания с дублированием // Кибернетика. - 1985. - №3.
14. **Хуродзе Р.А.** Модель простоя тройрованной системы // Надежность. - М.: Технологии. - 2003. - №3,

Груз. техн.-й ун-т.

Материал поступил в редакцию 4.10.2003.

Ռ.Ա. ԽՈՐՈԶԵ

ՈՐՈՇ ՆՈՐ ՄՈՏԵՅՈՒՄՆԵՐ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄԵԶ

Բերվում է տեղեկահաղորդակցական համակարգերի հուսալիության խնդրի ժամանակակից վիճակի վերլուծությունը: Նկարագրվում է այդ համակարգերի հուսալի պլանավորման մաթեմատիկական մոդելը: Մտցվում է փոխարինման և վերականգնման հերթերի առանձին սպասարկմամբ բազմաբաղադրիչ պահեստավորված համակարգի օպտիմալացման տնտեսական չափանիշ, առաջադրվում է մաթեմատիկական ծրագրավորման համապատասխան խնդիր: Վերլուծվում է պահեստավորված համակարգերի պարապուրդի՝ որպես հուսալիության կարևոր չափանիշի տևողությունը, քննարկվում են վերջինիս հավանականային վերլուծության որոշ տեսանկյուններ:

R.A. KHURODZE

SOME NEW APPROACHES TO THE MATHEMATICAL THEORY OF RELIABILITY

The analysis of present-day problem state in info - communication system reliability is given. The mathematical approach to reliability design is described. An economical optimization criterion of a multicomponent redundant system with separate service of replacement and restoration queues is introduced, an appropriate mathematical programming task is set. Downtime duration of reserved systems as an important ratio of reliability is analyzed and some aspects of its probability analysis are discussed.