

ЖИВА ЛИ ЕЩЕ ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ?

Игорь Ушаков

•
Сан Диего, Калифорния, США
e-mail: igorushakov@gmail.com

Во время банкета на закрытии конференции MMR-2004 Conference (Математические методы в надежности, Санта-Фе, США), один из ведущих Западных специалистов по надежности профессор Университета Джорджа Вашингтона (Вашингтон, США) Нозер Сингпурвалла выступал в качестве ведущего дискуссии. Темой дискуссии им был выбран, скажем прямо, провокационный вопрос: «Жива ли еще теория надежности?» Сама по себе постановка такого вопроса вызвала буквально бурю негодования среди участников: «Да, да, да! Она жива и процветает!»

Что же происходит в наши дни, и почему такой вопрос в принципе возник у серьезного математика, посвятившего многие годы развитию этой самой теории надежности?

Можно попытаться ответить на этот вопрос, хотя ответ этот будет далеко неоднозначным. На правах если уж не «динозавра в надежности», то уж, во всяком случае, «мамонта», я берусь обсудить эту непростую тему.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯВШИЕ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1. Теория зарождается в недрах практики.

Вспомним, когда начался бум теории надежности. Шла Корейская война (1950-53гг). Военная техника в первые же годы «холодной войны» бурно развивалась: обе стороны в процессе гонки вооружений создавали все более эффективные «мировороческое оружие, системы усложнялись, а промышленность мирного времени едва успевала за потребностями американских и советских «ястребов». Обе стороны несли огромные потери из-за частых отказов военной техники, а но первыми одумались американцы: они всегда лучше считали деньги. В США начали уделять повышенное внимание вопросам качества, надежности и обслуживания техники: начали проводиться ежегодные симпозиумы Института Радиоинженеров (IRE - Institute of Radio Engineers), а позднее, Института Инженеров Электрики и Электроники (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers), которые выпускали труды конференций. К 60-м годам прошлого столетия на читателей обрушился мощный поток публикаций по надежности...

Примерно в это же время началась активизация работ по надежности и в бывшем Советском Союзе. Академик Аксель Иванович Берг – «отец советской кибернетики» – пустил крылатую фразу: «Надежность – проблема №1!»

Иными словами, появилась насущная проблема, которая требовала быстрого и квалифицированного решения.

2. Уменьшение актуальности проблемы.

Не последнюю роль сыграло в спаде интереса к теории надежности среди разработчиков и производителей техники (в особенности электронной), что аппаратура стала существенно надежнее. Если наработка на отказ электронных («вакуумных») ламп в 50-60-х годах измерялась десятками, в лучшем случае – сотнями часов, то нынешние микросхемы, заменяющие по своим функциональным возможностям целые блоки, а то и стойки «ламповой аппаратуры», имеют интенсивность отказа порядка $10^{-6} - 10^{-8}$ 1/час.

Понятно, что в такой ситуации проблема надежности перешла на другой уровень – на уровень больших систем.

3. Перенасыщенность «научного рынка».

Теория всегда должна опережать нужды сегодняшней практики, иначе она будет держать руку на пульсе уже умершего J... Однако, в настоящее время теория надежности либо слишком «рванула» вперед, либо заползла в «экзотические тупики». Практика с успехом обходится громадным и – нужно отметить – первоклассным общетеоретическим багажом. «Локально» же возникающие текущие проблемы и разрешаются на локальном уровне.

Сейчас, видимо, фирмам-разработчикам выгоднее и эффективнее приглашать на текущие проекты по надежности квалифицированных специалистов со стороны для выполнения конкретных исследований.

4. Возникновение «теории ради теории».

Если просмотреть первые работы надежности конца 50-х и начала 60-х годов прошлого столетия, то в глаза бросается прагматичность работ по надежности. Даже «чистые математики» писали не для себя, а для «пользователей»: конечные результаты были прозрачны и практическая их применимость была очевидна. Однако уже в 70-е годы стали появляться публикации, либо посвященные изучению «экзотических» (а то и вовсе надуманных) моделей, либо содержащие головоломные математические выкладки (если не сказать – выкрутасы), за которыми терялся и смысл задачи да и конечные результаты представлялись в совершенно неудобоваримой форме. Это были работы, которые, как однажды сказал Борис Владимирович Гнеденко, авторы писали для себя, а не для читателя!

Это, безусловно, положило начало определенной дискредитации теории надежности, что позволило, например, одному из ведущих советских конструкторов космических аппаратов заявить: «Теорией надежностью занимаются те, кто в надежности ничего не понимает. Те же, кто понимает в надежности, те просто делают надежную аппаратуры!» (К несчастью, такое отношение к теории привело к тому, что произошел тот печальный случай, когда при посадке «Союза-11» трое космонавтов погибли из-за непродуманной схемы резервирования в системе разгерметизации: конструкторы не подумали о том, что релейные схемы имеют отказы типа ложного срабатывания как на замыкание, так и на размыкание.)

Потеря прагматичности работ по надежности стала с годами пугающей...

5. Вопросы «современной технической моды».

Однажды я спросил своего давнего друга Роберта Макола, которого многие могут знать по его книге «Системотехника», чем вызвано появление нового направления – Наука управления (Management Science)? Ведь была одно время в моде *кибернетика*, потом она породила *системотехнику*, потом возникло *исследование операций*, а теперь вот *наука управления*... «Так ты уже сам ответил на свой вопрос: смена моды! Каждый раз придумывается новое название, чтобы заставить того, кто платит, раскошелиться – это же новое! это же лучше, чем то, что было!» - ответил мне Макол.

Конечно, это шутка, но, как говорится, в каждой шутке есть *доля шутки*.

6. Смещение «центра тяжести» проблемы.

Теория надежности всегда уделяла основное внимание анализу систем: понятно, что на уровне элементов теоретические методы сводились в основном к задачам планирования испытаний и обработки экспериментальных данных. Современные системы все более и более усложняются – посмотрите на глобальные транспортные системы, телекоммуникационные сети, «компьютерные коммуну»... И здесь, действительно, есть много интересных, сложных и актуальных задач, но от специалиста по надежности уже требуется не написание общетеоретических работ, а решение этих конкретных задач, участие в «живых проектах». Зачастую задачи настолько специфичны, что их решения уже не носят междисциплинарного характера. Но, безусловно, решение этих задач опирается на общеметодологическую и математическую базу современной теории надежности.

Так что слухи о смерти теории надежности представляются преждевременными, как говаривал Марк Твэн, хотя пора ее расцвета, несомненно, уже осталась позади...

«ФРОНТ РАБОТ» ПО НАДЕЖНОСТИ В БЫВШЕМ СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ.

К концу 50-х в бывшем Советском Союзе публикации по надежности стали появляться, как грибы после доброго осеннего дождя, а в 1958 г. состоялась Первая Всесоюзная конференция по надежности, на которой председательствовал В.И. Сифоров.

Стали формироваться научные школы – в Москве, Ленинграде, Киеве, Риге...

Московская школа.

К концу 50-х в Москве сформировалась неформальная группа в основном из преподавателей Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского (Б. Васильев, Г. Дружинин, М. Синица), а также военных специалистов из ЦНИИ-22 Министерства Обороны (В. Кузнецов, И. Морозов, К. Цветаев).

В это же время в Научно-техническом обществе по радиотехнике им. А.С. Попова (председатель ак. В. Сифоров) замечательный организатор науки Яков Михайлович Сорин создал Секцию надежности, где активную роль стал играть Б. Левин. При активной поддержке ак. А. Берга, в

1959 г. Я. Сорин создал первый в Москве (и, видимо, второй в бывшем Советском Союзе) отдел надежности в одном из НИИ Министерства электронной промышленности. В этом отделе родилась первая ведомственная методика расчета надежности электронной аппаратуры, легшая затем в основу общесоюзных стандартов по надежности.

С первого же года существования этого отдела надежности, к его работе были привлечены первоклассные математики во главе с ак. АН Украины Борисом Владимировичем Гнеденко. В эту группу входили профессора Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова Ю. Беляев и А. Соловьев, а также первоклассный статистик Я. Шор из одного московского военного НИИ. Они вместе с Я. Сориным и сотрудником отдела И. Ушаковым стали официальными консультантами Госстандарта СССР, где был (опять же по инициативе Я. Сорина) создан Научно-технический совет по проблеме надежности.

В 1962г. Б. Гнеденко и Я. Сорин организовали еженедельный Семинар по надежности, который проходил в вечернее время в МГУ. На этом семинаре всегда было очень много слушателей – как говорится, яблоку негде было упасть, хотя заседания проходили не в аудиториях, а в лекционных залах. Чуть позднее этот семинар, который вели Б. Гнеденко, Ю. Беляев и А. Соловьев, а позднее присоединился и И. Коваленко, перерос в Семинар по надежности и массовому обслуживанию, который так и закрепился в МГУ.

«Тандем Сорин-Гнеденко» заработал в полную мощность и не снижал обороты в течение примерно 25 лет, проделав поистине гигантскую организационную и просветительскую работу. Примерно через год Я. Сорин организует Кабинет надежности и качества при Московском Политехническом музее. Своей правой рукой он выбирает Б. Гнеденко, делая его научным руководителем, а «всеобщим замом» назначает И. Ушакова. Задачей Кабинета было «нести знания в массы»: в то время при неиссякаемой организаторской и пропагандистской деятельности Я. Сорина через Госстандарт было проведено решение о создании службы надежности во всех промышленных (в основном, оборонных) министерствах.

Громадный коллектив докторов и кандидатов наук работал в этом Кабинете на общественных началах. (Помните шуточный ответ на вопрос: что такое работа на общественных началах? Это когда ты вкалываешь, но бесплатно, а обычная работа – это когда ты ничего не делаешь, но получаешь зарплату J.)

Был составлен график ежедневных консультаций для инженеров- разработчиков и работников служб надежности. Консультации проводились высококвалифицированными специалистами – как опытными инженерами (А. Аристов, И. Аронов, Б. Бердичевский, Э. Дзиркал, Р. Улинич, И. Ушаков, Ф. Фишбейн и др.), так и математиками (Ю. Беляев, В. Каштанов, А. Соловьев, Я. Шор и др.) Ежедневные консультации собирали по 15-20 человек в день, а на лекции (раз в две недели – две двухчасовых лекции) битком набивалась Главная Аудитория Политехнического музея, причем больше половины из них были командированные с промышленных предприятий, приезжавшие отовсюду: из Ленинграда и Киева, из Риги и Владивостока (!), из Новосибирска и Ташкента, из Еревана и Тбилиси... Карта СССР, висевшая в кабинете Якова Михайловича, все была утыкана красными флажками с указанием «охваченных» городов..

В 1969г. при журнале «Стандарты и качество» все тот же неутомимый Я. Сорин создает приложение «Надежность и контроль качества», а своими замами выбирает Б. Гнеденко, И. Ушакова и Я. Шора. После смерти Якова Михайловича Главным редактором стал Б. Гнеденко.

Примерно тогда же в издательстве «Советское радио» (позднее – «Радио и связь») создается Редакционный свет по надежности во главе с Б.В. Гнеденко. Начинается выпуск книг в серии «Библиотека инженера по надежности», которые сыграли огромную роль в воспитании специалистов по надежности во всех уголках бывшего Советского Союза.

Где-то в середине 70-х в журнале «Известия АН СССР. Техническая кибернетика» открывается раздел «Теория надежности».

И, конечно же, нельзя не вспомнить бесконечные «автопробеги по бездорожью и разгильдяйству», которые устраивал Я. Сорин со своими сподвижниками! Это были Киев, Ленинград, Ереван, Тбилиси, Рига и Горький... Именно по его инициативе и с его поддержкой в различных городах нашей страны были созданы кабинеты надежности, аналогичные Московскому (а Московский был с почетом переименован в Центральный).

Трудно перечислить всех представителей Московской школы надежности, но все же необходимо упомянуть некоторые имена, без которых картина не была бы полна: А. Аристов, И. Аронов, В. Гадасин, Ю. Конёнков, Г. Карташов, И. Павлов, А. Райкин, Р. Судаков, О. Тескин, В. Шпер

Говоря о Московской школе надежности, нельзя не упомянуть о двух книгах, которые, в определенном смысле, подвели итоги многолетних исследований.

Прежде всего, это прекрасная книга «Математические методы в теории надежности», написанная Б. Гнеденко, Ю. Беляевым и А. Соловьевым [1]. Книга была быстро переведена на английский язык [2]. И сейчас, спустя уже более сорока лет, она, наряду с книгой Р. Барлоу и Ф. Прошана [3, 4], переведенной на русский язык [5, 6], остается лучшей монографией по общей теории надежности.

Во вторую очередь, можно отметить «Справочник по расчету надежности» Б. Козлова и И. Ушакова [7], выдержавший несколько переизданий [8 – 9] и переводов [1 – 14]. Этот справочник долгие годы оставался настольной книгой инженеров-разработчиков.

Ленинградская школа.

В 1959г. в одном из Ленинградских НИИ Министерства Судостроительной промышленности был организован первый отечественный отдел надежности, который возглавил И. Маликов. В том же году группа авторов – основоположников ленинградской школы надежности (И. Маликов, А. Половко, Н. Романов и П. Чукуреев) выпустила «Основы теории и расчета надежности» [15]. В книге было всего 139 стр., но, как говорится: «Мал золотник, да дорог». Эта была первая – пусть и «худенькая» – монография, где впервые на русском языке была систематически изложена элементарная теория надежности.

Вслед за Московским Кабинетом надежности, в Ленинграде начал функционировать аналогичный кабинет при Доме научно-технической пропаганды. Здесь «организатором и вдохновителем побед» был Анатолий Михайлович Половко, преподававший в Военной академии им. А.Ф. Можайского.

В 1964г. А. Половко выпустил одну из первых отечественных серьезных монографий по теории надежности [16]. Она же была и первой отечественной книгой, переведенной на Западе [17]. Ленинградская школа надежности дала много интересных и высококвалифицированных ученых: это Л.К. Горский, И.А. Рябинин, Н.М. Седякин, Г.Н. Черкесов, И.Б. Шубинский и др.

Киевская школа.

В Киеве в стенах Киевского военно-инженерного радиотехнического училища (КВИРТУ) расцвела школа под руководством Николая Алексеевича Шишонка. В эту группу входили Л. Барвинский, М. Ластовченко, Б. Креденцер, А. Перроте, В. Репкин, С. Сенецкий. В 1964г. коллектив авторов, возглавлявшийся Н. Шишонком опубликовала монографию «Основы теории надежности радиоэлектронной аппаратуры» [18].

Параллельно в Киевском Государственном университете, а позднее в Институте кибернетики (ныне им. В.М. Глушкова) очень сильная группа математиков, в основном учеников Б.В. Гнеденко, получила большое число интересных научных результатов в области надежности и массового обслуживания. В этой группе были такие выдающиеся математики, как академики АН Украины В. Королюк и И. Коваленко, а также В. Волкович, В. Заславский, Т. Марьянович, А. Турбин и др.

Рижская школа.

«Отцом-основоположником» Рижской школы надежности является Хаим Борисович Кордонский, заведовавший кафедрой в Рижском Институте инженеров гражданской авиации (ныне Рижский Технический университет). Ученик крупного советского математика ак. Ю. Линника, Х. Кордонский унаследовал черты своего учителя: он был не только прекрасным ученым, но и замечательным преподавателем. Его ученики – А. Андронов, И. Герцбах и Ю. Пармонов были уже в ранние годы известны по всему бывшему Советскому Союзу.

В отличие от многих других школ надежности, Рижская отличалась прагматизмом и ориентацией на насущные инженерные проблемы. В 1963 г. выходит монография Х. Кордонского [19], где уже приведены некоторые модели надежности, а в 1969г. его книга совместно с И. Герцбахом [20]. Затем в 1969 г. вышла книга И. Герцбаха [21], пожалуй, лучшая из книг по моделям профилактики.

Усилиями Х. Кордонского в Рижском Доме научно-технической пропаганды, что располагался тогда на углу одной из улочек, вливавшихся на площадь Домского Собора, был организован регулярный семинар по надежности.

Независимо в Риге также работали над проблемой надежности В. Левин и В. Леонтьев.

Иркутская школа.

Здесь вопросами надежности энергосистем занимался директор Сибирского энергетического института ак. Юрий Николаевич Руденко, собравший в отдел надежности талантливую молодежь (Н. Воропай, В. Зоркальцев, Г. Колосок, Л. Криворуцкий). Он инициировал работы по анализу живучести Единой энергетической системы страны (ЕЭС), за что вместе с И.

Ушаковым получил престижную Премию им. Г.М. Кржыжановского от АН СССР. Они же в соавторстве выпустили и первую книгу о надежности энергосистем [22, 23].

Знаменитые «Руденковские семинары» семинары на Байкале привлекали не только экзотикой Сибири... Там собирался весь «цвет» специалистов по надежности в энергетике со всей страны: Ю. Гук, Н. Манов, Е. Червоный, Е. Ставровский, М. Сухарев, Э. Фархад-заде, М. Чельцов, Г. Черкесов, М. Ястрбенецкий и др.

Нельзя не сказать хотя бы несколько слов и о других школах надежности в бывшем советском Союзе.

Ташкент.

Здесь работы по надежности и статистическому контролю качества возглавил ставший впоследствии Вице-президентом Узбекской АН Сагды Хасанович Сираждинов, ученик А.Н. Колмогорова. Здесь в области надежности работали такие математики и прикладники, как Т. Азларов, А. Усманов, Ш.Форманов и др.

Горький.

Горьковском филиале ВНИИС Госстандарта большую работу по развитию статистических методов надежности и контроля качества проводили Л. Лейфер и В. Липидус-старший. (Как и в «Двенадцати стульях» Ильфа и Петрова, здесь были также два брата Липидуса.)

Минск.

В Минском Высшем инженерном радиотехническом училище (МВИРТУ) работала группа под руководством профессора Александра Михайловича Широкова (В. Скрипник, А. Назин).

Тбилиси.

Еще в начале 60-х здесь появился первый кандидат технических наук именно по надежности – Ш. Бебиашвили, ученик ак. В.И. Сифорова. В последующие годы под руководством И. Микадзе работала группа молодых прикладников-математиков.

Ереван.

В Ереванском Государственном университете и в Ереванском НИИ электронных машин работало несколько хороших специалистов, прежде всего, Э. Даниелян, а также А. Геворкян, А. Геокчян, Г. Маранджян и др.

Владивосток.

В Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного Отделения Академии наук работала сильная группа специалистов по надежности (О. Абрамов, А. Супоня).

И все же перечень этот, наверняка, далек от завершения...

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Как уже отмечалось, бурный поток идей в теории надежности хлынул в самом начале «холодной войны», когда стали появляться все более и более сложные системы вооружения, которые простаивали больше, чем работали.

Первые шаги в развитии того, что мы теперь называем теорией надежности, были сделаны в Америке. Однако отечественные специалисты быстро включились в этот процесс, а вскоре не только сравнялись, но во многом и опередили «законодателей моды».

Не претендуя ни в коей мере на полноту обзора, попытаемся все же дать беглое описание основных научных направлений, которые представляли специфику отечественной школы теории надежности.

Интересный метод оценки доверительных границ для надежности системы, основанных на результатах безотказных испытаний входящих в нее элементов, был получен Р. Мирным и А. Соловьевым [24]. Затем некоторые более общие результаты были получены Ю. Беляевым, который предложил метод, основанный на статистических испытаниях [25, 26]. Большое число новых аналитических результатов для различных случаев было получено И. Павловым [27 – 29], Р. Судаковым [30], О. Тескиным [31].

Много работ было посвящено анализу сложных систем с деградацией качества функционирования за счет «частичных отказов». Действительно, вряд ли сложную систему можно характеризовать примитивными бинарными критериями работоспособности типа «да-нет» [32-34].

Доказательство двух предельных теорем в теории процессов восстановления (рекуррентных точечных процессов) сыграло решающую роль в развитии теории надежности восстанавливаемых систем. А. Реньи [35] сформулировал и доказал теорему асимптотического «разрежения» точечного потока, и тогда же Г. Ососков [36] доказал теорему об асимптотическом поведении суперпозиции точечных потоков. Позже Ю. Беляев, Григелионис и И. Погожев обобщили эти результаты. Эти асимптотические теоремы позволяют построить практически удобные инженерные методы приближенного анализа сложных высоконадежных систем с восстановлением [37].

Б. Гнеденко [38, 39] был первым, кто начал разрабатывать асимптотические методы анализа систем с восстановлением еще в начале 60-х годов. Он рассмотрел дублированную систему и показал, что асимптотическое распределение времени безотказной работы таких систем является экспоненциальным и не зависит от распределения времени восстановления (если это время в среднем мало по сравнению с наработкой на отказ). Эти первые работы открыли новое направление в теории надежности, которое затем успешно развивали, в первую очередь, И. Коваленко [40 - 42] и А. Соловьев [43 - 46].

Интересные идеи агрегирования состояний полумарковских процессов с применениями к задачам надежности были предложены В. Королюком и А. Турбиным [47 – 48], а затем развиты в ряде работ [49 – 50]. Интересные приложения к надежности содержатся в работах В. Анисимова [51] и Д. Сильвестрова [52].

Методы оптимального резервирования получили свое развитие в работах [53 - 57]. Результаты первых работ по оптимальному обеспечению запасными элементами вошли в разрабатывавшиеся тогда военные стандарты.

Такое важное направление в теории надежности, как ускоренные испытания, возникло на самой заре развития теории надежности. Достаточно вспомнить работы Н. Седякина [58], Х. Кордонского и И. Герцбаха [59], А.Перроте, Г. Карташова и К. Цветаева [60]. Модели ускоренных испытаний с нагрузками, зависящими от времени, рассмотрели В. Багданавичус и М. Никулин [61].

В заключение хочется отметить прекрасную книгу под общей редакцией Бориса Владимировича Гнеденко [62], в которой подытожены отечественные достижения в области теории надежности.

* * *

Естественно, что эти краткие заметки не смогли отметить всех тех, кто внес заметный вклад в развитие теории и практики надежности. Автор попытался лишь сделать предельно краткий обзор идей в области теории надежности, в котором – как и во всем чересчур кратком – имеется прорва прорех... Каждый понимает, что подобного рода обзоры всегда страдают от авторского субъективизма и неизбежной некомпетентности в тех или иных вопросах. Более того, это задача к тому же и крайне неблагодарная – можно обидеть друзей, которых забыл вспомнить.

Нас буквально захлестнул шквал публикаций по надежности: десятки книг, сотни статей... Что делать тому, кто ищет в этом океане щепочку правды?.. Одним словом похоже на ситуацию: «Пить – так пить!» – сказал котенок, когда несли его топить...

Найти стоящие книги по теории надежности в нынешнем потоке литературы становится все труднее и труднее... Иногда даже создается впечатление, что какого-либо отбора рукописей для публикации не производится вовсе: издательства просто «зашибают деньгу». Необходимо организовать какой-то Форум специалистов по надежности, который был бы способен осуществлять честную и жесткую оценку публикаций в регулярно издаваемом обзоре новых публикаций. Нужен какой-то «коллективный разум», помогающий выплыть котенку! Может, проще довериться немногим экспертам, которые помогут (пусть даже субъективно) сориентироваться в информационной пучине?

В противном случае, новое поколение специалистов по надежности потеряет всякую ориентацию в этом мире...

Сейчас существует новый вебсайт «ГНЕДЕНКО ФОРУМ» (его электронный адрес <http://www.gnedenko-forum.org>). Может, имеет смысл на нем устроить рейтинг книг по надежности?

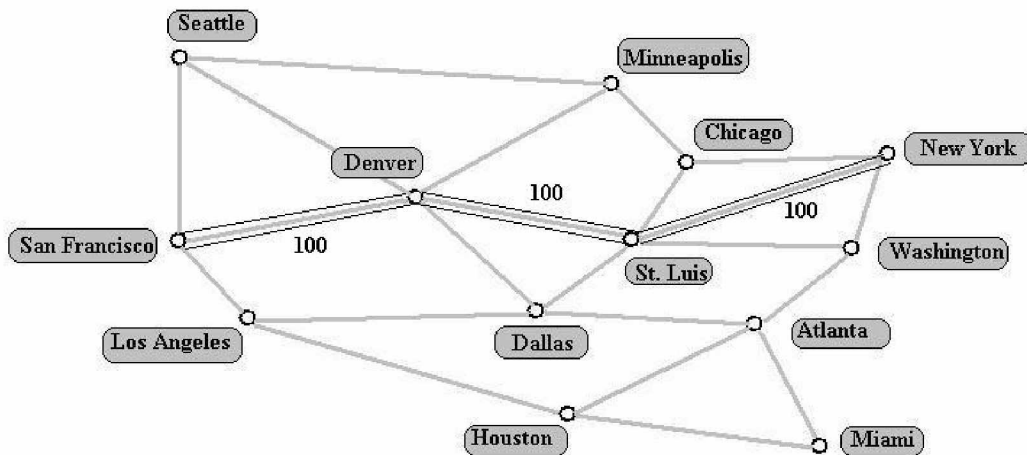
Одним словом, нерешенных задач даже чисто организационного толка очень много, и решить их можно только сообща!

Ниже приводятся примеры реальных приложений теории надежности к решению различных практических задач.

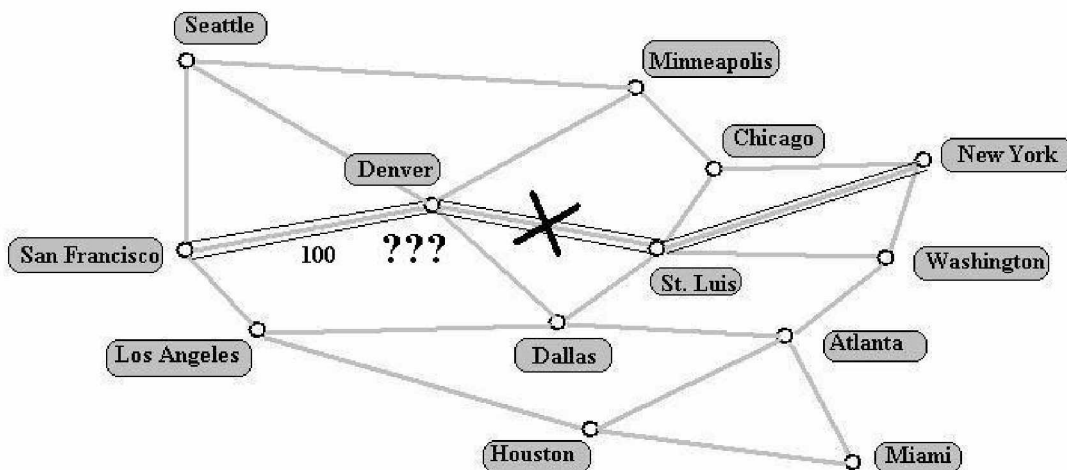
ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Компьютерная модель для анализ живучести сети передачи данных (для американской телефонной компании MCI)

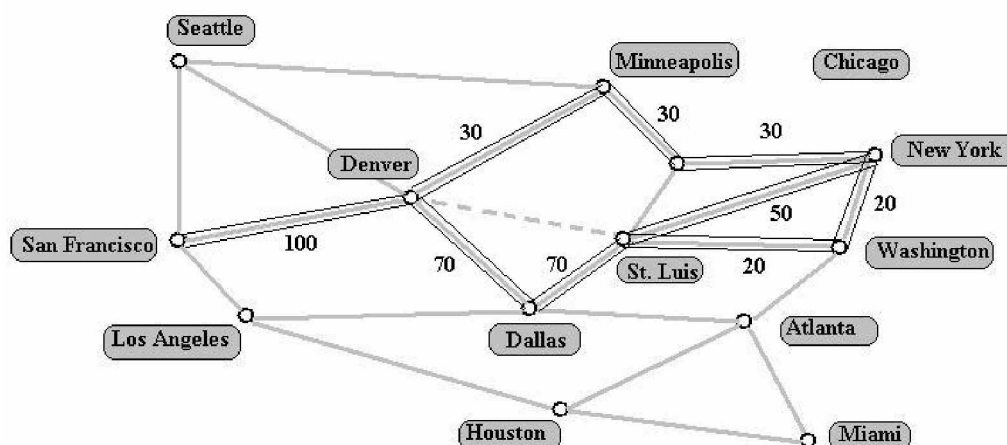
Решается задача оптимального распределения потоков в сети с учетом трафика и заданных пропускных способностей узлов и ребер. Допустим, что поток между Сан-Франциско и Нью-Йорком проходит так, как представлено на рисунке.



Дальше модель работает в режиме диалога: допустим, пользователь хочет посмотреть, как отреагирует сеть на отказ (или аварийное отключение) канала между Денвером и Сент-Луисом.



Модель пересчитывает новые исходные данные и находит новое оптимальное распределение потока данных между Сан-Франциско и Нью-Йорком.



Естественно, что при этом пересчитываются и потоки между остальными узлами. Программная реализация этой модели была использована для управления реальной сетью телекоммуникационной компании MCI.

Компьютерная модель для оптимизации числа запасных элементов для наземных станций телекоммуникационной спутниковой системы Глобалстар

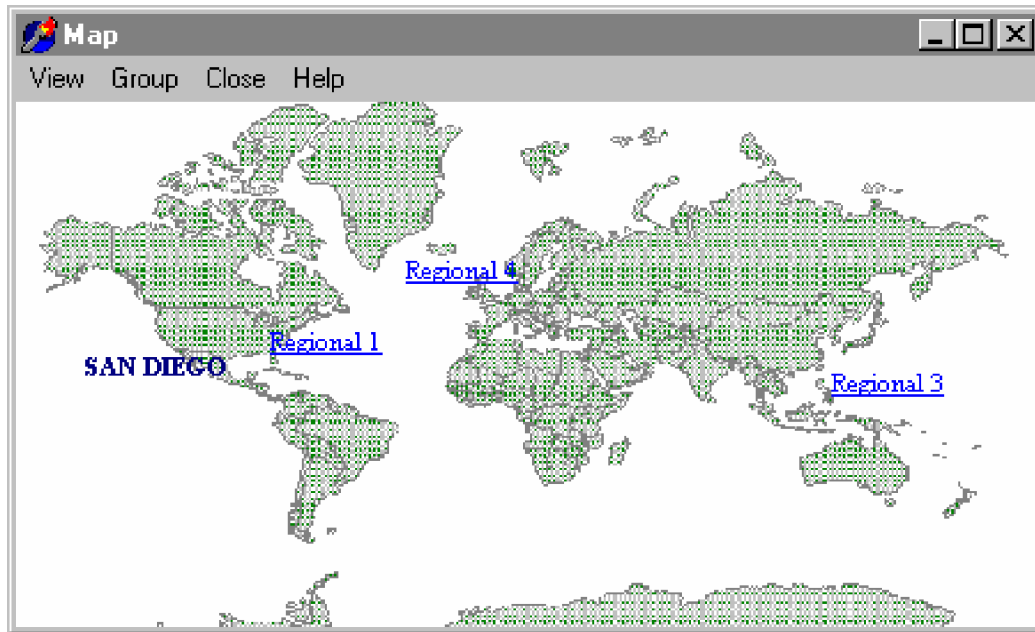


Система Глобалстар использует низко-орбитальные спутники, которые обращаются вокруг Земли по спиралеобразным орбитам, охватывая практически все точки на поверхности Земли. Планировалось разместить около сотни наземных базовых станций, причем по конфигурации (по составу оборудования и пропускной способности) все станции практически были различными, поскольку обслуживаемые ими зоны были различны по плотности населения и по доступности другими средствами связи.

В этих условиях обоснованный расчет необходимых запасных частей, иначе как при помощи компьютерной модели, не представлялся возможным. Заказчик быстро понял, что «неандертальские методы» типа «5% от числа работающих элементов данного типа, но не

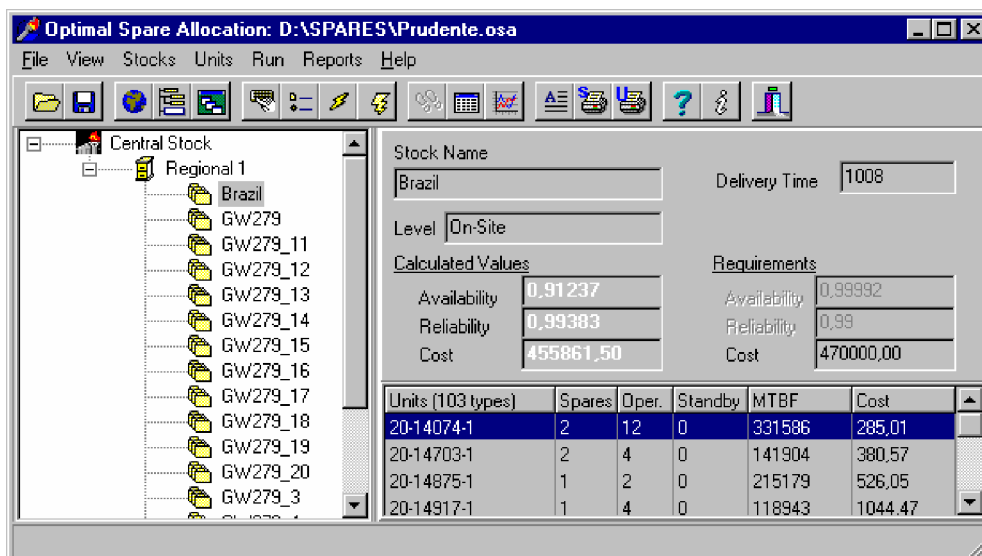
меньше одной штуки» приведут лишь к дезориентации разработчиков и неоправданным расходам.

В результате сошлись на необходимости создания трех региональных складских баз, обслуживающих базовые наземные станции. Центральный склад размещается в Сан-Диего (Калифорния).



В результате была разработана модель оптимального резервирования, которая давала список необходимых запасных элементов для каждой из наземных станций. Исходными данными были количество рабочих элементов каждого типа, тип пополнения (по запросу или периодически) и время доставки необходимого пополнения. Остальные данные (интенсивности отказа и стоимости элементов) хранились в общей базе данных.

Вид пользовательского окна с перечнем наземных станций для одного из региональных складов приведен ниже.



Для каждой из наземных станций в модели содержатся все необходимые сведения о числе необходимых запасных элементов.

Part No	Name	Qty	Standby	Comments
20-14074-1	TFU Distribution CCA	12	0	TFU_RF Rack
20-14703-1	TFU Site Alarm CCA	4	0	TFU_RF Rack
20-14875-1	TFU Frequency Reference CCA	2	0	TFU_RF Rack
20-14917-1	ATM IC CCA	4	0	CIS_SBS Rack
20-14918-1	CCA, YMCA Interface	4	0	CCP Combo Rack
20-14918-1	CCA, YMCA Interface	4	0	GC Rack
20-14930-1	BCN IC 8 Port CCA	24	0	CIS_SBS Rack
20-18034-1	CCA, ALARM INTERFACE, BULKHEAD	2	0	TFU_RF Rack
20-26035-1	GW Receiver Card (GRcC) CCA	90	0	Receive Rack
20-26085-1	Digital Common CCA	7	0	Digital Rack
20-26115-1	GW UpConvertor Card CCA	112	0	FL_GCU RACK
20-26195-1	Timing Freq. Dist. Card (TFDC) CCA	6	0	Receive Rack
20-26205-1	CCA, FAULT MONITORING, BRFAKFR	1	0	CCP Combo Rack

Решалось две задачи: (1) найти оптимальное число запасных элементов каждого типа, чтобы бесперебойность замен была бы максимальной при ограничениях на суммарные затраты, и (2) найти оптимальное число запасных элементов каждого типа, чтобы затраты были минимальны при условии, что достигается заданная вероятность бесперебойных замен. Для каждой станции была предусмотрена возможность распечатки отчета

Stock Report

OPTIMAL Spare Allocation Report: Stocks

Title: STOCKS
 Header: OPTIMAL SPARE ALLOCATION: STOCKS
 Notes:

Unit Detail

- Name
- MTBF
- Cost
- Operating
- Standby
- Spare
- Total Qty
- Spare Cost

Include into report

- Logo
- Header
- Notes
- Date
- UNIT DETAIL
- Level
- Delivery Time
- Return Time

Requirements:

- Availability
- Reliability
- Cost

Calculated values:

- Availability
- Reliability
- Cost

Include stocks

- All
- Selected
- Selected & Children

Sort units by

- Part No
- Name
- Unit Cost
- Unit MTBF
- Spare Cost
- Spare Qty

Sort stocks by

- Name
- Level
- Reliability
- Availability
- Cost
- Hierarchy

Buttons: Preview, Print, Export, Help, Close

Образец отчета представлен ниже.

QUALCOMM		OPTIMAL SPARE ALLOCATION STOCKS			
Stock: Brazil		Level: On-Site		Availability: 0,912372575375	
Spare unit delivery time: 1008				Reliability: 0,99383202067	
				Cost: 455861,50	
Unit data:					
Part No	Name	MTEF	Cost	Spare	Spare Cost
20-14074-1	TFU Distribution CCA	331586	285,01	2	570,02
20-14703-1	TFU Site Alarm CCA	141904	380,57	2	761,14
20-14875-1	TFU Frequency Reference CCA	215179	526,05	1	526,05
20-14917-1	ATM IC CCA	118943	1044,47	1	1044,47
20-14918-1	CCA, YMCA Interface	66667	92,42	3	277,26
20-14930-1	BCN IC 8 Port CCA	102364	609,74	3	1829,22
20-18034-1	CCA, ALARM INTERFACE, BULKHEAD	166667	178,44	1	178,44
20-26035-1	GW Receiver Card (GRc) CCA	78468	1301,53	6	7809,18
20-26085-1	Digital Common CCA	133333	788,14	2	1576,28
				12	15218,64

Определение размеров зон технического обслуживания и размещения центров обслуживания абонентов спутниковой системы связи

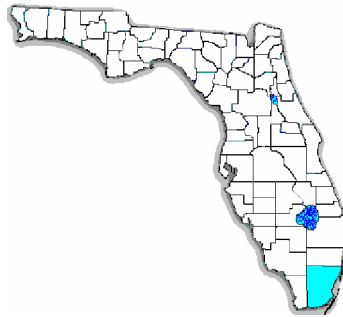
На основании начального периода эксплуатации системы были получены данные о числе запросов на обслуживание из различных графств штата Флорида (их насчитывается несколько десятков).

Графство	Число запросов	Площадь	Интенсивность (запр. в день)
Alachua	8	902	0.148148
Baker	0	585	0
Bay	9	758	0.166667
Bradford	3	293	0.055556
Brevard	16	995	0.296296
Broward	70	1211	1.296296
...
Wakulla	3	601	0.055556
Walton	8	1066	0.148148

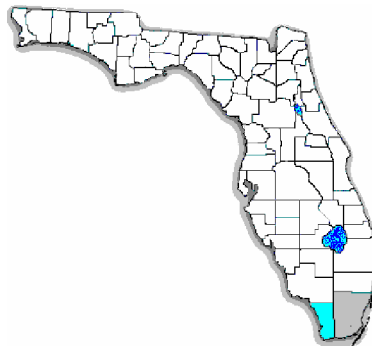
Компьютерная программа предполагала проведение необходимых вычислений в интерактивном режиме. Это объяснялось целым рядом неформализуемых факторов, например, место размещения центра зоны обслуживания выбиралось, исходя не из чисто «геометрических» соображений, а привязывалось к населенным пунктам.

Алгоритм был устроен на принципе направленного перебора с локальной оптимизацией результата. Было принято интуитивное соображение, что конфигурация зон обслуживания, например, в южных графствах Флориды не сказывается на конфигурациях зон на севере штата.

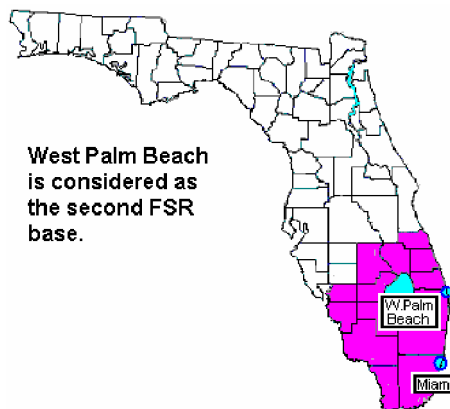
Первое графство выбиралось произвольно, хотя и учитывалась наибольшая плотность запросов на единицу площади. Таковым оказалось графство Дейд (Dade).



. Вычислялись все эксплуатационные характеристики, и оказалось, что допустимо подсоединение следующего графства. Следующее графство выбиралось пользователем из тех соображений, что оно должно быть соседним с первым, уже выбранным, а новая конфигурация зоны была бы достаточно «компактной». Вторым графством, расположенным слева, оказалось Монроу (Monroe).



В результате многократного повторения данной процедуры, была построена первая зона:



При построении этой зоны опять в интерактивном режиме была предпринята успешная попытка ввести два центра с перекрывающимися зонами действия.

Действуя аналогичным образом, мы строим зоны обслуживания от юга на север, покрывая всю территорию штата. Далее подобная процедура применяется к другим штатам.

В результате построения новых зон обслуживания только по одной Флориде экономия средств составила около 400 тысяч долларов за счет лучшего зонирования и более рационального

размещения центров, что позволило сократить число центров и число обслуживающего персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория надежности жива! Надо использовать знания в нужном направлении. Нужда в чистой теории, может быть, и спала, но нужда в приложениях теории надежности к решению практических задач была, есть и будет!

БИБЛИОГРАФИЯ

64. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. (1965) *Математические методы в теории надежности*. Москва, Наука.
65. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu. K., Solovyeu, A.D. (1969). *Mathematical. Methods of Reliability Theory*. New York: Academic Press.
66. Barlow, R., and F. Proschan (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. New York, John Wiley & Sons, NY.
67. Barlow, R., and F. Proschan (1975). *Statistical Theory of Reliability and Life Testing. Probability models*. New York. John Wiley & Sons, NY.
68. Барлоу Р. и Ф. Прошан (1969). *Математическая теория надежности*. Под ред. Б.В. Гнеденко. Москва, Сов. Радио.
69. Барлоу Р., Ф. Прошан (1984). *Статистическая теория надежности и испытания на безотказность*. Под ред. И.А. Ушакова. Москва, Наука.
70. Козлов Б.А. и Ушаков И.А. (1966). *Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры*. Москва, Сов. радио.
71. Козлов Б.А. и Ушаков И.А. (1975) *Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики*. Москва, Сов. радио.
72. Ушаков И.А., редактор (1985). *Надежность технических систем: Справочник*. Москва, Радио и связь.
73. Kozlov, B.A., and I.A. Ushakov (1970). *Reliability Handbook*. New York, Holt, Rinehart and Winston.
74. Koslow, B.A., und I.A. Uschakow (1978) *Handbbuch zur Berechnung der Zuverlassigkeit in Elektronik und Automatentechnik*. Berlin. Akademie-Verlag.
75. Koslow, B.A., und I.A. Uschakow (1979) *Handbbuch zur Berechnung der Zuverlassigkeit fur Ingenieure*. Munchen – Wien. Carl Hansen Verlag.
76. Ushakov, I.A., editor (1989). *Prorucka Spolehlivosti v Radioelektronice a Automatizacni Technice*. Praha, SNTL.
77. Ushakov. I.A., editor(1994) *Handbook of Reliability Engineering*. New York, John Wiley & Sons.
78. Маликов И.М., Половко А.М., Романов Н.А. и Чукреев П.А. (1959) *Основы теории и расчета надежности*. Ленинград, Судпромгиз.
79. Половко А.М. (1964) *Основы теории надежности*. Москва, Наука.
80. Polovko, A.M. (1985) *Fundamentals of Reliability Theory*. Amer. Society for Quality.
81. Шишонок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. (1964). *Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники*. Москва, Сов. радио.
82. Кордонский Х.Б. (1963) *Приложения теории вероятностей в инженерном деле*. Москва, Физматгиз.
83. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. (1966). *Модели отказов*. Москва, Сов. Радио.

84. Герцбах И.Б. (1969) *Модели профилактики*. Москва, Сов. Радио.
85. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. (1986). *Надежность систем энергетики*. Под ред. Л.А. Мелентьева. Москва, Наука.
86. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. (1989). *Надежность систем энергетики*. Изд. 2-е. Под ред. Б.В. Гнеденко. Новосибирск, Наука.
87. Мирный Р.А, Соловьев А.Д. (1964). *Оценки надежности системы по результатам испытаний ее компонент*. В кн. Кибернетику на службу коммунизму, т.2. Москва, Энергия.
88. Беляев Ю.К., Дугина Т.Н., Чепурин Е.В. (1967). *Вычисление нижней доверительной оценки для вероятности безотказной работы сложных систем*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №2, 3.
89. Беляев Ю.К. (1968). *Об упрощенных методах построения доверительных границ для надежности систем по результатам испытаний компонент*. Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, №5.
90. Павлов И.В. (1974). *Оценка надежности системы по результатам испытаний стареющих элементов*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, № 3.
91. Павлов И.В. (1976.) *Интервальное оценивание надежности системы по оценкам надежности ее компонент*. Надежность и контроль качества. №10.
92. Павлов И.В. (1982). *Статистические методы оценки надежности сложных систем по результатам испытаний*. Под ред. И.А. Ушакова. Москва, Радио и связь.
93. Судаков Р.С. (1974). *К вопросу об интервальном оценивании показателя надежности последовательной системы*. Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. №3.
94. Тескин О.И. (1969). *Точные доверительные границы для надежности резервированных систем при безотказных испытаниях их элементов*. Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, №4.
95. Ушаков И.А. (1960). *Оценка эффективности сложных систем*. В кн. «Надежность радиоэлектронной аппаратуры». М., Сов. радио.
96. Ушаков И.А. (1966). *Эффективность функционирования сложных систем*. В кн. «О надежности сложных систем». М., Сов. радио.
97. Дзиркал Э.В. (1974). *Задание и проверка требований к надежности сложных изделий*. М., Радио и связь.
98. Renyi, A. (1956). *Poisson-folyamat egy jellemzese*. (Венгерский). Ann. Math. Statist., Vol. 1, №4.
99. Ососков, Г.А. (1956). *Предельная теорема для потоков подобных событий*. Теория вероятностей и ее приложения, Том 1, №2.
100. Gnedenko, B.V., and I.A. Ushakov. (1995). *Probabilistic Methods in Reliability*. New York, John Wiley & Sons.
101. Гнеденко Б.В. (1964a). *О ненагруженном дублировании*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №4.
102. Гнеденко Б.В. (1964b). *О дублировании с восстановлением*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №5.
103. Коваленко И.Н. (1967). *Асимптотический метод оценки надежности сложных систем*. В кн. «О надежности сложных систем». М., Сов. радио.
104. Коваленко И.Н. (1975). *Исследования по анализу надежности сложных систем*. Киев, Наукова думка.
105. Коваленко И.Н. (1980). *Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем*. М., Сов. радио.

106. Соловьев А.Д. (1968). *Предельные теоремы для процесса гибели и размножения*. Теория вероятностей и ее применения, №4.
107. Соловьев А.Д. (1970). *Резервирование с быстрым восстановлением*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №1.
108. Гнеденко Д.Б., Соловьев А.Д. (1974). *Одна общая модель резервирования с восстановлением*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №6.
109. Гнеденко Д.Б., Соловьев А.Д. (1975). *Оценка надежности сложных восстанавливаемых систем*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №3.
110. Королюк В.С., Турбин А.Ф. (1978). *Математические основы фазового укрупнения сложных систем*. Киев, Наукова Думка.
111. Королюк В.С., Турбин А.Ф. (1978). *Фазовое укрупнение сложных систем*. Киев. Вища школа.
112. Korolyuk, V.S., and Korolyuk, V.V. (1999). *Stochastic Models of Systems*. Kluwer Academic Publisher. Netherland.
113. Павлов И.В., Ушаков И.А. (1978). *Асимптотическое распределение времени до выхода из ядра полумарковского процесса*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №5.
114. Anisimov, V.V. (2000). *Asymptotic analysis of reliability for switching systems in light and heavy traffic conditions*. Recent Advances in Reliability Theory. Ed. by N. Limnios and M. Nikulin. Birkhauser, Boston-Basel-Berlin.
115. Сильвестров Д.С. (1976). *Об одном обобщении теоремы восстановления*. ДАН СССР. Серия А11.
116. Ушаков И.А. (1969). *Методы решения простейших задач оптимального резервирования при наличии ограничений*. Москва, Сов. радио.
117. Райкин А.Л. (1971). *Вероятностные модели функционирования резервных устройств*. Москва, Наука.
118. Райкин А.Л. (1978). *Элементы теории надежности технических систем*. Под ред. И.А. Ушакова. М., Сов. Радио.
119. Волкович В.Л., Волошин А.Ф., Заславский В.А., Ушаков И.А. (1992). *Модели и методы оптимизации надежности сложных систем*. Киев, Наукова думка.
120. Гнеденко Б.В., редактор (1983) *Вопросы математической теории надежности*. Москва. Наука.
121. Седакин Н.М. (1966). *Об одном физическом принципе в теории надежности*. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, №3.
122. Кордонский Х.Б., Герцбах И.Б. (1966) *Модели отказов*. М., Сов. Радио.
123. Перротте А.И., Карташов Г.Д., Цветаев К.Н. (1968) *Основы ускоренных испытаний на надежность*. Москва, Сов. Радио.
124. Bagdanavichius, V., and M. Nikulin (1997). *Accelerated testing when process of production is unstable*. *Statist. and Probab. Letters*, Vol. 35.
125. Гнеденко Б.В., редактор (1983). *Вопросы математической теории надежности*. (Авт.: Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов, И.Н. Коваленко, А.Д. Соловьев, И.А. Ушаков.) Москва, Радио и связь.