

УДК 621.39

Модель превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций

Будко Н. П., Крюков О. В., Южакова А. А.

Постановка задачи: В работе на основе рассмотренных эволюции систем контроля ставится задача обоснованного перехода от существующей сегодня на узлах связи планово-предупредительной концепции технического обслуживания и ремонта средств связи и автоматизации к более прогрессивным стратегиям управления их надежностью по фактическому техническому состоянию и прогнозируемому обслуживанию, что выдвигает к разработке в данном исследовании следующий перечень задач: выбор объекта контроля, как унифицированного элемента кумулятивной модели отказа межвидовой перспективной информационно-телекоммуникационной системы; выбор необходимых контролируемых параметров, достаточных для идентификации вида технического состояния системы в любой момент времени, а также комплексных показателей качества; обоснование допустимых областей изменения каждого параметра (поля допуска); разработку элементов научно-методического аппарата обработки измерительной информации, а также математического обеспечения для обоснования стратегий эксплуатации по фактическому техническому состоянию и прогнозного обслуживания; создание перспективных систем контроля и мониторинга с элементами интеллектуальной обработки измерительной информации и прогнозирования вида технического состояния. **Цель работы:** разработка модели превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций на основе модификации кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска». **Используемые методы:** системный анализ; теория графов; модели и методы теории надежности; методы многоуровневого синтеза сложных технических систем; методы прогнозирования технического состояния объектов контроля на основе скрытых марковских моделей. **Результаты исследования:** предложена общая модель превентивной идентификации отказов объекта контроля, состоящая из двух частных: кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска» и вероятностно-графовой модели идентификации и прогнозирования отказа. **Новизна:** частные модели в совокупности в отличие от существующих учитывают не только области нормального функционирования и полного отказа, но также области предотказа и параметрического (скрытого отказа), что позволяет не допустить внезапного отказа, соответственно, не допустить простоя, обосновать пороги эксплуатационных и профилактических допусков. **Практическая значимость:** первая частная модель позволяет рассчитать профилактические допуски на контролируемые параметры с учетом ошибок контроля первого и второго рода в интересах прогнозного обслуживания, вторая – получать аналитические зависимости для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля и финальных вероятностей для состояний системы с учетом ошибок прогнозирования первого и второго рода. Предложенные частные модели должны лечь в основу создания подсистемы мониторинга нового поколения на основе прогнозного контроля разрабатываемых в настоящее время изделий.

Ключевые слова: кумулятивная модель отказа, надежность, объект контроля, превентивная идентификация отказа, профилактический допуск, техническое обслуживание, техническое состояние, эксплуатационный допуск.

Библиографическая ссылка на статью:

Будко Н. П., Крюков О. В., Южакова А. А. Модель превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 2. С. 138-242. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-138-242

Reference for citation:

Budko N. P., Kryukov O. V., Yuzhakova A. A. Proactive fault identification model devices and telecommunication systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 2, pp. 138-242 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-138-242

Актуальность

Сложность телекоммуникационного оборудования нового поколения и все большая насыщенность им современных распределенных информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС) узлов и сетей связи, а также их элементов, типа радиоцентр, приводит к тому, что отказы и другие нарушения их нормального функционирования ведут к перебоям или полной блокировке работы всей системы. Поэтому управление надежностью функционирования телекоммуникационным оборудованием на всех этапах его жизненного цикла (ЖЦ) является важной задачей органов технического обеспечения связи (ТОС) и автоматизированных систем управления (АСУ) в Министерствах и ведомствах Российской Федерации (РФ).

Актуальность работы определяется:

- высокой стоимостью современных образцов техники связи (ТС) и АСУ и повышением сложности телекоммуникационного оборудования нового поколения;
- ростом трудоемкости восстановления ТС и АСУ, и низкой квалификацией обслуживающего персонала ремонтных органов ведомств, связанной с некоторым перекосом в недавнем прошлом в подготовке техников и специалистов среднего профессионального образования по техническим (ремонтным) специальностям, (повсеместное сокращение профтехучилищ и техникумов);
- высокой динамикой изменения угроз со стороны потенциального нарушителя в киберпространстве с активным применением им высокоэффективных средств воздействия на систему связи;
- удаленностью ремонтных органов от района проведения специальных мероприятий (ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций), осуществляющих средний (СР), капитальный (КР) и др. виды ремонта, восстанавливающих эксплуатационный ресурс ТС и АСУ на местах;
- насущной потребностью в снижении цикла управления производственными процессами в чрезвычайных ситуациях, в основе которых стоит функциональная готовность техники связи к применению по назначению (в ущерб эксплуатационной готовности, когда все параметры техники связи должны быть в пределах эксплуатационных допусков).

В процессе своего ЖЦ ИТКС подвержены различным видам угроз и воздействию внешних дестабилизирующих факторов (ДФ), что может привести как к внезапным отказам, характеризующимся скачкообразным изменением метрик того или иного параметра, так и к постепенным деградационным отказам, связанным с внутренними физико-химическими процессами в радиоэлементах и материалах, влияющими на постепенные изменения метрик одного или нескольких параметров ТС и АСУ. При этом если внезапные отказы, возникающие в основном из-за нарушений правил эксплуатации, несовершенства технологий и внешних воздействий, являются явными, диагностируемыми зачастую визуально, рис. 1. То постепенные отказы относят к скрытым (трудноопределяемым), тре-

бующими не только специально разрабатываемых систем контроля в виде контрольно-измерительных приборов (КИП), автоматизированных измерительных комплексов (АИК) и платформ (АИП), рис. 2, но и современных технологий контроля и мониторинга.

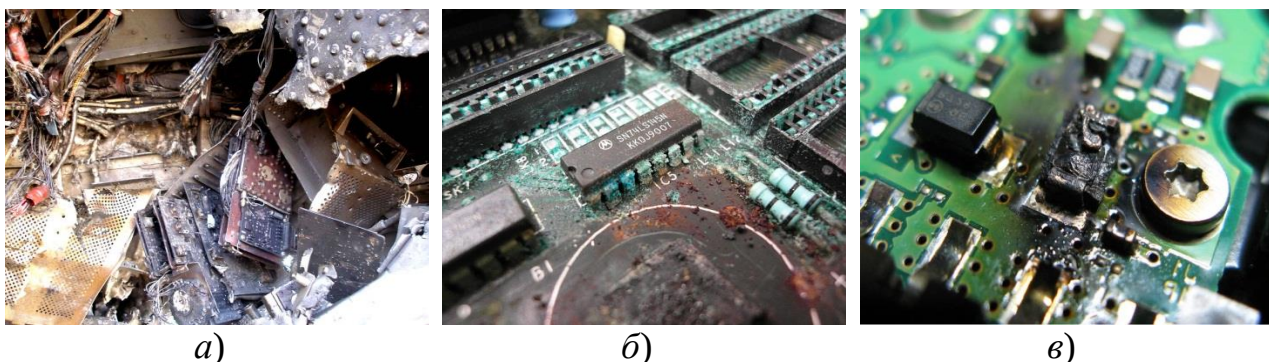


Рис. 1. Визуализация явных отказов:

а) боевое повреждение; б) воздействие влаги на монтаж печатных плат;
в) пробой



Рис. 2. Системы контроля и мониторинга для обнаружения скрытых отказов:
а) КИП; б) АИК; в) АИП

Также важно отметить, что на появление внезапного (как правило, явного) отказа, как указано выше, зачастую влияют внешние ДФ, и, в данном случае, органы ТЭС и АСУ могут бороться постфактум только с их последствиями, включая в работу ремонтные органы, что можно назвать «битьем по хвостам», путем восстановления и возвращения ТЭС и АСУ в строй, или ее утилизации. Первостепенной задачей органов ТЭС и АСУ является поддержание ТЭС и АСУ в исправном (работоспособном) состоянии и постоянной готовности к применению по назначению [1]. Данная задача трансформируется в *предотвращение* наступления отказов. И если внезапное внешнее воздействие (например, воздействие внешней среды) предотвратить можно только методами *повышения живучести* зачастую организационно, то постепенные (параметрические) отказы, составляющие подавляющую часть от общего количества отказов (до 90 %) [2], необходимо предсказывать *методами теории надежности*, за счет внедрения технологий проактивного обслуживания ТЭС и АСУ. Это влечет за собой переход к более гибким и прогрессивным *стратегиям управления надежностью*, основанным на учете информации о фактическом техническом состоянии объектов контроля (ОК) и прогнозом их анализе методами предсказательной аналитики [3].

Все это говорит о том, что назрела необходимость пересмотра руководящих документов (РД) органов ТОС и АСУ в сторону реального (а не декларируемого с 90-х годов прошлого века, но не реализуемого на практике) перехода к стратегии технического обслуживания и ремонта ТС по её *фактическому техническому состоянию*. Этому сегодня способствует также активное развитие и широкое внедрение современных технологий искусственного интеллекта (ТИИ), что в свою очередь требует дальнейшей эволюции научно-методического аппарата (НМА) в виде совершенствования получающей все большую популярность и активно продвигаемой мировым научным сообществом новой стратегии управления надежностью – *прогнозного обслуживания*.

Без изменения стратегии надежности в рамках страны, или, хотя бы ведомства, вряд ли изменится существующий на сегодня подход и *формальное отношение* к научным изысканиям по направлению обеспечения эксплуатационной надежности. Очевидно, это связано с тем, что финансирование разработок *подсистем контроля нового поколения* всегда шло по остаточному принципу в сравнение с разработками основных видов самих систем и комплексов связи в части развития вопросов мониторинга и прогнозного контроля. В чрезвычайных ситуациях (и на поле боя) основное внимание эксплуатанта телекоммуникационного оборудования обращается не на *параметрический отказ* (выход за пределы эксплуатационного допуска какого-то одного параметра ТС), а на не допущение *функционального отказа*, снижающего значение комплексного показателя надежности, типа коэффициент готовности K_T и др. А это уже переход от существующей на сегодня *планово-предупредительной* стратегии технического обслуживания и ремонта ТС и АСУ к другой стратегии – по *фактическому техническому состоянию*.

В настоящее время все еще наблюдается некоторая нерасторопность органов ТОС и АСУ к переходу на новые, находящиеся в тренде мировых тенденций развития методов управления технической эксплуатацией и надежностью. Несмотря на то, что требуются новые подходы в данном вопросе и активное применение агрегатного метода ремонта, имеющего преимущества, как в части повышения оперативности срока восстановления техники связи в рамках текущего ремонта, так и в снижении уровня квалификации ремонтников мастерских связи в подразделениях ТОС и АСУ, очевидно, что для органов ТОС и АСУ – это не тривиальная задача.

Цель статьи: разработка модели превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций на основе модификации кумулятивной модели¹ отказа типа «параметр – поле допуска», для обоснованного перехода к более прогрессивным комплексным стратегиям технического обслуживания и ремонта, ориентированным на надежность устройств и систем телекоммуникаций: обслуживанию по фактическому состоянию; прогнозному (проактивному) обслуживанию.

¹ *Кумулятивная модель* – модель развития научного знания, согласно которой каждый последующий шаг в науке можно сделать, лишь опираясь на предыдущие достижения.

1. Основные термины и обозначения

В ходе проведения анализа существующих и перспективных стратегий управления надежностью техники связи и АСУ и основанных на них моделей отказов типа «параметр – поле допуска», а также введенных выше задач и целевой установки исследования в статье используем следующие условные обозначения, таблица 1.

Таблица 1 – Основные обозначения и их физический смысл

Обозначение	Физический смысл обозначения
K_{Γ}	Коэффициент готовности
S	Множество элементов s (устройств) сети, подвергаемых мониторингу, $s = \overline{1, S}$
$T_{ц,м}$	Время цикла мониторинга, $T_{ц,м} = t_i - t_{(i-1)}$, t_i – временные отсчёты
$P_{отк}$	Вероятность отказа
$D(\alpha, \beta)$	Достоверность контроля (мониторинга)
α, β	Ошибки контроля первого и второго рода, соответственно
Y_s, Y_s^*	Перечень (множество) эксплуатационных параметров элементов ИТКС и его рациональный выбор, $Y_s \subseteq Y$
$\Theta_{доп}$	Эксплуатационные допуски на параметры, $\Theta_{\min} \geq \Theta_{доп} \geq \Theta_{\max}$
$\Xi_{доп}$	Корректирующие (профилактические) допуски на параметры, $\Xi_{\min} \geq \Xi_{доп} \geq \Xi_{\max}$
Z	Параметры подсистемы мониторинга наблюдаемой ИТКС, $Z \geq Z_{доп}$ ($Z_{доп} \geq 2$)
Q	Показатели качества подсистемы мониторинга
$f(x)$	Основные законы распределения случайной величины метрик контролируемых параметров: для работоспособного (рбт) состояния $P_{рбт}$ – нормальный (гауссовский) $f(x)^{(Норм.)}$, равномерный $f(x)^{(Равном.)}$, гамма-распределение $f(x)^{(Гамма)}$: $P_{рбт} \leftrightarrow [f(x)^{(Норм.)}, f(x)^{(Равном.)}, f(x)^{(Гамма)}]$; для критического (аварийного) состояния $P_{отк}$ – распределения Вейбулла $f(x)^{(Вейбулла)}$, Парето $f(x)^{(Парето)}$, пуассоновское $f(x)^{(Пуассон.)}$, экспоненциальное $f(x)^{(Эксп.)}$ и биномиальное (дискретное) $f(x)^{(Бином.)}$: $P_{отк} \leftrightarrow [f(x)^{(Вейбулла)}, f(x)^{(Парето)}, f(x)^{(Пуассон.)}, f(x)^{(Эксп.)}, f(x)^{(Бином.)}]$
τ	Продолжительность цикла мониторинга (проверки сетевого элемента)
$p_{ош}(\Theta, \Xi) \leq p_{доп}$	Показатель качества функционирования дискретного канала связи
$\Theta = (\Theta_1, \dots, \Theta_m)$	Вектор параметров ТС, определяющих их техническое состояние
$\Xi = (\Xi_1, \dots, \Xi_n)$	Вектор параметров, характеризующих неоднородность среды распространения радиоволн (РРВ)
$\Delta\Theta$	Множество возможных значений параметров ТС (поле допуска $\pm\Delta$)
$\Delta\Xi$	Множество допустимых значений параметров среды РРВ (поле допуска $\pm\Delta$)
$p_{доп}$	Допустимое значение вероятности ошибочного приема сигналов в дискретном канале связи (ДКС)
$K_{зн}$	Коэффициент значимости параметра объекта контроля, вносящий свой «вклад» в обеспечение показателя надежности всего объекта мониторинга
$P_{св}$	Вероятность связи в радиолинии
$K_{ти}$	Коэффициент технического использования
M	Множество параметров контролируемых элементов сети $M = \{C, D, E, F\}$
α	Вероятность ошибки контроля первого рода («ложная тревога»)
β	Вероятность ошибки контроля второго рода («необнаруженный отказ»)

Обозначение	Физический смысл обозначения
C	Фазовые переменные, определяющие состояние радиоканала в момент времени t . $C = \{X(t), S_n(t), S_s(t), S_u(t), Y(t)\}$, где $X(t)$ – низкочастотный информационный сигнал; $S_n(t)$ – модулирующий высокочастотный сигнал; $S_s(t)$ – эталонный модулированный сигнал (значения параметров в номинале); $S_u(t)$ – сигнал, искаженный в аппаратной части радиолинии; $Y(t)$ – выходной сигнал радиоканала
D	$D = \{\Phi, L\}$ – внешние параметры ДФ, где Φ и L – характеристики внешних воздействий соответственно на аппаратуру и среду РРВ
E	$E = \{\Theta, \Xi\}$ – внутренние параметры радиоканала, которые количественно характеризуют его свойства, где Θ – технические параметры радиосредств; Ξ – параметры, характеризующие неоднородность среды РРВ и наличие помех;
F	Выходные параметры, численно характеризующие качество функционирования радиоканала
$\hat{X}_{t+1}^n$	Состояние сетевых устройств («норма», «предотказное», «неработоспособное», «предельное»)
A	Матрица вероятностей смены состояний сетевых устройств («норма», «предотказное», «неработоспособное», «предельное»), $A = [a_{ij}, i, j = \overline{1, S}]$, где $S = 4$ – число скрытых состояний устройств сети для данного случая
$\tilde{Y}_t^{L,n}$	Многомерный наблюдаемый процесс, характеризующийся изменением параметров $[vc_i; mn_t; avg_t; ins_t]$, где vc_i – число и состояние своих виртуальных каналов; mn_t – число определенных видов сообщений о неисправности; avg_t – максимальная длина очереди на выходе (для маршрутизаторов и других устройств); ins_t – отказавшие и вновь пущенные в эксплуатацию сетевые интерфейсы
B	Матрица вероятностей появления многомерных наблюдений, характеризующих процесс изменения параметров $[vc_i; mn_t; avg_t; ins_t]$
V_t^n, W_t^n	Технологический (динамический) шум и шум измерения, соответственно, где n – индекс сетевого устройства, t – шаг наблюдения,
$\dots \Sigma_i^k, \dots \Sigma_i^{-1}$	Ковариационная матрица и обратимая ковариационная матрица, где k – число компонент смеси; l – мерность пространства; μ_i^k – вектор математических ожиданий по количеству компонентов смеси k .
K_L	Компоненты временного ряда наблюдаемого параметра, $K_L = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$
vc_t	Число и состояние своих виртуальных каналов
mn_t	Число определенных видов сообщений о неисправности
avg_t	Максимальная длина очереди на выходе маршрутизатора и др. устройств
ins_t	Отказавшие и вновь пущенные в эксплуатацию сетевые интерфейсы
$W(\Theta p_{\text{ош}} > p_{\text{доп}})$	Условная плотность распределения параметров Θ ТС при заданных значениях показателя дискретного канала связи (радиолинии) $p_{\text{ош}}$
σ_j, σ_p	Среднеквадратические отклонения j -го параметра θ_j и показателя $p_{\text{ош}}$, соответственно
θ_{jn}	Номинальное значение j -го параметра θ_j
p_0	Значение показателя качества при максимальном искажении выходного сигнала радиосредства
$\Delta \theta_j^{(a)} = a_j^{(2)} - a_j^{(1)}$	Поле допуска параметра θ_j
$\lambda^L, \bar{\lambda}^L$	Текущая модель и модель с новыми параметрами, соответственно
$P_{\text{пр}}, P_{\text{лт}}$	Вероятности пропуска отказа и ложной тревоги, соответственно
$P_{\text{рбт.с}}, P_{\text{отк}}$	Вероятности идентификации технических состояний «работоспособное» (норма) и «неработоспособное» (отказ), соответственно

Основной терминологический аппарат, раскрывающий типы сущностей, субъектов, объектов и процессов разрабатываемой кумулятивной модели отказа, применяемый в ходе исследования, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Основной терминологический аппарат разрабатываемой модели

Терминологический аппарат	Характеристика, описание, физический смысл сущностей, процессов, объектов и субъектов разрабатываемой модели отказа
<i>BDM</i>	<i>Break Down Maintenance</i> (англ.) – стратегия технического обслуживания и ремонта на основе отказов или поломок (стратегия до отказа)
<i>TBM</i>	<i>Time Based Maintenance</i> (англ.) – стратегия технического обслуживания и ремонта ТС и АСУ через определенные интервалы времени (планово-предупредительная стратегия)
<i>CBM</i>	<i>Condition Based Maintenance</i> (англ.) – стратегия технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию ТС и АСУ
<i>PM</i>	<i>Predictive Maintenance</i> (англ.) – стратегия прогнозного или проактивного обслуживания ТС и АСУ
<i>RCM</i>	<i>Reliability-Centered Maintenance</i> (англ.) – стратегия обслуживания ТС и АСУ, ориентированная на надежность
<i>RBM</i>	<i>Risk-Based Maintenance</i> (англ.) – стратегия обслуживания ТС и АСУ, ориентированная на риски
<i>Big Data</i>	Технология обработки больших данных (англ.)
<i>SRE</i>	<i>Site Reliability Engineer</i> (англ.) – инженер по мониторингу надежности и отказоустойчивости современных ИТ-компаний, совмещающий навыки разработки и администрирования информационно-телекоммуникационных сетей
<i>GII</i>	Глобальная информационная инфраструктура – интегрированная общемировая информационная сеть массового обслуживания населения планеты на основе интеграции глобальных и региональных ИТКС, а также систем цифрового телевидения и радиовещания, спутниковых систем и подвижной связи
<i>ISDN</i>	<i>Integrated Services Digital Network</i> (англ.) – технология, обеспечивающая передачу цифрового сигнала по телефонным каналам с предоставлением различных услуг
<i>NGN</i>	<i>New Generation Network</i> (англ.) – сети следующего/нового поколения. Мультисервисные сети связи, ядром которых являются опорные IP-сети, поддерживающие полную или частичную интеграцию услуг передачи речи, данных и мультимедиа
«Индустрия 4.0»	Четвертая промышленная революция, предполагает новый подход к производству, основанный на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, масштабную автоматизацию бизнес-процессов и распространение искусственного интеллекта
<i>MANET</i>	<i>Mobile Ad hoc Network</i> (англ.) – мобильные сети связи с ситуационным управлением
<i>Wi-Fi</i>	Сокр. от <i>Wireless Fidelity</i> (англ.) – технология беспроводной локальной сети с устройствами на основе стандарта <i>IEEE 802.11</i>
<i>ZigBee</i>	Спецификация сетевых протоколов верхнего уровня (приложений) <i>APS</i> и сетевого уровня <i>NWK</i> , использующих сервисы нижних уровней – уровня управления доступом к среде <i>MAC</i> и физического уровня <i>PHY</i> , регламентированных стандартом <i>IEEE 802.15.4</i>

Терминологический аппарат	Характеристика, описание, физический смысл сущностей, процессов, объектов и субъектов разрабатываемой модели отказа
<i>Bluetooth</i>	(от слов англ. <i>blue</i> – синий и <i>tooth</i> – зуб) – производственная спецификация беспроводных персональных сетей, обеспечивающая передачу данных на короткие расстояния
<i>JTRS</i>	<i>Joint Tactical Radio System</i> (англ.) – перспективная военная радиосистема связи армии США, применяющая закрытый сетевой протокол радиосвязи <i>Wideband Networking Waveform (WNW)</i>
<i>SNMP</i>	<i>Simple Network Management Protocol</i> (англ.) – простой протокол сетевого управления. Стандартный интернет-протокол для управления устройствами в IP-сетях
<i>ЕМ-алгоритм</i>	<i>Expectation-maximization (EM) algorithm</i> (англ.) – алгоритм, используемый в математической статистике для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей, в случае, когда модель зависит от некоторых скрытых переменных. Каждая итерация алгоритма состоит из двух шагов. На <i>E</i> -шаге (<i>expectation</i>) вычисляется ожидаемое значение функции правдоподобия, при этом скрытые переменные рассматриваются как наблюдаемые. На <i>M</i> -шаге (<i>maximization</i>) вычисляется оценка максимального правдоподобия, таким образом, увеличивается ожидаемое правдоподобие, вычисляемое на <i>E</i> -шаге. Затем это значение используется для <i>E</i> -шага следующей итерации. Алгоритм выполняется до сходимости
Алгоритм <i>KMEANS++</i>	Улучшенная версия алгоритма кластеризации <i>k-means</i> . Суть улучшения заключается в нахождении более «хороших» начальных значений центроидов кластеров (видов технического состояния) на основе поиска максимально отдаленных друг от друга ядер кластера

2. Кумуляция стратегий управления надежностью техники связи и АСУ при поддержании ее в работоспособном состоянии

Поддержание ТС и АСУ в работоспособном состоянии на сегодня может осуществляться выполнением мер, направленных на его сохранение и восстановление проведением различных видов технического обслуживания (сохранение) и ремонтов (восстановление) (ТОиР). В соответствии с мировым опытом различают стратегии управления надежностью [4, 5]:

- 1) техническое обслуживание и ремонт на основе отказов или поломок (*Break Down Maintenance – BDM*). При данной стратегии техника эксплуатируется до отказа. Её преимуществами является выработка своего ресурса полностью, а также отсутствие планирования технического обслуживания и ремонта как такового. К недостаткам относят непредсказуемость отказа, необходимость в остановке боевого применения на время ремонта и потребность в обеспечении резерва на все оборудование;
- 2) техническое обслуживание и ремонт через определенные интервалы времени (*Time Based Maintenance – TBM*). Стратегия предполагает планово-предупредительное проведение мероприятий технического обслуживания и ремонта через заданные промежутки эксплуатации. В каче-

стве достоинства данной стратегии можно выделить простоту планирования. Недостаток: стратегия достаточно успешно применяется исключительно на простых изделиях. При этом замене (ремонту) подлежат детали независимо от выработки ресурса, которые зачастую являются исправными. Также недостатком данной стратегии можно выделить тот факт, что при ней эксплуатационные мероприятия могут проводиться либо преждевременно, либо слишком поздно, при наличии значительного периода неправильного функционирования или скрытого (параметрического) отказа;

- 3) техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию (*Condition Based Maintenance – CBM*). При реализации данной стратегии процедуры технического обслуживания и ремонта осуществляются в зависимости от проводимых мероприятий по техническому диагностированию объекта контроля и прогнозу его технического состояния. Фактически данная стратегия устраняет недостатки планово-предупредительной стратегии (*TBM*), снижая число необоснованного ремонтного вмешательства для не выработавшего эксплуатационный ресурс изделия. Её основным преимуществом является, по сути дела, полное расходование ресурса и предсказуемость наступления отказа благодаря проведению циклов мониторинга технического состояния объектов контроля. Недостатки: затраты на проведение циклов мониторинга технического состояния и невозможность долгосрочного планирования в проведении мероприятий технического обслуживания и ремонта;
- 4) прогнозное или проактивное обслуживание (*Predictive Maintenance – PM*). Сущность стратегии состоит в снижении динамики развития неисправностей или их полное устранение (недопущение) за счет предварительного выявления в ходе мониторинга технического состояния ТС и АСУ и иного оборудования. К достоинствам стратегии стоит отнести: возможность своевременного выявления и устранения обнаруженных неисправностей еще на ранних этапах их развития, что увеличивает срок службы оборудования; проведение только необходимых ремонтных мероприятий. К недостаткам можно отнести повышенные требования к компетенциям обслуживающего персонала, а также дополнительные затраты на развертывание систем мониторинга и разработка методик прогнозирования, превентивной идентификации вида технического состояния ТС и АСУ, предсказательной аналитики;
- 5) стратегия обслуживания, ориентированная на надежность (*Reliability-Centered Maintenance – RCM*) [5]. Данная стратегия считается комбинированной, призванная обеспечить максимальную эффективность функционирования системы при минимальных затратах на обслуживание и ремонт, применяя в процессе эксплуатации наиболее подходящие подходы технического обслуживания и ремонта (*BDM, TBM, CBM, PM*), объединяя в себе достижения предыдущих стратегий, одновременно обеспечивая требуемый уровень функциональной готовности ОК. До-

стоинства: сокращение затрат на эксплуатацию и повышение надежности ТС и АСУ в целом. Недостатки: этап идентификации отказа является достаточно сложным и слабо формализуемым на практике;

- б) обслуживание, ориентированное на риски (*Risk-Based Maintenance – RBM*), позволяет выявить уровень риска, сопровождающий эксплуатацию ОК и баланс сроков и объемов технического обслуживания и ремонтов, путем установки приоритета в их выполнении. По сути, стратегия *RBM* является дальнейшим развитием стратегии *RCM* с учетом вероятности отказа каждой единицы оборудования сложной системы. Достоинства: сокращение затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также повышение надежности ОК. Недостатки: сложный процесс оценки вероятности отказа оборудования и системы в целом, а также последствий этих отказов [6].

На сегодня в РФ действует вторая стратегия управления надежностью, т. н. планово-предупредительная, предполагающая регламентированные по времени и полноте проводимых мероприятий виды технического обслуживания и виды ремонтов.

В то же время, все чаще и чаще возникают вопросы к пересмотру стратегий в сторону обоснованного перехода к третьей стратегии управления надежностью по фактическому техническому состоянию ТС и АСУ (публикации на эту тему были отмечены как в прошлом веке [7], так и в начале XXI [8]), а также и последующим более передовым и прогрессивным стратегиям (*PM*, *RCM*, *RBM*).

Также, с все более активным внедрением на системе связи ВС РФ распределенных на большой территории автоматизированных (в том числе автономных и необслуживаемых) объектов связи, типа автоматизированных сетей связи (АСС), узлов связи (АУС), и радиоцентров (АРЦ), и существенным продвижением в последние годы в отечественные научные разработки технологий искусственного интеллекта [9], приходит понимание необходимости более деятельного внедрения в практику работы органов ТОС и АСУ методов и алгоритмов прогнозирования технического состояния телекоммуникационного оборудования [10], объединяя лучшие практики функционально-параметрического направления теории надежности и диагностики (ТОС и АСУ) [11], что позволяет:

- в большей степени использовать ресурс каждого отдельного ОК путем снижения количества преждевременных вмешательств в его работу;
- превентивно предотвращать отказ за счет своевременного проведения профилактических (предупредительных) мероприятий ТОиР.

Кумуляцию² развития стратегий управления надежностью ТС и АСУ при поддержании их в работоспособном состоянии рассмотрим через развитие видов контроля и анализа состояния ОК во времени и по объему измерительной информации (ИИ) в системе ТОС и АСУ, рис. 3.

К примеру, многие авторы [12] относят прогнозное или проактивное обслуживание к стратегиям «гарантированного управления» надежностью, а в [13] напрямую указывается на прогнозирование, как на основной способ определения

² Кумуляция – способ построения композиций хроникальных и многолинейных событий

достижения надежности системы (например, метод Дельфи, как метод группового прогноза, обычно применяется к будущим событиям). Действительно, данная стратегия обеспечивает с заданной достоверностью гарантированное предупреждение постепенных скрытых параметрических отказов на заданном интервале функционирования, за счет определения предотказного вида технического состояния [14].

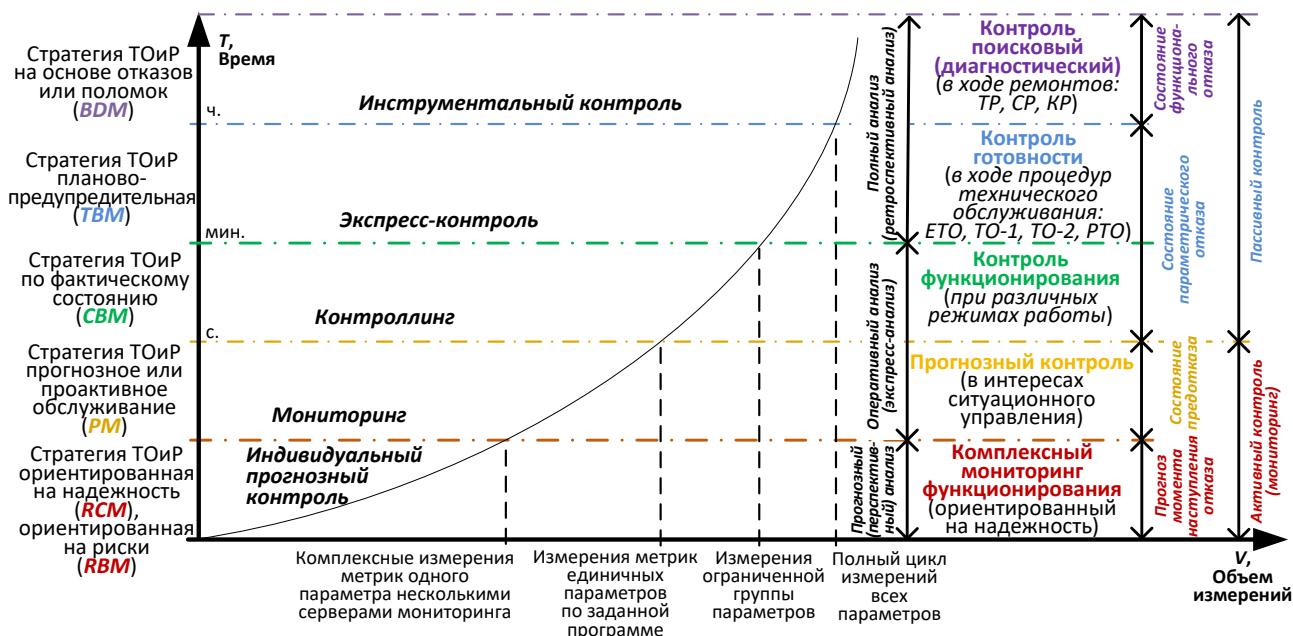


Рис. 3. Кумуляция развития стратегий управления надежностью ТС и АСУ (стратегий технического обслуживания и ремонта)

На сегодня вопросы контроля и мониторинга сетевых инфраструктур стационарного сегмента ИТКС общего пользования (ОП) достаточно хорошо представлены в научной литературе, где в качестве признаков диагностирования активно применяются единичные и комплексные показатели качества их функционирования [15-19]. При этом технологии формирования единых информационно-управляющих пространств (ЕИУП) как отдельных ведомств, так и, в целом, единого информационного пространства (ЕИП) России, требуют построения распределённой подсистемы сбора и обработки данных о техническом состоянии их элементов и состоянии всей системы при обеспечении своевременности обработки накапливаемой ИИ в виде больших данных (*Big Data*) для получения синергетического эффекта в наращивании эффективности использования ИТКС как их технической основы [15, 20].

Развитие в последние годы автоматического и автоматизированного контроля с одной стороны (таблица 3), и появление математических моделей обработки измерительной информации больших объемов в реальном масштабе времени – с другой, обусловили повышенное внимание специалистов к стратегии эксплуатации по фактическому состоянию (*CBM*), как к прогрессивному методу обслуживания техники. Это объясняется тем, что при данной стратегии эксплуатации используется более глубокая количественная информация о техническом

состоянии ОК, нежели информация только о моментах отказов, которую берут за основу при реализации первых двух стратегий (*BDM* и *CBM*). Именно большие объемы измерительной информации об объектах контроля и появившиеся технологии обработки больших данных (*Big Data*) [21] позволяют быстрее перейти на перспективные технологии эксплуатации и стратегии обеспечения надежности.

Таблица 3 – Эволюция систем контроля (мониторинга) и кумуляция стратегий управления надежностью

Этапы эволюции	Поколения сетей связи	Поколения технических средств	Поколения систем управления (СУ) связью	Поколения средств контроля и мониторинга	Поколения СУ (стратегии управления надежностью)
1 этап (1960-1970)	Гомогенные телефонные сети связи (ТФОП), сети передачи данных (СПД)	Техника связи (ТС), комплексы связи (КС)	Системы дистанционного управления (СДУ)	Ручной контроль, визуальный контроль, контрольно-измерительные приборы (КИП)	Гомогенные системы управления. (<i>BDM</i>)
2 этап (1970-1990) Автоматизация	Автоматизированные сети связи ведомств	Автоматизированные комплексы связи (АКС), комплексы средств автоматизации (КСА)	АСУ технологическими процессами (АСУ ТП), автоматизированные центры дистанционного управления (АЦДУ)	Документирование, автоматизированные системы контроля (АСК) и измерительные комплексы (АИК)	Региональные центры управления. (<i>TBM</i>)
3 этап (1990-2010) Интеграция	Гетерогенные <i>ISDN</i> , <i>NGN</i>	Программно-аппаратные комплексы связи (ПАКС), комплексы информационно-технических средств (КИТС), АУС и АРЦ	Интегрированные комплексы связи (ИКС), автоматизированная система управления связью (АСУС), бортовые информационно-управляющие системы (БИУС)	Автоматизация контроля, регистрация, документирование, АИК и АИП	Единые центры управления (ЕЦУ), ситуационные центры (СЦ). (<i>CBM</i>)
4 этап (2010-2030) Унификация	«Индустрия 4.0», <i>GII</i>	Межведомственные унифицированные комплексы средств автоматизации (УКСА)	Многофункциональные ИКС (МИКС), комплексы (КУФ) и центры (ЦУФ) управления функционированием	Комплексный мониторинг функционирования распределенных систем и сетей	Ситуационное управление на базе сети ситуационных центров. (<i>PM</i>)
5 этап (2030-2050) Интеллектуализация	Перспектива	Межведомственные УКСА в едином информационном пространстве	Распределенная интеллектуальная система мониторинга ЕИП и ЕИУП на базе распределенных интеллектуальных систем (РИС). (<i>RCM</i> , <i>RBM</i>)		

Действительно, стратегия технического обслуживания по фактическому состоянию (*CBM*) в последнее время вызывает больший интерес и привлекает внимание *SRE*-инженеров и специалистов органов ТОС и АСУ. Данную стратегию также называют *индивидуальной*, в связи с тем, что она нацелена на реальное состояние и осуществляет учет особенностей исследуемой системы, а не стати-

стику по опыту эксплуатации подобных систем, для корректного функционирования которых в первую очередь важна статистическая однородность (типаж) подконтрольного оборудования, а также значительные объемы измерительной информации.

В настоящее время повсеместное внедрение программно-аппаратных комплексов связи (ПАКС) и комплексов средств автоматизации (КСА) ведет к ускорению тенденций:

- сокращения числа пунктов управления (ПУ) при их рассредоточенности в пространстве, что влечет за собой увеличение дальности между ними;
- разработки и внедрения новых видов беспилотного транспорта и автономных глобально перемещающихся объектов (ГПО), способных в отрыве от ПУ выполнять специальные задачи (безэкипажные катера (БЭК) и суда, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), робототехнические комплексы (РТК) различного базирования и др.);
- подготовки к выделению беспилотных систем в отдельное направление развития народного хозяйства;
- переходу на полностью автоматизированные радиоцентры (АРЦ), комплексы (АКС), узлы (АУС), сети (АСС) связи, с существенным снижением обитаемости и сокращением обслуживающего персонала.

Рост номенклатуры современных КСА и их развитие в сторону внедрения технологий искусственного интеллекта позволяет сократить обслуживающий персонал, а зачастую полностью устранить расчёты связи на АУС и АРЦ. Однако в данном случае одной из первоочередных задач таких ГПО и автономных объектов связи является задача обеспечения необходимого уровня безопасности и надёжности, что требует разработок эффективных систем удалённого мониторинга и дистанционного контроля для решения всего спектра задач при автоматизации процедуры управлению связью. Сегодня ведется разработка автоматизированных систем управления связью (АСУС) под конкретные АСС отдельных министерств и ведомств. В тоже время, уникальность создаваемых в настоящее время объединенной автоматизированной цифровой системы связи (ОАЦСС) и межведомственной декаметровый (ДКМ) автоматизированной сети радиосвязи (АСРС), глобальная рассредоточенность их ресурсов элементов по территории страны требует формирования единого подхода для разработки АСК (мониторинга) и АСУС с учетом как внутриведомственной (межвидовой), так и межведомственной специфики и региональных особенностей размещения объектов связи (районы Арктики, морская среда, континентальный шельф и пр.).

Из таблицы 3 следует, что в эволюции развития систем управления и комплексов связи на сегодня мы уже перешли от этапа автоматизации и интеграции к этапу унификации, а в последние годы усиленными темпами движемся и к этапу интеллектуализации [17, 19]. Однако, несмотря на это, в развитии технологий и средств контроля (мониторинга) пока еще наблюдается некоторое отставание. Лишь недавно в практику органов ТОС и АСУ стали внедряться АИК и АИП с ориентацией на выполнение специальных узконаправленных опций в интересах конкретных ведомств (министерств), отраслей промышленности. Только сейчас, когда пристальное внимание развитию ТИИ обращено на самом высоком

уровне [9], нашли отклик вопросы создания межвидовых (межведомственных) АИК, АИП на базе сети ситуационных центров (СЦ) [22], автоматизированных (АСК) и интеллектуальных систем контроля (ИСК), осуществляющих комплексный контроль и мониторинг функционирования распределённых гетерогенных ИТКС и их элементов на ОАЦСС и ДКМ АСРС в единых информационном и информационно-управляющих пространствах России.

3. Постановка задачи на моделирование

Анализ достоинств и недостатков перечисленных выше стратегий управления надежностью, а также появление новых технологий контроля (мониторинга), ориентированных на переход от пассивных методов контроля, констатирующих факт наступления отказа, к активным методам прогнозного контроля (мониторингу) обосновывает назревшую потребность и созданные для этого условия перехода от второй к третьей и четвертой стратегиям управления надежностью по фактическому техническому состоянию и прогнозируемому обслуживанию ТС и АСУ, что выдвигает к разработке в данном исследовании следующий перечень задач:

- *выбор объекта контроля*, как унифицированного элемента кумулятивной модели отказа межвидовой перспективной информационно-телекоммуникационной системы (сети);
- *выбор необходимых контролируемых параметров*, достаточных для идентификации вида технического состояния системы в любой момент времени, а также комплексных показателей качества (КПК) и интегральных показателей эффективности (ИПЭ);
- *обоснование* допустимых областей изменения каждого параметра (его поля допусков);
- *разработка элементов НМА* (моделей и методов) обработки измерительной информации, а также математического обеспечения для обоснования стратегий эксплуатации по фактическому техническому состоянию и прогнозного обслуживания;
- *создание перспективных систем контроля и мониторинга* с элементами интеллектуальной обработки ИИ и прогнозирования вида технического состояния объектов контроля.

Основываясь на этом, *задачу на моделирование* математически возможно сформулировать как разработка модели M превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций s с целью повышения оперативности цикла мониторинга $T_{ц.м}$ в случае увеличения вероятности отказа $P_{отк}$ для обеспечения требуемой достоверности $D(\alpha, \beta)$ её результатов и точности с учётом ошибок контроля первого α и второго β рода (1):

$$M : \langle S, Y, Z, Q \rangle \rightarrow \min_{Y_s^*} T_{ц.м.} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & s = \overline{1, S}; \\ & Y = Y(\Theta_{доп}, \Xi_{доп}), \Theta_{\min} \geq \Theta_{доп} \geq \Theta_{\max}, \Xi_{\min} \geq \Xi_{доп} \geq \Xi_{\max}; \\ & Z \subseteq Z_{доп}, (Z_{доп} \geq 2), \\ & Q(P_{рбт}, P_{отк}): \\ & P_{рбт} \Leftrightarrow [f(x)^{(Норм.)}, f(x)^{(Равном.)}, f(x)^{(Гамма)}], \\ & P_{отк} \Leftrightarrow [f(x)^{(Вейбулла)}, f(x)^{(Парето)}, f(x)^{(Пуассон.)}, f(x)^{(Эксп.)}, f(x)^{(Бином.)}], \\ & D(\alpha, \beta) \geq D_{доп}, \alpha = \alpha_{\min}, \beta = \beta_{\min}, \\ & P_{отк} \geq P_{отк}^{доп} \Rightarrow T_{ц.м.} = T | \tau \rightarrow \min. \end{aligned}$$

где

S – перечень (множество) элементов (устройств) сети, подвергаемых мониторингу, при этом каждый элемент (устройство) сети $s = \overline{1, S}$;

Y – перечень (множество) эксплуатационных параметров элементов ИТКС в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД), подвергаемых мониторингу; Y_s – перечень (множество) эксплуатационных параметров, наблюдаемых сервером мониторинга s -го сетевого устройства (Y_s^* – рациональный выбор такого перечня параметров), $Y_s \subseteq Y$, причем на каждый контролируемый параметр устанавливают эксплуатационные допуски $\Theta_{доп}$: $\Theta_{\min} \geq \Theta_{доп} \geq \Theta_{\max}$ в соответствие с режимом работы, а также профилактические допуски $\Xi_{доп}$ [23] с учетом внешних условий эксплуатации $\Xi_{\min} \geq \Xi_{доп} \geq \Xi_{\max}$, т. е. $Y(\Theta_{доп}, \Xi_{доп})$;

Z – параметры подсистемы мониторинга наблюдаемой ИТКС, выражающиеся в количестве серверов мониторинга, следящими за сетевым устройством. В идеальном случае для перспективной подсистемы мониторинга таких серверов должно быть $Z \geq Z_{доп}$ ($Z_{доп} \geq 2$) не менее двух;

Q – показатели качества подсистемы мониторинга в виде основных законов распределения случайной величины метрик контролируемого параметра $f(x)$ с правилом разграничения наблюдаемых процессов, соответствующим: для стационарного характера параметров потока ИИ (метрики), когда вероятность работоспособного состояния (рбт) ОК (нормальное ТС – $P_{рбт}$) описывается нормальным (гауссовским) $f(x)^{(Норм.)}$, равномерным $f(x)^{(Равном.)}$ и гамма-распределением $f(x)^{(Гамма)}$: $P_{рбт} \leftrightarrow [f(x)^{(Норм.)}, f(x)^{(Равном.)}, f(x)^{(Гамма)}]$, а для нестационарного характера параметров потока ИИ (критического (аварийного) состояния – $P_{отк}$) описывается распределениями Вейбулла $f(x)^{(Вейбулла)}$, Парето $f(x)^{(Парето)}$, пуассоновским $f(x)^{(Пуассон.)}$, экспоненциальным $f(x)^{(Эксп.)}$ и биномиальным (дискретным) $f(x)^{(Бином.)}$ распределением: $P_{отк} \leftrightarrow [f(x)^{(Вейбулла)}, f(x)^{(Парето)}, f(x)^{(Пуассон.)}, f(x)^{(Эксп.)}, f(x)^{(Бином.)}]$. При этом в случае превышения $P_{отк}$ своего допустимого значения $P_{отк} \geq P_{отк}^{доп}$ (т. е. при переходе из работоспособного ТС в предотказное) период опроса T сетевых элементов сервером мониторинга должна сократиться для повышения оперативности и своевременного принятия превентивного решения на ситуационное управление ИТКС по её переконфигурации и недопущению дрейфа в сторону отказа;

$T_{ц.м}$ – время цикла (период повторения процедуры) мониторинга, зависит от скважности опроса сетевых элементов сервером мониторинга. В случае постоянной величине продолжительности проверки сетевого элемента $\tau = \text{const}$ и при сокращении цикла мониторинга $T = t_i - t_{(i-1)}$, где t_i – временные отсчеты начала проверки, время цикла мониторинга сокращается $T_{ц.м} = T/\tau \rightarrow \min$ при обеспечении *достоверности* $D(\alpha, \beta)$ результатов мониторинга в ходе идентификации вида технического состояния устройства сети и заданной *точности* мониторинга в виде минимальных ошибок контроля первого и второго рода: $\alpha = \alpha_{\min}$, $\beta = \beta_{\min}$. Важно отметить, что сокращение период опроса сетевых устройств оправдано лишь в случае, когда сервером мониторинга идентифицирован переход сетевого элемента из работоспособного технического состояния в предотказное $P_{\text{отк}} \geq P_{\text{отк}}^{\text{доп}}$, для недопущения в последующем времени деградации ОК. Также возможно пользоваться величиной обратной скважности опроса $1/T_{ц.м} = T/\tau$, что характеризует в процентном соотношении коэффициент наполнения рабочего цикла мониторинга. При его равенстве 100 % (единице) мониторинг длится непрерывно.

Определение ограничений и допущений в процессе моделирования:

- 1) в качестве объекта контроля и мониторинга рассмотрим комплексный элемент информационно-телекоммуникационной инфраструктуры (ИТКС) в виде ДКМ автоматизированной сети радиосвязи, ее базовых элементов – стационарных АРЦ, соединенных в сеть с помощью магистральных адаптивных радиолиний (МАРЛ), технической основой которых выступают радиопередающие (РПДУ) и радиоприемные (РПУ) устройства. Таким образом, объект мониторинга комплексный: АСРС – АРЦ – МАРЛ – РПДУ(РПУ);
- 2) модель отказа разрабатывается в интересах идентификации постепенных параметрических отказов, составляющих 90 % всех видов отказов [2] (а не внезапных, типа «короткое замыкание», ошибка персонала или «боевые повреждения»);
- 3) уровень эксплуатационных допусков на контролируемые параметры, как правило, устанавливается НТД производителем технической системы. При этом в научном сообществе по-разному относятся к терминам «корректирующих» («профилактических») допусков, поскольку они не определены в ГОСТ. Однако еще в работах Е. Ю. Барзиловича в 80-х годах прошлого века шла речь о необходимости их назначения в НТД, а также были обоснованы их величины в 0,6 – 0,8 от номинальных значений параметров сложных технических систем [7]. Также в работах П. И. Пенина и А. В. Фомина [24, 25], еще ранее, в 70-х годах, данные допуски были определены в отношении систем передачи цифровой информации как «эксплуатационный запас радиолиний», составляющий величину 0,8 от эталонного значения вероятности связи или в несколько дБ, не обосновывая их величину, но означающий, что «вклад» среды распространения радиоволн в значение КПК радиолинии (РЛ) состав-

ляет 0,8, а 0,2 – это «вклад» аппаратной (аппаратурной) части РЛ, вызванный из-за рассогласованности параметров аппаратуры на передающей и приемной части РЛ между модулятором, демодулятором и первой решающей схемой. При этом авторы убеждены, что для решения задачи превентивной идентификации таких видов технического состояния ИТКС как «предотказное» и «опасное» (впервые введено в ГОСТ 27.002-2015 [14]) и ее элементов (технических устройств, каналов связи и пр.), крайне назрела подготовка дополнений (изменений) в ГОСТ серии 27 (Надежность в технике) с вводом таких терминов, как «корректирующие» («профилактические») допуски. Без таких изменений в ГОСТ осуществлять достоверный прогноз технического состояния ОК крайне проблематично. Названные в [7, 24, 25] допущения и утверждения в последующем позволят создавать достаточно простые АСК, обладающие большой универсальностью и пригодных для контроля целого класса технических систем без существенной потери достоверности контроля;

- 4) в исследовании осуществлен учет исключительно параметрических и аппаратурных ресурсов АРЦ и АСРС, а также управление ими, не беря во внимание частотные, энергетические и другие виды ресурсов;
- 5) АСРС функционирует в условиях жестких ограничений на измерительные ресурсы, поскольку в РФ пока еще не достаточное количество АИК, АИП и пр., что затрудняет обеспечение надежности путем мониторинга абсолютно всех параметров одновременно на всех элементах системы связи. Из-за отсутствия таких возможностей, в исследовании рассмотрена необходимость выбора наиболее значимых параметров, вносящие максимальный «вклад» в обеспечение требуемого значения показателя качества – КПК объекта контроля;
- 6) для простоты математического описания модели отказа объекта контроля, а также требуемой точности при идентификации вида его технического состояния в случае решения практических задач с геометрической интерпретацией предлагаемой модели область неопределенности изображается на плоскости в виде так называемого «эллипса качества» (для двухпараметрического пространства), а для трехпараметрического пространства – в виде «эллипсоида качества», известных из теории надежности [7, 15-18] и др. При этом область $\Delta\Theta$ аппроксимируется эллипсоидом, симметрично ориентированным в пространстве параметров;
- 7) ограничения на ширину временного окна анализа ИИ устанавливаются исходя из доступных вычислительных мощностей обработки больших объемов данных (*Big Data*) сервером мониторинга ИТКС;
- 8) допущением в исследовании является использование термина «*техническое состояние*» исключительно для технических устройств, типа РПУ, РПДУ, коммутаторов, маршрутизаторов и пр., а термина «*состояние*» – для других структурно-функциональных элементов АСРС, типа АРЦ, РЛ, ПУ и пр. Соответственно и характеризуют технические

- устройства, как правило, параметры, а другие структурно-функциональные элементы АСРС – наряду с параметрами, вероятностно-временные характеристики (ВВХ), КПК, ИПЭ и др.;
- 9) выбор параметров для разрабатываемой кумулятивной модели отказа «параметр – поле допуска» в работе проведен на примере типовых технических средств АРЦ (РПДУ, РПУ и др.);
- 10) ухудшение показателя качества функционирования РЛ (дискретного канала связи – ДКС) происходит в отличие от сетевых устройств в односторонних пределах $p_{\text{ош}}(\Theta, \Xi) \leq p_{\text{доп}}$, $\Theta \in \bar{\Delta}\Theta$, $\Xi \in \Delta\Xi$, где $\Theta = (\Theta_1, \dots, \Theta_m)$ и $\Xi = (\Xi_1, \dots, \Xi_n)$ – вектора параметров, соответственно, радиосредств и параметров, характеризующих неоднородность среды РРВ и наличие помех в ней; $\Delta\Theta$ – множество возможных значений параметров радиосредств (поле допусков $\pm\Delta$); $\Delta\Xi$ – множество допустимых значений параметров среды РРВ; $p_{\text{доп}}$ – допустимое значение вероятности ошибочного приема сигналов в ДКС (РЛ);
- 11) для простоты разрабатываемой модели вид технического состояния «предельное» приравнивается к функциональному отказу ОК, хотя авторы статьи дают себе отчет, что это, по большому счету, слишком вольное допущение.

Далее рассмотрим вопросы выбора объекта контроля, как унифицированного элемента модернизируемой кумулятивной модели отказа, типа «параметр – поле допуска», в интересах разрабатываемой межвидовой информационно-телекоммуникационной инфраструктуры.

4. Объект контроля «радиосредство – радиоканал – радиоцентр – сеть радиосвязи», как унифицированный элемент кумулятивной модели отказа «параметр – поле допуска»

В данном исследовании объектом, на котором решается задача моделирования, является декаметровая автоматизированная сеть радиосвязи, как перспективная межвидовая информационно-телекоммуникационная инфраструктура [26, 27], рис. 4, с ее основными элементами в виде магистральных адаптивных радиолиний (МАРЛ) и АРЦ, состоящих из: ПУ АРЦ, включающего телекоммуникационное оборудование контроля и дистанционного управления частотными, аппаратными и другими видами ресурсов АРЦ; автоматизированных передающего (АПДРЦ) и приемного (АПРЦ) радиоцентров, в свою очередь включающих, соответственно, наборы радиопередающих (РПДУ) и радиоприемных (РПУ) устройств, техническое состояние которых наряду с состоянием отдельных радиолиний и всей радиосети в целом необходимо контролировать для обеспечения эффективного функционирования такого технически сложного объекта (СЛО) как распределенная на огромной территории страны ДКМ АСРС.

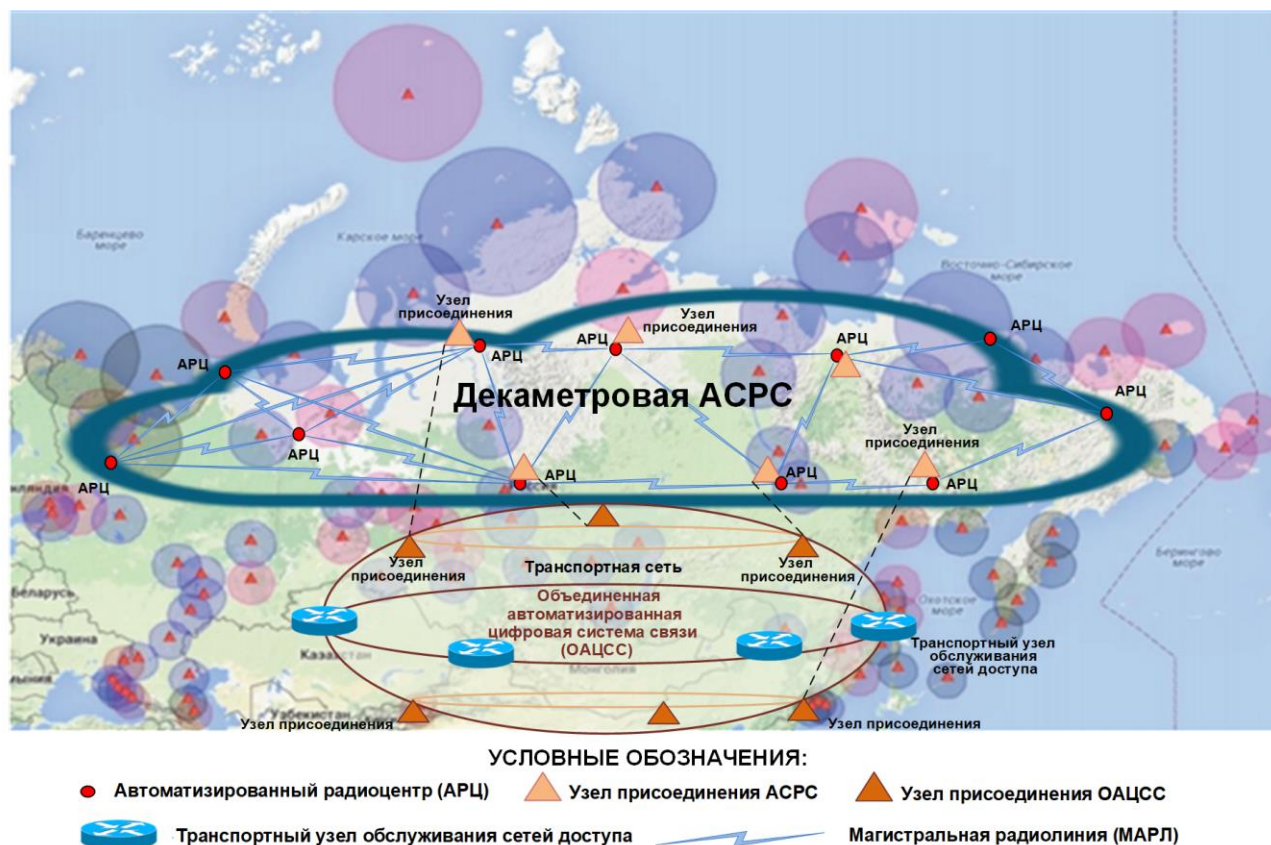


Рис. 4. Вариант построения ДКАСРС и ее сопряжения с объединенной автоматизированной цифровой системой связи (на примере взаимодействия с объектовыми радиосредствами, типа контрольно-корректирующие станции ГЛОНАСС)

В качестве объекта контроля разрабатываемой кумулятивной модели отказа «параметр – поле допуска» в данной работе не случайно выбран такой сложносоставной элемент как «радиосредство – радиоканал – радиоцентр – сеть радиосвязи». Это позволит в последующем использовать результаты моделирования как для определения эксплуатационных и профилактических допусков на *единичные параметры* отдельных технических средств (радиосредств), так и для расчета *комплексных показателей качества* радиолинии, ДКС или АРЦ, а также при анализе состояния всей АСРС по *интегральным показателям качества* (эффективности).

Сама по себе ДКАСРС характеризуется как сложноописываемая сетевая структура с высоким коэффициентом ошибок (низкой готовности и надёжности). Это связано с тем, что ее структура базируется на каналах радиосвязи с переменными параметрами (низкого качества). Данная причина стала сдерживающим фактором в создание такой уникальной межвидовой ИТКС, в связи с чем ее создание постоянно откладывалось. Развитие ДКАСРС радиосетей сопряжено с большим числом трудностей и далеко не все страны обладают возможностями по разработке и построению таких «капризных» сетевых структур, всё больше придерживаясь направлений по развитию сетей на базе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), а также высокоскоростных родов радиосвязи (радиорелейной, космической, тропосферной).

Но, не смотря на это, важно отметить, что для огромных просторов нашей страны в телекоммуникационной отрасли средства «прямой» радиосвязи всегда занимали особое место, обеспечивая возможность оперативного обмена информацией на большие расстояния, минуя каналы и линии первичной сети связи и сетей связи ОП. К классу таких средств телекоммуникаций всецело можно отнести РЛ ДКМ радиосвязи, которые находят широкое внедрение фактически во всех отраслях народного хозяйства и государственного управления, что объективно обусловлено рядом причин:

- обеспечение глобальной дальности связи с минимумом затрат ресурсов;
- высокая мобильность;
- гибкость, и др. [28].

Именно данные особенности делают ДКМ радиосвязь незаменимой практически во всех условиях обстановки, включая связь на высоких арктических широтах, на морских и океанских дальностях. А последующее ее совершенствование с построением АСРС дает прирост в эффективности применения ДКМ радиосвязи путём:

- наращивания многосвязности в подсетях и в сетевой структуре;
- применения прямых радиоканалов и составных радиотрактов для охвата больших пространств на земле, в воздухе и на воде;
- расширения возможностей АСРС по трансформации её топологической структуры при динамическом изменении обстановки по связи;
- расширения возможностей автоматизации и интеллектуализации управления ресурсами радиолиний, АРЦ и АСРС в целом;
- сопряжения АСРС с ведомственными сетями радиосвязи, а также с ОАЦСС [27].

Все это будет способствовать организации сбора и обработки измерительной информации о фактическом техническом состоянии сетевых элементов АСРС на основе осуществления так называемых «измерений в окружении», что позволит строить динамические карты радиосреды [29] при решении задачи планирования и распределения ресурсов в условиях деградации сети и эксплуатационных отказов.

Рассматривая такой сложносоставной объект контроля/мониторинга как «радиосредство – радиоканал – радиоцентр – сеть радиосвязи», важно отметить, что состояние АСРС кумулирует в себе технические состояния всех технических систем, входящих в основные структурно-функциональные элементы радиосети, но и не только их. В общем виде, к основным объектам контроля/мониторинга на АСРС [26] отнесем:

- а) автоматизированную сеть радиосвязи в целом, рис. 4;
- б) главный центр управления (ГЦУ) радиосети;
- в) автоматизированные радиоцентры (АРЦ), включающие:
 - автоматизированный приёмный радиоцентр (АПРЦ);
 - автоматизированный передающий радиоцентр (АПДРЦ);
 - пункт управления (ПУ) автоматизированного радиоцентра;
- г) магистральные адаптивные линии радиосвязи (МАРЛ);

- д) линии радиодоступа подвижных абонентов;
- е) сеть передачи данных на основе маршрутизаторов радиосети и др.

По большому счету, контроль и постоянному мониторингу должны подвергаться не только перечисленные элементы АСРС, но и уровень услуг связи, предоставляемые ею, а также услуги безопасности и управления ее ресурсами.

В свою очередь, объектами контроля и мониторинга на уровне АРЦ выступают:

- а) на АПРЦ [26]:
 - РПУ комплекса технических средств (КТС) МАРЛ, а также входящие в состав технических средств прямых линий радиосвязи (ТС РЛ);
 - устройства ВЧ-коммутации на антенно-фидерной подсистеме (АФП) АПРЦ;
 - КТС радиодоступа и узлов присоединения, рис. 4, (приемная часть);
 - различные (или унифицированные) программно-аппаратные комплексы (ПАК) установления и ведения связи (УВС), а также модемное оборудование;
 - аппаратура мультиплексирования и каналообразования (КОА);
 - ПАК коммутации, маршрутизации и адресации, в том числе и в интересах локальной вычислительной сети (ЛВС) АПРЦ;
 - ПАК и АРМ управления АПРЦ;
 - АРМ обеспечивающих подсистем АПРЦ, включающие подсистемы безопасности связи, ионосферно-волновой (ИВС) и частотно-диспетчерской служб (ЧДС), системы автономного электроснабжения (САЭ);
- б) на АПдРЦ [26]:
 - РПдУ ДКМ диапазон волн, из состава КТС МАРЛ, а также входящие в состав ТС РЛ;
 - устройства ВЧ-коммутации на антенно-фидерной подсистеме (АФП) АПдРЦ;
 - КТС радиодоступа и узлов присоединения, рис. 4, (передающая часть);
 - различные (или унифицированные) ПАК УВС, а также модемное оборудование;
 - аппаратура мультиплексирования и каналообразования (КОА) АПдРЦ;
 - ПАК коммутации, маршрутизации и адресации, в том числе и в интересах ЛВС;
 - ПАК и АРМ управления АПдРЦ;
 - АРМ обеспечивающих подсистем (в том числе САЭ АПдРЦ).

Рассмотрим следующий элемент сложносоставного объекта контроля – декаметровые радиолинии, которые можно назвать, наряду с АРЦ, другим основным структурным элементом АСРС. В основе построения всей АСРС, а также отдельных её радиолиний лежат *радиоканалы*, предназначенные для передачи дискретных сообщений от источника к получателю и называемые дискретными каналами связи (ДКС) [15, 16, 24, 28, 29]. Функционально схему ДКС, в соответствии с Рекомендацией ITU-R F.1487 [30] можно представить состоящей из ком-

плектов РПДУ и РПУ, как показано на рис. 5 (ДКС схематично обозначен красным цветом). При этом дискретный канал связи на АСРС функционируют в заданном режиме работы, устанавливаемом шириной спектра формируемого сигнала, последовательностью изменения выделяемых рабочих частот, видом, а также кратностью модуляции и используемым канальным кодированием. Данные процессы на рис. 5 охватывают модулятор РПДУ, среду распространения радиоволн (РРВ) и демодулятор с решающей схемой РПУ.

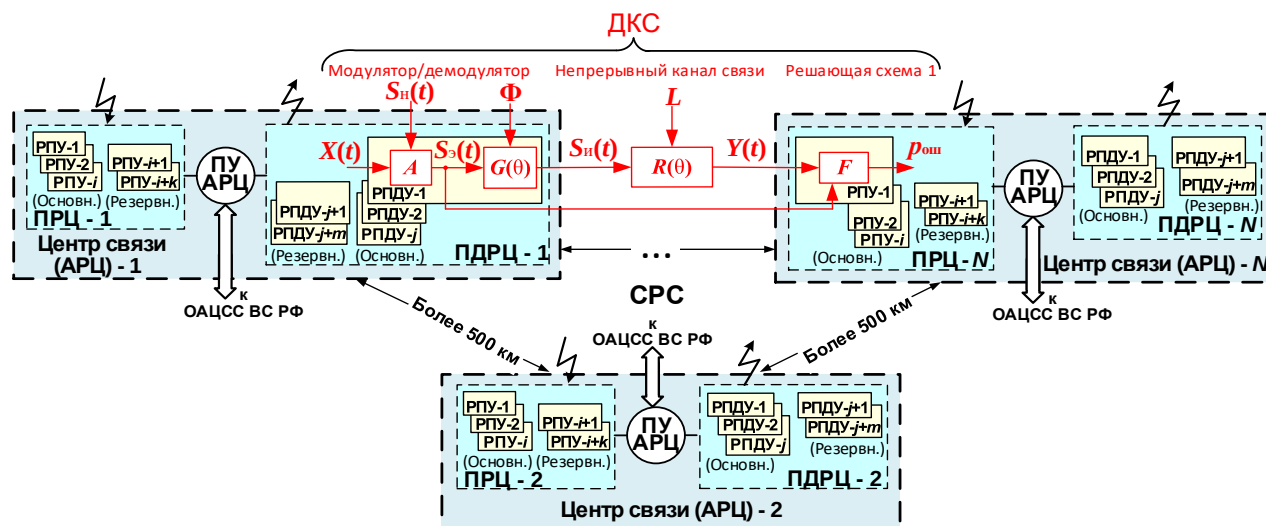


Рис. 5. Формализованная схема ДКС в составе радиолиний АСРС

В соответствии с [28] к основным способам организации радиосвязи относятся радиосети и радионаправления, в основе которых лежат каналы радиосвязи (радиоканалы). При этом в случае воздействия на радиосеть различных дестабилизирующих факторов, носящих как естественный, так и искусственный характер, радиосеть может распадаться на радионаправления. И, наоборот, при восстановлении радиосвязи – организуется в радиосеть, но зачастую другой структуры. Примером воплощения такого подхода в последнее время можно назвать самоорганизующиеся сети радиосвязи (ССР). Они управляются децентрализованно и не имеют постоянной структуры. В иностранной литературе такой класс сетей часто называют сетями *MANET* (*Mobile Ad hoc Network*) или мобильными сетями с ситуационным управлением. Сети *MANET* обеспечивают возможность передачи данных на значительные расстояния без существенного увеличения мощности РПДУ, а за счет децентрализации управления становятся устойчивыми к изменению своих структур [31].

Существующие в настоящее время ССР в основном базируются на технологиях *Wi-Fi*, *ZigBee*, *Bluetooth* и не распространяются на ДКМ диапазон. В тоже время такая перспективная военная радиосистема связи армии США как *Joint Tactical Radio System (JTRS)* применяющая закрытый сетевой протокол радиосвязи *Wideband Networking Waveform (WNW)*, делает возможным построение ССР в ДКМ диапазоне [31]. Это позволяет при наличии доступа любой радиостанции соединяться в произвольном порядке и выступать ретранслятором, динамически изменяя направления пересылки трафика сети.

Причем в случае использования ДКМ диапазона волн при организации АСРС возникает одна из ключевых проблем, необходимость учета анизотропии радиоканалов и по задействованному аппаратурному ресурсу, и по применяемым частотам, и по направлениям передачи. Это вызвано тем, что в различных направлениях передачи одна и та же рабочая частота на приёме будет обеспечивать разные уровни сигнала вследствие особенностей среды РРВ в виде ионосферы. Поскольку рабочая частота, подходящая для радиообмена в одном направлении, может быть совсем непригодной для радиообмена в обратном направлении. Также необходимо учитывать тот факт, что структурно автоматизированные радиоцентры, как элементы АСРС, состоят из множества РПДУ и РПУ (аппаратурного ресурса), закреплённых за радиоканалами и абонентами радиосети, каждый из которых обладает своим параметрическим ресурсом по показателям надежности [26]. Также анизотропия радиоканалов по частотному и аппаратурному ресурсам на ребрах АСРС (на одном направлении связи) заметно влияет на комплексный показатель качества, значение которого определяется ТТХ РПДУ и РПУ, состоянием среды РРВ, способами ведения радиосвязи, степенью использования частотных, аппаратурных, параметрических, временных, энергетических и других ресурсов (свойствами радиоканалов) [15, 16, 26, 28, 29]. Но необходимо отметить, что зачастую данная анизотропия радиоканала на практике полностью игнорируется, когда эксплуатант идеализирует его, используя вольное допущение об абсолютно надёжных средствах радиосвязи, что далеко не так [15, 16, 26, 28, 29].

Исходя из поставленной задачи, при формировании модели превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций, в статье мы будем вести речь исключительно об управлении параметрическими и аппаратурными ресурсами АРЦ и АСРС, не беря во внимание частотные, энергетические и другие виды ресурсов, что является еще одним ограничением на проводимые исследования.

5. Выбор необходимых контролируемых параметров, достаточных для идентификации вида технического состояния радиосредства и расчета комплексных показателей качества радиолинии и АРЦ, а также интегрального критерия эффективности радиосети

Параметры, определяющие техническое состояние ТС и АСУ, в процессе эксплуатации постоянно подвергаются изменениям, следовательно, можно говорить об их различном уровне надежности, поскольку изменение метрик параметров технического состояния устройств ведет к изменению показателей надежности. То есть, управляя параметрическим ресурсом (техническим состоянием), можно говорить об управлении показателями надежности (надежностью) ТС и АСУ. При этом управление надежностью может быть *дискретным* (периодическим) или *непрерывным*.

Соответственно, для проведения непрерывного управления надежностью требуется и непрерывный контроль параметров, рис. 3, что характеризуется большими экономическими издержками на измерительные ресурсы реального

времени (АИК, АИП), а также разработку систем мониторинга нового поколения, осуществляющих сбор метрик наблюдаемых параметров (ИИ) с ОК в режиме реального времени, или близком к нему – режиме мягкого реального времени. На сегодня это доступно лишь на объектах ответственного назначения (типа государственных корпораций (ГК) «Росатом», «Роскосмос» и др.). При этом, чем надежнее система, тем большее время она будет находиться в состоянии работоспособности, обеспечивая безотказность работы оборудования круглосуточно 7 дней в неделю 365 дней в году.

При дискретном (периодическом) управлении надежностью, распространенном на остальных объектах контроля ИТКС ОП хорошо себя проявляют прогностические методы, в которых принимаются во внимание вероятностные суждения относительно ненаблюдаемого состояния ОК в какой-то промежуток времени [32].

При дискретном управлении надежностью проводится не только периодический контроль параметров технического состояния, на основании чего определяют текущий уровень надежности ТС и АСУ, но и осуществляют прогноз надежности на заданный интервал функционирования для исключения возникновения отказа в период применения ОК по назначению на интервале до следующего момента проведения процедур дискретного контроля. При нахождении измеряемых параметров в пределах нормы, система может эксплуатироваться до следующего дискретного контроля, при выходе параметров за пределы нормального функционирования, необходимо проводить профилактические мероприятия по повышению надежности системы (регулировку параметров, корректировку уровней передачи и пр.). При наступлении параметрического отказа происходит замена отказавшего устройства (канала, системы) на резервное и восстановление работоспособности (ремонт) отказавшего ОК.

Поскольку описываемый в работе сложносоставной объект контроля (мониторинга) состоит из множества технических средств АСРС, а каждый из основных ее структурных элементов (АРЦ – как узел коммутации на графе сети и ДКС как ребро графа сети), вносящий «вклад» в интегральный показатель качества радиосети – ее связность, состоит из радиосредств РПДУ и РПУ, то в последующих исследованиях примем допущение: выбор параметров для разрабатываемой кумулятивной модели «параметр – поле допуска» проведем на примере типовых технических средств АРЦ (РПДУ, РПУ и др.).

При этом к основным контролируемым параметрам типовых элементов АРЦ можно отнести [33]:

а) для РПУ:

- радиотехнические параметры: чувствительность, избирательность, диапазон рабочих частот, коэффициент шума, виды принимаемых сигналов, динамический диапазон РПУ, амплитудная характеристика РПУ, частота опорного генератора, амплитуда сигнала опорного генератора, допустимые искажения сигналов, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, входной импеданс и др.;

- напряжение электропитания: напряжение электропитания РПУ, напряжение электропитания отдельных блоков РПУ (при необходимости) и др.;
- б) для РПДУ:
 - несущая частота (длина волны) или диапазон несущих частот, уровень выходной мощности, коэффициент полезного действия, стабильность частоты несущих колебаний (нестабильность частоты), краевые искажения, класс радиосигналов и др.;
 - напряжение электропитания: напряжение электропитания РПДУ, напряжение электропитания отдельных блоков РПДУ (при необходимости) и др.;
- в) для антенно-фидерных устройств (АФУ):
 - параметры АФУ: омическое сопротивление, волновое сопротивление, коэффициент стоячей волны и др.;
 - напряжение электропитания антенного коммутатора;
- г) для коммутатора:
 - производительность: процессорной платы, операционной системы (ОС), системы управления базой данных (СУБД);
 - среднее время обработки кадра;
 - состояние интерфейсов коммутатора: импеданс интерфейса, сопротивление интерфейса, затухание сигнала на входе интерфейса;
 - температура процессорного модуля;
 - напряжение питания коммутатора.

Даже это краткое представление основных параметров некоторых структурных элементов АРЦ показывает, что формирование перечня наблюдаемых системой контроля и мониторинга АСРС параметров должен быть строго индивидуален [4, 10, 16, 33] и др.

Критерий принятия решения в области выбора перечня наблюдаемых системой мониторинга параметров, а также определения профилактических (корректирующих) допусков на них должен согласовываться строго индивидуально на основе анализа видов и последствий отказов (*FMEA – Failure Mode and Effect Analysis*) и подвергаться регулярному пересмотру, к примеру, с учетом опыта эксплуатации в [34] предполагается присвоение каждому виду отказа *ранга критичности*. В данном случае критерием критичности выступают:

- *значимость влияния отказа* на целевую функцию системы и основные её функциональные характеристики, в том числе и для систем более высокого уровня;
- *вероятность* того, что *отказ* может наступить и привести к значимым последствиям;
- возможность своевременного *обнаружения отказа* (прогнозирование его наступления) для предотвращения или, хотя бы смягчения его последствий [34].

Для определения меры критичности, перечисленные значимость и вероятность отказа, или значимость, вероятность и обнаруживаемость отказа могут объединяться [34].

Также еще одним подходом при выборе перечня параметров мониторинга для АСРС, относящейся к сложным организационно-техническим объектам контроля, в [26] называют коэффициент, характеризующий критичность отказа элемента объекта контроля и тяжесть последствий для всей АСРС в случае возникновения аварии по причине параметрического отказа (выхода параметров за пределы эксплуатационных допусков), а также «вклад» каждого из таких параметров в обеспечение показателя надежности объекта мониторинга. Таким критерием выступает коэффициент значимости $K_{\text{зн}}$. В связи с тем, что каждый из элементов АСРС содержит большое количество технических устройств, то при условиях ограничения измерительных ресурсов на АСРС гарантированно обеспечить повышение надежности через улучшение качества сразу всех элементов и контроля всех параметров этих элементов одновременно нереально. Это и вызывает необходимость выбора наиболее значимых параметров, вносящих максимальный «вклад» в обеспечение требуемого значения показателя качества – КПК. При этом в ходе определения значимости включения в процедуру мониторинга состояния АСРС и ее элементов отдельного i -го параметра из представленного в НТД на ТС их множества, может быть выбран общий (суммарный) коэффициент значимости $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ параметра, который получается по лингвистической шкале оценки [35] как сумма назначенных весов показателей $K_{\text{зн}}$. Он учитывает коэффициенты значимости по каждому показателю лингвистической шкалы оценивания, в соответствии с выражением

$$K_{\text{зн}i}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n K_{\text{зн}i}, \quad (2)$$

где n – общее число параметров, входящих в НТД объекта контроля, $i = \overline{1, n}$.

Для каждого элемента АСРС, как объекта мониторинга формирование лингвистической шкалы оценивания также строго индивидуально и является весьма сложной задачей, поскольку необходимо объективно обосновать как выбор показателей лингвистической шкалы и ее лингвистических переменных, так и пределов изменения самого коэффициента значимости $K_{\text{зн}}$. Данную задачу обычно решают с использованием системного подхода и методов экспертных оценок [36]. При этом для обеспечения высокой надежности и безаварийного функционирования АСРС важно, чтобы весовой коэффициент элемента, включаемый в лингвистическую шкалу, был как можно выше. Окончательно выбор контролируемых параметров, включаемых перечень процедуры мониторинга, осуществляют построением вариационного ряда из значений общих коэффициентов значимости $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ из перечня НТД объекта контроля по правилу:

$$K_{\text{зн}l}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}r}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}k}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}i}^{\Sigma} \succ K_{\text{зн}n}^{\Sigma} \dots, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, l, \dots, r, \dots, k, \dots, n-1$. Причем вариационный ряд выстраивают по убыванию значений общих коэффициентов значимости $K_{\text{зн}i}^{\Sigma}$ параметров, включенных в процедуру мониторинга. Количество параметров контроля зависит от многих факторов, включая глубину проведения мониторинга, доступных

технологий сетевого мониторинга и вычислительных ресурсов подсистемы мониторинга, отводимого на мониторинг времени (цикла – $T_{ц.м}$) и пр.

В соответствии с положениями теории надежности [37] отдельные параметры ТС и АСУ относятся к единичным показателям надежности, количественно характеризующие только одно из свойств, составляющих их надежность. В то время, как надежность технической системы более высокого уровня (типа МАРЛ, АРЦ, АСРС и др.) характеризуются, как правило, комплексными показателями надежности, описывающих сразу несколько свойств, составляющих надежность [38], например: вероятность связи в радиолинии $P_{св}$ (для РЛ), вероятность ошибочного приема элемента сигнала $p_{ош}$ в радиоканале (для ДКС), коэффициент готовности K_r или коэффициент технического использования $K_{ти}$ радиоцентра (для АРЦ), связность радиосети (не менее 3) и др. [15, 16, 29].

6. Эволюция кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска» при обосновании эксплуатационных допусков в интересах идентификации видов технического состояния объектов контроля

Исторически, управление техническим состоянием (надежностью) сложных технических объектов в основном базировалось на оценке единичных и комплексных показателей надежности, а также на достижениях теорий надежности и диагностики, учитывающих внезапные и постепенные отказы, опираясь на марковские модели старения систем. При этом, как показывает опыт отечественных и зарубежных научных школ теории надежности, значительную часть отказов при эксплуатации технических систем составляют именно параметрические (постепенные) отказы. Причем одной из наиболее трудоемких и сложных задач проектирования автоматизированных систем контроля и мониторинга, является задача своевременной идентификации таких видов отказов. Обычно для этого используются методы функционально-параметрического подхода [10], основу которого составляют математическое моделирование процессов функционирования ОК и закономерностей корреляции взаимозависимых параметров, а также оптимальный параметрический синтез по выбранным критериям надежности [7].

В данной работе под *постепенным (параметрическим) отказом* понимаем отказ, характеризуемый постепенным изменением значения хотя бы одного рабочего параметра ОК с его дрейфом за пределы установленных эксплуатационных допусков [14]. Причем важно отметить, что у ряда технических систем в результате параметрического отказа может продолжать сохраняться функционирование, но при этом развивается разрегулировка (выход значений) одного или нескольких показателей качества за пределы эксплуатационных допусков, установленные в НТД. Здесь под *допуском* понимаем установленные опытным или расчетным путем (при проектировании) границы для значения параметра технического объекта, при которых он способен выполнять заданные функции, сохраняя свои технические показатели в течение требуемого времени в определенных условиях эксплуатации.

Различают эксплуатационные, производственные и допуски на готовую продукцию. В работе в большей мере мы будем обращаться к *эксплуатационным*

допускам, которые ограничивают отклонение выходных параметров в процессе эксплуатации изделия, вызванных производственным разбросом параметров, климатическими факторами (влажности, температуры) и фактором старения. В процессе эксплуатации под действием этих факторов происходит колебание и перемещение производственного допуска математического ожидания в сторону увеличения « $+\Delta$ » или уменьшения « $-\Delta$ » выходного параметра. При этом получаемый результирующий закон распределения погрешности будет иметь произвольный характер.

Повышение требований к качеству функционирования и надежности в целом систем ответственного назначения, к которым причисляются ТС и АСУ в виде нашего объекта исследования, АСРС, делают особо актуальным вопрос правильного назначения эксплуатационных допусков на параметры, сетевых элементов, а также входящих в них устройств и подсистем. Известные научному сообществу методы расчета эксплуатационных допусков на параметры технических устройств и систем [38-41] основаны на учете таких ДФ, как старение и технологический разброс параметров, однако они не учитывают корреляцию параметров ее элементов.

Для одного параметра Θ технического объекта геометрически модель его отказа типа «параметр – поле допуска» можно представить в виде отрезка с обозначением на нем номинального значения $\Theta_{\text{ном}}$ с максимальным Θ_{max} и минимальным Θ_{min} отклонением, обозначающими поле допуска 2Δ , рис. 6. При этом выход числового значения метрики наблюдаемого параметра за пределы его поля допуска означает *параметрический отказ* объекта контроля.

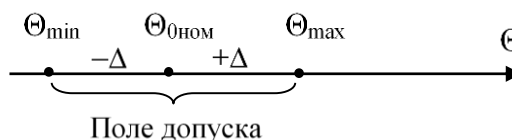


Рис. 6. Геометрическое представление параметра и поля допусков на него

На сегодня идентификация вида технического состояния ТС и АСУ в процессе выполнения процедур контроля (мониторинга) осуществляется путем нахождения наблюдаемых параметров ОК в пределах установленного поля эксплуатационных допусков. При этом к основным видам технического состояния относят финальную вероятность нахождения наблюдаемого ОК в одном из множеств возможных состояний [10, 16]. Ввиду того, что вид технического состояния ОК как правило может определяться не одним, а сразу несколькими параметрами, но при этом современные методы назначения эксплуатационных допусков на параметры не учитывают их корреляцию между собой, то для приращения достоверности процедуры контроля представим в пространстве параметров некоторую область, называемую «областью неопределенности», как показано на рис. 7, в которой значения контролируемых параметров ОК могут находиться с заданной вероятностью.

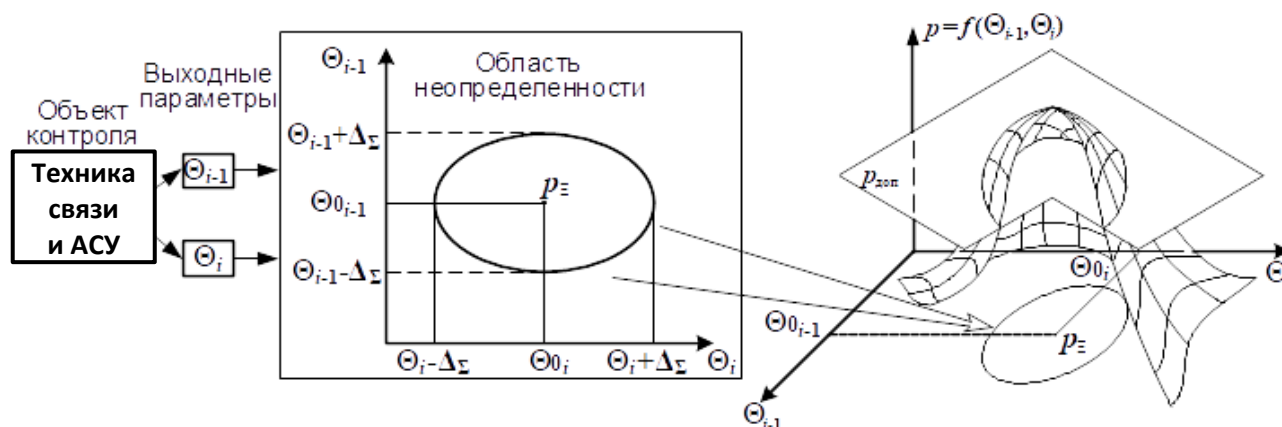


Рис. 7. Формирование области неопределенности при оценке технического состояния объекта контроля двумя параметрами Θ_{i-1} и Θ_i

Таким образом, в ходе идентификации вида технического состояния сетевого устройства вместо интервала $[\theta_{i \min}, \theta_{i \max}]$ изменения какого-либо из его параметров Θ_i используется область неопределенности $\Delta\Theta$ в виде эллипса. Так, для двухпараметрического пространства коррелированных параметров Θ_i и Θ_{i-1} ОК погрешность разброса минимальных и максимальных допусков будет представлять из себя область неопределенности в виде эллипса, получаемого в сечении плоскостью допустимого значения $p_{\text{доп}}$ комплексного показателя качества (надежности) $p = f(\Theta_{i-1}, \Theta_i)$ с телом неопределенности, представляющей результирующий закон распределения погрешности метрик измеренных выходных параметров, спроецированного на плоскость параметров Θ_{i-1} и Θ_i , рис. 7.

Размерность показанной в виде эллипса на рис. 7 области неопределенности определяется по числу выходных параметров, собственно, по которым и осуществляется оценка вида технического состояния ОК. В тоже время, в связи с тем, что при проведении измерений всегда присутствуют погрешности средств измерений и ошибки из-за внешних возмущений (ДФ), то эта область неопределенности будет иметь размытые границы, что переносится в виде погрешности непосредственно на фиксируемую величину контролируемого параметра.

Существующие на сегодняшний день методы параметрического синтеза сложных технических систем [42, 43] рассматривают применение точных значений параметров, описывающих техническое состояние ОК или знание вероятностных характеристик ДФ, которые ведут к наличию погрешностей в оценках величин наблюдаемых метрик параметров ИТКС [44]. В тоже время, достаточно широко распространенным методом наблюдения неопределенных величин, является так называемый метод на базе вероятностного подхода. Исходя из такого подхода, каждому вектору состояний ставится в соответствие некоторое распределение вероятностей с заданной плотностью. Несомненно, данный подход требует знания статистических характеристик исходных неопределенных факторов (статистики за продолжительное время эксплуатации ОК), что на практике не всегда обеспечивается для вновь вводимых в работу технических систем и устройств.

Специфика функционирования существующих систем контроля технического состояния ТС и АСУ, построенных на рассмотренных выше стратегиях

управления надежностью показывает, что к недостаткам таких устройств, реализующих данные стратегии относятся высокая вероятность отказа в обслуживании, вызванная тем, что назначение эксплуатационных допусков (порогов срабатывания системы контроля) осуществляется без учета общего состояния вышестоящей системы, например, радиолинии по отношению к РПДУ и РПУ, или ИТКС по отношению к сетевым элементам. Действительно, уровень загрузки буферных устройств в узлах коммутации, или высокий коэффициент ошибок в дискретном канале связи может вызвать блокировку узлов загруженной сети, низкую производительность и высокий коэффициент простоя, поскольку при мониторинге сложных технических систем и идентификации их состояния необходимо производить измерения, преобразование и обработку большого числа параметров (ИИ), именуемых в современных ТИИ большими данными (*BigData*), что нередко связано с отключением системы и ее простаиванием.

Рассмотрим пример решения задачи расчета допусков на параметры радиосредств, функционирующих в системе, на фрагменте декаметровой радиолинии, или ДКС, как основного элемента автоматизированной сети радиосвязи. Учитывая структуру ДКМ РЛ, показанную на рис. 5, и включающую модулятор РПДУ, среду РРВ и демодулятор с решающей схемой РПУ, множество параметров M , характеризующих состояние ее элементов, можно представить в виде подмножества вида

$$M = \{B, C, D, E\},$$

где:

- $B = \{X(t), S_n(t), S_o(t), S_{in}(t), Y(t)\}$ – фазовые переменные дискретного канала связи, определяющие его состояние в момент времени t ;
- $X(t)$ – информационный сигнал (низкочастотный);
- $S_n(t)$ – модулирующий сигнал (высокочастотный);
- $S_o(t)$ – эталонный модулированный сигнал, когда все значения параметров в номинале;
- $S_{in}(t)$ – сигнал, искаженный в аппаратной части радиолинии (ДКС);
- $Y(t)$ – выходной сигнал дискретного канала связи;
- $C = \{\Phi, L\}$ – параметры внешних ДФ, характеризующие Φ – воздействия на аппаратную часть РЛ (РПДУ, РПУ) и L – на среду РРВ;
- $D = \{\Theta, \Xi\}$ – внутренние параметры ДКС, количественно характеризующие его свойства;
- Θ – технические параметры радиосредств;
- Ξ – характеристики состояния (неоднородности) среды РРВ, а также помеховой обстановки;
- E – выходные параметры, которые количественно характеризуют качество функционирования РЛ (ДКС).

Расчет допусков на параметры радиосредств, функционирующих в декаметровых радиолиниях АСРС

1. Задаем показатель качества функционирования РЛ (ДКС). Как видно из рис. 5, первая решающая схема является выходным элементом ДКС. Она же реализует правило, по которому в радиоприемном устройстве по принятому из канала сигналу $Y(t)$, искаженному в аппаратной части и в среде

РРВ вследствие ДФ, принимается решение о виде элемента r переданного сигнала, $r = \overline{1, m}$; m – множество вариантов сигнала (для двоичных систем передачи $m = 2$). Таким образом, выходным параметром, характеризующим качество работы ДКС, является показатель верности принятия решения о виде переданного сигнала $S_{\text{вр}}(t)$. Этим показателем общепринята вероятность ошибочного приема элемента сигнала $p_{\text{ош}}$ в виде непрерывной функции случайных параметров Θ и Ξ , характеризующая соответственно техническое состояние радиосредств и состояние среды РРВ [11, 12, 29, 45].

- Введем допущение, что ухудшение показателя качества функционирования радиолинии (ДКС) происходит только в определенных односторонних пределах

$$p_{\text{ош}}(\Theta, \Xi) \leq p_{\text{доп}}, \quad \Theta \in \overline{\Delta\Theta}, \quad \Xi \in \Delta\Xi, \quad (4)$$

где $\Theta = (\Theta_1, \dots, \Theta_m)$ и $\Xi = (\Xi_1, \dots, \Xi_n)$ – вектора параметров, соответственно, радиосредств и параметров, характеризующих неоднородность среды РРВ и наличие помех в ней; $\Delta\Theta$ – множество возможных значений параметров радиосредств (поле допусков $\pm\Delta$); $\Delta\Xi$ – множество допустимых значений параметров среды РРВ; $p_{\text{доп}}$ – допустимое значение вероятности ошибочного приема сигналов в дискретном канале связи (РЛ).

- Проведем расчет радиосредств (РПдУ и РПУ) и получим расчетное значение параметров Θ_p для каждого индивидуально, удовлетворяющих критерию качества $p_{\text{ош}}$

$$p_{\Xi} \leq p_{\text{ош}}(\Theta_p, \Xi) \leq p_{\text{доп}}, \quad (5)$$

где p_{Ξ} – вероятность ошибочного приема сигналов, которая определяется как способом модуляции, так и видом решающей схемы, а также характеристиками среды РРВ при номинальных значениях параметров радиосредств, когда $\Theta = \Theta_n$.

- Отклонение значений показателя качества в пределах $[p_{\text{доп}}, p_{\Xi}]$ в пространстве параметров определяют связную область R^m допустимых вариаций параметров $\Theta \in \overline{\Delta\Theta}$ (поле допусков $\pm\Delta$) так, что для всех точек этой области неопределенности (рис. 7) $\Delta\Theta$ соответствующие эксплуатационные показатели качества РЛ будут приемлемы, т. е.

$$\Delta\Theta = \{\Theta \in R^m \mid p_{\Xi} \leq p_{\text{ош}}(\Theta, \Xi) \leq p_{\text{доп}}, \Xi \in \Delta\Xi\}. \quad (6)$$

При заданной структуре РЛ (ДКС) значение показателя качества, как было показано в [11, 12, 29, 45], зависит от значений параметров радиосредств и воздействий различного рода помех (ДФ) на среду РРВ. Для учета влияния возмущений Ξ на положение области неопределенности $\Delta\Theta$ в параметрическом пространстве используют различные методы [11, 12]. Методами поисковой оптимизации возможно, к примеру, определить критические значения воздействия $\Xi \in \Delta\Xi$, при которых достигнем $\min \Delta\Theta$. При этом показатель качества ДКС можно рассматривать как функцию параметров

$$p_{\text{ош}} = p_{\text{ош}}(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m). \quad (7)$$

В результате сечения гиперповерхности (7), рис. 7, гиперплоскостью заданного качества $p_{\text{ош}}(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m) = p_{\text{доп}}$ образуется область допустимых вариаций параметров.

В ходе параметрического синтеза сложного динамического объекта контроля при оптимизации области неопределенности параметрического пространства возможно осуществить замену одного значения его параметра множеством возможных значений, что обусловлено определением ограничений и допущений для упрощения математической модели ОК, а также требуемой точностью определения его положения в случае реализации практических задач [39, 46]. В данном случае заданную область неопределенности для двухпараметрического пространства возможно отобразить в виде эллипса качества (на плоскости), рис. 8.

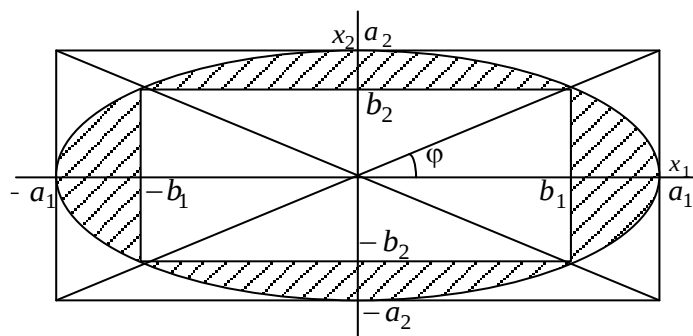


Рис. 8. Эллипс качества

Основные трудности, чаще всего возникающие при реализации данной процедуры расчета допусков на параметры ТС и АСУ, заключаются в сложности установления необходимой зависимости показателя качества функционирования всей системы от ее параметров, а также определении алгоритмов построения области допустимого поля допусков параметров при $m > 2$.

Применительно к исследуемому объекту, ДКС (РЛ) в составе ДКМ СРС, первая задача решена путем построения математической модели ДКС в виде $p_{\text{ош}}(\Theta, \Xi)$ [40]. Что касается второй, то зависимость (7) представляет собой нелинейную функцию многих переменных, определяемую $\Delta\Theta$ как область неопределенности сложной конфигурации и для числа параметров $m > 3$ задача построения такой области, как указано в [4, 11, 42], трудноразрешима.

В тоже время, не всегда есть потребность в точном описании области неопределенности $\Delta\Theta$. Её сложная конфигурация не позволяет назначить допуски на каждый параметр в отдельности, поскольку они все оказываются коррелированы (связанные) между собой. При этом допуск на каждый параметр в отдельности при $m = 3$ можно назначить в случае аппроксимации области неопределенности $\Delta\Theta$, показанной на рис. 9 в виде эллипсоида качества, прямоугольным параллелепипедом, таким образом, чтобы его грани были параллельны координатным плоскостям. В этом случае ребро параллелепипеда определяет допуск на каждый параметр в отдельности, что позволяет рассматривать объект с независимыми допусками.

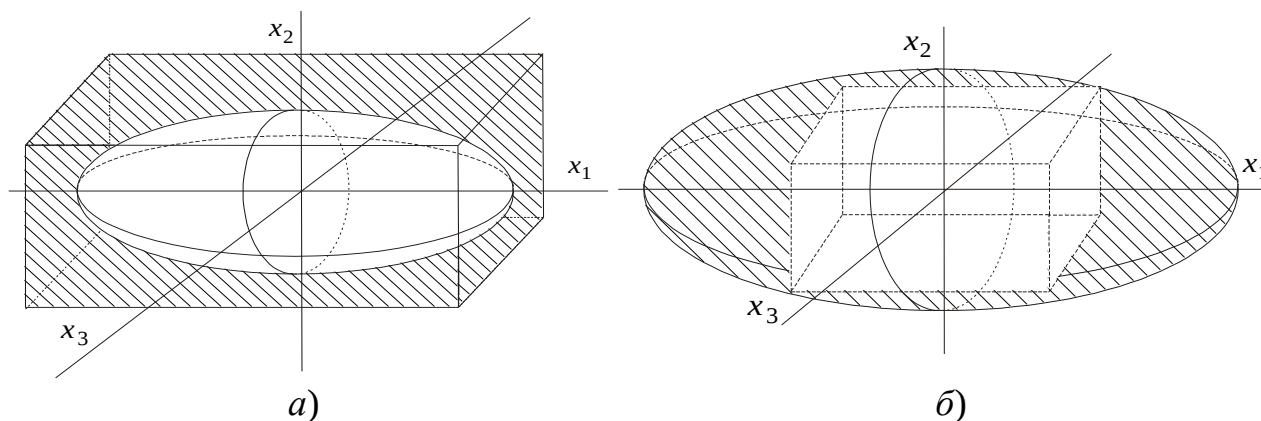


Рис. 9. Эллипсоид качества

Для $m > 3$ под m -мерным прямоугольным параллелепипедом будем понимать множество точек $\Theta = (\Theta_1, \dots, \Theta_m)$ вида

$$B = \{\Theta \mid a_1 < \Theta_1 \leq b_1, \dots, a_m < \Theta_m \leq b_m\}.$$

Для однозначного решения задачи назначения допусков на параметры аппаратуры помимо аппроксимации области неопределенности $\Delta\Theta$ прямоугольником ($m = 2$), параллелепипедом ($m = 3$) или гиперпараллелепипедом (для m -параметрического пространства) необходимо ввести также дополнительные условия [4, 11, 42]:

- минимизация ошибки первого рода α («ложная тревога»). При аппроксимации области допустимых значений вариации параметров описываемым прямоугольником B_o , рис. 8, (параллелепипедом, рис. 9 а) область $\Delta\Theta$ используется максимально, но указанные допуски на параметры образуют дефект, как между областью $\Delta\Theta$ и сторонами прямоугольника (гранями параллелепипеда). Эти области дефекта допусков определяют вероятность ошибки второго рода β «необнаруженный отказ»;
- минимизация ошибки второго рода β . При аппроксимации области допустимых значений вариации параметров вписанным прямоугольником B_v , рис. 8, (параллелепипедом, рис. 9 б), так, чтобы он полностью был вложен в область $\Delta\Theta$, вероятность необнаруженного отказа β близка к нулю, но область $\Delta\Theta$ используется не полностью. Для максимально полного её использования вводятся дополнительные условия по максимальному объему (8) или максимального периметра (9) вложенного параллелепипеда

$$V(B) = \prod_{j=1}^m (b_j - a_j), \quad (8)$$

$$P(B) = \sum_{j=1}^m (b_j - a_j). \quad (9)$$

- обеспечение требуемого соотношения ошибок первого и второго рода α/β , позволяющей аппроксимировать область $\Delta\Theta$ прямоугольником для рис. 8, и параллелепипедом, для рис. 9, так, чтобы он занимал промежуточное положение между вписанным B_v и описанным B_o прямоугольником (параллелепипедом). Данная фигура будет определять такие до-

пуски, которые оптимизируют затраты на систему контроля при выполнении заданных требований к показателю качества функционирования системы.

Упрощенное использование эллипсов и эллипсоидов качества в пространстве параметров более подробно описано в таких работах как [4, 11]. В дальнейшем этот подход развит в [47, 48], а в случае применения для нелинейных систем в [25, 49] и др. Учитывая условия технологичности, допуски на эксплуатационные параметры должны быть по возможности большими, в то время как требования обеспечения высокой надежности вызывают необходимость их уменьшения. В этом и состоит физический смысл противоречия ошибок контроля первого α и второго β рода в теории надежности.

В зависимости от изменения внутренних и внешних условий границы эллипсоида качества технически сложного объекта могут изменяться, что показано на рис. 10.

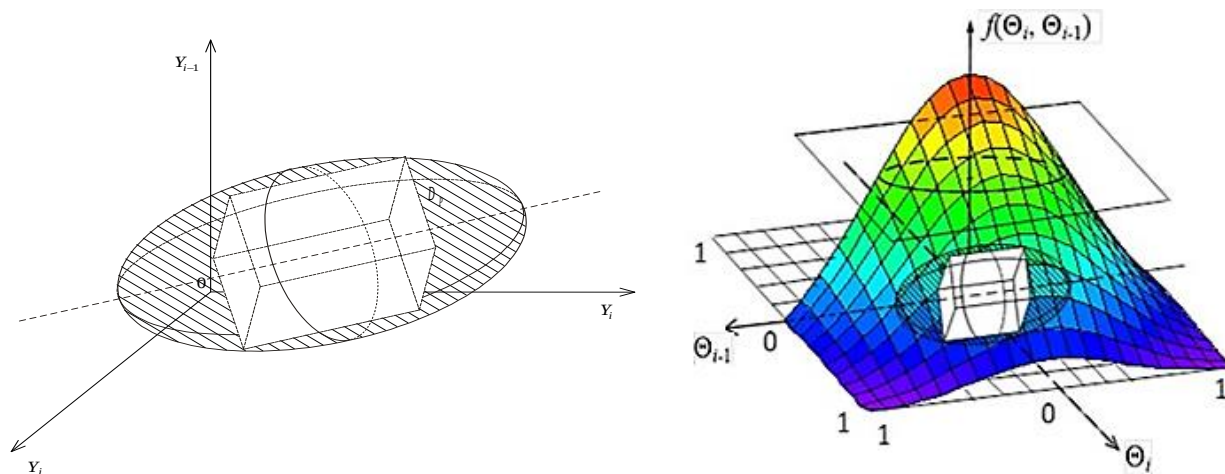


Рис. 10. Изменение границ эллипсоида качества ОК при изменении внутренних и внешних условий

Определение допусковых интервалов путем проекций эллипсоида качества технически сложного объекта при изменении внутренних и внешних условий приведено на рис. 11. Здесь показаны по осям различные условия в процессе оценивания состояния объекта контроля:

- ось Y_j внешние естественные воздействия;
- ось Y_{i-1} сторонние воздействия противоположной стороны;
- ось Y_i внутренние состояния.

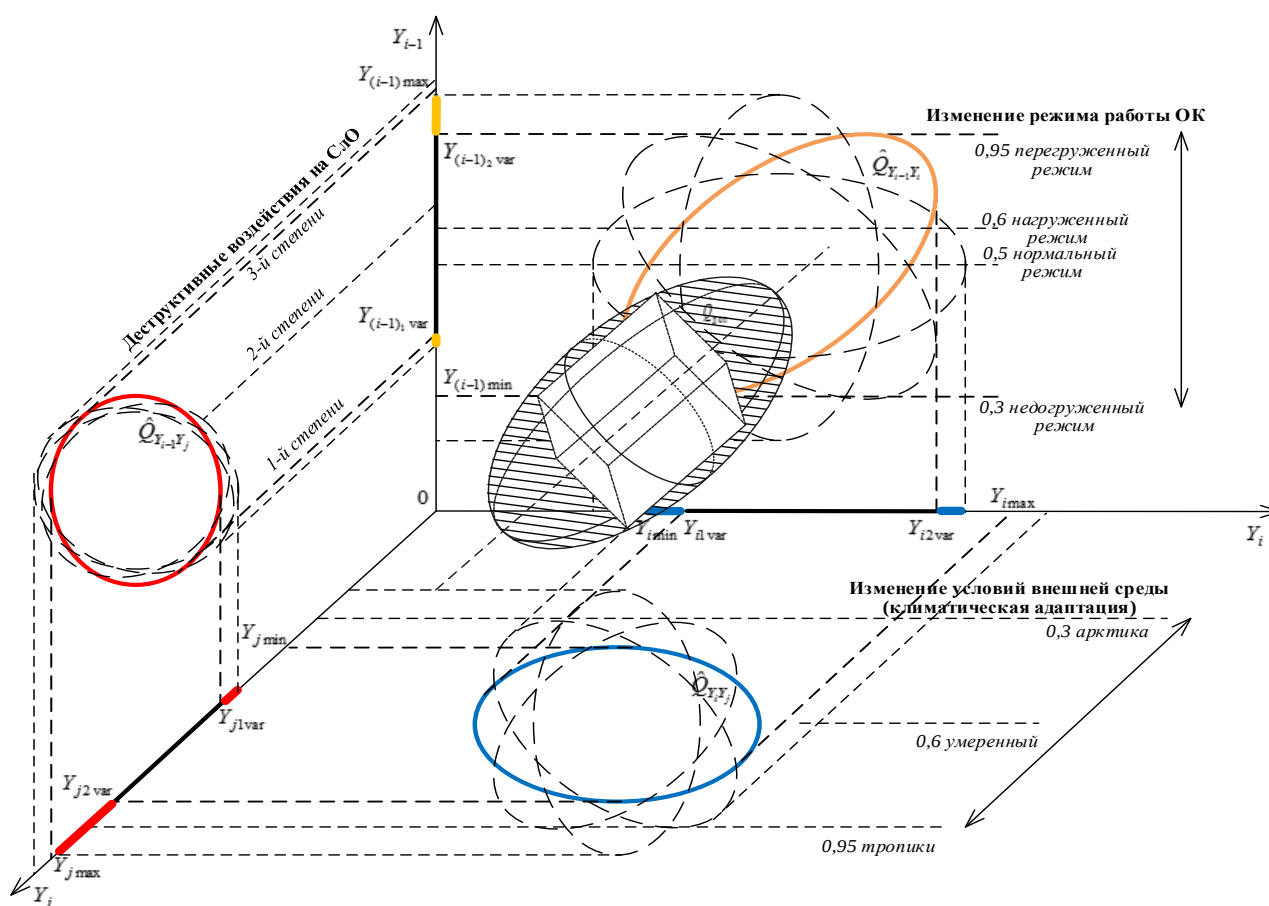


Рис. 11. Определение допусковых интервалов путем проекций эллипсоида качества ОК при изменении внутренних и внешних условий эксплуатации

7. Прогнозирование вида технического состояния объекта контроля с использованием скрытой марковской модели

Для разработки модели превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций представим процесс их функционирования в виде изменения четырех состояний: «норма»; «предотказное»; «неработоспособное» (параметрической отказ); «предельное» (функциональный отказ) [14]. Эти состояния связаны со значениями параметров сетевых устройств, полученных по результатам измерений. В качестве примера, можно рассмотреть параметры работы сетевого оборудования, полученные с использованием агента протокола *Simple Network Management Protocol (SNMP)* подсистемой сетевого мониторинга:

- vc_t – число и состояние своих виртуальных каналов;
- mn_t – число определенных видов сообщений о неисправности;
- avg_t – максимальная длина очереди на выходе (для маршрутизаторов и других устройств);
- ins_t – отказавшие и вновь пущенные в эксплуатацию сетевые интерфейсы.

В этом случае модель превентивной идентификации отказов процесса функционирования сетевых устройств следует представить в виде дважды стохастического процесса, первый – представлен марковским процессом смены состояний «норма», «предотказное», «неработоспособное», «предельное», второй –

многомерным процессом изменения параметров $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$. Тогда модель превентивной идентификации будет иметь вид:

$$\hat{X}_{t+1}^n = A_t^n X_t^n + V_t^n, \quad (10)$$

$$\vec{Y}_t^{L,n} = B X_t^n + W_t^n, \quad (11)$$

где:

- $\hat{X}_{t+1}^n$ – вид технического состояния сетевого устройства («норма», «предотказное», «неработоспособное», «предельное»);
- $A = [a_{ij}, i, j = \overline{1, S}]$ – матрица вероятностей смены состояний сетевых устройств («норма», «предотказное», «неработоспособное», «предельное»), S – число скрытых состояний сетевых устройств (для рассматриваемого случая $S = 4$);
- $\vec{Y}_t^{L,n}$ – многомерный наблюдаемый процесс, характеризующийся изменением параметров $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$;
- B – матрица вероятностей появления многомерных наблюдений, характеризующих процесс изменения параметров $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$;
- V_t^n и W_t^n – технологический (динамический) шум и шум измерения, n – индекс сетевого устройства, t – шаг наблюдения.

Целью такого подхода является получение прогнозной оценки вида технического состояния n -го сетевого устройства, представленного изменением четырех состояний («норма», «предотказное», «неработоспособное», «предельное») на основе анализа второстепенных признаков $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$.

Исходные данные определяются уравнение состояния (10) и уравнением наблюдения (11).

Требуется показать, что на основе представленной модели появляется возможность получить на ограниченном интервале времени прогнозные оценки процесса изменения технических состояний сетевых устройств при наблюдении таких параметров, как:

- число и состояние своих виртуальных каналов;
- число определенных видов сообщений о неисправности;
- максимальная длина очереди на выходе (для маршрутизаторов и других устройств);
- отказавшие и вновь пущенные в эксплуатацию сетевые интерфейсы.

Для того чтобы определить $\hat{X}_{t+1}^n$ необходимо найти матрицу B , которая наилучшим образом соответствует многомерному временному ряду наблюдений $[vc_t; mn_t; avg_t; ins_t]$.

Выдвинем гипотезу о том, что получить эффективные оценки основного процесса $\hat{X}_{t+1}^n$ возможно на основе получения оценок многомерной функции распределения плотности вероятности (ФРПВ), характеризующей второстепенные процессы, представленные изменениями значений параметров $[vc_t; mn_t; avg_t;$

$ins_t]$. При этом на начальном этапе необходимо сформировать функцию распределения плотности вероятности значений наблюдаемых параметров, представленную в рассматриваемой задаче многомерной.

7.1. Аппроксимация известными распределениями, параметрический случай

Рассмотрим возможные пути формирования многомерной функции распределения на основе наблюдений $[vc; mn; avg; ins_t]$. Здесь возможны два варианта [50]:

- параметрический случай, аппроксимация известными распределениями;
- непараметрический случай, использование оценок Розенблатта-Парзена.

Остановимся на рассмотрении параметрического случая. В работе [51] многомерная непрерывная ФРПВ наблюдаемых параметров для i -го скрытого состояния представлена эллиптическим симметричным распределением. Пусть наблюдается упорядоченное статистически зависимое множество векторов. Каждый вектор – это некоторая точка в Евклидовом d -пространстве. Всего T наблюдений $\vec{Y}_1, \vec{Y}_2, \dots, \vec{Y}_T$. Каждый раз при $t = \overline{1, T}$, $\vec{Y}_t$ исходя из сложившегося скрытого состояния устройства, получаем некоторую ФРПВ.

$$b_i(y) = h_i \cdot q_i(y) \cdot \left| \sum_i^{-1/2} \right|, \quad (12)$$

где $q_i(y)$ положительно определенная квадратичная форма, $i = \overline{1, S}$, скрытые состояния наблюдаемого параметра:

$$q_i(y) = (y - m_i)^T \cdot \sum_i^{-1} (y - m_i), \quad (13)$$

m_i – произвольные точки в Евклидовом d -пространстве, y – наблюдаемый параметр.

Результаты, представленные в работе [52], являются значительными в области получения оценок с использованием скрытых марковских моделей (СММ) при наличии нескольких наблюдений. Однако условие, связанное с тем, что ФРПВ наблюдений должны быть эллиптически симметричными во многих ситуациях не выполняется. На практике ФРПВ имеют сложный вид. Как правило, плотности распределения процесса функционирования сетевых устройств, аппроксимирующие представленные полигоны частот, имеют сложные формы многомерного пространства, типа т. н. многообразия, как показано на рис. 12, только еще сложнее, и не могут быть описаны каким-либо известным законом распределения.

Если функцию плотности $f(y)$ не удаётся смоделировать параметрическим распределением, её следует описать смесью нескольких распределений. В работе [52] рассмотрен частный случай, когда многомерная функция сложной формы $f(y)$ представлена смесью логарифмически вогнутых или эллиптически симметричных плотностей $B_{ik}(Y)$:

$$f_i(y) = \sum_{k=1}^K w_{ik} B_{ik}(Y). \quad (14)$$

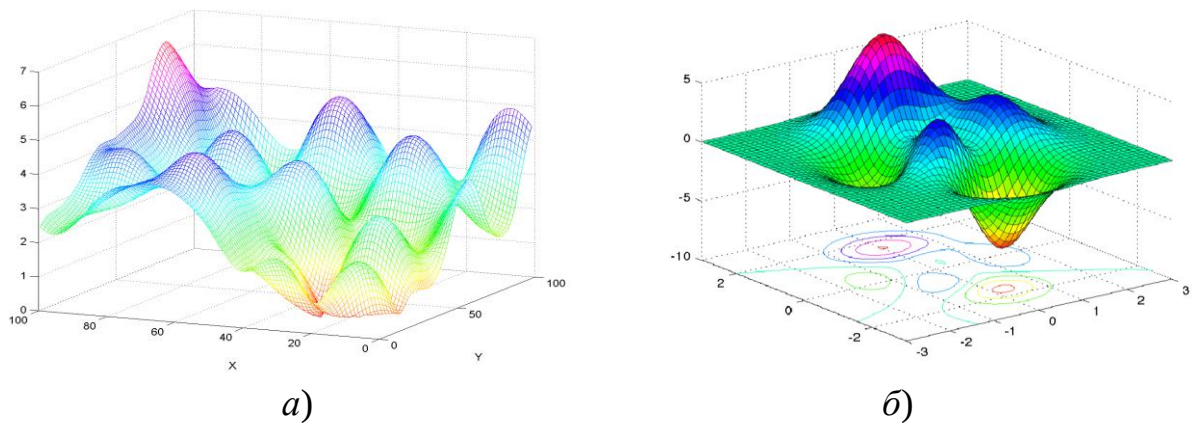


Рис. 12. Геометрическое представление многообразия в виде а) многомерных поверхностей; б) с проекцией сечений на плоскость XOY

Здесь: K – количество компонент смеси; w_k – весовой коэффициент i -ой компоненты смеси, $w_k \geq 0$.

Многомерная смесь $B_{ik}(Y)$ – удовлетворяет условиям согласованности Колмогорова, таким образом, что $B_{ik}(y)$ представлено в следующем виде:

$$B_{ik}(y) = \int_0^{\infty} \psi(y; \mu_i^k; l \Sigma_i^k) d(l), \quad (15)$$

где Σ_i^k – ковариационная матрица; k – число компонент смеси; l – мерность пространства; μ_i^k – вектор математических ожиданий по количеству компонентов смеси k .

Для смеси эллиптически симметричных ФРПВ $b_{ik}(y)$ примет вид:

$$B_{ik}(y) = h_{ik} \cdot q_{ik}(y) \cdot |\Sigma_{ik}^{-1/2}|, \quad (16)$$

где $q_{ik}(y) = (y - m_{ik})^* \cdot \Sigma_i^{-1} (y - m_{ik})$.

Следует отметить, что на практике получить оценки смеси эллиптически симметричных ФРПВ $f_i(y)$ многомерных функций распределения достаточно сложно. Трудности прежде всего возникают с обратимостью ковариационной матрицы Σ_i^{-1} . Кроме того данный метод предполагает использование одинакового числа компонент для L -мерных пространств, что оказывает негативное влияние на точность аппроксимации.

7.2. Аппроксимация смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент

В представленной постановке задачи сразу же возникает вопрос: сколько компонент необходимо брать для получения точной аппроксимации? Классический *ЕМ*-алгоритм, часто используемый для получения смеси распределений, имеет ряд проблем, как раз связанных:

- с выбором необходимого числа компонент, определяющего качество аппроксимации;

– зависимостью от выбора начального приближения, влияющего на качество и скорость сходимости решения.

Использование алгоритмов *SEM*, *MCSEM* и их модификаций в случае большого объема данных приводит к существенному увеличению времени обработки [53, 54]. Методы, основанные на иерархической кластеризации, также приводят к существенному увеличению времени.

Осуществим доработку *ЕМ*-алгоритма при следующих условиях:

- 1) для более точной аппроксимации ФРПВ наблюдаемых параметров число компонент $K_L = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$ может быть разным;
- 2) число компонент смеси нормальных распределений, аппроксимирующей эмпирическое распределение может изменяться во времени: $K_L(1), K_L(2), \dots, K_L(T)$ так как в работе рассматривается непараметрический случай.

С учетом рассмотренных условий для некоторого эмпирического распределения, представленного на рис. 13, необходимо получить алгоритм, позволяющий рассчитывать число компонент.

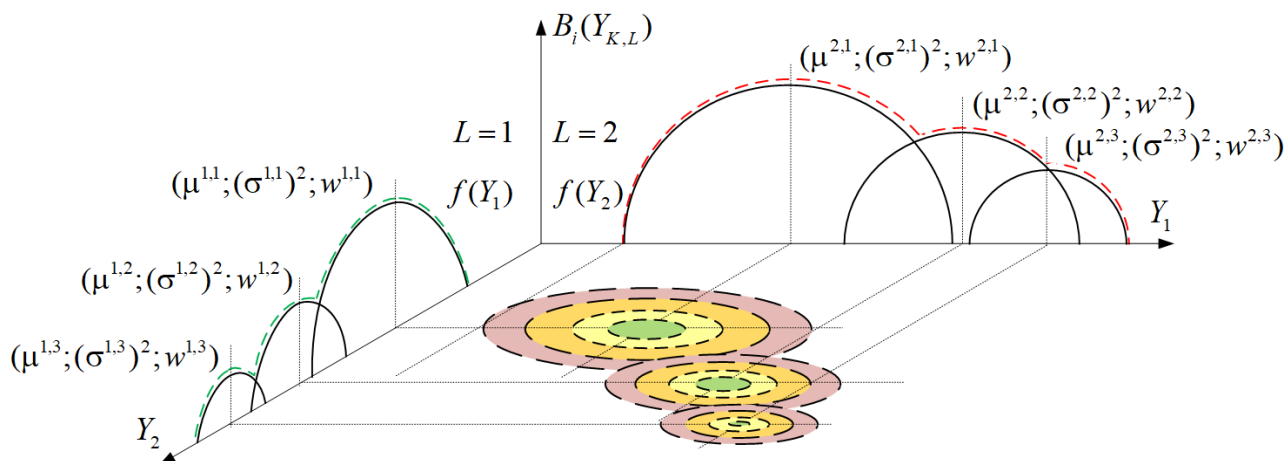


Рис. 13. Пример аппроксимации эмпирического распределения двухмерной ФРПВ, характеризующей наблюдения

На первом шаге доработки *ЕМ*-алгоритма необходимо решить проблему нахождения глобального максимума. Напомним, что в зависимости от выбора начального приближения алгоритм может сходиться к разным точкам. Существует несколько подходов в *ЕМ*-алгоритме к инициализации начальных параметров (математическое ожидание, дисперсия и вес) $\Theta = (w^1, \dots, w^{K_L}, \mu^1, \dots, \mu^{K_L}, \sigma^1, \dots, \sigma^{K_L})$, рис. 13. [55, 56]. Наиболее простой способ, когда дисперсия и математическое ожидание выбираются случайным образом, а вес задается как $1/K_L$. Однако даже при небольшом количестве компонент в большинстве случаев результирующие кластеры сильно отличаются от входных. Одним из самых эффективных алгоритмов получения начальных центроидов, согласно исследованиям [55, 57], является алгоритм *kmeans++*. Поэтому воспользуемся им для получения начального приближения для *ЕМ*-алгоритма.

Для преодоления второй проблемы *ЕМ*-алгоритма (определения оптимального числа компонент смеси распределений во времени) необходимо сформировать функцию правдоподобия и осуществить выбор критерия. В работе [58] приведены теоретические исследования и анализ критериев получения оптимального числа компонент для выборок разного размера и типа. Рассмотрены варианты использования информационных критериев Акаике и Байеса. В соответствии с исследованиями, представленными в работе [58], целевая функция, позволяющая определить оптимальное значение числа компонентов смеси для функции, представленной на рис. 13, будет иметь вид

$$k_{l \text{ opt}} = \arg \max_{k_l} \left\{ \sum_{t_l=1}^{T_l} \ln \sum_{k_l=1}^{K_l} \left(\frac{w^{k_l}}{\sqrt{2\pi(\sigma^{k_l})^2}} \exp \left(-\frac{(y^l - \mu^{k_l})^2}{2(\sigma^{k_l})^2} \right) \right) - (3k_l - 1) \right\}, \quad (17)$$

где размерность статистических гипотез $\Theta = (w^1, \dots, w^{K_l}, \mu^1, \dots, \mu^{K_l}, \sigma^1, \dots, \sigma^{K_l})$ для рассматриваемого случая равна $d = 3k_l - 1$ [58].

Выражение (17) основано на использовании информационного критерия Акаике.

Классический *ЕМ*-алгоритм содержит два шага: шаг ожидания (*expectation*), или *E*-шаг, и шаг максимизации (*maximization*) или *M*-шаг. Каждый из шагов повторяется до тех пор, пока изменение логарифмической функции правдоподобия не станет меньше, чем параметр ε – минимальное приращение функции логарифмического правдоподобия. Дополним известный *ЕМ*-алгоритм процедурой *kmeans++* и дополнительным циклом, позволяющим рассчитать функцию правдоподобия (17). Реализация усовершенствованного алгоритма нахождения параметров $w^1, \dots, w^{K_l}, \mu^1, \dots, \mu^{K_l}, \sigma^1, \dots, \sigma^{K_l}$ может быть проиллюстрирована с помощью следующего псевдокода:

```

INPUT:
 $K_l$  # число кластеров;
 $j = \overline{1, K_l}$ , # номер кластера;
 $Y^l = \{y_{1_l}, y_{1_l}, \dots, y_{T_l}\}$  # множество из  $T$  наблюдений  $L$ -мерного пространства;
 $l = \overline{1, L}$ , # индекс пространства;
 $t = \overline{1, T}$ , # номер наблюдения;
 $\langle \overline{M} \rangle$  # массив, содержащий значения выбираемых центроидов, используется в качестве начальных значений математических ожиданий центроидов для ЕМ-алгоритма;
 $\langle \overline{D} \rangle$  # массив, содержащий значения расстояний от элементов до центроидов, используется в качестве начальных значений дисперсий для ЕМ-алгоритма;
 $P_{centr}(t)$  # массив, содержащий значения вероятностей, характеризующих расстояния от элементов до центроида;
 $\varepsilon$  # минимальное приращение функции логарифмического правдоподобия, по достижении которого алгоритм останавливается;

```

OUTPUT:

$W; M; D$ # промежуточные матрицы для обновляемых параметров смеси распределений для пространства $l = 1$ (размерность по числу кластеров и наблюдений);

G # матрица нормированных вероятностей принадлежности наблюдений к кластерам;

P_{ij} # условная вероятность;

Fpr # функция правдоподобия.

процедура, позволяющая рассчитать первоначальное число кластеров K_{means} .

7.3. Алгоритм *KMEANS++*

Реализация алгоритма *kmeans++* может быть проиллюстрирована с помощью следующего псевдокода:

$cenr = random.randrange(Y^l)$ # назначение первого центроида случайным образом;

$K_l = T - 1$ # определение начального числа кластеров;

$j = 1$

$M_j = y^l(cenr)$

FOR $j = 1$ to K_l

проверка задействия данной точки в качестве центроида на предыдущих шагах;

FOR $t = 1$ to T

IF $y_t^l = M_j$

THEN $R_{ij} = 0$

ELSE $R_{ij} = (y_t^l - M_j)^2$ # расчет расстояний до кластера

Преобразование расстояний в вероятности для нахождения новых центроидов

$$P_{centr}(t) = \frac{R_{ij}}{\sum_{t=1}^{T-1} (y_t^l - M_j)^2} \quad \text{\# вектор по } t$$

END FOR t

выбор в качестве следующего центроида элемента, имеющего большую вероятность;

IF $P_{centr}(t) = \max$

THEN $j = (j + 1)$

$M_j = y^l(t); D_j = R_{ij}$

END FOR j

$K_{means} = j$ # число кластеров на выходе алгоритма;

$\langle \vec{M} \rangle = M_j; \langle \vec{D} \rangle = D_j$

7.4. Усовершенствованный *ЕМ*-алгоритм

Реализация усовершенствованного *ЕМ*-алгоритма может быть проиллюстрирована с помощью следующего псевдокода:

```

INITIALIZATION:
FOR  $j=1$  to  $K_l$ 
 $W_j = 1/K_{means}$ ; # задать исходные значения смеси распределений;
END FOR  $j$ 
WHILE
 $\Delta Fpr \geq \varepsilon$  # проверка условий выхода из ЕМ-алгоритма;
 $Fpr = 0$ ;  $Fak_{k_l} = 0$ 
PROCEDURE Kopt # процедура расчета оптимального числа кластеров;
FOR  $k_l = 2$  to  $K_l$  # цикл по  $k_l$ 
FOR  $t=1$  to  $T$ 
 $sumPk = 0$ 
FOR  $j=1$  to  $K_l$ 
 $\delta_{ij} = (y_t^j - M_j)^2$  # расчет расстояния до центроида;
 $Pk_{ij} = \frac{w_j^j}{\sqrt{2\pi(D_j)^2}} \exp\left(-\frac{\delta_{ij}}{2(D_j)^2}\right)$  # расчет условной вероятности;
 $sumPk = sumPk + Pk_{ij}$  # сумма вероятностей по кластерам  $j$ ;
END FOR  $j$ 
 $Gk_t = Pk_t / sumPk$  # расчет апостериорной вероятности;
 $\Delta Fak_t = \ln(sumPk)$  # расчет функции правдоподобия;
 $Fak = Fak_{t-1} + \Delta Fak_t$  # сумма по  $t$  в функции правдоподобия;
 $Fak = Fak_t - 3k_l - 1$  # расчет функции для критерия Акаике (сумма по  $t$ );
END FOR  $t$ 
IF  $Fak_{k_l} < Fak_{k_l-1}$  # проверка условия максимума функции для  $(k_l)$ ;
THEN  $K_l = (k_l - 1)$ 
END FOR  $k_l$ 
END PROCEDURE
PROCEDURE EXPECTATION
FOR  $t=1$  to  $T$ 
 $sumP = 0$ 
FOR  $j=1$  to  $K_l$ 
 $\delta_{ij} = (y_t^j - M_j)^2$  # расчет расстояния до центроида;
 $P_{ij} = \frac{w_j^j}{\sqrt{2\pi(D_j)^2}} \exp\left(-\frac{\delta_{ij}}{2(D_j)^2}\right)$  # расчет условной вероятности;
 $sumP = sumP + P_{ij}$  # сумма вероятностей по кластерам  $j$ ;
END FOR  $j$ 
 $G_t = P_t / sumP$  # расчет апостериорной вероятности;
 $\Delta Fpr = \ln(sumP)$ ; # расчет функции правдоподобия;
 $Fpr_t = Fpr_{t-1} + \Delta Fpr$  # сумма по  $t$  функции правдоподобия;
 $M = M + y_t^j G_t^T$ 
 $W = W + G_t^T$ 

```

```

END FOR t
END PROCEDURE
# расчет параметров смеси производим для рассчитанного значения  $K_l$ 
PROCEDURE MAXIMIZATION
FOR j=1 to  $K_l$ 
     $M_j = M_j / W_j$  # результирующий вектор математических ожиданий;
    FOR t=1 to T
         $D_j = D_j + (y_t^l - M_j) G_y (y_t^l - M_j)^T$ 
    END FOR i
     $D_j = D_j / T$  # результирующий вектор дисперсий;
     $W_j = W_j / T$  # результирующий вектор весовых коэффициентов;
END FOR j
END PROCEDURE
END WHILE

```

Представленный алгоритм отражает основные этапы расчета числа компонент для одномерных плотностей распределения. Количество компонент, используемых для представления отдельных распределений, характеризующих отдельные признаки, может оказаться разным. Такой подход, прежде всего, направлен на повышение точности аппроксимации.

Рассчитав число компонент для смеси нормальных распределений для одного параметра запишем

$$B_i(y^1) = \sum_{k_1=1}^{K_1} w_i^{1,k_1} \psi(y^1; \mu_i^{1,k_1}, (\sigma_i^{1,k_1})^2), \quad (18)$$

где $\mu_i^{1,k_1}, (\sigma_i^{1,k_1})^2$ – являются элементами сдвиг/масштабной смеси без смешивающего распределения [58]. Напомним, что число компонент, представляющих отдельные функции распределения плотности вероятности, и характеризующие наблюдаемые параметры могут отличаться. Математическое ожидание представляет собой параметр сдвига компоненты, дисперсия – параметр масштаба компоненты. Для устранения трудоёмкого обращения матриц Σ_i^{-1} , представленных в выражении (16) примем гипотезу, что в каждой компоненте смеси наблюдаемые параметры некоррелированы. В этом случае выражения, представляющие гауссианы упрощаются, оставаясь, тем не менее, универсальными аппроксиматорами плотности. Многомерную функцию распределения выразим в виде произведения одномерных плотностей по наблюдаемым параметрам. В этом случае одномерные распределения, характеризующие отдельные признаки могут быть, как и в выражении (12) эллиптическими, эллипсоиды рассеивания которых вытянуты вдоль осей координат.

Вероятностная смесь таких компонент позволят аппроксимировать сколь угодно сложную функцию. Такой подход в отличие от ядерных оценок Парзена-Розенблатта предпочтительней, поскольку последний на практике имеет слабое место, связанное определением значения параметра гладкости оценок «ширины окна», в то время как при использовании смеси распределений параметр дисперсии не один, а представлен вектором.

Таким образом, введя допущение о независимости наблюдаемых параметров в соответствии с [59] L -мерная плотность распределения системы может быть задана как произведение одномерных плотностей наблюдаемых величин:

$$B_i(y^1, y^2, \dots, y^L) = b_i^1(y^1) \cdot b_i^2(y^2) \cdot \dots \cdot b_i^L(y^L). \quad (19)$$

Вычислим выражение для $B_i(Y^{K,L})$ при наличии L параметров (признаков) и разного числа компонент и упростим его:

$$B_i(Y^{L,K_L}) = \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{k_2=1}^{K_2} \dots \sum_{k_L=1}^{K_L} \left(\prod_{l=1}^L \left(w_i^{l,k_l}; \psi(y^l; \mu_i^{l,k_l}, (\sigma_i^{l,k_l})^2) \right) \right). \quad (20)$$

Произведение $\prod_{l=1}^L \psi(y^l; \mu_i^{l,k_l}, (\sigma_i^{l,k_l})^2)$ в формуле (20) является гауссовской (нормальной) плотностью распределения в L -мерном пространстве, представленной в виде произведения одномерных нормальных распределений.

Обозначим $\Psi_i(y^1, y^2, \dots, y^L; k_1, k_2, \dots, k_L)$ за $\prod_{l=1}^L \psi(y^l; \mu_i^{l,k_l}, (\sigma_i^{l,k_l})^2)$.

Здесь $\Psi_i(y^1, y^2, \dots, y^L; k_1, k_2, \dots, k_L)$ – компонента L -мерной плотности распределения системы наблюдений СММ для i -го скрытого состояния.

Выражение (20) отличается от известных, представленных в [51, 52] разным числом компонентов в наблюдаемых параметрах. Это позволяет более точно аппроксимировать эмпирические распределения, характеризующие наблюдения, избежать вычислительные проблемы, связанные с обратимостью матриц и получить функцию, связывающую скрытые и многомерные наблюдения, представленные смесью нормальных распределений.

Дальнейшее решение задачи оценивания технического состояния сетевых устройств невозможно без определения значений параметров модели превентивной идентификации отказов сетевых устройств.

Порядок переоценки параметров модели (обучение модели) описан алгоритмом, представленным на рис. 14.

Исходными данными алгоритма являются:

- текущая модель $\lambda^L = (A, \{B_1, B_2, \dots, B_N\}, \pi)$;
- наблюдения $Y^L = \{y_1^1, y_2^2, \dots, y_T^L\}$, которые представляют собой параметры устройств $[vc_i; mn_i; avg_i; ins_i]$.

По выделенным сетевым характеристикам с использованием EM -алгоритма рассчитываются коэффициенты:

- $\bar{\mu}_i^{l,k_l}(k_1, k_2, \dots, k_L)$ – вектор средних значений;
- $\bar{d}_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$ – вектор дисперсий;
- $\bar{W}_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$ – весовые коэффициенты.

На основе полученной ФРПВ многомерной смеси с разным числом компонент с использованием алгоритмов прямого и обратного хода, рассчитывают переменные прямого и обратного хода $\alpha_i(j)$, $\beta_i(j)$. Далее осуществляется расчет вспомогательной переменной, $\gamma_t(i)$ для всех t [60].

На следующем шаге производится расчет уточненных параметров модели. Для этого используется вычисленные на предыдущем шаге значения вспомогательных переменных $\alpha_t(j)$, $\beta_t(j)$, $\gamma_t(i)$, $\varepsilon_t(i, j)$, $n_{x_i x_j}$, блок 2 рис. 14.

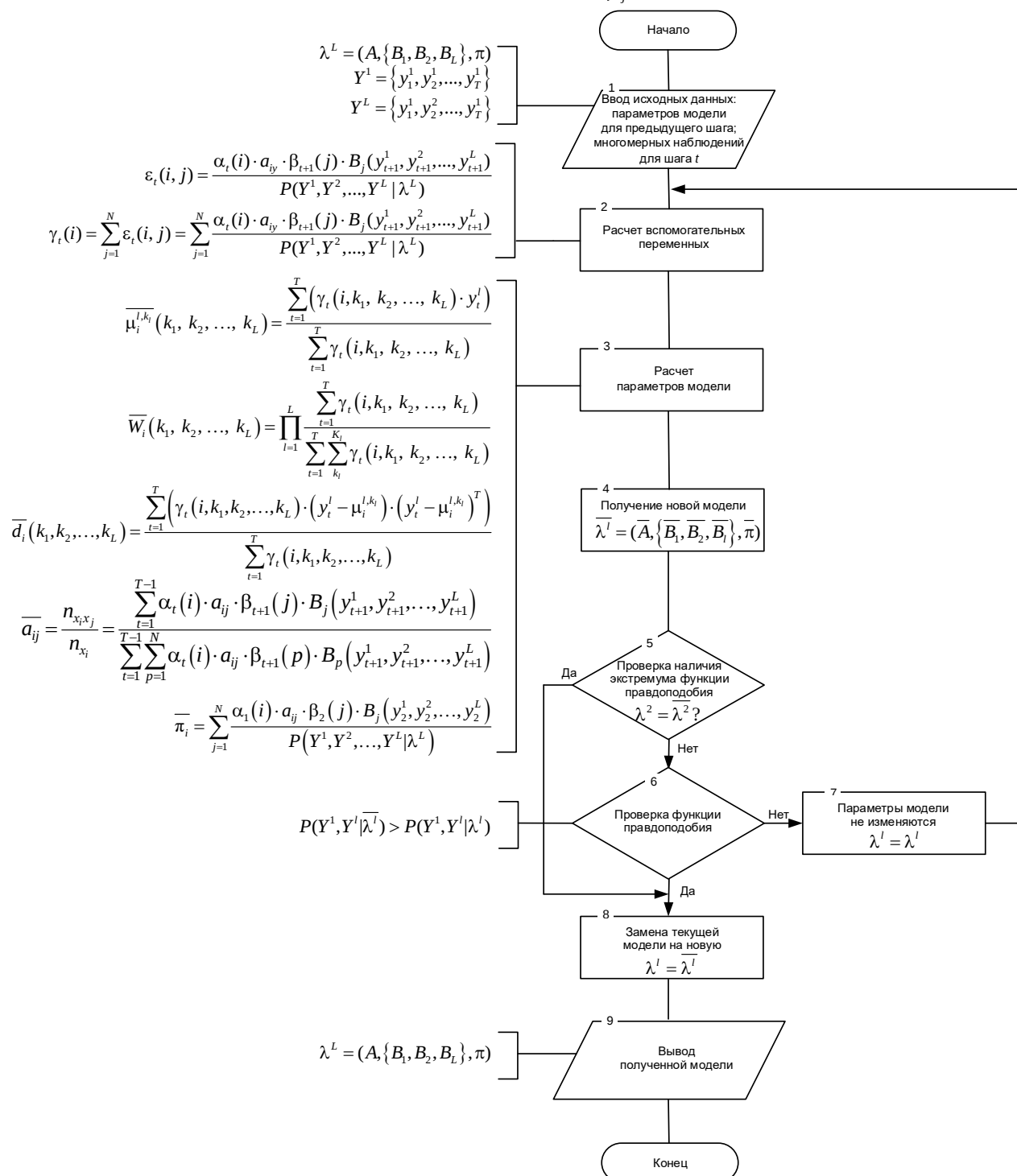


Рис. 14. Алгоритм определения значений параметров скрытой марковской модели с многомерными наблюдениями

Последовательная подстройка параметров модели осуществляется с использованием метода Баума-Уэлча. В точке экстремума функции правдоподобия $\lambda^L = \bar{\lambda}^L$. Если $P(Y^1, Y^L | \bar{\lambda}^L) > P(Y^1, Y^L | \lambda^L)$, то модель с новыми параметрами

$\overline{\lambda}^L$ более правдоподобна, чем λ^L . Поэтому после получения новой модели осуществляется ее сравнение с ранее используемой моделью, чтобы определить, не достигнута ли точка экстремума. Если равенство не выполняется, то происходит переход к следующему блоку.

На этом этапе рассчитывается разность вероятностей появления исходных наблюдений Y^1, Y^L для текущей и уточненной моделей $\left(P(Y^1, Y^L | \overline{\lambda}^L) - P(Y^1, Y^L | \lambda^L)\right)$, которая отражает, насколько новая модель более правдоподобна.

При невыполнении неравенства (блок 6 алгоритма) происходит реализация блока 7, где текущей модели присваивается уточненное значение. Далее осуществляется переход к новой итерации алгоритма (блок 2). Однако теперь в качестве текущей используется модель, уточненная на предыдущей итерации.

Если же в блоке 5 равенство не выполняется или в блоке 6 выполняется неравенство, то происходит переход к блоку 8, в котором текущая модель заменяется уточненной. Затем осуществляется вывод полученной модели λ^L (блок 9). На этом работа алгоритма подстройки параметров модели завершается.

Процесс принятия решения о состоянии сетевого устройства основан на алгоритме Витерби, определяющем последовательность скрытых состояний [60].

Рассмотрим вопросы модернизации существующих на сегодня моделей технической эксплуатации, и начнем с кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска».

8. Модификация кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска», в интересах моделирования проактивного обслуживания устройств и систем телекоммуникаций

Прогнозирование надежности и технического состояния объектов контроля играет важную роль при индивидуальном планировании их эксплуатации. При этом ключевая проблема в случае перевода системы ТОиР к стратегиям эксплуатации по фактическому состоянию (*СВМ*) или проактивному обслуживанию (*РМ*) заключается в том, что прогноз необходимо осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малом объеме результатов контроля, а также при наличии помех и ошибок контроля, статистические свойства которых достоверно не известны. В таких условиях методы математической статистики теряют свою привлекательность, а их применение в интересах прогнозирования (проактивного обслуживания – *РМ*) ведет к ошибкам и низкой достоверности прогноза. Все это требует изменения модели надежности, как математической модели сложносоставного объекта контроля, используемой для прогнозирования или оценки его надежности [14].

«В прогностике, науке, изучающей закономерности процесса прогнозирования, в качестве объекта, относительно наблюдаемых состояний, которого выносятся суждения, выступает не физический объект, а его образ или модель» [32]. Поэтому в данном исследовании в основу модели превентивной иден-

тификации отказов устройств и систем телекоммуникаций положим модель отказов типа «параметр – поле допуска», которая в настоящее время претерпевает модификацию на фоне принимаемых РД серии надежность.

Обзор ГОСТов последних лет дает основание надеяться, что движение в этом направлении началось. Так, если предшествующий ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения» различал только пять видов технического состояния («исправное», «неисправное», «работоспособное», «неработоспособное» и «предельное»), фактически разделяя техническое состояние объектов контроля на «черное и белое», то пришедший ему на смену ГОСТ 27.002-2015 [14] уже вводит в наш обиход такие виды технического состояния как «предотказное» и «опасное», таблица 4.

Таблица 4 – Виды технического состояния, устанавливаемые ГОСТ и РД по надежности

ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения»	ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения»	ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения»	Recommendation ITU-T.M.3703 «Common management services – Alarm management – Protocol neutral requirements and analysis»
Исправное	Исправное	Исправное	«неопределенное» – <i>undefined</i>
Неисправное	Неисправное	Неисправное	«норма» – <i>normal</i>
Работоспособное	Работоспособное	Работоспособное	«незначительное нарушение» – <i>minor</i>
Неработоспособное	Неработоспособное	Неработоспособное	«значительное нарушение» – <i>major</i>
Предельное	Рабочее	Рабочее	«критическое» – <i>critical</i>
	Нерабочее	Нерабочее	«опасное» – <i>fault</i>
	Предотказное	Опасное	
	Опасное	Предельное	
	Предельное		

К примеру, в ПАО «Газпром» еще с 2018 года (решением Совета директоров № 3195 от 25.12.2018 г.) действует стратегия, ориентированная на риски (RBM). Также это касается и других отраслей ответственного назначения и государственных корпораций, типа ГК «Роскосмос», ГК «Росатом» и др. Не взирая на инерционность принятия прогрессивных стратегий управления надежностью на государственном уровне (лишь ГОСТ 27.002-2015 [14], и ГОСТ Р 27.102-2021 [61] ввели такие виды технического состояния как «предотказное» и «опасное») данные корпорации в своих системах производственных стандартов организаций (СТО) еще раньше перешли на риск-ориентированные подходы.

Все это приближает нас к тенденциям, принятым международным научным сообществом (Международным союзом электросвязи – МСЭ) в теории надежности [62] в отношении видов технического состояния таблица 4:

- «неопределенное», *undefined*;
- «норма», *normal*;
- «незначительное нарушение», *minor*;
- «значительное нарушение», *major*;

- «критическое», *critical*;
- «опасное», *fault*.

Появление в российских ГОСТах по надежности последних лет новых видов состояний, несомненно, влечет за собой работу по совершенствованию НМА для перехода к новым стратегиям управления надежностью, в т. ч. в части прогнозного обслуживания. Опишем введение такого вида технического состояния как «предотказное» через термин профилактического допуска.

Полемика о внедрении в практику работы органов технической эксплуатации *профилактических допусков*³ наряду с эксплуатационными допусками ведется давно [4, 7, 16, 23, 63-66]. Однако наряду с эксплуатационными, производственными (технологическими) и ремонтными допусками, профилактические допуски пока еще не берутся во внимание основными общероссийскими ГОСТ (серии Р 27) по надежности. Несмотря на то, что в этапах эволюции систем контроля повсеместная автоматизация уже сменилась интеграцией и унификацией (таблица 3), на сегодня основная часть операций контроля технического состояния до сих пор осуществляются обслуживающим персоналом непосредственно на объектах контроля. Преимущественное использование ручных видов контроля технического состояния при планово-предупредительной стратегии технического обслуживания (регламентированное – РТО, годовое – ТО-2, ежемесячное – ТО-1, ежедневное – ЕТО), особенно на ТС старого парка, в ущерб автоматизированному функциональному контролю, оказывает негативное влияние на оперативное (своевременное) обнаружение и локализацию отказов, больше всего касается постепенных параметрических отказов, как сложно выявляемых.

В данном случае требуется наличие автоматизированной системы функционального контроля, осуществляющей сбор ИИ об объекте контроля в режиме реального времени (близкого к нему, режиме мягкого реального времени). А для повышения достоверности контроля и точности измерений необходимо введение в передовые практики обеспечения надежности профилактических допусков для повышения эффективности автоматизированного выявления и предупреждения параметрических отказов объекта контроля. При этом реализация индивидуальной стратегии эксплуатации технических систем и устройств требует непрерывного или дискретного контроля и анализа состояния объекта, что достигается путем перехода от периодического контроля и процедурам постоянного наблюдения за ОК в виде *мониторинга технического состояния*⁴. Предполагается, что данная процедура позволит иметь актуальную информацию о его

³ *Профилактический допуск* на параметры представляет собой предельное значение параметра, при котором изделие считается еще работоспособным (не отказавшим), но подлежащим замене (регулировке) с целью предупреждения отказа. Он позволяет более точно проводить оценку технического состояния объекта контроля и делать вывод о вероятности наступления постепенного отказа.

⁴ *Мониторинг технического состояния* – составная часть технического обслуживания, представляющая собой наблюдение за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг может проводиться непрерывно или через запланированные интервалы времени. (ГОСТ Р 27.102-2021).

реальном техническом состоянии, получаемую по результатам измерения параметров ОК, а долгосрочный и краткосрочный прогноз изменения вида состояния позволит эксплуатировать техническое устройство до появления признаков опасного снижения его надежности, не допуская преждевременного демонтажа узлов и агрегатов, а также выполнения иных сложных работ, имеющих зачастую сомнительную полезность для надежности функционирования [4].

Говоря об изменении модели надежности ОК при переходе к передовым стратегиям технической эксплуатации, проведем модификацию кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска» (рассмотренную ранее в п. 6) в интересах моделирования проактивного обслуживания устройств и систем телекоммуникаций с учетом изменений в ГОСТ 27.002-2015, ГОСТ Р 27.102-2021 [14, 61]. В данном случае введение вида состояния «предотказное» (состояние объекта контроля, характеризуемое повышенным риском его отказа) вносит в нее существенное изменение.

Модифицированную кумулятивную модель отказа, типа «параметр – поле допуска», в интересах моделирования проактивного обслуживания устройств и систем телекоммуникаций можно представить геометрически, как показано в общем виде на рис. 15.

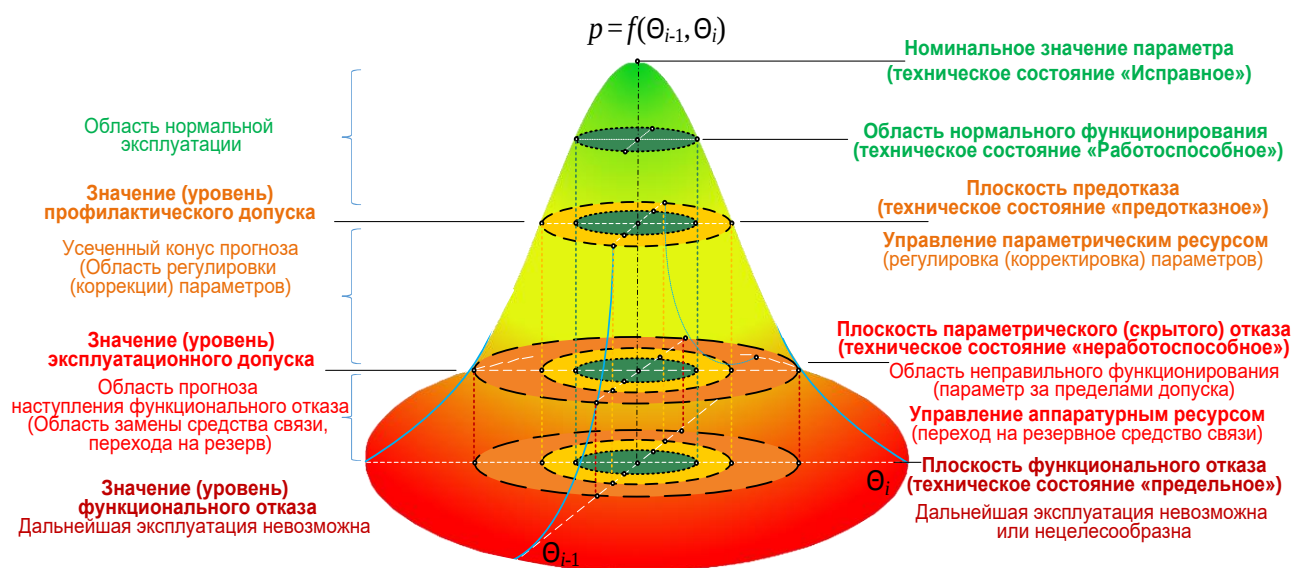


Рис. 15. Геометрическая интерпретация модифицированной кумулятивной модели отказа, типа «параметр – поле допуска»

Такое геометрическое представление рассматриваемой кумулятивной модели, см. рис. 15 и рис. 16 а) и г), несколько идеализировано, поскольку, как упоминалось выше и указано в [66], во-первых, выбор параметров и расчет его эксплуатационных допусков строго индивидуален в процессе моделирования (стратегии эксплуатации нового типа *CBM*, *PM*, *RCM*, *RBM* имеют индивидуальный и превентивный характер, упреждающий отказы), а, во-вторых, в сечении плоскости допустимого значения $p_{\text{доп}}$ (рис. 7) комплексного показателя качества с областью (телом) неопределенности $p = f(\Theta_{i-1}, \Theta_i)$, строго говоря, в виде эллипса ка-

чества не всегда будет наблюдаться правильный эллипс (для двухпараметрического пространства), как показано на рис. 16 б) и д), в том числе и в силу несимметричности допусков «+Δ» и «−Δ» на параметры, или из-за развития внезапных отказов в отношении одного или более коррелированных параметров, рис. 17, требующих приоритетности по времени обслуживания для недопущения аварии.

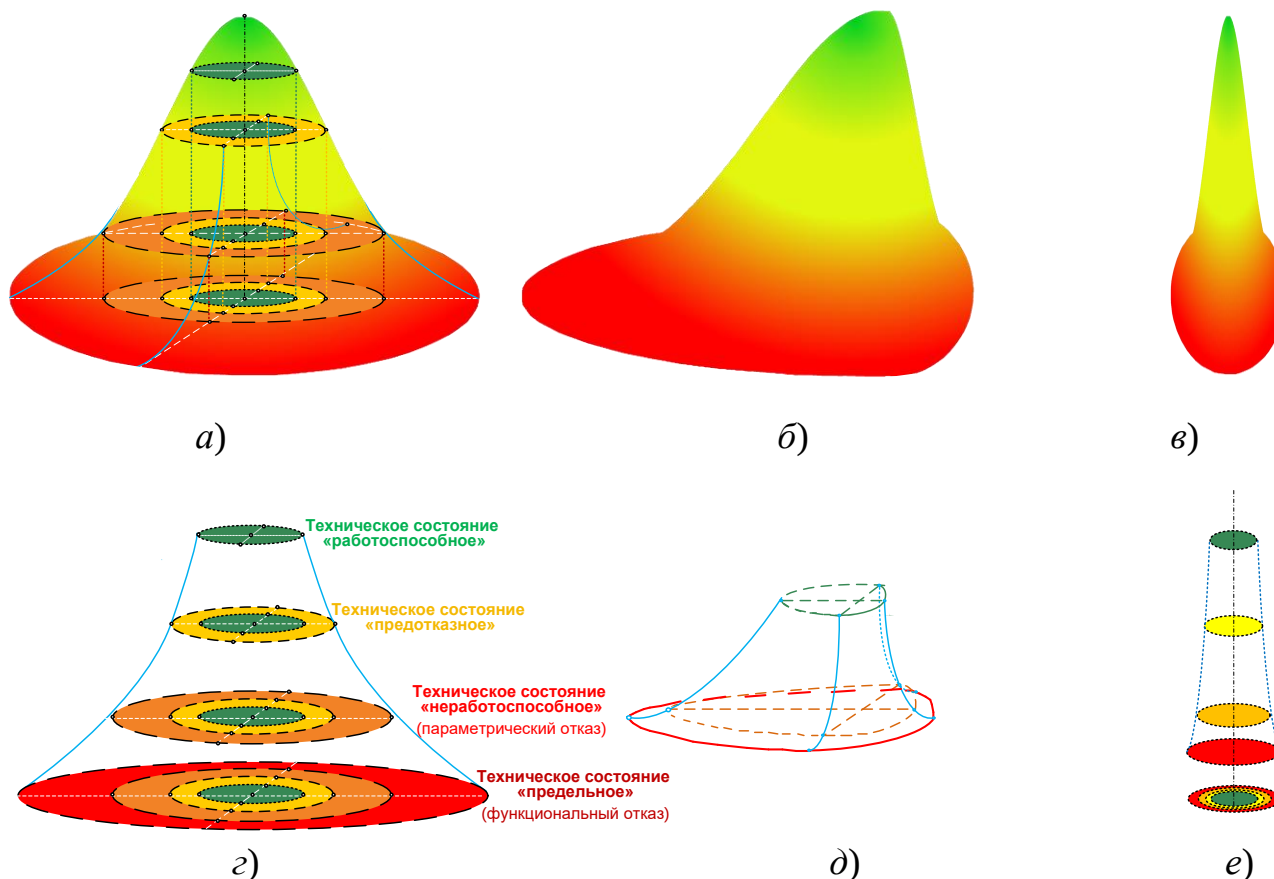


Рис. 16. Геометрическая интерпретация сечений уровней технических состояний объекта контроля «работоспособное», «предотказное», «неработоспособное», «предельное» с телом неопределенности $p = f(\Theta_{i-1}, \Theta_i)$: а), б), в), г), д) при постепенном развитии отказа; е), е) при лавинообразном развитии отказа

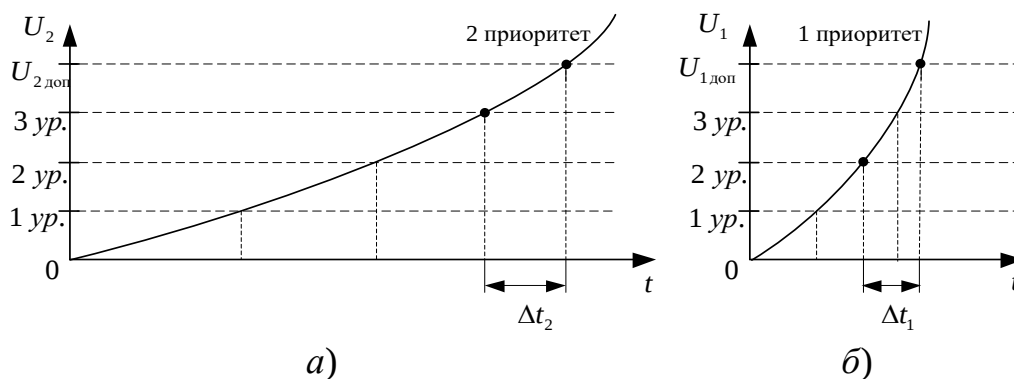


Рис. 17. Влияние скорости изменения значения параметра на приоритетность риска наступления отказа:
а) для постепенного отказа; б) для внезапного отказа

9. Расчет в общем виде профилактических допусков на параметры радиосредств, функционирующих в системе, в интересах кумулятивной модели отказа

Поскольку математический аппарат расчета эксплуатационных допусков на сегодняшний день существует и достаточно хорошо апробирован [4, 7, 16, 23, 63-66] и др., то в данном случае нас в большей степени интересует порядок назначения профилактических допусков, что крайне важно для внедрения технологий искусственного интеллекта в передовые стратегии управления надежностью на основе прогнозирования вида технического состояния, индивидуального и превентивного характера упреждения отказов.

При обосновании термина профилактического (корректирующего) допуска в [7] для упрощения синтеза автоматизированной системы контроля предложено установить унификационный ряд допусков, подбираемых таким образом, что каждый меньший допуск является упреждающим для большего:

- «норма» по отношению к «предотказу»;
- «предотказ» по отношению к «параметрическому отказу»;
- «параметрический отказ» по отношению к «функциональному отказу».

Именно таким унифицированным рядом можно рассматривать вложенные друг в друга эллипсы, рис. 15 и 16, на плоскости координатных осей (осей параметров).

Рассмотрим данную геометрическую интерпретацию более подробно, с учетом наличия для каждого из рассматриваемых допусков ошибок контроля (идентификации) первого и второго рода, рис. 18.

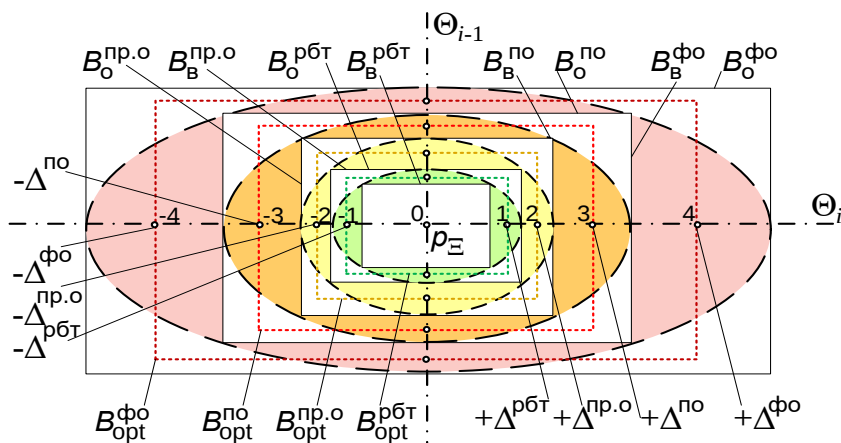


Рис. 18. Геометрическая интерпретация назначения допусков для кумулятивной модели отказа

Для двухпараметрического пространства параметров ($m = 2$) моделирование допусков на параметры можно осуществить с использованием ошибок контроля первого рода α («ложная тревога») через описанные вокруг эллипсов качества прямоугольники, характеризующие вид технического состояния объекта контроля «работоспособное» – $B_o^{рбт}$, «предотказное» – $B_o^{пр.о}$, «параметрический отказ» – $B_o^{по}$ и «функциональный отказ» – $B_o^{фо}$, а также ошибок контроля второго

рода β («необнаруженный отказ») через вписанные в эллипсы качества прямоугольники, характеризующие, соответственно, эти состояния и отказы $B_B^{p\beta\gamma}$, $B_B^{pr.o}$, B_B^{no} , B_B^{fo} , рис. 18.

Для трехпараметрического ($m = 3$) пространства параметров вместо прямоугольников используются параллелепипеды, вписанные в эллипсоиды качества и описанные вокруг них.

Для m -мерного пространства параметров будут использоваться, m -мерные гиперпараллелепипеды, вписанные в гиперэллипсоиды и описанные вокруг них.

Оптимальные же значения расчетных величин допусков (в том числе и для вводимого профилактического допуска) можно рассчитать обеспечивая требуемое соотношение ошибок первого и второго рода α/β и позволяя аппроксимировать область $\Delta\Theta$ прямоугольником при $m = 2$ и параллелепипедом при $m = 3$, так, чтобы он занимал промежуточное положение между вписанным B_B и описанным B_o прямоугольником (параллелепипедом).

На рис. 18 эти прямоугольники показаны пунктирным контуром. Данная фигура будет определять такие допуски, которые оптимизируют затраты на систему контроля при выполнении заданных требований к показателю качества функционирования системы.

Предложение в отношении назначения (расчета) эксплуатационных допусков на параметры технических средств не противоречит исследованиям [7], где показано, что упреждающий допуск обычно составляет 60-80 % от основного. Кроме того, необходимо отметить, что существующие в настоящее время методики расчета радиолиний также не учитывают аппаратные искажения сигнала и реальное техническое состояние радиосредств (принимая аппаратуру абсолютно надежной), или, в лучшем случае, предусматривают компенсацию аппаратных искажений выбором в отношении ДКС системного или т. н. «эксплуатационного запаса» [24], составляющего несколько дБ, не обосновывая их величину. Однако в современных условиях ограничения аппаратных ресурсов и снижения уровня технического состояния радиосредств возникает необходимость в учете подобных искажений как существенного фактора, влияющего на вероятность ошибочного приема элемента сигнала $p_{ош}$ в радиолинии. Названные в [7, 24] допущения и утверждения в последующем позволяют создавать достаточно простые АСК, обладающие большой универсальностью и пригодные для контроля целого класса систем без существенной потери достоверности контроля.

Особенностью показателя достоверности контроля является критичность к вероятности ошибок второго рода β «необнаруженный отказ» и, соответственно, к риску потребителя. Это вполне оправдано тем, что ошибки контроля технического состояния типа «необнаруженный отказ» наиболее опасны. В связи с чем, в [16, 40, 67] задача назначения эксплуатационных допусков на параметры радиоэлектронного средства (РЭС) решается для двух граничных случаев:

- при нулевой ошибке первого рода α (вероятность «ложного отказа»);
- при нулевой ошибке второго рода β (вероятность «пропуска отказа»).

Рассмотрим эти два варианта минимизация ошибок контроля при расчете профилактических допусков.

9.1. Решение задачи при нулевой ошибке первого рода

Предположим функциональную зависимость показателя качества функционирования радиолинии (ДКС) $p_{\text{ош}} = f(\Theta, \Xi)$ по крайней мере, дважды дифференцируемой по одному из параметров $\theta_j \in \Theta$, $j = \overline{1, m}$, а также непрерывной [68]. Данное предположение основано на результатах исследования [69], где область работоспособности (поле допусков) радиосредств $(\lg p_{\text{доп}} - \lg p_{\Xi})$ не выше значения $0.1 \lg p_{\Xi}$, при этом зависимости $\{p_{\text{ош}}(\Theta_j)\}$, $j = \overline{1, m}$ описываются кривыми второго порядка в пределах данной области. Тогда применив разложение Тейлора для данной зависимости и ограничив получаемый ряд членами, соответствующими производным второго порядка, имеем:

$$p_{\text{ош}}(\Theta, \Xi) = p_{\Xi} + \sum_{j=1}^m \frac{\partial p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j} \theta_j + 0,5 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j \partial \theta_i} \theta_j \theta_i \quad (21)$$

Рассмотрим вариант определения допусков на параметры радиосредства используя простейшую геометрическую интерпретацию в виде «эллипса качества», рис. 8, для двухпараметрического пространства ($m = 2$) [30], получаемого в результате сечения плоскости допустимого значения вероятности ошибки $p_{\text{доп}}$ и функциональной зависимости $p_{\text{ош}}(\Theta, \Xi)$ принимающей вид поверхности в трехмерном пространстве (рис. 7) с глобальным минимумом $p_{\text{ош}} = p_{\Xi}$ в точке, где $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$. Тогда данный «эллипс качества» математически можно представить уравнением, полученным на основе (21), путем приравнивания $p_{\text{ош}} = p_{\text{доп}}$:

$$p_{\Xi} - p_{\text{доп}} + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j} \theta_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \frac{\partial^2 p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j \partial \theta_i} \theta_j \theta_i = 0, \quad j, i = \overline{1, 2}. \quad (22)$$

Продифференцируем выражение (22) частным образом по θ_i , $i = \overline{1, 2}$, $i \neq j$, с целью определения значения одной из полуосей эллипса a_j . После чего приравняем производную к нулю и найдем параметр θ_i . После подстановки данного параметра в выражение (22) имеем квадратное уравнение относительно полуоси a_j [39]:

$$\gamma_{ji} a_i^2 + \gamma_{jj} a_j + \gamma_{j0} = 0, \quad (23)$$

решая которое имеем

$$a_j^{(1,2)} = \frac{-\gamma_{jj} \pm \sqrt{\gamma_{jj}^2 - 4\gamma_{ji}\gamma_{j0}}}{2\gamma_{ji}}, \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_{ji} &= C_{jj} - \frac{C_{ji}^2}{C_{ii}}; & \gamma_{jj} &= B_j - B_i \frac{C_{ji}}{C_{ii}}; & \gamma_{j0} &= p_{\Xi} - p_{\text{доп}} - \frac{B_i^2}{4C_{ii}}; \\ B_j &= \frac{\partial p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j}; & B_i &= \frac{\partial p_{\text{ош}}}{\partial \theta_i}; & & \\ C_{jj} &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j^2}; & C_{ii} &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_{\text{ош}}}{\partial \theta_i^2}; & C_{ji} &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j \partial \theta_i}. \end{aligned} \quad (25)$$

При рассмотрении многопараметрического пространства параметров контролируемого радиосредства (в общем случае, m -параметрического) для определения допусков на произвольное, но конечное их число m , из условия обеспечения заданного значения $p_{\text{ош}} = p_{\text{доп}}$ показателя качества функционирования ДКС, а также при справедливости допущения о непрерывности и дважды дифференцируемости зависимости $p_{\text{ош}} = f(\Theta, \Xi)$ по любому параметру $\Theta_j \in \Theta$, $j = \overline{1, m}$, формула (22) примет вид неявной формы уравнения гиперэллипсоида

$$p_{\Xi} - p_{\text{доп}} + \sum_{j=1}^m \frac{\partial p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j} \theta_j + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 p_{\text{ош}}}{\partial \theta_j \partial \theta_i} \theta_j \theta_i = 0, \quad j, i = \overline{1, m} \quad (26)$$

m -размерностью в пространстве параметров. Данный гиперэллипсоид в теории надежности [16, 17, 35, 38-40, 47, 48, 70, 71] называют «гиперэллипсоидом качества», рис. 9, поскольку попадание метрик параметров внутрь фигуры обеспечивает заданное качество работы системы, в нашем случае – ДКС. Значение j -й стороны гиперэллипсоида определяется по выражению [39]:

$$a_j^{(1,2)} = \frac{-\gamma_{j1} \pm \sqrt{\gamma_{j1}^2 - 4\gamma_{j2}\gamma_{j0}}}{2\gamma_{j2}}, \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_{j0} &= p_{\Xi} - p_{\text{доп}} - 0,25 E_j^T M_{jj}^{-1} E_j; \\ \gamma_{j1} &= B_j - 0,5 E_j^T M_{jj}^{-1} L_{ji}; \\ \gamma_{j2} &= C_{jj} - L_j^T M_{jj}^{-1} L_{ji}; \\ B_j &= \partial p_{\text{ош}} / \partial \theta_j; \\ C_{jj} &= 1/2 \partial^2 p_{\text{ош}} / \partial \theta_j^2; \\ M_{jj}^{-1} &\text{ – матрица обратная } M_{jj}; \\ M_{jj} &= \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1(j-1)} & C_{1(j+1)} & \dots & C_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(j-1)1} & \dots & C_{(j-1)(j-1)} & C_{(j-1)(j+1)} & \dots & C_{(j-1)m} \\ C_{(j+1)1} & \dots & C_{(j+1)(j-1)} & C_{(j+1)(j+1)} & \dots & C_{(j+1)m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1} & \dots & C_{m(j-1)} & C_{m(j+1)} & \dots & C_{mm} \end{bmatrix}; \\ E_j &= [B_1, \dots, B_{(j-1)}, B_{(j+1)}, \dots, B_m] \text{ – вектор без } j\text{-й компоненты}; \\ L_j &= \begin{bmatrix} C_{j1} \\ \dots \\ C_{j(j-1)} \\ C_{j(j+1)} \\ \dots \\ C_{jm} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (28)$$

(29)

При этом исследования, проводимые методами имитационного моделирования [72, 73] показали, что для многопараметрического пространства «эллипсоид качества», рис. 9, стремится деформироваться в точку, рис. 19, в связи с

чем, оценку методической погрешности определения поля допусков на параметры радиосредств по КПК удобнее производить для двух- и трех-параметрической зависимости из-за ее наглядности, $m = 2, 3$. Для более m числа параметров пространства эту зависимость можно получить лишь аналитически.

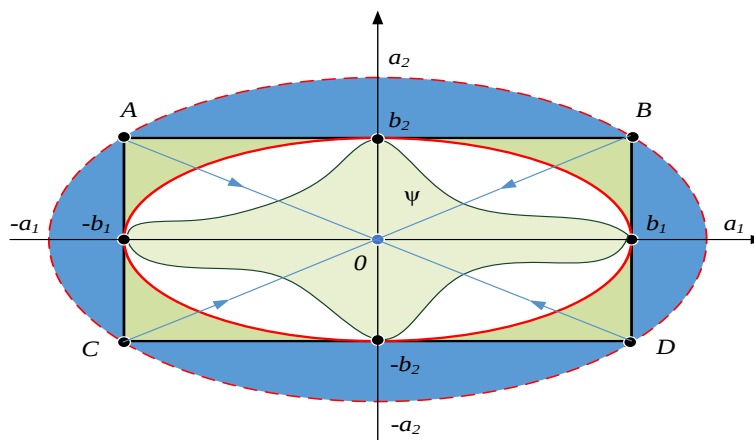


Рис. 19. К определению порогового значения КПК радиосредств через ошибки контроля

В работе [40] приведен вариант расчета эксплуатационных допусков [14, 74] на параметры аппаратуры связи с учетом свойств ДКС и требований на показатель достоверности системы передачи сообщений. Из методики [40] следует, что для минимизации ошибочного принятия решения о неработоспособном техническом состоянии ТС необходимо в «эллипс качества», образованный сечением плоскости $p_{\text{ош}} = p_{\text{доп}}$ функции $p_{\text{ош}} = f(\Theta, \Xi)$, рис. 8, как было указано выше, вписать прямоугольник максимальной площади, который можно назвать параметрическим, поскольку его стороны равны допускам на параметры, а взаимная перпендикулярность его сторон говорит об их независимости. Это условие означает необходимость правильного установления значений поля допусков на параметры ТС для минимизации методической погрешности ошибок контроля α и β по комплексному показателю качества ОК.

Реальный вид фигуры ψ на рис. 19 может быть различным, а ее физический смысл состоит в том, что она отображает область значений контролируемых параметров. При этом форма данной фигуры указывает на малую вероятность события их одновременного отклонения за границы установленных допусков (наступление параметрического отказа). Выход одного из контролируемых параметров за пределы допусков более вероятен. В этом случае крайние области параметрического прямоугольника будут сглажены (как бы «втянуты») в «эллипс качества», см. фигуру ψ на рис. 19. В таком случае достоверность контроля по КПК будет стремиться к максимуму, $D \rightarrow 1$, независимо от числа параметров, подлежащих контролю.

Выражения (24), (25) и (27) – (29) определяют уравнения описанного вокруг эллипса (при $m = 2$) прямоугольника на плоскости параметров и описанного вокруг эллипсоида качества параллелепипеда в многопараметрическом про-

странстве, соответственно. При этом величины $\{a_j\}$, $j = \overline{1, m}$, могут быть рассмотрены в качестве эксплуатационных допусков на параметры $\{\theta_j\}$, $j = \overline{1, m}$, для случая обеспечения минимальной ошибки первого рода (вероятность ложного отказа) [16, 40].

Однако в таком случае сохраняется высокая вероятность ошибочного принятия решения о работоспособности ТС при ее неработоспособном состоянии (вероятность «пропуска отказа» β). Её геометрическая интерпретация определяется областью значений параметров между «эллипсоидом качества» и описанным вокруг него гиперпараллелепипедом для $m = 3$ или заштрихованной областью между «эллипсом качества» и описанным вокруг него прямоугольником для двухпараметрического объекта, $m = 2$, рис. 8, 9.

Аналитически ошибку второго рода можно определить как в [16, 40]:

$$\beta = \int_{\Theta \in \Delta a} W(\Theta | p_{\text{ош}} > p_{\text{доп}}) d\Theta, \quad (30)$$

где Δa – ограниченная описанным параллелепипедом область значений параметров; $W(\Theta | p_{\text{ош}} > p_{\text{доп}})$ – условная плотность распределения параметров Θ ТС при заданных значениях показателя $p_{\text{ош}}$.

Для некоррелированности и при нормальном распределении параметров ТС имеем:

$$W(\theta_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left[-\frac{(\theta_j - \theta_{jн})^2}{2\sigma_j^2}\right], \quad (31)$$

а для показателя качества ДКС, соответственно, можно записать

$$W(p_{\text{ош}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left[-\frac{(\theta_j - \theta_{jн})^2}{2\sigma_j^2}\right] & \text{при } p_{\Xi} \leq p_{\text{ош}} \leq p_0; \\ 0 & \text{при } p_{\text{ош}} < p_{\Xi}, p_{\text{ош}} > p_0, \end{cases} \quad (32)$$

где σ_j и σ_p – среднеквадратические отклонения j -го параметра θ_j и показателя $p_{\text{ош}}$, соответственно; $\theta_{jн}$ – номинальное значение j -го параметра θ_j ; p_0 – значение показателя качества при максимальном искажении выходного сигнала ТС.

Тогда при условии

$$\int_{p_{\Xi}}^{p_0} W(p_{\text{ош}}) dp_{\text{ош}} = 1, \quad (33)$$

выражение для расчета вероятности необнаруженного отказа β будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \beta &= \int_{p_{\text{ош}}}^{p_0} W(p_{\text{ош}}) \left[\prod_{j=1}^m \int_{a_j^{(1)}}^{a_j^{(2)}} W(\theta_j) d\theta_j \right] dp_{\text{ош}} = \\ &= \frac{\left[\Phi\left(\frac{(p_0 - p_{\Xi})}{\sigma_p}\right) - \Phi\left(\frac{(p_{\text{доп}} - p_{\Xi})}{\sigma_p}\right) \right] \prod_{j=1}^m \left[2\Phi\left(\frac{\Delta\theta_j^{(a)}}{\sigma_j}\right) - 1 \right]}{\Phi\left(\frac{(p_0 - p_{\Xi})}{\sigma_p}\right) - 0,5}, \end{aligned} \quad (34)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности: $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$, $\Delta \theta_j^{(a)} = a_j^{(2)} - a_j^{(1)}$ –

поле допуска параметра θ_j , полученное из выражений (27), (28) [69].

Выражение (34) устанавливает зависимость вероятности ошибки контроля второго рода β , как одного из показателей достоверности контроля, от относительной величины допуска на каждый из параметров ТС ($\theta_j^{(a)}/\sigma_j$) и от ряда значений показателя качества ДКС (вероятности ошибочного приема сообщений в канале $p_{\text{ош}}$): например, допустимого значения $p_{\text{ош}} = p_{\text{доп}}$; значения показателя p_{Ξ} при номинальных значениях параметров ТС $\Theta_{\text{ном}}$; значения показателя p_0 при наиболее нежелательных отклонениях параметров ТС. При этом значения показателя p_{Ξ} и p_0 определяются, прежде всего, состоянием среды РРВ и помеховой ситуацией в ДКС.

9.2. Решение задачи при нулевой ошибке второго рода

Для эксплуатанта и системы контроля (подсистемы мониторинга) АСРС, как ИТКС ответственного назначения, а также ее элементов в виде, АРЦ, РПДУ, РПУ и пр. гораздо важнее не иметь высоким значение ошибки контроля второго рода, чем ошибки первого рода, поэтому рассмотрим вариант решения задачи сведения вероятности необнаруженного отказа β в ТС к нулю, для чего строится не описанный параллелепипед (при $m = 3$) в эллипсоид качества, а вложенный в него, рис. 8. При этом ошибки контроля $\beta = 0$, а $\alpha \rightarrow \max$ [39]. Из данных рассуждений следует, что можно поставить задачу построения такого гиперпараллелепипеда (для $m > 3$) для многопараметрического пространства параметров, который обеспечивает минимальную вероятность ложного отказа α .

Для построения вложенного параллелепипеда $B_{\text{в}}$ целевыми функциями могут выступать объем $V(B)$ выражение (8) или периметр $P(B)$ параллелепипеда, выражение (9), а также стоимость проектирования и эксплуатации системы мониторинга при определенных допусках на параметры и др. [38]. При этом нет необходимости при расчете допусков каждую целевую функцию рассматривать в отдельности. Ограничимся зависимостью объема вписанного параллелепипеда от параметров ТС и обозначим данную целевую функцию $V(\Theta)$. Задача построения вложенного параллелепипеда потребует большой вычислительный ресурс, поскольку помимо решения задачи достижения экстремума целевой функции важно еще и выполнить условие принадлежности всех вершин 2^n искомого гиперпараллелепипеда к области $\Delta\Theta$, что аналитически возможно получить только для определенных фигур. Поэтому формализуем постановку данной задачи при допущении, что область $\Delta\Theta$ аппроксимируется эллипсоидом, симметрично ориентированным в пространстве параметров, получив:

$$\{b_j\} = \arg \max_{\{b_j\} \in \Delta\Theta} V(\Theta) \text{ при } \beta = 0, j = \overline{1, m}. \quad (35)$$

Тогда в соответствие с утверждением из [16, 69] о назначении симметричных допусков $\Theta_{\text{доп}}^{(b)} = \{b_j\}_{j=1, \overline{m}}$ на параметры ТС, их значения $\{\theta_j\}$ для ОК с $m > 3$ при $\beta = 0$ и $\alpha \rightarrow \min$ рассчитывают по допускам $\Theta_{\text{доп}}^{(a)} = \{a_j\}_{j=1, \overline{m}}$, определяемых для случая $\alpha = 0$ и $\beta \rightarrow \min$, через соотношение [16, 69]:

$$\Theta_{\text{доп}}^{(b)} = \left\{ b_j = \frac{a_j}{\sqrt{m}} \right\}_{j=1, \overline{m}}.$$

Следовательно, значения сторон вложенного в «эллипсоид качества» параллелепипеда будут равны:

$$b_1 = \frac{a_1}{\sqrt{m}}, \quad b_2 = \frac{a_2}{\sqrt{m}}, \quad \dots, \quad b_m = \frac{a_m}{\sqrt{m}}, \quad (36)$$

что соответствует допускам на параметры ТС при обеспечении нулевой ошибки второго рода $\beta = 0$ и минимально возможной ошибки первого рода $\alpha \rightarrow \min$, определяемой выражением:

$$\alpha = \int_{\Theta \in \Delta b} W(\Theta | p_{\text{ош}} \leq p_{\text{доп}}) d\Theta. \quad (37)$$

При некоррелированности и нормальном распределении параметров ТС $\{\theta_j\}_{j=1, \overline{m}}$ КПК ДКС $p_{\text{ош}}$, т. е. при выполнении условий (31) и (32), значение вероятности ложного отказа имеет вид:

$$\begin{aligned} \alpha &= \int_{p_{\Xi}}^{p_{\text{доп}}} W(p_{\text{ош}}) \left[1 - \prod_{j=1}^m \int_{b_j^{(1)}}^{b_j^{(2)}} W(\theta_j) d\theta_j \right] dp_{\text{ош}} = \\ &= \frac{\Phi\left(\frac{(p_{\text{доп}} - p_{\Xi})}{\sigma_p}\right) \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m \left[2\Phi\left(\frac{\Delta\theta_j^{(b)}}{\sigma_j}\right) - 1 \right] \right\}}{\Phi\left(\frac{(p_0 - p_{\Xi})}{\sigma_p}\right) - 0,5}, \end{aligned} \quad (38)$$

где $\Delta\theta_j^{(b)} = b_j^{(2)} - b_j^{(1)}$ - поле допусков параметра θ_j , определяемое из условия (35) [69].

10. Модифицированный граф состояний

При эксплуатации технически сложного объекта (к которым можно отнести АСРС), обычно пользуются многоуровневым подходом к оценке его работоспособности. Это связано с тем, что создаваемые на основе многоуровневого принципа построения Сло характеризуются огромным числом параметров составных элементов [75, 76], функционирование которых контролируется (наблюдается) с разных контуров управления несколькими серверами мониторинга. В связи с чем, саму процедуру мониторинга состояния объекта контроля логичнее осуществлять поэтапно [16, 40, 43, 77-80]. Причем на первом этапе осуществля-

ется проверка системы на функционирование по заданному КПК, и, в случае выявления аномальной ситуации (предотказного состояния), на втором этапе, производится более детальная проверка с использованием полученной от сервера мониторинга локального уровня и подсистемы мониторинга регионального уровня измерительной информации. Данная ИИ поступает на СЦ глобального уровня или АСУС контура организации контроля и управления. Исходя из результатов, полученных в ходе такого анализа ИИ, принимается окончательное решение о фактическом состоянии объекта контроля. В результате за счет внедрения поэтапной процедуры контроля объемы циркулирующей в системе ИИ значительно сокращаются. Также данная процедура ведёт и к сокращению времени цикла мониторинга [81].

С учетом изложенного, для формирования модели процедуры превентивной идентификации отказа элементов АСРС исходим из того, что модель подсистемы мониторинга должна иметь возможность осуществления гибкого перераспределения функций мониторинга между главным АРЦ АСРС (главной станцией сети) и региональной подсистемой мониторинга (ПУ АРЦ), либо на локальном уровне сети – сервере мониторинга АПРЦ (АПдРЦ), учитывающим с использованием агентно-ориентированного подхода реальное состояние структурно-функциональных элементов АСРС на текущем интервале времени [82]. В этом случае, сначала, на первом этапе мониторинга, выявляется нарушение режима функционирования АСРС по доступной на локальном уровне ИИ, а в последующем, на втором – осуществляется распознавание типа нарушения с конкретизацией отказавших сетевых элементов. В такой постановке известную графовую вероятностную модель идентификации отказа [15, 16, 43, 83] можно модифицировать с выделением третьего этапа – прогнозирования вида технического состояния (превентивной идентификации отказа) технического устройства или ИТКС в целом, рис. 20.

Графо-аналитические подходы и модели достаточно широко применяются в теории вероятностей и в Байесовской статистике, а в последние годы и в машинном обучении. На графо-вероятностной модели рис. 20 в виде графа приведены зависимости между случайными вероятностными величинами, которые характеризуют состояние элементов сети. Причем вершинам графа соответствуют виды технического состояния элементов АСРС (АРЦ) как случайным переменным. Ребра же графа представляют взаимосвязь этих случайных вероятностных величин. На рисунке показаны: $P_1 = 1 - P_2$ – априорные вероятности отсутствия аномальной ситуации и P_2 – её наличие.

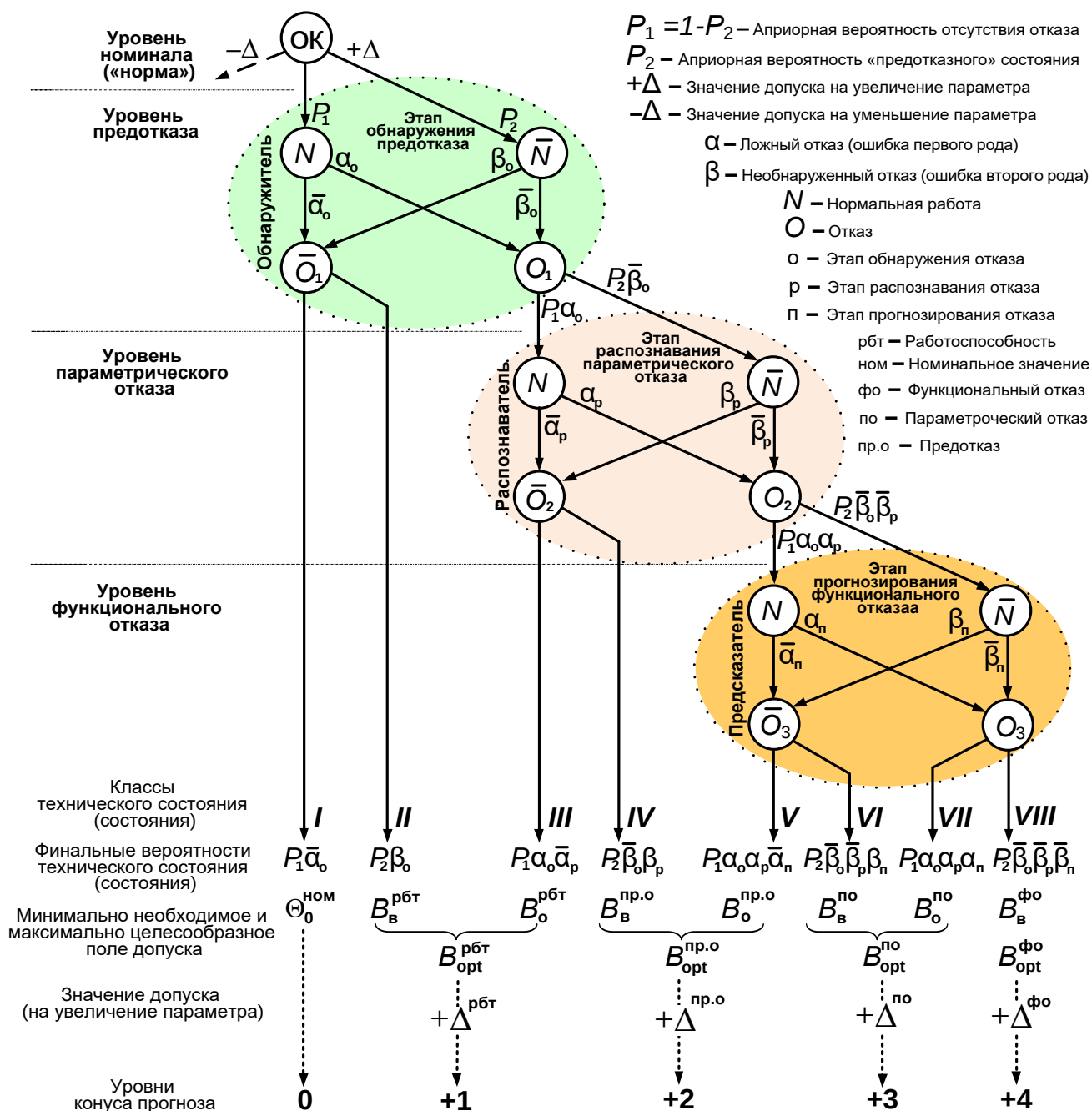


Рис. 20. Модифицированная графово-вероятностная модель идентификации отказа сетевого элемента

11. Использование критерия Байеса для классификации функционального состояния объектов контроля

В ходе применения многоуровневого подхода [43] в моделировании с использованием технологий искусственного интеллекта, рассмотрим ИТКС как мультиагентную систему [82], в которой идентификация отказа (техническое состояние «неработоспособное» или «предотказное») сетевого элемента осуществляется путем рассылки интеллектуальных агентов (ИА) с присвоением им номера соответствующего сервера мониторинга того или иного логического уровня наблюдаемой системы (АСРС), осуществляющих управление функциональным

состоянием технических устройств, переводя их в техническое состояние «работоспособное» (на графо-вероятностной модели рис. 20 N – «Норма») путём осуществления регулировок, изменения режимов работы, или переключением на резерв (переконфигурации сети и перемаршрутизации в доставке сообщений) с последующим запуском для аварийного объекта контроля процедуры технического обслуживания (ТО) или текущего ремонта. Также ИА используются и в случае обратного перехода с резерва на основное техническое устройство при его восстановлении. При этом аварийной ситуацией признается такое состояние сетевого элемента или всей сети в целом, когда сервером мониторинга наблюдается выход метрик параметров за поле допусков (параметрический отказ) или установленного порогового значения параметров $z^{\text{пор}}(k, n, m)$, а случай предаварийной ситуации (техническое состояние «предотказное») характеризуется существенным приближением метрик к данному порогу. В данном случае можно говорить о приближении (или нарушении метрикой значения допуска на параметр) к значению профилактического допуска [7, 23-25, 38, 40] и др.

Из теории статистических решений и применяемого в нем научно-методического аппарата, возможно, найти подход к построению модели процедуры идентификации отказов, позволяющий достаточно точно получить ответ на вопрос: к какому множеству, «нормальная работа» N или ее нарушение в виде отказа или предотказного состояния $\bar{N}$ принадлежит вид технического состояния идентифицируемого сетевого устройства, а также определить соответствующий данному виду технического состояния вектор $S = S(x_1, x_2, \dots, x_n)$. При этом точность ответа на этот вопрос зависит от наблюдаемых ошибок контроля первого α и второго рода β в решении задачи классификации.

Известно, что вероятность «ложной тревоги» (ошибка α) возникает когда гипотеза $U_2(S = N)$ отклоняется при ее справедливости, а вероятность «пропуска отказа» (ошибки β) – при ситуации, когда вместо справедливой гипотезы $U_1(S = \bar{N})$ необоснованно принимается ошибочная гипотеза $U_2(S = N)$. Для минимизации среднего риска в определении вида технического состояния выберем решающее правило по критерию Байеса: $W = \delta_a \cdot \alpha + \delta_b \beta$. Для чего используем обозначения весовых коэффициентов ошибок контроля первого и второго рода (α и β) при определении средней стоимости принятия решения по классификации вида технического состояния, обозначив их соответственно δ_a и δ_b . Тогда имеем:

$$S \in N, \text{ если } \frac{P(x_1, \dots, x_n / N)}{P(x_1, \dots, x_n / \bar{N})} > \frac{\delta_a P(\bar{N})}{\delta_b P(N)} = \theta, \quad (39)$$

$$S \in \bar{N}, \text{ если } \frac{P(x_1, \dots, x_n / N)}{P(x_1, \dots, x_n / \bar{N})} < \frac{\delta_a P(\bar{N})}{\delta_b P(N)} = \theta, \quad (40)$$

где $P(x_1, \dots, x_n / N)$ и $P(x_1, \dots, x_n / \bar{N})$ – условные плотности вероятностей, характеризующие, соответственно «нормальную работу» или аномальное функционирование сетевого устройства; $P(\bar{N}) = 1 - P(N)$ – априорная вероятность аномального технического состояния устройств сети.

Обычно данные величины получают опытным путем через обучение системы, что позволяет добиться достаточно близких к истинным значения, поскольку применяемый для их расчета критерий Байеса обеспечивает, по крайней мере, при решении двувальтернативных задач классификации, наилучшую точность [15, 16, 39, 67, 81, 84]. Причем решающее правило Байеса в определении значений весов δ_a и δ_b , снижающее средний риск W , называют отношением правдоподобия, с помощью которого сравнивается отношение условных плотностей вероятностей с неким постоянным пороговым значением θ

$$L(x_1, \dots, x_n) = \frac{P(x_1, \dots, x_n / N)}{P(x_1, \dots, x_n / \bar{N})}.$$

Как правило, для расчёта порогов классификации на границе деления классов (видов) технического состояния сетевых устройств, сервером мониторинга используется вся доступная на сети измерительная информация, как при централизованном, так и в случае децентрализованного управления ею.

При централизованном варианте в сегмент мониторинга ситуационного центра собирается вся доступная ИИ о функционировании ИТКС и по результатам ее обработки принимается решение о состоянии сети (системы), либо техническом состоянии отдельных элементов сети (сетевых устройств), рис. 2 в). Данная информация в последующем директивно рассылается по сети в виде агентов [85].

Для децентрализованной системы управления при принятии обоснованного решения о состоянии всей сети, либо отдельных сетевых устройств каждый сервер мониторинга (подсистема мониторинга) сегмента ИТКС должны обладать достаточным объемом априорной информации. В связи с тем, что на каждом из этапов функционирования подсистемы мониторинга могут появляться ошибки измерений (контроля) первого и второго рода $\alpha(x_{oi})$, $\beta(x_{oi})$, то важно установить пороги классификации x_{oi} подсистемы мониторинга на каждом i -м этапе:

$$\alpha(x_{oi}) = \int_{x_{oi}}^{\infty} f(x_i / N) dx_i, \quad (41)$$

$$\beta(x_{oi}) = \int_{-\infty}^{x_{oi}} f(x_i / \bar{N}) dx_i, \quad (42)$$

С учетом (41) и (42) для многоуровневой системы (ИТКС), использующей многоэтапную процедуру мониторинга возможно получение суммарных величин ошибок контроля, соответствующих вероятностям «пропуска отказа» P_{np} и «ложной тревоги» $P_{лт}$:

$$P_{np} = P_2 \left[1 - \prod_{i=1}^n \beta(x_{oi}) \right], \quad (43)$$

$$P_{лт} = P_1 \cdot \prod_{i=1}^n \alpha(x_{oi}), \quad (44)$$

Тогда, используя критерий Неймана-Пирсона для решения задачи оптимизации порогов идентификации отказа, зафиксируем на заданном уровне вероятность «ложной тревоги» $P_{лт}$ и минимизируем вероятность $P_{np}^{\min}$ «пропуска от-

каза», учитывая, что переменные x_{0i} , как пороги классификации, связаны функциональной зависимостью $P_{\text{лт}}$. Такая постановка задачи идентификации вида технического состояния может быть отнесена к задаче условной оптимизации. Её решение возможно с использованием метода неопределённых множителей Лагранжа:

$$\Phi = P_2 \left[1 - \prod_{i=1}^n \beta(x_{0i}) \right] + \lambda P \prod_{i=1}^n \alpha(x_{0i}) . \quad (45)$$

Используя формулы (43) и (44) после проведения расчётов частных производных $\partial\Phi/\partial x_{0i}$ построим систему из n уравнений, характеризующих переменные пороги классификации x_{0i} , а также найдём неопределённый множитель Лагранжа λ . Дифференцируя полученный в системе уравнений результат, найдём искомые оптимальные пороги классификации видов состояния для каждого этапа процедуры мониторинга $(x_{01}^*, x_{02}^*, \dots, x_{0i}^*, \dots, x_{0n}^*)$. Это нам позволяет определить минимальное значение вероятности «пропуска отказа» (ошибки второго рода) $P_{\text{пр}}^{\min}$. Данная величина, в свою очередь, влияет на минимальное значение вероятности ошибки появления аварийной ситуации. Что позволяет рассчитать вероятность получения правильного решения $\bar{P}_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{пр}}^{\min}$, когда на сети (в сетевом устройстве) отсутствует отказ, т. е. идентифицируется техническое состояние «работоспособное» при принятии верного решения: $\bar{\beta}_i = 1 - \beta_i$.

Используя методы многоуровневого синтеза для построения перспективной подсистемы сетевого мониторинга, а также ее модифицированной графово-вероятностной модели идентификации отказа сетевого элемента, рис. 20, можно реализовать поэтапный процесс принятия решения:

- 1) *обнаружение* отказа (первый этап);
- 2) *распознавание* отказа, вернее, места отказа на сети с использованием объектовых серверов мониторинга (второй этап).

Перечисленные этапы на рис. 20 условно приведены как «Обнаружитель» и «Распознаватель». Также в данной модифицированной модели отказа для определения класса (вида) состояния сети (технического состояния сетевого элемента) выделим финальные значения вероятностей их нахождения в том или ином состоянии:

- класс «I» – система работоспособна, признана работоспособной;
- класс «II» – система заблокирована, отказ не обнаружен, предотказ не обнаружен;
- класс «III» – система работоспособна, признана работоспособной;
- класс «IV» – система заблокирована, отказ не распознан, параметрический отказ не распознан;
- класс «V» – прогноз состояния «работоспособное», ложный отказ не распознан;
- класс «VI» – прогноз состояния «неработоспособное», отказ обнаружен и не распознан;
- класс «VII» – состояние «работоспособное», ложный прогноз отказа;

- класс «VIII» – прогноз состояния «неработоспособное», отказ обнаружен и распознан.

Классы состояний «V-VIII», показанные на рис. 20, можно отнести к завершающему ее этапу работы – прогнозированию (его можно назвать третьим этапом графово-вероятностной модели идентификации отказа), в то время как классы «I-IV» относятся к обнаружению и распознаванию технических состояний «предотказное» и «неработоспособное».

При этом для объекта контроля можно выделить следующие последствия:

- класс «I» – эксплуатация;
- класс «II» – снижение боевой готовности;
- класс «III» – профилактика;
- класс «IV» – снижение боевой готовности;
- класс «V» – ложный резерв;
- класс «VI» – резерв;
- класс «VII» – ложный резерв;
- класс «VIII» – резерв.

В соответствии с вероятностно-графовой моделью идентификации и прогнозирования отказа математически виды технических состояний можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \langle I \rangle &= P_1 \bar{\alpha}_o; \\
 \langle II \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o; \\
 \langle III \rangle &= P_1 \alpha_o \bar{\alpha}_p; \\
 \langle IV \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o \bar{\beta}_p; \\
 \langle V \rangle &= P_1 \alpha_o \alpha_p \bar{\alpha}_n; \\
 \langle VI \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o \bar{\beta}_p \bar{\beta}_n; \\
 \langle VII \rangle &= P_1 \alpha_o \alpha_p \alpha_n; \\
 \langle VIII \rangle &= P_2 \bar{\beta}_o \bar{\beta}_p \bar{\beta}_n.
 \end{aligned} \tag{46}$$

Наиболее предпочтительным является класс «I», когда объект контроля работоспособен и признан работоспособным. Менее предпочтителен класс «VIII», когда объект контроля заблокирован, но при этом отказ обнаружен и распознан.

В общем виде вариационный ряд предпочтений видов состояния математически можно выразить как:

$$\langle I \rangle \succ \langle VIII \rangle \succ \langle V \rangle \succ \langle VII \rangle \succ \langle III \rangle \succ \langle VI \rangle \succ \langle IV \rangle \succ \langle II \rangle. \tag{47}$$

Исходя из представленной модели, аналитические выражения для определения вероятности идентификации подсистемой мониторинга работоспособного состояния ($P_{\text{рбт}}$) и, вероятности идентификации ею неработоспособного состояния (отказа) $P_{\text{отк}}$, соответственно, будут иметь вид:

$$P_{\text{рбт}} = 1 - \left[\bar{\beta}_n \left\{ 1 - \left(1 - P_1 \alpha_o \bar{\beta}_p \right) \left(1 - P_1 \alpha_p \right) \right\} \right] \left[1 - P_1 \alpha_n \right], \tag{48}$$

$$P_{\text{отк}} = 1 - \bar{\beta}_n \left[1 - \bar{\beta}_p \left\{ 1 - \left(1 - P_2 \alpha_o \bar{\beta}_o \right) \left(1 - P_2^p \right) \right\} \right] \left[1 - P_2^p \right]. \tag{49}$$

Таким образом, модель позволяет получать аналитические зависимости для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля, характеризующих «предотказ», «параметрический отказ», «функциональный отказ», а также финальные вероятности для видов состояний «работоспособное», «предотказное» и «неработоспособное» не только с использованием ошибок контроля (ошибки обнаружения и ошибки распознавания отказов), но и ошибок прогноза первого и второго рода.

12. Проверка на адекватность предложенной модели идентификации отказа через оптимизацию порогов вида технического состояния объекта контроля

Для обоснования адекватности предложенной модифицированной модели отказов необходимо провести процедуру оптимизации порогов классификации видов технического состояния ОК подсистемой мониторинга ИТКС.

Из представленной на рис. 20 графово-вероятностной модели отказа следует, что на этапах обнаружения (о), распознавания (р) и прогнозирования (п) отказа, соответствующие ошибки первого и второго рода будут равны:

$$\overline{\alpha}_o = 1 - \alpha_o; \quad \overline{\alpha}_p = 1 - \alpha_p; \quad \overline{\alpha}_n = 1 - \alpha_n; \quad \overline{\beta}_o = 1 - \beta_o; \quad \overline{\beta}_p = 1 - \beta_p; \quad \overline{\beta}_n = 1 - \beta_n. \quad (50)$$

Тогда для соответствующих вероятностей «ложной тревоги» $P_{лт}$ и «пропуска отказа» $P_{пр}$, представленных выражениями (43) и (44), на основании критерия Неймана-Пирсона [15] можно записать

$$P_{лт} = \text{const} = c, \\ P_{пр} = \min P_2(1 - \overline{\beta}_o \overline{\beta}_p). \quad (51)$$

С учетом графиков плотности распределения признаков x и y для двухэтапной процедуры мониторинга, рис. 21, для нормального класса технического состояния $f(x/N) = f_1(x)$ и при аварии ОК $f(x/\overline{N}) = f_2(x)$ имеем:

$$\begin{cases} \alpha_o = \int_{x_o}^{\infty} f_1(x) dx; \\ \beta_o = \int_{-\infty}^{x_o} f_2(x) dx, \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_p = \int_{y_o}^{\infty} f_1(y) dy; \\ \beta_p = \int_{-\infty}^{y_o} f_2(y) dy, \end{cases} \quad (52)$$

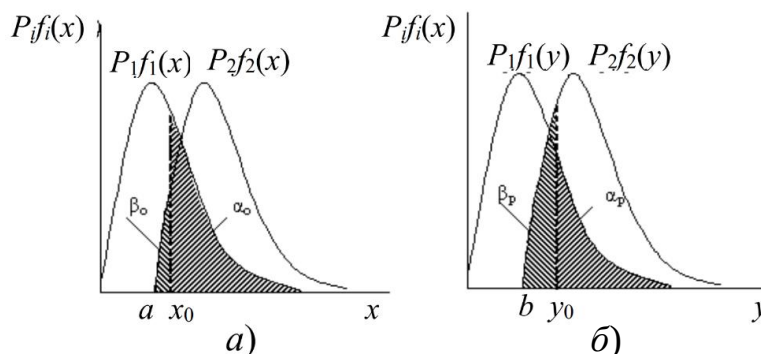


Рис. 21. Законы распределения признаков x и y для двухэтапной процедуры мониторинга

Тогда возможно записи выражений (51) с учетом (52) привести к виду:

$$P \int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx \int_{y_0}^{\infty} f_1(y) dy = c, \quad (53)$$

$$P_{\text{ип}}^{\min} = \min \left\{ P_2 \left[1 - \int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy \right] \right\}. \quad (54)$$

При этом если на стадии распознавания вида технического состояния идентификация осуществляется по n случайно распределённым признакам, $\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$, то в этом случае, при определении суммарной ошибки распознавания, возможно применять известный из теории управления математический аппарат [67, 84, 87]. В данном случае пороги классификации на этапах обнаружения и распознавания отказа объединяются выражением $[x = \varphi(y_0)]$. Тогда, используя дифференцирование по нижнему пределу, получим математическую запись:

$$\frac{d x_0}{d y_0} f_2(x_0) \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy + f_2(y_0) \int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx = 0, \quad (55)$$

которая позволит найти значения оптимальных порогов классификации, обеспечивающих минимизации ошибки идентификации состояния сетевого устройства и ИТКС в целом.

Такая запись (55) представляет собой модель идентификации вида технического состояния сетевого устройства подсистемой мониторинга ИТКС, которая получена из описанной выше поэтапной процедуры принятия решения аналогично известным подходам и достаточно хорошо иллюстрирует обоснование расчета значений x_0 и y_0 в виде порогов идентификации, за счет минимизации ошибок классификации видов состояния системы.

Из ошибок контроля первого и второго рода при эксплуатации сетевых устройств предпочтительной всегда считается ошибка α_0 («ложная тревога»), по сравнению с ошибкой β_0 («пропуск отказа»). В связи с чем, и более предпочтительными классами состояний сетевых устройств, показанных на рис. 20 будут классы «I» и «VIII».

При использовании научно-методического аппарата статистической теории распознавания образов, возможно, снизить ошибки мониторинга в предложенной модели за счет обучения классификатора, а также обработки накапливаемой сервером мониторинга измерительной информации о надежности ИТКС и ее элементов.

Задача существенно упрощается, если вид функций $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_1(y)$, $f_2(y)$ позволяет осуществлять оптимизацию аналитически, например при рэлеевских законах распределения случайных величин:

$$f_1(x) = x e^{-\frac{x^2}{2}}; \quad f_2(x) = (x-a) e^{-\frac{(x-a)^2}{2}}; \quad f_1(y) = y e^{-\frac{y^2}{2}}; \quad f_2(y) = (y-b) e^{-\frac{(y-b)^2}{2}}. \quad (56)$$

При данном подходе выражения (53), (54) приводятся к виду [16, 67, 84]:

$$x_0^2 + y_0^2 = 2 \ln(P_1/c); \quad (57)$$

$$\frac{dx_0}{dy_0}(x_0 - a) + (y_0 - b) = 0. \quad (58)$$

Совместное решение данных уравнений проведем путем дифференцирования выражения (57) по y_0 и подставкой полученного результата в (58):

$$x_0^* = \sqrt{\frac{2 \ln \frac{P_1}{c}}{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}}, \quad y_0^* = \sqrt{\frac{2 \ln \frac{P_1}{c}}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}}. \quad (59)$$

Используя уравнения (59) в интересах решения задачи (54), получим результат минимизации ошибки второго рода («пропуска отказа») на сети:

$$P_{\text{пр}}^{\min} = P \left\{ 1 - \frac{c}{P} \exp \left[\sqrt{2(a^2 + b^2) \ln \frac{P_1}{c}} - \frac{1}{2}(a^2 + b^2) \right] \right\}. \quad (60)$$

В последующем, на этапе функционирования модели, представленной на рис. 20, сервером мониторинга должна обрабатываться только та часть измерительной информации, которая описывает вероятность «ложной тревоги» $P_{\text{лт.о}}$ (т. е. ошибку первого рода обнаружителя), получаемую из выражений (52) и (53):

$$P_{\text{лт.о}} = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx. \quad (61)$$

Выражение (61) раскрывают лишь ту часть всего поступающего на сервер мониторинга объема измерительной информации, принятую за единицу, которая на последующем этапе анализируется. Именно по ней определяется степень редуцирования данных подсистемы мониторинга, передаваемой между сетевыми устройствами и сервером мониторинга для более достоверного определения типа отказа.

Тогда с учетом (56) в случае рэлеевских законов распределения признаков x и y , уравнение (61) возможно привести к виду (62) и (63), известному из работ по управлению [16, 67, 84]:

$$P_{\text{лт.о}} = \rho_{\text{сокр.}} = P_1 \exp \left(- \frac{\ln \left(\frac{P_1}{C} \right)}{1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2} \right), \quad (62)$$

$$\rho_{\text{сокр.}} = C^{(1+D^2)} / P_1^{D^2}, \quad (63)$$

где $D = b/a$ – определяется как относительная степень пересечения классов технического состояния по признакам y и x .

13. Усеченный конус прогноза

Расчет в общем виде профилактических допусков на параметры радиосредств, функционирующих в системе, в интересах создаваемой модели превентивной идентификации отказа позволяет количественно обосновать размеры «конуса прогноза», рис. 22, известного из работ по прогнозированию [17, 23, 63, 64] и раскрывающих гарантированный подход в задачах прогнозирования технического состояния объектов контроля.

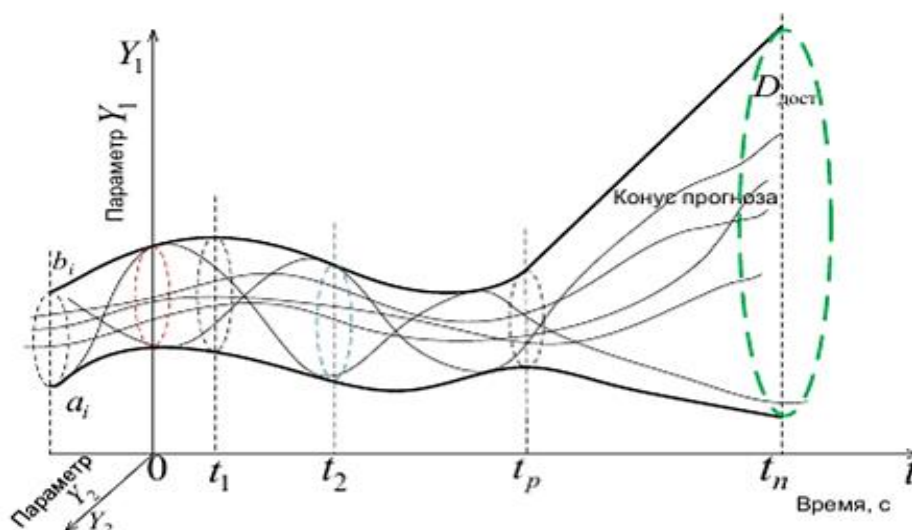


Рис. 22. Эволюция области работоспособности на прогнозируемый период

На рис. 22 представлена истинная реализация $y(t)$ на интервале T_p в виде конуса, ограниченного минимальной $\Theta_{\min}$ областью неопределенности. Данный конус строится, таким образом, что моделью случайного процесса изменения параметров, определяющей техническое состояние контролируемого технического устройства, принимается структура в виде полиномов Чебышева со случайными коэффициентами, наихудшими реализациями которых будут экстремальные полиномы Карлина. В итоге, внутри образованного двумя наихудшими реализациями внутренней и внешней области допусков конуса прогноза на заданном интервале прогноза будет гарантированно находиться истинная реализация [23, 63, 64]. Такой подход относится к индивидуальному прогнозированию в условиях неполных или недостоверных исходных данных и позволяет получать при этом достаточно надежные результаты. Данные реализации еще называют экстремальными [17].

Тогда, опираясь на геометрическую интерпретацию модифицированной кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска», представленную на рис. 15, 16, усовершенствуем известный из теории надежности конус прогноза (рис. 22) с использованием сечений уровней технических состояний ОК «работоспособное», «предотказное», «неработоспособное», «предельное» рис. 15 (определяющих пороги их наступления) и геометрической интерпретации рис. 16 по назначению допусков на них, получим фигуру т. н. «усеченного конуса прогноза», обозначенной желтой заливкой на рис. 23.

В основе малого сечения (основания) данной фигуры лежит обоснованное с учетом ошибок контроля первого и второго рода поле профилактического допуска изменения контролируемого параметра. Физический смысл данного поля профилактического допуска обосновывает проведение минимально необходимых и максимально целесообразных регулировок (профилактических мероприятий) в период времени $[t_1, t_2]$, рис. 23, т. е. в промежутке нахождения реализации случайного процесса (в виде метрики наблюдаемого параметра) между техническими состояниями «предотказное» и «неработоспособное». Именно в данный

текущий период времени необходимо осуществлять *управление параметрическим ресурсом* ОК (регулировку параметров технических устройств, корректировку уровней передачи в канале связи, перемаршрутизацию на сети и пр.) для недопущения развития отказа (деградации параметра). Такие профилактические мероприятия (регулировки) необходимо проводить в промежутке от «предотказного» вида технического состояния (момент времени t_1), когда произошло нарушение *профилактического допуска*, до «неработоспособного» вида технического состояния (момент времени t_2), характеризующего нарушение *эксплуатационного допуска*, после которого наступает параметрический отказ. При этом в случае перехода реализации случайного процесса за поле эксплуатационного допуска необходимо осуществление мероприятий по *управлению аппаратным ресурсом*, путем перехода с аварийного технического средства (канала, радионаправления) на резервное. В противном случае скрытый параметрический отказ (неправильное функционирование ОК) может перерасти в функциональный отказ или «предельный» вид технического состояния.

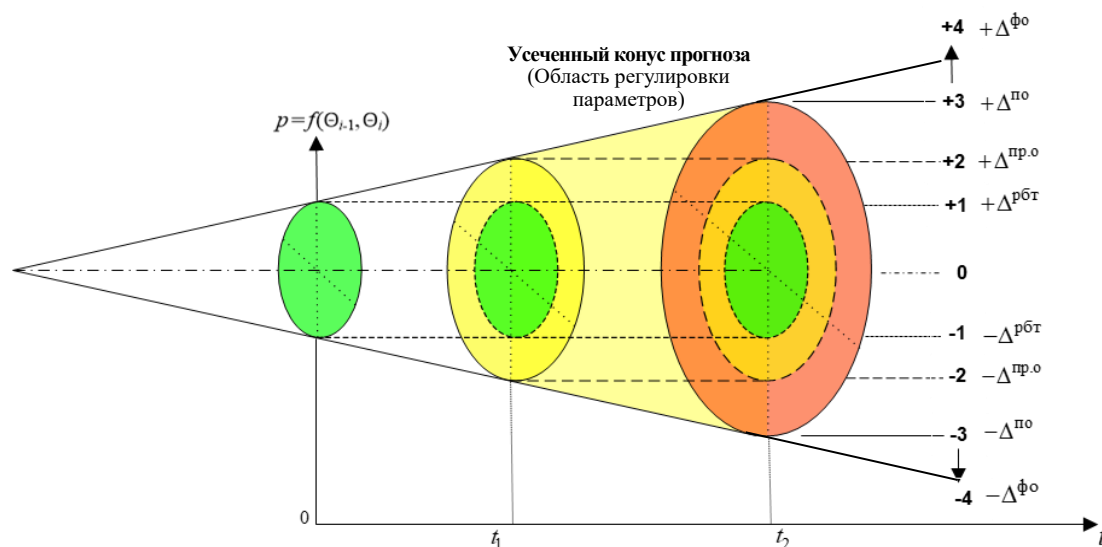


Рис. 23. Усеченный конус прогноза с рассчитанными уровнями видов состояний объекта контроля

Выявление минимально необходимой для допусковой оценки измерительной информации контролируемого параметра и исключение лишней (ложной) производится предварительным нанесением на ось ординат рис. 23 граничных значений полей допусков:

- зона исправности: «1» – «-1»;
- зона упреждающей профилактики: «2» – «-2»;
- зона параметрического отказа: «3» – «-3»;
- зона функционального отказа: «4» – «-4».

При этом разделение на зоны осуществляется в зависимости от максимально допустимых уходов каждого измеряемого параметра. Признаком выхода измеряемого параметра за пределы зоны исправности является появление его в

том или ином поле допуска, что вызывает в автоматизированной системе отклик (генерацию команды) на принятие мер персоналом:

- при нахождении значения метрики измеряемого параметра в зоне предотказа – генерация команды на проведение упреждающих профилактических регулировок;
- при нахождении значения метрики измеряемого параметра в зоне параметрического отказа – генерация команды на резервирование неисправного аппаратного (канального) ресурса для недопущения в дальнейшем функционального отказа.

Фактически вся процедура превентивной идентификации отказа разбита на три этапа:

- 1 этап – обнаружение нарушения, техническое состояние «предотказное»;
- 2 этап – идентификация параметрического отказа, техническое состояние «неработоспособное»;
- 3 этап – прогнозирование наступления функционального отказа, техническое состояние «предельное».

Авторы понимают, что использовать термин «предельного» технического состояния в данном случае не совсем корректно [14], но для удобства отличия параметрического и функционального отказа в работе применено это допущение.

14. Моделирование процедуры превентивной идентификации вида технического состояния сетевых устройств с использованием символьного представления временных рядов

Представим значения метрик параметров сетевых устройств в виде временного ряда с применением методов символической динамики используемых в теории динамических систем, когда для описания некоторой последовательности полученных метрик наблюдаемой системы вводятся символы заранее назначенного алфавита Σ [10, 88]. Данный подход на детерминированных системах достаточно эффективен, когда результаты исследования временных рядов схожи со случайными процессами. При этом временной ряд со своими динамическими свойствами можно описать матрицей возможных переходов между классами состояния технической системы в терминах топологических аналогов марковских процессов [60].

Для разбиения всего пространства возможных состояний технического устройства или системы на области, соответствующие контролируемому величинам метрик параметров (полю допускаемых наблюдаемых параметров) зададим подходящий для этого алфавит. Данный подход заимствован теорией символической динамики⁵ из биоинформатики [89], где активно используется для расшифровки последовательностей ДНК (цепей нуклеотидных геномных последова-

⁵ Теория символической динамики – из биоинформатики, применяется при расшифровке цепей нуклеотидных геномных последовательностей (последовательностей ДНК).

тельностью) [90]. В данном способе представим однонуклеотидный полиморфизм SNP^6 через анализ поступающих значений измерительной информации во временном окне, когда оценку заданной длительной временного ряда (допустимой последовательности) получаем по конечному составу входящих в неё нуклеотидов (A, C, G, T), рис. 24. Для варианта же представления усеченного конуса прогноза, показанного на рис. 23 используем уровни технического состояния.

Тогда задача идентификации [91] естественным образом формализуется в задачу соотнесения значения метрики измеренного параметра к одной из граничных значений полей допусков, показанных на оси ординат цифр, описанных следующим алфавитом:

- зона (поле) исправности от «+1» до «-1»;
- зоны (поля) упреждающей профилактики: от «+1» до «+2», от «-1» до «-2»;
- зоны (поля) параметрического отказа от «+2» до «+3» и от «-2» до «-3»;
- зоны (поля) функционального отказа от «+3» до «+4» и от «-3» до «-4».

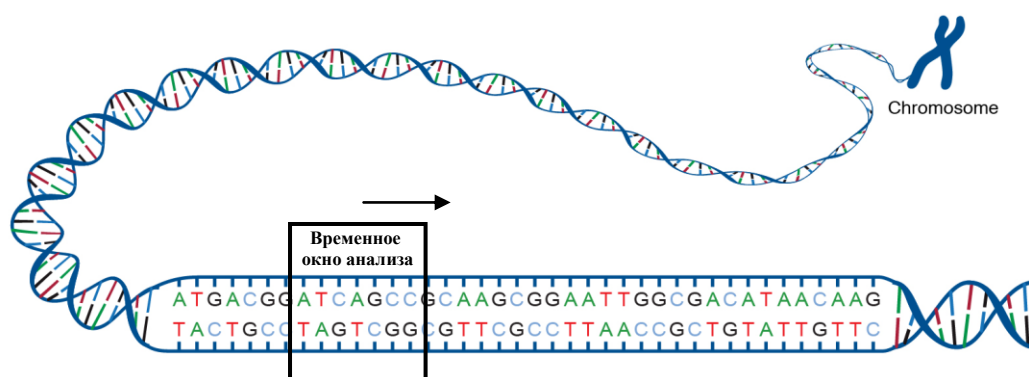


Рис. 24. Использование методов символической динамики при анализе сложных нуклеотидных геномных последовательностей

Получаемые коды, представлены алфавитом заданных уровней состояний методом скользящего окна в виде кодов скользящего окна с кодовой последовательностью измеряемых метрик, выстраиваемых во временной ряд, при этом для численной оценки временного ряда используют топологическую (метрическую) энтропию по Колмогорову [10, 92].

При заданном алфавите Σ классов технических состояний по зонам (полю допуска метрик параметров сетевых элементов), показанным выше, а также на рис. 23, рассмотрим в общем виде временной ряд метрики параметра произвольной природы $T = \{f_i, t_i\}, i = \overline{1, n}\}$, где n – количество наблюдений (число отсчетов временного ряда), f_i – измеренное значение метрики наблюдаемого параметра (характеристики наблюдаемого процесса) сетевого устройства в момент

⁶ SNP – (англ. *Single Nucleotide Polymorphism*) отличие последовательности ДНК размером в один нуклеотид (A, T, G или C) в геноме (или в другой сравниваемой последовательности) представителей одного вида или между гомологичными участками гомологичных хромосом путем анализа временного окна.

времени t_i . При этом задачей является получение обобщённых универсальных характеристики временного ряда метрики контролируемого параметра для оценки соотношения его значения к той или иной области класса технического состояния сетевого устройства, или виду состояния ИТКС в целом.

При этом модель процедуры превентивной идентификации осуществляется поэтапно:

- на первом этапе производим символьное кодирование временных рядов по возможным значениям метрик наблюдаемых параметров;
- на втором этапе выполняем оценку энтропии кода, описываемого наблюдаемую метрику по временному ряду;
- на третьем этапе обучаем классификатор состояний объекта контроля, используя подход, основанный на энтропии сдвигов;
- на четвёртом этапе классифицируем техническое состояние объекта контроля на основе тестовой выборки, наблюдаемой во временном окне анализа (рис. 24), в которой измеренные значения метрик параметров описывается законами распределения вероятностей сдвигов.

14.1. Анализ временных рядов по значениям метрик параметров объекта контроля

Получение обобщённых универсальных характеристики временного ряда при анализе значений метрик параметров ОК во многом зависят от точности проводимых измерений характеристик наблюдаемого процесса f_i и их вариаций на интервалах времени t_i , рис. 25. При этом в ходе кластеризации видов технических состояний ОК требуется выделение этих универсальных характеристик, значения которых представляют координатами точки в пространстве.

Для получения универсальных характеристик временных рядов в [88] предложено проводить масштабирование измеряемых значений функции f_i с построением строк символов, отображающих процесс динамики их изменения. В результате определяется $V = y_{\max} - y_{\min}$ – размах изменения значения метрики анализируемого временного ряда, где $y_{\max} = \max_{i=1,n} f_i$, а $y_{\min} = \min_{i=1,n} f_i$, на котором уста-

навливают разбиение y_i , $i = \overline{1, m}$ на диапазоне $[y_1, y_m]$, с размахом $y_1 = y_{\min}$, $y_m = y_{\max}$. Но поскольку значения f_i метрики временного ряда может попасть и на стык разбиений, то важно провести анализ диапазона $[y_i, y_{i+1}) = \{y \mid y_i < y < y_{i+1}, i = \overline{1, m-1}\}$. В данном случае такое определение числа разбиений k ($k = m - 1$) всего диапазона наблюдения значений параметра на сегменты и расчет их внутренних границ может считаться самостоятельной оптимизационной задачей [92]. Для ее решения можно использовать бикритериальный метод построения гистограмм [93]. Причем число разбиений k диапазона наблюдения метрик параметра с использованием данного метода определяет мощность кода описания. На рис. 25 показано разбиение размаха временного ряда на символы кода «+1» – «-1»; «+2» – «-2»; «+3» – «-3»; «+4» – «-4» заданного алфавита Σ , соответствующие цифрам, характеризующим уровни допусков на виды (классы) технического состояния ОК.

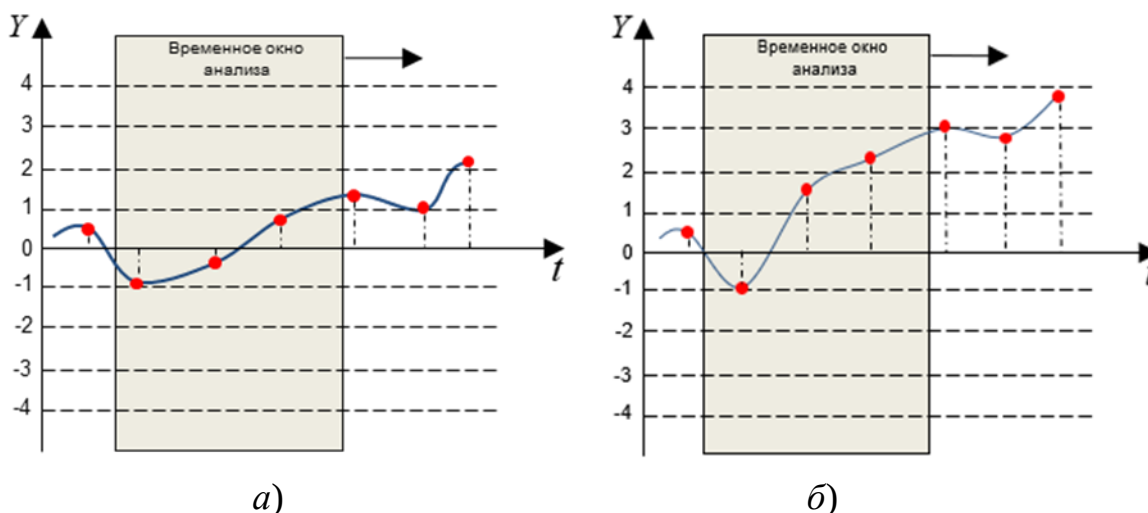


Рис. 25. Временной ряд метрики наблюдаемого параметра на основе символьного представления:

а) с постепенным развитием отказа; б) с лавинообразным развитием отказа

Если значение метрики наблюдаемого параметра находится в сегменте между ними, то это означает назначение того или иного классов технического состояния. При этом такой элемент разбиения на рис. 23 и 25 как от «+4» и выше, а также от «-4» и ниже, очевидно также будет являться сегментом. В данном случае цифры кода определяют разбиения значений измеряемой метрики параметра в ходе их деградации, соответственно в сторону дальнейшего роста либо снижения. Так нахождение значения метрики временного ряда наблюдаемого параметра в промежутке уровней «-1» – «0» – «1» соответствует разбиению, определяющему вид технического состояния сетевого элемента «исправное» («0»), когда все параметры имеют номинальные значения, а также «работоспособное» (от «0» до «+1» и от «0» до «-1»), когда параметры не выходят за значения профилактических допусков. В промежутке уровней «-2» – «-1» и «+1» – «+2» вид соответствует «предотказному» техническому состоянию. Попадание значения метрики временного ряда в промежуток уровней «-3» – «-2» и «+2» – «+3» характеризуют параметрический отказ ОК, а «-4» – «-3» и «+3» – «+4» – наступление вида технического состояния «предельное», или функционального отказа, когда дальнейшая эксплуатация опасна или нецелесообразна [1].

Поскольку наблюдение изменения метрики параметра осуществляется на временных интервалах с помощью перемещения временного окна анализа, то значения данного временного ряда, описанное символами разбиений сегментов, будет представлять собой код в наблюдаемой кодовой последовательности алфавита Σ . Длина извлекаемого при анализе кода ограничена шириной временного окна. При перемещении временного окна анализа по наблюдаемому временному ряду формируется кодовая последовательность. Фактически происходит кодирование временного ряда, т. е. измеряемые значения функции f_i кодируется той цифрой номера сегмента (разбиения), в котором на данный момент времени (временной интервал) они находятся. Из рис. 25 а) можно увидеть, что временной ряд метрик наблюдаемого параметра представлен кодом 1:

$\{0, -1, 0, 0, +1, +1, +2, \dots\}$, а временной ряд, показанный на рис. 25 б) – кодом 2: $\{+1, -1, +1, +3, +4, +4, +4, \dots\}$.

При резком (лавинообразном) увеличении значения параметра наблюдаемого процесса, равно как при резком спаде за один временной интервал ($t_i - t_{i+1}$) относительно нормального тренда его изменения, например, при переходе из одного сегмента (разбиения) через допустимый уровень в другой, минуя соседний, получаем коды, которые характеризуют временной ряд не содержащие номера некоторых сегментов. Так, на рис. 25 б), идентифицируется лавинообразный процесс развития отказа, поскольку в кодовой строке отсутствует сегмент «2» – «3». Данная ситуация идентифицирует переход из технического состояния «исправного» (норма) сразу в «неработоспособное» (параметрический отказ), минуя техническое состояние «предотказное».

В данном случае осуществляется интервальный анализ временного ряда поступающей на сервер мониторинга ИИ, где в качестве интервала рассматривается временное окно анализа (или «скользящее окно»), сдвигающееся вдоль временного ряда формируя вектор-строку кода технического состояния. В результате такой процедуры отслеживается появление нежелательных предаварийных и аварийных режимов работы (состояний) объекта контроля, или его параметрических отказов, путём сравнения наблюдаемого вектора-строки в «скользящем окне» кодов в общей кодовой последовательности временного ряда с так называемыми «запрещёнными» кодами, идентифицирующими аномальное состояние.

В ходе процедуры прогноза состояния сетевых элементов в процессе мониторинга ширина «скользящего окна» (временного окна анализа) наблюдаемого временного ряда с n временными отсчётами представляется в виде кода, состоящего из n символов алфавита Σ . При этом выбор ширины «скользящего окна» также может рассматриваться как самостоятельная оптимизационная задача, и в данном случае может изменяться от $m = 1$ до $m = 5$ и более. Подбор временного окна анализа необходимо осуществлять для конкретной метрики индивидуально, с учетом физических процессов развития отказов на множестве сетевых элементах.

Также возможна адаптация ширины «скользящего окна» к различным условиям и режимам функционирования ИТКС. В данном случае оптимизировать ширину временного окна анализа необходимо для обеспечения точности и оперативности процедур мониторинга и прогноза. Возможно выбрать слишком узкий интервал анализа и получать оперативно недостоверный прогноз. И, наоборот, задать слишком широкое «скользящее окно» для повышения точности прогнозирования, но снизить при этом ее оперативность. В случае, показанном на рис. 25 а), ширина временного окна анализа временного ряда равна $m = 3$ измерениям (циклам мониторинга).

В связи с тем, что ограничениями данной работы являются исследование физических процессов, связанных с развитием параметрических (постепенных) отказов (как указано в п. 2 пп. 2), которым, как правило, предшествуют деградационные явления на метриках параметров с трендом выхода их значений за пределы эксплуатационных и профилактических допусков ($+\Delta^{\text{пр.о.}}$; $+\Delta^{\text{п.о.}}$; $-\Delta^{\text{пр.о.}}$;

$-\Delta^{n.o.})$ [4, 23] в сторону увеличения или уменьшения, рис. 15, 16, 23, то при проведении производственных испытаний, а также в ходе опытной эксплуатации сетевых элементов нарабатывается («формируется») база «запрещённых» кодов, которая в последующем используется для сравнения с наблюдаемыми результатами измерений метрик параметров, получаемыми в пространстве сдвигов «скользящего окна».

Для нашего исследования при минимальной ширине «скользящего окна» $m = 1$ таким «запрещённым» кодом могут быть уровни: «+2», «+3», «+4», «-2», «-3», «-4». Поскольку пересечение данных уровней метрикой параметра уже требует от эксплуатанта принятия определенных мер. В разряд «запрещённых кодов» не входят уровни «0», «+1», «-1», поскольку при этом идентифицируется нормальный процесс функционирования ОК (виды технического состояния – «исправное» и «работоспособное»). При ширине «скользящего окна» равном $m = 2$ такими запрещёнными кодами могут быть: «+2, +2»; «+2, +3»; «+2, +4»; «+3, +3»; «+3, +4»; «+4, +4»; «-2, -2»; «-2, -3»; «-2, -4»; «-3, -3»; «-3, -4»; «-4, -4», идентифицирующие виды технических состояний «предотказное», «неработоспособное» (параметрической отказ), «предельное» (функциональный отказ, см. допущения). Для нашего случая, при $m = 3$ «запрещёнными» кодами могут быть: «+1, +1, +2»; «+1, +2, +2»; «+1, +1, +3»; «+1, +2, +3»; «+1, +3, +3»; «+1, +3, +4»; «+1, +4, +4»; «+2, +2, +2»; «+2, +2, +3»; «+2, +3, +3»; «+2, +3, +4»; «+2, +4, +4»; «+3, +3, +3»; «+3, +3, +4»; «+3, +4, +4»; «+4, +4, +4», аналогично для симметричных допусков на уменьшение параметра, и т. д. для $m = 4$.

Таким образом, выявлением «запрещённых» кодов в строке измеренных значений временного ряда можно наблюдать дрейф параметров в сторону его деградации и своевременно прогнозировать наступления отказа в будущем для принятия превентивных действий по регулировке параметров (при наступлении технического состояния «предотказное»), или резервированию ОК при угрозе выхода параметра за пределы допуска (наступление параметрического скрытого отказа с видом технического состояния – «неработоспособное»).

Для решения задач определения масштаба и диапазона изменения метрик временного ряда в [91] на базе аппарата математической статистики используется подход с равномерным разбиением такого диапазона на уровни, или с расчетом длины и количества его разбиений на сегменты («0-1»; «1-2»; «2-3»; «3-4»). Данный вопрос остается сугубо индивидуальным для временных рядов конкретных контролируемых параметров заданного объекта контроля. В тоже время, опираясь на аппарат теории надёжности, можно констатировать, что число таких разбиений на сегменты, как правило, должно соответствовать видам (классам) их технических состояний.

14.2. Анализ временных рядов по тенденциям изменения метрик параметров объекта контроля

Зачастую, для раннего предупреждения развития нежелательных деградационных процессов на системах ответственного назначения в их подсистемах

мониторинга функциональной безопасности большое внимание уделяется не изменению значения временного ряда на последующем интервале наблюдения, а тенденциям его изменения. Для выбора рациональных порогов идентификации развития негативной тенденции важно сформировать критерий наличия или отсутствия положительной тенденции (возможно в процентном соотношении). В данном случае обычно прибегают к более тщательной подготовке исходных данных и обучению системы мониторинга обработке значений временных рядов, а также к экспертной оценке, что вносит некий субъективизм, поскольку математически такая оценка не обоснована.

Для предварительной обработки значений метрик временных рядов в [91] предложен способ символьного кодирования и бикритериальный метод формирования разбиений пространства параметров на сегменты и пороговые значения для каждого из состояний, что обеспечивает ширину доверительного интервала в интересах выборочного среднего для каждого разбиения не больше самого разбиения. При этом используется ограничение в кодировании значений метрик, попадающих в один сектор, одним символом алфавита Σ . Таким образом, в случае применения метода символьного кодирования, изменение символа заданного для временного ряда алфавита Σ в следующий временной интервал и есть квалификация тенденции, при том, что изменение значения метрики параметра, не выходящее ее за полосу ширины разбиения (сектора) говорит об отсутствии какой-либо тенденции.

Рассмотрим символьное описание временного ряда изменения значений метрик параметра по тенденции, рис. 26.

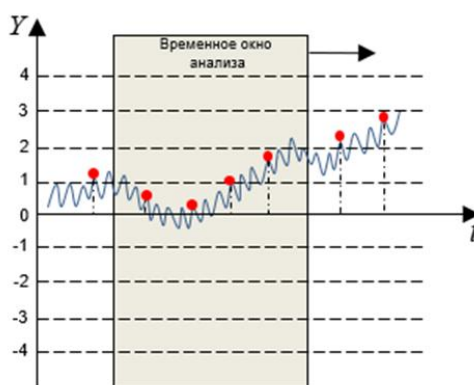


Рис. 26. Символьное описание временного ряда по тенденции изменения метрики

В данном случае при кодировании временного ряда применим алфавит вида: $\Sigma_{\text{тенд}} = \{-, 0, +\}$. Здесь символ «0» определяет отсутствие тенденции изменения наблюдаемых значений метрик на последующем временном окне анализа. Поэтому, если при кодировании временного ряда по значениям (знач) в алфавите, заявленном в п. 14.1 – $\Sigma_{\text{знач}} = \{A, B, C, D, E\}$, код метрики, продемонстрированной на рис. 26 можно представить как $\{CDDDCBAB\}$, то в случае кодирования этого временного ряда с использованием алфавита по тенденциям $\Sigma_{\text{тенд}}$, код метрики будет представлен в виде $\{0 + 0 0 - - - +\}$, где символ кода «0» говорит об отсутствии тенденции.

С точки зрения функциональной безопасности и теории надёжности для подсистемы мониторинга крайне важно нахождение значений метрик наблюдаемых параметров устройств и элементов сети в стабильном состоянии при определенных режимах функционирования, т. е. когда тенденции их изменения отсутствуют. В тоже время, для динамически нестабильных систем с постоянно меняющимися режимами работы, типа перегрузки или недогрузки, изменением обрабатываемой нагрузки в символах кодовых последовательностей, тенденции изменения метрик наблюдаемых параметров всегда будут присутствовать. В данном случае, для идентификации разрушительных тенденций, которые могут вызвать переход элемента сети из состояния «работоспособное» в состояние «неработоспособное» (параметрический отказ), необходимо выявить запрещённые коды в описываемом временной ряд векторе-строке.

Как правило, аварийному режиму функционирования предшествует некоторый временной период повышенного риска возникновения отказа (аварии), характеризующий в соответствии с [14] вид технического состояния «предотказное». Это может быть вызвано воздействием на элемент сети как внутренних факторов (программные сбои, производственные дефекты, перегруженный режим работы и пр.), так и внешних воздействий (естественного и искусственного характера, ошибки персонала, условия эксплуатации и пр.). Своевременное обнаружение вида технического состояния «предотказное» и является одной из основных задач подсистемы мониторинга. Что необходимо для превентивного и оперативного принятия мер при развитии аварии (отказа). Исходя из описанного выше, применение метода символьного кодирования временных рядов по значениям метрик и по тенденциям их изменений позволяет обнаружить «запрещённую» кодовую комбинацию заблаговременно в векторе-строке значений контролируемых параметров.

Так, на рис. 26 а) переход из режима нормального функционирования (состояние «работоспособное»), к состоянию «предотказное» интерпретируется кодами «+1, +2» и «+1, +3» в векторе-строке $\{+1, -1, -1, +1, +2, +1, +3, \dots\}$, а на рис. 25 б) переход к техническому состоянию «неработоспособное» и далее «предельное» – кодом «-1, +2, +4» в векторе-строке $\{+1, -1, +2, +4, +4, +4, +4, \dots\}$. При кодировании же метрик параметров временного ряда по тенденциям (рис. 26) поведение сетевого устройства может идентифицироваться кодовой последовательностью $\{- -\}$, $\{- - -\}$ или $\{+ +\}$, $\{+ + +\}$. Следовательно, подсистема сетевого мониторинга в ходе анализа измерительной информации временного ряда должна выявлять подобные «запрещённые» кодовые последовательности, которые характеризуют наступление состояния «предотказное» или «неработоспособное».

Причем переход ОК в критическое состояние должен быть выявлен заблаговременно для своевременного (превентивного) принятия управляющего воздействия. В этом случае в качестве реакции подсистемы мониторинга на наступление деградации сетевого элемента может быть управляющее воздействие на него (регулировка параметра, корректировка уровня передачи и пр.), либо перевод системы мониторинга в особый режим мониторинга (из пассивного в актив-

ный). В [10] предложено в качестве такого особого режима мониторинга использовать увеличение скважности опроса сервером мониторинга сетевых устройств, когда, например, при выявлении его состояния «предотказное» по предварительно собранной и агрегированной статистике для недопущения дальнейшего развития аварии частоту опроса ОК увеличивают.

14.3. Оценка энтропии кодовой комбинации, описывающей временной ряд метрики наблюдаемого параметра

Для идентификации «запрещённых» кодовых комбинаций вектора-строки наблюдаемого временного ряда, выявляющих развитие аварийной ситуации, воспользуемся оценкой энтропии кода [92]. При этом вначале анализа фиксируют алфавит Σ и длину кода m . Множество различных кодовых комбинаций на заданном алфавите составляет Σ_m , а его мощность, составляющая общее число возможных кодовых комбинаций $M = |\Sigma_m|$. Введем произвольную нумерацию кодовых последовательностей (кодов) $i = 1, M$ и счётчики числа кодов c_i для фиксированной длины кода m , соответствующей ширине временного окна анализа. Поскольку в процессе анализа временного ряда T длиной n , в каждый момент времени осуществляется сдвиг временного окна на один интервал $[t_i, t_{i+1}]$, то будет всего $n - m + 1$ положений временного окна, для каждого из которых фиксируется код. Когда для актуальной временной позиции скользящим окном шириной m идентифицируется i -й код, то значение c_i в счётчике числа кодов возрастает на единицу. В данном случае по фиксируемым значениям счётчика c_i оценивается энтропия каждого кода [92]:

$$C_m = -\sum_{i=1}^M \left(\frac{c_i}{n-m+1} \right) \log_m \left(\frac{c_i}{n-m+1} \right). \quad (64)$$

Применение в выражении (64) в качестве основания алгоритма мощности различных кодов M позволяет нормировать значение энтропии кодовых комбинаций C_m . Причем, если $C(m) = 0$, то это говорит о том, что любой размер кодовой комбинации соответствует размеру рассматриваемого кода ($m = n$), либо кодовые комбинации длиной m одинаковы и содержат в своем составе один и тот же код. Если $C(m) = 1$, то это указывает на наблюдаемость в алфавите Σ_m всех возможных кодов из рассматриваемой кодовой комбинации с одинаковой частотой. Вышесказанное означает, что при оценке энтропии кодов может быть получена функция $C(m) = C_m$, аргумент которой изменяется от 1 до n , вычисляемый при фиксированном m по наблюдаемому временному ряду в соответствии с (64) и повышением на единицу ширины окна $m + 1$ на области определения $1 < m < n$.

В такой постановке, используя терминологический аппарат символической динамики [92], функция $C(m)$ есть не что иное как оценка энтропии сдвигов. Проведя её расчёт последовательно для каждой ячейки с возрастающей шириной окна $m = 1, \dots, W$, получим вектор энтропийной характеристики ячейки u_i :

$$h = (C_1, C_2, \dots, C_m). \quad (65)$$

14.4. Влияние закона распределения энтропии сдвигов метрик параметров временного ряда на прогнозирование отказа

При выборе математического аппарата в ходе анализа методов обработки временных рядов метрик параметров сетевых устройств, ключевым аспектом является степень неоднородности объекта контроля [17], определяемая по шкале (например, от 0 до 1, в сторону её увеличения). В зависимости от неё для анализа разнородных ОК преимущественно подходит аппарат экспертных оценок (например, метод бинарных сравнений).

В целом, для обоснования степени важности того или иного ОК, который необходимо наблюдать, применяются положения теории важности критериев:

а) для однотипных технических устройств и элементов сети степень неоднородности имеет значениям от 0 до 0,6. Это связано с достаточной унификацией сетевых устройств, подвергаемых контролю с регистрируемым потоком измерительной информации, описываемым однородными признаками. Поскольку исследования проводятся над объектами с постепенными отказами, то изменение технического состояния, в данных сетевых элементах более сглаженное, что выделяет приоритетными процедуры обобщения и обучения для поддержания высокой эффективности мониторинга, способствуя, в частности, широкому применению искусственных нейронных сетей (ИНС). Также применимыми методами для оценки вида технического состояния могут быть методы экспертных оценок, методы статистических решений (Неймана-Пирсона, минимакса), статистические методы распознавания, метрические методы и ИНС [17, 85];

б) для неоднотипных технических устройств и элементов сети, обладающих нестационарной природой потока измерительной информации с законом распределения Вейбула или пуассоновским законом распределения («рванный» сигнал, получаемый с большим разбросом), степень неоднородности имеет значения от 0,7 до 1. Для идентификации отказов таких объектов контроля в большей степени применяется метод последовательного анализа Вальда метод дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) [17, 85].

Для различных элементов сети и типовых устройств, как правило, применяются свои методы оценки временных рядов. Так, например, для моделирования сетевых задержек на каналах связи используются следующие распределения вероятностей непрерывных случайных величин [88]:

Гамма-распределение. Гамма-распределение использует два параметра: масштаба $\beta > 0$ и формы $\alpha > 0$. Данный вид распределения ассиметричен и определяется исключительно для неотрицательных действительных чисел. Варьирование параметра α изменяет форму функции плотности, в то время как варьирование параметра β соответствует изменению единиц измерения (например, от микросекунд до миллисекунд) при неизменной форме функции плотности. В работе [94] показано, что гамма-распределение во многих ситуациях достаточно точно описывает задержки маршрутизации.

Смещённое гамма-распределение. После оценки параметров гамма-распределения, с помощью которых получена модель задержки маршрутизации, как правило, осуществляют моделирование полной задержки на сети, включающей

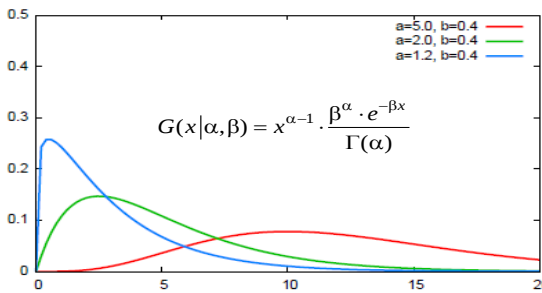
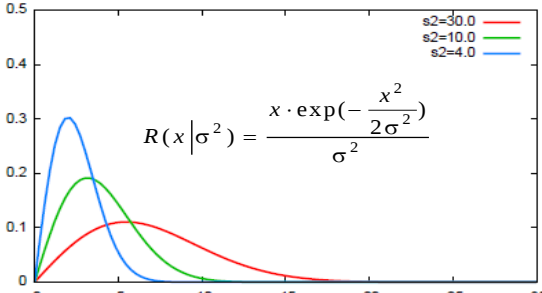
внутренние задержки при передаче пакетов по физическим средам – c . Для чего два параметра гамма-распределения α и β дополняют третьим параметром $c > 0$, которое сдвигает пик распределения на c единиц вправо. Такое линейное преобразование называют смещённым гамма-распределением. При этом внутренняя задержка c независима от состояния маршрутизаторов на пути, которые, в свою очередь, моделируется посредством параметров α и β гамма-распределения.

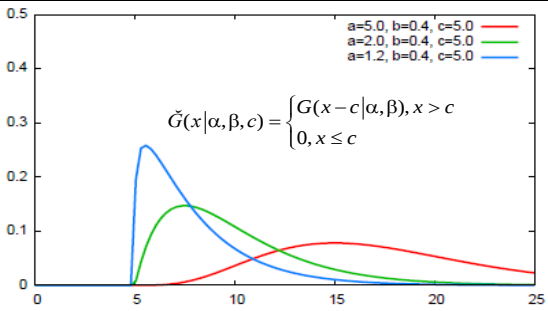
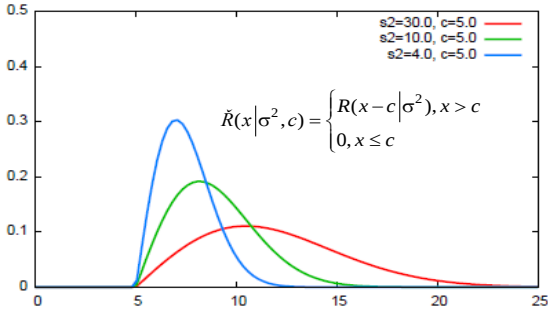
Распределение Рэлея – альтернатива гамма-распределению, принимающая лишь один параметр σ^2 . Это оправдано тем, что рэлеевское распределение даже при одном параметре описания показывает аналогичное поведение во многих случаях, хотя и довольно грубо к реальному приближению в поведении задержек маршрутизации. Данное упрощение имеет преимущество в меньшей вычислительной сложности расчета параметра σ^2 .

Смещённое распределение Рэлея. Аналогично смещённому гамма-распределению, смещённое распределение Рэлея дополнено параметром $c > 0$ и является обобщением распределения Рэлея с учетом внутренней задержки.

Функции плотности указанных распределений вероятностей вместе с их математическим ожиданием и дисперсией, а также графиками функций плотности с несколькими выбранными параметрами, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Распределения вероятностей, используемые для моделирования сетевых задержек

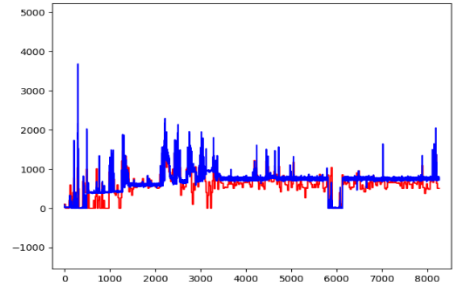
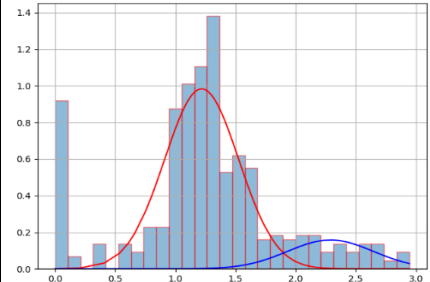
Распределение	Функция плотности	Область значений	Математическое ожидание	Дисперсия
Гамма-распределение	 $G(x \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot \beta^\alpha \cdot e^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)}$	$[0, \infty)$	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$
Распределение Рэлея	 $R(x \sigma^2) = \frac{x \cdot \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2})}{\sigma^2}$	$[0, \infty)$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$	$\frac{4-\pi}{2} \sigma^2$

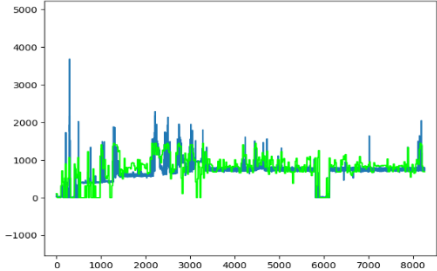
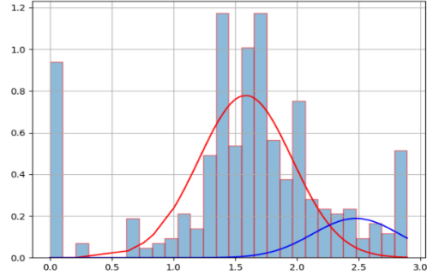
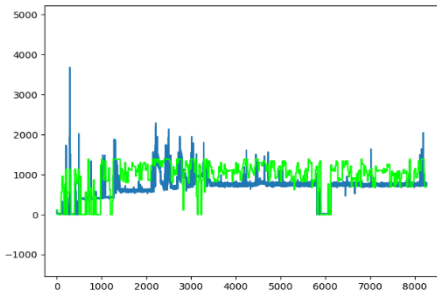
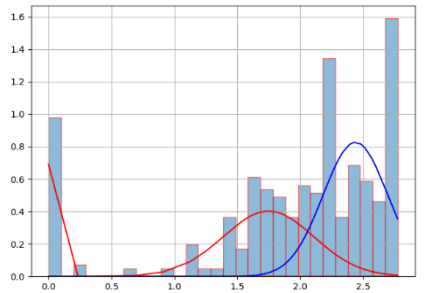
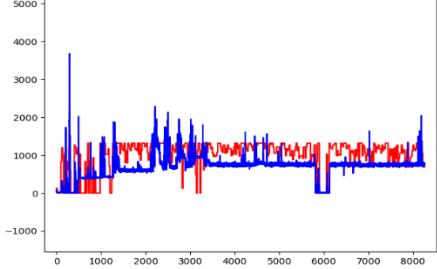
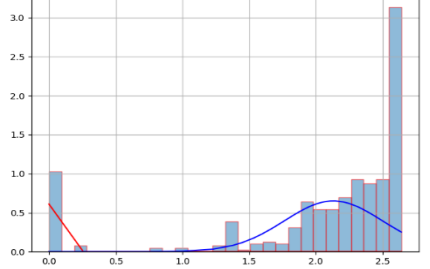
Распределение	Функция плотности	Область значений	Математическое ожидание	Дисперсия
Смещённое гамма-распределение	 $\check{G}(x \alpha, \beta, c) = \begin{cases} G(x-c \alpha, \beta), & x > c \\ 0, & x \leq c \end{cases}$	$[0, \infty)$	$\frac{\alpha}{\beta} + c$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$
Смещённое распределение Рэлея	 $\check{R}(x \sigma^2, c) = \begin{cases} R(x-c \sigma^2), & x > c \\ 0, & x \leq c \end{cases}$	$[0, \infty)$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} + c$	$\frac{4-\pi}{2} \sigma^2$

14.5. Результаты экспериментальной проверки работы модели

Для проверки адекватности предложенной модели превентивной идентификации отказов на основе статистики энтропии сдвигов был проведен вычислительный эксперимент на основе набора данных недельной загрузки процессора сервера виртуализации, результаты которого приведены в таблице 6. Исследовался фиксированный интервал в 50 отсчетов наблюдения временного ряда (голубой цвет на рисунках таблицы) с размером временного окна анализа энтропии 2, 3, 5 и 7. В результате вычислений получена статистика энтропии сдвигов (энтропийные ряды зелёного и красного цвета на рисунках таблицы), а также гистограммы таблицы 6, полученные при использовании смешанной гауссовской модели *ЕМ*-алгоритм, аппроксимированные тремя нормальными распределениями, описанными выше.

Таблица 6 – Геометрическая интерпретация вычислительного эксперимента

Параметры	Временной и энтропийный ряды	Гистограмма и параметры смешанного распределения	Исходные данные
Интервал анализа: 50 Окно: 2			m : 0; 1,23; 2,29. D : 0,13; 0,09; 0.

Параметры	Временной и энтропийный ряды	Гистограмма и параметры смешанного распределения	Исходные данные
Интервал анализа: 50 Окно: 3			m : 0; 1,58; 2,48. D : 10^{-6} ; 0,15; 0,12.
Интервал анализа: 50 Окно: 5			m : 0,02; 1,70; 2,41. D : 0,07; 0,003; 0,12.
Интервал анализа: 50 Окно: 7			m : 0,01; 2,13; 2,63. D : 10^{-5} ; 0,01; 0,1.

В таблице 7 приведены выходные данные, полученные в ходе вычислительного эксперимента для значений параметров математического ожидания m и дисперсии D при различной ширине скользящего окна (временного окна анализа).

Таблица 7 – Выходные данные вычислительного эксперимента

Ширина скользящего окна: 2		Ширина скользящего окна: 3		Ширина скользящего окна: 5		Ширина скользящего окна: 7	
m	D	m	D	m	D	m	D
0	0,13	0	10^{-6}	0,02	0,07	0,01	10^{-5}
1,23	0,09	1,58	0,15	1,70	0,003	2,13	0,01
2,29	0	2,48	0,12	2,41	0,12	2,63	0,1

Как следует из анализа результатов вычислительного эксперимента, более чёткое разделение состояний (нормальное функционирование – «работоспособное», переходное состояние – «предотказное», блокировка – «неработоспособное») наблюдаются для энтропийных окон с шириной 2 и 3. С увеличением ширины скользящего окна качество аппроксимации визуально значительно ухудшается. Это, в целом затрудняет процедуру классификации технического состояния наблюдаемого элемента сети.

Данный подход к классификации состояния сетевых элементов хорошо работает для случая возможности выделения классов поведений (режимов работы:

нагруженный, перегруженный), что было продемонстрировано при мониторинге односторонней задержки [10], когда компонента, связанная с ожиданием в очередях на разных маршрутах ИТКС, учитывается при расчете общей задержки лишь для средних и высоких нагрузок трафика. В меньшей степени такой подход используется при оценке состояния загрузки процессора (его вычислительных ресурсов, в частности). Хотя при этом также может возникать задержка, связанная с переключением контекста вычисления, но в данном случае она связана в большей мере не с режимом нагрузки, а с организацией вычислительного процесса. При этом необходим предварительный этап модели для уточнения числа состояний и закрепления за ними соответствующих им распределений, что продемонстрировано на рис. 27 и 28.

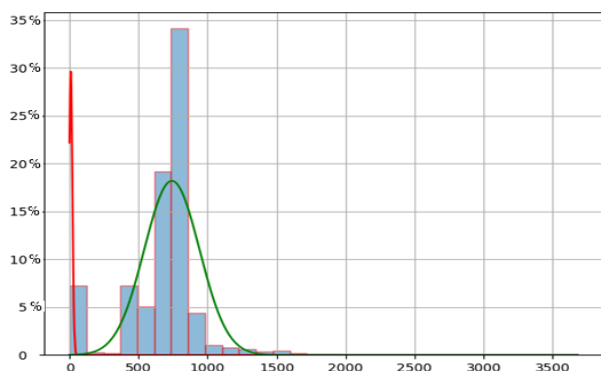


Рис. 27. Аппроксимация гистограммы загрузки процессора двумя нормальными распределениями

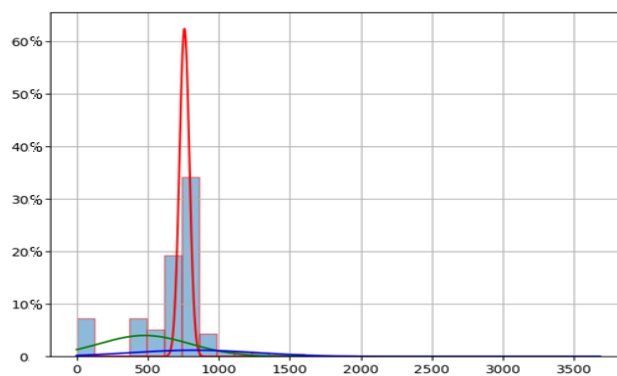


Рис. 28. Аппроксимация гистограммы загрузки процессора тремя нормальными распределениями

Исходя из результатов анализа аппроксимации гистограмм загрузки процессора несколькими выбранными параметрами смешанных распределений, можно констатировать, что наиболее информативна аппроксимация гистограмм наблюдаемых метрик параметров сетевых устройств, с двумя нормальными распределениями. При этом вычислительный эксперимент проводился на гистограммах статистики недельной загрузки процессора сервера виртуализации двумя и тремя нормальными распределениями по смешанной гауссовской модели *ЕМ*-алгоритмом. Гистограммы были получены при тех же исходных данных, используемых для установления оптимальной величины окна для расчёта энтропии сдвигов (таблицы 6 и 7).

Как видно из рис. 27 и 28, использование в модели предобработки временных рядов энтропии сдвигов обеспечивает «разнесение» распределений, моделирующих виды технического состояния ОК, что позволяет провести более точную их классификацию. При этом на рис. 27 хорошо видно, что две компоненты (зеленая и красная кривые) обеспечивают более точную классификацию технического состояния сетевого элемента, нежели три (зеленая, красная и синяя кривые) на рис. 28. Вычислительный эксперимент проводился на параметрах тактах загрузки процессора.

15. Модельный пример прогнозирования вида технического состояния объекта контроля с использованием скрытой марковской модели

Для превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций, заключающейся в виде изменения четырех состояний: «исправное», «работоспособное», «предотказное», «опасное» необходимо получить первичные значения для матрицы переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$ и вектора начального распределение вероятностей состояний $\pi = \{\pi_i\}$, а также последовательность скрытых состояний S_t^* . Порядок расчета этих параметров представлен в алгоритме рис. 14.

Для демонстрации эволюции процесса идентификации параметров модели $\lambda^L = (A, \{B_1, B_2, \dots, B_N\}, \pi)$, описывающей работоспособность устройства рассмотрим два шага.

На первом шаге, были получены первичные значения для матрицы переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$ и вектора начального распределение вероятностей состояний $\pi = \{\pi_i\}$, а также последовательность скрытых состояний устройства (всего четыре состояния) S_t^* .

Значения первичных параметров модели, а также результаты их перерасчета приведены на рис. 29 и 30.

Полученная последовательность изменения скрытых состояний анализируемого устройства после первого шага приведена на рис. 31.

На втором шаге, были пересчитаны значения матрицы переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$ и вектора начального распределение вероятностей состояний $\pi = \{\pi_i\}$, а также последовательность скрытых состояний анализируемого устройства S_t^* .

Значения матрицы A до идентификации

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]
[1,]	0.07692308	0.15384615	0.7692308	0.00000000
[2,]	0.21428571	0.07142857	0.7142857	0.00000000
[3,]	0.11428571	0.15714286	0.6857143	0.04285714
[4,]	0.00000000	0.00000000	1.0000000	0.00000000

Значения матрицы A после идентификации:

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]
[1,]	9.998000e-05	9.998000e-05	0.0001483836	0.999651656
[2,]	9.998013e-05	9.998013e-05	0.2219311926	0.777868847
[3,]	1.847464e-03	9.954936e-01	0.0001143400	0.002544568
[4,]	9.999455e-05	5.685527e-01	0.4131854786	0.018161868

Рис. 29. Значения матрицы переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$

Значения вектора начального распределение вероятностей состояний π до идентификации:

[1] 1 0 0 0

Значения вектора начального распределение вероятностей состояний π после идентификации:

[1] 0.0002520815 0.0002520815 0.9853705229 0.0141253142

Рис. 30. Значения вектора начального распределение вероятностей состояний $\pi = \{\pi_i\}$

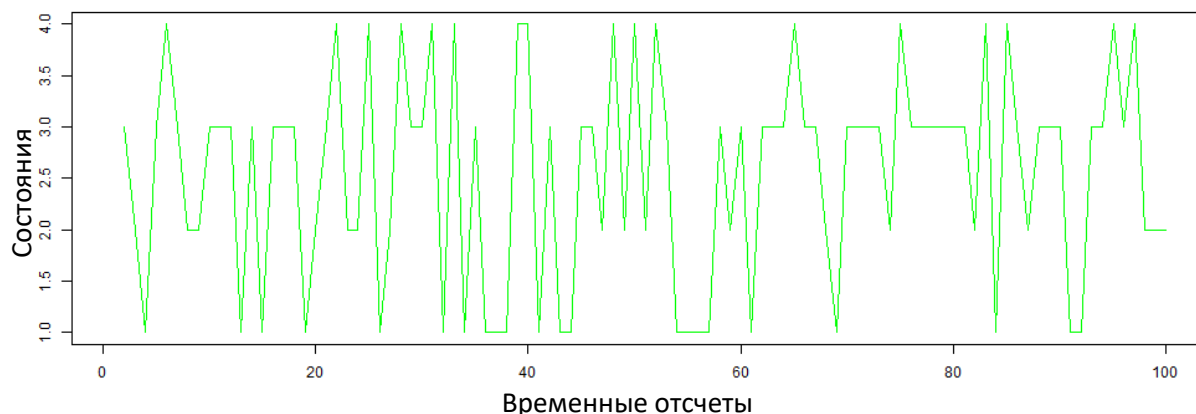


Рис. 31. Последовательность изменения скрытых состояний S_t^* анализируемого устройства

Полученные результаты перерасчета параметров приведены на рис. 32, 33.

Значения матрицы A до идентификации

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]
[1,]	0.07692308	0.15384615	0.7692308	0.00000000
[2,]	0.21428571	0.07142857	0.7142857	0.00000000
[3,]	0.11428571	0.15714286	0.6857143	0.04285714
[4,]	0.00000000	0.00000000	1.0000000	0.00000000

Значения матрицы A после идентификации:

	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]
[1,]	9.997001e-05	9.997001e-05	9.997001e-01	9.997001e-05
[2,]	9.997001e-05	9.997001e-05	9.997001e-05	9.997001e-01
[3,]	9.997001e-05	9.997001e-05	9.997001e-05	9.997001e-01
[4,]	9.997001e-05	9.997001e-01	9.997001e-05	9.997001e-05

Рис. 32. Значения матрицы переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$

Значения вектора начального распределение вероятностей состояний P_i до идентификации:

[1] 1 0 0 0

Значения вектора начального распределение вероятностей состояний P_i после идентификации:

[1] 1.000000e+00 7.626288e-18 7.626288e-18 7.626288e-18

Рис. 33. Значения вектора начального распределение вероятностей состояний $\pi = \{\pi_i\}$

Полученная последовательность скрытых состояний анализируемого устройства после второго шага приведена на рис. 34.

На рис. 31 и 34 состояния 1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 соответствуют видам технического состояния «исправное», «работоспособное», «предотказное», «опасное» (по ГОСТ 27.002-2015 [14]).

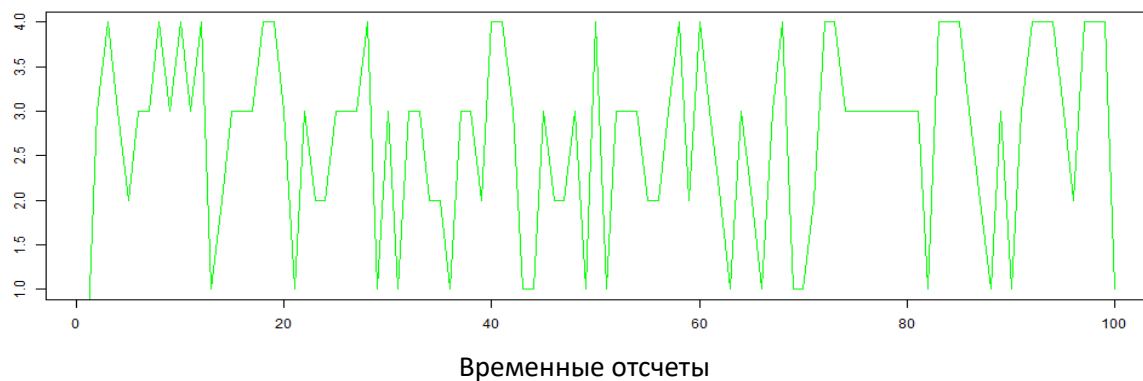


Рис. 34. Последовательность скрытых состояний S_t^* анализируемого устройства

Заключение

В результате выполненного исследования можно сформулировать следующие основные выводы.

1. На основе эволюции систем контроля и диагностики в работе рассмотрены более прогрессивные стратегии управления надежностью элементов сети и ИТКС в целом по фактическому их техническому состоянию и прогнозируемому обслуживанию. Обоснованы термины «профилактический допуск» на телекоммуникационное оборудование и «усеченный конус прогноза» (превентивной идентификации) отказа подсистемы интеллектуального мониторинга, без которых повышать точность и достоверность прогнозирования возникновения на технике связи постепенных отказов весьма затруднительно.
2. Проведённый в работе обзор научно-методического аппарата анализа временных рядов с целью превентивной идентификации вида технического состояния сетевых элементов (класса состояния ИТКС) показал, что каждый из рассмотренных методов имеет недостатки и достоинства. Активное использование в различных отраслях науки временных рядов с анализом регулярных периодических компонент, позволяет реализовать решение задач прогноза, что подтверждает актуальность проводимых исследования и важность на основе созданной модели превентивной идентификации отказов, позволяющей учитывать данные компоненты и отвечающей свойствам:
 - инвариантности, как к обрабатываемым метрикам параметров сетевых устройств, так и к разнородным (гетерогенным) элементам ИТКС в рамках рассматриваемого класса процессов прогноза их технического состояния;
 - способности регуляризовать временной ряд по малому числу наблюдаемых подсистемой мониторинга параметров;
 - учета взаимосвязи сечений (корреляцию параметров) как на тренде (компоненте) центрированного случайного процесса, так и на интервале его периодичности;

- возможности теоретического обоснования выбора и применения оптимизационного алгоритма прогноза.
- 3. Предложена общая модель превентивной идентификации отказов объекта контроля, состоящая из двух частных: усовершенствованной кумулятивной модели отказа типа «параметр – поле допуска» и модифицированной вероятностно-графовой модели идентификации и прогнозирования отказа.
- 4. Новизна данных частных моделей состоит в том, что в отличие от существующих, они учитывают не только области нормального функционирования и полного отказа, но также области предотказа и параметрического (скрытого отказа), что позволяет не допустить функционального отказа, вызывающего простаивание сетевого оборудования.
- 5. На основе использования методов символьной динамики для выявления в кодовой комбинации анализируемого временного ряда «запрещённых» кодов, идентифицирующих развитие предотказного технического состояния и аварии, используется оценка энтропии кода, а для обучения классификатора вида технического состояния применяется процедура *ЕМ*-алгоритма, когда на каждом *Е*-шаге вычисляют текущие вероятности принадлежности точек временного ряда той или иной компоненте распределения вероятностей энтропии виду состояния, а на каждом *М*-шаге находят новые оценки параметров энтропии путём максимизации нижней оценки логарифмической функции правдоподобия, полученной из условия её выпуклости путём применения неравенства Йенсена с подстановкой соответствующих параметров, вычисленных на предыдущем *Е*-шаге.
- 6. Разработанная общая модель превентивной идентификации отказов позволяет обосновать пороги эксплуатационных и профилактических допусков на контролируемые параметры с учетом ошибок контроля первого и второго рода в интересах прогнозного обслуживания, а также получать аналитические зависимости для нахождения вероятности каждого вида технического состояния объекта контроля и финальных вероятностей для состояний системы в целом с учетом ошибок прогнозирования первого и второго рода.
- 7. Процедура выявления запрещённых кодовых комбинаций в описании временного ряда и разграничения наблюдаемых процессов использует соответствие основным законам распределений:
 - для стационарного характера сетевого оборудования (техническое состояние «работоспособное») параметров потока ИИ – нормальный (гауссовский), равномерный и гамма-распределение;
 - для нестационарного (техническое состояние «предотказное», «опасное» и «неработоспособное») – пуассоновский, Вейбула, Парето, экспоненциальное, биномиальное (дискретное) распределения.

8. Предложенные общая и частные модели должны лечь в основу создания подсистем мониторинга нового поколения, на основе прогнозного контроля разрабатываемых в настоящее время систем, сетей и устройств телекоммуникаций.

Литература

1. Винограденко А. М. Прогнозирование отказов контролируемых комплексов связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 222-237. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10308.
2. РД 26.260.004-91 Руководящий документ. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.
3. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалецкий А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. Радио, 1974. 224 с.
4. Абрамов О. В. Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3 (31). С. 5-14. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-1.
5. Ажмухамедов И. М., Гостюнин Ю. А. Выбор стратегии технического обслуживания и ремонта оборудования сетей связи на предприятиях нефтегазового комплекса // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. С. 74-83.
6. Современные стратегии технического обслуживания и ремонта // galaktika.ua: Корпорация Галактика [Электронный ресурс]. URL: galaktika.ua/eam/sovremennye-strategii-toir.html (дата обращения 20.05.2025).
7. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высшая школа, 1982. 231 с.
8. Черкесов Г. Н. Надежность программно-аппаратных комплексов. СПб.: Питер, 2005. 479 с.
9. Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 (в ред. от 15.02.2024 № 124) «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года») // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения 15.05.2025).
10. Аллакин В. В., Будко Н. П., Васильев Н. В. Общий подход к построению перспективных систем мониторинга распределенных информационно-телекоммуникационных сетей // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 125-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-125-227.
11. Абрамов О. В. Функционально-параметрическое направление теории рисков: возможности и перспективы // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2016. № 4 (188). С. 96-101.
12. Гришин В. В., Шаулов В. А., Галяутдинов Д. Н. Стратегия «гарантированного управления» надежностью радиоэлектронных систем информационного обмена с космическими аппаратами // Научно-техническая

конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посв. Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 23-25.

13. ГОСТ Р 27.015-2019. Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по проектированию надежности систем. М.: Стандартинформ. 2020. 44 с.

14. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2016. 30 с.

15. Будко П. А., Кулешов И. А., Курносов В. И., Мирошников В. И. Инфокоммуникационные сети: энциклопедия. Книга 4: Гетерогенные сети связи: принципы построения, методы синтеза, эффективность, цена, качество / Под ред. проф. В.И. Мирошникова. – М.: Наука, 2020. – 683 с.

16. Будко П. А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2012. 512 с.

17. Винограденко А. М. Методология интеллектуального контроля технического состояния автоматизированной системы связи специального назначения. СПб.: Научноёмкие технологии, 2020. 180 с.

18. Козырев Г. И., Полончик О. Л. Методы контроля функционирования радиоэлектронных средств. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 80 с.

19. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

20. Николашин Ю. Л., Мирошников В. И., Будко П. А., Затуливетер Ю. С., Семенов С. С. Общий подход к формированию единого информационно-управляющего пространства морской компоненты Вооруженных Сил Российской Федерации. Часть II. Принципы формирования сильносвязной телекоммуникационной подсистемы единого информационно-управляющего пространства Военно-морского флота России // Морская радиоэлектроника. 2015. № 1 (51). С. 22-28.

21. Будко П. А., Груздев А. А., Шаталов А. Е., Шмидт А. А. Модель формирования системы интеллектуального мониторинга состояния информационно-телекоммуникационной сети Росморречфлота // Морская радиоэлектроника. 2024. № 2 (88). С. 20-27.

22. Зацаринный А. А., Шабанов П. А. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. – 232 с.

23. Абрамов О. В. Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3 (53). С. 55-66. DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66.

24. Пенин П. И. Системы передачи цифровой информации. М.: Сов. Радио, 1976. 368 с.

25. Фомин А. В., Борисов В. Ф., Чермошенский В. В. Допуски в РЭА. – М.: Сов. Радио, 1973. – 128 с.

26. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жуков Г. А. Основные направления модернизации декаметрового системы связи // Техника средств связи. 2019. № 1 (145). С. 13-25.

27. Арсланов Х. А., Абрамович А. В., Лихачёв А. М. Концептуальные основы развития Объединённой цифровой автоматизированной системы связи Вооружённых Сил Российской Федерации // Связь в Вооружённых Силах Российской Федерации. 2014. С. 18-24.

28. Военные системы радиосвязи. Часть 1. Теоретические основы построения средств и комплексов военной радиосвязи / Под ред. В. В. Игнатова. – Л. ВАС, 1989. – 386 с.

29. Аллакин В. В., Голунов М. В. Анализ научно-методического аппарата удаленного мониторинга технического состояния информационно-телекоммуникационных сетей и систем // Техника средств связи. 2020. № 4 (152). С. 17-37.

30. Рекомендация ITU-R F.1487-2000. Тестирование КВ-модемов с полосой пропускания до 12 кГц и использованием имитаторов ионосферных каналов. МСЭ-R. 2000. 11 с.

31. Панин Р. С., Путилин А. Н., Хвостунов Ю. С. Использование частотного ресурса системой декаметрового связи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 2-13.

32. Дедков В. К. Прогностика и косвенное прогнозирование надежности технических объектов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество» в 2-х томах (Пермь, 25-31 мая 2009 г.). – Пермь: ГОУ ВПО «Пермский гос. ун-т», 2009. Т. 1. С. 108-110.

33. Агеев С. А., Агеева Н. С., Гладких А. А., Каретников В. В. Метод и алгоритмы подсистемы оперативной поддержки принятия решений для управления техническим состоянием судового комплекса связи // Автоматизированные системы управления. 2024. № 2 (76). С. 32-42.

34. ГОСТ Р 27.303-2021. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ. 2021. 66 с.

35. Винограденко А. М., Меженев А. В., Будко Н. П. К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 30-44. DOI: 10.24411/2409-5419-201810293.

36. Легков К. Е., Буренин А. Н., Емельянов А. В. Основные показатели качества функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Информация и Космос. 2017. № 2. С. 58-64.

37. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 479 с.

38. Абрамов О. В., Здор В. В., Супоня А. А. Допуски и номиналы систем управления. Москва. Наука. 1976. 160 с.

39. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972. 424 с.

40. Федоренко В. В., Будко П. А. Расчет эксплуатационных допусков на параметры каналообразующей аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 3-4. С. 55-60.
41. Будко П. А., Винограденко А. М., Меженев А. В., Заремба В. Е. Метод адаптивного интеллектуального контроля технического состояния радиоэлектронных систем // Техника средств связи. 2019. № 4 (148). С. 59-69.
42. Abramov O. V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77. № 4. P. 594-603.
43. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. – 476 с.
44. Borgonovo E. A new uncertainty importance measure // Reliability Engineering & System Safety. 2007. Vol. 6 (92). P. 771-784.
45. Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В. Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радицентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 204-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.
46. Акуленко Л. Д., Шматков А. М. Оптимальное по быстродействию приведение динамического объекта на поверхность эллипсоида в многомерном пространстве // Доклады академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 29-33.
47. Винограденко А. М. Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния РТК // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 53-60. DOI: 10.31776/RTCJ.6306.
48. Abramov O. V, Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability // Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability. 2016. P. 91-94.
49. Filippova T. F., Berezina E. V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2008. Vol. 4818. P. 326-333.
50. Расин Д. Непараметрическая эконометрика: вводный курс // Квантиль. 2008. № 4. С. 7-56.
51. Louis A. L. Maximum Likelihood Estimation for Multivariable Observations of Markov Sources // IEEE transactions on information theory. 1982. Vol. IT-28. № 5. P. 729-734.
52. Juang B.-H. Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariable Stochastic Observations of Markov Chains // AT&T Technical Journal. 1985. Vol. 64. № 6. P. 1235-1248.
53. Blomer J., Bujna K. Simple methods for initializing the EM algorithm for Gaussian mixture models // Computing Research Repository. 2013. Vol. abs/1312.5946.

54. Baudry J.-P., Celeux G. EM for Mixtures // Statistics and Computing. 2015. № 25 (4). P. 713–726.

55. Полянский И. С., Логинов К. О. К вопросу оценки интенсивности межличностной коммуникации пользователей социальной сети // XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – 430 с.

56. Liang P., Klein D. Online EM for unsupervised models // Proceedings of Human Language Technologies: The 2009 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (Boulder, Colorado, 31 May 2009). Boulder. 2009. P. 611-619.

57. Aggarwal C. C., Han J., Wang J., Yu P. S. A framework for clustering evolving data streams // Proceedings of the 29th international conference on Very large data bases (VLDB'03). (Berlin, September 2003). Berlin. 2003. P. 81-92.

58. Королев В. Ю. Вероятностно-статистический анализ хаотических процессов с помощью смешанных гауссовских моделей. Декомпозиция волатильности финансовых индексов и турбулентной плазмы. – М.: Изд-во ИПИ РАН, 2007. 343 с.

59. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

60. Крюков О. В., Щербаков В. С. Метод параметрической идентификации трафика на ограниченном интервале наблюдения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 4. С. 9-18.

61. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2021. 46 с.

62. Recommendation ITU-T M.3703 Common management services – Alarm management – Protocol neutral requirements and analysis. International Telecommunication Union. Telecommunication Standardization Sector of ITU. 06/2010. 78 p.

63. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 200 с.

64. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990. 126 с. DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66.

65. Абрамкин Р. В., Винограденко А. М., Слепов С. Н., Дросс В. А. Оптимизация профилактических допусков в сложных технических системах // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 6. С 18-25. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-18-25.

66. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Методы и средства интеллектуальной поддержки прогноза технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. 2022. № 4 (74). С. 54-63. DOI: 10.22250/18142400-2022-4-54.

67. Будко П. А., Федоренко В. В. Управление в сетях связи. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2003. – 228 с.

68. Сикарев А. А., Соболев В. В. Функционально устойчивые демодуляторы сложных сигналов. – М.: Радио и связь, 1988. – 244 с.

69. Федоренко В. В., Будко П. А., Власов В. И. Анализ достоверности функционального диагностирования формирователей сигналов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1996. № 3. С. 24-31.

70. Kotenko I. V., Saenko I. B., Budko P. A., Vinogradenko A. M. An Approach for Intelligent Evaluation of the State of Complex Autonomous Objects Based on the Wavelet Analysis // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. 2019. Vol. 318. P. 25-38. DOI: 10.3233/FAIA190036.

71. Kotenko I. V., Saenko I. B., Vinogradenko A. M., Budko N. P. Intelligent State Assessment of Complex Autonomous Objects Based on Wavelet Analysis // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol. 126. P. 106869. 20 p. [электронный ресурс] URL: www.elsevier.com/locate/engappai 1-s2.0-S0952197623010539-main.pdf (дата обращения 18.05.2025).

72. Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В. Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радиопункта за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 204-227. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.

73. Аллакин В. В., Будко П. А., Голунов М. В., Буцанец А. А., Каретников В. В. Способ функционального контроля средств радиосвязи автоматизированного радиопункта // Патент России № 2791715. 2023. Бюл. № 8.

74. ГОСТ РВ 0027-011-2008. Надежность военной техники. Система технического обслуживания. Общий порядок задания требований и оценки их выполнения. М.: Стандартинформ. 2009. 15 с.

75. Будко П. А., Фомин Л. А., Гайчук Д. В. Принципы организации и планирования сетей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2003. Т. № 5. С. 87-90.

76. Будко П. А., Чихачев А. В., Баринев М. А., Винограденко А. М. Принципы организации и планирования сильносвязной телекоммуникационной среды сил специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С. 8-12.

77. Будко П. А., Винограденко А. М., Меженев А. В., Чикирев А. А. Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108.

78. Будко П. А., Винограденко А. М., Будко П. А., Дорошенко Г. П., Рожнов А. В., Минеев В. В., Мухин А. В. Способ распределенного контроля и адаптивного управления многоуровневой системой и устройство для его осуществления // Патент России № 2450335. 2012. Бюл. № 13.

79. Будко П. А., Дорошенко Г. П., Ершов Г. А., Мухин А. В., Будко П. А. Реализация метода распределенного контроля и адаптивного управления многоуровневой системой // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 3. С. 65-73.

80. Будко П. А., Жуков Г. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К. Определение аварийного состояния морского робототехнического комплекса по многоэтапной процедуре контроля на основе использования вейвлет-преобразований // Морская радиоэлектроника. 2016. № 4 (58). С. 20-23.

81. Будко Н. П. Сокращение объема измерительной информации на основе интеллектуального подхода к построению подсистемы мониторинга информационно-телекоммуникационной системы // Техника средств связи. 2021. № 1 (153). С. 86-97.

82. Пузанков Д. В., Мирошников В. И., Пантелеев М. Г., Серегин А. В. Интеллектуальные агенты, многоагентные системы и семантический Web: концепции, технологии, приложения. – СПб.: ООО «Технолит», 2008. – 292 с.

83. Будко П. А., Линец Г. И., Мухин А. В., Фомин Л. А. Эффективность, цена и качество информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. 420 с.

84. Фомин Л. А. Оптимизация ошибок при двухэтапной процедуре контроля // Автоматизация и вычислительная техника. 1975. № 3. С. 34-37.

85. Ключев В. В., Соснин Ф. Р. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

86. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Оценка объема управляющей информации в информационных сетях // Электросвязь. 2000. № 6. С. 34-36.

87. Будко П. А., Винограденко А. М., Кузнецов С. В., Гойденко В. К. Реализация метода многоуровневого комплексного контроля технического состояния морского робототехнического комплекса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4 С. 71-101. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/04-Budko.pdf>.

88. Васильев Н. В., Забродин О. В., Яшин А. И. Автоматизированный программный комплекс оценки качества обслуживания в телекоммуникационной сети // Техника средств связи. 2018. № 3 (143). С. 56-61.

89. Витяев Е. Е., Дергилев А. И., Чадаева И. В., Васикин Ю. Ю., Спицина А. М., Кулакова Е. В., Вишневский О. В., Орлов Ю. Л. Поиск регулярных контекстных сигналов в геномной ДНК // Сб. научн. трудов конференции «Информатика-2016» (Москва, 24-29 апреля 2016 г.). – М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2016. – С. 52-62.

90. Бенхэм К. Д., Бенхэм К. Дж., Блэйсделл Б. Э. Математические методы для анализа последовательностей ДНК – М.: Мир, 1999. – 349 с.

91. Ульянов М. В., Сметанин Ю. Г. Об одном характеристическом функционале слов над конечным алфавитом // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 5. С. 333-341.

92. Седякин И. Ульянов М. В. Эффективный по времени алгоритм расчета обобщенной энтропии двумерных слов методом скользящего окна // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 3. С. 560-566.

93. Петрушин В. Н., Ульянов М. В., Чертихина И. А., Никульчев Е. В. Бикритериальный метод построения и оценки качества гистограмм // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 4. С. 22-31.

94. Lind D., Marcus B. An introduction to symbolic dynamics and coding. Cambridge. UK. Cambridge University Press, 1995. 495 p.

95. Holleczeck T. Statistical Analysis of IP Performance Metrics in International Research and Educational Networks // Nuremberg. ETSI. 2008. P. 105-114.

References

1. Vinogradenko A. M. Prediction of failures of controlled special-purpose communication systems. *System of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 222-237 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10308.

2. RD 26.260.004-91. *Rukovodyashchij dokument. Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii* [Guidance Document. Methodological guidelines. Forecasting the remaining life of the equipment by changing the parameters of its technical condition during operation]. (in Russian).

3. Gaskarov D. V., Golinkevich T. A., Mozgalevskij A. V. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoj apparatury* [Prediction of technical condition and reliability of avionics]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1974. 224 p. (in Russian).

4. Abramov O. V. *Prognozirovanie sostoyaniya i planirovanie e'kspluatatsii sistem otvetstvennogo naznacheniya* [Forecasting the condition and planning of operation of responsible systems]. *Reliability & Quality of Complex System*, 2020, no. 3 (31), pp. 5-14 (in Russian). DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-1.

5. Azhmuxamedov I. M., Gostyunin Yu. A. *Vy`bor strategii texnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya setej svyazi na predpriyatiyax neftegazovogo kompleksa* [Choosing a strategy for the maintenance and repair of communication network equipment at oil and gas enterprises]. *Engineering Journal of Don*, 2017, no. 2, pp. 74-83 (in Russian).

6. *Sovremennye strategii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta* [Modern maintenance and repair strategies]. Korporaciya Galaktika. Available at: galaktika.ua/eam/sovremennye-strategii-toir.html (accessed 20 May 2025) (in Russian).

7. Barzilovich E. Yu. *Modeli texnicheskogo obsluzhivaniya slozhny`x system* [Maintenance models for complex systems]. Moscow. Higher School Publishing House, 1982. 231 p. (in Russian).

8. Cherkesov G. N. *Nadezhnost` programmno-apparatny`x kompleksov* [Reliability of software and hardware complexes]. St. Petersburg, Piter Publ., 2005. 479 p. (in Russian).

9. *Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii* [Decree of the President of the Russian Federation] No. 490 dated 10.10.2019 «*O razvitii iskusstvennogo intellekta v Rossijskoj Federacii*» (vmeste s «*Nacional'noj strategiej razvitiya iskusstvennogo*

intellekta na period do 2030 goda») [«On the development of artificial intelligence in the Russian Federation» (together with the «National Strategy for the Development of Artificial Intelligence for the period up to 2030»)]. *Spravochno-pravovaya sistema «Konsul'tantPlyus»* [ConsultantPlus legal reference system]. Available at: www.consultant.ru (accessed 15 May 2025) (in Russian).

10. Allakin V. V., Budko N. P., Vasiliev N. V. A general approach to the construction of advanced monitoring systems for distributed information and telecommunications networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 125-227 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-125-227.

11. Abramov O. V. *Funkcional'no-parametricheskoe napravlenie teorii riskov: vozmozhnosti i perspektivy`* [Functional-parametric direction of risk theory: opportunities and prospects]. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 4 (188), pp. 96-101 (in Russian).

12. Grishin V. V., Shaulov V. A., Galyautdinov D. N. *Strategiya «garantirovannogo upravleniya» nadezhnost'yu radioelektronny`x sistem informacionnogo obmena s kosmicheskimi apparatami* [The strategy of «guaranteed management» of the reliability of electronic information exchange systems with spacecraft]. *Nauchno-texnicheskaya konferenciya Sankt-Peterburgskogo NTO RE'S im. A.S. Popova, posvyashchennaya Dnyu radio*, 2024, no. 1 (79), pp. 23-25 (in Russian).

13. State Standard R 27.015-2019. *Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Rukovodstvo po proektirovaniyu nadezhnosti sistem* [Reliability in engineering. Reliability management. System Reliability Design Guide]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 44 p. (in Russian).

14. State Standard 27.002-2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 30 p. (in Russian).

15. Budko P. A., Kuleshov I. A., Kurnosov V. I., Miroshnikov V. I. *Infokommunikacionny`e seti: e`nciklopediya. Kniga 4: Geterogenny`e seti svyazi: principy` postroyeniya, metody` sinteza, e`ffektivnost`, cena, kachestvo* [Infocommunication networks: an encyclopedia. Book 4: Heterogeneous communication networks: principles of construction, synthesis methods, efficiency, price, quality]. Moscow, Science Publ., 2020. 683 p. (in Russian).

16. Budko P. A. *Upravlenie resursami informacionno-telekommunikacionny`x sistem. Metody` optimizatsii* [Resource management of information and telecommunication systems. Optimization methods]. St. Petersburg, Military Academy of Communications Publ., 2012. 512 p. (in Russian).

17. Vinogradenko A. M. *Metodologiya intellektual'nogo kontrolya texnicheskogo sostoyaniya avtomatizirovannoj sistemy` svyazi special'nogo naznacheniya* [Methodology of intelligent control of the technical condition of a special-purpose automated communication system]. St. Petersburg, Naukoyomkie tekhnologii Publ., 2020. 180 p. (in Russian).

18. Kozyrev G. I., Polonchik O. L. *Metody kontrolya funkcionirovaniya radioelektronnykh sredstv* [Methods of monitoring the functioning of electronic devices]. St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky Publ., 2016. 80 p. (in Russian).

19. Oxtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellectualnye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoj dinamikoj slozhnykh tekhnicheskix ob`ektov* [Intelligent technologies for monitoring and managing the structural dynamics of complex technical facilities]. Moscow, Science Publ., 2006. 410 p. (in Russian).

20. Nikolashin Yu. L., Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zatuliveter Yu. S., Semenov S. S. Common way of looking at the unified information management space for the maritime component of the Russian Federation Armed Forces. Part II. The principles of strongly communicative telecommunication subsystem formation for the Russian Navy unified information control space. *Marine Radio Electronics*, 2015, no. 1 (51), pp. 22-28 (in Russian).

21. Budko P. A., Gruzdev A. A., Shatalov A. E., Shmidt A. A. *Model formirovaniya sistemy intelektualnogo monitoringa sostoyaniya informacionno-telekommunikacionnoj seti Rosmorrechflota* [A model for the formation of an intelligent monitoring system for the state of the Rosmorrechflot information and telecommunications network]. *Marine Radio Electronics*, 2024, no. 2 (88), pp. 20-27 (in Russian).

22. Zaczarinnyj A. A., Shabanov P. A. *Texnologiya informacionnoj podderzhki deyatel'nosti organizacionnykh sistem na osnove situacionnykh centrov* [Technology of information support of organizational systems based on situational centers]. Moscow, Torus Press, 2015. 232 p. (in Russian).

23. Abramov O. V. Planning of preventive corrections of parameters of engineering devices and systems. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2017, no. 3 (53), pp. 55-66 (in Russian). DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66.

24. Penin P. I. *Sistemy peredachi cifrovoj informacii* [Digital information transmission systems]. Moscow, Soviet Radio publ., 1976. 368 p. (in Russian).

25. Fomin A. V., Borisov V. F., Chermoshenskij V. V. *Dopuski v REA* [Tolerances in avionics]. Moscow, Soviet Radio publ., 1973. 128 p. (in Russian).

26. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zhukov G. A. *Osnovnye napravleniya modernizacii dekametrovoj sistemy svyazi* [The main directions of modernization of the decameter communication system]. *Means of Communication Equipment*, 2019, no. 1 (145), pp. 13-25 (in Russian).

27. Arslanov X. A., Abramovich A. V., Lixachyov A. M. *Konceptualnye osnovy razvitiya Ob`edinyonnoj cifrovoj avtomatizirovannoj sistemy svyazi Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii* [Conceptual foundations of the development of the Unified Digital Automated Communications System of the Armed Forces of the Russian Federation]. *Svyaz v Vooruzhennykh Silax Rossijskoj Federacii*, 2014, pp. 18-24 (in Russian).

28. *Voennyje sistemy radiosvyazi. Chast 1. Teoreticheskie osnovy postroeniya sredstv i kompleksov voennoj radiosvyazi* [Military radio communication systems.

Part 1. Theoretical foundations of the construction of military radio communication facilities and complexes]. Leningrad, Military Academy of Communications Publ., 1989. 386 p. (in Russian).

29. Allakin V. V., Goryunov M. V. Analysis of scientific and methodological apparatus for remote monitoring of the technical state of information and telecommunication networks and systems. *Means of Communication Equipment*, 2020, no. 4 (152), pp. 17-37 (in Russian).

30. Recommendation ITU-R F.1487 Testing of HF Modems with Bandwidths of Up to About 12 kHz Using Ionospheric Channal Simulators, 2000. Available at: <https://www.itu.int> (accessed 20 May 2025) (in Russian).

31. Panin R. S., Putilin A. N., Khvostunov Yu. S. Use of frequency resource by decimeter communication system in pseudorandom operation frequency tuning mode. *Means of Communication Equipment*, 2020, no. 3 (151), pp. 2-13 (in Russian).

32. Dedkov V. K. *Prognostika i kosvennoe prognozirovanie nadezhnosti texnicheskix ob`ektov* [Forecasting and indirect forecasting of reliability of technical facilities]. *Trudy` mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost` i kachestvo»*. (Perm`, Perm State University, 25-31 May 2009), 2009, Vol. 1, pp. 108-110 (in Russian).

33. Ageev S. A., Ageeva N. S., Gladkix A. A., Karetnikov V. V. *Metod i algoritmy` podsystemy` operativnoj podderzhki prinyatiya reshenij dlya upravleniya texnicheskim sostoyaniem sudovogo kompleksa svyazi* [The method and algorithms of the subsystem of operational decision support for managing the technical condition of the ship's communications complex]. *Avtomatizirovanny`e sistemy` upravleniya*, 2024, no. 2 (76), pp. 32-42 (in Russian).

34. State Standard R 27.303-2021. Reliability in technology. Analysis of the types and consequences of failures. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 66 p. (in Russian).

35. Vinogradenko A. M., Mezhenov A. V., Budko N. P. To the question of substantiation of the conceptual apparatus of nondestructive express control of technical condition equipment of communication system and aerodrome radio engineering support. *H&ES Research*, 2019, Vol. 11, no. 6, pp. 30-44 (in Russian). DOI: 10.24411/2409-5419-201810293

36. Legkov K. E., Burenin A. N., Emel`yanov A. V. *Osnovny`e pokazateli kachestva funkcionirovaniya informacionny`x podsystem avtomatizirovanny`x sistem upravleniya slozhny`mi organizacionno-texnicheskimi ob`ektami* [The main indicators of the quality of functioning of information subsystems of automated control systems for complex organizational and technical facilities]. *Information and Space*, 2017, no. 2, pp. 58-64 (in Russian).

37. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy` teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg, BXV-Peterburg Publ., 2006. 479 p. (in Russian).

38. Abramov O. V., Zdor V. V., Suponya A. A. *Dopuski i nominaly` sistem upravleniya* [Tolerances and ratings of control systems]. Moscow, Science Publ., 1976. 160 p. (in Russian).

39. Evlanov L. G. *Kontrol` dinamicheskix system* [Dynamic systems control]. Moscow, Main edition of physical and mathematical literature of the publishing house "Science", 1972. 424 p. (in Russian).
40. Fedorenko V. V., Budko P. A. *Raschet e`kspluatacionny`x dopuskov na parametry` kanaloobrazuyushhej apparatury`* [Calculation of operational tolerances for channel-forming equipment parameters]. *Journal of the Universities. Radioelectronics*, 2000, Vol. 43, no. 3-4, pp. 55-60 (in Russian).
41. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Mezhenov A. V., Zaremba V. E. Method of adaptive intellectual control of technical condition of radio-electronic systems. *Means of Communication Equipment*, 2019, no. 4 (148), pp. 59-69 (in Russian).
42. Abramov O. V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*, 2016, Vol. 77, no. 4, pp. 594-603.
43. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevny`j sintez informacionno-telekommunikacionny`x sistem. Matematicheskie modeli i metody` optimizacii* [Multilevel synthesis of information and telecommunication systems. Mathematical models and optimization methods]. St. Petersburg, Military Academy of Communications Publ., 2011. 476 p. (in Russian).
44. Borgonovo E. A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, Vol. 6 (92), pp. 771-784.
45. Budko P. A., Golyunov M. V., Allakin V. V. Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 204-227 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.
46. Akulenko L. D., Shmatkov A. M. *Optimal`noe po by`strodejstviyu privedenie dinamicheskogo ob`ekta na poverxnost` e`llipsoida v mnogomernom prostranstve* [Optimal speed reduction of a dynamic object to the surface of an ellipsoid in a multidimensional space]. *Doklady Akademii Nauk*, 2017, Vol. 477, no. 1, pp. 29-33 (in Russian).
47. Vinogradenko A. M. *E`llipsoidal`naya approksimaciya oblastej parametriceskoj neopredelennosti texnicheskogo sostoyaniya RTK* [Ellipsoidal approximation of the areas of parametric uncertainty of the technical condition of the robotic complex]. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, no. 3 (20), pp. 53-60 (in Russian). DOI: 10.31776/RTCJ.6306.
48. Abramov O. V., Nazarov D. A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability. *Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*, 2016, pp. 91-94.
49. Filippova T. F., Berezina E. V. On state estimation approaches for uncertain dynamical systems with quadratic nonlinearity: theory and computer simulations. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, vol. 4818, pp. 326-333.

50. Rasin D. *Neparametricheskaya e`konometrika: vvodny`j kurs* [Nonparametric Econometrics: an introductory course]. *Kvantil`*, no. 4, pp. 7-56 (in Russian).
51. Louis A. L. Maximum Likelihood Estimation for Multivariable Observations of Markov Sources. *IEEE transactions on information theory*, 1982, Vol. IT-28, no. 5, pp. 729-734.
52. Juang B.-H. Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariable Stochastic Observations of Markov Chains. *AT&T Technical Journal*, 1985, Vol. 64, no. 6, pp. 1235-1248.
53. Blomer J., Bujna K. Simple methods for initializing the EM algorithm for Gaussian mixture models. *Computing Research Repository*, 2013, Vol. abs/1312.5946.
54. Baudry J.-P., Celeux G. EM for Mixtures. *Statistics and Computing*, 2015, no. 25 (4), pp. 713–726.
55. Polyanskij I. S., Loginov K. O. *K voprosu ocenki intensivnosti mezhlichnostnoj kommunikacii pol`zovatelej social`noj seti* [On the issue of assessing the intensity of interpersonal communication of social network users]. *XI Vserossijskaya nauchnaya konferenciya «Sistemny`j sintez i prikladnaya sinergetika»: sbornik nauchny`x trudov Yuzhny`j federal`ny`j universitet. – Rostov-na-Donu; Taganrog: Izdatel`stvo Yuzhnogo federal`nogo universiteta*, 2022. 430 p. (in Russian).
56. Liang P., Klein D. Online EM for unsupervised models. Proceedings of Human Language Technologies. *The 2009 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*. (Boulder. Colorado, 31 May 2009). Boulder, 2009, pp. 611-619.
57. Aggarwal C. C., Han J., Wang J., and Yu P. S. A framework for clustering evolving data streams. *Proceedings of the 29th international conference on Very large data bases*. Berlin, 2003, pp. 81-92.
58. Korolev V. Yu. *Veroyatnostno-statisticheskij analiz xaoticheskix processov s pomoshh`yu smeshanny`x gaussovskix modelej. Dekompoziciya volatil`nosti finansovy`x indeksov i turbulentnoj plazmy`* [Probabilistic and statistical analysis of chaotic processes using mixed Gaussian models. Decomposition of financial index volatility and turbulent plasma]. Moscow, The Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007. 343 p. (in Russian).
59. Ventcel` E. S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow, Publishing House Higher School, 1998. 576 p. (in Russian).
60. Kryukov O. V., Shherbakov V. S. *Metod parametricheskoj identifikacii trafika na ogranichenom intervale nablyudeniya* [A method for parametric identification of traffic over a limited observation interval]. *Promy`shlenny`e ASU i kontrollery`* [Industrial ACS and controllers], 2019, no. 4, pp. 9-18 (in Russian).
61. State Standard R 27.102-2021. Reliability in technology. The reliability of the facility. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 46 p. (in Russian).
62. Recommendation ITU-T M.3703 Common management services – Alarm management – Protocol neutral requirements and analysis. International

Telecommunication Union. Telecommunication Standardization Sector of ITU. 06/2010. 78 p.

63. Abramov O. V., Rozenbaum A. N. *Upravlenie e`kspluataciej sistem otvetstvennogo naznacheniya* [Management of the operation of responsible systems]. Vladivostok. Dal`nauka Publ., 2000. 200 p. (in Russian).

64. Abramov O. V. Planning of preventive corrections of parameters of engineering devices and systems. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2017, no. 3 (53), pp. 55-66 (in Russian). DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66.

65. Abramkin R. V., Vinogradenko A. M., Slepov S. N., Dross V. A. Detection of gradual failures taking into account preventive tolerances and cost-effective redundancy of measurement channels. *H&ES Research*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 18-25 (in Russian). DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-18-25.

66. Abramov O. V., Nazarov D. A. Methods and means of intellectual support for forecasting the technical condition of responsible systems. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2022. no. 4(74), pp. 54-63 (in Russian). DOI: 10.22250/18142400_2022_4_54.

67. Budko P. A., Fedorenko V. V. *Upravlenie v setyax svyazi. Matematicheskie modeli i metody`optimizacii* [Management in communication networks. Mathematical models and optimization methods]. Moscow, Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2003. 228 p. (in Russian).

68. Sikarev A. A., Sobolev V. V. *Funkcional`no ustojchivy`e demodulyatory` slozhny`x signalov* [Functionally stable demodulators of complex signals]. Moscow, Radio and Communications Publishing House, 1988. 244 p. (in Russian).

69. Fedorenko V. V., Budko P. A., Vlasov V. I. *Analiz dostovernosti funkcional`nogo diagnostirovaniya formirovatelej signalov* [Analysis of the reliability of functional diagnostics of signal generators]. *Journal of the Universities. Radioelectronics*, 1996, no. 3, pp. 24-31 (in Russian).

70. Kotenko I. V., Budko P. A., Vinogradenko A. M., Saenko I. B. An Approach for Intelligent Evaluation of the State of Complex Autonomous Objects Based on the Wavelet Analysis. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2019, vol. 318, pp. 25-38. DOI: 10.3233/FAIA190036

71. Kotenko I. V., Saenko I. B., Vinogradenko A. M., Budko N. P. Intelligent State Assessment of Complex Autonomous Objects Based on Wavelet Analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, vol. 126, pp. 106869. 20 p. Available at: www.elsevier.com/locate/engappai 1-s2.0-S0952197623010539-main.pdf) (accessed 18 May 2025).

72. Budko P. A., Golyunov M. V., Allakin V. V. Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 204-227 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.

73. Allakin V. V., Budko N. P., Golyunov M. V., Butcanetc A. A., Karetnikov V. V. *Sposob funkcional`nogo kontrolya sredstv radiosvyazi*

avtomatizirovannogo radiocentra [A method of functional control of radio communication facilities of an automated radio center]. Patent Russia, no. 2791715. 2023 (in Russian).

74. State Standard RV 0027-011-2008. Reliability of military equipment. The maintenance system. The general procedure for setting requirements and evaluating their implementation. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 15 p. (in Russian).

75. Budko P. A., Fomin L. A., Gajchuk D. V. *Principy` organizacii i planirovaniya setej* [Principles of network organization and planning]. *Fizika volnovy`x processov i radiotekhnicheskie sistemy`*, 2003, no. 5, pp. 87-90 (in Russian).

76. Budko P. A., Chixachev A. V., Barinov M. A., Vinogradenko A. M. *Principy` organizacii i planirovaniya sil`nosvyaznoj telekommunikacionnoj sredy` sil special`nogo naznacheniya* [Principles of organization and planning of a highly connected telecommunication environment of special forces]. *T-Comm*, 2013, Vol. 7, no. 6, pp. 8-12 (in Russian).

77. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Mezhenov A. V., Chikirev A. A. Method and equipment of the intelligent express control of the technical condition of ground-based means of communication and radio-technical flight support. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 235-283 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108.

78. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Budko N. P., Doroshenko G. P., Rozhnov A. V., Mineev V. V., Muxin A. V. *Sposob raspredelennogo kontrolya i adaptivnogo upravleniya mnogourovnevoj sistemoy i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya* [A method of distributed control and adaptive management of a multilevel system and a device for its implementation]. Patent Russia, no. 2450335. 2012 (in Russian).

79. Budko P. A., Doroshenko G. P., Ershov G. A., Muxin A. V., Budko N. P. *Realizaciya metoda raspredelennogo kontrolya i adaptivnogo upravleniya mnogourovnevoj sistemoy* [Implementation of the method of distributed control and adaptive management of a multi-level system]. *Information-Measuring and Control Systems*, 2012, Vol. 10, no. pp. 65-73 (in Russian).

80. Budko P. A., Zhukov G. A., Vinogradenko A. M., Gojdenko V. K. *Opredelenie avariynogo sostoyaniya morskogo robototekhnicheskogo kompleksa po mnogoe`tapnoj procedure kontrolya na osnove ispol`zovaniya vejvlet-preobrazovanij* [Determination of the emergency condition of the marine robotic complex according to a multi-stage control procedure based on the use of wavelet transformations]. *Marine Radio Electronics*, 2016, no. 4 (58), pp. 20-23 (in Russian).

81. Budko N. P. Reducing the amount of measurement information based on an intelligent approach to build a monitoring subsystem for an information and telecommunication system. *Means of Communication Equipment*, 2021, no. 1 (153), pp. 86-97 (in Russian).

82. Puzankov D. V., Miroshnikov V. I., Panteleev M. G., Seregin A. V. *Intellektual`ny`e agenty`, mnogoagentny`e sistemy` i semanticheskij Web: koncepcii, texnologii, prilozheniya* [Intelligent agents, multi-agent systems, and the Semantic

Web: concepts, technologies, and applications]. St. Petersburg, Texnolit Publ., 2008. 292 p. (in Russian).

83. Budko P. A., Linecz G. I., Muxin A. V., Fomin L. A. *E`ffektivnost`, cena i kachestvo informacionno-telekommunikacionny`x sistem. Metody` optimizacii* [Efficiency, price and quality of information and telecommunication systems. Optimization methods]. St. Petersburg, Military Academy of Communications Publ., 2011. 420 p. (in Russian).

84. Fomin L. A. *Optimizaciya oshibok pri dvuxe`tapnoj procedure kontrolya* [Optimization of errors in a two-stage control procedure]. *Avtomatizaciya i vy`chislitel`naya texnika*, 1975, no. 3, pp. 34-37 (in Russian).

85. Klyuev V. V., Sosnin F. R. Non-destructive testing and diagnostics: reference. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 656 p. (in Russian).

86. Steklov V. K., Berkman L. N. Estimation of the volume of control information in information networks. *Telecommunication*, 2000, no. 6, pp. 34-36 (in Russian).

87. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Kuznetsov S. V., Goidenko V. K. Implementation of the method of multilevel integrated monitoring of the technical condition of the marine robotic complex. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 4, pp. 71-101 (in Russian). URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/04-Budko.pdf>

88. Vasiliev N. V., Zabrodin O. V., Yashin A. I. Automated software package for assessing the quality of service in the telecommunications network. *Means of Communication Equipment*, 2018, no. 3 (143), pp. 56-61 (in Russian).

89. Vityaev E. E., Dergilev A. I., Chadaeva I. V., Vasikin Yu. Yu., Spitsina A. M., Kulakova E. V., Vishnevsky O. V., Orlov Yu. L. Search for regular contextual signals in genomic DNA. *Sat. scientific proceedings of the conference "Informatics-2016"* (Moscow, April 24-29, 2016). Moscow, National Research Nuclear University "MEPhI", 2016, pp. 52-62 (in Russian).

90. Benham K. D., Benham K. J., Blaisdell B. E. *Mathematical Methods for DNA Sequence Analysis*, Moscow, Mir Publ., 1999. 349 p. (in Russian).

91. Ulyanov M. V., Smetanin Yu. G. About one characteristic functionality of words over a finite alphabet. *Information technology*, 2017, Vol. 23, no. 5, pp. 333-341 (in Russian).

92. Sedyakin I. Ulyanov M. V. Time-efficient algorithm for calculating the generalized entropy of two-dimensional words using the sliding window method. *Modern information technologies and IT education*, 2018, Vol. 14, no. 3, pp. 560-566 (in Russian).

93. Petrushin V. N., Ulyanov M. V., Chertikhina I. A., Nikulchev E. V. Bicriteria method of building and evaluating the quality of histograms. *Information technologies and computing systems*, 2012, no. 4, pp. 22-31 (in Russian).

94. Lind D., Marcus B. An introduction to symbolic dynamics and coding. Cambridge. UK. Cambridge University Press, 1995. 495 p.

95. Holleczech T. Statistical Analysis of IP Performance Metrics in International Research and Educational Networks. *Nuremberg. ETSI*, 2008, pp. 105-114.

Статья поступила 09 июня 2025 г.

Сведения об авторах

Будко Никита Павлович – кандидат технических наук. Независимый эксперт. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. E-mail: budko62@mail.ru

Адрес: 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Бутлерова, д. 9.

Крюков Олег Витальевич – доктор технических наук, доцент. Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: сетевые технологии; современные телекоммуникационные системы; информационная безопасность сетевых коммуникаций. E-mail: oleghooker@mail.ru

Адрес: 302020, Россия, г. Орел, ул. Приборостроительная, д. 35.

Южакова Анна Алексеевна – адъюнкт. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы контроля и мониторинга состояния телекоммуникационных систем. E-mail: anutikaaa@mail.ru.

Адрес: 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

Proactive fault identification model devices and telecommunication systems

N. P. Budko, O. V. Kryukov, A. A. Yuzhakova

Setting the task: Based on the reviewed evolution of control systems, the task is to reasonably switch from the current preventive concept of maintenance and repair of communications equipment and automation at communication centers to more advanced strategies for managing their reliability in terms of actual technical condition and predictive maintenance, which puts forward the following list of tasks for development in this study: selection of the control object as a unified element of the cumulative failure model of the interspecific perspective information and telecommunication system; selection of the necessary monitored parameters sufficient to identify the type of technical condition of the system at any time, as well as complex quality indicators; justification of allowable change areas for each parameter (tolerance field); development of elements of the scientific and methodological apparatus for processing measuring information, as well as mathematical support for justifying operation strategies according to the actual technical condition and predictive maintenance; creation of perspective control and monitoring systems with elements of intelligent processing of measurement information and prediction of the type of technical condition. **Purpose of work:** development of a model for preventive identification of failures of devices and telecommunication systems based on modification of the cumulative failure model of the type "parameter - tolerance field". **Methods used:** system analysis; graph theory; reliability theory models and methods; methods of multilevel synthesis of complex technical systems; methods for predicting the technical state of control objects based on hidden Markov models. **Study results:** a general model of preventive identification of failures of the object under control is proposed, consisting of two particular ones: a cumulative model of failure of the type "parameter - tolerance field" and a probability-graph model of identification and prediction of failure. **Novelty:** private models in aggregate, unlike existing ones, take into account not only the areas of normal operation and complete failure, but also the areas of pre-failure and parametric (latent failure), which allows preventing a sudden failure, respectively,

preventing downtime, justifying the thresholds of operational and preventive tolerances. **Practical significance:** the first particular model allows you to calculate preventive tolerances for controlled parameters, taking into account control errors of the first and second types in the interests of predictive maintenance, the second - to obtain analytical dependencies to find the probability of each type of technical condition of the object under control and final probabilities for system states, taking into account prediction errors of the first and second types. The proposed proprietary models should form the basis for the creation of a new generation monitoring subsystem based on predictive control of currently developed products.

Keywords: cumulative failure model, reliability, object under control, preventive identification of failure, preventive admission, maintenance, technical condition, operational admission.

Information about Authors

Nikita Pavlovich Budko – Ph.D. of Engineering Sciences. An independent expert. Field of research: information monitoring; data acquisition. E-mail: budko62@mail.ru

Address: 195220, Russia, St. Petersburg, Butlerova str., build. 9/3, sq. 252.

Oleg Vitaievich Kryukov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation. Field of research: network technologies; modern telecommunications systems; network communications information security. E-mail: oleghooker@mail.ru

Address: 302020, Russia, Orel, Priborostroitel'naya str., build. 35.

Anna Alekseevna Yuzhakova – Postgraduate. Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: methods of control and monitoring of the state of telecommunication systems. E-mail: anutikaaa@mail.ru

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretskiy prospect, build. 3.