

На правах рукописи

УДК 621.396

**НЕНАДОВИЧ Дмитрий Михайлович**

**МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ  
ПРОЕКТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и  
обработка информации (в технических  
системах, технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
НЕУСЫПИН Константин Авеняирович  
доктор технических наук, профессор  
ПЕТРОВ Владимир Александрович  
доктор технических наук, профессор  
ШЛОМА Александр Михайлович

Ведущая организация: Институт системного анализа РАН

Защита со-  
на заседании  
дарственного  
г. Москва, 2-

У1898303  
Ненадович Д.М.  
Методология экспертизы  
проектов  
телекоммуникационных  
систем  
2009

14 ч. 30 мин.  
02 Московского госу-  
Н.Э. Баумана, 105505,

0-00 7000 мпа

У1898303

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ  
обозначенного здесь срока

ского госу-  
на

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

ИНОВ

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1898303

Ненадович Д.М. Методология

1708

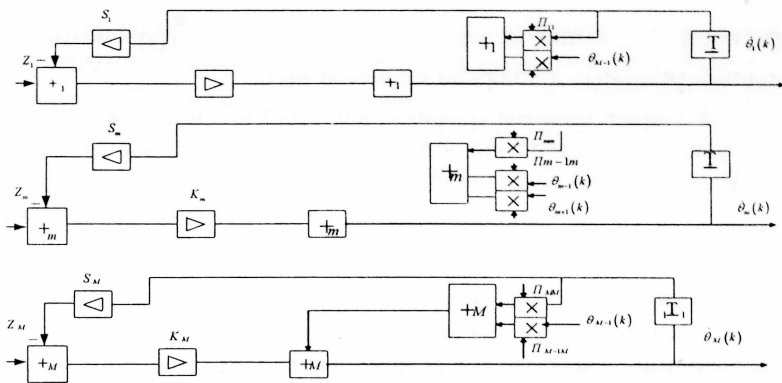


Рис.4 Дискретный адаптивный фильтр Калмана

$$\begin{aligned} \bar{P}_c(k+1, k) &= \Delta \pi(k+1, k, r) \bar{P}_c(k) \Delta \pi^T(k+1, k, r) + \\ & \pi(k+1, k, r) \bar{P}_c(k) \pi^T(k+1, k, r) + \\ & \Gamma^T(k) \bar{V}_v(k) \Gamma^T(k) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}(\Delta \bar{\theta}(k+1)) &= K(k+1) \Delta H(k+1) \bar{V}(k+1) \Delta H^T(k+1) K^T(k+1) + \\ & + [I - K(k+1) H(k)] \bar{P}(k+1, k) [I - K(k+1) H(k+1)]^T - \\ & - K(k+1) \Delta H(k+1) \bar{V}(k+1, k) [I - K(k+1) H(k+1)]^T - \\ & - [I - K(k+1) H(k+1)] \bar{V}^T(k+1, k) \Delta H^T(k+1) K^T(k+1) + \\ & + \bar{\Gamma}^T(k+1) \bar{V}_v(k+1) \bar{\Gamma}^T(k+1); \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}(k+1, k) &= \pi(k+1, k, r) \bar{P}(\Delta \bar{\theta}(K)) \pi^T(k+1, k, r) + \\ & + \Gamma(k+1) \bar{V}_v(k+1) \Gamma^T(k+1); \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}(k+1, k) &= \pi(k+1, k, r) \bar{P}_c(k) \pi(k+1, k, r) + \Gamma(k+1) \bar{V}_v(k+1) \Gamma^T(k+1); \\ \bar{P}(k+1) &= \bar{V}_c(k+1, k) [I - K(k+1) H(k+1)]^T - \bar{V}_o(k+1) \Delta H^T(k+1) K^T(k+1); \end{aligned} \quad (27)$$

$$\bar{V}_o(k+1) = \pi(k+1, k, r) \bar{V}_o(k) \pi^T(k+1, k, r) + \Gamma(k+1) \bar{V}_v(k+1) \Gamma^T(k+1); \quad (28)$$

$$\dot{\theta} = M[\theta(0)] \quad P(\Delta \theta(0)) = V(0)$$

$$\bar{P}(\Delta \Theta(0)) = \bar{V}_\Theta(0) = \bar{P}_c(0) = D[\Theta(0)]$$

$\bar{P}(\Delta \bar{\theta}(k))$  - матрица реальных апостериорных дисперсий ошибок оценивания процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $\bar{P}(\Delta \bar{\theta}(k+1, k))$  - матрица реальных априорных дисперсий ошибок оценивания состояний процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $\bar{P}_c(k)$  - реальная апостериорная взаимная ковариационная матрица;  $\bar{P}_c(k+1, k)$  - реаль-

ная априорная взаимная ковариационная матрица;  $V_{\theta}^R(k)$  - матрица апостериорных реальных дисперсий процесса  $\hat{\theta}(k)$ .

На рисунке 5 представлены графики, наглядно представляющие зависимости функции чувствительности процесса фильтрации от мерности модели и различных соотношений дисперсий шумов возбуждения и наблюдения ( $\sigma_v^2/\sigma_w^2=2$  - сплошная линия,  $\sigma_v^2/\sigma_w^2=4$  - штриховая линия).

Анализ зависимостей позволяет выявить значительные отклонения значений дисперсии процесса фильтрации от реальных при довольно незначительных изменениях значений элементов матриц ОПВ и наблюдения. Необходимо отметить, что если корректировка значений элементов матрицы наблюдений является прерогативой разработчиков ТКЭС, то Анализ зависимостей позволяет выявить значительные отклонения значений дисперсии процесса фильтрации от реальных при довольно незначительных изменениях значений элементов матриц ОПВ и наблюде-

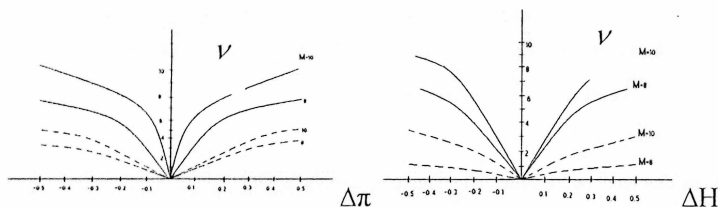


Рис.5 Функции чувствительности процесса фильтрации к изменению значений элементов матрицы ОПВ и наблюдения.

ния. Необходимо отметить, что если корректировка значений элементов матрицы наблюдений является прерогативой разработчиков ТКЭС, то для уточнения значений элементов матрицы ОПВ необходима реализация процедуры идентификации параметров, определяющих вероятностно-временной механизм изменения состояния (значений ЭПК) модели проектируемой ТКС. С целью повышения качества оценочных значений разработаны алгоритмы идентификации и коррекции значений элементов матрицы ОПВ. Совместная реализация алгоритмов фильтрации, идентификации и коррекции составляет дискретный адаптивный фильтр Калмана (ДАФК), позволяющий существенно (на 15-20%) снизить временные затраты на формирование состоятельных, несмещённых, достаточных и эффективных оценочных значений. Разработаны предложения по технической реализации ДАФК.

Разработанный алгоритм идентификации элементов матрицы ОПВ

основан на реализации методов последовательного оценивания А.Г. Тартаковского. Разработанный алгоритм позволяет по наблюдению за интервалами ( $T_n$ ) между наступлением событий в ТКС (модели, аналоге, опытном участке) формировать оценочные значения интенсивностей наступления событий ( $\lambda, \mu, \nu$ ), оптимальные по критерию наименьшего апостериорного риска:

$$\bar{R}_n(s_1^n) = \min \{ R_n^0(x_1^n), M[\bar{R}_{n+1}([x_1^{n+1}] | x_1^n) ] \}, \quad (29)$$

где-  $R_n^0(s_1^n)$  - текущий апостериорный риск, определяемый из условия

$$R_n^0(s_1^n) = \inf_{\mu_n \in U_n} R_n(x_1^n, \dot{\mu}_n) = \inf_{\mu_n \in U_n} \int_{\mu} g_n(\mu, \dot{\mu}_n) p(\mu | x_1^n) d\mu, \quad (30)$$

(здесь  $U_n$  - класс оценок, для которых  $MR_n(x_1^n, \dot{\mu}_n) < \infty$ ).

В этом случае оптимальный момент остановки определяется выражением

$$\tau^o_N = \min \{ N, \min [ 1 \leq n < N: \tilde{T}_n \geq \tilde{A}_n ] \}, \quad (31)$$

а оптимальная неусеченная процедура оценивания состоит в сравнении статистики  $T_n$  с постоянным порогом

$$A = (1/\sqrt{c}) - \beta; \quad (32)$$

и имеет вид

$$\begin{cases} U_n(T_n) = u_{\approx} \text{ при } T_n < A, \\ U_n(T_n) = \dot{\mu}_n(T_n) \text{ при } T_n \geq A, \end{cases} \quad (33)$$

Результаты проведенных экспериментов показали высокую скорость сходимости алгоритма идентификации, составившую в среднем 20-30 шагов наблюдения.

С целью учета особенностей оценивания состояний (значений ЭПК) моделируемого процесса на нестационарных временных отрезках (рис. 6) и реализации экстраполирующих свойств авторегрессионных моделей разработан алгоритм адаптивного оценивания-прогнозирования. В основу разработки алгоритма положен метод авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС), впервые предложенный Дж. Боксом и Г. Джекинсом. Общая структурная схема устройства фильтрации-экстраполяции для модели АРПСС (1,2,4) представлена на рис. 7. Структурная схема алгоритма фильтрации-экстраполяции

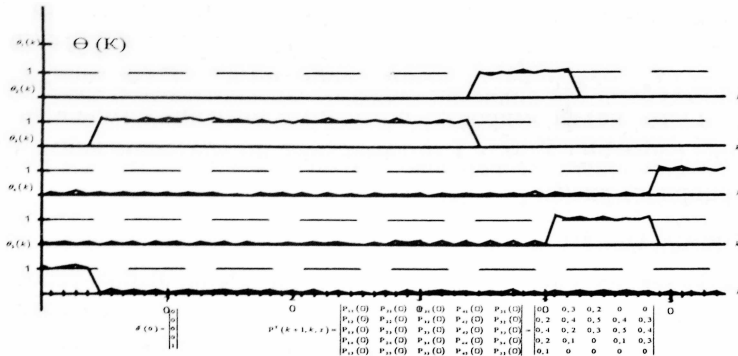


Рис. 6. График изменения состояний модели

оценочных значений состояний нестационарных процессов изменения значений ЭПК представлена на рис. 8.

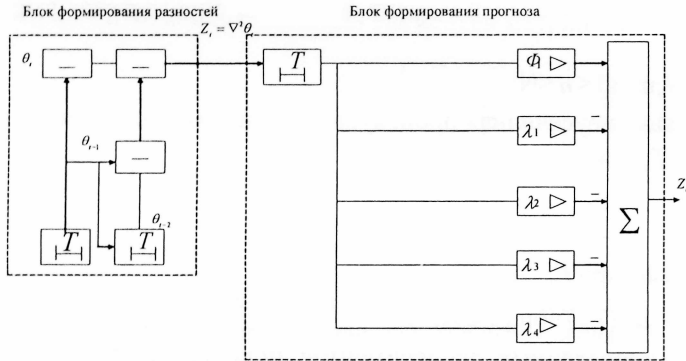


Рис. 7. Общая структурная схема фильтрации-экстраполяции значений ЭПК для АРПС (1,2,4)

Разработаны предложения по технической реализации известного базового РНК-алгоритма, представленного в виде следующих выражений для вычисления векторов коэффициентов предсказания, коэффициентов усиления и дисперсии ошибки фильтрации:

$$\vec{\phi}_{p,N+1} = \begin{cases} \vec{\phi}_{p,N} - P_{N\theta_N} \vec{\theta}_{m,p-1}(N) (\vec{\theta}_{p-1}^T(N) \vec{\phi}_{p,N} + \vec{\theta}_{m,p-1}(N+1)) = \\ = \vec{\phi}_{p,N} - \vec{e}_{p,N}^f(N+1) P_{N\theta_N} \vec{\theta}_{m,p-1}(N) = \\ = \vec{\phi}_{p,N} - \vec{e}_{p,N}^f(N+1) \vec{c}_{p-1,N}; \end{cases} \quad (34-36)$$

$$\vec{c}_{p-1,N} = P_{N-1} \vec{\theta}_{p-1}(N) / (W + \vec{\theta}_{m,p-1}^T(N) P_{N-1} \theta_{N-1} \vec{\theta}_{m,p-1}(N));$$

$$P_N = W^{-1} (\vec{I} - \vec{c}_{p-1,N} \vec{\theta}_{m,p-1}^T(N)) P_{N-1} \theta_{N-1};$$

Структурные схемы устройств, аппаратно реализующих выражения (34-36) при решении задач в рассматриваемой постановке, представлены на рис. 8-10. Структурная схема адаптивного алгоритма экстраполяции-оценивания нестационарных процессов изменения ЭПК представлена на рис. 11. Пример формирования прогнозного значения индикатора состояния (значения ЭПК) представлен на рис. 12. Сходимость алгоритма обуславливается последовательным характером определения порядка и пересчета значений операторов сдвига и авторегрессии, а так же однозначностью определения пороговых значений для реализации правила останова.

Для моделирования процесса изменения состояний (значений ЭПК) в условиях априорной неопределенности, имеющей нестохастический характер, разработан формирующий фильтр нечеткой последовательности (ФФНП). Результаты проведенных экспериментов показали, что на основе разработанной модели возможно адекватное описание процессов имеющих нечёткую природу и реально протекающих в ТКС.

В качестве устройства формирования оценочных и прогнозных значений моделируемого нечеткого процесса предлагается реализовать модель искусственной нейронной сети Хэмминга, хорошо зарекомендовавшей себя в качестве инструмента оценки зашумлённых значений векторных величин. В качестве алгоритма обучения входного слоя сети предлагается использовать разработанный ДАФК. Конструктивность обучения ИНС на основе методов калмановской фильтрации показана в работах С. Хайкина и подтверждена в ходе проведенных экспериментов. На основе реализации предлагаемого подхода в большинстве случаев существенно (на 15-20%) увеличивается точность формируемых оценок при незначительном росте скорости сходимости процесса. Структурная схема искусственной нейронной сети Хемминга с обучением на основе ДАФК представлена на рис.13

**В четвертом разделе** представлены разработанные на основе реализации алгоритмов декомпозиции и редукции (раздел 2) варианты оптимальных локальных экспертных систем показателей качества мультисервисной гетерогенной телекоммуникационной системы, сформулированы критерии их оценки. Разработаны алгоритмы последовательной свертки критериев оценки ЭСПК в обобщенный (глобальный) критерий. Пример процесса последовательной свертки ЭПК представлен на рис.14. Локальные ЭСПК и критерии их оценки разработаны с учетом

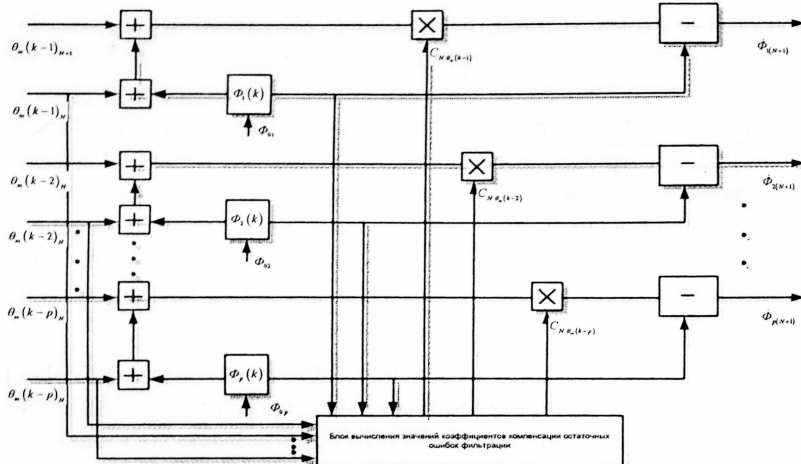


Рис. 8. Структурная схема устройства фильтрации-экстраполяции значений операторов авторегрессии.

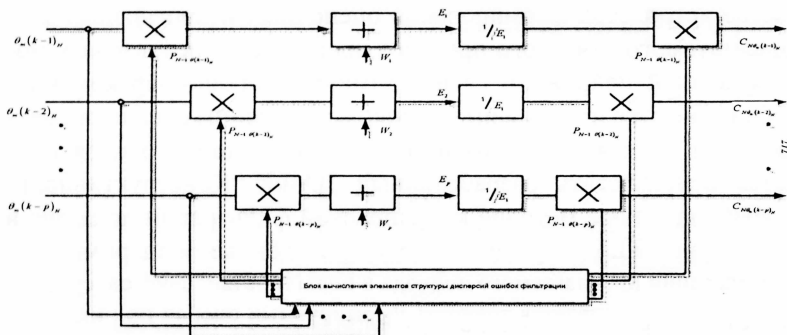


Рис. 9. Структурная схема блока вычисления значений коэффициентов компенсации остаточных ошибок фильтрации

особенностей сетевого, канального и физического уровней. На рис.15 и рис.16, в качестве примера, представлены структурные схемы локальной ЭСПК и системы критериев оценки ЭПК физического уровня.

**В пятом разделе** представлены предложения по технической реализации ТКЭС, затрагивающие организационные и экономические аспекты разработки экспертной системы. На основе анализа задач, стоящих перед ТКЭС, определяется, что по классу решаемых задач систему целесообразно классифицировать как комбинированную: диагностическую,

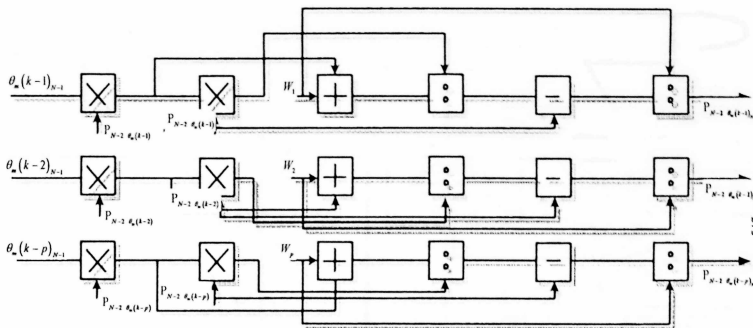


Рис. 10.. Структурная схема блока вычисления элементов корреляционной матрицы

прогнозирующую, поддерживающую принятие решения. По способу реализации ТКЭС необходимо классифицировать как квазидинамическую ЭС с возможностью организации на основе локальных вычислительных сетей ПВЭМ. По степени интеграции программного обеспечения ТКЭС должна быть классифицирована как гибридная, функционирующая как интеллектуальная надстройка над пакетами прикладных программ, реализующих структурные и функциональные модели проектируемых ТКС, методы оценки ЭПК и оптимизации требований к ЭСПК различных уровней ЭМ ВОС.

Наиболее предпочтительной для реализации в ТКЭС моделью представления знаний выглядит модель, созданная на основе фреймового подхода, позволяющего учесть концептуальную основу организации памяти человека. Результаты анализа основных положений работ Ньюэлла и Саймона, посвященных проблемам создания экспертных систем, выявил целесообразность реализации в ходе разработки ТКЭС продукционного подхода, реализующего основное правило человеческих рассуждений при принятии решения: «условие-действие». Вместе с тем, учитывая тот факт, что основным недостатком продукционного подхода является отсутствие явного структурирования правил предметной области, наиболее перспективным для реализации в ТКЭС выглядит комплексный - продукционно-фреймовый подход с использованием комбинированных стратегий разрешения конфликтов. Отмечается, что разрабатываемая ТКЭС должна обладать объяснительными возможностями.

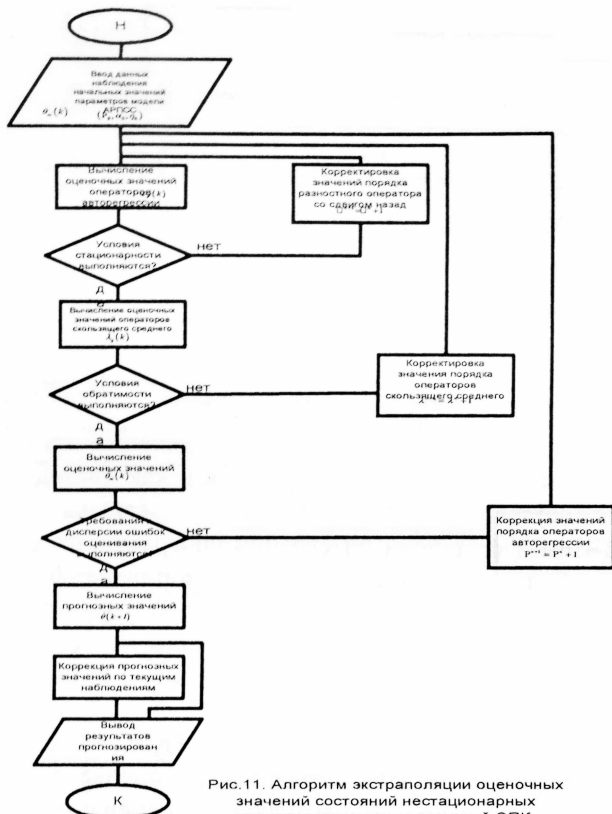


Рис.11. Алгоритм экстраполяции оценочных значений состояний нестационарных процессов изменения значений ЭПК.

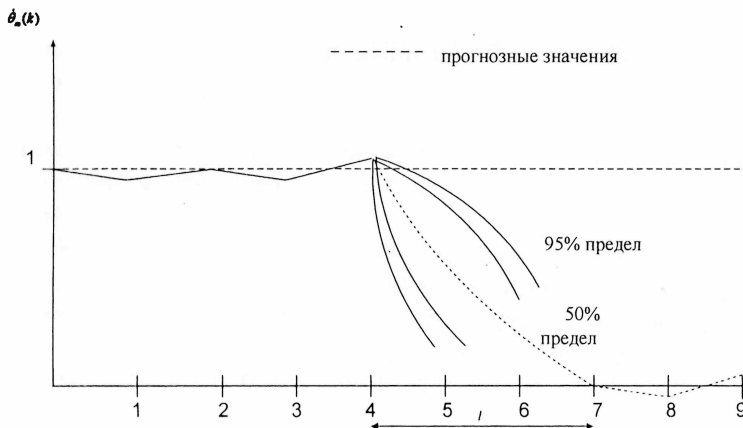


Рис. 12. Пример прогноза изменения значений индикатора состояния (значения ЭПК)

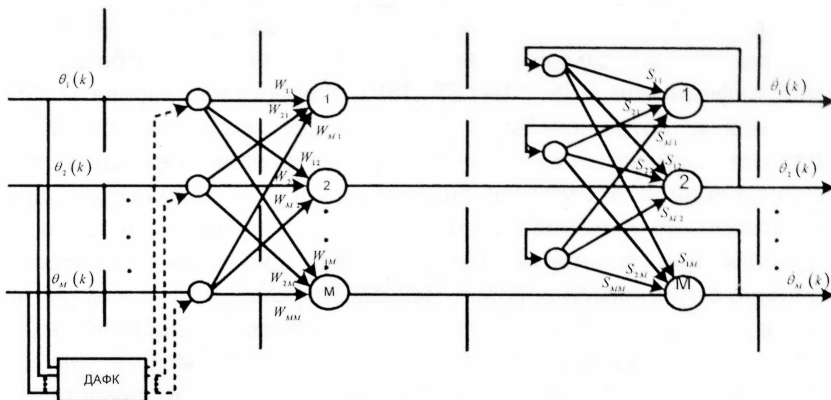


Рис. 13. Структурная схема искусственной нейронной сети Хемминга с обучением на основе ДАФК

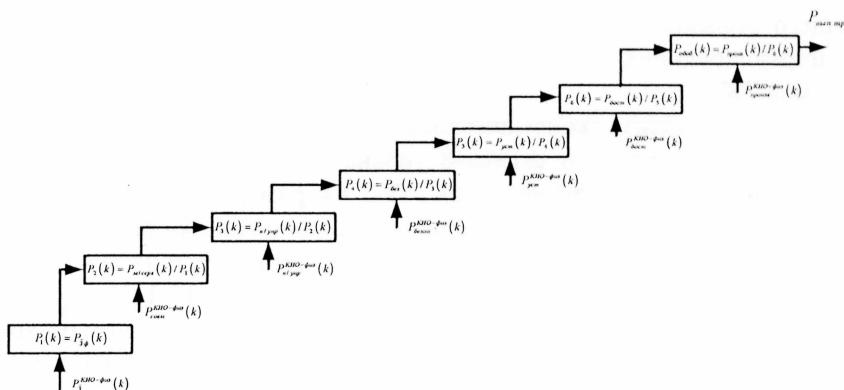


Рис. 14. Вариант структурной схемы процесса свертки критериев оценки ЭПК проектируемой ТКС

Результаты анализа жизненного цикла ЭС позволяет отметить, что одной из главных задач, определяющих успех разработки ТКЭС, является этап разработки прототипа. Разрешению противоречия между требованиями к экономичности процесса создания прототипа и его функциональности способствует многоэтапный подход к разработке и совершенствованию прототипа ТКЭС, предусматривающий реализацию на

ранней стадии базовых ЭС (EMYCIN, KAS) с последующим усложнением инструментария (RLL, OPS\_5, PROLOG) и принятием решения о целесообразности реализации в промышленном варианте ТКЭС процедурных языков программирования, ориентированных на обработку символьной информации (LISP, INTERLISP). Разработаны варианты концептуальной и функциональной составляющих поля знаний ТКЭС. Представлен вариант обобщенного алгоритма функционирования телекоммуникационной экспертной системы, реализующей поддержку принятия экспертного решения (формирования экспертной оценки) на основе данных (трансформирующихся в знания), полученных из внешних источников, от экспертов-доноров, данных от реализации процедур нечеткого и стохастического моделирования, оценивания-экстраполяции, а так же данных полученных из системы-аналога (опытного участка) разрабатываемой ТКС. Вариант структурной схемы ТКЭС представлен на рис. 17. Структурная схема обобщенного алгоритма представлена на рис.18. Представлены результаты разработки устройства для параметрической оценки закона распределения потоков сообщений, позволяющего формировать данные о типах и значения параметров потоков ИС, циркулирующих в системах-аналогах (опытных участках) разрабатываемой ТКС.

Результаты анализа экономического эффекта от реализации ТКЭС позволяют сделать вывод о высоком уровне рентабельности внедрения системы в процесс проектирования. Так, например, опыт реализации проектов по развитию ТКС крупнейшими отечественными операторами (ОАО «Ростелеком», ОАО «МТС») показывает, что потери из-за ошибок при проектировании сетей составляют приблизительно 10-12% от стоимости проекта. В этом случае, учитывая тот факт, что ежегодные расходы на развитие сетей крупных российских операторов составляют сотни миллионов долларов в год, экономический эффект от реализации ТКЭС, позволяющей предотвратить хотя бы 50% ошибок), может составить порядка 14 миллионов долларов в год (при реализации 100 миллионного проекта). В итоге, экономический эффект от реализации ТКЭС более чем на порядок превышает суммарную стоимость разработки и годовой эксплуатации экспертной системы.

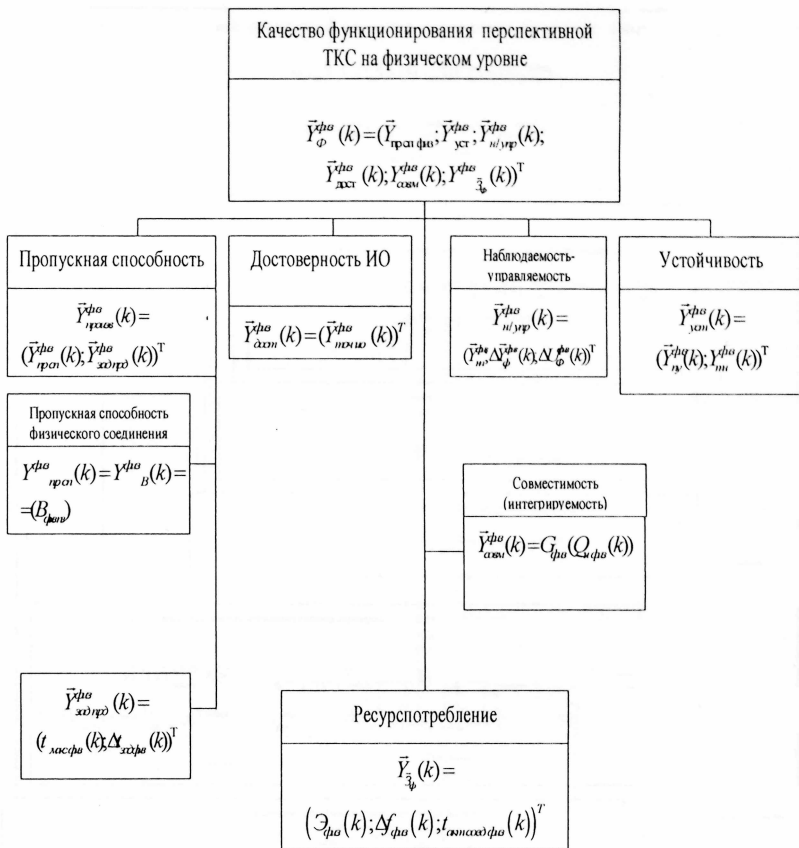


Рис.15. Состав экспертной системы показателей качества реализации физического уровня проектируемой ТКС

**В разделе «Заключение»** изложены основные теоретические и практические результаты диссертационной работы.

**В Приложениях 1-19** представлены результаты анализа основных характеристик существующих и перспективных телекоммуникационных технологий, примеры решения задач оптимизации требований к значениям экспертных показателей качества, элементы концептуальной составляющей поля знаний, листинги программ разработанных моделей и алгоритмов оценки-экстраполяции состояний (значений ЭПК) ТКС.

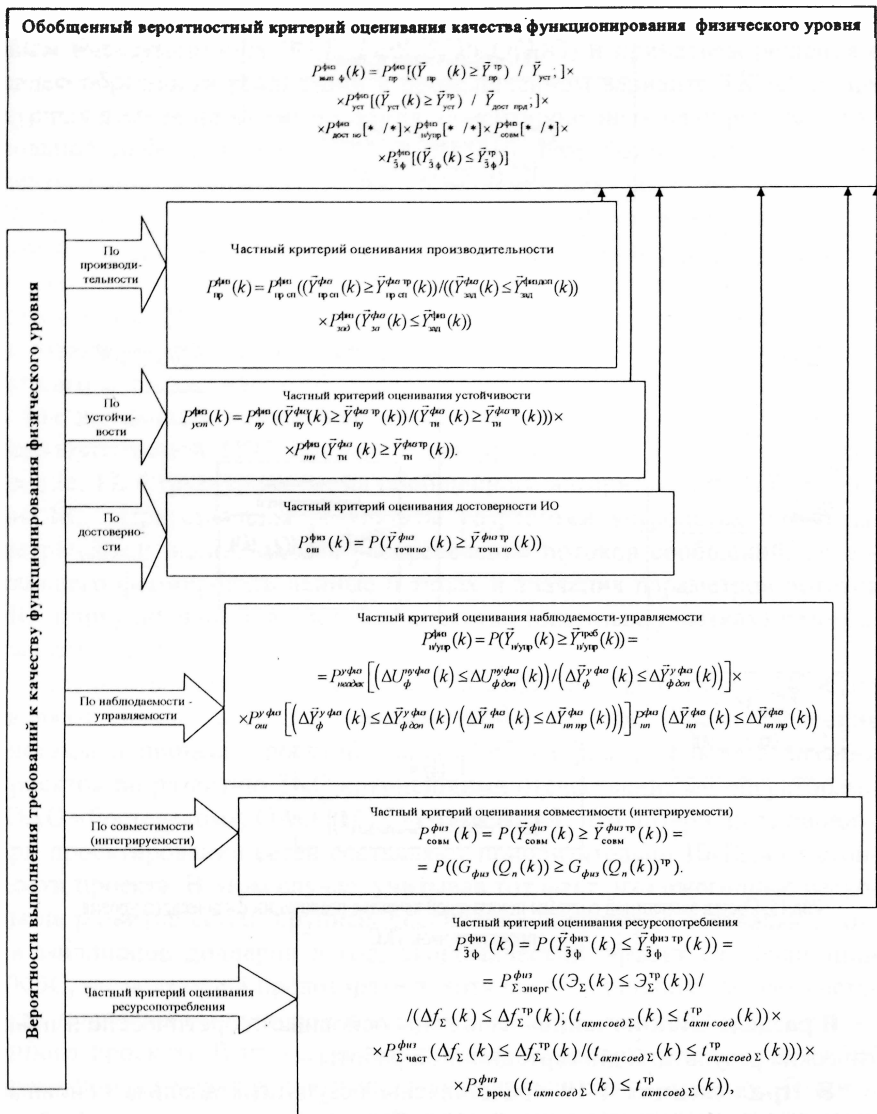


Рис. 16. Обобщенный вероятностный критерий оценивания качества реализации физического уровня модели перспективной ТКС



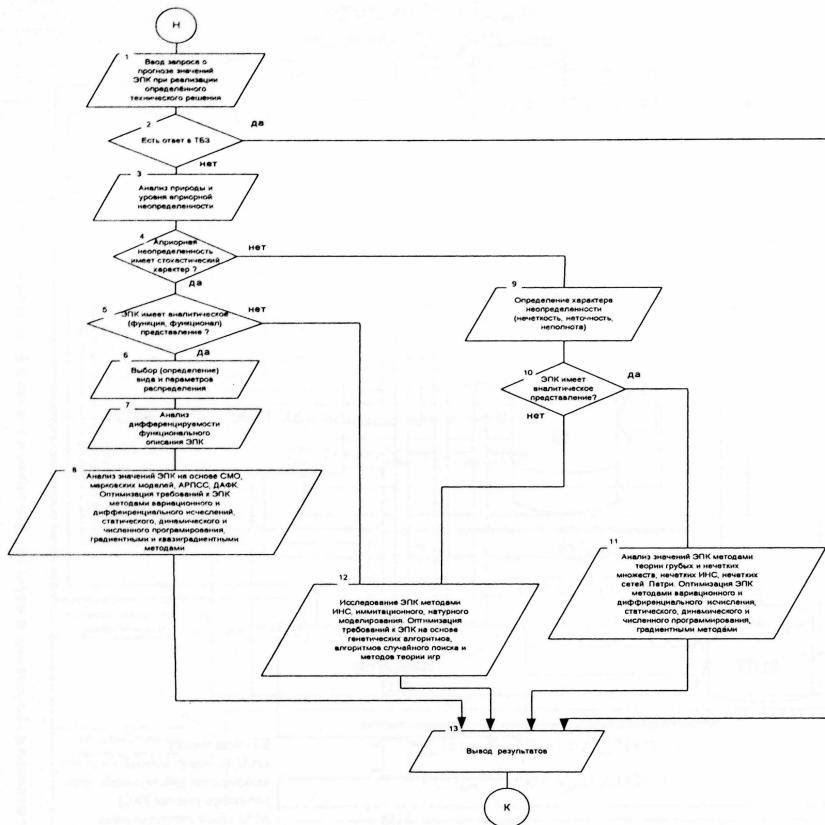


Рис. 18. Структурная схема варианта обобщенного алгоритма анализа и оптимизации ЭПК

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе разработаны методологические и концептуальные основы экспертизы проектов перспективных ТКС на основе реализации ТКЭС, позволяющие преодолевать противоречие между непрерывным ростом степени автоматизации процесса проектирования ТКС, предусматривающей широкое использование строгих математических методов, с одной стороны, и субъективным характером формирования экспертных оценок соответствия качества проектно-технических решений субъективно заданным требованиям, с другой. Существующее противоречие приводит к значительному увеличению уровня рисков принятия ошибочных решений по построению перспективных ТКС. и, как следствие, к неоправданному росту затрат на их проектирование, разворачивание и эксплуатацию. Предлагаемый подход к разрешению противоречий базируется на комплексном использовании методов стохастического и нечеткого

моделирования процессов (подпроцессов) функционирования мультисервисных гетерогенных телекоммуникационных систем при реализации в них различных проектно-технических решений с последующей оценкой-экстраполяцией значений экспертных показателей качества, отражающих существенные свойства проектируемой системы и учитывающих особенности ПТР. Разработанные методологические и концептуальные основы организации экспертной деятельности в ходе проектирования перспективных ТКС. на основе создания и внедрения ТКЭС обладают определенной степенью универсальности и при учете особенностей смежной предметной области могут быть реализованы для формирования экспертных оценок качества проектно-технических решений перспективных сложных многофункциональных технических систем.

**Основное содержание диссертационной работы нашло отражение в следующих публикациях:**

1. Ненадович Д.М. Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 272 с.
2. Ненадович Д.М. Унифицированная математическая модель процесса функционирования управляемой информационной системы // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. - 1992.- № 3.. - С. 64-67.
3. Ненадович Д.М. Методы теории последовательного оценивания в задачах идентификации параметров дискретнозначных марковских моделей процесса функционирования телекоммуникационных систем // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника, - 2005. - № 87.- С. 68-75.
4. Ненадович Д.М. Методы теории искусственных нейронных сетей в задачах идентификации переходных вероятностей управляемых дискретнозначных марковских моделей // Научный вестник МГТУ ГА Информатика. Прикладная математика. – 2005. - № 92. - С. 74-80.
5. Ненадович Д.М. Постановка задачи идентификации переходных вероятностей управляемых дискретнозначных марковских моделей. методами теории искусственных нейронных сетей // Научный вестник МГТУ ГА. Информатика. Прикладная математика. – 2005.. - № 92. - С. 95-100.
6. Ненадович Д.М. Методы теории нечетких множеств в задачах редукции показателей качества информационной безопасности телекоммуникационных систем // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. - 2005.- № 93. - С. 53-60.
7. Ненадович Д.М. Методы редукции в задачах синтеза систем показателей качества информационной безопасности телекоммуникационных систем // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2005.. - № 93. - С. 45-52.
8. Ненадович Д.М., Шахтарин Б.И. Постановка задачи декомпозиции систем показателей качества безопасности инфокоммуникационных сетей специального назначения. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. - 2008.- № 1.- С. 107-116.
9. Ненадович Д.М. Синтез дискретной математической модели процесса функционирования управляемой инфокоммуникационной системы со случайной скачкообразной структурой // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. - № 2-3. - С. 9-13.
10. Ненадович Д.М. Методы теории линейной фильтрации и экстраполяции в задачах оценки состояния управляемой инфокоммуникационной системы со случайной скачкообразной структурой // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. - № 6. - С. 16-21.

Ненадович Д.М. Методы стохастической аппроксимации в задачах адаптивного оценивания состояния управляемой инфокоммуникационной системы со случайной скачкообразной структурой // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006.. - №

10. - С.18-20.

11. Ненадович Д.М. Анализ устойчивости и чувствительности процесса функционирования управляемой инфокоммуникационной системы со случайной скачкообразной структурой // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2006. - № 9.. - С. 16-20.
12. Ненадович Д.М. Градиентные методы в задачах оптимизации характеристик систем управления инфокоммуникационными сетями // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. - 2006. - № 107. - С. 132 - 136.
13. Ненадович Д.М. Методы теории игр в задачах векторной динамической оптимизации процесса управления инфокоммуникационными системами со случайной скачкообразной структурой // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. - 2006. - № 107. - С. 137 - 142.
14. Ненадович Д.М., Шахтарин Б.И. Методы теории нечетких множеств в задачах декомпозиции систем показателей качества инфокоммуникационных сетей специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. - 2006. - №3. - С. 88 - 96.
15. Ненадович Д.М. Адаптивный байесов подход в задачах оптимального управления инфокоммуникационными системами со случайной скачкообразной структурой // Известия высших учебных заведений. Технические науки. - 2006. - № 6. - С. 123 - 131.
16. Ненадович Д.М. Алгоритм экспертного принятия решений по организации контроля безопасности инфотелекоммуникационных систем в условиях нечеткости исходной информации // Инфокоммуникационные технологии. - 2006. - Т.4, №4. - С. 63-68.
17. Ненадович Д.М. Алгоритм экспертного принятия решений по организации контроля безопасности инфотелекоммуникационных систем в условиях недостаточности исходной информации // Инфокоммуникационные технологии. - 2007. - № 2. - С.65-69.
18. Ненадович Д.М., Шахтарин Б.И. Постановка задачи декомпозиции систем показателей качества безопасности инфокоммуникационных сетей специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. - 2008. - № 1. - С. 107-116.
19. Ненадович Д.М., Шахтарин Б.И. Метод авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего в задачах экспертного моделирования телекоммуникационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. - 2009. - № 2. - С. 102 - 111.
20. Ненадович Д.М., Редкозубов С.А. Реализация методов искусственных нейронных сетей с обучением для решения задач экстраполяции-оценивания значений экспертных показателей качества сложных информационных систем, в нечеткой векторной постановке // Информационно-аналитический бюллетень МГТУ. - 2009. - № 2.. - С. 39-42.
- Ненадович Д.М., Редкозубов С.А. Метод формирования нечетких последовательностей в задачах экспертной оценки качества сложных информационных систем // Информационно-аналитический бюллетень МГТУ. - 2009.. - № 2.. - С. 33-39.
21. Ненадович Д.М. Алгоритм адаптивного прогнозирования значений временных рядов в задачах экспертного оценивания качества проектно-технических решений, предлагаемых к реализации в ходе проектирования сложных информационных систем // Информационно-аналитический бюллетень МГТУ. - 2009. - № 5. - С. 44 - 49.
22. Патент № 2099781 (РФ). Управляемый вероятностный автомат / В.И. Зимарин, Д.М. Ненадович, И.Б. Парашук // Открытия. Изобретения. ... - 1997. - № 35. Патент № 2094844 (РФ). Устройство для параметрической оценки закона распределения потоков сообщений / Зимарин В.И., Ненадович Д.М., Парашук И.Б.. // Открытия. Изобретения. ... - 1997. - № 30.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из существенных особенностей современного этапа научно технического прогресса является стремительное развитие инфокоммуникационных систем (ИКС) и их транспортной основы - телекоммуникационных систем (ТКС). В настоящее время в нашей стране широко развернуты работы по реализации федеральной целевой программы «Электронная Россия». Одной из основных целей программы является повышение эффективности функционирования экономики, государственного управления и местного самоуправления за счет внедрения и массового распространения информационных и телекоммуникационных технологий. Это направление развития нашего общества является отражением объективных процессов, реально протекающих в мировом сообществе, обуславливается переходом от индустриального общества к информационному (постиндустриальному). Реализация перехода возможна только на основе создания соответствующей информационной инфраструктуры. Создание информационной инфраструктуры предполагает реализацию взаимосвязанной совокупности баз данных, средств обработки информации, телекоммуникационных систем и пользовательских терминалов.

Большое количество современных ТКС являются мультисервисными гетерогенными системами, разработка которых требует постоянного осмысления тенденций их развития, направлений совершенствования технологий информационного обмена и топологии их построения. В качестве преобладающей тенденции развития ТКС в настоящее время рассматривается реализация концепции NGN (Next Generation Network). Концепция создания NGN отражает тенденции объективного процесса конвергенции действующих и перспективных сетей связи различного назначения, осуществляемой под эгидой большого количества международных организаций, специализирующихся на разработке нормативной базы в сфере телекоммуникаций.

В условиях высокой динамики развития телекоммуникационной сферы одной из основных проблем, стоящей перед разработчиками ТКС, является проблема оценки целесообразности выбора из большого многообразия новых сетевых технологий и реализующих их программно-аппаратных средств, практически ежегодно появляющихся на телекоммуникационном рынке, одной или нескольких совместимых технологий (не исключая разработку собственных). В этих условиях существенно

возрастает роль систем автоматизированного проектирования ТКС, развитие которых выделилось в настоящее время в отдельное направление решения проблемы искусственного интеллекта.

Близкими по содержанию к задачам разработчиков ТКС, решаемым на этапе обоснования целесообразности выбора базовых телекоммуникационных технологий, являются задачи, стоящие перед специалистами, осуществляющими экспертизу качества технических решений, предлагаемых в ходе проектирования ТКС. В рассматриваемом случае в качестве экспертов могут выступать либо представители заказывающих организаций, либо специально создаваемые группы независимых экспертов. Процесс создания ТКС должен происходить в непрерывном соревновательном взаимодействии экспертов и разработчиков системы. При этом соревновательный характер процесса взаимодействия должен быть направлен на решение задач повышения качества проекта в целом, так, чтобы содержание соревновательности, в терминах теории игр, могло быть сформулировано как многошаговая позиционная неантогонистическая игра, предполагающая приблизительно равные возможности сторон.

Вместе с тем, практика показывает, что разработка сложных технических систем осуществляется на основе широкого использования средств САПР и, как правило, большими коллективами специалистов в области телекоммуникаций, составляющих в совокупности полноценные предприятия – системные интеграторы, активно взаимодействующие с проектными организациями. Тогда как экспертная деятельность, в большинстве случаев, осуществляется небольшой группой специалистов в той или иной области телекоммуникаций с минимальным использованием средств автоматизации.

Кроме того, как показывает практика, организация экспертной деятельности в сфере телекоммуникационных проектов очень часто сводится к субъективной оценке экспертом (группой экспертов) степени соответствия представленных разработчиком материалов (отчетов, оборудования, сегментов, опытных участков ТКС и т.д.) субъективно же сформулированным требованиям технического задания. При этом в ходе формирования экспертного заключения, в лучшем случае, используются коллективные методы работы (обмен мнениями, «мозговой штурм», метод «суда» и т.д.). Методы, направленные на снижение организационных сложностей коллективной работы, а так же методы снижения степени субъективности экспертных оценок на практике, как правило, не используются.

Результаты анализа реальных соотношений сил и средств участников проектов ТКС и организации их деятельности явно указывают на то, что процесс экспертной деятельности должен быть автоматизирован не в меньшей степени, нежели процесс разработки системы. Вместе с тем, каких-либо концептуальных решений по разработке автоматизированных систем поддержки принятия экспертного решения о качестве проектных решений, предлагаемых разработчиками для реализации в ТКС в ходе проектирования системы, к настоящему времени не выработано.

Результаты анализа перспективным направлений автоматизации процесса принятия экспертного решения в различных областях знаний показали, что наиболее действенными являются подходы, связанные с разработкой экспертных систем как самого востребованного практикой направления развития интеллектуальных систем.

Поэтому, решение комплекса взаимоувязанных научных задач, составляющих в совокупности проблему разработки методологии создания и внедрения телекоммуникационных экспертных систем (ТКЭС) в процесс экспертизы телекоммуникационных проектов, является в настоящее время особенно актуальным.

При разработке телекоммуникационных экспертных систем необходимо учитывать объективные различия между экспертной деятельностью и оценочной составляющей деятельности разработчиков в процессе проектирования ТКС. Основное различие состоит в том, что приоритетными объектами экспертной деятельности являются внешние (потребительские) свойства системы, тогда как оценочный аспект деятельности разработчиков требует, прежде всего, оценки качества конкретных технических решений по полному перечню решаемых задач проектирования (оценка внутренних свойств разрабатываемой системы). Поэтому алгоритмическое обеспечение ТКЭС должно разрабатываться с учетом направленности на формирование экспертных оценок, основанных на анализе значений некоторых обобщенных показателей качества проектируемой системы, характеризующих особенности предлагаемых к реализации системообразующих технических решений и непосредственно отражающих существенные свойства проектируемой ТКС, определяющие технический облик системы в целом.

Таким образом, возникшее и непрерывно углубляющееся в настоящее время объективное противоречие между субъективным характером формирования экспертных оценок качества проекта ТКС, с одной стороны, и ростом степени обоснованности проектно-технических решений на основе широкого внедрения в процесс разработки средств

САПР, с другой стороны, должно преодолеваться на основе разработки и внедрения телекоммуникационных экспертных систем, позволяющих автоматизировать деятельность немногочисленных по составу и разнообразных по специализации групп экспертов. Рост степени объективности экспертных оценок на основе внедрения в практику экспертной деятельности интеллектуальных систем поддержки принятия решений позволит существенным образом уменьшить степень риска возникновения ошибок проектирования и, как следствие, значительно снизить уровень финансовых потерь при реализации проектов ТКС.

Решению проблемы формирования концептуальных и методологических основ организации экспертной деятельности в ходе проектирования ТКС на основе разработки и внедрения ТКЭС как системы поддержки принятия экспертного решения посвящено данное диссертационное исследование.

**Объектом исследования** являются перспективные гетерогенные мультисервисные телекоммуникационные системы.

**Предметом исследования** является процесс экспертизы качества системообразующих проектно-технических решений, предлагаемых к реализации в ходе проектирования телекоммуникационных систем, протекающий в изменяющихся условиях различного характера и уровня априорной неопределенности исходных данных о проектируемой системе.

**Целью работы** является разработка концептуальных и методологических основ автоматизации процесса экспертной деятельности, осуществляемой в ходе разработки проектов перспективных телекоммуникационных систем, предусматривающей создание и внедрение телекоммуникационных экспертных систем, позволяющих существенно снизить финансовые и временные затраты на проектирование и последующую эксплуатацию телекоммуникационных систем за счет снижения уровня рисков принятия субъективно-ошибочных проектно-технических решений.

**Научная проблема**, решаемая в диссертационной работе, заключается в разработке концептуальных и методологических основ экспертизы проектов телекоммуникационных систем, предусматривающих создание и внедрение интеллектуальных телекоммуникационных экспертных систем, позволяющих существенно снизить уровень объективного противоречия между субъективным характером формирования экспертных оценок системообразующих проектно-технических решений, принимаемых в ходе разработки телекоммуникационных систем, с одной стороны, и ростом степени автоматизации процесса проектирования телекоммуни-

кационных систем, с другой.

**Методы исследования.** Теория сложных систем, теория вероятностей и случайных процессов, теория декомпозиции, теория анализа эффективности, теория оптимизации, теория переменных состояния, теория марковских процессов, теория массового обслуживания, теория стохастического оценивания, теория нечетких множеств, теория нечеткого управления, теория искусственных нейронных сетей, теория принятия решений в условиях неопределенности, математическое программирование, аналитическое и имитационное моделирование.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту.**

1. Метод синтеза оптимальных систем экспертных показателей качества перспективных телекоммуникационных систем, позволяющий формировать на основе разработанных алгоритмов декомпозиции и редукции системы безыбыточных и чувствительных к особенностям проектно-технических решений показателей качества на различных этапах проектирования мультисервисных и гетерогенных телекоммуникационных систем.
2. Результаты разработки моделей процессов функционирования перспективных телекоммуникационных систем, учитывающих особенности функционирования мультисервисных гетерогенных систем в условиях различного уровня и характера априорной неопределенности относительно свойств протекающих в них процессов.
3. Результаты разработки алгоритмов экстраполяции-оценивания состояний моделей процесса изменения значений экспертных показателей качества в условиях стохастической и нечеткой априорной неопределенности исходных данных для проектирования телекоммуникационных систем.
4. Метод многоуровневого оценивания систем экспертных показателей качества перспективных телекоммуникационных сетей, включающих в себя экспертные показатели качества физического, канального, сетевого уровней и критерии оценки численных значений экспертных показателей качества, позволяющие учесть основные особенности перспективных мультисервисных гетерогенных телекоммуникационных систем.
5. Концептуальные основы технической реализации телекоммуникационных экспертных систем на основе моделей функционирования и алгоритмов экстраполяции-оценивания значений экспертных показателей качества в условиях различного уровня и характера априорной неопределенности на различных этапах проектирования телекоммуникационных систем.

**Научная новизна** работы обусловлена тем, что в ней:

1. Впервые разработаны концептуальные и методологические основы экспертизы телекоммуникационных проектов на основе внедрения в практику экспертной деятельности телекоммуникационной экспертной системы как системы поддержки принятия экспертного решения о целесообразности внедрения в разрабатываемую телекоммуникационную систему различных вариантов проектно-технических решений.
2. С целью создания аппаратно-программного комплекса системы поддержки принятия экспертного решения разработаны новые модели процесса (подпроцессов) функционирования перспективных телекоммуникационных систем, алгоритмы экстраполяции-оценивания значений экспертных показателей качества в условиях различного характера и уровня априорной неопределенности.
3. Разработаны новые методики синтеза оптимальных систем экспертных показателей качества и критериев оценки показателей для различных уровней ЭМ ВОС в условиях неопределенности. Синтезированные на основе разработанных методик системы экспертных показателей качества и критериев их оценивания впервые позволили учесть особенности реализации различных проектно-технических решений на физическом, канальном и сетевом уровнях ЭМ ВОС при формировании превентивных экспертных оценок качества проектно-технических решений, предлагаемых к реализации на различных этапах проектирования телекоммуникационных систем.
4. Новизна полученных результатов, с точки зрения научной значимости, способствует развитию теории оценивания, теории моделирования процессов, реально протекающих в сложных информвционно-технических системах, теории контроля качества сложных динамических систем. Реализация новых результатов направлена на получение достоверной и безызбыточной информации о качестве перспективных гетерогенных мультисервисных телекоммуникационных систем на различных этапах проектирования.

**Практическая ценность** работы определяется тем, что реализация разработанных концептуальных основ автоматизации экспертной деятельности на основе внедрения телекоммуникационной экспертной системы, создаваемой в соответствии с обоснованно выбранными принципами построения, разработанными моделями, методами и алгоритмами позволит существенно снизить уровень экономических потерь в процессе разработки и эксплуатации перспективных телекоммуникационных систем на основе повышения степени объективности экспертных оценок

качества проектно-технических решений, формируемых на различных этапах проектирования.

**Реализация результатов исследований.** Основные результаты исследований реализованы в ОКР «Дигер», выполненной по заказу МВД России, при создании нормативно-технической базы и руководящих документов по проектированию перспективных телекоммуникационных систем двойного назначения 16 ЦНИИС МО, а так же в ходе проведения экспертизы проектов оснащения объектов опытного района Объединенной автоматизированной цифровой системы связи ВС РФ 17 ЦПИС МО, что подтверждается соответствующими актами.

**Апробации.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 22-ой юбилейной НТК ВАС в Санкт-Петербурге в 1994 году, НТК ВИПС в 1995 году в Орле, НТК “Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2003)” в Санкт-Петербурге в 2003 году, всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в Вооруженных силах РФ» в Санкт-Петербурге в 2003 году, II Международной научно-практической конференции «Экономика и инфокоммуникации в XXI веке» в Санкт-Петербурге в 2003 году, межвузовской НТК «Военная электроника. Опыт использования и проблемы, подготовка специалистов» в Воронеже в 2004 году, Международной научной конференции «Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов» в Москве в 2003 году, 6-ой Всероссийской конференции «Проблемы развития технологических систем государственных органов охраны, специальной связи и информации» в Орле в 2009 г.

**Публикации.** Содержание диссертационной работы отражено в монографии, в 60 печатных работах (из них 28 статей в журналах перечня ВАК) и 3 изобретениях. На часть публикаций с основными результатами работы приведены ссылки в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и отдельной книги приложений. Она содержит 475 листов, включая 357 листов текста, 92 листа с таблицами, графиками и рисунками, 6 листов перечня сокращений, 20 листов списка использованных источников, включающего 165 наименований, и 414 листов приложений в отдельной книге.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрыта актуальность, новизна, научная и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цель, научная проблема, перечислены основные научные результаты, выносимые на защиту, раскрыто содержание основных разделов диссертации.

**В первом разделе** представлены результаты анализа характеристик

существующих и перспективных телекоммуникационных систем и технологий информационного обмена. Особое внимание уделяется рассмотрению разноплановых процессов конвергенции, определяющих облик сетей следующего поколения (NGN). Архитектура одного из типичных вариантов построения NGN представлена на рис. 1.

Результаты сравнительного анализа тенденций развития отечественной телекоммуникационной сферы и тенденций развития аналогичной сферы развитых зарубежных государств позволяют сделать вывод об их идентичности с поправкой на некоторое запаздывание внедрения передовых телекоммуникационных технологий в нашей стране, обусловленное, прежде всего, продолжающейся эксплуатацией большого количества морально и физически устаревшего оборудования. Рассматриваются варианты построения NGN в России, делается вывод о целесообразности поэтапной реализации сценария «наложенной сети». Особое внимание уделяется анализу действующих Рекомендаций ITU, касающихся проблем обеспечения QoS. Отмечается несоответствие некоторых терминов и определений, представленных в различных Рекомендациях ITU. Разработан понятийный аппарат, отражающий основные аспекты экспертной деятельности в ходе проектирования ТКС как сложной пространственно распределенной технической системы. Взаимосвязь процессов разработки ТКС и экспертизы представлена на рис. 2.

Отмечается, что многообразие задач различной степени сложности, стоящих перед перспективными мультисервисными гетерогенными ТКС, многообразие рекомендаций, стандартов, протоколов, разработанных различными организациями телекоммуникационного сообщества, большое количество производителей телекоммуникационного оборудования, предлагающих разнообразные проектно-технические решения (ПТР) сходных по своей сути задач, обуславливает необходимость незамедлительной разработки экспертных систем в области телекоммуникаций.

**Во втором разделе** сформулированы основные направления предлагаемого подхода к организации экспертной деятельности, состоящего в построении оптимальных (безызыбыточных и чувствительных к особенностям анализируемых технических решений) глобальной и локальных векторных экспертных систем показателей качества (ГЭСПК и ЭСПК) на основе алгоритмов, разработанных с использованием основных результатов теорий декомпозиции (I.P. Wilson, I.Lefkowitz), чувствительности (Е.Н. Розенвасер, Р.М. Юсупов) и теории полезности с после-

дующим анализом значений показателей качества при реализации в проекте ТКС различных технических решений.

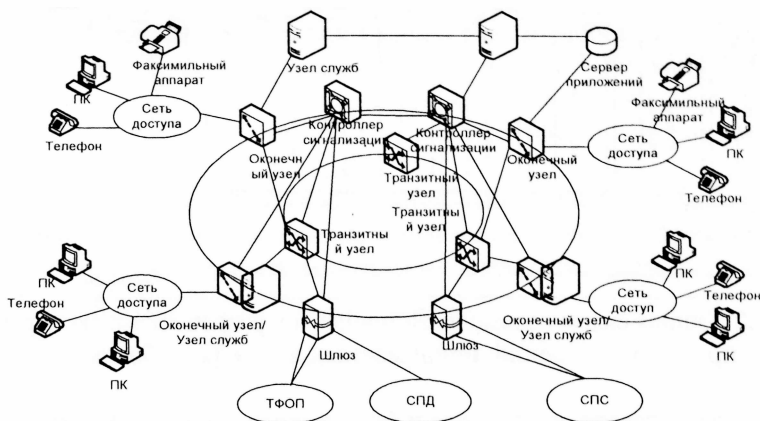


Рис. 1. Вариант структурной схемы NGN

Процесс декомпозиции глобальной ЭСПК на иерархически связанную совокупность локальных ЭСПК, принадлежащих различным уровням ЭМ ВОС, должен состоять из ряда этапов: Применение метода структурной декомпозиции, позволяющего получить локальные ЭСПК в соответствии с задачами, решаемыми на различных уровнях ЭМ ВОС путем видоизменения общей цели функционирования для каждого уровня ТКС  $W[\zeta(k)] \rightarrow w[\zeta_i(k)]$  и разбиения общего множества ЭПК системы на подмножества ЭПК различных уровней ЭМ ВОС  $w[Y(k)] \rightarrow w[Y_i(k)]$ . Использование данного метода обусловлено структурой (иерархией) процессов, которые призвана реализовать ТКС.

1. Иерархия процессов выстраивается исходя из принадлежности тому или иному уровню ЭМ ВОС. Формализованная запись первого этапа декомпозиции, опирающегося на метод структурной декомпозиции, имеет вид:

$$\bar{Y}_{ТКС}(k) \cup \bar{Y}_{i,ТКС}(k), \quad \bar{Y}_{i,ТКС}(k) = \{\bar{Y}_{сет.ур.}(k); \bar{Y}_{кан.ур.}(k); \bar{Y}_{физ.ур.}(k)\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} W[Y(k)] &\rightarrow w[Y_i(k)]; \\ w[Y(k)] &\rightarrow w[Y_i(k)]; \\ \forall (w, y) &\in Y_i(k) \end{aligned}$$

где  $\bar{Y}_{сет.ур.}(k)$ ,  $\bar{Y}_{кан.ур.}(k)$  и  $\bar{Y}_{физ.ур.}(k)$  - соответственно локальные ЭСПК

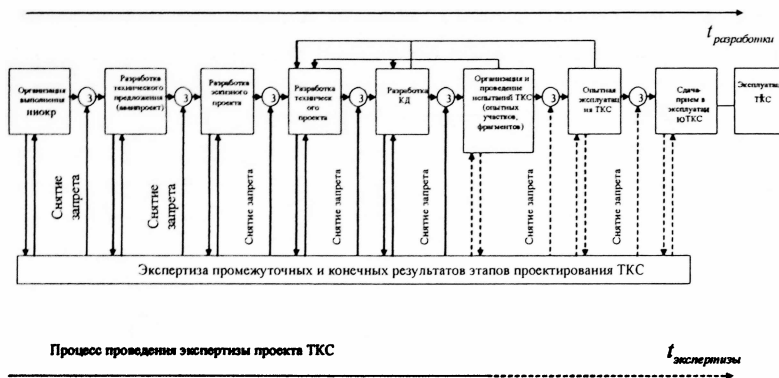


Рис.2 Общая схема взаимосвязи процессов разработки и экспертизы проектных решений, принимаемых в ходе разработки ТКС

процессов сетевого, канального и физического уровней ЭМ ВОС.

2. Применение метода параметрической декомпозиции, позволяющего декомпозировать локальные ЭСПК  $\vec{Y}_{сет.ур}(k)$ ,  $\vec{Y}_{кан.ур}(k)$  и  $\vec{Y}_{физ.ур}(k)$  на отдельные пары иерархически взаимосвязанных локальных ЭПК процессов верхнего и нижнего уровней. Для процессов сетевого и канального уровней:

$$\vec{Y}_{пр.верх.ур.}(k) = \vec{Y}_{сет.ур.}[Y_1^*(k), Y_2(k)] \cup \vec{Y}_{кан.ур.}[Y_1(k), Y_2^*\{Y_1(k)\}], \quad (2)$$

при условии

$$\forall \{(Y_1(k), Y_2(k)) \in \vec{Y}_{пр.верх.ур.}(k)\}, \exists (Y_2(k) : Y_2(k) \in \vec{Y}_{пр.верх.ур.}(k); Y_2(k) R Y_1(k)); \\ \exists (Y_1(k) : Y_1(k) \in \vec{Y}_{пр.верх.ур.}(k); Y_1(k) R Y_2(k)).$$

Для ЭПК процессов канального и физического уровней  $\vec{Y}_{пр.ниж.ур.}(k)$  задача решается аналогично:

$$\vec{Y}_{пр.ниж.ур.}(k) = \vec{Y}_{кан.ур.}[Y_2^*(k), Y_3(k)] \cup \vec{Y}_{физ.ур.}[Y_2(k), Y_3^*\{Y_1(k)\}], \quad (3)$$

при условии

$$\forall \{(Y_2(k), Y_3(k)) \in \vec{Y}_{пр.ниж.ур.}(k)\}, \exists (Y_2(k) : Y_2(k) \in \vec{Y}_{пр.ниж.ур.}(k); Y_2(k) R Y_3(k)); \\ \exists (Y_3(k) : Y_3(k) \in \vec{Y}_{пр.ниж.ур.}(k); Y_3(k) R Y_2(k));$$

Окончательный отбор чувствительных к особенностям ПТР экспертных показателей качества (ЭПК) в ЭСПК предлагается производить на основе разработанного трехэтапного алгоритма редукции, построенного на анализе функций взаимной чувствительности значений ЭПК к изменению переменных состояния ТКС, взаимно корреляционных функ-

ций (ВКФ) и неоклассических функций полезности.

В разделе представлены результаты разработки базовой методики аналитической вероятностной оценки качества функционирования перспективных ТКС на основе использования аппарата условных вероятностей. Разработанная методика позволяет учесть особенности функционирования ТКС на физическом, канальном и сетевом уровнях ЭМ ВОС и произвести корректную свертку отдельных ЭПК в глобальную ЭСПК, отражающую степень достижения общей цели функционирования системы.

Выражения для расчета вероятностей выполнения требований к качеству информационного обмена, управления, качеству функционирования СИО и СУ могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{вып ио}} [\bullet / \bullet] &= P_{\text{сд}} \left[ (t_{\text{дос}} \leq t_{\text{дос тр}}) / (K_{\text{ош}} \leq K_{\text{ош тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{достов}} \left[ (K_{\text{ош}} \leq K_{\text{ош тр}}) / (Y_{\text{упр}} \geq Y_{\text{упр тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып упр}} \left[ (Y_{\text{упр}} \geq Y_{\text{упр тр}}) \right]; \\
 P_{\text{вып упр}} [\bullet / \bullet] &= P_{\text{опер}} \left[ (T_{\text{цв}} \leq T_{\text{цв доп}}) \right] P_{\text{точ упр}} \left[ (\Delta \bar{Y}_{\text{ио}} \leq \Delta \bar{Y}_{\text{ио доп}}) / (\bar{Y}_{\text{непр}} \leq \bar{Y}_{\text{непр тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{непр}} \left[ (\bar{Y}_{\text{непр}} \leq \bar{Y}_{\text{непр тр}}) / (\bar{Y}_{\text{су}} \leq \bar{Y}_{\text{су тр}}) \right] P_{\text{вып су}} \left[ \bar{Y}_{\text{су}} \leq \bar{Y}_{\text{су тр}} \right]; \\
 P_{\text{вып сию}} [\bullet / \bullet] &= P_{\text{вып в}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в сию}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в сию тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып стн}} \geq \bar{Y}_{\text{вып стн тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып стн (сет)}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып стн}} \geq \bar{Y}_{\text{вып стн тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып тн}} \geq \bar{Y}_{\text{вып тн тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып тн (физ)}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып тн}} \geq \bar{Y}_{\text{вып тн тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып су}} \geq \bar{Y}_{\text{вып су тр}}) \right] P_{\text{вып су}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып су}} \geq \bar{Y}_{\text{вып су тр}}) \right] \square / \bar{3} \leq \bar{3}_{\text{тр}}; \\
 P_{\text{вып в}} &= P_{\text{сет в}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в сию}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в сию тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып в кан}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в кан тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{кан в}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в кан}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в кан тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып в физ}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в физ тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{физ в}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в физ}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в физ тр}}) \right]; \\
 P_{\text{вып су}} [\bullet / \bullet] &= P_{\text{вып в су}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в су}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в су тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып прсу}} \geq \bar{Y}_{\text{вып прсу тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып прсу}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып прсу}} \geq \bar{Y}_{\text{вып прсу тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып тн су}} \geq \bar{Y}_{\text{вып тн су тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып тн су}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып тн су}} \geq \bar{Y}_{\text{вып тн су тр}}) \right] \square / \bar{3} \leq \bar{3}_{\text{тр}}; \\
 P_{\text{вып в су}} &= P_{\text{вып в сет}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в сет}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в сет тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып в кан}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в кан тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып в кан}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып в кан}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в кан тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып в физ}} \geq \bar{Y}_{\text{вып в физ тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып в физ}} \left[ \bar{Y}_{\text{вып в физ}} \geq Y_{\text{вып в физ тр}} \right]; \\
 P_{\text{вып прсу}} &= P_{\text{вып пр сет}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып пр сет}} \geq \bar{Y}_{\text{вып пр сет тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып пр кан}} \geq \bar{Y}_{\text{вып пр кан тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып пр кан}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып пр кан}} \geq \bar{Y}_{\text{вып пр кан тр}}) / (\bar{Y}_{\text{вып пр физ}} \geq \bar{Y}_{\text{вып пр физ тр}}) \right] \times \\
 &\times P_{\text{вып пр физ}} \left[ (\bar{Y}_{\text{вып пр физ}} \geq Y_{\text{вып пр физ тр}}) \right];
 \end{aligned} \tag{4-11}$$

где  $P_{сд}$  - вероятность своевременной доставки сообщений,  $P_{достоv}$  - вероятность выполнения требований к показателям достоверности информации, циркулирующей в ТКС,  $K_{ош}$  - коэффициент ошибок,  $P_{опер}$  - вероятность выполнения требований к показателям оперативности управления,  $P_{точ\ упр}$  - вероятность выполнения требований к показателям точности (действенности) управления,  $P_{непр}$  - вероятность выполнения требований к показателям непрерывности управления,  $P_{вып\ v\ cу}$  - вероятность выполнения требований к показателям пропускной способности каналов (выделенных физических, выделенных логических, логических) обмена управляющей информацией,  $P_{вып\ стн(сет)}$  - вероятность выполнения требований к показателям структурной надежности ТКС,  $P_{вып\ тн(физ)}$  - вероятность выполнения требований к показателям технической надежности,  $P_{сет\ v}$  - вероятность выполнения требований к показателям пропускной способности сетевого уровня ТКС,  $P_{кан\ v}$  - вероятность выполнения требований к показателям пропускной способности канального уровня ТКС,  $P_{физ\ v}$  - вероятность выполнения требований к показателям пропускной способности физического уровня ТКС,  $P_{вып\ прс\ v}, P_{вып\ пр\ кан}, P_{вып\ пр\ физ}$  - вероятности выполнения требований к показателям производительности СУ в интересах сетевого, канального и физического уровней ЭМ ВОС соответственно,  $\bar{z} \leq \bar{z}_{пр}$  - условие выполнения требований по эксплуатационным расходам.

Отмечается, что решение задач экспертизы телекоммуникационных проектов осуществляется в условиях различного характера и уровня априорной неопределенности. Изменение уровня и характера априорной неопределенности значений экспертных показателей качества на различных этапах проектирования ТКС обуславливает необходимость реализации гибкого подхода к расстановке приоритетов использования методов преодоления априорной неопределенности на каждом из этапов. Представлены подходы к решению задач формирования экспертных оценок в условиях априорной неопределенности информации, имеющей нечеткий и стохастический характер, на основе методов грубых (задачи классификации) и нечетких множеств (алгоритм Мамдани), искусственных нейронных сетей (экстраполирующая сеть Хопфилда) и вероятностных методов принятия решения (на основе методов ТМО). Делается вывод о целесообразности реализации в ТКЭС смешанных

СМО, действенность которых подтверждается доказательством теоремы ВСМР. Приведены примеры решения частных задач формирования экспертных оценок качества ПТР на основе рассмотренных подходов. Проведен анализ целесообразности реализации имитационных моделей (ИМ) и моделей сети Петри (СП) в ТКЭС. Делается вывод о целесообразности реализации в ТКЭС методов имитационного моделирования, реализующих смешанные СМО, и на основе алгоритма Р.Шеннона формулируются требования к модели для реализации в ТКЭС. Кроме того, в материалах раздела рассмотрены методы оптимизации требований к экспертным показателям качества, позволяющим определить границы достижимости значений показателей с учетом накладываемых на них ограничений, например, технологического и стоимостного характера. Предпочтение для реализации в ТКЭС отдается методам целочисленного программирования, квазиградиентным методам и методам эволюционных вычислений. Делается вывод о том, что доказанность теорем Хехт-Нильсена, У. Ванга, К. Кастро создает предпосылки для достижения синергетического эффекта при решении задач формирования прогнозных оценок значений ЭПК на основе комплексирования аппроксимирующих свойств логики нечеткого вывода с бионическим механизмом аппроксимации ИНС. Кроме того, реализация в нечетких ИНС генетических или стохастических алгоритмов обучения может привести к достижению дополнительного прироста синергетического эффекта относительно комплексирования свойств ИНС и нечеткого вывода.

**В третьем разделе** представлены результаты разработки дискретных по времени и состояниям марковских моделей изменения состояний (значений ЭПК) проектируемой ТКС. Дискретные марковские модели позволяют достаточно адекватно учитывать особенности (передача ИС определенного объема в нормированные временные отрезки, быстрое старение информации о состоянии соединений и т.д.) функционирования современных и перспективных цифровых ТКС. Основным недостатком традиционного описания марковских моделей является сложность представления с его помощью выборочных значений (реализации) случайного процесса. Поэтому предлагается ввести специальные индикаторы  $\theta$  состояния моделируемых последовательностей

$$\tilde{\eta}(k) = \begin{cases} \tilde{\theta}_m(k) = 1 & \text{при } \eta(k) = \eta_m, m = 1, \dots, M, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Суть предлагаемого подхода состоит в получении адекватных дискретному как по времени, так и по состоянию процессу функционирова-

ния стохастических разностных уравнений состояний перспективной ТКС. Модели разработанны на основе леммы о существовании стохастического дифференциала для стандартного винеровского процесса, доказанной А.Н. Ширяевым и являющейся многомерным обобщением известной теоремы Дж. Дуба о принципиальной возможности записи стохастического дифференциала для счетномерного вероятностного процесса при выполнении обычных требований к непрерывности и ограниченности моделируемого процесса. Уравнения состояния и наблюдения, составляющие полную математическая модель случайного процесса, могут быть представлены в следующем виде:

$$\eta(k) = C(k) \bar{\theta}(k), \quad (11)$$

$$\bar{\theta}(k+1) = \Pi^T(k+1, k, r(k)) \bar{\theta}(k) + \Gamma(k) \bar{V}(k), \quad (12)$$

$$\bar{Z}(k) = H(k, \eta(k)) \bar{\theta}(k) + \bar{W}(k), \quad (13)$$

где  $C(k)$  - М-мерная матрица-строка возможных состояний процесса  $\eta(k)$ ;  $\Pi(k+1, k, r(k))$ -матрица одношаговых переходных вероятностей (ОПВ), значения элементов которой зависят от принятых ПТР  $r(k)$  и определяемая в соответствии с соотношениями  $\Pi_{mi}(k+1, k, r(x)) = q_{mi}T$ ,  $\Pi_{mm} = q_{mm}T + 1$ ,  $T$  - период изменения состояния;  $\Gamma(k)$  - М-мерная диагональная матрица возбуждения процесса  $\theta(k)$  с элементами  $\Gamma_{mm}(k) = T \sqrt{2\sigma_{\theta m}^2 q_{mm} / R_{\theta m}}, \sigma_{\theta m}^2$  - априорная дисперсия,  $R_{\theta m}$  - спектральная плотность мощности белого шума возбуждения  $\bar{V}(k)$  ( $V(k)$  - ступенчатый мартингал, удовлетворяющий условию  $M\{\bar{V}((k)/(s))\} = \bar{Z}(\tau), s \leq \tau, \forall k \geq \tau$ ) процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $H(k, \eta)$  - М-мерная диагональная матрица наблюдения за состоянием процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $\bar{Z}(k)$  - М-мерный вектор наблюдения за состоянием процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $\bar{W}(k)$  - вектор белых шумов наблюдения. Структурная схема стохастического формирующего фильтра, аппаратно реализующего выражения (1-3) представлена на рис.3. Результаты проведенных экспериментов показали, что разработанная модель позволяет вполне адекватно (с точностью до 93%) описать стохастические процессы реально протекающие в ТКС.

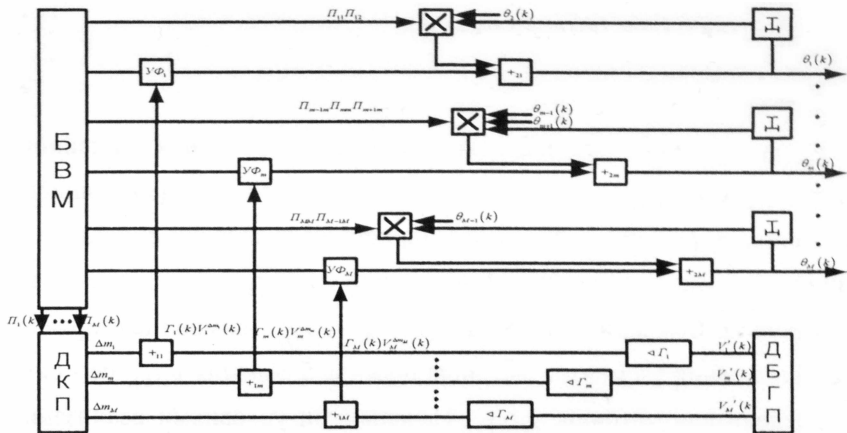


Рис. 3. Структурная схема стохастического формирующего фильтра (СФФ)

В разделе представлен пример учета особенностей ПТР в вероятностно-временном механизме изменения состояния модели, на основе аналитического формулирования выражений для расчета интенсивностей ( $q_{mi}$ ) изменения состояний марковской цепи при различных фазах информационного обмена в ТКС. Возможность учёта особенностей ПТР в вероятностно- временном механизме изменения состояний моделируемого процесса позволяет существенно повысить уровень адекватности разработанной модели.

Представлены результаты разработки алгоритмов оценивания-прогнозирования состояний процесса функционирования (изменения-значений ЭПК), позволяющих учесть особенности разработанных дискретных моделей.

Структурная схема дискретного фильтра Калмана, учитывающего особенности разработанной модели и аппаратно реализующего выражения (14-18), представлена на рис.4

$$\dot{\theta}_m(k+1) = \sum_{q=1}^{m+1} \pi_{qm}(k+1, k, r) \dot{\theta}_q(k) + K_{mm}(k) \times [Z_m(k) - S_m(k) \pi_{mm}(k+1, k, r) \dot{\theta}_m(k)]; \quad (14)$$

$$K_{mm}(k) = \frac{1}{\det V_w(k)} (\pi_{mm}^2(k+1, k, r) \times P_{mm}(\Delta\theta(k+1, k)) S_m(k) A_{mm}(V_w(k))); \quad (15)$$

$$P_{mm}(\Delta\theta(k+1, k)) = \pi_{mm}^2(k+1, k, r) P_{mm}(\Delta\theta(k)) + 4\pi^2(k+1, k, r) \sigma_v^2; \quad (16)$$

$$P_{mm}(\Delta\theta(k)) = (1 - K_{mm}(k))S_m(k)P_{mm}(\Delta\theta(k+1, k)), \quad (17)$$

$$Z_m(k) = S_{mm}\dot{\theta}(k) + V_w(k), \quad (18)$$

где  $K_{mm}(k)$  – элемент матрицы коэффициентов усиления линейного фильтра,  $P_{mm}(\Delta\theta(k+1, k))$  – элемент матрицы априорной дисперсии ошибок оценивания,  $P_{mm}(\Delta\theta(k))$  – элемент апостериорной дисперсии ошибок оценивания,  $S_m$  – элемент матрицы наблюдения ( $H(k, \eta(k))$ ),  $\sigma_v^2$  – элемент матрицы шума возбуждения процесса  $\tilde{\theta}(k)$ ,  $A_{mm}(V_w(k))$  – символ алгебраического дополнения элементов матрицы шума наблюдения  $V_w(k)$ ,  $\det$  – символ определителя матрицы  $V_w(k)$ . Начальными условиями реализации алгоритма являются:  $\dot{\theta}_m(0) = M[\dot{\theta}_m(0)]$ ,  $P_{mm}(\Delta\theta(0)) = V_\theta(0)$ . Скорость сходимости алгоритма составляет 5-10 шагов фильтрации.

На основе методов предложенных в работах Э.Сейджа и Дж. Мелса разработаны алгоритмы анализа чувствительности  $\nu(k)$  предлагаемых алгоритмов оценивания-прогнозирования к отклонениям значений элементов матрицы одношаговых переходных вероятностей и матрицы наблюдений от истинных значений (выражения 19-28).

$$\gamma_r(k) = \frac{\left[ \overset{R}{P}(\Delta\tilde{\theta}(k)) - P(\Delta\tilde{\theta}(k)) \right]}{\Delta\eta_r} \quad (19)$$

$$\overset{R}{P}(\Delta\tilde{\theta}(k)) = [I - K(k)H(k)] \times \overset{R}{P}(\Delta\tilde{\theta}(k+1, k)) \times \\ \times [I - K(k)H(k)]^T + K(k)\overset{R}{V}_w(k)K(k); \quad (20)$$

$$\overset{R}{P}(\Delta\tilde{\theta}(k+1, k)) = \Delta\pi(k+1, k, r)\overset{R}{V}_{\Theta(k)}\Delta\pi^T(k+1, k, r) + \\ + \pi(k+1, k, r)\overset{R}{P}(\Delta\tilde{\theta}(k))\pi^T(k+1, k, r) + \\ + \Delta\pi(k+1, k, r)\overset{R}{P}_e(k)\pi^T(k+1, k, r) + \\ + \pi(k+1, k, r)\overset{R}{P}_e(k)\Delta\pi^T(k+1, k, r) + \\ + \overset{R}{\Gamma}_e\overset{R}{V}_v(k)\overset{R}{\Gamma}^T(k) \quad (21)$$

$$\overset{R}{P}_e(k) = \overset{R}{P}_e(k+1, k)[1 - K(k)H(k)]^T \quad (22)$$

$$\overset{R}{V}_{\Theta}(k) = \pi(k+1, k, r)\overset{R}{V}_{\Theta}(k)\pi^T(k+1, k, r) + \\ + \overset{R}{\Gamma}(k)\overset{R}{V}_v(k)\overset{R}{\Gamma}^T(k) \quad (23)$$

Подписано к печати 24.09.09. Заказ № 574  
Объем 2,0 печ.л. Тираж 100 экз.  
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5  
(499) 263-62-01