

# КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ХОДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Д. М. Ненадович

ОАО «Корпорация специальных космических систем «Комета»

Поступила в редакцию 23.04.2017 г.

**Аннотация.** В статье представлены некоторые результаты разработки концептуальных основ создания телекоммуникационных экспертных систем, позволяющих существенным образом повысить степень объективности формирования экспертных оценок качества проектно-технических решений, принимаемых в ходе проектирования телекоммуникационных систем. Предложенные подходы к автоматизации экспертной деятельности, позволяют учесть различие в характере и степени априорной неопределённости исходной информации, присущие каждому этапу проектирования.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы, телекоммуникационные экспертные системы, проектно-технические решения, экспертные показатели качества.

**Annotation.** The article presents the results of the development of conceptual bases of creation of telecommunication expert systems that allow significantly improve the level of objectivity of forming expert quality estimates of design and technical decisions made during the design of telecommunication systems. Proposed approaches to automation of expert activity can take into account differences in the degree of a-prior uncertainty of the initial information specific to each design phase.

**Keywords:** telecommunication systems, telecommunication expert systems, project and technical decisions, expert quality estimates.

## ВСТУПИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В условиях резкого спада производства, переживаемого отечественными предприятиями-производителями телекоммуникационных средств, разработку перспективных телекоммуникационных систем (ТКС) в обозримом будущем придется вести на основе выбора и функционального согласования того или иного перечня телекоммуникационного оборудования зарубежных производителей. В ходе проектирования ТКС деятельность Заказчика сводится по существу к неким договорным формам контроля за ходом разработки ТКС, как правило, в моменты принятия стратегических проектно-технических решений (ПТР) по построению сетей. При этом индикаторами качества ПТР выступают значения экспертных показателей каче-

ства (ЭПК) функционирования ТКС, при реализации в системе того или иного решения. В зависимости от сложности моделируемых процессов, из ЭПК могут быть сформированы системы (ЭСПК), содержащие различное количество ЭПК. В этих условиях, резко возрастает значение интеллектуализации экспертной деятельности Заказчика в ходе проектирования ТКС [1].

Результаты анализа основных этапов разработки телекоммуникационных систем (структурная схема взаимосвязи процессов разработки и экспертизы проектов ТКС, представлена на рис.1), многообразия телекоммуникационных технологий различной сложности, различных уровней ЭМ ВОС и особенностей функционирования сетей сотовой, спутниковой, радиорелейной, оптической и проводной связи позволяют отметить, что проведение экспертизы проектов перспективных ТКС, является сложной, завися-

щей от множества факторов многоэтапной задачей. Кроме того, решение задач экспертизы проектов перспективных ТКС происходит в условиях различного уровня и характера априорной неопределенности исходной информации и требований к системам. Условия осуществления экспертной деятельности и, связанные с ними методы проведения экспертизы, представлены на рис. 2. Анализ перечисленных выше факторов позволяют сделать вывод о невозможности качественного решения задач экспертизы без автоматизации процесса экспертной деятельности [1].

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Автоматизации экспертной деятельности выглядит наиболее целесообразной на основе разработки телекоммуникационной экспертной системы (ТКЭС) – интеллектуальной системы, осуществляющей информационную поддержку процесса формирования экспертных оценок качества ПТР, принимаемых в ходе проектирования телекоммуникационных систем на основе реализации программы-модели процесса мышления эксперта на основе анализа данных специализированной базы знаний и данных, полученных в ходе вероятностного, нечеткого и генетического моделирования, а так же данных, полученных из системы-аналога [1].

Один из вариантов общей структурной схемы ТКЭС представлены на рис. 3. Основными элементами схемы являются блок экспертных знаний (БЭЗ), блок стохастических моделей (БСМ), блок имитационных моделей (БИМ), блок нечетких моделей (БНМ), блок искусственных нейронных сетей (БИНС), блок анализа информации поступающей из действующей системы (опытного участка ТКС) (БА ИДС), блок оптимизации технических требований (БОТТ), блок управления ТКЭС (БУ), блок представления знаний (БПЗ), интерпретатор знаний (ИПЗ).

Учитывая, что содержание БЭЗ, БА ИДС, БУ, БПЗ, ИПЗ, составляет информация определяющая функционирование ТКЭС, подлежащая отдельному рассмотрению, коротко остановимся на функциональных основах реализации БСМ и БИМ. Изложение подходов к технической реализации БНМ, БИНС и БОТТ не укладывается в рамки настоящей статьи и будет представлено в последующей публикации.

Основу содержания БСМ являются марковские модели процесса функционирования ТКС, при реализации в них различных проектно-технических решений (ПТР). Основным недостатком классического описания данного вида моделей, является невозможность представления выборочных значений (реализации) случайного процесса

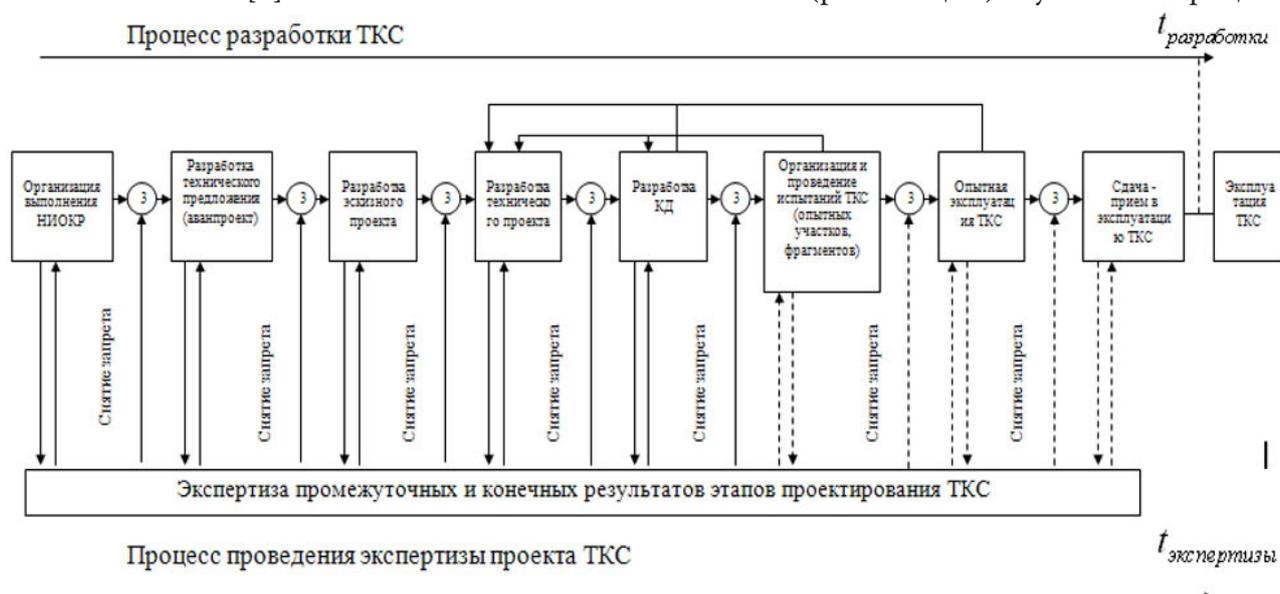


Рис. 1 Общая схема взаимосвязи процессов разработки экспертизы проектных решений, принимаемых в ходе разработки ТКС

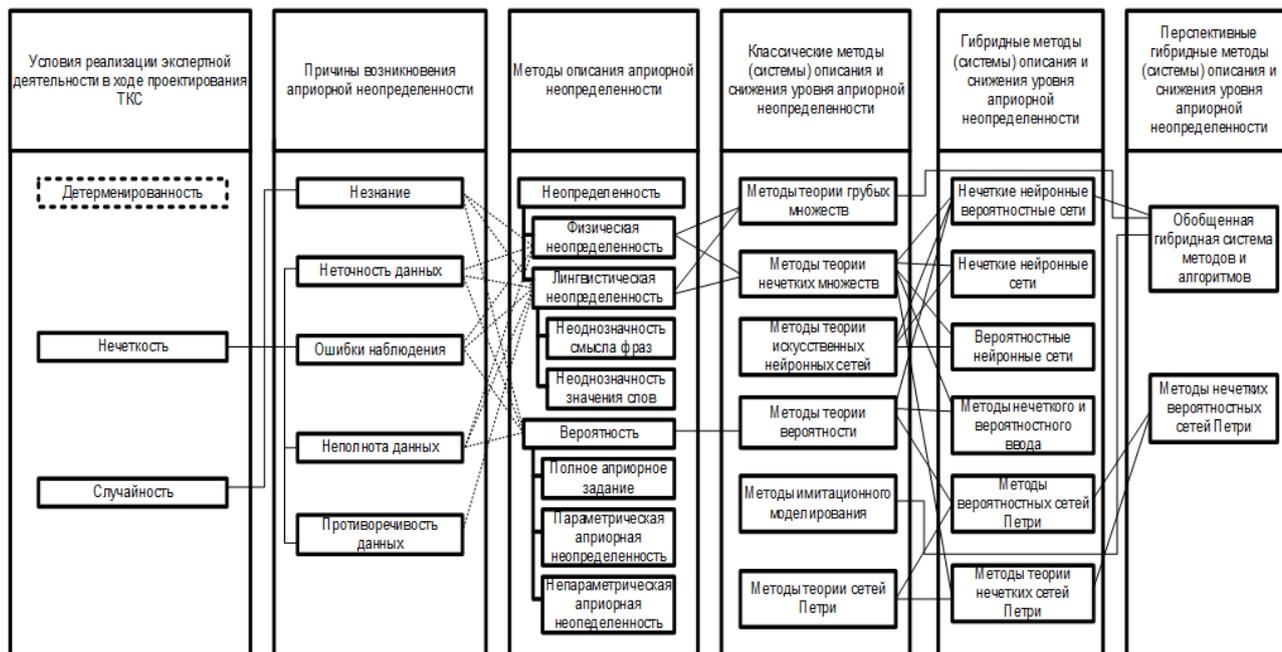


Рис. 2. Взаимосвязь характера и уровней априорной неопределенности исходной информации о проектируемой ТКС. Методы, направленные на снижение степени априорной неопределенности

$\eta(k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, K$ . Поэтому в работе [2] введены специальные индикаторы состояния моделируемых последовательностей:

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

Суть подхода состоит в получении адекватных дискретному, как по времени, так и по состоянию процессу функционирования стохастических разностных уравнений состояний перспективной ТКС, на основе леммы о существовании стохастического дифференциала для стандартного винеровского процесса 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.

В этом случае, уравнения состояния и наблюдения, составляющие полную математическую модель случайного процесса могут быть представлены в следующем виде [2]:

$$\eta(k) = C(k)\bar{\theta}(k), \quad (2)$$

$$\bar{\theta}(k+1) = \Pi^T(k+1, k, r(k))\bar{\theta}(k) + \Gamma(k)\vec{V}(k), \quad (3)$$

$$\vec{Z}(k) = H(k, \eta(k))\bar{\theta}(k) + \vec{W}(k), \quad (4)$$

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  $\Pi_{ml}(k+1, k, r(x)) = q_{ml}T$ ,  $\Pi_{mm} = q_{mm}T + 1$ ,  $T$  – период изменения состояния;  $\Gamma(k)$  – М-мерная диагональная матрица возбуждения процесса  $\theta(k)$  с элементами  $\Gamma_{mm}(k) = T\sqrt{2\sigma_{\theta m}^2 q_{mm} / R_{vm}}$ ,  $\sigma_{\theta m}^2$  – априорная дисперсия,  $R_{vm}$  – спектральная плотность мощности белого шума возбуждения  $\vec{V}(k)$  ( $V_m(k)$  – ступенчатый мартингал, удовлетворяющий условию  $M\{V_m(k)/s\} = Z(\tau)$ ,  $s \leq \tau$ ,  $\forall k \geq \tau$ ) процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $H(k, \eta)$  М-мерная диагональная матрица наблюдения за состоянием процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $\vec{Z}(k)$  – М-мерный вектор наблюдения за состоянием процесса  $\bar{\theta}(k)$ ;  $\vec{W}(k)$  – вектор белых шумов наблюдения.

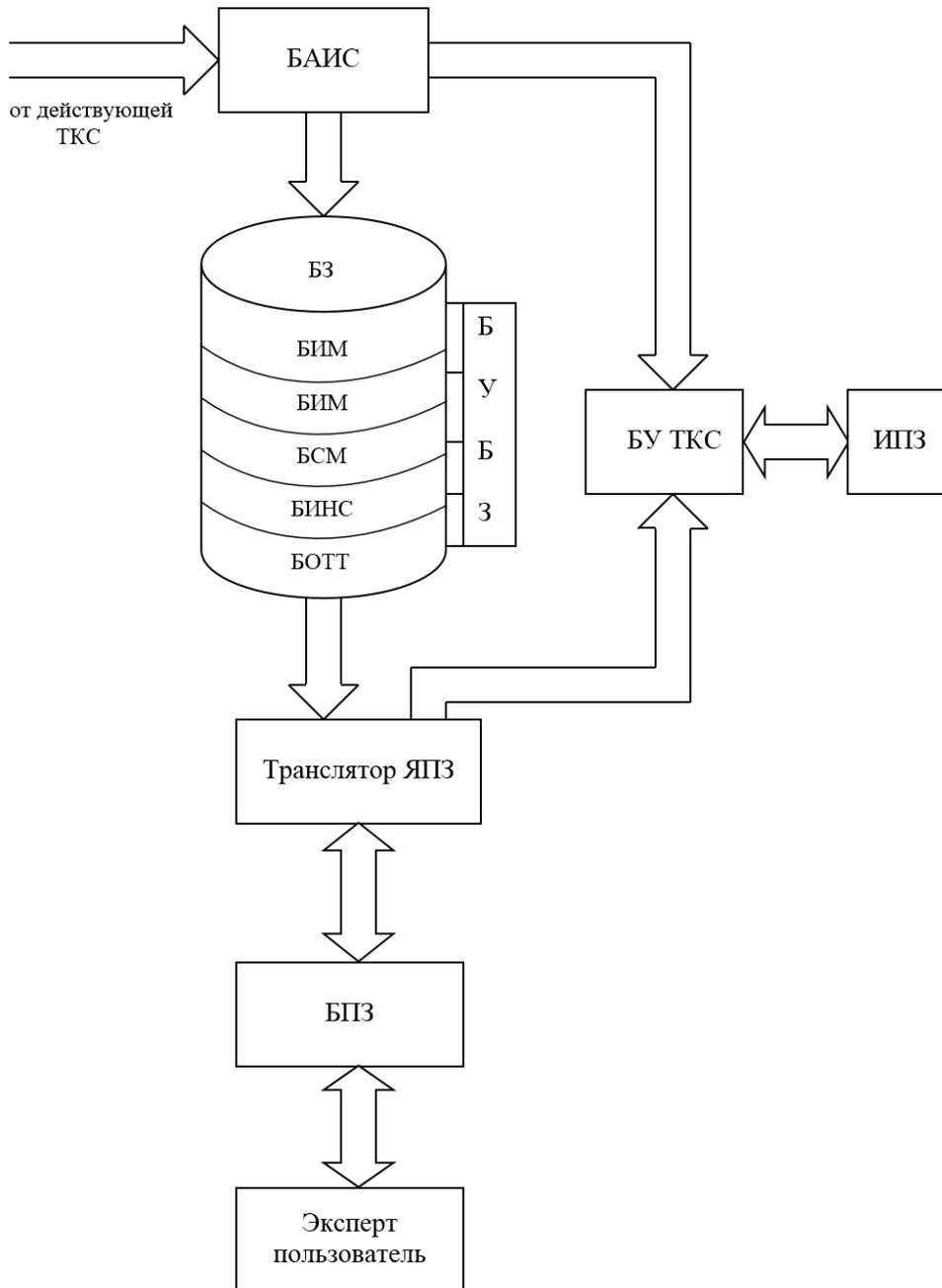


Рис. 3. Вариант структурной схемы ТКЭС с централизацией знаний

Структурная схема стохастического формирующего фильтра (СФФ), аппаратно реализующего уравнение (3), представлена на рис 4. Формирование процесса функционирования проектируемой ТКЭС при априорно заданных вероятностях начальных состояний  $(\Pi_1(0) \dots \Pi_M(0))$  осуществляется следующим образом. Датчик белой гауссовской последовательности (ДБГП) генерирует значения вспомогательной последовательности  $V'(k)$  с нормальной плотностью распределения, которые корректируются: 1) по матема-

тическому ожиданию в первой группе сумматоров  $1, 1 \dots 1, M$  в соответствии со значениями  $\Delta m_1 - \Delta m_M$ , формируемыми датчиком корректирующих последовательностей (ДКП); 2) по дисперсии – усилителями с коэффициентами  $\Gamma_1(k) - \Gamma_M(k)$  в соответствии с априорными данными цепи Маркова, формируемыми блоком выбора матрицы переходных вероятностей БВМ. Группа устройств формирования УФ, управляемая откорректированными значениями последовательности  $\Gamma_1 \pi(k) V_1^{\Delta m_1} - \Gamma_M(k) V_M^{\Delta m_M}$ , на основании

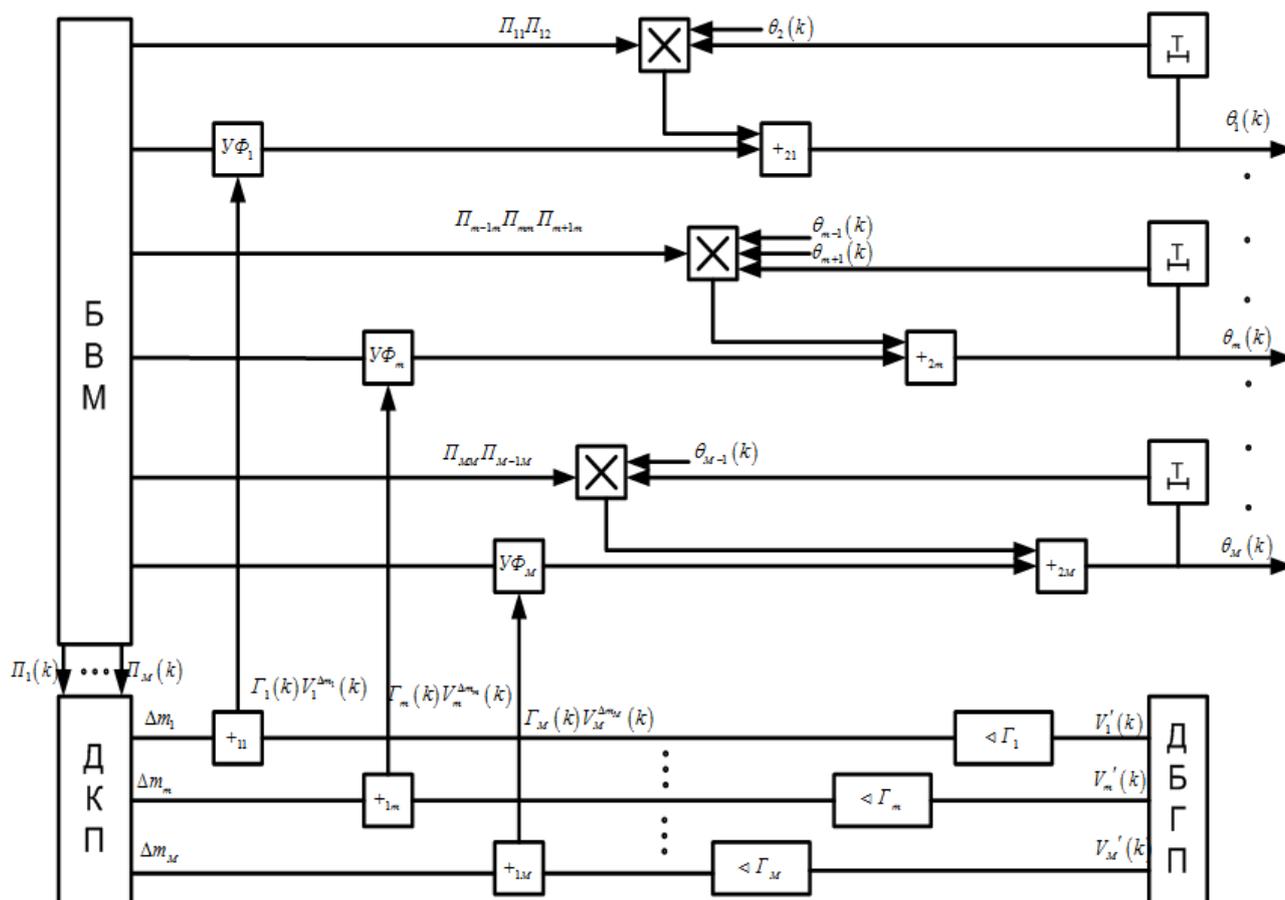


Рис. 4. Структурная схема стохастического формирующего фильтра (СФФ)

принятых решений о значениях индикаторов на предыдущем шаге (формируемыми на выходах соответствующих устройств задержки), а так же с учетом значений элементов матрицы ОПВ, формирует последовательности, компенсирующие нецелочисленные значения индикаторов, возникающие в правой части уравнения (3). Завершается процедура формирования значений индикаторов второй группой сумматоров (2,1-2,М). Таким образом, представленный СФФ полностью определяет пошаговые значения векторов индикаторов процесса, моделирующего процесс (подпроцессы) функционирования ТКС при реализации того или иного ПТР.

Основу содержания БИМ составляют СМО, а именно смешанные СМО [3], состоящие из конечного числа многоканальных и одноканальных центров обслуживания, между которыми в соответствии с маршрутной матрицей циркулируют разноприоритетные сообщения (с возможностью изменения приоритета в ходе передачи по сети). Опреде-

лено четыре класса центров обслуживания, каждый класс характеризуется дисциплиной обслуживания, типом входящего потока и распределением времени обслуживания. Для четырех классов центров обслуживания доказано существование стационарного распределения вероятностей состояний СМО:

– Центр типа 1. обслуживание сообщений в центре осуществляется в соответствии с дисциплиной FCFS. Длительность обслуживания сообщений всех классов имеет одно и то же экспоненциальное распределение с интенсивностью  $\underline{\mu}_i(n_i)$  [ $i$  – номер данного центра в сети ( $i = 1, M$ )], зависящей от числа сообщений в центре  $n_i$ . Состояние  $n_i$  центра определяется вектором  $n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{in_i}$ , где  $n_{ij}$  – номер класса сообщения, стоящего  $j$ -м в очереди ( $j = 1, n_i; n_{ij} = 1, R$ ).

– Центр типа 2. Обслуживание сообщений в однолинейном центре осуществляется в соответствии с дисциплиной PS (разделение процессора). Длительность обслуживания сообщения  $r$ -го класса,  $r = 1, 2, \dots, R$ , распре-

делена по закону Кокса с параметрами  $a_{irl}$ ,  $b_{irl}$ ,  $\mu_{irl}$ ,  $L_{irl}$  ( $l = 1, L_{ir}$ ) и средним

$$\sum_{l=1}^{L_{ir}} (A_{irl} / \mu_{irl}),$$

где  $A_{irl}$  – вероятность того, что сообщение класса  $r$  достигает  $e$ -й стадии обслуживания в  $i$ -м узле. Состояние центра  $n_i$  определяется вектором  $(n_i, n_{i2}, \dots, n_{ir})$ , где  $n_{ir}$  – вектор  $(n_{ir1}, n_{ir2}, \dots, n_{irL_{ir}})$ ,  $l$ -я координата которого  $n_{irl}$  означает число сообщений  $r$ -го класса в  $i$ -м центре, которые находятся на  $l$ -м этапе обслуживания. Число сообщений  $r$ -го класса в  $i$ -м центре составляет  $n_{ir} = n_{ir1} + n_{ir2} + \dots + n_{irL_{ir}}$ , а общее число сообщений в центре  $n_i = n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ir}$ . Таким образом скорость завершения обслуживания сообщения  $r$ -го класса находящегося на  $l$ -м этапе в состоянии  $n_i$  центра, равна  $n_{irl} / n_i$ . После завершения обслуживания сообщение покидает центр с вероятностью  $b_{irl}$  и переходит к следующей стадии с вероятностью  $a_{irl}$ .

– Центр типа 3. Многолинейный центр с числом обслуживающих приборов, равным или большим максимального количества сообщений в этом центре, и дисциплиной обслуживания IS (обслуживанием без ожидания). Состояние центра и распределение длительности обслуживания, имеющие рациональное преобразование Лапласа описываются так же, как и для центра второго типа.

– Центр типа 4. Однолинейный центр с дисциплиной обслуживания LCFS. Так же как и для узлов второго и третьего типов, распределение длительности обслуживания имеет рациональное преобразование Лапласа и может отличаться для сообщений разных классов. Состояние центра  $n_i$  определяется вектором  $(r_1 l_1, r_2 l_2, \dots, r_n l_n)$ , где  $n_i$  – число сообщений в  $i$ -м центре,  $(r_j l_j$  – пара, характеризующая сообщение, стоящее  $j$ -м в очереди, при дисциплине обслуживания LCFS, ( $r_j$  – номер класса сообщения и  $l_j$  – номер прерванного этапа обслуживания). Обслуживание прерванного сообщения начинается с того момента, когда оно было прервано.

Важным вехой развития ТМО явилось доказательство теоремы ВСМР (по первым буквам фамилий авторов доказательства). Суть доказанной теоремы можно сформулировать следующим образом: для смешанной СМО, каждый центр которой принадлежит к одному из указанных четырех типов, стационарное распределение вероятностей состояния существует и имеет мультипликативный вид:

$$P(n') = G^{-1} \Lambda * (n') \prod_{i=1}^M f_i(n'_i), \quad (5)$$

Для каждого из типов центров и видов потока стационарное распределение вероятностей имеет следующий вид:

$$f_i(n_i) = \begin{cases} \left( \frac{1}{\mu_i} \right)^{n_i} \prod_{j=1}^{n_i} e_j n_{ij}, & \text{если } i\text{-й центр 1-го типа,} \\ n_i! \prod_{r=1}^R \prod_{l=1}^{L_{ir}} \left\{ \left[ \frac{e_{ir} A_{irl}}{\mu_{irl}} \right]^{n_{irl}} / n_{irl}! \right\}, & \text{если } i\text{-й центр 2-го типа,} \\ \prod_{r=1}^R \prod_{l=1}^{L_{ir}} \left\{ \left[ \frac{e_{ir} A_{irl}}{\mu_{irl}} \right]^{n_{irl}} / n_{irl}! \right\}, & \text{если } i\text{-й центр 3-го типа,} \\ \prod_{j=1}^{n_i} [e_{irl} A_{irjl_j}], & \text{если } i\text{-й центр 4-го типа,} \end{cases}$$

$$\Lambda * (n') = \begin{cases} \prod_{i=0}^{M(n)-1} \Lambda(i), & \text{если входящий поток 1-го типа,} \\ \prod_{j=1}^L \prod_{i=0}^{M(n, E_j)-1} \Lambda_j(i), & \text{если входящий поток 2-го типа,} \\ 1, & \text{если сеть замкнута.} \end{cases}$$

Таким образом, математический аппарат теории массового обслуживания охватывает широкий класс СМО с простейшими, примитивными и рекуррентными потоками и может быть использован для формирования экспертных оценок относительно качества проектных решений по конфигурированию разрабатываемой ТКС – например, оценка выполнимости требований к пропускной способности системы на основе анализа: 1) принятой разработчиком структуры системы, или же выбранного объекта экспертизы (однолинейность, многолинейность); 2) технических характеристик элементов системы, предполагающихся к использованию (тип и количество обслуживающих приборов, буферная емкость и быстродействие коммутаторов, контроллеров, маршрутизаторов и т. д.); 3) дисциплины обслуживания отдельных подсистем и проектируемой ТКС в целом (FCFS, LIFO, WFQ, IS).

Основным недостатком математического аппарата ТМО является невозможность описания на его основе нестационарных процессов. Вместе с тем, расчетные значения оценок ВВХ, выполненные на участках квазистационарности процесса функционирования ТКС могут быть весьма полезными для формирования экспертных оценок качества технических решений, принимаемых в ходе проектирования ТКС.

Трудность аналитического разрешения уравнений состояния для СМО большой размерности делает целесообразным применение для их исследования методов имитационного моделирования [4] и численных методов расчета на ПЭВМ.

Рассмотрим существующие методы имитационного моделирования с целью анализа целесообразности их применения для решения задач экспертизы телекоммуникационных проектов. В общем случае, в ходе имитационного моделирования на ЦВМ реализуется процесс функционирования СМО с помощью случайных и псевдослучайных величин. Остановка процесса моделирования, как правило, производится по текущему состоянию счетчика и определяется требованиями к точности моделирования. При этом усреднение результатов осуществляется по

времени моделирования или по значениям реализаций моделируемого процесса на основе использования методов математической статистики.

В общем случае, имитационная модель ТКС должна представлять собой взаимосвязь следующих функциональных элементов [4]:

- датчиков случайных чисел (устройств формирования первичных событий);
- таймера (счетчика модельного времени);
- счетчиков;
- блока инициализации (устройство обнуления счетчиков и установки в исходное состояние генераторов псевдослучайных чисел).

Идеологию функционирования имитационной модели ТКС составляют содержания таких понятий, как:

- цели моделирования;
- пространство состояний;
- пространство событий;
- цепи событий (события, наступающие в один момент модельного времени: текущие события, будущие события, задержанные события);
- критерии останова;
- методы обработки результатов.

В рассматриваемом случае, основная цель моделирования состоит в накоплении и анализе статистики распределения значений того или иного ЭПК при реализации в ТКС конкретного ПТР, а в качестве критерия останова (для формирования грубой оценки качества ПТР на первом прогоне модели) могут быть использованы критерии достаточности статистики. Для уточнения оценок параметров распределения ЭПК может понадобиться несколько прогонов с целью определения среднего времени нахождения значений ЭПК в некоторой области (доверительном интервале). В этом случае в качестве критерия останова может быть выбран определенной интервал времени в течение которого, значения ЭПК не выходят за пределы участка допустимых отклонений, определяемых требованиями к точности моделирования.

Пространство состояний модели должно быть определено с детальностью, необходимой и достаточной для обеспечения возможности исследования моделируемой системы.

С целью реализации этой возможности процесс изменения состояний (изменения значений ЭПК) в ходе имитационного моделирования должен носить дискретный и марковский характер. При этом события (поступление новых заявок на обслуживание, отказ сетевых элементов и т. д.) определяют изменение состояния модели. События выстраиваются в цепи, которые могут быть текущими (поступление высокоприоритетной заявки в систему, удаление низкоприоритетной заявки из очереди, перемещение первой высокоприоритетной заявки из очереди на обслуживание, продвижение очереди, поступление новой заявки в очередь), будущими (восстановление ранее отказавшего обслуживающего устройства, поступление заявок из очереди на восстановленное устройство) и задержанными (не влияющими на значения анализируемого в данный момент времени ЭПК). По сути дела в процессе обработки цепей событий реализуется логика моделирования.

Результаты анализа способов обработки цепей событий показывают, что при организации имитационного моделирования в ходе экспертизы ПТР наиболее целесообразным выглядит построение упорядоченных по моментам наступления, двунаправленных списков событий. Построенные таким образом модели имеют наибольшую логическую сложность, однако существенно сокращают затраты машинного времени на реализацию прогона.

Обработка результатов моделирования состоит в вычислении статистических характеристик процесса изменения значений ЭПК в точках стационарности (в установившихся состояниях модели), построении соответствующих гистограмм и статистических функций распределения. При этом, для анализа статистических характеристик процесса изменения ЭПК не требуется анализа высших моментов распределений, достаточно ограничиться первыми двумя.

Одним из принципиальных моментов при построении имитационной модели является выбор языков моделирования. В качестве языков моделирования в настоящее время используются как общецелевые языки про-

граммирования (ПЛ, Фортран, Паскаль и т. д.), так и специализированные языковые средства (GPSS, СЛЭНГ, Симул, Негус, Аргон и т. д.).

Несмотря на такие преимущества использования общецелевых языков программирования высокого уровня как отсутствие необходимости в специальном ПО, «прозрачность» логики модели, доступность многочисленных встроенных функций (подпрограмм, средств статистического анализа), возможность управления экспериментом им присущ и ряд существенных недостатков. К основным недостаткам использования общецелевых языков программирования высокого уровня для имитационного моделирования в ходе организации экспертизы ПТР, по нашему мнению, относятся:

- резкое увеличение уровня сложности отладки модели при необходимости внесения каких-либо изменений, обусловленное многообразием логических операций и взаимозависимостью различных ветвей алгоритма;

- низкий уровень наглядности моделей, требующей от программиста такого же знания системы как у эксперта для качественной отладки программы.

В этих условиях наиболее перспективным выглядит реализация в ТКЭС имитационных моделей созданных на основе использования специализированных языков моделирования (СЯМ). Специализированные языки позволяют писать имитационные программы в форме близкой к описанию моделируемой системы и малым изменениям в описании системы соответствуют малые изменения программы. СЯМ позволяют строить, корректировать и работать с моделью в диалоговом режиме, что особенно важно при реализации в ТКЭС [1]. При преобразовании состояния моделируемой системы и ее элементов часто требуется выполнение математических операций над соответствующими переменными, что приводит к необходимости включения в СЯМ некоторых базисных вычислительных средств, например, из состава вычислительных средств одного из языков высокого уровня.

В общем случае ИМ представляет собой систему, состоящую из СЯМ, компилято-

ра, системы интерпретации отдельных конструкций языка, библиотеки стандартных подпрограмм, проблемно-ориентированным банком данных и средства отладки. Наиболее характерной особенностью системы моделирования является наличие выделенной переменной – системного времени, усреднение по модельному времени дает оценки с меньшей дисперсией, чем усреднение по числу наблюдений. Необходимо отметить, что логика моделирования интересующих нас дискретных процессов должна быть встроена в универсальный интерпретатор и учитываться при написании программы моделирования. Следуя алгоритму Шеннона [4], нетрудно выявить, что оптимальным ЯПЗ для реализации ТКЭС является ориентированный на процессы язык, объединяющий в одной стандартной подпрограмме имитации процесса множество подпрограмм имитации событий. К таким языкам, прежде всего, относятся: Симула, OPS, SOL.

Кроме того, целесообразность применения того или иного метода моделирования для решения задач формирования экспертных оценок характеризуется чувствительностью модели к особенностям планируемых к внедрению ПТР и ее экспериментальными возможностями. В связи с этим, необходимо отметить, что благодаря возможности достаточно полного учета особенностей реальных ТКС (многоэтапности процесса обслуживания заявок пользователей, неоднородности информационных потоков и каналов, ограниченной буферной емкости, многообразия приоритетов и дисциплин обслуживания) методы имитационного моделирования позволяют получать результаты, имеющие достаточно четкий физический смысл.

Необходимо отметить, что при решении задач в рассматриваемой постановке, результаты имитационного моделирования,

содержащие данные о законах и параметрах распределения значений ЭПК могут служить исходными данными для реализации стохастических динамических моделей и методик оценки эффективности функционирования перспективных ТКС. Кроме того, ИМ могут быть использованы для проверки устойчивости функционирования системы при малых отклонениях входных переменных от расчетных значений и проведения сравнительного анализа вариантов построения системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, реализация в ТКЭС рассмотренных методов позволит добиться существенного снижения степени субъективности оценки качества системообразующих проектно-технических решений, принимаемых на различных этапах построения ТКС, характеризующихся стохастической априорной неопределённостью информации, являющейся исходной для проектирования сложных технических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // Радиоэлектроника (Изв. высш. учеб. заведений). – 1992. – № 3. – С. 64–67.
3. *Вишневский В. М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М. : Техносфера, 2003. – 400 с.
4. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем. – М. : Мир, 1978. – 418 с.

**Ненадович Д. М.** – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «Корпорация специальных космических систем «Комета». Тел.: +7-915-359-01-72  
E-mail: nend@mail.ru

**Nenadovich D. M.** – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Corporation special space systems. Tel.: +7-915-359-01-72  
E-mail: nend@mail.ru