

Д. М. Ненадович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК СОСТОЯНИЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЭКСПЕРТНЫХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРУЕМЫХ  
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Важнейшим этапом проектирования перспективных инфокоммуникационных систем является этап моделирования функционирования системы при реализации в ней различных основополагающих проектно-технических решений, определяющих ее облик в целом. Индикаторами качества решений могут служить значения экспертных показателей качества функционирования системы, отражающие динамику изменения состояния системы в различных фазах и режимах эксплуатации. Поэтому целью данной работы является разработка алгоритмов оценки значений экспертных показателей качества, позволяющих выполнить известные требования к состоятельности, несмещенности и эффективности формируемых оценочных значений в условиях, отличных от стационарности исследуемых процессов. *Материалы и методы.* Разработка алгоритмов выполнена на основе анализа изменения состояний управляемой дискретнозначной марковской модели с использованием рекуррентного алгоритма наименьших квадратов. *Результаты.* Содержатся результаты разработки алгоритмов формирования прогнозных оценок значений реализаций нестационарного (в общем случае) процесса изменения экспертных показателей качества в ходе функционирования перспективных инфокоммуникационных систем. *Выводы.* Реализация разработанных алгоритмов в программно-аппаратном комплексе инфокоммуникационной экспертной системы позволит существенно снизить степень субъективизма экспертных оценок качества проектно-технических решений, принимаемых в ходе разработки систем, а также в значительной мере повысить степень автоматизации экспертной деятельности.

**Ключевые слова:** инфокоммуникационные системы, экспертные показатели качества, нестационарные процессы, управляемая дискретнозначная марковская модель, параметр скользящего среднего, рекуррентные алгоритмы наименьших квадратов.

D. M. Nenadovich

**DEVELOPMENT OF ALGORITHMS OF THE FORMATION  
OF FORWARD-STATE ESTIMATES IN NON-STATIONARY  
PROCESSES OF CHANGE VALUES OF EXPERT  
QUALITY INDICATORS IN PROJECTED  
INFOCOMMUNICATION SYSTEMS**

**Abstract.** *Background.* The most important stage of the prospective infocommunication systems design is the modeling stage of functioning of the system through implementation of various fundamental designs and engineering decisions that determine its shape as a whole. The indicators of the quality of decisions, can serve as indicators of the value of expert quality indicators of the system, showing the dy-

namics of the system in various phases and modes of operation. The aim of this work is to develop algorithms for estimating the values of expert quality indicators that allow well-known requirements for consistency, unbiased results and efficiency of estimated values formed in a non-stationary processes under study. *Materials and methods.* Development of the algorithms is executed on the basis of analysis of changes in the state-controlled discrete-valued Markov model using the recursive least squares algorithm. *Results.* The submitted article contains the results of the development of algorithms forming predictive estimates of the values of realizations of non-stationary change process of expert quality indicators in the operation of prospective infocommunication systems. *Conclusions.* The implementation of the developed algorithms in the software and hardware complex of infocommunication expert system will significantly reduce the degree of subjectivity expert quality assessments of project and technical design decisions made during the development of systems, as well as, greatly increase the degree of automation expert activities.

**Key words:** infocommunication systems, expert quality indicators, non-stationary processes, controlled discrete-valued Markov model, option the moving average, the terms of reversibility, the residual variance, recurrent least squares algorithm.

Важнейшим этапом проектирования перспективных инфокоммуникационных систем (ИКС) является этап моделирования функционирования системы при реализации в ней различных основополагающих проектно-технических решений (ПТР), определяющих ее облик в целом. Индикаторами качества ПТР могут служить значения экспертных показателей качества функционирования системы, отражающие динамику изменения состояния системы в различных фазах и режимах эксплуатации. Анализ существующих подходов к разработке функциональных моделей ИКС позволяет отметить, что особый интерес для исследований представляют управляемые дискретно-значные марковские последовательности, являющиеся в отдельных случаях единственным инструментом преодоления «проклятия размерности» при выполнении требований к адекватности моделей [1].

Вместе с тем при исследовании моделей данного класса большой интерес для экспертов могут представлять исследования поведения системы в неустановившемся (переходном) состоянии, когда условия функционирования ИКС могут существенно отличаться от стационарных и процесс формирования оценочных значений фильтром калмановского типа не в полной мере удовлетворяет известным требованиям состоятельности, несмещенности и эффективности.

Для решения этой задачи наибольший интерес вызывает такая разновидность моделей временных рядов, как модель авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС  $(p, d, q)$ ), предложенная Боксом и Дженкинсом [2]. Модель включает три типа параметров: порядок операторов авторегрессии  $(p)$ , порядок оператора разности  $(d)$  и порядок параметров скользящего среднего  $(q)$ . Порядки операторов  $p$  и  $q$ , а также их значения вычисляются для ряда после взятия разности с лагом  $d$ . Разработку алгоритмов оценивания проведем на основе рекуррентного алгоритма наименьших квадратов (РНК), который позволяет производить анализ ошибок фильтрации по выборке наблюдаемых значений объемом  $N$  и при поступлении новых текущих данных  $\theta(N+1)$  переходить от вектора коэффициентов линейного предсказания  $\bar{\phi}_{p,N}$  к вектору  $\bar{\phi}_{p,N+1}$ , не решая уравнение Юла – Уолкера [2]. Та-

кой подход учитывает необходимость реализации высокой степени автоматизации процесса экспертной деятельности на основе инфокоммуникационной экспертной системы (ИКЭС), так как он требует построения алгоритмов определения параметров авторегрессии в виде, удобном для реализации на ЭВМ.

Основу базового РНК-алгоритма составляют следующие выражения для векторов коэффициентов предсказания, коэффициентов усиления и дисперсии ошибки фильтрации:

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

$$\bar{c}_{p-1,N} = P_{N-1} \bar{\theta}_{p-1}(N) / \left( W + \bar{\theta}_{m,p-1}^T(N) P_{N-1\theta_{N-1}} \bar{\theta}_{m,p-1}(N) \right); \quad (2)$$

$$P_N = W^{-1} \left( \bar{I} - \bar{c}_{p-1,N} \bar{\theta}_{m,p-1}^T(N) \right) P_{N-1\theta_{N-1}}, \quad (3)$$

где  $\bar{e}_{p,N}^f(N+1) = \bar{\theta}_{m,p-1}^T(N) \bar{\phi}_{p,N} + \bar{\theta}_{m,p-1}(N+1)$  – вектор остаточных ошибок фильтрации, так как, в отличие от ошибки предсказания, здесь используется вектор  $\bar{\phi}_{p,N}$ , а не  $\bar{\phi}_{p,N+1}$ ;  $\bar{c}_{p-1,N} = P_N \bar{\theta}_{m,p-1}(N)$  – вектор коэффициентов компенсации остаточной ошибки фильтрации-экстраполяции;  $\bar{P}_{N-1} = \bar{R}_{p-1,N-1}^{-1}$  – матрица дисперсий ошибок фильтрации;

$$R_{p-1,N-1} = \sum_{n=1}^{N-1} W^{N-1-n} \bar{\theta}_{m,p-1}(n) \bar{\theta}_{m,p-1}^T(n) -$$

матрица размерностью  $(p-1) \times (p-1)$  взвешенных с весом  $0 < W < 1$  вторых моментов процесса на шагах  $(p-1)$ , усредняемых по выборке объемом  $(N-1)$ . Исходные данные для работы фильтра задаются в виде  $\bar{\phi}_0$  и  $\bar{P}_{p,0} = \varepsilon I$ , где  $I$  – единичная матрица, а  $\varepsilon$  – некоторая положительная величина, обеспечивающая обратимость матрицы  $P_{p,0}$ . Структурная схема устройства фильтрации-экстраполяции значений операторов авторегрессии, аппаратно реализующего выражение (1), представлена на рис. 1. Структурная схема блока вычисления значений коэффициентов компенсации остаточных ошибок фильтрации аппаратно реализующего выражение (2) представлена на рис. 2. Выражение, необходимое для обновления матрицы  $P_{N-1\theta_{N-1}}$ , учитывая особенности процесса  $\bar{\theta}_m(p-1)$ , можно представить следующим образом:

$$P_{N-1\theta_{N-1}} = \frac{W^{-1} (P_{N-2\theta_m(p-1)} - P_{N-2\theta_m(p-1)} \bar{\theta}_m(p-1)(N-1) P_{N-2\theta_m(p-1)})}{W + \bar{\theta}_m^T(p-1)(N-1) P_{N-2\theta_m(p-1)}}. \quad (4)$$

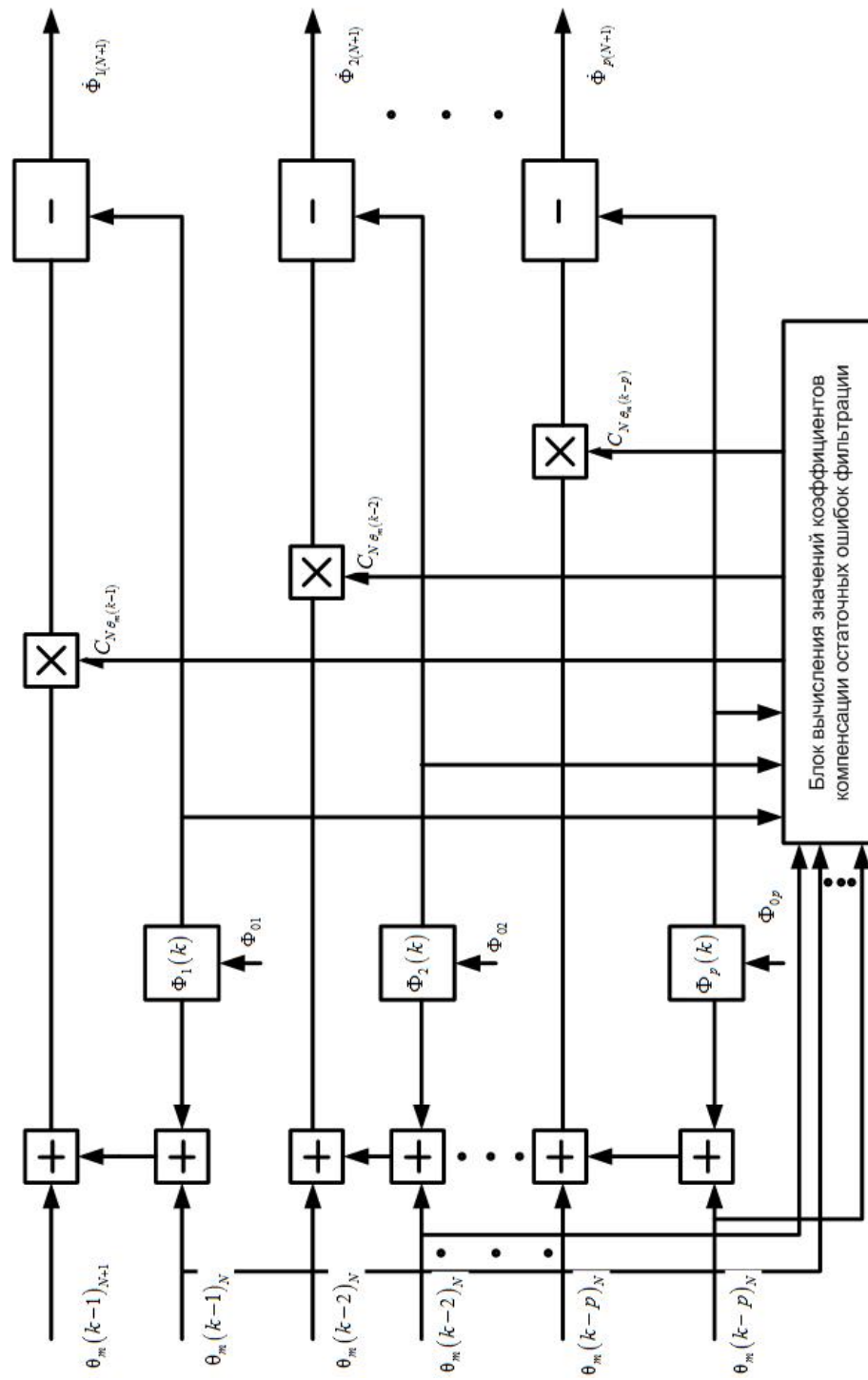


Рис. 1. Структурная схема устройства фильтрации-экстраполяции значений операторов авторегрессии

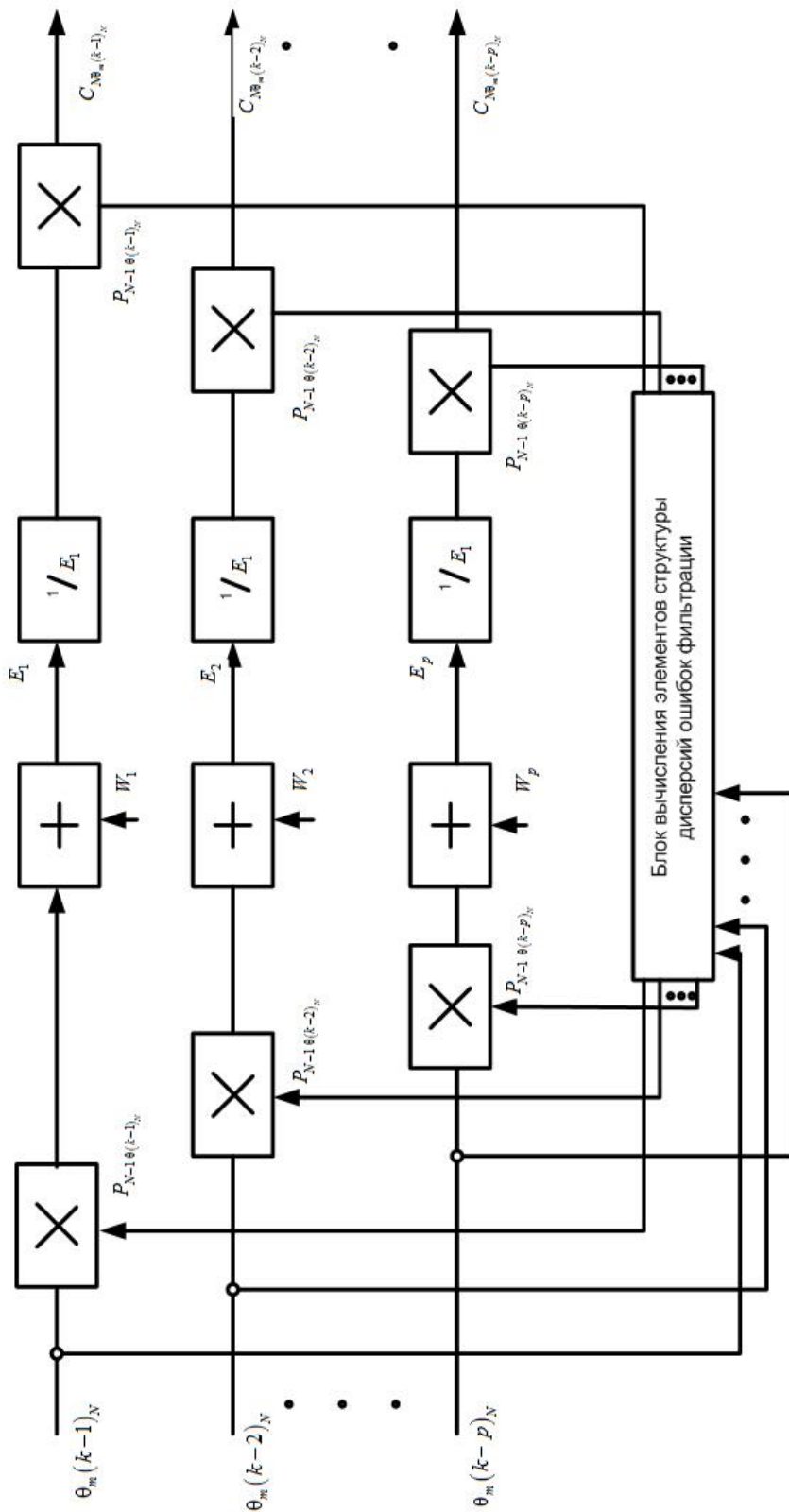


Рис. 2. Структурная схема блока вычисления значений коэффициентов компенсации остаточных ошибок фильтрации

Структурная схема блока вычисления элементов матрицы ошибок фильтрации, аппаратно реализующего выражение (4), представлена на рис. 3. Существенное уменьшение вычислительных затрат с  $p^2$  операций до  $5p$  может быть достигнуто при использовании быстрых РНК-алгоритмов вычисления  $\bar{\phi}_{p,N}$ . Ключевым моментом ускорения при этом является введение процедуры обновления значений вектора коэффициентов усиления  $\bar{c}_{p-1,N}$  с использованием лишь векторных операций вместо векторно-матричных. Однако экспериментальные данные позволяют отметить снижение устойчивости реализации быстрых алгоритмов относительно классических. Учитывая, что требования к временным показателям процессов формирования экспертных оценок являются гораздо менее жесткими, нежели требования к формированию оценочных значений в системах управления ИКС, целесообразнее остановиться на рассмотрении возможностей реализации классических алгоритмов. Практика показывает, что для формирования оценочных и прогнозных значений в общем случае нестационарных процессов изменения значений экспертных показателей качества (ЭПК) моделей проектируемой ИКС в телекоммуникационной ЭС целесообразно реализовать (в качестве базовой с возможностью подстройки) модель АРПСС (1), (2), (4). Данная модель обладает свойствами безызбыточности и адекватности для большинства процессов, которые необходимо оценивать в ходе экспертизы различных этапов проекта ИКС. Структурная схема устройства оценки-экстраполяции для модели (1), (2), (4), представлена на рис. 4. Рекуррентные соотношения для определения значений операторов скользящего среднего для модели АРПСС (1), (2), (4) могут быть представлены следующим образом:

$$\lambda_{1t} = -(c'_1 / \sigma_V^2 - \lambda_{1(t-1)}\lambda_{2(t-1)} - \lambda_{2(t-1)}\lambda_{3(t-1)} - \lambda_{3(t-1)}\lambda_{4(t-1)}), \quad (5)$$

$$\lambda_{2t} = -(c'_2 / \sigma_V^2 - \lambda_{1(t-1)}\lambda_{3(t-1)} - \lambda_{2(t-1)}\lambda_{4(t-1)}), \quad (6)$$

$$\lambda_{3t} = -(c'_3 / \sigma_V^2 - \lambda_{3(t-1)}\lambda_{4(t-1)} - \lambda_{2(t-1)}\lambda_{4(t-1)}), \quad (7)$$

$$\lambda_{4t} = -(c'_4 / \sigma_V^2 - \lambda_4), \quad (8)$$

где  $c'_q$  – параметры автоковариации;  $\sigma_V^2$  – остаточная дисперсия шума возбуждения, определяемая в соответствии с выражением

$$\sigma_V^2 = c'_0 / 1 + \lambda_{1t}^2 + \lambda_{2t}^2 + \lambda_{3t}^2 + \lambda_{4t}^2 \quad (9)$$

Параметры автоковариации определяются в соответствии с выражениями:

$$c_0 = \phi_1, \quad c_1 = \phi_1 c_0, \quad c_2 = \phi_1 c_1,$$

$$c_3 = \phi_1 c_2, \quad c_4 = \phi_1 c_3, \quad c_5 = \phi_1 c_3, \quad (10)$$

$$c'_0 = \phi_0^2 c_0 + \phi_1^2 c_0 + \phi_0 \phi_1, \quad (11)$$

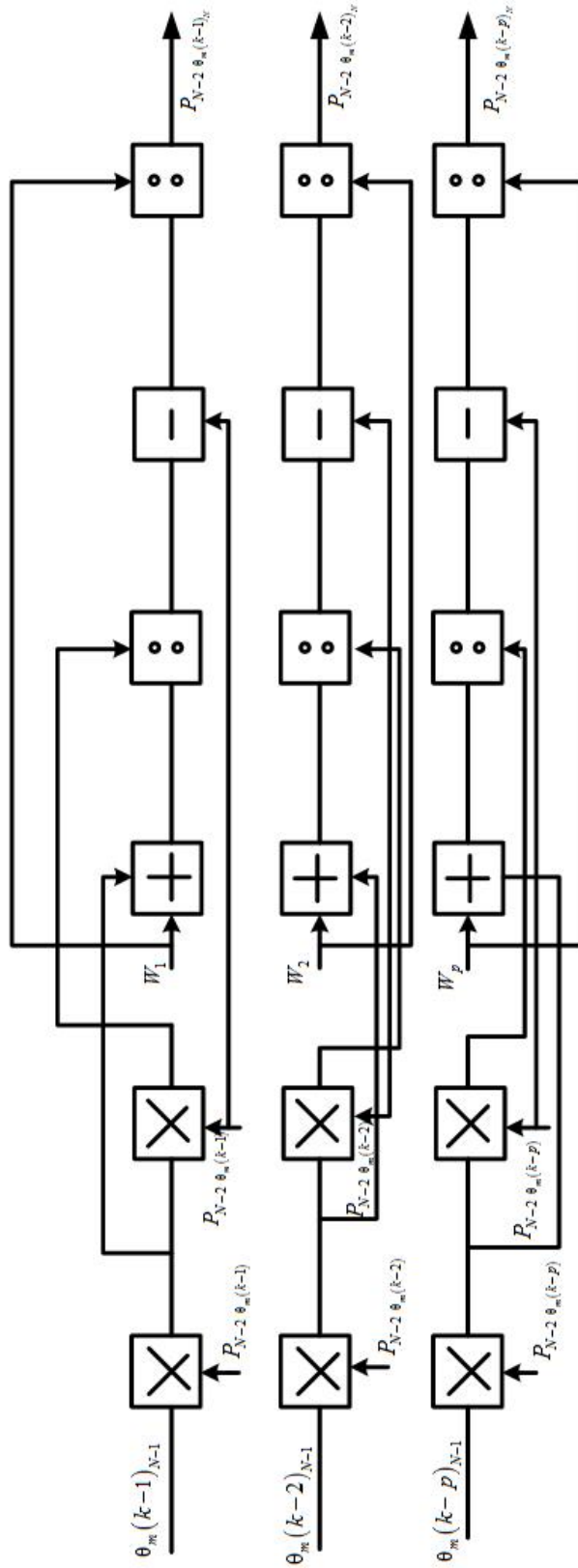


Рис. 3. Структурная схема блока вычисления элементов корреляционной матрицы

$$c'_1 = \phi_0^2 c_1 + \phi_1^2 c_1 + \phi_0 \phi_1 (c_2 + c_0), \quad (12)$$

$$c'_2 = \phi_0^2 c_1 + \phi_1^2 c_2 + \phi_0 \phi_1 (c_3 + c_1), \quad (13)$$

$$c'_3 = \phi_0^2 c_3 + \phi_1^2 c_3 + \phi_0 \phi_1 (c_4 + c_2), \quad (14)$$

$$c'_4 = \phi_0^2 c_4 + \phi_1^2 c_4 + \phi_0 \phi_1 (c_5 + c_3), \quad (15)$$

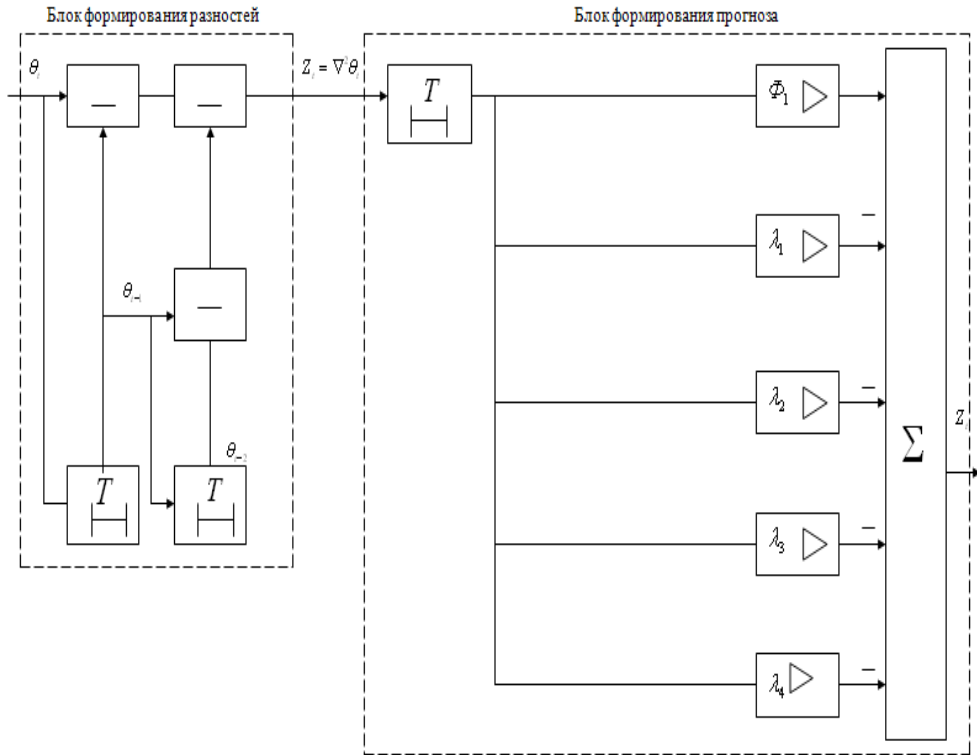


Рис. 4. Структурная схема фильтрации-экстраполяции значений ЭПК для АРПСС (1), (2), (4)

Необходимо отметить, что формирование оценочного значения  $\dot{\bar{\theta}}_m(p-1)$  возможно только при выполнении условия

$$\sigma_V^2 \leq \sigma_V^2 \text{ доп}, \quad (16)$$

определяемого требуемой точностью прогнозирования. В случае невыполнения этого условия по завершении начального этапа оценивания производится корректировка порядка операторов авторегрессии. Если требования к остаточной дисперсии по каким-то причинам не заданы, с достаточной для практики точностью процесс корректировки порядка операторов авторегрессии может быть приостановлен исходя из анализа соотношения

$$(\sigma_V^2(k-1) / \sigma_V^2(k)) / (\sigma_V^2(k-2) / \sigma_V^2(k-1)) \leq 1,3. \quad (17)$$



Кроме того, при определении порядка модели важное значение имеет объем и расположение участка наблюдаемой при этом выборки. Так, Ульрихом и Клейтоном экспериментально, а Лангом и Макклелланом аналитическими средствами показано, что выбор порядка модели наиболее эффективен на участке выборки, составляющем от  $N/2$  до  $N/3$  [3]. Отдельно следует остановиться на учете шумов наблюдения для случаев оценки наблюдаемых временных последовательностей, поступающих, например, из систем-аналогов ИКС. В этом случае, учитывая тот факт, что мощность шума наблюдения влияет только на член автокорреляционной последовательности, соответствующий нулевому сдвигу, дополнительную погрешность оценочного значения можно предотвратить, удаляя из оценки автокорреляционной последовательности член, соответствующий нулевому сдвигу, ограничивая при этом пределы изменения остаточной дисперсии. Соответствующие компенсационные схемы представлены в [3]. Необходимо отметить, что вначале итеративной процедуры вычисления оценочных значений операторов авторегрессии они полагаются равными нулю, а  $\phi_0 = -1$ . По завершении процесса определения порядка разности определяется первоначальное прогнозное значение индикатора значений ЭПК, моделируемой ИКС в соответствии с выражением

$$\bar{\theta}_{m(l)} = \phi_1[\bar{\theta}_{m(t+l-1)}] + V_{t+l} - \lambda_1[V_{t+l-1}] - \dots - \lambda_4[V_{t+l-3}]. \quad (18)$$

Подправление прогнозного значения (состояния модели ИКС, значения ПК) на  $(t+1)$ -м шаге осуществляется в соответствии с выражением

$$\theta_{m(t+1)}(l+1) = \theta_{m(t)}(l) + \phi_l V_{t+1}, \quad (19)$$

где  $\phi$  – линейный оператор, преобразующий  $V_t$  в  $\theta_{cm(t)}$ , определяемый в соответствии с выражениями:

$$\phi_1 = \phi_1 - \lambda_1; \quad (20)$$

$$\phi_2 = \phi_1\phi_1 + \phi_2 - \lambda_2; \quad (21)$$

.....

$$\phi_l = \phi_1\phi_{l-1} + \dots + \phi_{p+d}\phi_{l-p-d} - \lambda_l. \quad (22)$$

Доверительный интервал значений прогноза определяется в соответствии с выражением

$$z_{t+l}(\pm) = z_t(l) \pm u_{\varepsilon/2} \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{l-1} \phi_j^2 \right\}^{1/2} s_v, \quad (23)$$

где  $u_{\varepsilon/2}$  – квантиль уровня  $1 - \varepsilon / 2$ ;  $s_v$  – текущее значение  $\sigma_Y$ .

Условия стационарности с достаточной для практики точностью определяются размещением значений операторов авторегрессии внутри единичного круга:

$$-1 < \phi < 1. \quad (24)$$

В случае невыполнения условий стационарности процесса производится коррекция порядка оператора разности со сдвигом назад. Важным этапом реализации алгоритма формирования оценочных значений операторов скользящего среднего является этап проверки выполнения условий обратимости – свойства, обеспечивающего «разумную» [2] связь между настоящими и предшествующими значениями временного ряда. Условия обратимости в рассматриваемом случае состоят в том, что корни характеристического уравнения

$$\lambda B = 1 - \lambda_1 B - \dots - \lambda_q B^q = 0 \quad (25)$$

должны лежать вне единичного круга. Тогда условие, подлежащее контролю в ходе формирования прогнозных значений, в общем случае можно сформулировать в виде

$$|\lambda| < 1; \quad (26)$$

для рассмотренной базовой модели можно записать:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 < 1; \quad (27)$$

$$\lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2 - \lambda_1 < 1; \quad (28)$$

$$-1 < \lambda_q < 1; \quad (29)$$

при невыполнении условия производится изменение порядка операторов скользящего среднего. Структурная схема обобщенного алгоритма экстраполяции значений индикаторов, наблюдаемых в ходе моделирования процессов функционирования ИКС, представлена на рис. 5. Сходимость алгоритма обусловлена последовательным характером реализации процедур анализа условий стационарности и обратимости. Следует отметить, что представленный алгоритм позволяет производить подстройку модели в ходе начального этапа экстраполяции (фильтрации), а также в ходе дальнейшего наблюдения за процессом изменения значений ЭПК. В отличие от критериев типа «окончательная ошибка предсказания» или информационных критериев выбора порядка модели, предлагаемых в методах Берга, Акаике, Парзена [3], предложенный критерий более прост в реализации и позволяет учесть динамику скорости снижения дисперсии при увеличении порядка модели с достаточной для практики точностью. Общая структурная схема экстраполятора значений индикаторов представлена на рис. 6 и состоит из формирующего фильтра (ФФ), сумматора, устройства вычисления коэффициентов авторегрессии (УВКАР), устройства вычисления значений операторов скользящего среднего (УВОСС), экстраполятора оценочных значений (ЭОЗ), устройства коррекции (УК) прогнозных значений. Пример двухшагового прогноза изменения значения индикатора состояния (значения ЭПК) моделируемой (1), (2), (4) ИКС представлен на рис. 7.

Таким образом, представляя на основе модели АРПСС (в общем случае нестационарные) процессы изменения состояния (значения ЭПК), чувствительных к особенностям альтернативных технических решений, рассматриваемых в ходе проектирования ИКС, можно получать их оценочные и прогнозные значения, способствующие существенному снижению степени субъективизма при формировании экспертного заключения о целесообразности принятия того или иного проектного решения.

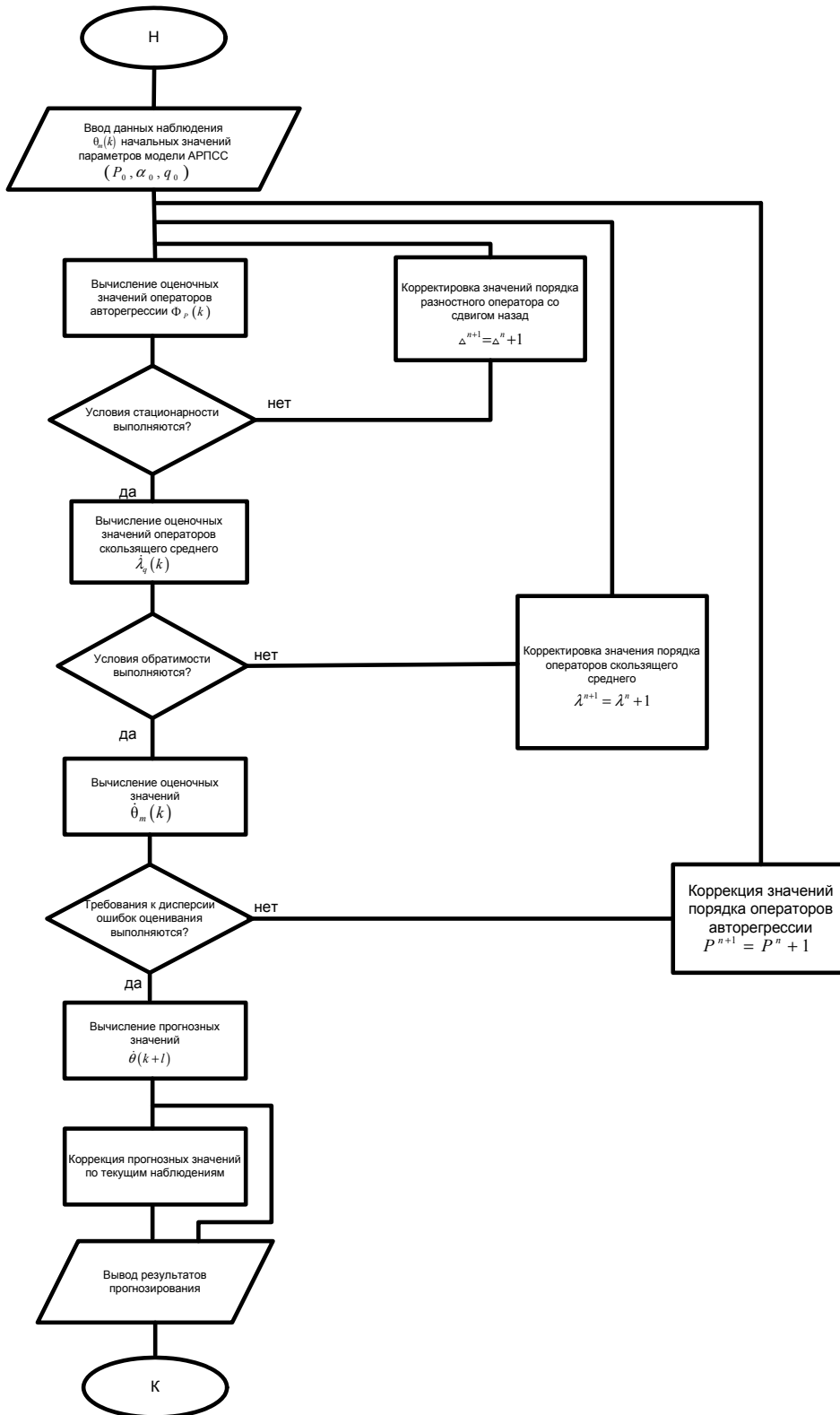


Рис. 5. Алгоритм экстраполяции оценочных значений состояний нестационарных процессов изменения значений ЭПК

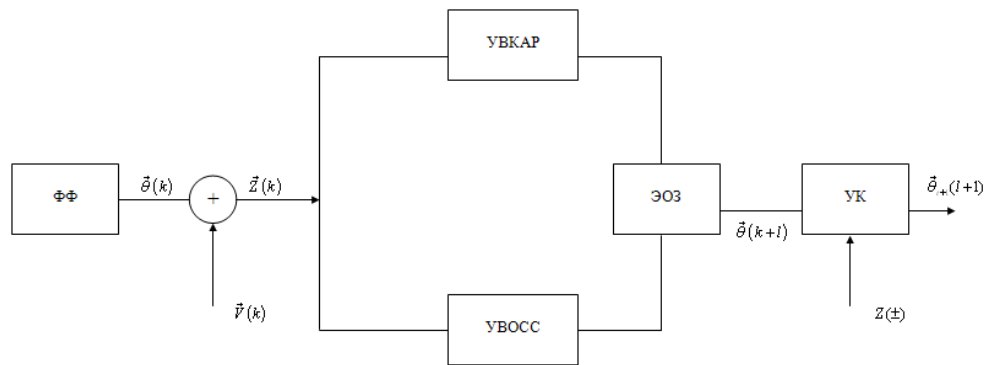


Рис. 6. Общая схема экстраполяции значений индикатора

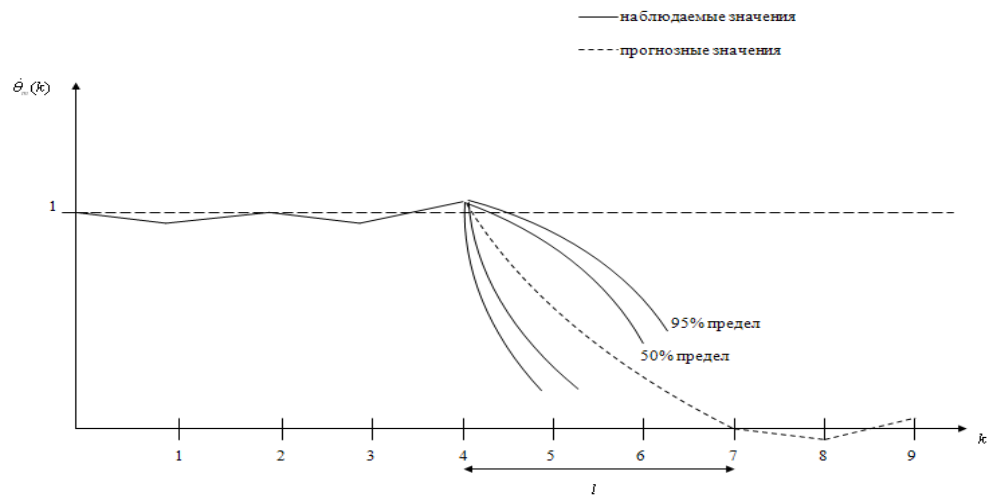


Рис. 7. Пример прогноза изменения значений индикатора

### Список литературы

1. **Ненадович, Д. М.** Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов / Д. М. Ненадович. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008 – 272 с.
2. **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Джеккинс. – М. : Мир, 1974. – 402 с.
3. **Марпл-мл., С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.

### References

1. Nenadovich D. M. *Metodologicheskie aspekty ekspertizy telekommunikatsionnykh projektov* [Methodological aspects expert examination of telecommunication projects]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2008, 272 p.
2. Boks Dzh., Dzhekins G. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie* [Time series analysis. Forecast and management]. Moscow: Mir, 1974, 402 p.
3. Marpl-ml. S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectrum analysis and applications thereof]. Moscow: Mir, 1990, 584 p.

**Ненадович Дмитрий Михайлович**

доктор технических наук, менеджер проектов Департамента управления проектами Корпоративного центра ОАО «Ростелеком» (Россия, г. Москва, ул. 1-я Тверская-Ямская, д. 14)

E-mail: nend@mail.ru

**Nenadovich Dmitriy Mikhaylovich**

Doctor of engineering sciences, project manager of the Department of management project Corporate Center "Rostelecom" (14 1st Tverskaya-Yamskaya street, Moscow, Russia)

---

УДК 621.396

**Ненадович, Д. М.**

**Разработка алгоритмов формирования прогнозных оценок состояний нестационарных процессов изменения значений экспертных показателей качества проектируемых инфокоммуникационных систем / Д. М. Ненадович // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 135–147.**