

УДК 681.5 : 69 : 621 : 039

В.А.КОЛЯДЕНКО

УкрНИИГаз, г.Харьков

С.И.ЧАЙНИКОВ, канд. техн. наук

Харьковский национальный университет радиозлектроники

## ПРОЦЕДУРА КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ СИСТЕМ ПРОМЫСЛОВЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Рассматривается возможность применения рекурсивных процедур типа Калмана-Бьюси для оценки технологических параметров систем промысловых газопроводов и косвенных измерений коэффициентов гидравлического сопротивления систем промысловых газопроводов.

Розглядається можливість використання рекурсивних процедур типу Калмана-Б'юсі для оцінки технологічних параметрів систем промислових газопроводів та непрямих вимірювань коефіцієнтів гідравлічного опору лінійних ділянок промислових газопроводів.

Considers the possibility of using recursive procedures such as Kalman-B'usy filter to estimate the technological parameters of the systems of trade gas pipeline and indirect measurements of hydraulic resistance coefficient of linear plots of field pipelines.

*Ключевые слова:* система промысловых газопроводов, технологические параметры, коэффициент гидравлического сопротивления, рекурсивные процедуры, фильтр Калмана-Бьюси.

Системы промысловых газопроводов уровня газодобывающего предприятия (ГДП) могут рассматриваться как сложные организационно-технические, иерархические системы. Отличительными особенностями таких систем являются: кустовое расположение скважин, разветвленная система шлейфов от скважин до установок комплексной подготовки газа (УКПГ), сетевая структура промыслового газосборного коллектора (ПГК), наличие дожимных компрессорных станций (ДКС) и нескольких направлений магистрального транспорта газа (выходов системы). Все УКПГ работают на общий газосборный коллектор и изменение режима работы одной из них (уменьшение или увеличение выходного давления  $P_{\text{вых}}$ , температуры  $T_{\text{вых}}$ , или расхода  $Q_{\text{вых}}$ ) приводит к изменению режима работы других УКПГ, газосборного коллектора и ДКС.

Промысловый газосборный коллектор представляет собой систему газопроводов определенной структуры с различным количеством линейных участков, каждый из которых имеет свои гидравлические характеристики и режимные технологические параметры, которые необходимо оценивать. Упрощенная схема системы промысловых газопроводов представлена на рис.1.

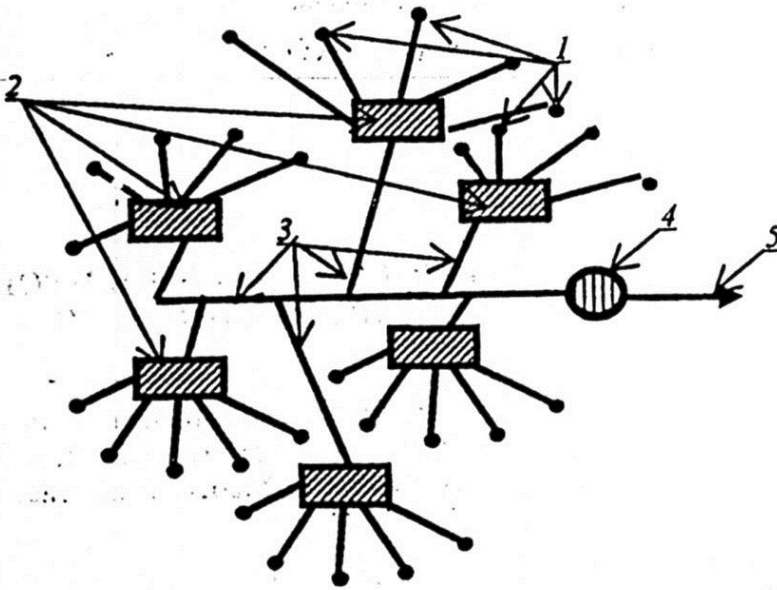


Рис.1 – Схема системы промышленных газопроводов:

- 1 – газовые скважины; 2 – установки комплексной подготовки газа;  
 3 – промышленный газосборный коллектор; 4 – дожимная компрессорная станция;  
 5 – выход в магистральный газопровод.

Основными технологическими параметрами, характеризующими режимы работы систем промышленных газопроводов, являются: давление, температура и расход газа в контрольных точках (на входе и выходе шлейфов скважин и каждого линейного участка промышленного газосборного коллектора). Остальные параметры, такие как теоретический ( $\lambda_{\text{теор}}$ ) и фактический ( $\lambda_{\text{факт}}$ ) коэффициенты гидравлического сопротивления, коэффициент гидравлической эффективности ( $E$ ) линейных участков системы газопроводов являются производными и определяются расчетным путем. Контроль этих параметров необходим для ликвидации отклонений от заданного режима добычи и сбора газа, а также своевременного принятия мер по предотвращению аварийных ситуаций. Поэтому актуальной научной задачей является выбор методов обработки результатов косвенных измерений параметров для оценивания гидравлического состояния линейных участков систем промышленных газопроводов.

Существующие в настоящее время подсистемы измерения технологических параметров не в полной мере реализуют известные меры повышения достоверности оценок, что может приводить к ошибочным решениям. Поскольку 100%-ной вероятности достичь практически невозможно, необходимо минимизировать ошибки как во время измерений, так и при принятии решений. Алгоритмы управления режимами работы системы промышленных газопроводов предусматривают сбор, накопление, обработку информации о значениях технологических параметров, их анализ и принятие решения о выдаче управляющего воз-

действия. Существуют процедуры, обеспечивающие минимизацию ошибок измерений и их оценивание. Обработка может осуществляться методом выборочной статистики, исключением аномальных резко выделяющихся результатов измерений, использованием робастных методов обработки [1, 2].

Если спектры технологических параметров и ошибок измерения располагаются в различных областях частот, результат измерения параметров легко выделить с помощью перечисленных методов. Значительно сложнее эта задача решается в том случае, когда спектры измеряемых параметров и ошибок измерения перекрываются, что наиболее характерно для практики. В этом случае выделить результаты измерения в чистом виде, неискаженными, практически невозможно. Однако, зная статистические характеристики параметров, можно поставить задачу синтеза процедуры оценки с такими характеристиками, при которых результат оценивания наиболее близок к истинному значению. Такими характеристиками обладает процедура, разработанная Калманом и Бьюси. Эта процедура имеет то преимущество, что она хорошо приспособлена для программной реализации. При этом оценки вычисляются последовательно, по мере поступления отсчетов наблюдаемого процесса и в силу этого не требуется большого объема памяти. Применение рекурсивной обработки результатов измерений на основании процедуры Калмана-Бьюси позволяет получать результат оценки на любом шаге рекурсии, производить оценку в реальном масштабе времени и не требует дополнительного времени на накопление и обработку информации. При асинхронном опросе датчиков или частичной потере результатов измерений предлагается использовать метод аппроксимации реализаций технологических параметров с помощью кубических и эрмитовых сплайнов.

Достоверность результатов измерений основных параметров и расчет производных параметров зависит от процедур обработки статистики. Отличительной чертой для систем газопроводов является то, что измеряемые параметры являются случайными величинами и случайными процессами, поэтому их оценку необходимо производить с помощью методов теории вероятностей и математической статистики. В работах [3-8] показано, что в силу центральной предельной теоремы технологические параметры газопроводов распределены по гауссовому закону.

Случайный процесс являются обобщением случайной величины в том смысле, что каждое сечение процесса представляет случайную величину. Динамика для гауссовского процесса в дискретном виде представляется в виде уравнений состояния [8, 9]:

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + G(k+1)n(k+1). \quad (1)$$

Здесь  $x(k)$  – измеряемый процесс или величина;  $n(k)$  – порождающий белый гауссов шум с нулевым средним;  $\Phi(k)$  – коэффициент (матрица) состояния определяется:

$$\Phi(k) = \exp\{-\alpha\Delta t_k\}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 1/\tau_{kor}$  – параметр, обратный интервалу корреляции;  $\Delta t_k = k - (k-1)$  – интервал измерений;  $G(k+1)$  – коэффициент (матрица) возбуждения определяется:

$$G(k+1) = \sqrt{\sigma_x^2(1 - \exp\{-\alpha\Delta t_k\})}, \quad (3)$$

где  $\sigma_x^2$  – спектральная плотность мощности порождающего процесса  $n(k)$ .

Уравнение состояния (1) дополняется уравнением наблюдения

$$y(k) = H(k)x(k) + \xi(k), \quad (4)$$

где  $H(k)$  – коэффициент (матрица) наблюдения;  $\xi(k)$  – ошибки измерения или помехи в канале наблюдения, которые часто аппроксимируют белым гауссовым шумом, «зашумленность» определяется не столько наличием каких-то случайных помех, сколько сложностью системы и наличием всякого рода второстепенных процессов, с точки зрения управления.

Структурная схема алгоритма наблюдения на основе уравнений (1) и (4) приведена на рис.2.

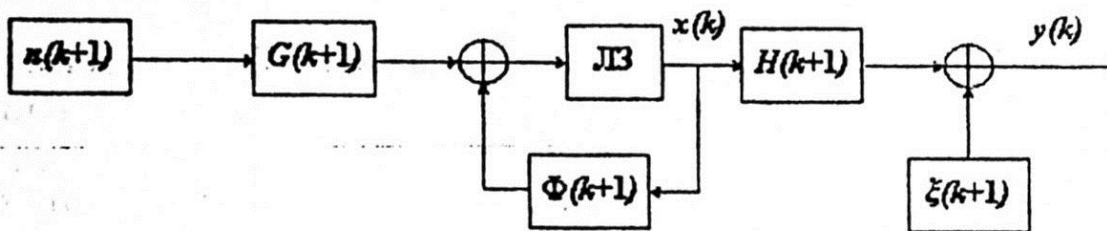


Рис.2 – Структурная схема алгоритма наблюдения процесса  $x(k)$  на фоне шума  $\xi(k)$

Для оценки параметров случайных величин используют процедуры стохастической аппроксимации [6, 9]: Роббинса-Монро, Кифера-Вольфовица, Ньютона-Рафсона, Качмажа и др. Для оценки случайных процессов существует достаточно эффективная оптимальная в гауссовом и линейном приближениях процедура, получившая название

«фильтра Калмана-Бьюси». Процедура оценки  $\hat{x}(k)$  имеет вид [9]:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + K(k) \left[ y(k) - H(k)\Phi(k+1, k)\hat{x}(k) \right]; \quad (5)$$

где  $K(k)$  – коэффициент, обеспечивающий устойчивость и оптимальную скорость сходимости алгоритма:

$$K(k+1) = P(k+1, k)H^T(k)V^{-1}(k+1). \quad (6)$$

Здесь

$$P(k+1, k) = \Phi(k+1, k)P(k, k)\Phi^T(k+1, k) + N_n(k), \quad (7)$$

$$V(k+1) = H(k)P(k+1, k)H^T(k) + N_\xi(k), \quad (8)$$

$$P(k, k) = P(k, k-1) - K(k)H(k)P(k, k), \quad (9)$$

где  $N_n(k), N_\xi(k)$  – соответственно значения спектральных плотностей мощности порождающего шума  $n(k)$  и шума наблюдения  $\xi(k)$ ;  $P(k+1, k)$  – апостериорная дисперсия ошибки оценки;  $V(k+1)$  – априорная дисперсия ошибки оценки.

На рис.3 приведена структурная схема алгоритма (5) Калмана-Бьюси.

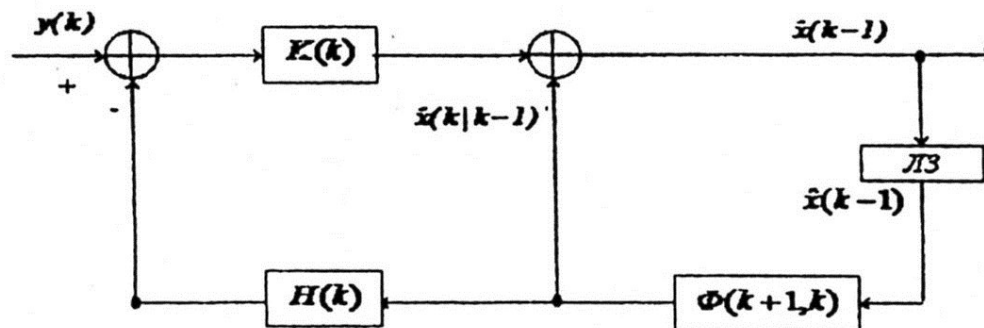


Рис.3 – Структурная схема дискретного алгоритма оценки «фильтра Калмана-Бьюси»

Следует отметить одно важное отличие фильтра Калмана-Бьюси от процедур оценки случайных величин [8], это наличие множителя  $\Phi(k+1, k)$  с элементами  $\Phi_{ij} = \exp\{-\Delta t_k / \tau_{кор}\}$ , определяющих величину корреляционной связи между соседними отсчетными значениями наблюдаемого процесса и величину связи между компонентами  $i$  и  $j$  при  $i \neq j$ . Здесь уместно отметить, что чем более коррелированными являются отсчеты наблюдаемого процесса  $x(k), x(k-1), \dots$ , тем вы-

ше качество получаемой оценки [9].

Достаточно общей характеристикой, определяющей качество оценки (5), является апостериорная дисперсия ошибки оценки (7). На практике часто используют гипотезу о стационарности наблюдаемого процесса, предполагая при этом, что незначительные проявления нестационарности не приведут к значительным погрешностям оценки. Данная задача может быть исследована как теоретически, так и практически.

Теоретические исследования базировались на основе анализа расчетной апостериорной дисперсии ошибки оценки  $P(k)$ .

Предположим, что параметры фильтра являются оптимальными и не изменяются во времени, а характеристики наблюдаемого процесса, генерируемого, как  $x(k)$  и шума наблюдения  $\xi(k)$  будем отклонять в одну и другую сторону на порядок. Для этого используем аналитические соотношения (6)-(9). Результаты проведенных исследований представлены на рис.4, 5.

На рис.4 приведены графики  $P$  – относительного значения апостериорной дисперсии ошибки оценки в зависимости от  $h$  – отношения уровней дисперсии измеряемого параметра к дисперсии шума наблюдения в установившемся состоянии при различных значениях параметров выбранной модели  $\alpha_m$ .

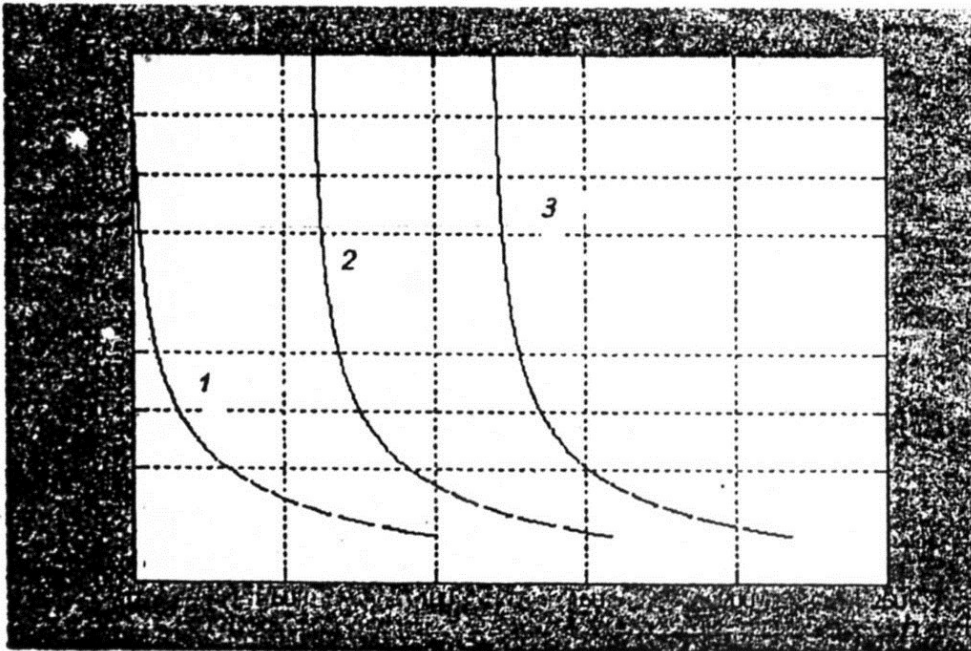


Рис. 4 – Графики относительного значения апостериорной дисперсии ошибки оценки:  
 1 – значения параметров модели равно значению, установленному в фильтре  $\alpha_m = \alpha_f$ ;  
 2 – отношение параметров модели к параметрам фильтра равно  $\alpha_m = 10\alpha_f$ ;  
 3 – отношение параметров модели к параметрам фильтра равно  $\alpha_m = 0,1\alpha_f$ .

Кривая 1 характеризует состояние, когда значение параметров выбранной модели  $\alpha_m$  не изменяются по отношению к значению, установленному в фильтре  $\alpha_\phi$ . Кривые 2 и 3 характеризуют состояние, когда значение параметров выбранной модели  $\alpha_m$  изменяются в одну и другую сторону на порядок по отношению к значению установленному в фильтре  $\alpha_\phi$ . Как следует из рис.4, при малых соотношениях  $h$ , в пределах  $h=100 \div 150$  раз, рассмотренные отклонения параметров модели приводят к потерям устойчивости процедуры, где апостериорная дисперсия превышает априорную. С увеличением  $h$  – наступает и отмечается устойчивый режим: Кривая 2 характеризует ситуацию, когда корреляция процесса, выбранная в модели в 10 раз меньше корреляции реального процесса. Оказывается, что выбор более широкополосной процедуры обработки приводит к меньшим потерям (кривая 2), чем в случае, когда процедура более узкополосна (кривая 3).

На рис.5 показана кривая изменения относительного значения апостериорной дисперсии при соответствующих отклонениях коэффициента наблюдения  $H$ .

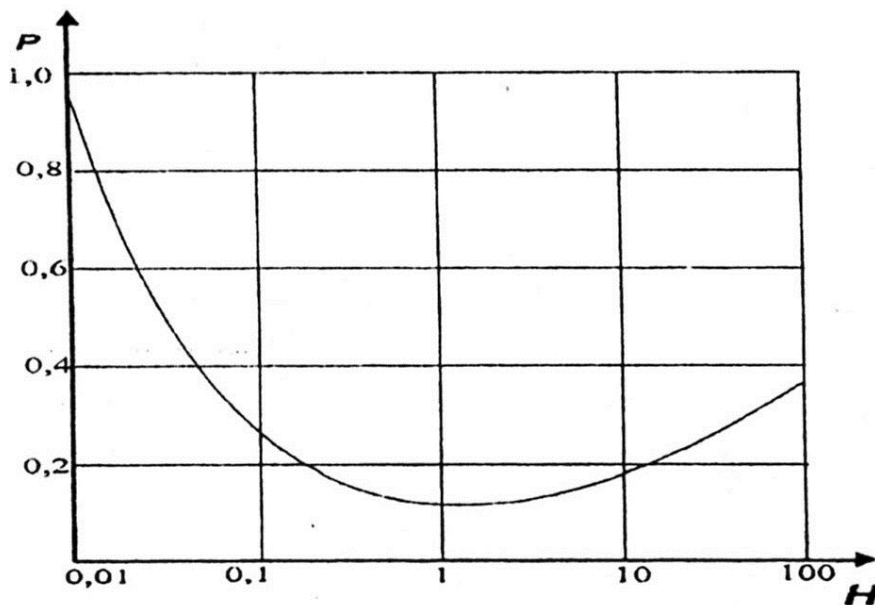


Рис.5 – Зависимость апостериорной дисперсии от  $H$  – коэффициента наблюдения

Как следует из результатов проведенных исследований, несовпадения параметров выбранной модели и параметров фильтра могут привести к значительным потерям качества обработки или даже к потере устойчивости процедуры обработки. В то же время, как видно из результатов проведенного машинного эксперимента (рис.4, 5), изменения параметров модели в пределах  $\pm (20-30)\%$  не приводят к замет-

ным ошибкам оценок. Из сопоставления погрешностей, приведенных на рис.4, 5, следует, что процедура оценки оказывается менее чувствительна к неточности задания коэффициента наблюдения  $H$ , чем к соответствующим неточностям задания корреляции  $a_\phi$ .

Изменения режимных параметров в газопроводах имеют непрерывные реализации  $x(t)$ . Вместе с тем, измерения этих параметров осуществляются с определенным интервалом измерения  $\Delta t$  [10]. При использовании оптимальных процедур оценки Калмана-Бьюси [9], получают оценку  $\hat{x}(k)$  с минимальной среднеквадратической погрешностью по отношению к  $x(k)$ . Однако, точность воспроизведения исходного процесса  $x(t)$  во многом зависит как от выбора интервала измерения, так и от того какая выбрана аппроксимирующая функция на интервалах между соседними измерениями  $k$  и  $k+1$ .

На практике часто восстановление последовательности  $x(k)$  по оценкам  $\hat{x}(k)$  осуществляется на основе линейной аппроксимации, а точность восстановления увеличивается по мере сокращения интервала измерения  $\Delta t$ . Практика показывает, что линейная аппроксимация не является лучшим вариантом [11]. В данном случае более конструктивным является применение сплайн-функций более высокого порядка.

Выполнен сравнительный анализ эффективности процедур интерполяции дискретными кубическими сплайнами, эрмитовыми кубическими сплайнами и методами линейной аппроксимации. В качестве количественной меры выбрана точность оценки параметра измерения в виде среднеквадратического отклонения  $\sigma$  оценок измеряемого параметра  $\hat{x}(k)$  от истинного значения  $x(k)$ . В результате имитационного моделирования получены зависимости точности оценок от отношения  $h$  при различных интервалах измерения  $\Delta t$ . Показано, что при необходимости воспроизведения режимного параметра (рассматриваемого как случайный процесс) с 5%-ной погрешностью периодичность замеров расхода газа 24 раза в сутки является допустимой, а периодичность замеров давлений газа должна быть не менее 5 раз в сутки [10]. Интервал корреляции режимных параметров газопроводов для давлений составляет около 40 ч, а для расходов около 10 ч.

Проведен сравнительный анализ точности оценки при аппрокси-

мации кубическими сплайнами, эрмитовыми сплайнами и линейной аппроксимации давлений газа при различных интервалах измерения  $\Delta t = 0,02\tau_{кор}$ , и составляет 48 мин,  $\Delta t = 0,12\tau_{кор}$ , (составляет 4,8 ч), что рекомендовано нормативными документами по сбору и обработке информации в задачах оперативного управления, и  $\Delta t = 0,5\tau_{кор}$ , (составляет 20 ч). Вариант интервала измерения 20 ч и более может иметь место в случаях потери или пропуска результатов измерений.

На рис.6, а приведены данные зависимости при интервале измерения  $\Delta t = 0,02\tau_{кор}$ .

Как видно из приведенных графиков (рис.6), при линейной аппроксимации (кривая 1), дискретными кубическими сплайнами (кривая 2) и эрмитовыми кубическими сплайнами (кривая 3) точности оценок практически не отличаются от теоретических зависимостей. Дискретные кубические сплайны и эрмитовы кубические сплайны позволяют получить практически одинаковую точность оценок. При интервале измерения  $\Delta t = 0,12\tau_{кор}$  линейная аппроксимация (рис.6, б кривая 1) позволяет получить значительно более низкую точность восстановления по сравнению с дискретными кубическими сплайнами (кривая 2) и эрмитовыми кубическими сплайнами (кривая 3). Кроме того, и точность аппроксимации дискретными кубическими сплайнами несколько ниже точности аппроксимации эрмитовыми кубическими сплайнами.

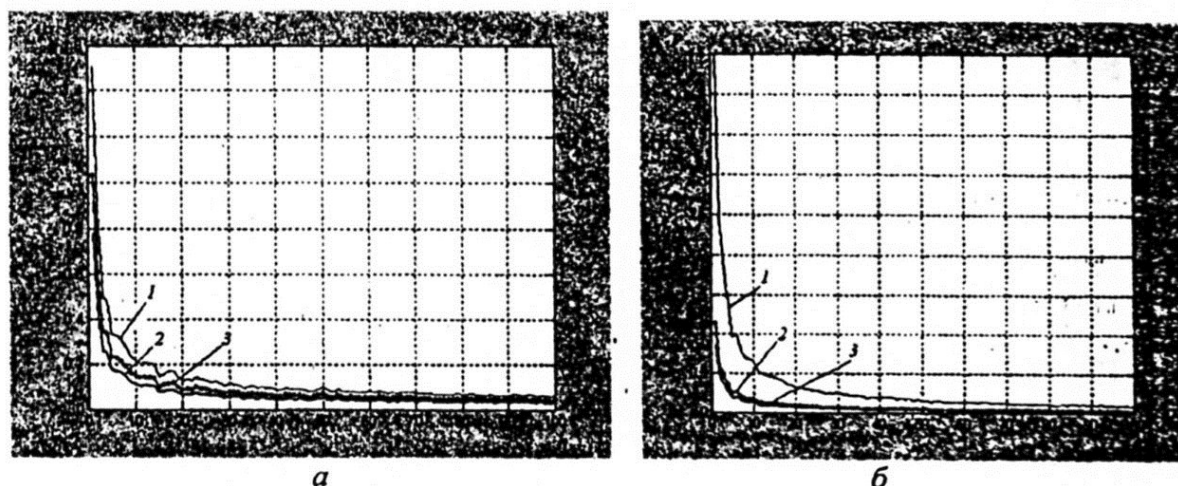


Рис.6 – Графики ошибки аппроксимации при интервалах измерения  $\Delta t = 0,02\tau_{кор}$  (а) и  $\Delta t = 0,12\tau_{кор}$  (б):

1 – линейная аппроксимация; 2 – аппроксимация дискретными кубическими сплайнами; 3 – аппроксимация эрмитовыми кубическими сплайнами.

При дальнейшем увеличении интервала измерения результаты восстановления при линейной аппроксимации выходят за пределы до-

пустимых значений. Так, на рис.7 приведены зависимости ошибок аппроксимации при интервале измерения  $\Delta t = 0,5\tau_{кор}$  (кривая 1 – линейная аппроксимация, кривая 2 – аппроксимация дискретными кубическими сплайнами, кривая 3 – аппроксимация эрмитовыми кубическими сплайнами).

Из приведенных графиков (рис.7) видно, что, результаты оценивания и результаты восстановления с использованием дискретных кубических сплайнов и эрмитовых кубических сплайнов дают значительное, почти на порядок, ухудшение, что же касается линейного метода восстановления, то здесь он просто неприемлем.

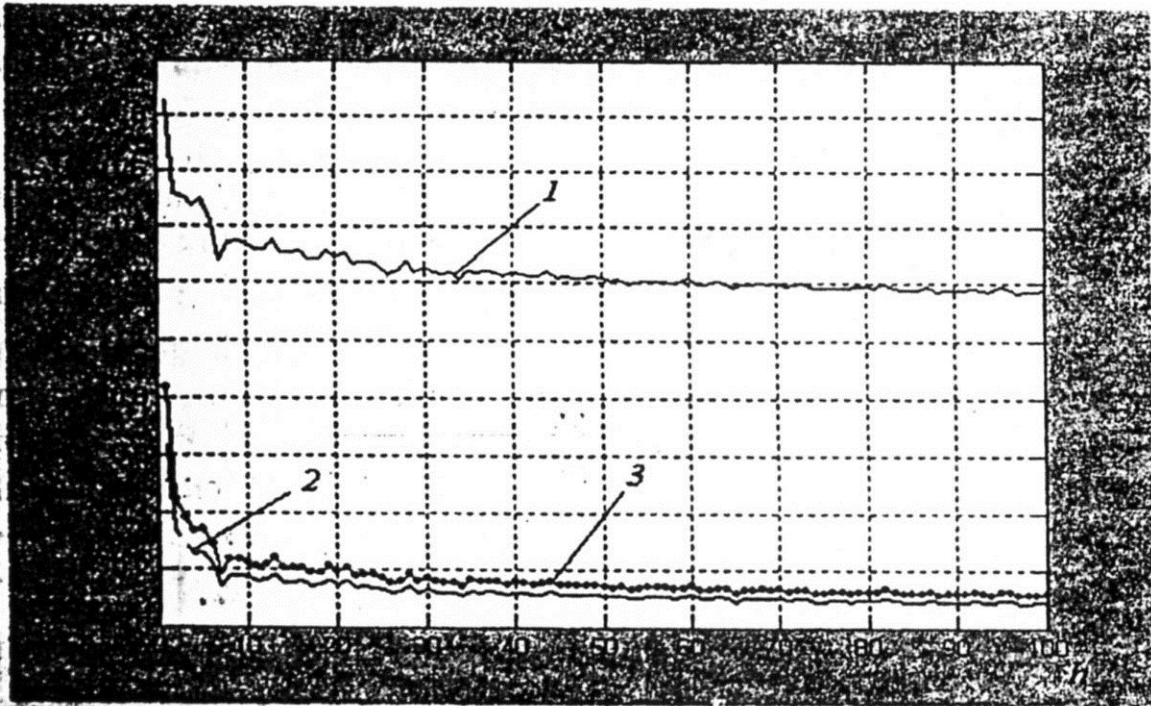


Рис.7 – Графики ошибки аппроксимации при интервале измерения  $\Delta t = 0,5\tau_{кор}$ :  
 1 – линейная аппроксимация; 2 – аппроксимация дискретными кубическими сплайнами;  
 3 – аппроксимация эрмитовыми кубическими сплайнами.

Таким образом, в работе предложено использовать рекурсивную обработку результатов измерений на основании процедуры Калмана-Бьюси, что позволяет получить результат оценки на любом шаге рекурсии, выполнять оценку в реальном масштабе времени и не требует дополнительного времени на накопление и обработку информации. Кроме того, процедура Калмана-Бьюси имеет то преимущество, что она хорошо приспособлена для программной реализации. При этом оценки вычисляются последовательно, по мере поступления отсчетов наблюдаемого процесса и в силу этого не требуется большого объема памяти. Исследования качества получаемых оценок показали, что несовпадения параметров выбранной модели и параметров фильтра мо-

гут привести к значительным потерям качества обработки или даже к потере устойчивости процедуры обработки. В то же время, изменения параметров модели в пределах  $\pm (20-30)\%$  не приводят к заметным ошибкам оценок. Из сопоставления погрешностей следует, что процедура оценки, оказывается, менее чувствительна к неточности задания коэффициента наблюдения  $H$ , чем к соответствующим неточностям задания параметра корреляции  $\alpha_\phi$ . Предложена модификация результатов оценивания измеряемых параметров с помощью кубических сплайнов. Проведенный анализ показывает, что при интерполяции последовательности оценок, получаемым по методу Калмана-Бьюси аппроксимация кубическими сплайнами оказывается более эффективной, чем линейная аппроксимация.

1. Лемешко Б.Ю. Робастные методы оценивания и отбраковка аномальных измерений // Заводская лаборатория. – 1997. – Т.63. – №5. – С.43-49.

2. Довідник інженера диспетчерської служби / За заг. ред. канд. техн. наук, акад. УНГА Ю.В.Пономарьова та М.П.Химка. – К.- Х.: УЦЕБОПнафтогаз, 2007. – 248 с.

3. Кучин Б.Л. Оперативная информация в АСУ магистральных газопроводов. – М.: Недра, 1979. – 216 с.

4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 384 с.

5. Берман Р.Я., Панкратов В.С. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами. – Л.: Недра, 1978. – 277 с.

6. Райбман Н.С. Адаптивные модели в системах управления. – М.: Сов. радио. 1966. – 155 с.

7. Коляденко В.А. Адаптивные алгоритмы обработки результатов измерений технологических параметров газопроводов для оценки гидравлического состояния и оптимального управления системой газоснабжения // Проблеми нафтогазової промисловості: Зб. наук. праць. Вип.2. – К., 2005. – С.253-257.

8. Коляденко В.А. Применение адаптивных моделей в задачах оптимизации режимов работы газопровода // Материалы I междунар. науч. конф. "Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития". – Туапсе, 3-6 октября 2006 г. – С.162-163.

9. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. под ред. Б.Р.Левина. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

10. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. – М.: Недра, 1975. – 277 с.

11. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 352 с.

*Получено 25.01.2011*