



## СОПОСТАВЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ И КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ В ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ ВЫХОДА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Е.А. Гребенюк (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН)

Рассматривается класс процессов, для которых в режиме нормального функционирования агрегата присутствуют изменения среднего уровня, что исключает возможность применения стандартных контрольных карт для контроля выхода качественных показателей за технологические ограничения. Предлагается решение задачи контроля по результатам лабораторных анализов путем совместного применения методов статистической экстраполяции и контрольных карт.

Ключевые слова: прогноз дискретных лабораторных анализов, статистическая экстраполяция, модель авторегрессии и скользящего среднего, кусочно-стационарный процесс, автокоррелированные наблюдения, контрольные карты, технологические ограничения.

### Введение

Задача контроля и управления с целью предупреждения выхода качественных показателей материальных потоков за допустимые технологические границы в реальном времени является одной из важнейших задач управления непрерывными производствами.

Для дискретных производств эта задача традиционно решается с использованием различных типов контрольных карт [1–3], которые разрабатывались для производств, качественные показатели которых при нормальном функционировании процесса представляют собой независимые случайные величины, распределенные относительно постоянного среднего значения.

Одной из основных особенностей непрерывных производств является инерционность, вследствие которой между последовательными значениями лабораторных анализов качественных показателей могут наблюдаться автокорреляции. Наличие автокорреляций послужило препятствием для использования существующих контрольных карт (КК) и стимулом для исследований, направленных на разработку соответствующих карт для автокоррелированных процессов. Известно большое число различных типов КК для автокоррелированных процессов с постоянным средним уровнем, изменение или наличие значительных отклонений от которого может являться сигналом о неблагополучии в процессе, приводящим к выходу его за технологические ограничения [4].

Однако большинство непрерывных процессов при функционировании в рабочем режиме характеризуется изменениями среднего уровня значений качественных показателей, случайными колебаниями относительно их среднего уровня и наличием автокорреляций между последовательными значениями. Динамика показателей в режиме нормального функционирования технологического агрегата, значения которых получаются в результате лабораторных анализов, описывается кусочно-стационарным процессом. Указанные свойства процесса, с одной стороны, снижают возможности применения известных КК, с другой — позволяют использовать для прогнозирования и контроля алгоритм статистической экстраполяции, основанный на описании процесса моделью АРСС [5].

Алгоритм статистической экстраполяции вычисляет будущие значения качественных показателей с учетом устойчивых статистических связей между их последовательными значениями и позволяет строить прогнозы будущих значений показателя с большей точностью, чем используемые в настоящее время

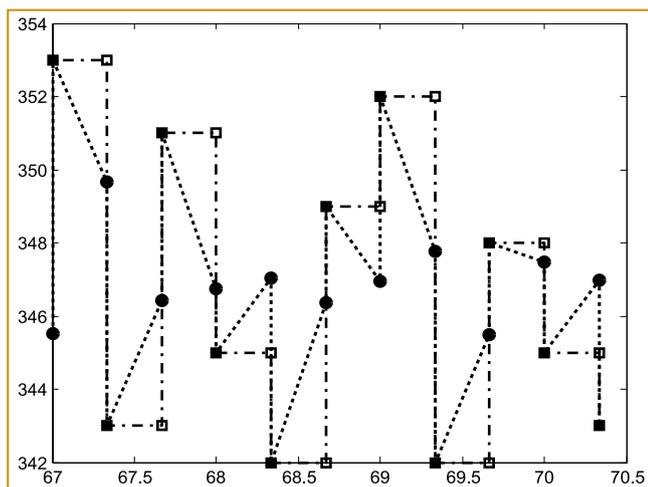


Рис. 1. Фактические значения лабораторных анализов (●), прогноз по АРСС (2,1,3) модели (□), наивный прогноз (△). По горизонтальной оси отложено время в сутках, по вертикальной оси – значения лабораторных анализов и их прогнозов

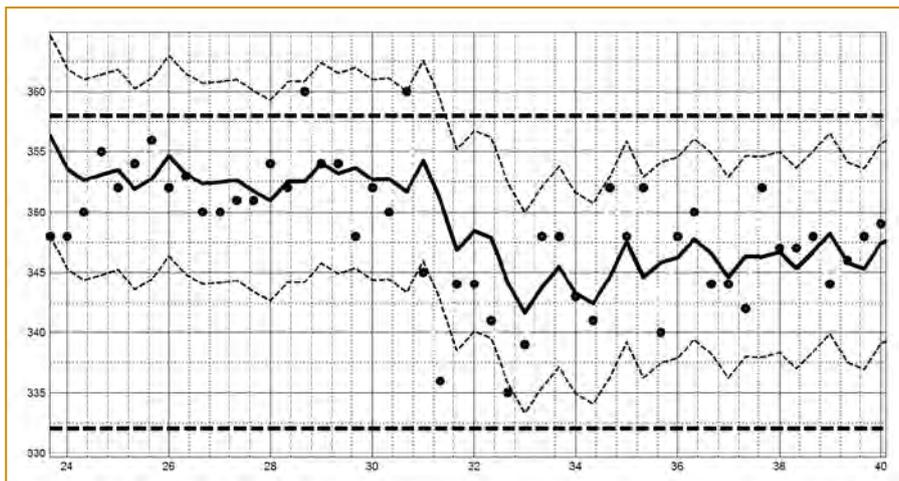


Рис. 2. Фактические значения лабораторных анализов (•), прогнозные значения, вычисленные по модели —; границы доверительных интервалов прогноза при  $\alpha=5\%$  - - -; технологические ограничения —; по горизонтальной оси отложено время в сутках

на предприятиях «наивные» прогнозы, выбирающие в качестве прогнозного значения результат последнего лабораторного анализа, может применяться:

1) для определения тенденции изменений дискретно измеряемого во времени показателя непрерывного процесса на основе значений имеющихся измерений;

2) для выполнения прогнозов будущих значений дискретно измеряемого показателя, уменьшающих среднеквадратическую ошибку прогноза по сравнению с «наивным прогнозом» на 20...40%, в зависимости от свойств процесса;

3) для выбора частоты лабораторных анализов каждого показателя по требуемой точности его оценки в каждый момент времени, позволяющего увеличить или, наоборот, уменьшить интервалы между анализами для обеспечения необходимой точности оценки;

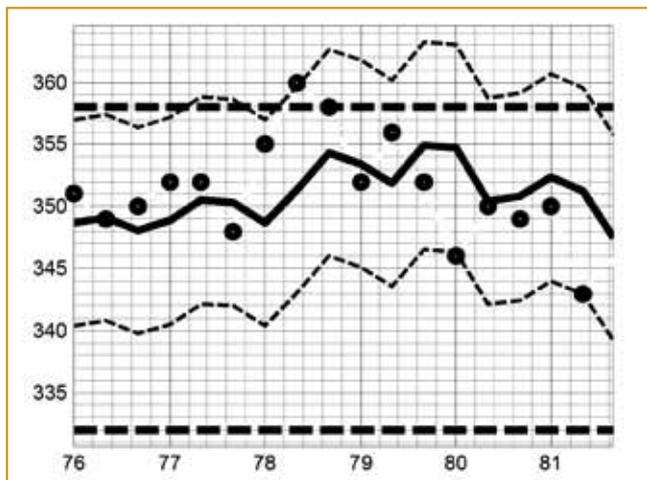


Рис. 3. Прогнозирование выхода за ограничения по доверительным интервалам прогноза. Фактические значения лабораторных анализов (•), прогнозные значения по модели —, границы доверительных интервалов прогноза - - -, технологические ограничения —, по горизонтальной оси отложено время в сутках

4) для определения среднего уровня качественного показателя, при котором вероятность выхода последнего за технологические ограничения маловероятна.

Основное назначение КК — обнаружение таких изменений качественных показателей, которые могут привести к их выходу процесса за технологические ограничения.

В статье обсуждаются варианты совместного применения модели статистической экстраполяции и КК для решения задачи контроля выхода качественных показателей непрерывных производств, описываемых кусочно-стационарными процессами, за границы технологических ограничений.

#### Алгоритмы статистической экстраполяции

Алгоритм статистической экстраполяции, основанный на описании процесса моделью АРПСС, был впервые предложен в [5]. Эта модель позволяет строить прогнозы будущих значений процесса с минимальной среднеквадратической ошибкой и используется для нестационарных процессов, которые могут быть преобразованы к стационарным путем операции взятия разностей исходного ряда.

Рассмотрим последовательность значений лабораторных анализов:

$$x_1, x_2, \dots, x_{t-1}, \quad (1)$$

где  $x_i, i=1,2,\dots$  — результаты лабораторного анализа пробы, взятой в момент времени  $t=i$ . Модель АРПСС описывает процесс в виде разности двух линейных комбинаций: прошлых значений и прошлых значений ошибок его прогноза на один шаг. Первая линейная комбинация известна в литературе как авторегрессия (АР), вторая — как скользящее среднее (СС). Число членов АР комбинации —  $p$ , число членов СС комбинации —  $q$ . Если ряд кусочно-стационарный, то для преобразования его к стационарному операция взятия разностей выполняется один раз, и полученная модель обозначается как АРПСС  $(p,1,q)$ , (arima  $(p,1,q)$  в англоязычной литературе).

Для одного и того же временного ряда можно построить и использовать несколько моделей, различающихся между собой числом членов в каждой из имеющихся линейных комбинаций, а следовательно, величиной среднеквадратической ошибки прогноза. Однако для получения прогноза хорошего качества следует выбирать число членов и их параметров таким образом, чтобы получить модель, наиболее точно описывающую изменения во времени рассматриваемого показателя как на обучающей выборке, так и на дру-

гих участках процесса при условии постоянства его автокорреляционных свойств. В [6] была предложена автоматизированная процедура выбора порядков  $p$  и  $q$ , учитывающая как прогнозные свойства модели, так и возможность ее использования без подстройки на расширенной выборке значений процесса.

Когда модель статистической экстраполяции построена, то по ней можно вычислять прогнозы будущих значений лабораторных анализов. Среднеквадратическая ошибка прогноза на один шаг вычисляется по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i+k=2}^n (x_i - \hat{x}_{i|j-1, i-2, \dots, i-k-1})^2, \quad (2)$$

где  $n$  — объем выборки,  $k = \max(p, q)$  — максимальный порядок модели,  $\hat{x}_{i|j-1, \dots, i-k-1}$  — прогноз значения  $i$ -го лабораторного анализа на 1 шаг по значениям  $x_{i-k-1}, \dots, x_{i-1}, x_i$  — его фактическое значение.

Был рассмотрен и проанализирован ряд типовых примеров поведения качественных показателей непрерывных производств на основе данных, полученных в результате лабораторных анализов. Здесь рассматривается один из примеров, иллюстрирующий результаты статьи. Процесс изменения значений лабораторных анализов показателя, которые берутся с интервалом 8 часов (3 раза в сутки), включает 518 наблюдений.

На рис. 1 представлены фрагмент процесса, фактические значения анализов за трое суток и их прогнозные значения, полученные методами «наивного» прогноза и статистической экстраполяции, порядки модели АРПСС (2,1,3), для которой выбраны с помощью алгоритма, описанного в [6]. В среднем правильный прогноз фактического направления изменения показателя по модели АРПСС (2,1,3) и, следовательно, снижение величины ошибки относительно наивного прогноза выявляются в 70% наблюдений. Для рассматриваемого процесса уменьшение ошибки статистической экстраполяции относительно наивного прогноза вычисляется по формуле:

$$Z = 100\% \frac{(\sigma_N - \sigma_{se})}{\sigma_N}, \quad (3)$$

где  $\sigma_N$  — корень квадратный среднеквадратической ошибки наивного прогноза,  $\sigma_{se}$  — корень квадратный среднеквадратической ошибки прогноза по модели, и составляет 28%.

Если для вычисления прогноза по последовательности наблюдений (1) построена АРПСС ( $p, 1, q$ ) модель, то для каждого вновь получаемого прогнозного значения можно построить доверительный интервал. Выход фактического значения прогнозируемой величины за границы доверительного интервала возможен с заданной доверительной вероятностью. Обычно величина доверительной вероятности задается в диапазоне 1...10%. Построенные границы доверительных интервалов служат индикатором тех участков процесса, на которых возможен его выход за технологические ограничения.

На рис. 2 представлен фрагмент графика процесса, технологических ограничений, его прогноза по модели АРПСС (2,1,3) и доверительных интервалов.

Как можно видеть, значения качественных показателей представляют собой флуктуации относительно двух различных средних уровней — 353 и 346, причем при первом среднем уровне (поскольку значения верхнего доверительного интервала превышают уровень технологических ограничений) увеличивается вероятность выхода показателя за технологические ограничения. При снижении среднего уровня качественного показателя возрастает вероятность выполнения технологических ограничений. Хотя при установившемся среднем уровне технологические ограничения соблюдаются, но желательно повысить средний уровень для снижения затрат на производство.

На рис. 3 представлены результаты попытки повышения среднего уровня показателя. Увеличение вероятности нарушения технологических ограничений начинается при превышении средним уровнем процесса значения 350, верхняя граница доверительных интервалов прогноза в период с 78-х по 81-е сутки выходит за технологические ограничения. В начале 78-х суток прогноз на следующие 8 часов предсказывает увеличение показателя, а выход верхнего доверительного интервала прогноза за границу технологических ограничений прогнозирует увеличение вероятности выхода показателя за эти ограничения.

Алгоритм статистической экстраполяции описывает стационарный или кусочно-стационарный процесс и определяет с заданной вероятностью интервал времени, в котором возможен выход анализируемого показателя за заданный диапазон. Практически возможное наличие в отдельные моменты времени резких выбросов или изменений среднего уровня показателя, причиной которых могут являться, например, скачкообразные изменения давления, замена единицы оборудования, задержка поступления одного из компонентов сырья этим алгоритмом не прогнозируется, а только описывается с запаздыванием.

Поэтому при прогнозе по алгоритму статистической экстраполяции нельзя предсказывать будущие «резкие» скачки показателя, вызванные такими внешними воздействиями, как сбой оборудования, ошибки датчиков, возникновение резких колебаний сырьевых потоков после смены хранилищ сырья и пр. Алгоритм определяет установившийся средний уровень процесса и предсказывает направление изменений будущих значений, которые вызваны случайными возмущениями инерционного процесса.

#### Назначение и примеры контрольных карт

В отличие от алгоритма статистической экстраполяции КК могут быстрее реагировать на «резкие» скачки показателей. Однако применение их при наличии автокорреляций и изменений среднего уровня процесса имеет ряд ограничений, на которые будет указано далее. КК представляют измеренные характеристики (значения или функции от значений) ка-

качественных показателей в виде графика временного ряда, на котором нанесены три горизонтальные прямые линии. Центральная линия задает целевое значение измеряемого показателя или заданной функции от его измерений. Верхняя UCL (upper control limit) и нижняя LCL (lower control limit) линии определяют контрольные пределы ее изменения и лежат, соответственно, выше и ниже центральной линии. Целевое значение определяется в виде среднего значения от предыдущих значений, когда процесс находился в режиме нормального функционирования агрегата. Если значения не выходят за контрольные пределы, то предполагают, что отклонения процесса от режима нормального функционирования не происходит. Под влиянием внешних воздействий свойства последовательности качественных показателей изменяются, их значения выходят за контрольные пределы. Различия в КК определяются видом функции от измеренных значений качественных показателей, которые наносятся на график. Это могут быть средние значения фиксированного числа измерений, накопленные отклонения от заданного значения и т. п. В зависимости от целей анализа используются различные виды КК и настройки, определяющие величину контрольных пределов. Рассмотрим несколько примеров КК.

*Карта Шухарта* представляет собой график средних значений процесса, вычисляемых по группе из последовательных лабораторных анализов. Для построения карты Шухарта исходная последовательность наблюдений разбивается на группы равной длины:

$$\dots, \underbrace{x_{(i-1)m+1}, x_{(i-1)m+2}, \dots, x_{im}, \dots, x_{nm}}_{i\text{-я группа}}, \quad (4)$$

где  $i$  — номер группы,  $m$  — число анализов в группе. Для каждой  $i$ -ой группы вычисляются оценки среднего  $\bar{x}_i$  и стандартного отклонения  $s_i$  по формулам:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{(i-1)m+j}, \quad s_i = \frac{\sum_{j=1}^m (x_{(i-1)m+j} - \bar{x}_i)^2}{m-1}$$

Получают оценки Центральной линии  $\bar{X}_{center}$  и верхних, и нижних контрольных пределов USL и LSL:

$$\bar{X}_{center} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i, \quad s_{center} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i$$

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{X}_{center} + G \frac{s_{center}}{\sqrt{n}}, \quad LCL_{\bar{X}} = \bar{X}_{center} - G \frac{s_{center}}{\sqrt{n}},$$

где  $n$  — число групп в выборке (4),  $G$  — настроечный параметр, определяющий число стандартных отклонений, на которое групповое среднее отклоняется от Центральной линии. При анализе промышленных процессов принято использовать предложенное Шухартом значение  $G$  равное трем.

Так как на непрерывных производствах лабораторные анализы выполняются достаточно редко, то для контроля качества непрерывных производств обычно строят КК *индивидуальных наблюдений*, в такой карте  $m=1$ , центральная линия и контрольные пределы вычисляются по формулам:

$$\bar{X}_{center} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i, \quad UCL_{\bar{X}} = \bar{X}_{center} + 3 \frac{\bar{R}}{1.128},$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{X}_{center} - 3 \frac{\bar{R}}{1.128},$$

где  $\bar{R} = \frac{\sum_{i=2}^n R_i}{n-1}$  — среднее «размахов» — абсолютных

разностей последовательных значений ряда (1),  $R_i = |x_i - x_{i-1}|$ ,  $i = 2, \dots, n$ ,  $n$  — объем выборки, на которой вычисляются настроечные параметры.

*Карта экспоненциально взвешенного скользящего среднего (Exponentially Weighted Moving Average — EWMA)*. При построении КК EWMA по последовательности (1) вычисляется статистика:

$$z_t = \lambda y_t + (1-\lambda)z_{t-1} = \lambda \sum_{j=0}^{t-1} (1-\lambda)^j y_{t-j},$$

где  $z_t$  — значения КК,  $x_t$  — значения лабораторного анализа,  $\lambda$  — настроечный параметр. В качестве начального значения обычно выбирается оценка среднего значения наблюдений  $x_t$ ,  $t = 1, 2, \dots, t_0$ , вычисленного по обучающей выборке. Если наблюдения независимы и одинаково распределены с дисперсией  $\sigma^2$ , то дисперсия величины  $z_t$  стремится к величине  $\frac{\lambda}{2-\lambda} \sigma^2$ . Центральная линия

и контрольные пределы и вычисляются по формулам:

$$\bar{X}_{center} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i,$$

$$USL = X_{center} + G\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}, \quad LSL = X_{center} - G\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}},$$

В Engineering Statistics (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>) предлагается использовать значения  $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$  и  $2,6 \leq G \leq 3$ .

Если процессы автокоррелированы, то рассмотренные выше КК снижают свою эффективность. Было проведено большое число исследований влияния автокорреляций на эффективность стандартных карт, которые показали, что их наличие приводит к увеличению числа ложных обнаружений и величины запаздывания при обнаружении. Уменьшение частоты наблюдений в последовательности (1) таким образом, чтобы они поступали с интервалами времени, большими времени спада автокорреляционной функции процесса, позволяет использовать стандартные КК, но уменьшает вероятность своевременного обнаружения изменений в процессе, которые могут привести к выходу его за технологическую норму.

Одним из основных подходов к построению КК для автокоррелированных наблюдений является подход, основанный на описании временного ряда наблюдений подходящей параметрической моделью и построение КК по остаткам модели, представляющим собой разность между текущими наблюдениями и моделью. Если модель адекватно описывает процесс, остатки — независимые нормально определенные величины, то для них могут применяться стандартные

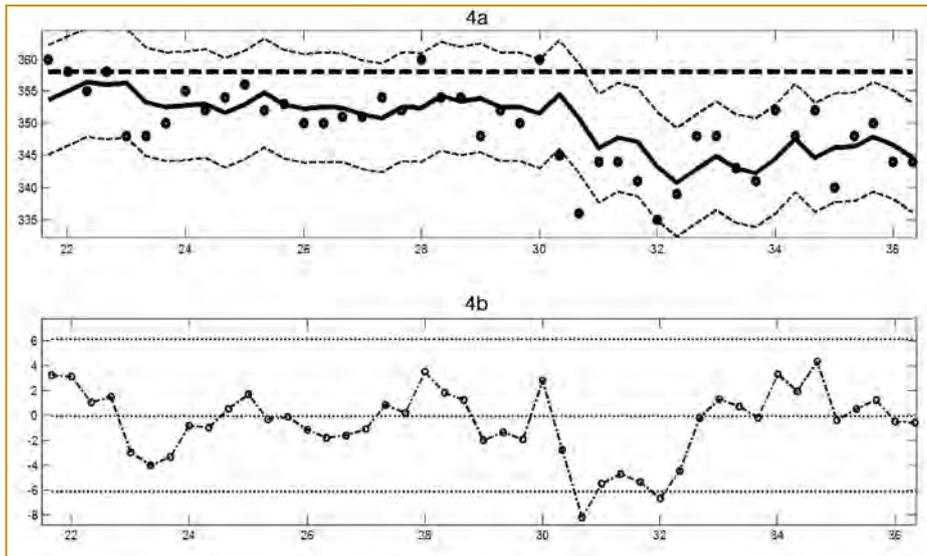


Рис. 4. Фактические значения лабораторных анализов ( ), прогнозные значения, вычисленные по модели ; границы доверительных интервалов прогноза при  $\alpha=5\%$  - - -; технологические ограничения (4a); контрольные пределы и центральная линия ; карта EWMA - - - о (4b); по горизонтальной оси отложено время в сутках

карты для независимых наблюдений, например, описанные выше.

Однако, если процесс описывается моделью, имеющей несколько средних уровней, то выход КК остатков за контрольные пределы, указывающий на увеличение отклонений от модели, может быть никак не связан с нарушением технологических ограничений, и наоборот, КК может никак не реагировать на выход за технологические ограничения, вызванный близостью текущего среднего уровня к их значениям.

#### Сопоставление КК и алгоритма статистической экстраполяции при решении задачи контроля выхода за технологические ограничения автокоррелированного кусочно-стационарного процесса

Рассмотрим решение задачи контроля выхода значений качественных показателей за технологические ограничения с использованием методов статистической экстраполяции и КК. Такие попытки предпринимались и ранее. Впервые система, рассматривающая модель статистической экстраполяции, построенной по исходным данным и КК, построенной по остаткам от этой модели, была предложена в работе Алвана и Робертса [7] применительно к стационарным процессам. Для них, как указано в предыдущем разделе, КК по остаткам модели могут быть использованы для обнаружения отклонений. Авторами применялась индивидуальная КК Шухарта, построенная модель использовалась не для прогноза возможных нарушений, а только как иллюстрация поведения процесса.

Мы рассмотрим систему контроля, в которой алгоритм статистической экстраполяции служит для контроля критических участков процесса при установленном среднем уровне процесса, а КК служит для

обнаружения участков, на которых происходит изменение среднего уровня процесса.

Результаты работы системы могут быть представлены в виде системы из двух графиков. На первый наносятся прогнозные значения лабораторных анализов на один шаг, вычисленные в соответствии с процедурой, изложенной в первом разделе, их фактические значения, доверительные интервалы прогнозов и технологические ограничения. На втором графике — значения КК, построенной по остаткам (разностям между прогнозом на один шаг по модели и его фактическим значением), центральная линия и контрольные пределы. В качестве КК может быть использована одна из КК, описанных в предыдущем разделе.

В наших примерах мы использовали EWMA, сравнение результатов ее работы с индивидуальной картой Шухарта, используемой в [7], не выявило значимых различий в результатах применения обеих карт.

На рис. 4 а представлен фрагмент графика процесса, технологических ограничений, его прогноза и доверительных интервалов, на рис. 4b — КК EWMA, построенная по отклонениям прогноза от фактических значений.

На интервале с 22-х до начала 31-х суток средний уровень показателя — 354, на этом уровне границы верхних доверительных интервалов прогнозов превышают значения верхних технологических ограничений, и часто наблюдается выход фактических значений за технологические ограничения. Однако КК, представленная на рис. 4b, не дает никаких сигналов о возможности выхода процесса за ограничения, поскольку отклонения прогнозных значений от фактических, как видно из рис. 4а, невелики. В течение следующих суток средний уровень показателя понижается и устанавливается равным 346, при котором не происходит выхода ни доверительных интервалов, ни фактических значений за технологические ограничения. Контрольная карта реагирует на большие отклонения фактических значений от модели. Выход ее за нижние контрольные пределы указывает на возможное снижение среднего уровня до того, как это показывает модель статистической экстраполяции.

Представленная на рис. 5 система из двух графиков — алгоритма статистической экстраполяции и карты EWMA дополнена третьим графиком, на котором изображена используемая в [7] карта индивидуальных наблюдений Шухарта, результаты применения которой

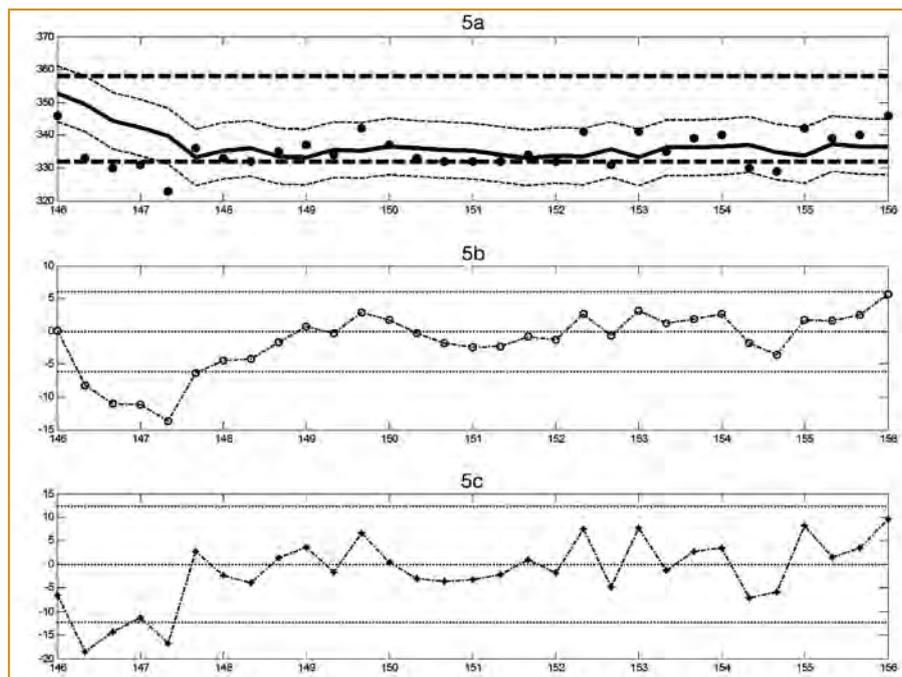


Рис. 5. Фактические значения лабораторных анализов ( ), прогнозные значения, вычисленные по модели ( ), границы доверительных интервалов прогноза при  $\alpha = 5\%$  (---), технологические ограничения (5a); контрольные пределы и центральная линия ( ), карта EWMA -- о -- о (5b); карта индивидуальных наблюдений Шухарта -- \* -- \*, контрольные пределы и центральная линия -- (5c); по горизонтальной оси отложено время в сутках

практически не отличаются от результатов карты EWMA.

В примере, представленном на рис. 5, снижение фактического значения показателя процесса до 331–322, сопровождающееся выходом за технологические ограничения на 146-е — 147-е сутки, не прогнозируется моделью статистической экстраполяции, но на отклонение от модели обе карты реагируют на сутки раньше, чем модель статистической экстраполяции. Установившийся на 147-е сутки средний уровень модели статистической экстраполяции и величина нижнего доверительного интервала указывают на то, что значения качественного показателя могут выйти и выйдут за нижнюю границу технологических ограничений, что и происходит на 153-е сутки. Контрольные карты, наоборот, не реагируют на снижение среднего уровня: ни одна из них не предупреждает о возможности выхода процесса за ограничения после того, как средний уровень процесса снизился до значений, при которых увеличилась вероятность выхода за нижнюю границу технологических ограничений.

#### Заключение

Таким образом, при наличии в процессе изменений среднего уровня в режиме нормального функционирования агрегата применение КК, построенных по отклонениям от модели, возможно для обнаружения изменений среднего уровня процесса независимо от того, связаны

эти изменения с выходом за технологические ограничения или нет. КК обнаруживают эти изменения быстрее, чем алгоритм статистической экстраполяции и дают сигнал оператору об изменениях среднего уровня процесса. При переходе от одного среднего уровня к другому, как было отмечено выше, алгоритм статистической экстраполяции обладает запаздыванием, при этом на время переходного процесса нарушаются его прогнозные свойства. Если значения КК находятся внутри контрольных пределов, то алгоритм статистической экстраполяции позволяет выявлять критические участки процесса и путем своевременного изменения настроек регуляторов предотвращать возможные нарушения качества. При совместном применении сигнал КК указывает на изменение прогнозных свойств алгоритма статистической экстраполяции, вызванных резкими выбросами или изменениями среднего уровня показателя.

Применение в составе прикладного математического обеспечения ЛИМС модуля статистической экстраполяции и КК позволит предотвратить выход качественных показателей за технологические ограничения и построить для любого анализируемого в лаборатории качественного показателя статистический прогноз его значения до следующего по времени анализа.

#### Список литературы

1. Штурм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.: Мир. 1970. 368 с.
2. Page E.S. Continuous inspection schemes // *Biometrika*, 1954, vol.41, pp. 100-115.
3. Roberts S.V. Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics*. 1959. V.1 pp. 239-250.
4. Montgomery D., Mastrangelo C., Faltin F.W., Woodall W.H., MacGregor J.F., Ryan T.P. Some Statistical Process Control Methods for Autocorrelated Data // *Journal of quality technology*. 1991, V.23.1. 1. pp. 179-204.
5. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Мир. 1974.
6. Гребенюк Е.А., Ицкович Э.Л. Повышение точности оценки значений текущих качественных показателей по их дискретным лабораторным анализам использованием алгоритмов экстраполяции // *Автоматизация в промышленности*. 2016. №8.
7. Alwan L.C. Roberts H. Time series modeling for statistical quality control // *Journal of business & economic statistics*. 1988. №6.

Гребенюк Елена Алексеевна — д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.  
Контактный телефон (495) 334-90-21.  
E-mail: lgreben@ipu.ru