

РАЗВИТИЕ ОТРАСЛЕВОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.2, 65.011.56, 622.23.05

JEL L64, L71

DOI 10.26425/1816-4277-2019-11-62-70

Бондаренко Инна Сергеевна

канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ORCID: 0000-0002-4160-8413

e-mail: msmu_asu@mail.ru

Куприянов Вячеслав Васильевич

д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ORCID: 0000-0003-3793-8361

e-mail: msmu_asu@mail.ru

Bondarenko Inna

Candidate of Technical Sciences, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-4160-8413

e-mail: msmu_asu@mail.ru

Kupriyanov Vyacheslav

Doctor of Technical Sciences, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-3793-8361

e-mail: msmu_asu@mail.ru

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ПРЕДСКАЗАНИИ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Аннотация. Статья направлена на развитие и обоснование одного из подходов к прогнозированию индивидуального остаточного ресурса конкретного находящегося в эксплуатации горно-шахтного оборудования в очистном забое угольной шахты. Выявлены основные причины, влияющие на точность прогнозов. Показана перспективность применения комплексированных прогнозов по нескольким аналогам с помощью сплайн-функций для переменных, характеризующих технологические ситуации с горно-шахтным оборудованием. Приведена процедура краткосрочного прогнозирования многомерного процесса изменения среднегодовых значений переменных, описывающих технологические ситуации с конвейером и крепью лавы в очистном забое. Выявлены успешно прогнозируемые и непрогнозируемые переменные. Проведенные комплексированные прогнозы по разным критериям самоорганизации позволили установить оптимальное число аналогов и ранжировать прогнозируемые переменные комбайна и крепи по точности прогноза.

Ключевые слова: прогноз, аналог, сплайн-функции, баланс дискретизаций, ресурс, технологическая ситуация, метод комплексирования.

Цитирование: Бондаренко И.С., Куприянов В.В. Возможности методов самоорганизации при предсказании нештатных ситуаций в горном деле // Вестник университета. 2019. № 11. С. 62-70.

POSSIBILITIES OF SELF-ORGANIZATION METHODS IN PREDICTING EMERGENCY SITUATIONS IN MINING

Abstract. The article is directed at developing and substantiating one of the approaches to forecasting the individual residual resource of a particular mining equipment in operation in a coal mine clean-up area. The main causes, affecting the accuracy of forecasts, have been identified. The perspectivity of using complex forecasts on several analogs with the help of spline functions for variables, characterizing the technological situations with GGOs, has been shown. The procedure of short-term forecasting of the multidimensional process of changing the average annual values of variables describing technological situations with the conveyor and lava supports in the breakage face has been adduced. Successfully predictable and non-predictable variables have been revealed. Conducted complex forecasts for different criteria of self-organization have allowed us to set the optimal number of analogs and to rank the forecasted variables of the combine and linings according to the accuracy of the forecast.

Keywords: forecast, analog, spline functions, balance of discretizations, resource, technological situation, method of aggregation.

For citation: Bondarenko I.S., Kupriyanov V.V. Possibilities of self-organization methods in predicting emergency situations in mining (2019) Vestnik universiteta, I. 11, pp. 62-70. doi: 10.26425/1816-4277-2019-11-62-70

© Бондаренко И.С., Куприянов В.В., 2019. Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0. всемирная (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The Author(s), 2019. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



В настоящее время все более актуальными становятся задачи прогнозирования состояния горно-шахтного оборудования (далее – ГШО) на угледобывающих предприятиях в условиях постоянного роста удельного веса машин и механизмов в структуре промышленно-производственных фондов. В современных условиях цена ошибки от необоснованных решений управленческого характера сводится к большим потерям для производства. Поэтому особый интерес вызывают вопросы прогнозирования индивидуального остаточного ресурса ГШО на стадии его эксплуатации. Их решение опирается на графики планово-предупредительного ремонта, технологические карты по безопасному техническому обслуживанию и ремонту оборудования шахты, журнальные отчеты горных мастеров. При этом используется текущая информация об объекте, полученная в результате хронометражных наблюдений и измерений во время эксплуатации, например, механизированных комплексов очистных забоев [2; 7].

Многочисленные исследования функционирования очистных забоев как объектов прогнозирования показывают, что они представляют собой сложную динамическую систему. Если попытаться уточнить понятие сложности, то прежде всего необходимо выделить многомерность, нестационарность, стохастичность производственного комплекса. Забой лавы проходит участки геологических осложнений, что определяет, причем стохастическое, условие эксплуатации на состояние оборудования. Поэтому считается, что процесс добычи угля весьма сложен для прогноза. Необходимо прогнозировать переменные, описывающие технологическое состояние очистного оборудования на стадии эксплуатации, то есть определять, какие переменные успешно прогнозируются и какие не прогнозируются, поскольку от них зависит решение задачи индивидуального прогнозирования ресурса, то есть оценка рисков по отношению к аварийным ситуациям, установление допустимых остаточных сроков эксплуатации при наличии возрастающего риска и т. п.

А. Г. Ивахненко была высказана мысль о том, что популярными в научной среде детерминистическими методами синтеза алгебраических уравнений однократного прогноза, основанных на регрессионных алгоритмах, не предусматривающих свободы выбора решения, просто невысказано решать сложные задачи, например, предсказать количество воды в реке через 10 лет [1]. Формирование точных прогнозов усложняется тем, что многие случайные процессы настолько стохастичны, что принципиально не поддаются математическому или иному прогнозированию. Процессов, не поддающихся прогнозу, меньше, чем может казаться на первый взгляд. Большинство случайных процессов прогнозируемы с большой точностью.

Отсутствие удачных прогнозов объясняется и тем, что для прогнозов обычно применялись слишком простые (линейные и квадратичные) уравнения прогнозирования. Утверждение о том, что простые соотношения более соответствуют истине, чем сложные, справедливо только для простых детерминированных случаев. В сфере стохастических явлений действуют сложные, нелинейные соотношения [7, с. 200].

До сих пор рассматривали вопросы прогнозирования случайных процессов, представленных рядом дискретных точек. Эксперты предсказывают определенные события, а не значения случайных процессов. Во многих случаях прогноз единичных событий не отличается от прогнозирования непрерывных случайных процессов. Например, технологические ситуации с ГШО изменяются под воздействием определенных факторов, одни из которых учесть строго математически сложно. Другие же, с определенной степенью уверенности, – возможно. Так, остановка электродвигателя – пример единичного события, но ясно, что событие непосредственно связано с ходом роста температуры нагрева его комплектующих элементов [8]. А прогноз температуры есть прогнозирование случайного процесса. Возможно оценить также и существующую постоянную времени износа оборудования в очистном забое.

Таким образом, прогноз единичных событий, которые отличаются тем, что уже они бывали в прошлом, не только возможен, но и почти не отличается от прогноза непрерывных случайных процессов. А вот прогнозирование событий, которых еще никогда не было, весьма затруднительно. Некоторая возможность здесь скрыта в исследовании аналогичных явлений. Ведь «смутная» память человека наверняка как раз и представляет собой большой набор аналогов, в чем-то (распознавание образов по законам близости изображений) похожих на ситуацию, относительно которой нужно принять решение в данный момент. Задача часто состоит в выборе и его обосновании подходящего аналога для решения той или иной проблемы.

Как правило, изменения технологических параметров ГШО часто приводят к возникновению аварий. При некоторых видах аварий, например, при обрыве цепи конвейера, при сходе струга с направляющих и т. п., работа по добыче невозможна. При авариях же с механической частью крепи в лаве, при частичной заштыбовке

конвейера можно продолжать работу по добыче. Как известно, аварии – это события, повторяющиеся с определенными циклами [5; 7, с. 200]. Есть определенные циклы и периоды, когда события могут повторяться каждые 5-7 лет или каждые 10-12 лет, и их число должно быть одинаковым. Необходимо рассмотреть применение к предсказанию состояний очистного забоя метода прогноза случайных процессов при помощи поиска аналога или нескольких аналогов в предыстории. Формально в качестве исходных данных можно взять выборку наблюдений многомерного процесса в очистном забое, но при условии, что эта выборка достаточно представительна для описания состояний забоя как объекта наблюдения. Поэтому то, что случилось в прошлом, повторяется еще раз, если исходное состояние было аналогичным.

Для прогноза погоды и изменения климата требуется наличие длинной и разнообразной выборки данных при стационарном характере многомерного процесса. Поскольку при прогнозе состояний очистного забоя количество предсказываемых переменных значительно превышает число точек прогноза (лет наблюдений), то целесообразно использовать метод комплексирования прогнозов по нескольким аналогам. Прогнозы не рассчитываются, а берутся из таблицы данных наблюдений. Преимущества этого метода были показаны в работах А. Г. Ивахненко и др., Н. М. Качурина и др., В. Е. Кривоножко и др., В. В. Куприянова и др. при решении задач прогнозирования многомерных процессов в экологических системах [2; 3; 6, с. 46; 7]. Известные алгоритмы экстраполяции, например, метод группового учета аргументов, как правило, успешно прогнозируют лишь небольшое число переменных многомерного процесса.

Точность прогноза каждой переменной, например, очистного забоя, типичных подземных аварий, таких как взрывы, пожары, горные удары, оценивается по величине вариации:

$$\delta_i^2(x_i) = \sum_{k=1}^K (x_{i(k)} - \hat{x}_{i(k)})^2 / (x_{i(k)} - \bar{x}_{i(k)})^2, \quad (1)$$

где $x_{i(k)}$ – фактическое значение i -й переменной; $\hat{x}_{i(k)}$ – прогнозное значение; $\bar{x}_{i(k)}$ – среднее значение (без учета прогнозируемой точки); k – номер года наблюдения.

Если процесс нестационарный, когда часть переменных непрерывно растет или снижается по величине, то, согласно работе «Непараметрические прогнозирующие модели МГУА», величина $\bar{x}_{i(k)}$ принимается равной значению «тренда» на k -шаге прогноза [2]. Числитель в формуле (1) определяет среднюю ошибку прогноза по методу аналогов, а ее знаменатель – среднюю ошибку обычного прогноза по среднему. По сути, в формуле (1) сравниваются эти две ошибки. Поэтому когда прогноз по аналогам позволяет получить более точную информацию, чем прогноз по среднему, он считается оправданным или эффективным. Обычно прогноз каждой переменной считается успешным, если вариация $\delta_{i(k)}^2 \leq 1,0$. Как правило, только часть переменных предсказывается хорошо. Общим показателем успешности предсказания многомерного процесса считается процент или доля переменных τ , (%), для которых $\delta_{i(k)}^2 \leq 1,0$. Именно для максимально возможного увеличения этого процента для всех M переменных при короткой выборке исходных данных, например, горно-производственной деятельности, целесообразно переходить от поиска одного аналога в предыстории к комплексированию прогнозов нескольких аналогов. Кроме того, появляется возможность указать переменные, например, очистного забоя, в качестве предикторов и ранжировать их по эффективности конечного результата прогнозирования при переборе трех аналогов, начиная с одного аналога.

Будем рассматривать комплексирование прогнозов нескольких аналогов с помощью двух подходов и сравнения их по эффективности (успешности) предсказания на примере прогноза параметров ГШО очистного забоя шахты. Первый из них основан на использовании сплайн-функций со степенными коэффициентами по критерию вариации прогноза, а другой – на переборе эвристик (число аналогов, состав множества переменных, степень коэффициентов сплайн-функций) по критерию непротиворечивости или баланса дискретизаций. Последний подход непосредственно вытекает из принципов самоорганизации или массовой селекции. Эти подходы позволят установить не только число успешно прогнозируемых переменных очистного забоя, но и выявить переменные, возможно, не учтенные в данной работе и имеющие «размытый» прогноз, к которым полезнее применить аппарат нечеткой логики Л. Заде.

По первому подходу каждой строке выборки исходных данных соответствует точка как в многомерном пространстве переменных x_i , так и в пространстве прогнозов \hat{x}_i . Первое пространство необходимо для

определения межточечных расстояний, а второе – для аппроксимации прогнозов с помощью сплайн-функций. Для прогноза выбирается выходная точка C пространства x_i и \hat{x}_i , в качестве которой принимается либо последняя по времени точка выборки, либо предпоследняя для оценки вариации прогноза по последней строке. Расстояния от выходной точки C до всех остальных в пространстве x_i используются для определения аналогов, а именно: ближайшая точка A_1 является первым (основным) аналогом; следующая по расстоянию точка A_2 – вторым аналогом и т. д., вплоть до последнего аналога A_N . В пространстве прогнозов каждому аналогу соответствует определенный прогноз \hat{x}_i . Комплексирование представляет собой аппроксимацию прогнозов нескольких аналогов, обычно ближайших к точке C . Число учитываемых аналогов при комплексировании определяется экспертным путем. Для комплексирования будем использовать экстраполяцию пространства прогнозов с помощью сплайн-функций, но при допущении, что в каждой точке этого пространства присутствует значение прогноза, вычисляемое при помощи прогнозов, полученных в соседних точках пространства. В качестве сплайн функций применяется полный полином следующего вида:

$$\hat{x}_{i(C)} = a_0 + a_1 \hat{x}_{i(A_1)} + \dots + a_N \hat{x}_{i(A_N)}, \quad (2)$$

где i – номер переменной [4].

Соотношение (2) соответствует параметрическому заданию многомерной функции, в которой число слагаемых, оценки их коэффициентов могут быть найдены теми или иными алгоритмами. Однако в этом случае не будет учтена близость точек, характеризующих аналоги A_i , к выходной точке в многомерном пространстве прогнозов. Нужно выбрать сплайн-функции так, чтобы различие прогнозов в этих точках уменьшалось. А это ведет к увеличению сходства самих прогнозов на выходе с группой выбранных аналогов. С этой целью вычисляются метрические евклидовы расстояния между точками в пространстве \hat{x}_i :
расстояние от выходной точки C до первого (ближайшего) аналога A_1 :

$$d_1 = [(x_{1(A_1)} - x_{1(C)})^2 + (x_{2(A_1)} - x_{2(C)})^2 + \dots + (x_{M(A_1)} - x_{M(C)})^2]^{1/2}, \quad (3)$$

расстояние от точки C до второго, более удаленного аналога A_2 :

$$d_2 = [(x_{1(A_2)} - x_{1(C)})^2 + (x_{2(A_2)} - x_{2(C)})^2 + \dots + (x_{M(A_2)} - x_{M(C)})^2]^{1/2}, \quad (4)$$

расстояние от точки C до третьего, еще более удаленного аналога A_3 :

$$d_3 = [(x_{1(A_3)} - x_{1(C)})^2 + (x_{2(A_3)} - x_{2(C)})^2 + \dots + (x_{M(A_3)} - x_{M(C)})^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где M – количество предсказываемых переменных.

Метрические расстояния далее используются для формирования следующих сплайн-функций:

– при одном аналоге ($B=1$):

$$\hat{x}_{i(C)} = (\hat{x}_{i(A_1)}), \quad (6)$$

– при учете прогнозов двух аналогов ($B=2$):

$$\hat{x}_{i(C)} = \left(\frac{1}{d_1} \hat{x}_{i(A_1)} + \frac{1}{d_2} \hat{x}_{i(A_2)} \right) \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

– при учете прогнозов трех аналогов ($B=3$):

$$\hat{x}_{i(C)} = \left(\frac{1}{d_1} \hat{x}_{i(A_1)} + \frac{1}{d_2} \hat{x}_{i(A_2)} + \frac{1}{d_3} \hat{x}_{i(A_3)} \right) \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где B – количество учитываемых аналогов; $1 \leq B \leq N$; N – число прогнозных точек [4].

Можно записать выражения для сплайн-функций при учете четырех, пяти и более аналогов. Но практически количество успешно и удовлетворительно прогнозируемых переменных с ростом числа аналогов не только не увеличивается, но даже и снижается. Это показано ниже. Поэтому опустим эти выражения. Укажем на важное обстоятельство, вытекающее из формул (7) и (8), а именно: из (7) следует, что

$$\begin{aligned} \text{при } d_1 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A1)}, \\ \text{при } d_2 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A2)}, \end{aligned} \quad (9)$$

а из (8) видно, что

$$\left. \begin{aligned} \text{при } d_1 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A1)} \\ \text{при } d_2 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A2)} \\ \text{при } d_3 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A3)} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (10)$$

Соотношения (9) и (10) можно считать контрольными для сплайн-функций (6), (7), (8). Их справедливость легко доказывается из (7), (8) с помощью известного правила Лопиталя для раскрытия ситуаций бесконечности.

Данные наблюдений были получены на шахте «Северная» шахтоуправления «Воркутауголь» за 8 лет (с 2005 по 2012 г.). Измерению подлежали 12 переменных ($M = 12$): x_1 – заштыбовка конвейера; x_2 – изгиб конвейера в горизонтальной плоскости; x_3 – доля порывов замковых соединений конвейера; x_4 – доля механических повреждений земника конвейера; x_5 – доля отрывов гидростоек от опор крепи лавы; x_6 – деформация раздвижных кожухов перекрытий крепи лавы; x_7 – доля порывов тяг крепи; x_8 – доля проваливаний оснований крепи; x_9 – доля порывов проушин крепи; x_{10} – доля перекосов секций крепи на сборном штреке; x_{11} – доля перекосов секций крепи на запасном штреке; x_{12} – доля заваливаний секций.

Попробуем выделить из 12 переменных, характеризующих нештатные ситуации с конвейером и крепью лавы, некоторое множество, поддающееся успешному и удовлетворительному прогнозированию при помощи комплексирования прогнозов. Исходные данные рассматривались в качестве координат восьми точек наблюдений в двенадцатимерном пространстве переменных. Они были нормированы по формуле:

$$x_i = (X_i - X_{i \max}) / (X_{i \max} - X_{i \min}). \quad (11)$$

В результате данные были табулированы и представлены выборкой размерности $N \times M$ ($N=8$). Последний (2012 г.) был оставлен для вычисления вариации δ_i^2 (проверка). Тогда выходной будет седьмая точка (2011 г.) 12-мерного пространства. Для вычисления аналога имеем семь точек ($N-1=7$). На основании исходных данных по формулам (3)-(5) были найдены метрические межточечные расстояния от выходной точки C до остальных шести точек и выполнен выбор трех ближайших точек в качестве аналогов. Такими аналогами оказались: A_1 – первая точка, $d_1=1,642$; A_2 – третья точка, $d_2=1,685$; A_3 – четвертая точка, $d_3=1,868$.

Далее путем сдвига номеров точек исходных данных на единицу было найдено пространство прогнозов, аппроксимация которого сплайн-функциями с вычислением значения прогноза в выходной точке и представляет собой комплексирование. Успешность прогноза каждой переменной в этой точке определяется по вариации $\delta^2(x)$. Результаты вычислений показаны в таблице 1, из которой видно, что наибольшее число успешно прогнозируемых переменных достигается при наличии трех аналогов A_1 , A_2 и A_3 . Их семь, в таблице 1 они отмечены знаком «+», а «размытые» прогнозы – знаком «-». Их обычно считают предикторами прогноза. Все переменные можно ранжировать по вариации прогноза и получить следующий ряд:

$$\frac{\delta^2(x) < 1,0}{x_{10}x_7x_{11}x_6x_3x_4x_2} \mid \frac{\delta^2(x) \geq 1,0}{x_9x_{12}x_8x_5x_1}.$$

Видно, что лучшим предиктором является доля перекосов секций крепи на сборном штреке, а худшим – заштыбовка конвейера очистного забоя. По сути метод аналогов позволил выявить эффективный ансамбль предикторов-признаков, не упустив ни одного из них.

Прогноз по трем аналогам на 2012 г. (последний год исходной выборки данных) выполнялся с целью выявления оптимального числа учитываемых аналогов (три аналога) и оптимального ансамбля прогнозируемых переменных (семь переменных) очистного забоя. Чтобы сделать прогноз на следующий, 2013 г., необходимо допустить, что оптимальное число аналогов и ансамбль переменных на последнем шаге выборки остаются без изменения.

Таблица 1

Данные для выбора эффективных прогнозов по критерию вариации $\delta^2(x)(\delta^2(x)<1,0)$

Используемые аналоги	Вариации прогноза												Число успешных прогнозов	$\tau, \%$
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}		
$A_1 = 2005$ г.	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	3	25
$A_1 = 2005$ г. $A_2 = 2007$ г.	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	5	41,7
$A_1 = 2005$ г. $A_2 = 2007$ г. $A_3 = 2008$ г.	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	7	58,3

Составлено авторами по материалам исследования

Аналогами будут данные за 2006, 2008 и 2009 г. С помощью сплайн-функций (6)-(10) удастся найти комплексированные прогнозы на 2013 г. Указанное допущение не требуется, если критерий вариации заменить на критерий баланса дискретизаций BL^2 [3]. Этот критерий требует, чтобы модель, найденная при дискретизации переменных на N -уровней (N – число строк выборки), как можно меньше отличалась от модели, получаемой путем дискретизации на $N/2$ уровней. Частный критерий баланса дискретизаций для каждой i -й переменной равен:

$$b_i^2 = [\hat{x}_i(N) - \hat{x}_i(N/2)]^2, \tag{12}$$

где $\hat{x}_i(N), \hat{x}_i(N/2)$ – прогнозы дискретизированных значений i -й переменной [4].

Общий критерий баланса BL^2 имеет вид:

$$BL^2 = \sum_{i=1}^M b_i^2 \rightarrow \min. \tag{13}$$

Перебору подлежат все варианты использования точек в качестве аналогов (по одной, две, три, и так далее вплоть до учета всех точек (строк) выборки). При этом 12 исходных переменных назначаются экспертами априорно, а показатель степени коэффициентов сплайн-функции принимается на единицу меньше размерности пространства аналогов. При переборе точек ранжирование можно прекратить, как только увеличение числа переменных перестает снижать критерий (13), что означает достижение им минимума. Но к пороговому значению критерия (13) предъявим другие требования. Будем считать прогноз хорошим, если $BL^2 < 0,8$; удовлетворительным, если $0,8 \leq BL^2 < 1,0$; «размытым», если $BL^2 \geq 1,0$. Для этого строятся вспомогательные выборки двух инструментальных переменных $\hat{x}_i(N)$ и $\hat{x}_i(N/2)$, одна из выборок – путем дискретизации данных исходной выборки на восемь уровней, а вторая – дискретизацией на четыре уровня. В отличие от предыдущего случая, в качестве выходной точки можно взять точку номер восемь (данные за 2012 г.), поскольку вариация $\delta_i^2(x)$ не рассчитывается и, поэтому проверочная последовательность не нужна.

По Хэммингу были вычислены метрические межточечные расстояния от выходной точки до всех остальных. Найдено:

$$d_{(8-1)} = |x_1(8) - x_1(1)| + |x_2(8) - x_2(1)| + |x_3(8) - x_3(1)| + \dots + |x_{12}(8) - x_{12}(1)| = 37;$$

$$d_{(8-2)} = 38; d_{(8-3)} = 32; d_{(8-4)} = 33; d_{(8-5)} = 28; d_{(8-6)} = 42; d_{(8-7)} = 41.$$

По мере близости к выходной точке аналогами являются: A_1 – пятая точка, A_2 – третья точка, A_3 – четвертая точка, A_4 – первая точка, A_5 – вторая точка и т. д. Далее выполняется оценка по критерию баланса дискретизаций всех переменных x_i при числе аналогов $B = 3$. Например, прогнозы аналогов на 2013 г. (девятая точка выборки) по первой переменной составили: $\hat{x}_{1(A1)} = 0,125$; $\hat{x}_{1(A2)} = 0,625$; $\hat{x}_{1(A3)} = 0,500$.

Комплексированный прогноз \hat{x}_1 на 2013 г. рассчитывается по формуле (8) при дискретизации на восемь уровней пространства переменных x_i и найденных значениях $d_1 = 1$, $d_2 = 4$, $d_3 = 2$ по первой вспомогательной выборке. Получено, что $\hat{x}_{1(C)} = 0,220$. После дискретизации на восемь уровней пространства переменных и вычисления значений $\hat{x}_{1(A1)}$, $\hat{x}_{1(A2)}$, $\hat{x}_{1(A3)}$ по каждой x_i комплексированные прогнозы остальных переменных на 2013 г. при $B = 3$ оказались следующими:

$$\hat{x}_{2(C)} = 0,502; \hat{x}_{3(C)} = 0,423; \hat{x}_{4(C)} = 0,181; \hat{x}_{5(C)} = 0,310; \hat{x}_{6(C)} = 0,455; \hat{x}_{7(C)} = 0,583; \hat{x}_{8(C)} = 0,829;$$

$$\hat{x}_{9(C)} = 0,831; \hat{x}_{10(C)} = 0,792; \hat{x}_{11(C)} = 0,546; \hat{x}_{12(C)} = 0,352$$

Комплексированный прогноз каждой из 12-ти переменных на 2013 г. при дискретизации на четыре уровня при $B = 3$ составил:

$$\hat{x}_{1(C)} = 0,500; \hat{x}_{2(C)} = 1; \hat{x}_{3(C)} = 0,778; \hat{x}_{4(C)} = 1; \hat{x}_{5(C)} = 1,333; \hat{x}_{6(C)} = 1; \hat{x}_{7(C)} = 0,500; \hat{x}_{8(C)} = 1,500;$$

$$\hat{x}_{9(C)} = 0,750; \hat{x}_{10(C)} = 2; \hat{x}_{11(C)} = 1,184; \hat{x}_{12(C)} = 0,500$$

Частные критерии баланса b_i^2 , характеризующие эффективность каждой переменной и рассчитанные по формуле (11), оказались в пределах от 0,007 для \hat{x}_7 до 1,46 для \hat{x}_{10} . Сформировался ранжированный по b_i^2 ряд предикторов при комплексировании прогнозов трех аналогов:

$$\frac{BL^2 < 0,8}{x_7 \ x_{12} \ x_1 \ x_3 \ x_2 \ x_6 \ x_{11} \ x_8 \ x_4} \cdot \frac{0,8 \leq BL^2 < 1,0}{x_9} \cdot \frac{BL^2 \geq 1,0}{x_5 \ x_{10}}.$$

Ранжированный ряд переменных при комплексировании прогнозов двух аналогов оказался следующим:

$$\frac{BL^2 < 0,8}{x_7 \ x_1 \ x_{12} \ x_3 \ x_4 \ x_6 \ x_2 \ x_5 \ x_{11} \ x_9} \cdot \frac{0,8 \leq BL^2 < 1,0}{-} \cdot \frac{BL^2 \geq 1,0}{x_8 \ x_{10}}.$$

При этом частные критерии баланса уложились в диапазон от 0,0279 для x_7 до 1,460 для x_{10} . По сути прогнозы по двум и трем аналогам совпали, хотя по наибольшему числу успешно прогнозируемых переменных приоритет за двумя аналогами (10 успешных прогнозов против 9) при двух «размытых» прогнозах. Объяснением этого может служить эвристическая сущность параметра B , т. е. он «свободен» при выборе решения. Лучшими предикторами являются доля порывов тег крепи лавы, заштыбовка конвейера и заваливание секций крепи, а худшим – доля перекосов секций крепи на сборном штреке. Результаты расчетов по критерию представлены в таблице 2. Экспериментальный расчет по данной модели проводился за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-11-01353). Сравнивая сформированные ряды с рядом, найденным при помощи критерия вариации прогноза, видим, что разным критериям соответствуют различные ансамбли эффективных предикторов.

Прогнозы на 2013 г., комплексированные по двум аналогам, отобраным по критерию $BL^2 < 0,8$, будут следующие: $\hat{x}_{7(C)} = 0,333$; $\hat{x}_{1(C)} = 0,225$; $\hat{x}_{12(C)} = 0,188$; $\hat{x}_{3(C)} = 0,208$; $\hat{x}_{4(C)} = 0,528$; $\hat{x}_{4(C)} = 0,438$; $\hat{x}_{2(C)} = 0,406$; $\hat{x}_{5(C)} = 0,300$; $\hat{x}_{11(C)} = 0,625$; $\hat{x}_{9(C)} = 0,708$. Преимущество критерия BL^2 в сравнении с критерием вариации очевидно, так как первый из них позволяет сделать прогноз большего числа переменных за пределами исходной выборки данных. И даже в этом случае он более точен.

Таблица 2

Данные для выбора ансамбля эффективных прогнозов по критерию баланса дискретизаций при прогнозе на 2013 г.

Используемые аналоги	Критерий баланса дискретизаций												Число успешных прогнозов	τ, %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}		
$A_1 = 2009$ г.	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	5	41,7
$A_1 = 2009$ г. $A_2 = 2007$ г.	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	10	83,3
$A_1 = 2009$ г. $A_2 = 2007$ г. $A_3 = 2008$ г.	+	+	+	+	-	+	+	+	*	-	+	+	9	75

Составлено авторами по материалам исследования

Описанный подход можно применить для краткосрочного предсказания таких типичных аварий в шахтах, как взрывы, пожары, горные удары, затопления горных выработок. Возможно, при подобных авариях придется столкнуться с прогнозированием нестационарных многомерных процессов при наличии трендов, когда многие переменные будут непрерывно увеличиваться или уменьшаться, а это затруднит поиск аналогов. Выделив тренд одним из известных способов, изложенный подход можно использовать для прогноза отклонений от тренда. Очевидно, что та или иная статистика по указанным авариям существует и аналоги могут быть определены. Вопрос лишь в том, сколько их потребуется. Для пошагового прогнозирования нештатных ситуаций важен переход к квазистационарности наблюдаемых процессов, а количество успешно прогнозируемых переменных остается общим показателем эффективности любого процесса. Расчеты можно вести по приведенным выше критериям прогноза.

Повторением процедуры пошагового прогнозирования можно добиться долгосрочного прогноза на любой угольной шахте с упреждением до нескольких шагов, а при времени прогноза более четырех шагов (лет) можно применить в качестве меры близости выходной точки к аналогам канонический коэффициент корреляции.

Библиографический список

- Ивахненко, А. Г., Зайченко, Ю. П., Дмитров, В. Д. Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: Советское Радио, 1978. – 280 с.
- Ивахненко, А. Г., Ивахненко, Н. А., Костенко, Ю. В. Непараметрические прогнозирующие модели МГУА//Автоматика. – 1989. – № 3. – С. 3-10.
- Качурин, Н. М., Клишин, В. И., Борщевич, А. М., Качурин, А. Н. Прогноз метановой опасности угольных шахт при интенсивной отработке угольных пластов. – Тула: ТулГУ, 2013. – 219 с.
- Кожевников, Ю. В. Введение в математическую статистику. – Казань: КГТУ, 2013. – 196 с.
- Козырева, Е. Н., Шинкевич, М. В. Разработка рекомендаций по повышению эффективности управления газовыделением на выемочных участках//Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 5. – С. 138-142.
- Кривоножко, В. Е., Форсунд, Ф. Р., Лычев, А. В. Улучшение эффективного фронта в методологии анализа среды функционирования//Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 471. – № 4. – С. 398-402.

7. Куприянов, В. В., Мацкевич, О. А., Бондаренко, И. С. Параметрические и непараметрические модели прогнозирования нештатных ситуаций в подземных горных выработках//Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 3. – С. 200-207.
8. Фролов, Д. Л., Фролова, А. Ю., Бондаренко, И. С. Оптимизация процесса выбора электрооборудования при проектировании строительства промышленных объектов//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 6. – С. 177-182.

References

1. Ivakhnenko A.G., Zaichenko Yu.P., Dmitrov V.D. Prinyatie reshenii na osnove samoorganizatsii [*Decision-making on the basis of self-organization*], Moscow, Sovetskoe radio, 1978, 280 p.
2. Ivakhnenko A. G., Ivakhnenko N. A., Kostenko Yu. V. Neparаметрические прогнозирующие модели MGUA [*Nonparametric predictive models of GMDH*], Avtomatika [*Avtomatika*], 1989, I. 3. pp. 3-10.
3. Kachurin N. M., Klishin V. I., Borshchevich A. M., Kachurin A. N. Prognoz metanovoi opasnosti ugol'nykh shakht pri intensivnoi otrabotke ugol'nykh plastov [*Forecast of methane hazard of coal mines with intensive mining of coal seams*], Tula, TulGU [*Tula State University*], 2013, 219 p.
4. Kozhevnikov Yu. V. Vvedenie v matematicheskuyu statistiku [*Introduction to mathematical statistics*], Kazan, KGTU [*Kazan State Technical University*], 2013, 196 p.
5. Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. Razrabotka rekomendatsii po povysheniyu effektivnosti upravleniya gazovydeleniem na vyemochnykh uchastkakh [*Development of recommendations to improve the efficiency of gas management at the excavation sites*], Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [*Bulletin of the Kuzbass State Technical University*], 2016, I. 5, pp. 138-142.
6. Krivonozhko V. E., Forsund F. R., Lychev A. V. Uluchshenie effektivnogo fronta v metodologii analiza sredy funktsionirovaniya [*Improvement of the effective front in the methodology of functioning environment analysis*], Doklady Akademii Nauk [*Reports of the Academy of Sciences*], 2016, Vol. 471, I. 4, pp. 398-402.
7. Kupriyanov V. V., Matskevich O. A., Bondarenko I. S. Parametricheskie i neparаметрические модели прогнозирования нештатных ситуаций в подземных горных выработках [*Parametric and nonparametric models for predicting off-normal situations in underground mines*], Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [*Mining Information Analytical Bulletin*], 2018, I. 3, pp. 200-207.
8. Frolov D. L., Frolova A. Yu., Bondarenko I. S. Optimizatsiya protsessa vybora elektrooborudovaniya pri proektirovanii stroitel'stva promyshlennykh ob'ektov [*Optimization of the process of choosing electrical equipment when designing the construction of industrial facilities*], Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [*Mining Information Analytical Bulletin*], 2017, I. 6, pp. 177-182.