

УДК 51-74

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА

Статья поступила в редакцию 20.09.2015 г., в окончательном варианте 5.11.2015 г.

Кузенков Антон Николаевич, аспирант, Мордовский государственный университет, 430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39, e-mail: kosmodila@yandex.ru

Выполнен анализ применимости классификатора данных для разработанной подсистемы контроля качества (КК) с использованием контрольных карт Шухарта (ККШ). Для осуществления эффективной классификации критических ситуаций обоснована целесообразность применения метода опорных векторов – support vector machine (SVM). Накоплена база возможных решений для особых случаев, соответствующих выходу показателей процесса производства цемента за контрольные пределы. Для программной реализации метода опорных векторов применена библиотека LIBSVM. Подробно описаны процедуры по подготовке накопленных данных для обучения моделей SVM. Подобраны оптимальные параметры ядер созданных моделей, обеспечивающие точность классификации. Созданы модели SVM для всех контролируемых параметров. Разработан человеко-машинный интерфейс отображения предлагаемых эффективных решений по предотвращению критических ситуаций, предназначенный для оператора.

Ключевые слова: контрольные карты Шухарта, помол цемента, статистическая управляемость, база знаний, контроль качества, машина опорных векторов, классификация, кросс-валидация

IDENTIFICATION OF CRITICAL SITUATIONS IN CEMENT PRODUCTION CYCLE

Kuzenkov Anton N., post-graduate student, Mordovia State University, 39 B. Khmel'nitskiy St., Saransk, 430005, Russian Federation, e-mail: kosmodila@yandex.ru

Author made the analysis of the classifier data for the developed system of quality control (QC) based on Shewhart control charts. For implement an effective classification of critical situations, we justified target-conformity application of support vector. We accumulated the base of possible solutions in special cases when process of cement production goes out from control limits. For pro-programmatic implementation of support vector, we used library application LIBSVM. We described procedures for the preparation of the accumulated data for training models of SVM. We determined optimal parameters of created models nuclei to ensure accurate classification. We created SVM models for all monitored parameters. We created HMI display effective solutions to prevent critical situations for the operator.

Keywords: Shewhart control charts, grinding of cement, statistical controllability, knowledge base, quality control, support vector machine, classification, cross-validation

Качество производимого цемента во многом определяет место и роль предприятия-производителя на современном рынке строительных материалов. Поэтому внедрение в АСУ цементного производства подсистем контроля качества является актуальной задачей. Для ее реализации необходимо решить две взаимосвязанные подзадачи. Первая – распознавание (выявление) критических ситуаций, вызвавших нарушение в технологическом процессе (ТП). Вторая – собственно идентификация критической ситуации – для последующего исправления возможных отклонений в ТП. Теоретическим вопросам обеспечения качества продукции посвящено достаточно много работ, Однако практические вопросы их использования для сферы цементного производства остаются раскрытыми недостаточно полно. По-

этому в данной статье сделана попытка комплексно исследовать специфику применения методов управления качеством при производстве цемента.

Общая характеристика использованных методических подходов. Технологический процесс производства цемента можно разделить на несколько этапов. На первом этапе добывается сырье для производства цемента и дробится в сырьевых мельницах для подготовки к следующему этапу. На втором этапе полученная сырьевая смесь поступает в цементные печи, где происходит процесс обжига. На выходе печей получается так называемый клинкер, который на следующем этапе отправляется вместе с другими добавками в цех помола. После прохождения цементных мельниц получается готовый продукт – портландцемент [6]. Именно процесс помола цемента является наиболее важным с точки зрения контроля качества. Технологическая схема (рис. 1) иллюстрирует ТП помола цемента.

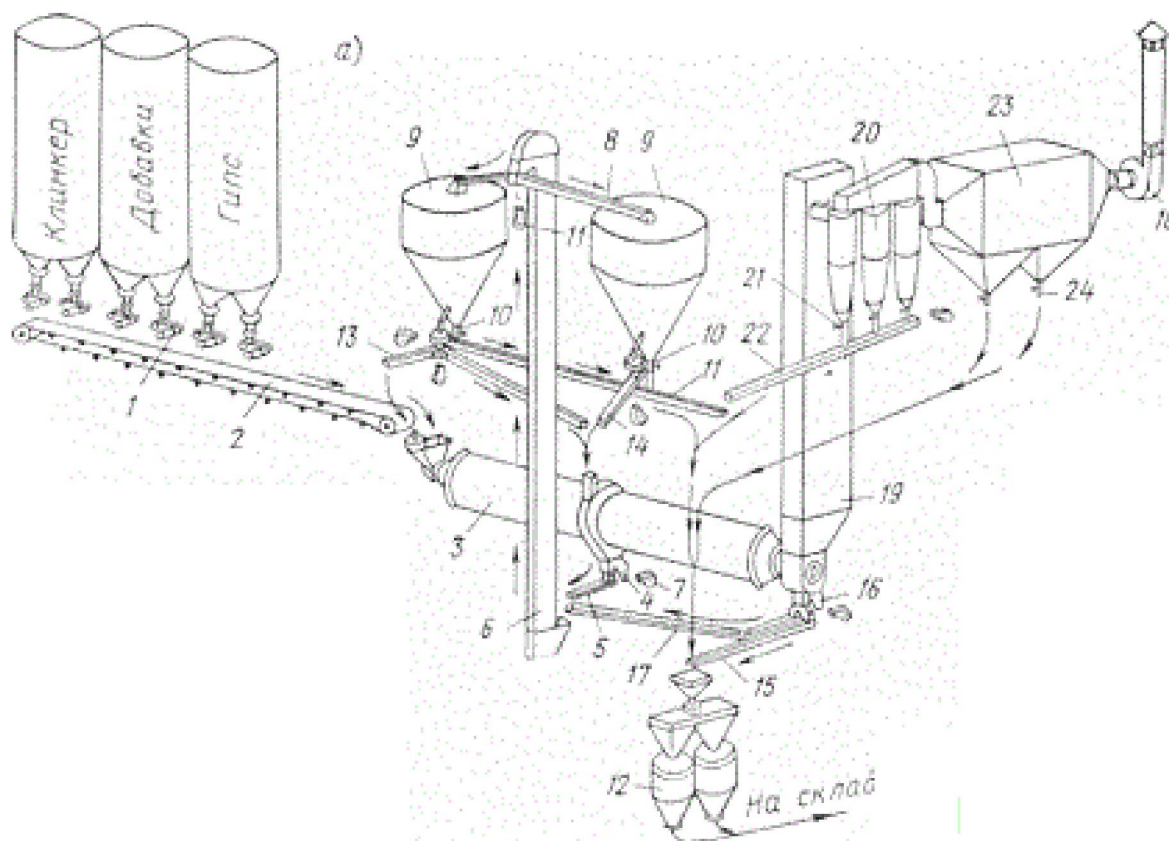


Рис. 1. Технологическая схема помола клинкера, гипса и добавок:

- 1 – дозаторы; 2 – ленточный транспортер; 3 – мельница; 6, 11, 17, 22 – аэрожелоба; 8 – фильтр сжатого воздуха; 9 – сепараторы; 11 – рукавный фильтр; 12 – силосы; 16 – камерный насос; 18 – вентилятор; 19 – аспирационная шахта; 20 – циклоны; 23 – электрофильтр

Клинкер вместе с добавками транспортируется в шаровую цементную мельницу, заполненную металлическими мелющими телами. После прохождения мельницы материал проходит через вращающиеся сепараторы, где осуществляется отбор мелких фракций полученного цемента (крупные фракции отправляются на повторный помол в цементную мельницу). В процессе помола мельница аспирируется с целью устранения пыления, удаления тепла и мельчайших фракций материала. Аспирация осуществляется от специальной установки, состоящей из вентилятора, рукавного фильтра или электрофильтра и осадительных циклонов (или аспирационной шахты). Аспирационная шахта-воздуховод системы подклю-

частся к верхнему фланцу приемной камеры, в результате чего вся мельница находится под разрежением. Воздух засасывается через загрузочную камеру. Именно за счет этого воздушного потока фракции цемента перемещаются по цементной мельнице, а затем по аэрожелобам в силосы [8].

Контроль за процессом помола цемента осуществляется в специальном помещении, оборудованном несколькими мониторами, на которые выводятся мнемосхемы технологического производства. Оператор способен оказывать управляющие воздействия практически на любой этап процесса помола цемента. Он регулирует дозацию клинкера и добавок, частоту вращения ротора сепаратора, обороты вентилятора аспирационной системы (тем самым может изменять разреженность воздуха во всей системе помола). Однако в силу загруженности большим объемом информации с экранов оператор не всегда способен оперативно реагировать на критические ситуации в процессе помола, и в ряде случаев не может предвидеть возникновение таких ситуаций.

Для решения первой из задач, указанных во введении (распознавание критических ситуаций), был выбран хорошо зарекомендовавший себя на практике метод на основе контрольных карт Шухарта (ККШ) [3, 13]. Использование ККШ в составе АСУ ТП может обеспечить выявление изменений в ТП (в том числе выход процесса за пределы статистической управляемости) еще до того, как он достигнет аварийного состояния [9].

В [7] описывается экспериментальное внедрение подсистемы мониторинга и идентификации критических ситуаций в ТП на основе контрольных данных в ОАО «Мордовцемент». Для мониторинга были выбраны шесть характеристик.

1. Удельная поверхность цемента (на единицу веса).
2. Тонкость помола цемента, при просеивании через сито №008 (измеряется процент оставшегося материала на сите от общей массы просеиваемой пробы).
3. Массовая доля в процентах ангидрида серной кислоты в цементе.
4. Массовая доля опоки в цементе.
5. Массовая доля оксида кальция в цементе.
6. Процентное содержание влаги в цементе.

Для всех этих параметров согласно ГОСТ [4] существуют допустимые пределы, выход за которые говорит о наличии брака в произведенном цементе.

В результате исследования была разработана подсистема АСУ [7], отображающая ККШ в реальном времени. При помощи данной подсистемы оператор может отслеживать графики изменения во времени величин, определяющих качество цемента и в зависимости от отображаемой информации выполнять действия, которые занесены в диаграмму вариантов использования. Существует несколько правил для выявления потери статистической управляемости. Однако для практического применения ККШ достаточно использование первых четырех правил – это позволяет снизить вероятность ложных срабатываний [9]. На языке «С» был реализован скрипт, который следит за «срабатыванием» (выполнением) этих четырех правил. Они включают в себя следующее:

- правило 1 – выход одной точки, соответствующей показателю ТП, за трехсигмовые пределы;
- правило 2 – выход хотя бы двух из трех последовательных по времени точек, лежащих по одну сторону от центральной линии, за двухсигмовые пределы (центральная линия соответствует среднему значению показателя);
- правило 3 – выход по меньшей мере четырех из пяти последовательных точек, лежащих по одну сторону от центральной линии, за пределы одной сигмы;
- правило 4 – расположение по меньшей мере восьми последовательных точек по одну сторону от центральной линии [9].

В течение трёх месяцев тестирования подсистемы было обработано около 3000 значений для каждого контролируемого технологического параметра, т.е. всего около 10000 значений. За этот период времени ККШ для всех характеристик параметров выявили потери

статистической управляемости по каждому из указанных выше четырех правил. Все принятые оператором эффективные решения для возвращения ТП в состояние статистической управляемости, а также параметры производственного процесса (температура, скорость вращения сепаратора и т.д.) были занесены в базу знаний – для формирования экспертной оценки по выявлению причин возникновения отклонений от ТП. Таким образом, стало возможным внедрение классификатора, который связывает накопленные данные в базе знаний с особыми событиями, ведущими к потере статистической управляемости. При этом в качестве входных данных используются значения параметров «1–6». Перспективным решением для данной задачи является использование классификатора на основе машины опорных векторов SVM [2].

Основная идея этого метода – перевод исходных векторов контролируемых параметров (соответствующих фактическим наборам показателей для определенного момента времени) в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором между ней и двумя параллельными гиперплоскостями, построенными по обеим ее сторонам (рис. 2).

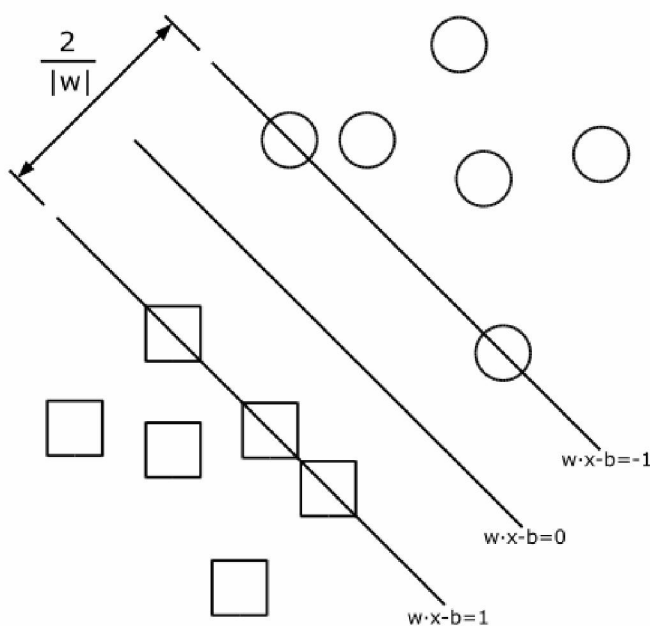


Рис. 2. Геометрическое изображение метода SVM,
 где $\langle w, x \rangle - b = 0$ – разделяющая гиперплоскость; $\langle w, x \rangle - b = 1$ и $\langle w, x \rangle - b = -1$ плоскости принадлежащие к одному и другому классу параметров соответственно

Математически обучающая выборка контролируемых параметров записывается в виде $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m), x_i \in R^n, y_i \in \{-1, 1\}$ [1, 10]. Метод опорных векторов строит классифицирующую функцию F в виде:

$$F(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b), \quad (1)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – скалярное произведение, w – перпендикуляр к разделяющей гиперплоскости, b – равен по модулю расстоянию от гиперплоскости до начала координат. При этом объекты, для которых $F(x) = 1$ попадают в один класс, а объекты с $F(x) = -1$ – в другой. Такая функция используется потому, что любая гиперплоскость может быть задана в виде $\langle w, x \rangle + b = 0$ для некоторых w и b (рис. 2). Необходимо выбрать такие w и b , которые максимизируют расстояние до каждого класса. Можно показать, что данное расстояние равно $1/\|w\|$. Проблема нахождения максимума $1/\|w\|$ эквивалентна проблеме нахождения минимума $\|w\|^2$ и сводится к задаче оптимизации:

$$\begin{cases} \arg \min \|w\|^2 \\ y_i (\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1, i = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (2)$$

Она является стандартной задачей квадратичного программирования и решается аналитически с помощью множителей Лагранжа. При отсутствии линейной делимости классов [1, 12], следует прибегнуть к расширению пространства за счет увеличения его размерности, выбирая для этого отображение $\phi(x)$ векторов x в новое пространство. При этом получается новая функция скалярного произведения:

$$K(x, y) = \phi(x) \cdot \phi(y). \quad (3)$$

Функция $K(x, y)$ называется ядром. Она является базовым параметром для настройки SVM. С математической точки зрения ядром может служить любая положительно определенная симметричная функция двух переменных. Положительная определенность необходима для того, чтобы соответствующая функция Лагранжа в задаче оптимизации была ограничена снизу, т.е. задача оптимизации была бы корректно определена. Точность классификатора зависит, в частности, от выбора ядра. На практике встречаются (используются) следующие типы ядер.

- Полиномиальное: $k(x, x') = (\langle x, x' \rangle + const)^d$.
- Радиальная базисная функция (наиболее распространенный тип ядра):
 $k(x, x') = \exp(-\gamma \|x - x'\|^2)$.
- Гауссова радиальная базисная функция: $k(x, x') = e^{-\|x - x'\|^2 / 2\sigma^2}$.
- Сигмоид: $k(x, x') = \tanh(k \langle x, x' \rangle + c), k > 0, c < 0$.

Программный модуль работы с картами Шухарта, при отсутствии статистической управляемости по конкретному технологическому параметру, выставляет соответствующую этому параметру переменную в единицу. Таким образом, подсистема контроля качества помола цемента позволяет выявить, для какой технологической характеристики имел место особый случай. После этого осуществляется применение машины SVM. Она сначала распознает, по какому из четырех правил была потеряна статистическая управляемость, т.е. относит случай к одному из четырех классов.

На втором этапе SVM определит по верхней или нижней границе (пределу) произошел выход показателя (параметра) процесса за пределы статистической управляемости, т.е. отделит один класс от другого. Диаграмма, показанная на рисунке 3, иллюстрирует процесс классификации для каждого технологического параметра.

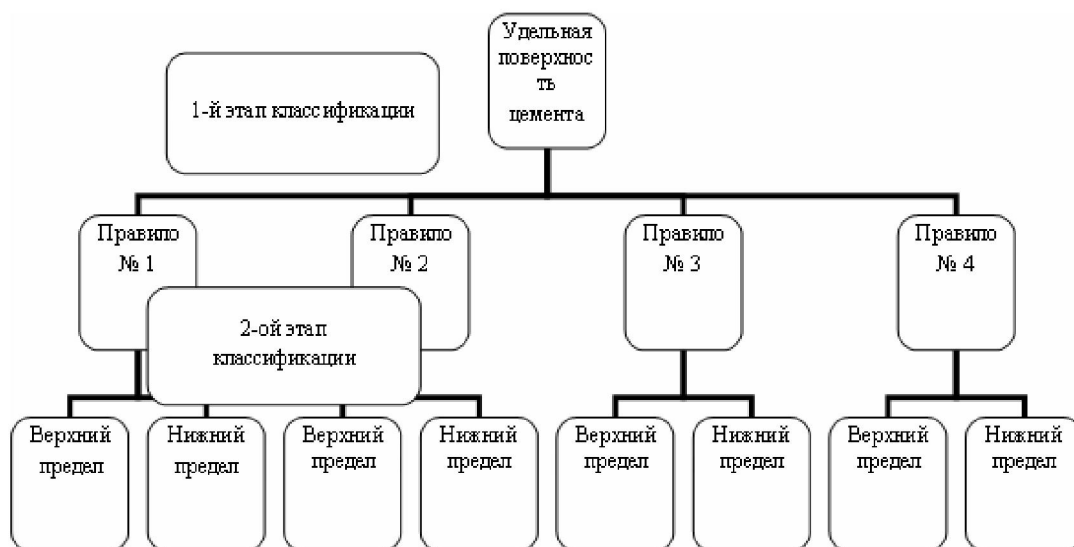


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая процесс использования классификатора на примере первого параметра ТП

Алгоритмическая и программная реализация предложенного метода. В качестве инструмента программной реализации данного метода было принято решение использовать свободно распространяемую библиотеку LIBSVM [11]. Для достижения наиболее эффективной классификации необходимо выполнить действия для подготовки наборов данных и поиска лучшего ядра для них, а именно сделать следующее.

- Преобразовать числовые данные, соответствующие выходу ТП за пределы статистической управляемости, к формату информационной системы, использующей SVM.
 - Провести шкалирование данных в диапазоне от 0 до 1 [11].
 - Использовать ядро RBF: $k(x, x') = \exp(-\gamma \|x - x'\|^2)$.
 - Использовать перекрестную проверку для поиска наилучших параметров C и γ .
- Константа « C » является управляющим параметром метода и позволяет находить компромисс между максимизацией расстояния между двумя гиперплоскостями и минимизацией суммарной ошибки.
- Использовать найденные значения C и γ для обучения модели с целью получения классификатора для конкретного технологического параметра.
 - Провести проверку полученного классификатора на тестовом примере.

Все накопленные данные о выходе процесса из состояния статистической управляемости были приведены к формату LIBSVM и прошкалированы в диапазоне от 0 до 1 – для обеспечения более точного обучения моделей (рис. 3).

1	1:0.3471	6:0.3321	17:0.3400	21:0.3465
2	2:0.3472	10:0.3521	18:0.3626	24:0.3621
3	3:0.3645	6:0.3678	17:0.3691	31:0.3699
4	2:0.3934	17:0.3865	22:0.3878	36:0.3812

Рис. 3. Фрагмент данных для обучения модели SVM

Формат данных для LIBSVM представляет собой строку вида: <label> <index>: <value>. Параметр <label> характеризует класс, к которому относятся следующие за ним значения. На первом этапе классификации требуется выявить, к какому из четырех правил потери статистической управляемости относится конкретный особый случай. Поэтому в тренировочном (обучающем) файле должны содержаться значения для четырех классов. Следует отметить, что при возникновении потери статистической управляемости по нескольким правилам одновременно, высший приоритет имеет правило № 1, а низший – правило № 4. Пара <index>: <value> дает характеристику значения контролируемого параметра. <index> – это целое число, начинающееся с «1» и увеличивающееся с каждым шагом. Параметр <value> – действительное число, отражающее значение выбранной характеристики, отшкалированное в диапазоне от «0» до «1».

При использовании ядра RBF осуществляется подбор как минимум двух коэффициентов – коэффициента регуляризации «C» и параметра ядра « γ ». Поскольку априорно оценить оптимальное значение этих параметров математическими методами невозможно, то на практике прибегают к эмпирической процедуре – перекрестной проверке (cross-validation или кросс-валидация). Суть данной процедуры заключается в следующем [11, 12].

(1). Задается диапазон, в пределах которого будут меняться значения параметров «C» и « γ » и шаг дискретизации для него. В результате получается «сетка», узлы которой задают набор пар значений «C» и « γ », среди которых необходимо выбрать оптимальную.

(2). Для каждой пары значений «C» и « γ » обучающая выборка разделяется на n частей. Одна из частей используется для обучения при данных значениях «C» и « γ », а другая часть – для тестирования. Данная процедура повторяется n раз (для получения более точного результата). В итоге каждая из n частей используется для тестирования; затем полученные значения усредняются. Процедура повторяется для всех значений сочетаний параметров «C» и « γ ». Иногда вначале проводят кросс-валидацию с крупным шагом изменения «C» и « γ » для предварительной локализации лучшего решения. Затем в том промежутке (на том подинтервале), где были достигнуты наилучшие результаты, проводят кросс-валидацию еще раз, но с меньшим шагом.

Недостатком данного способа подбора параметров является большая вычислительная сложность и, как следствие, долгое время выполнения.

После проведения перекрестной проверки для каждой модели классификатора с помощью библиотеки LIBSVM были найдены наилучшие параметры «C» и « γ » для каждого случая. В рамках машинного обучения вводятся четыре статистические метрики для оценки качества работы классификатора [14, 15].

Все образцы, для которых классификатор выдал ответ, можно разделить на четыре группы.

1. True positive – положительные результаты, верно найденные (определенные) классификатором как положительные.

2. False positive – отрицательные результаты, неверно найденные (определенные) классификатором как положительные.

3. True negative – отрицательные результаты, верно определенные классификатором как отрицательные.

4. False negative – положительные результаты, неверно найденные (определенные) классификатором как отрицательные.

На основе этих четырех статистических метрик библиотека LIBSVM выделяет метрику Accuracy = (true positive + true negative) / (true positive + false negative + false positive + true negative). В содержательном плане это соответствует доле (от «1») правильных ответов классификатора среди всех ответов. В ходе проверки обученных моделей SVM на тестовых данных этот показатель не опускался ниже 96, 875 %.

В таблице 1 представлены исходные данные модели и результаты использования SVM для технологической характеристики (показателя) «Удельная поверхность цемента».

В процессе помола цемента в случае потери статистической управляемости по какому либо технологическому параметру подсистема извлекает решение из базы знаний (сформированной на основе мнений экспертов в области помола цемента), соответствующее выбору классификатора – такой выбор осуществляется в автоматическом режиме. После этого на дисплее оператора отображается совет по разрешению критической ситуации (рис. 4).

Таблица 1

Параметры SVM для технологической характеристики «Удельная поверхность цемента»

Модель SVM	Параметр «C»	Параметр « γ »	Accurasy, %
Для правила № 1	2,0	2,0	98,194
Для правила № 2	2,0	0,5	97,123
Для правила № 3	128	0,125	96,875
Для правила № 4	8,0	0,003	97,222

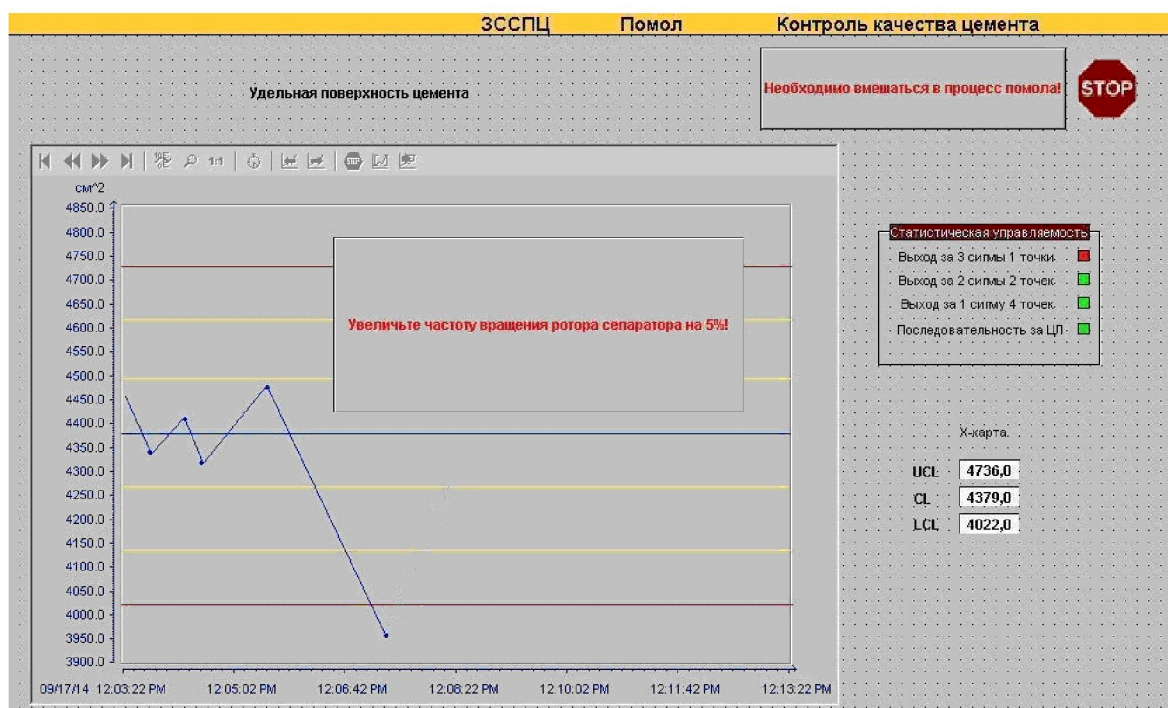


Рис. 4. Отображение совета при особом случае на экране оператора.
 Обозначения: UCL – верхняя граница для ККШ; LCL – нижняя; CL – центральная линия

В таблице 2 представлена база знаний для параметра «удельная поверхность цемента», которая была сформулирована экспертами при возникновении особых случаев потери статистической управляемости в период тестирования системы.

Для остальных пяти параметров ТП также были сформированы подобные базы знаний в отношении принятых эффективных решений (для каждого параметра в базу было внесено по 8 решений). Итак, для всех 6-ти параметров технологического процесса при возникновении особых случаев было определено 48 возможных решений (подклассов). Для каждого из шести технологических параметров было создано по 5 моделей SVM. Первая модель при возникновении критической ситуации определяет, по какому из четырех правил

сработала ККШ. Затем, в зависимости от номера правила выбирается соответствующий ему классификатор (один из четырех). Выбранный классификатор определяет по верхнему или нижнему пределу произошел особый случай и связывает его с соответствующим решением в базе знаний (предлагаемых решений).

Таблица 2

**База знаний (технологических решений) для параметра
«Удельная поверхность цемента»**

Выполняется правило №	Для границы	Решение проблемы
1	Верхняя	Уменьшить частоту вращения ротора сепаратора на 5 %
	Нижняя	Увеличить частоту вращения ротора сепаратора на 5 %
2	Верхняя	Понизить частоту обороты вентилятора аспирационной системы на 3% для понижения разреженности воздуха в системе
	Нижняя	Повысить обороты вентилятора аспирационной системы на 3 % для повышения разреженности воздуха в системе
3	Верхняя	Понизить обороты вентилятора аспирационной системы на 1 %, одновременно уменьшить частоту вращения ротора сепаратора на 1 %
	Нижняя	Повысить обороты вентилятора аспирационной системы на 1 %, одновременно увеличить частоту вращения ротора сепаратора на 1 %
4	Верхняя	Проверить пропускную способность фильтра сепаратора. При отсутствии неполадок понизить обороты вентилятора аспирационной системы на 1 % для понижения разреженности воздуха в системе
	Нижняя	Проверить пропускную способность фильтра сепаратора. При отсутствии неполадок повысить обороты вентилятора аспирационной системы на 1 % для повышения разреженности воздуха в системе

Выводы.

1. В ходе проделанной работы в подсистему контроля качества помола цемента с использованием ККШ был внедрен классификатор на основе метода опорных векторов. 2. Для реализации классификатора использована библиотека LIBSVM. 3. В ходе тестирования классификатора были подобраны оптимальные значения настроек моделей SVM. Это позволило обеспечить долю правильных ответов не ниже 96.875 %. 4. Доработанная с использованием предложенного классификатора подсистема контроля качества показала достаточную точность идентификации критических ситуаций и обеспечила повышение эффективности действий оператора, направленных на предотвращение таких ситуаций.

Список литературы

1. Айвазян С. А. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. — Москва: Финансы и статистика, 1989. — 342 с.
2. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным /В.Н. Вапник — Москва: Наука, 1979. — 217 с.
3. ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. — Москва: Стандартинформ 1999. — 32 с.
4. ГОСТ 30515-97. Цементы. Общие технические условия. - Стандартинформ 1997. — 47 с.
5. Канне М.М. Системы, методы, и инструменты менеджмента качества / М.М. Канне, Б.В. Иванов, В.Н. Корешков, А.Г. Схиртладзе — СПб.: Питер, 2008. — 560 с.
6. Колокольников В.С. Производство цемента. - Москва: Высшая школа, 1970. — 124 с.
7. Кузенков А.Н. Автоматизированная подсистема контроля качества цемента на основе использования карт Шухарта /А.Н. Кузенков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2014. — № 4. — С. 134–144.
8. Теремецкий К.Н. Проектирование цементных и асбестоцементных заводов. Москва: Издательство литературы по строительству, 1964. — 165 с.
9. Уиллер Д. Статистическое управление процессами : пер.с англ. / Д. Уиллер, Д. Чамберс — Москва: Альпина Бизнес Букс, 2009.— 409 с.
10. Bartlett P. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers / P. Bartlett, J. Shawe-Taylor // *Advances in Kernel Methods*. — MIT Press, Cambridge, USA, 1998. — С.43–54.
11. С.-С. Chang and С.-J. Lin. LIBSVM: a library for support vector machines, 2001. Режим доступа: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (дата обращения 15.08.2015), свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.
12. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. A Practical Guide to Support Vector Classification, 2010. Режим доступа: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>, (дата обращения 15.08.2015), свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.
13. Shewart. W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product / W.A. Shewhart – Van Nordstrom, 1931 – 18 с.
14. Wikipedia, Precision and recall. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall, (дата обращения 15.08.2015), свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.
15. Wikipedia, Sensitivity and specificity. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_and_specificity, (дата обращения 15.08.2015), свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.

References

1. Ajvazjan S. A. Prikladnaja statistika: klassifikacija i snizhenie razmernosti. [Applied statistics: classification and reduction of dimension].Moscow: Finansy i statistika, 1989. — 342 p.
2. Vapnik V.N. Vosstanovlenie zavisimostey po empiricheskim dannym [Restoring dependency on empirical data]. Moscow, Nauka, 1979. 447p.
3. GOST R 50779.42-99. Statistical methods. Shewhart control charts. Moscow, Standartinform, 1998. (In Russ.)
4. GOST 30515-97. Cements. General specifications. - Standartinform 1997. (In Russ.)
5. Kanne M.M. Sistemy, metody, i instrumenty menedzhmenta kachestva [Systems, methods, and tools of quality management]. Saint-Petersburg, Piter, 2008. 560 p.
6. Kolokol'nikov V.S. Proizvodstvo cementa.[Cement production] Moscow: Vysshaja shkola, 1970. — 124 s.
7. Kuzenkov A.N. Avtomatizirovannaya podsystema kontrolya kachestva tsementa na osnove ispol'zovaniya kart Shukharta [Automatd subsystem quality control of cement based on the using Shewhart charts]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2014, no. 4, pp. 134–144.
8. Teremeckij K.N. Proektirovanie cementnyh i asbestocementnyh zavodov.[Designing cement and asbestos cement factories] Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1964. — 165 s.
9. Wheeler D. Statisticheskoe upravlenie protsessami [Statistical Process Control]. Moscow, Alpina Business Book, 2009. 409p.

10. Bartlett P. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers. *Advances in Kernel Methods*. MIT Press, Cambridge, USA, 1998. pp 43–54
11. C.-C. Chang and C.-J. Lin. LIBSVM: a library for support vector machines, 2001. Available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (accessed 15 August 2015). (In Russ.)
12. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. A Practical Guide to Support Vector Classification, 2010. Available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>, (accessed 15 August 2015). (In Russ.)
13. Shewart. W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product / W.A. Shewhart – Van Nordstrom, 1931 – 18 с.
14. Wikipedia, Precision and recall. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall, (accessed 15 August 2015). (In Russ.)
15. Wikipedia, Sensitivity and specificity. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_and_specificity, (accessed 15 August 2015). (In Russ.)

УДК 681.586.783 : 537.633

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КОЛОССАЛЬНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ¹

Статья поступила в редакцию 13.11.2015 г., в окончательном варианте 16.11.2015 г.

Карнасюк Владимир Корнильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: vkarasyuk@mail.ru

Смирнов Андрей Михайлович, ведущий инженер, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: sc_lab@bk.ru

Баделин Алексей Геннадьевич, младший научный сотрудник, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: alexey_badelin@mail.ru

В статье рассмотрены особенности построения и функционирования многоэлементных цифровых датчиков магнитного поля для широкого интервала температур на основе керамических манганитов, обладающих колоссальным магнитосопротивлением. Обеспечение достоверности и повторяемости измерений требует учета нелинейных температурных и вольтамперных характеристик манганитов и контактных областей, а также влияния сопутствующих эффектов на измеряемые величины. Это достигается с помощью процедур предварительной автоматической калибровки магниточувствительных элементов, что дает возможность расширить допустимый разброс электромагнитных параметров манганитов и интервал рабочих температур. При этом исключается необходимость термостабилизации датчиков. Описаны конструкция и рабочие характеристики датчика на примере созданного экспериментального образца, а также алгоритмы начальной калибровки и обработки информационных сигналов в рабочем режиме. Рассмотрены перспективы развития «интеллектуальных» матричных систем для анализа неоднородных магнитных полей, в том числе с использованием манганитов новых составов, позволяющих значительно повысить чувствительность датчиков.

Ключевые слова: манганиты, колоссальное магнитосопротивление, температура, магнитное поле, матричный датчик, экспериментальный образец, микропроцессорная обработка, автоматическая калибровка, параметры

¹ Работа частично выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 334).