

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РИСКОВ НЕСООТВЕТСТВИЯ ПРОДУКЦИИ

© 2024 Т.В. Малышева, А.И. Лысенков

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 04.03.2024

Статья посвящена актуальной проблеме совершенствования системы управления качеством продукции промышленных предприятий на основе математической статистики и цифровых технологий. Расширение возможностей решения производственных задач с использованием цифровых двойников и киберфизических систем охватывает в том числе и интеллектуальное прогнозирование проблем качества и рисков возникновения брака. Целью статьи является разработка организационно-технических решений по развитию системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции. Основными методами исследования являются структуризация факторов производства по категориям и функциональным признакам, формализация последовательности операций предиктивной аналитики, математическое описание взаимосвязей между объектами системы управления качеством. Разработка модели предиктивной аналитики осуществлена с использованием регламентирующих документов в сфере управления качеством продукции, технического обслуживания оборудования, автоматизации производства и управления данными, искусственного интеллекта. В статье выделены проблемы внедрения предиктивной аналитики качества, заключающиеся в технической готовности производства: наличии считывающих устройств, цифровизации и автоматизации процессов, синхронизации баз данных и аппаратно-программных средств. Разработана концептуальная структурная модель предиктивной аналитики качества продукции и управления рисками несоответствий, предусматривающая формирование трех баз данных рисков возникновения брака и базы данных готовых предиктивных моделей. Результатом предиктивной аналитики является прогнозирование несоответствий продукции по качеству и возможность изменения настроек производственного процесса для предупреждения брака. Произведено математическое описание процесса предиктивной аналитики с формализацией формульной записи аппроксимации функции предиктивных и зависимой переменной. Визуализирована схема организации системы контроля качества на этапах технологического процесса производства сухого молока с указанием контрольных точек сбора данных и регламентирующей документации. Смоделирована ситуация производства некачественного сухого молока сниженной растворимости и обоснованы производственные причины брака. Материалы исследования могут быть использованы при разработке и реализации программ развития систем управления качеством промышленных предприятий, модернизации автоматизированных систем и программных продуктов управления производством, планировании проектов по ресурсосбережению и сокращению потерь от брака.

Ключевые слова: система управления качеством, предиктивная аналитика, несоответствие продукции, качество сырья, технология производства, аппроксимация функции, качество сухого молока.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-39-47

EDN: QTTCNV

ВВЕДЕНИЕ

Система управления качеством продукции и процессов промышленного предприятия требует постоянного совершенствования в связи с обновлением стандартов и регламентов, развитием подходов к организации производства, прогрессом в сфере информационных и цифровых технологий. В целом для организации систем менеджмента качества российские производства используют ставшие уже классическими

Малышева Татьяна Витальевна, доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления. E-mail: tv_malyшева@mail.ru

Лысенков Антон Ильич, аспирант кафедры логистики и управления. E-mail: lysenkov.rf@gmail.com

и актуальные по-прежнему 14 принципов и концепцию Всеобщего управления качеством Эдвардса Деминга, трилогию качества Джозефа Джурана, концепции Филиппа Кросби «Качество бесплатно» и «Ноль дефектов» и пр. [1,2,3]. Несомненно, перечисленные теории являются фундаментальной основой менеджмента качества, реализация которых будет более эффективной с использованием больших данных о производственном процессе и их статистическим анализом. Здесь следует упомянуть об этапах развития или эволюции систем управления качеством, где в рамках концепции производства Индустрия 4.0 возникает понятие Качество 4.0, как составной элемент промышленной революции. Цифровые технологии на основе умных

алгоритмов и процедур направлены на управление качеством в производственной цепи, в том числе на прогнозирование проблем качества и рисков возникновения брака [4]. Расширение функционала цифровых двойников производства с возможностью управления качеством продукции на основе полных киберфизических систем настройки параметров производства дополняет технологии Индустрии 4.0 до уровня Индустрии 5.0.

Качество продукции и процессов представляет собой сложную производственную категорию, в связи с чем является непростым объектом для управления. В последнее время в управлении производством активное развитие получила предиктивная или предсказывающая аналитика, представляющая собой набор методов анализа данных об объекте для предсказаний его состояния в будущем с использованием математических моделей, методов интеллектуального анализа данных, машинного обучения и пр. Первые шаги применения предиктивной аналитики на отечественных производствах отмечаются в сфере диагностики состояния производственного оборудования для целей предсказания отказов машин и аппаратов, снижение стоимости ремонта, уменьшение времени простоя, и, в целом совершенствования техобслуживания и ремонта [5].

В сфере управления качеством предиктивная аналитика может решать вопросы предсказания выпуска брака или продукции несоответствующего качества и быть направлена на управление рисками несоответствий. Особенностью предиктивной аналитики является предсказывание качества продукции в режиме онлайн, т.е. на этапе, когда продукция уже находится в производственном процессе. В этой связи, целью статьи является разработка организационно-технических решений по развитию системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции.

МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОСНОВА

Для разработки структурной модели предиктивной аналитики качества продукции и управления рисками несоответствий использованы методы структуризации факторов производства по категориям и функциональным признакам, формализация последовательности операций предиктивной аналитики, описание взаимосвязей между объектами системы. Для передачи сущности предиктивной аналитики представлена математическая запись зависимости риска производства несоответствующей продукции от критических параметров производственного процесса. В обобщенном виде

функциональная зависимость имеет вид:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3), \quad (1)$$

где Y – качество продукции расчетное (прогнозируемое);

X_1 – риск брака ввиду некачественного сырья;

X_2 – риск брака ввиду нестабильной работы оборудования;

X_3 – риск брака ввиду нарушения технологического режима производства продукции.

Качество продукции Y может быть представлено множеством параметров – органолептических и физико-химических характеристик производимого продукта:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, \quad (2)$$

где y_1, y_2, \dots, y_n – множество параметров качества производимого продукта.

В свою очередь, каждая группа рисков включает подмножество параметров производственного процесса, являющихся критическими при прогнозировании качества продукции:

$$\begin{aligned} X_1 &= \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}\} \\ X_2 &= \{x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}\} \\ X_3 &= \{x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n}\} \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ – множество параметров качества исходного сырья;

$x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}$ – множество параметров состояния производственного оборудования;

$x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n}$ – множество параметров технологического режима производства продукции.

Таким образом, зависимость риска производства несоответствующей продукции от критических параметров производственного процесса имеет вид:

$$\begin{aligned} Y &= \{y_1, y_2, \dots, y_n\} = f(X_1, X_2, X_3) = \\ &= f \left(\begin{pmatrix} x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n} \\ x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n} \\ x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n} \end{pmatrix} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Ввиду большого многообразия технологий организации производства количество аргументов функции нами не фиксировано, а запись формульного выражения представлена произвольно. Аппроксимация функций может быть выполнена различными способами с учетом преимуществ и ограничений для конкретной задачи, и доступности данных о производственном процессе (линейная, нелинейная, полиномиальная, интерполяционная аппроксимация) [6].

Формализация сущности и последовательности операций предиктивной аналитики качества осуществлена с использованием регламентирующих документов в сфере управления качеством продукции, технического обслуживания оборудования, автоматизации производства и управления данными, искусственного интеллекта: ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ 15467-79, ГОСТ 18322-2016, ГОСТ Р ИСО 10303-242-2019, ГОСТ Р 59277-2020 и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Несомненно, причинами производственного брака может быть множество факторов – отклонений производственных операций от нормативных режимов: несоответствующее нормативам сырье, нестабильная работа оборудования, нарушение технологии производства, человеческий фактор и пр. Соответственно, для прогноза брака необходима практически полная оцифровка производственного процесса, т.е. описание процедур технологического маршрута числовыми характеристиками. Фактически, все данные для настройки предиктивных моделей в части управления качеством продукции на производстве существуют, но на практике они не всегда оцифрованы или могут находиться в раз-

личных закрытых локальных базах данных [7, 8]. Таким образом, для умной диагностики брака необходима систематизация всех действий, формализация процессов, инвентаризация ресурсов, выбор математического аппарата и методов аппроксимации зависимостей данных.

Использование методов предиктивной аналитики в рамках организации системы управления качеством Качество 4.0 требует разработки концептуальной структурной модели (рис. 1). Представленная модель является универсальной и не содержит специфики производимой продукции.

Полагаем, что возможные факторы риска возникновения производственного брака можно представить в виде трех основных групп:

1) качество сырья и материалов для произ-

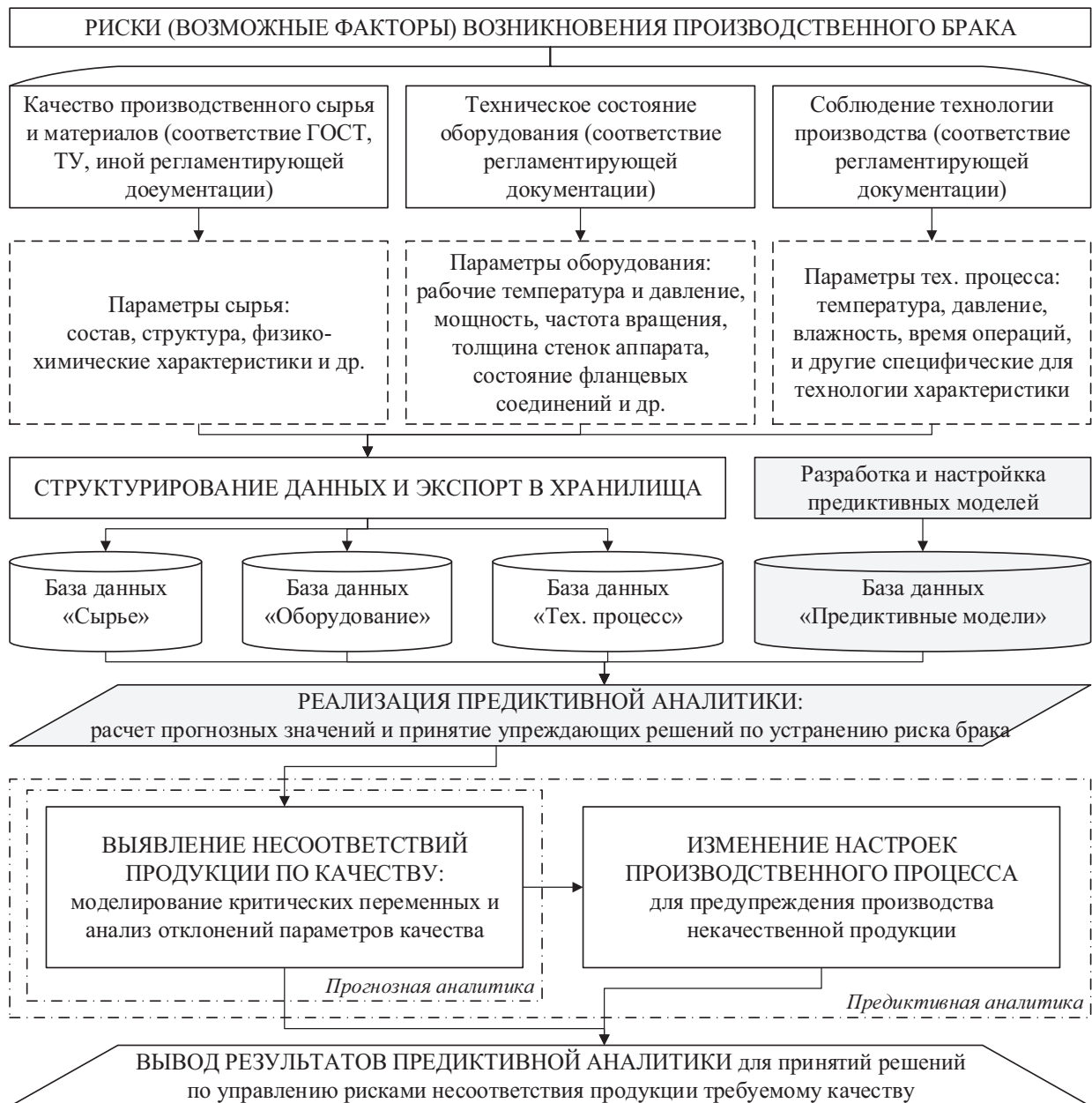


Рис. 1. Структурная модель предиктивной аналитики качества продукции и управления рисками несоответствий

водства или их соответствие регламентирующей документации (ГОСТ, ТУ и пр.);

2) техническое состояние и наличие отклонений в работе оборудования, используемого на всех этапах производства продукции;

3) выполнение установленной регламентирующей документацией технологии производства продукции.

Соответственно, по каждой группе рисков в ручном или автоматизированном режиме аккумулируются значения критических показателей, характеризующих возможные факторы риска производства брака, и в дальнейшем данные обрабатываются, структурируются и экспортируются в три хранилища. В привязке к данным о рисках бракованной продукции разрабатываются алгоритмы и модели, которые образуют четвертую базу данных «Предиктивные модели» и позволяют выявить информативные корреляции между критическими переменными, обнаружить аномалии и предсказать будущие результаты и тенденции качества продукции.

Таким образом, предиктивная аналитика начинается со сбора, обработки, форматирования и анализа больших объемов данных, собранных в процессе производства. Затем производится непосредственно предиктивный анализ данных с применением статистических алгоритмов и различных методов машинного обучения, чтобы получить полезную информацию для принятия решений в части управления рисками.

Предсказание возможных несоответствий продукции требуемому качеству позволяет устранить первопричины брака до того, как непосредственно возникнут какие-либо проблемы с качеством.

Говоря о внедрении интеллектуальных технологий управления качеством продукции, следует обозначить важность наличия на производствах соответствующих диагностических приборов и аппаратно-программных средств, необходимых для реализации предиктивной аналитики. Кроме того, зачастую существует проблема несовместимости автоматизированных систем управления различными подсистемами производства на программном и аппаратном уровнях [9,10]. В этой связи внедрению предиктивной аналитики предшествует решение задачи обеспечения производства общезаводской программной платформой для интеграции баз данных в единое хранилище, статистической обработки массивов с использованием математического аппарата принятия решений. Подобные производственные цифровые платформы являются связующим звеном между датчиками полевого уровня и АСУП на основе предиктивных моделей.

Разработка предиктивных моделей качества возможна только после детального изучения технологии производства продукции, количественных и качественных характеристик всей цепи процессов. К примеру, для организации



Рис. 2. Организация системы контроля качества на этапах технологического процесса производства сухого молока

системы контроля качества в производстве сухого молока необходимо формализовать процессы и определить контрольные точки сбора данных. На рисунке 2 с использованием материалов [11,12] визуализирован технологический процесс производства цельного сухого молока, включающий пять основных подпроцессов согласно технологии изготовления продукта.

Качество производимого в России сухого молока регулируется рядом технических регламентов о безопасности молочной продукции и ее упаковки, требованиях к вспомогательным ингредиентам, правилах маркировки (ТС 005/2011, ТР ТС 021/2011, ТР ТС 033/2013), а также межгосударственным стандартом ГОСТ 33629-2015 «Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия». Полагаем, что система контроля качества сухого молока на предприятии должна состоять из входного, межоперационного и выходного контроля. Каждый этап контроля качества характеризуется рядом параметров, образующих функциональную зависимость предиктивной аналитики (4). В таблице 1 представлены нормативные параметры качества производства сухого молока: предиктивные переменные из группы рисков X_1 (параметры качества сырья – коровьего молока) и X_3 (параметры технологического процесса), а также прогностические переменные (Y) – параметры качества сухого молока. Факторы риска группы X_2 , касающиеся технического состояния производственного оборудования (сублимационные сушилки, скороморозильный аппарат, насосы, мельница др.) не представлены ввиду многообразия способов сублимации и средств производства.

В ходе производственного процесса любое отклонение фактических значений параметров от нормативных ($\{x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}\}, \{x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}\}$) может привести к нарушению качества конечного продукта – сухого молока ($\{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7\}$). К примеру, одним из пороков сухого молока является его пониженная растворимость, обусловленная несоответствием продукта нормативам по массовой доле влаги (y_1) и массовой доле жира (y_2). Несоответствия могут возникать ввиду использования в производстве сырья (коровьего молока) с превышающей норму жирностью ($x_{12} > 3,5\%$). Излишний жир выходит на поверхность сухих частиц и снижает их смачиваемость. Повышенная влажность готового продукта может быть связана с нарушением технологии сублимации по параметрам температуры (x_{31}, x_{32}) и продолжительности сушки (x_{34}). Соответственно, на основе корреляции данных параметров производится разработка и настройка предиктивной модели качества сухого молока.

Как было показано выше, аппроксимация функциональных зависимостей может быть

выполнена различными методами математической статистики с учетом конкретной задачи предиктивной аналитики и этапа производства. Для примера представим использование базового алгоритма определения взаимосвязей – метода множественной линейной регрессии для предсказания нарушения массовой доли влаги сухого молока на этапе сублимационной сушки. В таблице 2 приведены результаты испытаний образцов продукта на соответствие качества после сушки.

Прогнозируемой переменной регрессионной модели выступает показатель массовой доли влаги в % (y_1), а предикторными переменными являются:

- температура сублимации в сушильной камере, °C (x_{32});
- продолжительность сушки, часов (x_{34}).

Диаграммы рассеяния, визуализирующие зависимость между показателем влажности сухого молока и предикторами, представлены на рисунке 3. Наблюдается отрицательная зависимость по парным переменным, что характеризует сверхнормативное увеличение влажности продукта при несоблюдении температуры и продолжительности сушки.

Регрессионная модель предиктивной аналитики соответствия влажности сухого молока требуемому качеству будет иметь вид:

$$y_1 = 7,345 - 0,116 x_{32} - 0,034 x_{34}, \quad (5)$$

а оценка значимости параметров модели подтверждается адекватным для регрессии по методу наименьших квадратов коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$, вероятности $P < 0,05$ и критерия Фишера $F < 0,05$.

Полученная модель позволяет предсказывать значение массовой доли влаги сухого молока при различных технологических параметрах сушки. В таблице 3 смоделированы различные сочетания температуры и продолжительности сушки молока в сушильной камере. Используя построенную модель предиктивной аналитики, спрогнозированы значения массовой доли влаги молока и показано наличие или отсутствие риска производства бракованной продукции.

Представленный пример предиктивной модели на основе метода линейной регрессии является базовым подходом к предсказанию одного параметра качества продукции в условиях относительной определенности технологического процесса. Полагаем, что при прогнозировании рисков брака по множеству параметров качества, на различных этапах производства, по множеству технологических параметров и параметров качества исходного сырья потребуются разработка системы взаимозависимых моделей и алгоритмов, что, несомненно, представляет интерес для дальнейшего исследования.

Таблица 1. Нормативные параметры качества производства сухого молока для разработки предиктивной модели

Переменные предиктивной модели	Наименование параметра качества продукта и процесса	Значение параметра
Качество продукции (Y)	Параметры качества цельного сухого молока	
y_1	Массовая доля влаги, %, не более	4,0
y_2	Массовая доля жира, %	[26,0; 41,9]
y_3	Массовая доля белка в сухом обезжиренном молочном остатке, %, не менее	34,0
y_4	Массовая доля молочного сахара (лактозы), %	[40,0; 31,5]
y_5	Индекс растворимости, см ³ сырого осадка, не более	0,2
y_6	Группа чистоты, не ниже	1
y_7	Кислотность, °Т (% молочной кислоты)	[14; 21] ([0,126; 0,189])
Качество сырья (X_1)	Параметры качества сырья – коровьего молока 1 сорта	
x_{11}	Температура, °С	[0; 10]
x_{12}	Массовая доля жира, %	3,5
x_{13}	Плотность, г/см ³	1,027
x_{14}	Кислотность, °Т	16-18
x_{15}	Группа чистоты, не ниже	1
x_{16}	Бактериальное обсеменение, тыс. / мл	<300
x_{17}	Содержание соматических клеток, тыс. / мл	500
Технология производства (X_3)	Технологические параметры сушки молока на сублимационной сушилке	
x_{31}	Температура замораживания низкотемпературным воздухом, °С	-50
x_{32}	Температура сублимации в сушильной камере, °С	+25±2
x_{33}	Давление в сушильной установке, Па	60-75
x_{34}	Продолжительность сушки, часов	10-15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование подходов к развитию системы управления качеством на основе предиктивной

аналитики позволило получить следующие научно-практические результаты:

1. Обоснована значимость и своевременность исследования вопросов развития систем

Таблица 2. Исходные данные для построения предиктивной модели соответствия влажности сухого молока требуемому качеству

	№ образца																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$y_1, \%$	4,2	4,1	4	4,5	4,6	4,2	4,5	3,9	4,0	3,8	4,2	4,1	4	4,5	4,6	4,2	4,5	3,9	4,0	3,8
$x_{32}, \text{°C}$	25	24	25	21	22	24	22	26	25	26	25	24	25	21	22	24	22	26	25	26
$x_{34}, \text{час.}$	9,7	9,8	10	9,2	9,0	9,8	9,2	13,2	12,5	14,9	9,7	9,8	10	9,2	9,0	9,8	9,2	13,2	12,5	14,9

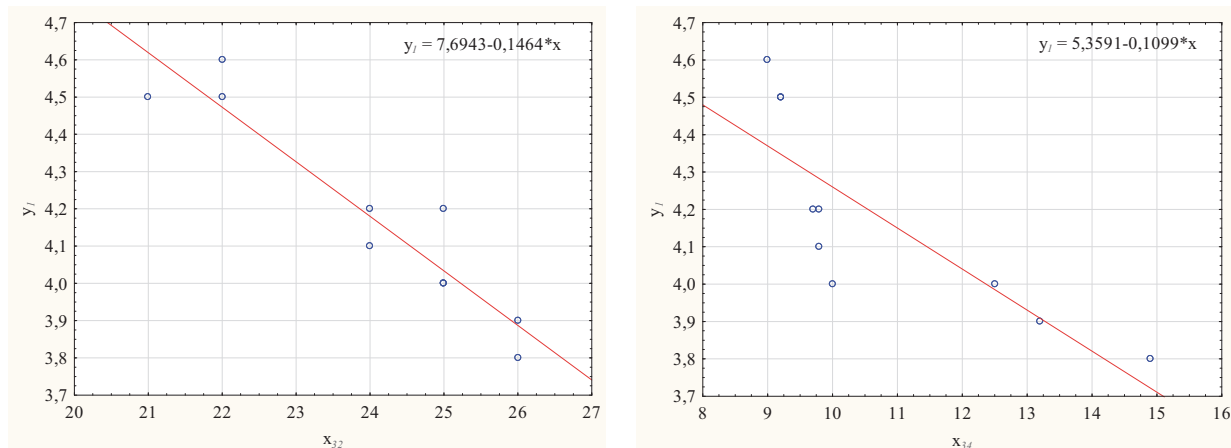


Рис. 3. Диаграммы рассеяния значений показателей влажности сухого молока (y_1), температуры сублимации в сушильной камере (x_{32}) и продолжительности сушки (x_{34})

Таблица 3. Предсказание нарушения качества сухого молока на основе предиктивной модели при различных параметрах технологического процесса

Параметры процесса сублимационной сушки (условные значения и их сочетания)		Качество продукта – сухого молока (расчетное значение)	Предсказание риска несоответствия сухого молока требуемой влажности
Температура сублимации в сушильной камере, °C (x_{32})	Продолжительность сушки, часов (x_{34})	Массовая доля влаги, % (y_1) (нормативное значение: не более 4,0%)	
21	9,0	4,6030	выше нормы (риск брака!)
22	9,2	4,4802	выше нормы (риск брака!)
23	9,4	4,3574	выше нормы (риск брака!)
28	9,6	3,7706	норма
29	9,8	3,6478	норма
30	15,2	3,3482	норма

управления качеством продукции на основе предиктивной аналитики, позволяющей на принципах концепции Качество 4.0 решать вопросы предсказания брака или продукции несоответствующего качества и управлять рисками несоответствий: несоответствующее нормативам сырье, нестабильная работа оборудования, нарушение технологии производства, человеческий фактор. Выделены проблемы внедрения предиктивной аналитики качества, заключающиеся в технической готовности производства:

наличии считывающих устройств, цифровизации и автоматизации процессов, синхронизации баз данных и аппаратно-программных средств.

2. Разработана концептуальная структурная модель предиктивной аналитики качества продукции и управления рисками несоответствий, предусматривающая формирование трех баз данных рисков возникновения брака и базы данных готовых предиктивных моделей. Результатом предиктивной аналитики является

прогнозирование несоответствий продукции по качеству и возможность изменения настроек производственного процесса для предупреждения брака. Произведено математическое описание процесса предиктивной аналитики с формализацией формульной записи аппроксимации функции предиктивных и зависимой переменной.

3. Визуализирована схема организации системы контроля качества на этапах технологического процесса производства сухого молока с указанием контрольных точек сбора данных и регламентирующей документации. Структурированы нормативные параметры качества производства сухого молока, адекватные аргументам функции предиктивной аналитики. Смоделирована ситуация производства некачественного сухого молока сниженной растворимости и обоснованы производственные причины брака. Разработана регрессионная модель предиктивной аналитики соответствия влажности сухого молока требуемому качеству.

Материалы исследования могут быть использованы при разработке и реализации программ развития систем управления качеством промышленных предприятий, модернизации автоматизированных систем и программных продуктов управления производством, планировании проектов по ресурсосбережению и сокращению потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тверяков, А.М. Совершенствование методов управления качеством / А.М. Тверяков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 1(93). – С. 50-55.
2. Усанькова, Е.А. К вопросу о концептуальных основах управления качеством продукции / Е.А. Усанькова, А.С. Попова // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2023. – № 11. – С. 245-247.
3. Грачева, А.Д. Всеобщее управление качеством на производстве / А.Д. Грачева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 426-430.
4. Пономарев, К.С. Цифровой двойник производства – средство цифровизации деятельности организации / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – № 2(4). – С. 11-17.
5. Дьяконов, Н.А. Системы управления технологическим процессом на основе предиктивной аналитики: проектирование / Н.А. Дьяконов, О.С. Логунова // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 1(50). – С. 58-64.
6. Бурнаев, Е.В. Алгоритмические основы предиктивной аналитики в задачах индустриального проектирования / Е.В. Бурнаев // Информационные процессы. – 2019. – Т. 19, – № 3. – С. 271-283.
7. Васильева, В.А. Автоматизация процессов производства и управление данными на промышленном производстве / В.А. Васильева, К.Ю. Лобков, Е.В. Филюшина // Перспективы науки. – 2023. – № 8(167). – С. 21-23.
8. Малышева, Т.В. Ресурсосберегающие производственные системы. Управление информационными потоками / Т.В. Малышева // Компетентность. – 2020. – № 4. – С. 24-27.
9. Khoudi A., Masrour T., El Hassani I, El Mazgualdi C. A Deep-Reinforcement-Learning-Based Digital Twin for Manufacturing Process Optimization // Systems. 2024. № 12. P. 38.
10. ГОСТ Р ИСО 10303-242-2019 «Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными».
11. Радаева, И.А. Принципы обеспечения качества отечественного сухого молока / И.А. Радаева, Е.Е. Илларионова, С.Н. Туровская // Пищевая промышленность. – 2019. – № 9. – С. 54-57.
12. ГОСТ 33629-2015 «Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия».

DEVELOPMENT OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM BASED ON PREDICTIVE ANALYTICS TO PREVENT THE RISKS OF PRODUCT NONCONFORMITY

© 2024 T.V. Malysheva, A.I. Lysenkov

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

The article is devoted to the current problem of improving the quality management system for products of industrial enterprises based on mathematical statistics and digital technologies. Expanding the ability to solve production problems using digital twins and cyber-physical systems also includes intelligent forecasting of quality problems and defect risks. The purpose of the article is to develop organizational and technical solutions for the development of a quality management system based on predictive analytics for preventing the risks of product non-conformity. The main research methods are the structuring of production factors by categories and functional characteristics, the formalization of the sequence of operations of predictive analytics, and the mathematical description of the relationships between the objects of the quality management system. The development of a predictive analytics model was carried out using regulatory documents in the field of product quality management, equipment maintenance, production automation and data management, and artificial intelligence. The article highlights the problems of implementing predictive quality analytics, which consist in the technical

readiness of production: the availability of reading devices, digitalization and automation of processes, synchronization of databases and hardware and software. A conceptual structural model of predictive analytics of product quality and nonconformity risk management has been developed, which provides for the formation of three databases of defect risks and a database of ready-made predictive models. The result of predictive analytics is the prediction of product quality discrepancies and the ability to change production process settings to prevent defects. A mathematical description of the predictive analytics process has been made with the formalization of a formulaic recording of the approximation of the predictive function and the dependent variable. A diagram of the organization of the quality control system at the stages of the technological process for the production of powdered milk is visualized, indicating control points for data collection and regulatory documentation. The situation of production of low-quality milk powder of reduced solubility was modeled and the production reasons for defects were substantiated. The research materials can be used in the development and implementation of programs for the development of quality management systems at industrial enterprises, modernization of automated systems and software products for production management, planning projects to save resources and reduce losses from defects.

Key words: quality management system, predictive analytics, product non-conformity, quality of raw materials, production technology, function approximation, milk powder quality.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-39-47

EDN: QTTCNV

REFERENCES

1. *Tveryakov, A.M.* Sovershenstvovanie metodov upravleniya kachestvo / A.M. Tveryakov // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* – 2020. – T. 22. – № 1(93). – S. 50-55.
2. *Usan'kova, E.A.* K voprosu o konceptual'nyh osnovah upravleniya kachestvom produkcii / E.A. Usan'kova, A.S. Popova // *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii.* – 2023. – № 11. – S. 245-247.
3. *Gracheva, A.D.* Vseobshchee upravlenie kachestvom na proizvodstve / A.D. Gracheva // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* – 2020. – № 2. – S. 426-430.
4. *Ponomarev, K.S.* Cifrovoy dvojniki proizvodstva – sredstvo cifrovizacii deyatel'nosti organizacii / K.S. Ponomarev, A.N. Feofanov, T.G. Grushina // *Avtomatizaciya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii.* – 2019. – № 2(4). – S. 11-17.
5. *D'yakov, N.A.* Sistemy upravleniya tekhnologicheskimi processami na osnove prediktivnoj analitiki: proektirovanie / N.A. D'yakov, O.S. Logunova // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы.* – 2021. – № 1(50). – S. 58-64.
6. *Burnaev, E.V.* Algoritmicheskie osnovy prediktivnoj analitiki v zadachah industrial'nogo proektirovaniya / E.V. Burnaev // *Informacionnye processy.* – 2019. – T. 19, – № 3. – S. 271-283.
7. *Vasil'eva, V.A.* Avtomatizaciya processov proizvodstva i upravlenie dannymi na promyshlennom proizvodstve / V.A. Vasil'eva, K.Yu. Lobkov, E.V. Filyushina // *Perspektivy nauki.* – 2023. – № 8(167). – S. 21-23.
8. *Malysheva, T.V.* Resursoberegayushchie proizvodstvennye sistemy. Upravlenie informacionnymi potokami / T.V. Malysheva // *Kompetentnost'.* – 2020. – № 4. – S. 24-27.
9. *Khdoudi A., Masrour T., El Hassani I, El Mazgualdi C.* A Deep-Reinforcement-Learning-Based Digital Twin for Manufacturing Process Optimization // *Systems.* 2024. № 12. P. 38.
10. GOST R ISO 10303-242-2019 «Sistemy avtomatizacii proizvodstva i ih integraciya. Predstavlenie dannyh ob izdelii i obmen etimi dannymi».
11. *Radaeva, I.A.* Principy obespecheniya kachestva otechestvennogo suhogo moloka / I.A. Radaeva, E.E. Illarionova, S.N. Turovskaya // *Pishchevaya promyshlennost'.* – 2019. – № 9. – S. 54-57.
12. GOST 33629-2015 «Konservy molochnye. Moloko suhoe. Tekhnicheskie usloviya».

Tatyana Malysheva, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Logistics and Management Department.

E-mail: tv_malysheva@mail.ru

Anton Lysenkov, Graduate Student of the Department of Logistics and Management. E-mail: lysenkov.rf@gmail.com