УДК 004.415.2.031.43 DOI: 10.17587/mau.22.475-783

Н. В. Астапенко, PhD, доц., astankin@mail.ru,
Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, Республика Казахстан,
К. Т. Кошеков, д-р техн. наук, проф., kkoshekov@mail.ru,
АО "Академия гражданской авиации", г. Алматы, Республика Казахстан

Автоматизация контроля технологического процесса хранения в зернохранилище с горизонтальными силосами*

Хранение и переработка зерна является важнейшей составной частью инфраструктуры зернового рынка. Задача хранения зерна состоит в том, чтобы обеспечить полную сохранность количества и качества при минимальных затратах труда и денежных средств. В лаборатории Северо-Казахстанского университета имени М. Козыбаева был разработан опытный образец зернохранилища инновационного типа с использованием горизонтальных силосов, предназначенный для снижения стоимости строительства и реконструкции элеваторов при одновременном улучшении качества, увеличении сроков хранения и снижении текущих затрат на хранение. Особенность конструкции позволяет автоматизировать большинство операций технологического процесса хранения зерна.

Предлагается способ автоматизированного формирования управляющих воздействий на оборудование зернохранилища в результате анализа данных с датчиков температуры, влажности, уровня углекислого газа и 3D-измерений поверхности зерна.

Разработан проект автоматизированной системы для мониторинга и управления зернохранилищами с горизонтальными силосами. Отличительной особенностью предлагаемой автоматизированной системы является наиболее полный набор условий правильного хранения зерна по сравнению с другими системами контроля технологического процесса зернохранилища. Автоматизация работы достигается посредством разработанного способа формирования управляющих сигналов, а также таких вычислительных алгоритмов, как прогноз времени завершения выгрузки на базе условной скорости выпуска зерна, вычисление объема зерна в секции с помощью 3D-измерений. Логика функционирования базовых алгоритмов для автоматизированной системы мониторинга и управления зернохранилищем с горизонтальными силосами основана на анализе параметров температуры, влажности, уровня углекислого газа и 3D-измерений поверхности зерна в секциях зернохранилища. В представленном проекте автоматизированной системы учитывались научные знания и достижения в области хранения зерна и теории идентификационных измерений, что позволяет использовать описанные алгоритмы в информационных системах мониторинга зернохранилищ других видов.

Ключевые слова: *автоматизация, автоматизированная система, технологический процесс, управление, зернохранилище с горизонтальными силосами*

Введение

Технологический процесс работы зернохранилища направлен на обеспечение безопасных условий хранения и поддержание качества хранимого продукта. Несоблюдение условий хранения приводит к росту плесени, деятельности насекомых и в целом к потере зерна. Достижения в области автоматизации и компьютерных технологий за последние десятилетия привели к изменениям способов обработки и хранения зерна. Вопросы безопасности, экономической эффективности, качественной сохранности привели к необходимости использовать автоматизированные системы для отслеживания запасов, перемещения зерна, климатического контроля.

Важным фактором снижения себестоимости хранения и переработки зерна является внедрение комплексной автоматизации всех этапов технологического процесса. В настоящее время в Республике Казахстан ведутся работы по внедрению новой техники и технологий в агропромышленном комплексе, но автоматизированные решения по контролю количества зерна в процессе хранения пока предложены не были. Количественно-качественная сохранность зерна обеспечивается только традиционным методом визуального осмотра мест хранения зерна. Однако практика показала, что плановых осмотров мест хранения зерна недостаточно.

Указанные направления автоматизации частично реализованы в рамках современных научных исследований. Анализ научных трудов в данной области показывает широкий спектр результатов научных исследований. Наибольший вклад в развитие автоматизированных систем для элеваторов и зернохранилищ внесли зарубежные ученые из Индии и Китая. Следует отметить ученых, работающих над контролем параметров температуры, влажности и углекислого газа: J. Song [1], J. Liu [2], S. G. Galande [3], L. Li [4], X. D. Zhang [5], Z. Y. Zou [6], X. X. Zheng [7], M. Surendra [8], P. Sujatha [9], Dr. P. Dakhole [10]. Отдельно над решением проблемы контроля масс зерна на основе датчиков давления работали ученые D. X. Zhang [11], Sh. Qing [12] и Zh. Miao [13].

Разработкой автоматизированных систем управления зернохранилищами на территории России и Украины занимаются в основном

*Данное исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РК №ГР 0115РК01229.

инженеры специализированных предприятий. В существующих автоматизированных системах мониторинг процесса хранения ограничивается отслеживанием значений температурных датчиков, как, например, в работах д-ра техн. наук, профессора, заслуженного изобретателя России В. М. Дринча [14] или канд. техн. наук А. Ю. Неделько [15].

Исследования авторов статьи направлены на усовершенствование процесса хранения зерна посредством внедрения комплекса интеллектуальных решений, основанных на использовании беспроводных технологий, инновационных способах контроля операций технологического процесса зернохранилища, алгоритмах сбора, обработки и анализа информационных сигналов и изображений и способе формирования управляющих воздействий к исполнительному оборудованию.

В лаборатории Северо-Казахстанского университета имени М. Козыбаева был разработан опытный образец зернохранилища инновационного типа с использованием горизонтальных силосов [16], предназначенный для снижения стоимости строительства и реконструкции элеваторов при одновременном улучшении качества, увеличении сроков хранения и снижении текущих затрат на хранение. Отличительная особенность данной разработки — это возможность полной автоматизации технологического процесса хранения зерна.

В данной статье авторы описывают логику функционирования и базовые алгоритмы системы для осуществления автоматизированного контроля технологического процесса зернохранилища на основе параметров температуры, влажности, уровня углекислого газа и 3D-измерений поверхности зерна.

В качестве метода исследования используется системное проектирование, которое позволяет комплексно решить поставленную задачу автоматизации контроля технологического процесса хранения сырья в зернохранилище с горизонтальными силосами. С помощью системного проектирования показаны взаимодействие и взаимосвязь отдельных элементов рассматриваемого объекта автоматизации, а также описывается структура и алгоритмы базовых процессов для реализуемой автоматизированной системы.

Характеристика объекта автоматизации

Объектом автоматизации является опытный образец зернохранилища инновационного типа с горизонтальными силосами, находящийся на территории фирмы ТОО "Диқанши" (г. Петропавловск, Республика Казахстан). Особенность горизонтальных силосов заключается в способе и устройстве выгрузки зерна из хранилища. Традиционно транспортер для выгрузки зерна размещается под силосом, в зернохранилищах с горизонтальными силосами он размещается внутри силоса. На полу силоса устанавливаются цепные транспортеры для выгрузки зерна, пол между транспортерами делается с уклоном к транспортерам. Над цепями транспортеров установлены коробы.

Зернохранилище емкостью 200 т, оснащено автономным энергоисточником, имеет девять изолированных секций размером 2×4,5×7 (длина [м] × ширина [м] × высота [м]). При необходимости бункер может быть увеличен в длину путем добавления секций. Полы наклонены под углом в 45°, что способствует естественному потоку зерна при открытых нижних заслонках. Схема поперечного среза зернохранилища с горизонтальными силосами представлена на рис. 1.

Готовое к хранению зерно выгружается в выгрузную яму. Зерно поступает в норию с помощью шнекового подавателя через приемный патрубок. Нории ленточные применяются для подъема сыпучих грузов по вертикали. В свою очередь нория направляет зерно на верхний скребковый транспортер, который заполняет силос. Контроль заполнения каждой секции регулируется положением верхних заслонок. Цепной транспортер с погруженными скребками работает путем сплошного волочения сыпучих материалов посредством скребков, находящихся на замкнутой цепи, которая расположена в закрытом металлическом коробе.

Зерно выгружается через отверстия в днище корпуса, которые снабжены задвижками. Процесс загрузки и выгрузки зерна из секции регулируется управляющими заслонками, установленными на корпусе транспортеров подачи зерна. В зависимости от уровня зерна в бункере система формирует сигнал — оставить заслонку открытой либо закрыть ее.

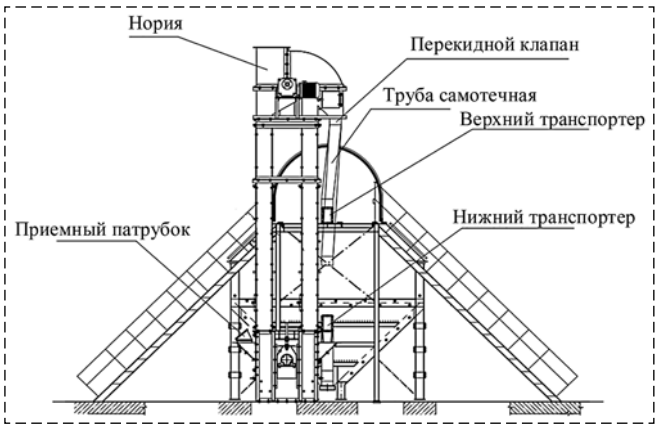

Рис. 1. Схема поперечного среза опытного образца
Fig. 1. Cross-sectional diagram of the prototype

Выгрузка из силосов осуществляется с помощью нижнего скребкового транспортера, который направляет зерно на норию для загрузки зерна в бункер. Для погрузки зерна в кузовы машин предусмотрена установка перекидного клапана на нории. Транспортер подает зерно на норию, которая поднимает его до определенного уровня. Перекидной клапан переключается в режим выгрузки и зерно поступает в разгрузочное сопло. В соответствии с технологической схемой в зернохранилище возможно выполнить внутреннее перемещение зерна.

Для предотвращения угрозы разрыва цепи верхнего или нижнего скребкового транспортера предусмотрены специальные устройства — виброанализаторы.

При работе технологического оборудования зернохранилища инновационного типа выделяется много пыли и прочих мелких частиц. Поэтому зернохранилище комплектуется аспирационной вентиляцией в каждой секции.

Таким образом, автоматизированная система для данного вида зернохранилища должна управлять следующим оборудованием: верхними задвижками (по одной на каждую секцию); перекидным клапаном; верхним транспортером; нориеи; нижним транспортером; нижними задвижками (по одной на каждую секцию); вентиляцией (по одной на каждую секцию). Для осуществления мониторинга зернохранилища используются следующие устройства: датчики температуры зерна; датчики уровня влажности зерна; датчики уровня углекислого газа; 3D-измеритель; датчик температуры и уровня влажности вне зернохранилища; виброанализатор.

Процессы создания 3D-измерителя, получения облака точек поверхности зерна, определение высоты насыпи и объема зерна в секции описаны авторами в работах [17, 18], поэтому в данной статье будем ссылаться на результаты предыдущего исследования.

Описание технологического процесса

Работа любого зернохранилища предполагает совершение комплекса взаимосвязанных операций. В технологическом процессе работы зернохранилища с горизонтальными силосами необходимо было выделить операции, которые возможно автоматизировать. В результате анализа авторы систематизировали все операции по трем базовым режимам работы: "Загрузка", "Мониторинг", "Выгрузка". Режим мониторинга, в свою очередь, агрегирует два режима: "Перемешивание", "Проветривание". Автоматизированное выполнение режимов и последовательности переходов осуществляется оператором, который предварительно выполняет настройку системы под конкретные параметры зернохранилища. Для осуществления режима загрузки оператор должен указать номера заполняемых секций, вид зерна и влажность загружаемого зерна. Максимальная высота насыпи для каждого вида зерна при разной влажности может значительно различаться [19]. Автоматизированная система контролирует высоту насыпи в процессе загрузки с помощью 3D-измерителя и завершает процесс загрузки изменением положения верхней задвижки.

После окончания процесса загрузки система переходит в режим мониторинга. В процессе хранения система должна осуществлять мониторинг основных параметров зернохранилища: температуры, влажности, уровня углекислого газа и объема зерна в секциях, рассчитанных на основе 3D-измерений поверхности зерна. Значения с датчиков аккумулируются в базе данных на сервере и становятся доступны для анализа автоматизированной системой и контрольного просмотра оператором.

Согласно правилам хранения зерна:

- необходимо выполнять перемешивание зерна через интервал времени, зависящий от вида зерна и установленной длительности хранения;
- слишком влажное зерно, идентифицируемое по значениям датчиков температуры и влажности, запускает режим перемешивания;
- слишком сухое зерно требует сокращения срока хранения;
- превышение критического значения уровня углекислого газа должно запускать режим проветривания (включение вентиляторов);
- резкое сокращение объема зерна при учете формулы Дюваля [20] говорит о возможности хищения зерна.

Переход в режим "Выгрузка" осуществляется по сигналу оператора. Оператор указывает объем зерна для выгрузки. После завершения режима выгрузки технологический процесс заканчивается в пустом силосе или осуществляется переход в режим "Мониторинг", если зерно в силосе осталось.

В режиме "Загрузка", "Перемешивание" и "Выгрузка" для предотвращения угрозы разрыва цепи верхнего или нижнего скребкового транспортера установлены виброанализаторы. Виброанализаторы запускаются при работе верхнего и/или нижнего транспортера и передают в систему показания напряжений в дискретные моменты времени. Анализ виброизмерений основывается на теории идентификационных измерений [21]. Идентификационный параметр не должен превышать установленное критическое значение $NF_k = 0{,}6$. Определяется идентификационный параметр по формуле

$$NF = \left[\frac{\max(G^N) - \min(G^N)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(g_i - \overline{g})^2} \right]^2, \qquad (1)$$

где $G^N = [g_1, g_2, ..., g_N]$ — значения напряжений, считанные виброанализатором.

Если $NF < NF_k$, то загрузка продолжается, иначе следует остановка оборудования с уведомлением оператору об угрозе разрыва цепи.

После окончания процесса загрузки система переходит в режим хранения. В процессе хранения система должна осуществлять мониторинг основных параметров зернохранилища: температуры, влажности, уровня углекислого газа и объема зерна в секциях, рассчитанных на основе 3D-измерений поверхности зерна.

Логика функционирования автоматизированной системы

Комплексное описание системы. Автоматизированная система мониторинга и управления зернохранилищем с горизонтальными силосами — это крупная многопараметрическая система, характеризующаяся следующими особенностями:

- присутствует сложное описание, включающее большое число функций, параметров и нетривиальные взаимосвязи между ними;
- выделяется совокупность взаимодействующих модулей и их компонентов, различающихся целями и задачами функционирования;
- наблюдается разобщенность и разнородность отдельных групп параметров системы.

Для успешной реализации проекта необходимо точное и однозначное моделирование и инициализация информационных потоков системы. Логика функционирования автоматизированной системы мониторинга и управления технологическим процессом хранения зерна в зернохранилищах инновационного типа реализовано с помощью диаграммы потоков данных в соответствии с нотацией Гейна—Сарсона (рис. 2).

- "Фигура с маркировкой D*" определяет хранилище данных: D1.dbSetting хранит установочные статические значения системы; D2.dbMySQL содержит информацию по зернохранилищу, нормативы хранения зерна, значения измерительных датчиков, журнал результатов мониторинга и управления; D3.dbCalibration хранит данные после калибровки панелей 3D-измерителя; D4.dbImage — каталог цифровых изображений с 3D-измерителя; D5.dbStandartPoint — каталог реперных эталонных точек; D6.db3DMeasuring содержит непосредственно 3D-измерения.

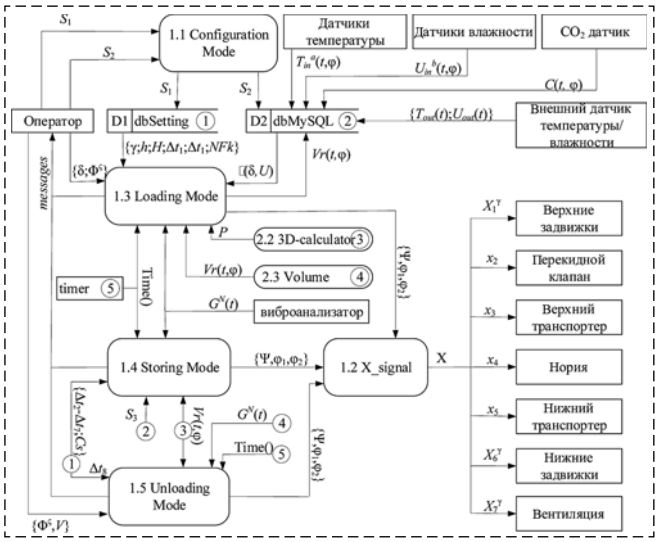

Рис. 2. Диаграмма потоков данных информационной системы мониторинга и управления зернохранилищем с горизонтальными силосами

Fig. 2. Diagram of data flows of information system for monitoring and control of grain storage with horizontal silos

- "Прямоугольники со скругленными углами" — это модули автоматизированной системы.
- "Линии со стрелками" указывают направление информационных потоков между объектами диаграммы.

Инициализация подсистем:

- Подсистема "1.1 Configuration Mode" ("1.1 Режима настройка") — интерфейс для ввода/изменения набора задающих параметров.
- Подсистема "1.2 X_signal" формирует набор управляющих сигналов для транспортного оборудования зернохранилища инновационного вида.
- Подсистема "1.3 LoadingMode" ("1.3 Режим загрузки") поддерживает функционирование процесса загрузки.
- Подсистема "1.4 StoringMode" ("1.4 Режим хранения") поддерживает функционирование процесса мониторинга, во время которого анализируются показания с датчиков температуры, влажности, углекислого газа и 3D-измерителя.
- Подсистема "1.5 UnloadingMode" ("1.5 Режим выгрузки") поддерживает функционирование процесса выгрузки зерна.
- Подсистема "2.2 3D-calculator" ("2.2 3D-вычислитель") получает измерения поверхности по цифровым изображениям и вычисляет высоту насыпи в секции.
- Подсистема "2.3 Volume" ("2.3 Расчет объема") выполняет расчет объема зерна в секции по облаку трехмерных измерений.

Функционирование двух последних подсистем не являются предметом настоящей статьи.

Рассмотрим инициализацию параметров системы по группам.

1. Данные, вводимые оператором:

$\Phi^{\varsigma} = (\varphi 1, \varphi 2, ..., \varphi\varsigma)$ — номера загружаемых секций зернохранилища;

V — объем зерна, которое нужно выгрузить;

S_1 $\{\gamma; H; h; Cs; NFk; \Delta t_1; \Delta t_2; \Delta t_3; \Delta t_4; \Delta t_5; \Delta t_6; \Delta t_7; \Delta t_8\}$: γ — число секций в зернохранилище; H — высота секций; h — максимальная высота насыпи в секции;

S_2 $\{Vs^{\gamma}; \delta^{\omega}; U^{\gamma}; \varepsilon(\delta, U); \Theta(T_0(\delta), T_1(\delta), U_0(\delta), U_1(\delta)); E^{\gamma}\}$: Vs^{γ} — одномерный массив со значениями объема соответствующей секции зернохранилища; δ^{ω} — список видов зерна; U^{γ} — одномерный массив со значениями влажности зерна перед загрузкой в соответствующую секцию; $\varepsilon(\delta, U)$ — максимальная высота насыпи для зерна вида δ с уровнем влажности U; $\Theta(T_0(\delta), T_1(\delta), U_0(\delta), U_1(\delta))$ — таблица нормального соответствия влажности (U_0, U_1) и температуры (T_0, T_1) для зерна вида δ; E^{γ} — одномерный массив сроков хранения зерна, загруженного в соответствующие секции зернохранилища.

2. Показания с датчиков:

$T_{out}(t)$ — температура на улице во время t; $U_{out}(t)$ — влажность на улице во время t; $T_{in}^{a}(t, \varphi)$ — вектор температур с a датчиков во время t в секции φ; $U_{in}^{b}(t, \varphi)$ — вектор уровней влажности с b датчиков во время t в секции φ; $C(t, \varphi)$ — уровень углекислого газа с датчика CO_2 во время t в секции φ; G^N — значения напряжений, считанных виброанализатором

3. Структура информационного потока в режим хранения: $S_3\{T_{out}(t); U_{out}(t); T_{in}^{a}(t, \varphi); U_{in}^{b}(t, \varphi); C(t, \varphi)\}$.

4. $Vr(t,\varphi)$ — объем зерна в секции φ после загрузки; P — высота загруженной насыпи в секции; $Time()$ — определяет текущее время по таймеру.

5. Управляющий сигнал для оборудования $X\{X_1^{\gamma}; x_2; x_3; x_4; x_5; X_6^{\gamma}; X_7^{\gamma}\}$:

X_1^{γ} — одномерный битовый массив значений, соответствующих управлению верхними задвижками γ секций (1 — открытое положение задвижки, 0 — закрытое положение); x_2 — определяет положение перекидного клапана (1 — режим загрузки, 0 — режим выгрузки); x_3 — определяет состояние верхнего конвейера (1 — пуск, 0 — останов); x_4 — определяет состояние нории (1 — пуск, 0 — останов); x_5 — определяет состояние нижнего конвейера (1 — пуск, 0 — останов); X_6^{γ} — одномерный битовый массив значений, соответствующих управлению нижними задвижками γ секций (1 — открытое положение задвижки, 0 — закрытое положение); X_7^{γ} — одномерный битовый массив значений, соответствующих управлению вентиляторами γ секций (1 — пуск, 0 — останов).

Формирование управляющих сигналов. В процессе выполнения операций вычислительного процесса формируются управляющие воздействия к исполнительным устройствам: верхним задвижкам для загрузочных щелей; верхнему транспортеру, нории, перекидному клапану, нижнему транспортеру, нижним задвижкам для выгрузных щелей.

Формирует набор управляющих сигналов для исполнительных устройств зернохранилища инновационного типа подсистема "1.2 X_signal". Для ее реализации разработан одноименный алгоритм "X_signal". Алгоритм работы подсистемы для формирования управляющих сигналов к оборудованию зернохранилища реализован в соответствии с рис. 3.

Управляющий сигнал для секции φ формируется в зависимости от значения параметра Ψ:

($\Psi = A$) — сигналы для загрузки указанного номера секции;

($\Psi = B$) — сигналы для выгрузки указанного номера секции;

($\Psi = C$) — сигналы для перемешивания/перемещения указанных номеров секций;

($\Psi = D$) — сигналы для остановки оборудования;

($\Psi = E$) — сигналы для вентиляции указанных секций;

($\Psi = F$) — сигналы для отключения вентиляции.

Номер секции во всех случаях кроме ($\Psi = C$) указывается вторым параметром φ_1, а третий параметр не указывается.

Для случая ($\Psi = C$) указывается два номера секции, чтобы можно было перемещать зерно из одной секции в другую. Если $\varphi_1 = \varphi_2$, то осуществляется перемешивание зерна.

Таким образом в результате работы алгоритма формируется управляющий сигнал, структура которого описана выше при описании параметров системы. Для наглядности приведем пример сигнала на загрузку первой секции из 9:

$$X\{\overbrace{1}^{X_1}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \overbrace{1, 1, 1, 1}^{x_2 x_3 x_4 x_5}, \overbrace{0}^{X_6}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \overbrace{0}^{X_7}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

Значения битовых массивов формируются с помощью специальных функций f_1 и f_2. Функ-

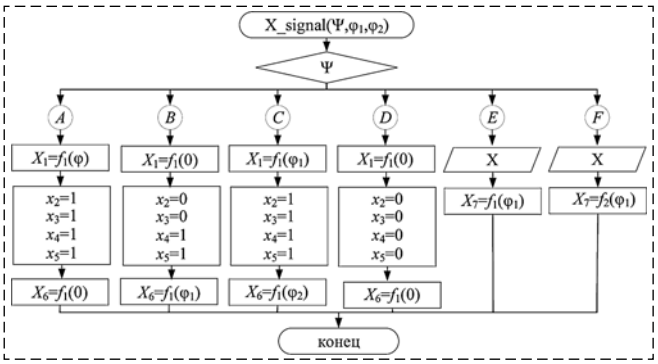

Рис. 3. Алгоритм формирования управляющих сигналов
Fig. 3. Algorithm for generating control signals

ция f_1 для управления верхними и нижними задвижками и включения вентиляции выглядит в соответствии со следующей группой правил:

$$\begin{aligned} &X_i = f_1(\varphi) \Rightarrow \forall x_j^* \in X_i, \\ &\text{где } i = 1, 6, 7,\ j = 1 \ldots \gamma, \\ &x_j^* = \begin{cases} 1, \text{ где } j = \varphi \wedge \varphi \neq 0, \\ 0, \text{ где } j \neq \varphi \vee \varphi = 0, \end{cases} \end{aligned} \tag{2}$$

где φ — номер секции, а γ — число секций в зернохранилище.

Функция f_2 для отключения вентиляции в секции определяется правилом

$$\begin{aligned} &X_7 = f_2(\varphi) \Rightarrow \forall x_j^* \in X_7, \text{ где } j = 1 \ldots \gamma, \\ &x_j^* = 0, \text{ где } j = \varphi. \end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, модуль формирования управляющих сигналов представляет собой алгоритм, содержащий оператор выбора с блоком операторов присваивания кода сигнала соответствующему исполнительному оборудованию.

Алгоритм работы режима загрузки. Подсистема "1.3 Режим загрузки" поддерживает функционирование процесса загрузки. Наиболее важный момент, который необходимо учитывать при загрузке, это высота насыпи зерна. Максимально возможная высота насыпи зависит от вида зерна и влажности зерна ($\varepsilon(\delta, U)$) [21]. Кроме того, необходимо учитывать максимально возможную высоту насыпи в секции зернохранилища (h). Таким образом можно определить высоту насыпи загружаемого зерна по формуле: $\min(\varepsilon(\delta, U), h)$.

Реализация алгоритма загрузки одной секции зернохранилища выглядит следующим образом:

Шаг 1. Отправляется сигнал к оборудованию на загрузку φ_i-секции X_signal($\Psi = A$, φ_i), где $i = 1, \ldots, \varsigma$.

Шаг 2. Получаем с виброанализатора показания напряжений G^N, по формуле (1) определяем NF.

Шаг 3. ЕСЛИ $NF \geqslant NF_k$, ТО передать сообщение оператору "угроза разрыва цепи" и сигнал на остановку оборудования X_signal($\Psi = D$, 0), ИНАЧЕ выполняем Шаг 2 через интервал времени Δt_1.

Шаг 4. С помощью таймера фиксируем время первой проверки через интервал Δt_2.

Шаг 5. В установленное время с помощью подсистемы "2.1 3D-calculator" определяем загруженную высоту насыпи (P).

Шаг 6. ЕСЛИ $P < \min(\varepsilon(\delta), h)$, ТО рассчитаем время следующей проверки высоты насыпи по формуле

$$t = \frac{\min(\varepsilon(\delta), h) - P}{P}(Time() - t_0), \tag{4}$$

где $Time()$ — текущее время, t_0 — время начало загрузки,

ИНАЧЕ определяется объем (Vr) заполненной секции с помощью подсистемы "2.2 Volume", результат сохраняется в D2.dbMySQL и выполняется переход на загрузку следующей секции — Шаг 1.

Указанные оператором номера секций заполняются циклически по представленному алгоритму. После загрузки последней секции подается сигнал на остановку оборудования $X_signal(\Psi = D, 0)$.

Алгоритм работы режима хранения. Подсистема "1.4 Режим хранения" поддерживает функционирование процесса хранения, во время которого анализируются показания с датчиков температуры, влажности, углекислого газа и 3D-измерителя.

Анализ работ по автоматизации зернохранилищ [2—9] показал, что не существует работ с полным перечнем условий качественного хранения зерна по показаниям датчиков температуры, влажности, углекислого газа. В данной работе авторы попытались восполнить данный пробел на основе правил хранения зерна, приведенных в работах [10, 11].

Разработка алгоритма режима хранения реализована следующим образом:

Шаг 1. Через каждый интервал времени Δt_3 считываются показания с датчиков: $T_{out}(t)$ — температура на улице во время t; $U_{out}(t)$— влажность на улице во время t; $T_{in}^a(t, \varphi)$ — вектор температур с a датчиков во время t в секции φ; $U_{in}^b(t, \varphi)$ — вектор уровней влажности с b датчиков во время t в секции φ.

Шаг 2. Для хранимого вида зерна (δ) считывается таблица нормального соответствия влажности и температуры $\Theta(T_0(\delta), T_1(\delta), U_0(\delta), U_1(\delta))$.

Шаг 3. ЕСЛИ

$!([U_0(\delta) \leqslant \max(U_{in}^b(t,\varphi)) \leqslant U_1(\delta)] \wedge [T_0(\delta) \leqslant$
$\leqslant \max(T_{in}^a(t,\varphi)) \leqslant T_1(\delta)])$,

ТО

{ЕСЛИ

$([\max(U_{in}^b(t,\varphi)) \leqslant U_1(\delta)] \wedge [T_0(\delta) \leqslant$
$\leqslant \max(T_{in}^a(t,\varphi)) \leqslant T_1(\delta)])$,

ТО сообщение оператору "опасность самовозгорания зерна" и запуск перемешивания зерна в течении временного интервала Δt_7,

ИНАЧЕ сообщение оператору "зерно пересушено, требуется сокращение сроков хранения"

}, ИНАЧЕ { ЕСЛИ

$([(\min(T_{in}^a(t,\varphi)) - T_{out}(t) \geqslant 4°) \wedge (U_{out}(t) \leqslant$
$\leqslant 40\ \%)] \vee$

$[(\min(T_{in}^a(t,\varphi)) - T_{out}(t) \geqslant 8°) \wedge (U_{out}(t) > 40\ \%)])$,

ТО сообщение оператору "требуется вентиляция зерна" и сигнал на вентиляцию в i-ю секцию X_signal($\Psi = E$, φ_i)

}

Шаг 4. Через каждый интервал времени Δt_4 считываются показания с датчика CO_2 во время t в секции φ ($C(t,\varphi)$).

Шаг 5. ЕСЛИ $C(t,\varphi) \geqslant Cs$, ТО сообщение оператору "требуется вентиляция зерна" И сигнал на вентиляцию в i-секцию X_signal($\Psi = E, \varphi_i$).

Шаг 6. Через каждый интервал времени Δt_5 считываются показания объема ($Vr(t, \varphi)$) в каждой заполненной секции с подсистемы "Volume".

Шаг 7. ЕСЛИ выполняется условие

$$\frac{Vr(t,\varphi_i)}{V0(\varphi_i)} \geqslant \frac{100(U0(\varphi_i) - \max(U_{in}^b(t,\varphi_i)))}{100 - \max(U_{in}^b(t,\varphi_i))}, \quad (5)$$

где $V_0(\varphi_i)$ — последнее установленное значение объема в секции φ_i, $U_0(\varphi_i)$ — последнее установленное значение уровня влажности зерна в секции φ_i,

ТО сообщение оператору "необоснованное уменьшение зерна".

Шаг 7. Через каждый интервал времени Δt_6 запуск перемешивания зерна в течении временного интервала Δt_7 и проверка значения идентификатора по показаниям виброанализатора во время перемешивания в соответствии с формулой (1).

Изложенный алгоритм работы режима хранения выполняется для всех непустых секций зернохранилища.

Алгоритм работы режима выгрузки. Подсистема "1.5 Режим выгрузки" поддерживает функционирование процесса выгрузки зерна. Оператор указывает выгружаемый объем зерна V и номера секций, из которых будет выгружаться зерно Φ^{ς}. Указанные оператором номера секций выгружаются циклически по следующему алгоритму:

Шаг 1. Считываем начальный объем зерна $V_0(\varphi_i)$ в φ_i-й секции, где $i = 1, ..., \varsigma$.

Шаг 2. Отправляется сигнал к оборудованию на выгрузку φ_i-й секции X_signal($\Psi = B, \varphi_i$).

Шаг 3. Получаем с виброанализатора показания напряжений G^N, по формуле (1) определяем NF.

Шаг 4. ЕСЛИ $NF \geqslant NF_k$, ТО сообщение оператору "угроза разрыва цепи" и сигнал на остановку оборудования X_signal($\Psi = D$,0), ИНАЧЕ выполняем Шаг 2 через интервал времени Δt_1.

Шаг 5. С помощью таймера фиксируем время первой проверки через интервал Δt_8.

Шаг 6. В установленное время с помощью подсистемы "2.2 Volume" определяем объем зерна в секции $Vr(t, \varphi)$.

Шаг 7. ЕСЛИ $V_0(\varphi) - Vr(t, \varphi) < V$, ТО время следующей проверки объема зерна при выгрузке определяем по формуле

$$t = \frac{V - (V0(\varphi) - Vr(t,\varphi))}{V0(\varphi) - Vr(t,\varphi)}(Time() - t_0), \quad (6)$$

где $Time()$ — текущее время, t_0 — время начало выгрузки,

ИНАЧЕ выполняется переход на выгрузку следующей секции — Шаг 1.

После выгрузки последней секции подается сигнал на остановку оборудования X_signal($\Psi = D$, 0).

Заключение

Интегрированными показателями качества сельскохозяйственной продукции является ее температура, влажность и уровень углекислого газа. Нарушение условий загрузки и хранения аграрной продукции приводит к ее порче, самосогреванию и самовозгоранию. Анализ существующих систем дистанционного контроля выявил их недостатки и слабую автоматизацию операций технологического процесса. Созданный учеными СКУ имени М. Козыбаева экспериментальный образец зернохранилища инновационного типа с горизонтальными силосами предоставил возможность максимально автоматизировать операции технологического процесса хранения зерна.

Наибольшая значимость работы заключается в автоматизации технологического процесса хранения зерна. В данной статье авторы описали логику функционирования и базовые алгоритмы для автоматизированной системы мониторинга и управления зернохранилищем с горизонтальными силосами на основе анализа параметров температуры, влажности, уровня углекислого газа и 3D-измерений поверхности зерна. Данная автоматизированная система позволяет обрабатывать результаты замеров, выдавать результаты анализа в виде управляющих сигналов и рекомендаций по работе зернохранилища. В разработке автоматизированной системы учитывались научные знания и достижения в области хранения зерна и теории идентификационных измерений.

В данной работе представлены:

- проект информационной системы для автоматизированного мониторинга и управления зернохранилищами с горизонтальными силосами;
- прогноз времени завершения загрузки на базе условной скорости заполнения секции зернохранилища;
- прогноз времени завершения выгрузки на базе условной скорости выпуска зерна;
- наиболее полный набор условий правильного хранения зерна по сравнению с други-

ми системами контроля технологического процесса зернохранилища;
- способ и алгоритм формирования управляющих сигналов.

Разработанные алгоритмы и технологические решения могут быть применены для разработки интеллектуальных систем мониторинга и управления зернохранилищами других видов.

Список литературы

1. **Song J., Kai W., Xiaochen Zh.** Measurement and control system based on wireless senor network for granary // 5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine (EMIM). 2015. P. 256—260. URL: https://doi.org/10.2991/emim-15.2015.50.
2. **Liu J.** Design of granary temperature monitoring system based on virtual instrument technology // Advanced Materials Research. 2012. Vols. 542—543. P. 212—216.
3. **Galande S., Agrawal G., Anap M.** A Parameter monitoring and control of grain storage by embedded system // International Journal of Informative & Futuristic Research. 2015. Vol. 2(11). P. 4172—4179.
4. **Li L. J.** Distributed sensors network of granary based on Zigbee // Network and Information Technology. 2012. Vol. 31. P. 63—65.
5. **Zhang X. D**., **Zhang J., Li Z. Q.** Environmental monitoring in grain granary based on embedded system // 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). China. 2016. P. 1051—1054.
6. **Zou Z., Wang Y., Zhou M.** Design of ZigBee & ARM technology based granary monitoring system // 3rd IEEE Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). China. 2017. P. 835—838.
7. **Zheng X. X., Li L. R., Shao S. F.** A GSM-based remote temperature and humidity monitoring system for granary // International Conference on Electronic, Information and Computer Engineering (ICEICE). Hong Kong. 2016. Vol. 44. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/20164401060.
8. **Surendra M., Kishore G.** The Design of granary environment monitoring through web server based on ARM-9 and Zigbee // International Journal of Advanced Technology and Innovative Research. 2014. Vol. 06 (12). P. 1552—1555.
9. **Sujatha P., Kishore Ch.** Advanced system for monitoring and controlling of the grain condition based on ARM7 // International Journal of Scientific Engineering and Technology Research. 2015. Vol. 04 (29). P. 5655—5660.
10. **Khorgade M., Dr. Dakhole P.** Granary environmental monitoring system using ZigBee and ARM Processor IJCSN // International Journal of Computer Science and Network. 2015. Vol. 4 (3). P. 456—460.
11. **Zhang X., Zhang D. X.** A Detection model of granary storage quantity based on deep learning // Proceedings of the 2017 International Conference on Material Science, Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 125. P. 30—33. URL: https://doi.org/10.2991/mseee-17.2017.21.
12. **Qing Sh., Tao X., Yoshino T.** Point cloud simplification algorithm based on particle swarm optimization for online measurement of stored bulk grain // International journal of agricultural and biological engineering. 2016. Vol. 9(1). P. 71—78.
13. **Miao Zh., Dexian Zh.** A Hybrid model for granary storage quantity detection // Journal of Residuals Science & Technology, DEStech Publications. 2016. Vol. 13 (5).
14. **Дринча В. М.** Контроль и мониторинг температуры зерна: залог сохранности его качества // TechnoGrad. URL: http://www.agrometall.ru/uchebnyj-centr-zhivoe-zerno/nou-hau/stati-po-posleuborochnoj-obrabotke-zerna/kontrol-i-monitoring-temperatury-zerna/
15. **Неделько А. Ю., Масло А. Д., Кропачев Д. Ю.** Система мониторинга температуры зерна в элеваторах и зернохранилища // Метрология Компетентность. 2012. № 7. С. 52—56.
16. **Тулешов А. К., Дильмагамбетов Ш. Н., Байболов К. Б., Кожаков К. С., Дилмагамбетов Р. П.** Евразийский патент № 201600284. Способ выгрузки сыпучих материалов, преимущественно зерна, из емкостей и хранилищ, устройство для его осуществления и хранилище для сыпучих материалов, преимущественно зерна.
17. **Astapenko N. V., Koshekov K. T., Petrov P. A.** Design of the granary technological process control subsystem for monitoring of the grain volume in a silo // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2016). 2016. P. 48—52. URL: https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7818971.
18. **Astapenko N., Koshekov K., Kolesnikov A.** Methodology of automatic registration of 3D measurements of bulk materials in granaries // Computer Optics. 2018. V. 42 (03). P. 510—520. URL: https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-510-520.
19. **Karpov V., Chirkova A., Mogdalev P.** Organization of production: Uchebno-methodical manual Belarusian State Agricultural Academy. Gorki: Publishing house of BSAA, 2007. 63 p.
20. **Шепелев М. А.** Технология хранения зерна: учебно-методическое пособие по технологии хранения и переработке растениеводческой продукции для студентов специальности "5В080100—Агрономия". Костанай: КРУ А. Байтурсынова, 2013. 62 с.
21. **Koshekov K., Klikushin Yu., Savostin A., Sofyina N., Astapenko N., Kashevkin A., Koshekova B.** Modernization of vibrational analysis based on identification measurements // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. No 54(5). P. 328—334. URL: https://doi.org/10.1134/S106183091805008X.

Automation of Control of Technological Process of Storage in a Granary with Horizontal Silos

N. V. Astapenko, astankin@mail.ru,
M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan,
K. T. Koshekov, kkoshekov@mail.ru,
Civil Aviation Academy, Almaty, 050039, Republic of Kazakhstan

Corresponding author: **Astapenko Natalya V.**, Ph.D., Associate Professor,
M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan, e-mail: astankin@mail.ru

Accepted on May 29, 2021

Abstract

Grain storage and processing is the most important component of the grain market infrastructure. The task of grain storage is to ensure complete safety of quantity and quality with minimal labor and money costs. In the laboratory of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, a prototype of an innovative type of grain storage was developed using hori-

zontal silos, designed to reduce the cost of construction and reconstruction of elevators while improving quality, increasing storage times and reducing current storage costs. The design feature makes it possible to automate most of the operations of the technological process of grain storage. This article proposes a method for the automated formation of control actions on grain storage equipment as a result of data analysis from temperature, humidity, carbon dioxide level sensors and 3D measurements of the grain surface. A project of an automated system for monitoring and controlling grain storage facilities with horizontal silos has been developed. A distinctive feature of the proposed automated system is the most complete set of conditions for the correct storage of grain in comparison with other control systems for the technological process of a granary. Automation of work is achieved through the developed method for generating control signals, as well as such computational algorithms as forecasting the completion time of loading based on the conditional filling rate of the grain storage section, forecasting the completion time of unloading based on the conditional grain release rate, calculating the grain volume in the section using 3D measurements. The logic of the functioning of the basic algorithms for an automated monitoring and control system for a granary with horizontal silos is based on the analysis of the parameters of temperature, humidity, carbon dioxide level and 3D measurements of the grain surface in the sections of the granary. In the presented project of an automated system, scientific knowledge and achievements in the field of grain storage and the theory of identification measurements were taken into account, which makes it possible to use the described algorithms in information systems for monitoring grain storage facilities of other types.

Keywords: *automation, automated system, technological process, control, granary with horizontal silos*

Acknowledgments: *This study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan No. GR 0115RK01229.*

For citation:

Astapenko N. V., Koshekov K. T. Automation of Control of Technological Process of Storage in a Granary with Horizontal Silos, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 475—483.

DOI: 10.17587/mau.22.475-483

References

1. **Song J., Kai W., Xiaochen Zh.** Measurement and control system based on wireless senor network for granary, *5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine (EMIM)*, 2015, pp. 256—260, available at: https://doi.org/10.2991/emim-15.2015.50.

2. **Liu J.** Design of granary temperature monitoring system based on virtual instrument technology, *Advanced Materials Research*, 2012, vols. 542—543, pp. 212—216.

3. **Galande S., Agrawal G., Anap M.** A Parameter monitoring and control of grain storage by embedded system, *International Journal of Informative & Futuristic Research*, 2015, vol. 2(11), pp. 4172—4179.

4. **Li L. J.** Distributed sensors network of granary based on Zigbee, *Network and Information Technology*, 2012, vol. 31, pp. 63—65.

5. **Zhang X. D.**, **Zhang J., Li Z. Q.** Environmental monitoring in grain granary based on embedded system — *7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, China, 2016, pp. 1051—1054.

6. **Zou Z., Wang Y., Zhou M.** Design of ZigBee & ARM technology based granary monitoring system — *3rd IEEE Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, China, 2017, pp. 835—838.

7. **Zheng X. X.**, **Li L. R.**, **Shao S. F.** A GSM-based remote temperature and humidity monitoring system for granary — *International Conference on Electronic, Information and Computer Engineering (ICEICE)*, Hong Kong, 2016, vol. 44.

8. **Surendra M., Kishore G.** The Design of granary environment monitoring through web server based on ARM-9 and Zigbee, *International Journal of Advanced Technology and Innovative Research*, 2014, vol. 06 (12), pp. 1552—1555.

9. **Sujatha P., Kishore Ch.** Advanced system for monitoring and controlling of the grain condition based on ARM7, *International Journal of Innovative Technologies*, 2015, vol. 04 (29), pp. 5655—5660.

10. **Khorgade M., Dr. Dakhole P.** Granary environmental monitoring system using ZigBee and ARM Processor IJCSN, *International Journal of Computer Science and Network*, 2015, vol. 4 (3), pp. 456—460.

11. **Zhang X., Zhang D. X.** A Detection model of granary storage quantity based on deep learning, *Proceedings of the 2017 International Conference on Material Science, Energy and Environmental Engineering*, 2017, vol. 125, pp. 30—33.

12. **Qing Sh., Tao X., Yoshino T.** Point cloud simplification algorithm based on particle swarm optimization for online measurement of stored bulk grain, *International journal of agricultural and biological engineering*, 2016, vol. 9(1), pp. 71—78.

13. **Miao Zh., Dexian Zh.** A Hybrid model for granary storage quantity detection, *Journal of Residuals Science & Technology*, DEStech Publications, 2016, vol. 13 (5).

14. **Drincha V. M.** Control and monitoring of grain temperature: a guarantee of the preservation of its quality, *TechnoGrad*, available at: http://www.agrometall.ru/uchebnyj-centr-zhivoe-zerno/nou-hau/stati-po-posleuborochnoj-obrabotke-zerna/kontrol-i-monitoring-temperatury-zerna/ (in Russian).

15. **Nedelko A. Yu., Maslo A. D., Kropachev D. Yu.** The system for monitoring the temperature of grain in elevators and granaries, *Metrology Competence*, 2012, no. 7, pp. 52—56 (in Russian).

16. **Tuleshov A. K., Dilmagambetov Sh.N., Baibolov K. B., Kozhakov K. S., Dilmagambetov R. P.** *Eurasian patent No. 201600284 Method for unloading bulk materials, mainly grain, from containers and storages, a device for its implementation and storage for bulk materials, mainly grain* (in Russian)

17. **Astapenko N. V., Koshekov K. T., Petrov P. A.** *Design of the granary technological process control subsystem for monitoring of the grain volume in a silo*, Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2016), 2016, pp. 48—52.

18. **Astapenko N., Koshekov K., Kolesnikov A.** Methodology of automatic registration of 3D measurements of bulk materials in granaries, *Computer Optics,* 2018, vol. 42 (03), pp. 510—520, available at: https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-510-520.

19. **Karpov V., Chirkova A., Mogdalev P.** Uchebno-methodical manual *Belarusian State Agricultural Academy*, Gorki, Publishing house of BSAA, 2007, 63 p.

20. **Shepelev M. A.** Grain storage technology: teaching aid on storage technology and processing of crop products for students of the specialty "5B080100-Agronomy", Kostanay, Publishing house of KPU A. Baitursynova, 2013, 62 p. (in Russian).

21. **Koshekov K., Klikushin Yu., Savostin A., Sofyina N., Astapenko N., Kashevkin A., Koshekova B.** Modernization of vibrational analysis based on identification measurements, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, no. 54(5), pp. 328—334.