

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.514:658.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОБЕТОНА

Каминская Ж. К. – ассистент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Кулинич Э. М. – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Сердюк С. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена проблема повышения эффективности и качества процессов функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) производства газобетона. Актуальность данной проблемы обуславливается необходимостью учета человеческого фактора при разработке систем данного типа. Объект исследования – методы и средства автоматизации процессов управления сложными технологическими процессами (ТП). Предмет исследования – модели, методы и средства повышения эффективности и качества автоматизации процессов управления технологическими комплексами газобетонного производства.

Цель работы – повышение эффективности и качества процессов управления ТП приготовления газобетона на основе создания комплексной математической модели, формализующей деятельность человека-оператора и физические процессы, происходящие в ходе ТП, с учетом характеристик исполнительных механизмов и режимов их управления, а также ее практическая реализация в виде имитационной модели (ИМ) процесса управления дозированием материалов газобетонной смеси на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

Метод. Предложено решение рассматриваемой проблемы в виде ИМ процесса функционирования АСУТП приготовления газобетона, основанной на комплексной математической модели процессов дозирования, смешивания компонентов газобетонной смеси и интерактивного взаимодействия оператора с человеко-машинным интерфейсом (ЧМИ) АСУТП при решении им задач управления ТП. В ИМ человеко-машинная система «оператор-АСУТП» представлена в виде системы массового обслуживания. Для формализации алгоритма деятельности оператора использован обобщенный структурный метод А.И. Губинского. Особенность данной ИМ заключается в том, что она может быть использована для оценки и отладки работы АСУТП, алгоритмов работы с ЧМИ.

Результаты. Разработано программное обеспечение и имитационная модель ТП изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич», реализующие предложенную комплексную модель на основе транзактного способа организации квазипараллелизма в ИМ.

Выводы. В работе предложена комбинированная (аналитико-имитационная) модель процесса автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона, которая в отличие от известных моделей управления, включающих процессы дозирования и смешивания, позволяет формализовать деятельность человека-оператора АСУТП, количественно оценить показатели его информационной загрузки, а также дополнительно учитывать в процессе дозирования влияние динамической составляющей веса набора компонентов в бункеры дозаторов и скорость истечения компонентов из расходных емкостей. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач обоснования оптимального выбора структуры, способов управления, вариантов ЧМИ, уточнения параметров системы управления указанным ТП, а также при создании интеллектуальных тренажеров для подготовки операторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, имитационная модель, оператор, газобетон, человеко-машинный интерфейс, дозирование, смешивание, транзакт.

АББРЕВИАТУРЫ

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
АФО – алгоритма функционирования оператора;
ИКВ – известково-кремнеземисто вяжущий;
ИМ – имитационная модель;
ОСМ – обобщенный структурный метод;
ТП – технологический процесс;
ТФЕ – типовая функциональная единица;
ТФС – типовая функциональная структура;
ФС – функциональная сеть;
ЧМИ – человеко-машинный интерфейс;
ЧМС – человеко-машинная система.

НОМЕНКЛАТУРА

B^1 – вероятность безошибочного выполнения алгоритма функционирования;
 D_z – диаметр заслонки;
 $f_{i1}(t)$ – функция распределения получения дозы сыпучих материалов;
 F_i – векторный параметр потока i -го компонента;
 $F_i(t, q)$ – поток i -го компонента из расходной емкости;
 F_{iA} – поток i -го компонента на выходе заслонки питателя дозатора;
 F_{iB} – поток i -го компонента в точке касания;
 $f_{\text{вых}}$ – частота на выходе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель-редуктор»;
 g – ускорение свободного падения;
 G – вес дозатора с компонентами газобетонной смеси;
 G_i – вес i -го компонента газобетона;
 $G_{\text{доз}}$ – вес пустого дозатора;
 h – высота падения частиц компонентов;
 $h_{\text{доз}}$ – высота бункера дозатора;
 $h_{\text{цил}}$ – высота цилиндрической части дозатора;
 $h_{\text{у,кон}}$ – высота усеченного конуса дозатора;
 K^{00} – вероятность обнаружения ошибки при ее наличии;
 K^{11} – вероятность обнаружения отсутствия ошибки при ее отсутствии;
 m – масса компонентов в дозаторе;
 $m_{\text{доз}}$ – масса пустого дозатора;
 M – математическое ожидание;
 $P_i(t, q)$ – производительность шнекового питателя i -го компонента;
 P_{max} – максимальная производительность шнекового питателя;
 $P_{\text{дин}}$ – динамическая сила воздействия падающего материала;
 $P_{\text{стат}}$ – статическая сила воздействия падающего материала;
 q – параметр, характеризующий особенности системы управления;
 Q_i – сигнал на открытие заслонки на 90 градусов;
 Q_i – сигнал на открытие заслонки на 30 градусов;
 $Q_{\text{упр}}$ – управление контактором привода шнека;
 $Q_{\text{засл}}$ – состояние i -й двухпозиционной заслонки;
 R – радиус цилиндрической части дозатора;

r – радиус выходного отверстия дозатора;
 S – среднеквадратичное отклонение;
 S_i – площадь открытия i -й заслонки;
 t – время;
 t_0 – момент времени выключения дозирования сыпучих материалов;
 t_1 – момент получения дозы компонента сыпучих материалов;
 $t_{i\text{д}}$ – время дозирования i -го компонента;
 $t_{i\text{дир}}$ – директивное время дозирования компонентов;
 $t_{J(0,t)}$ – директивное время дозирования в пределах заданной погрешности;
 V – объем набранных в дозатор компонентов;
 $V_{\text{доз}}$ – объем бункера дозатора;
 $V_{\text{кон}}$ – объем конусной части бункера дозатора;
 $V_{\text{цил}}$ – объем цилиндрической части дозатора;
 v_B – скорость частиц падающего материала в области касания с поверхностью неподвижного материала;
 v_{flo} – скорость истечения/прохождения компонента;
 v_{floA} – скорость истечения i -го компонента из расходной емкости в дозатор;
 α – угол конуса дозатора;
 α_3 – угол открытия заслонки;
 δ – погрешность дозирования;
 δ_{min} – минимальный заданный предел погрешности дозирования;
 δ_{max} – максимальный заданный предел погрешности дозирования;
 Δp – перепад давления на выходе заслонки;
 μ_i – коэффициент расхода i -го компонента;
 π – константа 3,14;
 ρ_i – плотность дозируемого i -го компонента;
 τ – время падения частиц компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения эффективности, качества и надежности ТП производства газобетона необходим комплексный учет и анализ как «машинной части» АСУТП, так и человеческого фактора. Следовательно, необходимо анализировать информацию о состоянии отдельных звеньев и блоков всей линии, осуществлять контроль энергозатрат, состояний электрического и технологического оборудования, наличия сырья и его физических характеристик, режимов работы электроприводов, гидроприводов и пневмоприводов (машинная часть системы), а также учитывать возможности оператора по приему, переработке технологической информации, принятии им решения и исполнению управляющих воздействий (человеческий фактор).

Таким образом, в процессе разработки АСУТП возникает необходимость получения комплексной математической модели, достаточно точно описывающей, как взаимодействие оператора с ЧМИ, так и работу ТП, динамику исполнительных механизмов,

потоки дозируемых компонентов, оборудования ТП, датчики и т. д.

Система «оператор-АСУТП» является ЧМС. Применение математических методов для разработки ЧМС, ввиду сложности операторской деятельности, часто позволяет оценивать ее лишь приближенно [1]. В этом случае, эффективно использование имитационного моделирования ЧМС и математического аппарата теории массового обслуживания [1, 2].

Поэтому, на основе комплексной математической модели целесообразно построить ИМ управления конкретным ТП. На основании результатов имитационного моделирования делается вывод об обоснованности предлагаемого варианта ЧМИ, алгоритма управления, принимается решение об их дальнейшей разработке, либо о переходе на другие варианты ЧМИ, методы или алгоритмы управления.

Объектом исследования являются методы и средства автоматизации процессов управления сложными ТП.

Предметом исследования являются модели, методы и средства повышения эффективности автоматизации процессов управления технологическими комплексами газобетонного производства.

На практике в производстве газобетона используются процессы, как многокомпонентного дозирования (в один общий дозатор несколько компонентов), так и однокомпонентного дозирования. Модели однокомпонентного, например [3–5], и многокомпонентного дозирования [6, 7], построены без учета человеческого фактора.

Цель работы – повышение эффективности и качества процессов управления ТП приготовления газобетона на основе создания комплексной математической модели, формализующей деятельность человека-оператора и физические процессы, происходящие в ходе ТП, с учетом характеристик исполнительных механизмов и режимов их управления, а также ее практическая реализация в виде ИМ процесса управления дозированием материалов газобетона на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Деятельность оператора связана с объектом автоматизированного управления в виде технологической линии производства газобетона. ТП приготовления газобетона укрупнено может быть представлен следующей последовательностью операций: дозирование; смешивание; сушка; порезка; термическая обработка и возврат отходов на дозирование после смешивания и порезки.

АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» предназначена для выполнения первых двух операций. Поэтому, необходима разработка математической модели процессов дозирования (многокомпонентного и однокомпонентного) компонентов газобетонной смеси (жидких и сухих) и их смешивания.

Реализовать точное дозирование сыпучих материалов довольно сложно [8]. Причиной потери точности дозирования является влияние множества факторов на поведение сыпучего материала. Вследствие этого для порционного (дискретного) дозатора момент получения дозы является случайной величиной t_1 со своим распределением $f_{t_1}(t)$. Таким образом, при принятии решения о выключении в момент t_0 вероятность ошибки имеет вид

$$P = \int_{t_0}^{t_1} f_{t_1}(t) dt.$$

Смеситель, как объект управления описывается системой дифференциальных уравнений, число которых зависит от количества компонентов смеси. Математическая модель сводится к формированию ряда независимых решений, которые отображают режимы отдельных стадий ТП производства газобетона. В такой модели эффективность достижения оптимального управления зависит от степени согласованности соответствующих параметров, точностных характеристик датчиков, инерционности исполнительных механизмов и контроля потоков компонентов газобетонной смеси. Кроме этого оптимальное управление подразумевает достижение качества получаемой смеси совместно с обеспечением $t_{\text{дир}}$ в пределах заданной погрешности

$$t_{J(\theta, t)} = \sum_{i=1}^N t_{ид} \rightarrow \sum_{i=1}^N t_{идир} \quad \delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$$

Несоответствие директивному времени приводит к удлинению времени цикла, рассогласованию режимов и к снижению технологической эффективности вследствие неоптимальной загрузки оборудования.

Полученная комплексная математическая модель является базой для построения ИМ ТП приготовления газобетона. Для оценки количественных характеристик деятельности оператора АСУТП возможно использовать номенклатуру предложенных показателей [1, 9].

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Так как процесс дозирования сухих и жидких компонентов ТП приготовления газобетона является сложным и состоит из нескольких более мелких стадий, то были исследованы модели схожих ТП и аппаратов. В [10] описывается модель весового дозирования сыпучих материалов, использующая модель асинхронного двигателя при двухскоростном способе весового дозирования без описания преобразователя частоты. Здесь также учитывается задержка, с которой материал попадает в бункер, определяемая временем падения. Высота и время падения определяют по упрощенной (цилиндрической) геометрии бункера. При этом не учитывается скорость истечения материала из расходной емкости и динамическая со-

ставляющая его веса. В [3–5] исследованы динамика потоков различных материалов, свойства различных материалов и их истечения из бункеров, что позволяет описать отдельные процессы, бункерные устройства, но в основном описано однокомпонентное дозирование, а в [5] – непрерывное дозирование жидкостей. Наиболее подробно процесс дискретного дозирования сыпучих материалов описан в работах [6, 7]. Однако, в них описан только набор компонентов с помощью вибропитателя без выгрузки. Кроме того, высота падения компонента не связана с геометрией бункера и с объемом набранного материала.

Имеющиеся математические описания процессов и агрегатов дозирования в этих и многих других работах, представляют собой ценный, но разрозненный материал, который требовал обобщения в виде одной модели дозирования компонентов в составе ТП производства газобетона с учетом операторской деятельности по управлению этим ТП.

Для описания и количественной оценки деятельности человека в эргономике и инженерной психологии используется большое количество различных математических методов. В связи с этим, выбор математического аппарата и построения на его основе адекватной математической модели становится самостоятельной проблемой [1]. Однако, по результатам проведенного в [11–13] анализа моделей процесса функционирования ЧМС, наиболее универсальными из них являются функционально-структурная теория и ОСМ А. И. Губинского [14].

Недостатком ОСМ является то, что его можно применять только для процессов без последствия и при отсутствии зависимых операций.

Функционально-структурная теория и ОСМ получили дальнейшее развитие в многочисленных работах коллег и последователей. Найдены также методы решения указанных выше недостатков ОСМ, например [11], где предложена интеграция ОСМ с методом имитационного моделирования. Поэтому, для достижения поставленной цели, для моделирования деятельности оператора был выбран ОСМ.

Для построения комплексной математической и имитационной моделей ТП необходимо исследовать влияние основных факторов и возможных режимов на динамику процесса дозирования газобетонной смеси [15].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплекс дозирочно-смесительного отделения ЗАО «Мотор Сич» предназначен для дозирования составляющих газобетонной смеси согласно установленной в технологии рецептуре, приготовления смеси в смесителе и ее выгрузки в тележку с формой. Комплекс осуществляет дозирование пяти компонентов смеси: шлама, алюминиевой суспензии, воды, ИКВ и цемента. При этом, используются два двухкомпонентных дозатора (для сыпучих компонентов и шлама) и один однокомпонентный дозатор суспензии. Сухие компоненты подаются в дозатор при помощи шнековых питателей. Для измерения веса всех компонентов смеси используются тензометрические датчики.

Рассмотрим математическую модель процесса двухкомпонентного дозирования сухих компонентов. Конечным параметром, характеризующим производительность дозатора технологической линии и системы управления, является весовой показатель i -го компонента газобетона:

$$G_i(t) = \int_{t_1}^{t_2} F_i(t, q) \cdot \rho_i(t) \cdot g dt, \quad (1)$$

При этом поток компонента модулируется производительностью шнекового питателя $P_i(t, q)$, которая зависит от максимальной производительности шнекового питателя $P_{\max i}(q)$ [10], частоты на выходе «преобразователь частоты-асинхронный двигатель – редуктор» $f_{\text{вых}}(t)$ и управления контактором привода шнека $Q_{\text{упр}i}(t)$:

$$P_i(t, q) = P_{\max i}(q) \cdot f_{\text{вых}}(t) \cdot Q_{\text{упр}i}(t). \quad (2)$$

Введем векторный параметр потока i -го компонента $F(t)$, который описывается вектором следующих параметров:

$$F_i(t) = \{F_i(t, q), \rho_i(t)\}. \quad (3)$$

Поток $F_i(t, q)$ компонентов из расходной емкости зависит от состояния выходной заслонки $Q_{\text{засл}i}(t)$ и находится по формуле:

$$F_i(t, q) = S_i(t, q, \alpha_3) \cdot v_{\text{пл}i}(t). \quad (4)$$

Площадь открытия заслонки вычисляется по формуле:

$$S_i(t, q, \alpha_3) = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \cdot (1 - \cos \alpha_3(t)). \quad (5)$$

Поток компонентов на выходе из шнекового питателя (поток в дозатор) рассчитываем по формуле:

$$F_{iA}(t) = \begin{cases} F_i(t, q) = S_i(t, q, \alpha_3) \cdot v_{\text{пл}i}(t), & \text{если } P_i(t, q) \geq F_i(t, q); \\ P_i(t, q) = P_{\max i}(q) \cdot f_{\text{вых}}(t) \cdot Q_{\text{упр}i}(t), & \text{если } F_i(t, q) > P_i(t, q). \end{cases} \quad (6)$$

Масса компонентов в дозаторе m и масса пустого дозатора $m_{\text{доз}}$ создают статическое усилие $P_{\text{стат}}$, пропорциональное весу дозатора с компонентами газобетонной смеси $G(t)$. Практика дозирования показывает, что после закрытия заслонки вес в дозаторе еще некоторое время (в течение около 0,5 с) увеличивается, а затем стабилизируется на меньшем значении. Это обусловлено инерционностью исполнительных механизмов и временем стабилизации падения частиц компонентов от выходного патрубка заслонки питатель (точка А рис. 1) до точки падения (точка В рис. 1), а также динамическим воздействием $P_{\text{дин}}$ падающих компонентов на емкость дозатора в течении времени дозирования.

Таким образом, в данной модели необходимо найти $P_{\text{дин}}(t)$. С этой целью, скорость падения частиц набираемого компонента v_B определяется по высоте падения частиц компонентов $h(t)$ и времени падения частиц компонентов τ .

Объем дозатора состоит из объема его цилиндрической $V_{\text{цил}}$ и конической $V_{\text{кон}}$ (усеченный конус) части (рис. 1):

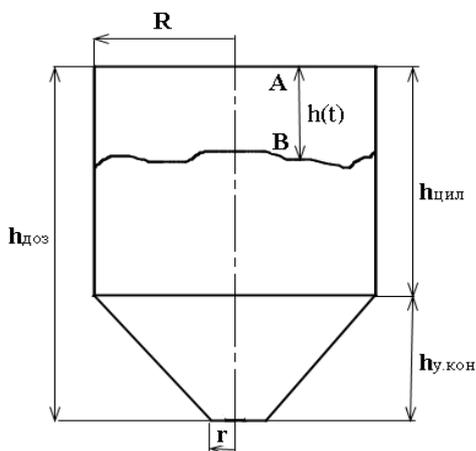
$$V_{\text{доз}} = V_{\text{цил}} + V_{\text{кон}} = \pi \cdot R^2 \cdot h_{\text{цил}} + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{\text{у.кон}} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2). \quad (7)$$

Поток дозируемых в точке B компонентов определяется по формуле:

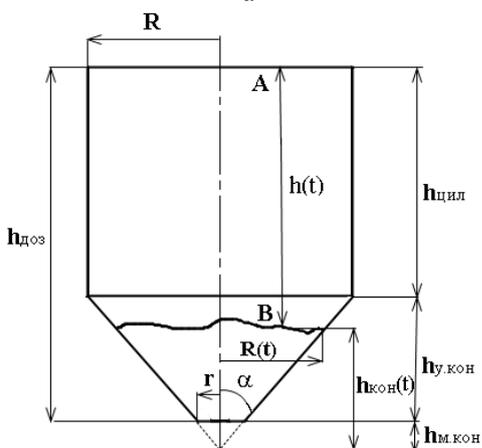
$$F_{iB}(t) = F_{iA}(t - \tau). \quad (8)$$

Высота падения частиц компонентов $h(t)$ изменяется по мере наполнения дозатора и определяется по формуле:

$$h(t) = \begin{cases} h_{\text{доз}} - \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V(t)}{\pi \cdot \text{tg}^2 \alpha}}, & \text{если } V(t) < V_{\text{кон}}; \\ \frac{V_{\text{доз}} - V(t)}{\pi \cdot R^2}, & \text{если } V(t) > V_{\text{кон}}. \end{cases} \quad (9)$$



а



б

Рисунок 1 – Возможные варианты загрузки компонентами газобетонной смеси:

а – в цилиндрической; б – в конической части дозатора

Объем набранных в дозатор компонентов определяется по формуле:

$$V(t) = \sum_{i=1}^2 \int_{t_1}^{t_2} F_{iB}(t) dt. \quad (10)$$

Скорость падающего компонента вблизи области касания с поверхностью уже поступивших в дозатор компонентов определяется по формуле:

$$v_B = \tau g = \sqrt{2g h(t)}. \quad (11)$$

При абсолютно неупругом соударении (скорость после взаимодействия равна нулю) динамическая сила воздействия падающего материала определяется [7] по формуле:

$$P_{\text{дин}}(t) = F_{iB}(t) \cdot \rho_i \cdot v_B = \sqrt{2g h(t)} \cdot F_{iB}(t) \cdot \rho_i(t). \quad (12)$$

Сила воздействия на тензометрический датчик веса для набора складывается из веса пустого дозатора $G_{\text{доз}}$, статической и динамической компонент и определяется по формуле:

$$P_{\Sigma}(t) = G_{\text{доз}} + g \cdot \sum_{i=1}^2 \int_{t_1}^{t_2} F_{iB}(t) \cdot \rho_i dt + v_B \cdot F_{iB}(t) \cdot \rho_i, \quad (13)$$

В соответствии с рецептом, производится также подача и дозирование жидких компонентов газобетонной смеси. При наборе компонентов используется трехпозиционная круглая поворотная заслонка. Ее пропускная способность зависит от площади открытия, которая регулируется двумя сигналами на открытие заслонки на 90 градусов ($Q_i(t)$) и открытие заслонки на 30 градусов ($Q_{ig}(t)$) сигналов управления, соответственно грубого и точного набора i -го компонента смеси [7].

Поток i -го компонента на входе дозатора в точке A (выход из заслонки) определяется параметром потока $F_i(t, q)$ компонентов из расходной емкости:

$$F_{iA} = F_i(t, q) = \mu S_i(t, q, \alpha_3) \cdot v_{\text{ifloA}}(t). \quad (14)$$

Скорость истечения компонентов из расходной емкости в начальном приближении принята постоянной и равна [5]:

$$v_{\text{ifloA}}(t) = \sqrt{\Delta p \cdot \frac{2g}{\rho_i}}. \quad (15)$$

Скорость истечения меняется случайным образом вследствие: изменения перепада давления; колебаний уровня в расходной емкости; неоднородности материалов; погодных условий; набора компонентов в расходные емкости во время дозирования. Поэтому, в процессе дозирования требуется идентификация ско-

рости истечения потока компонентов и, с учетом этого, изменение момента переключения набора (грубо/точно) и стабилизация потока дозируемых компонентов.

Вода подается в дозатор не из накопительной емкости, а по трубопроводу с давлением в 5 бар. Поэтому, для расчета ее скорости истечения в формуле (15) необходимо принять Δp постоянной и равной 500000 Па.

При падении потока компонента, исходя из условия сохранения энергии, его скорость в момент касания поверхности (точка B) определяется по формуле:

$$v_{iB}(t) = \sqrt{v_{iFloA}^2(t) + 2gh(t)}. \quad (16)$$

Поток в этой точке определяется согласно выражению (8), а высота падения частиц и объем набранной воды рассчитываются по формулам (9) и (10) соответственно. Суммарный вес дозатора получается последовательным преобразованием изменяющегося потока жидких компонентов газобетонной смеси в весовые показатели в дозаторе. Потоки на выходе соответствующих дозаторов рассчитываются по формулам (14) и (15), а сила воздействия (масса компонентов) на тензометрический датчик весов дозаторов рассчитываются по формуле (13).

Оператор не в состоянии отслеживать динамику набора массы компонентов в дозаторы с цифрового поля вывода на экране ЧМИ. Ему важна только фиксация момента конечной набранной массы компонента. Поэтому, геометрией (точки A и B) дозаторов можно пренебречь, принять поток в точке B равным потоку на входе в дозатор (точка A), т.е. $F_{iB}(t) = F_{iA}(t)$ и в формуле (13) учитывать только статическую составляющую:

$$P_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^2 \int_{t_1}^{t_2} F_{iB}(t) \cdot \rho_i \cdot dt. \quad (17)$$

На основании разработанных моделей дозирования сухих и жидких компонентов, принятых ограничений и начальных условий, конечных директивных заданных значений веса каждого компонента, а также, исходя из скорректированных, по результатам выполнения предыдущего цикла, параметров модели (v_{iFlo} и др.) определяется время дозирования компонентов и стадий дозирования в ИМ.

Приведенные выше модели формализуют только «машинную» часть АСУТП. Для моделирования процесса функционирования АСУТП с учетом деятельности оператора используется ОСМ. В соответствие с данным методом, процесс функционирования задается в виде ФС и представляется состоящим из ряда ТФЕ, комбинации из которых образуют ТФС. Существует библиотека ТФС с расчетными формулами для определения таких основных показателей качества функционирования как: вероятность безошибочного

выполнения АФО B^1 ; математическое ожидание M и среднеквадратичное отклонение S времени выполнения АФО [14]. Для определения данных показателей производится постепенное «сворачивание» всей ФС путем замены ТФС на эквивалентные ТФЕ. Редукция продолжается до тех пор, пока вся ФС не будет сведена до одной эквивалентной рабочей операции. Показатели качества ее выполнения и будут равны показателям качества выполнения всей ФС.

Приведем АФО при проверке нулевых значений в дозаторе «Сухие», с указанием ТФЕ, моделирующих реальные операции, выполняемые оператором линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич». ЧМИ состоит из пульта управления и набора экранных форм, отображаемых на операторной панели ОР 177В.

1) Считывание значений массы сухих компонентов с экрана «Общий вид» (моделируется рабочей операцией P_1).

2) Проверка на равенство считанных значений нулю (контрольная операция K_1). Если значение равно нулю, то «Конец», иначе п. 3).

3) Переключение двухпозиционного тумблера на пульте управления в ручной режим «РУЧ» (рабочая операция P_2).

4) Переход в «Стартовый экран дозирования» посредством нажатия кнопки F14 (рабочая операция P_3).

5) Задержка на открытие формы «Стартовый экран дозирования» (операция задержки Z_1).

6) Выбор дозатора сухих посредством нажатия соответствующей кнопки (рабочая операция P_4).

7) Задержка на время открытия формы «Дозатор сухих» (операция задержки Z_2).

8) Открыть заслонку на выгрузку посредством нажатия кнопки F11 (рабочая операция P_5).

9) Задержка на время открытия заслонки (операция задержки Z_3).

10) Включение обдува дозатора посредством нажатия кнопки F10 (рабочая операция P_6).

11) Задержка на время обдува (операция задержки Z_4).

12) Выключение обдува посредством нажатия кнопки F10 (рабочая операция P_7).

13) Ожидание снятия избыточного давления в дозаторе (операция задержки Z_5).

14) Закрыть заслонку на выгрузку посредством нажатия кнопки F12 (рабочая операция P_8).

15) Задержка на время закрытия заслонки (операция задержки Z_6).

16) Считывание значений массы сухих компонентов с экрана «Дозатор сухих» (рабочая операция P_9).

17) Проверка на равенство считанных значений нулю (контрольная операция K_2). Если значение равно нулю, то «Конец», иначе п. 10).

Модель данного АФО представляется в виде ФС с использованием языка ОСМ (рис. 2).

Исходные показатели качества выполнения рабочих, контрольных операций и операций задержек

(табл. 1) взяты из [14, 16], технических условий, а также частично получены в ходе производственного эксперимента и учитывают конструктивные особенности ЧМИ, используемого оператором. Фрагмент ФС, отмеченный как $P_{\Sigma 1}$ (рис. 2), является ТФС №2 – «последовательное выполнение рабочей операции и контроля функционирования» [14]. Фрагменты ФС, отмеченные как $P_{\Sigma 2}$ и $P_{\Sigma 3}$ (рис. 2), являются ТФС №1 – «последовательное выполнение рабочих операций». Эквивалентная ТФЕ $P_{\Sigma 3}$ и контрольная операция K_2 (рис. 2), образуют ТФС №12 – «рабочая операция с контролем функционирования без ограничения числа циклов» (эквивалентная ТФЕ $P_{\Sigma 4}$). И, наконец, эквивалентные ТФЕ $P_{\Sigma 1}$, $P_{\Sigma 2}$ и $P_{\Sigma 4}$ также образуют ТФС №1. Протокол свертки ФС (рис. 2) можно представить в табличном виде (табл. 2).

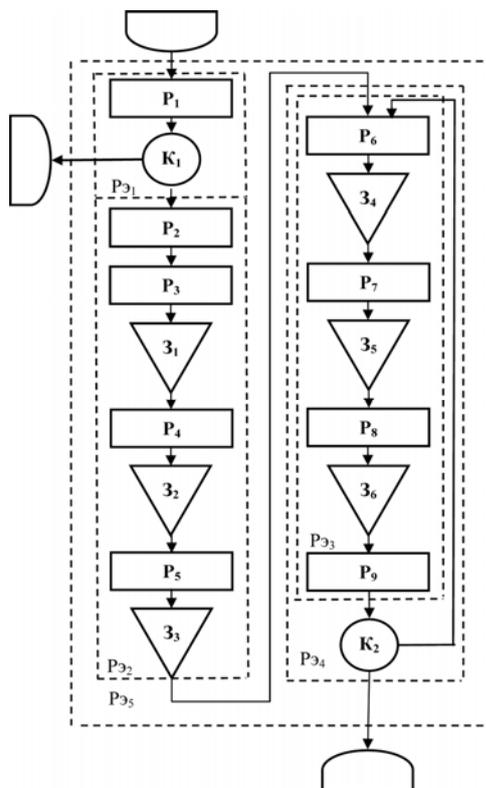


Рисунок 2 – Функциональная сеть алгоритма функционирования оператора при проверке нулевых значений в дозаторе «Сухие»

В соответствии с данными табл. 2 итоговые показатели качества АФО следующие: вероятность безошибочного выполнения АФО $B^1 = 0,9711$; математическое ожидание $M(T) = 66,164$ с и среднеквадратичное отклонение времени выполнения АФО $S(T) = 13,63$ с.

Рассмотренные выше модели образуют комплексную математическую модель формализующую, как процессы дозирования и смешивания, так и деятельность оператора и являются основой для построения ИМ процесса функционирования АСУТП дозирования

материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич».

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Имитационное моделирование проводилось с использованием авторского инструментария в виде системы имитационного моделирования СИМ-СИ, предназначенной для моделирования систем массового обслуживания (Свидетельство о регистрации авторского права на произведение № 74996 от 27.11.2017). Для создания ИМ и их формального описания в СИМ-СИ используется транзактный способ организации квазипараллелизма. Модели оформляются в виде типовых процедур на языке C++, а также процедур и функций разработанной специализированной библиотеки (в виде файла simc.cpp). Для реализации функциональности данной библиотеки и обеспечения работоспособности ИМ, разработана компонента дополнения simc.h для среды разработки QtCreator. Линия приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» работает по две восьмичасовые смены в день. Моделировалась ее работа в течение 30 дней. Единицей времени в модели выбрана одна секунда. Время загрузки программной части АСУТП, а также время перехода между экранами ЧМИ данной АСУТП равномерно распределено и составило 30 ± 2 с и $2,0 \pm 0,2$ с соответственно. Количество рецептов газобетонной смеси равно 11. Для моделирования выбран рецепт №6 приготовления газобетона: ИКВ – 180,3 кг, цемент – 76,5 кг; суспензия 17,4 кг, шлам 323,1 кг, вода 120,1 кг. Диаметры заслонок набора цемента и ИКВ дозатора сухих равны 125 мм. Диаметры входных заслонок: дозатор шлама – 100 мм и 50 мм (для воды); суспензии – 40 мм. Диаметры выходных заслонок: смесителя – 250 мм; дозаторов сухих – 200 мм, суспензии – 50 мм и шлама – 100 мм. Время открытия и закрытия всех заслонок равномерно распределено и равно $1,95 \pm 0,05$ с. Скорость истечения ИКВ принята $0,050$ м³/с. Производительность шнекового питателя составляла $3,7 \times 10^{-3}$ м³/с. Плотность шлама, суспензии и смеси составляет $2,65 \times 10^3$, $2,7 \times 10^3$ и $1,8 \times 10^3$ кг/м³ соответственно. Перепад давления при снижении уровня в дозаторах шлама и суспензии учитывался для пяти уровней с шагом 20%. Директивное время для всех рецептов не должно превышать 17 минут при соблюдении точности дозирования для шлама и воды 1%, для суспензии и сухих 0,5%.

Кроме возможных ошибок оператора, в ИМ была учтена наиболее часто встречающаяся в ходе ТП неисправность – зависание материала в бункере сухих. Данная неисправность поступает в модель в соответствии с распределением Пуассона со средней интенсивностью пять раз в течение каждых восьми часов. Так как в полученной ИМ все емкости расходных материалов считались неограниченными и не учитывались иные виды возможных неисправностей, можно говорить о том, что она является моделью некоего «идеализированного» процесса функционирования АСУТП приготовления газобетонной смеси.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты имитационного моделирования ТП приведены на рис. 3 и в табл. 3. На рис. 3 приведена временная диаграмма дозирования и смешивания компонентов смеси по рецепту №6 для двух вариантов диаметра входной заслонки дозатора сухих (125 и 150 мм). В табл. 3 представлен фрагмент итоговых статистических данных за 30 рабочих дней, позволяющих дать количественную оценку работы оператора АСУТП и ТП в целом.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Адекватность математических моделей процессов дозирования и смешивания была доказана при их практическом применении в моделировании АСУТП приготовления газобетона Бершадского завода газобетонных изделий. Приведенные результаты [17] согласуются с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 6% в динамическом и менее 1% в статическом режимах.

Таблица 1 – Показатели качества выполнения рабочих, контрольных операций и задержек

Показатель		Операции							
		P_1, P_9	P_2	P_3, P_5, P_6, P_7, P_8	K_1, K_2	$3_1, 3_2$	$3_3, 3_6$	3_4	3_5
Вероятность, B^1		0,998	0,9969	0,9951	-	1,0	1,0	1,0	1,0
Вероятность	K^{11}	-	-	-	0,990	-	-	-	-
	K^{00}	-	-	-	0,975	-	-	-	-
Временной	M, c	0,178	0,94	0,48	0,29	2,00	1,95	50,0	2,00
	S, c	0,018	0,12	0,13	0,11	0,20	0,05	10,0	0,10

Таблица 2 – Табличный протокол свертки функциональной сети

№	Сворачиваемые ТФЕ	Эквивалентная ТФЕ			
		Обозначение	B^1	M	S
1	P_1, K_1	$P_{Э1}$	0,988	0,468	0,128
2	$P_2, P_3, 3_1, P_4, 3_2, P_5, 3_3$	$P_{Э2}$	0,9833	8,330	0,960
3	$P_6, 3_4, P_7, 3_5, P_8, 3_6, P_9$	$P_{Э3}$	0,9833	55,568	10,558
4	$P_{Э3}, K_2$	$P_{Э4}$	0,9996	57,366	12,542
5	$P_{Э1}, P_{Э2}, P_{Э4}$	$P_{Э5}$	0,9711	66,164	13,630

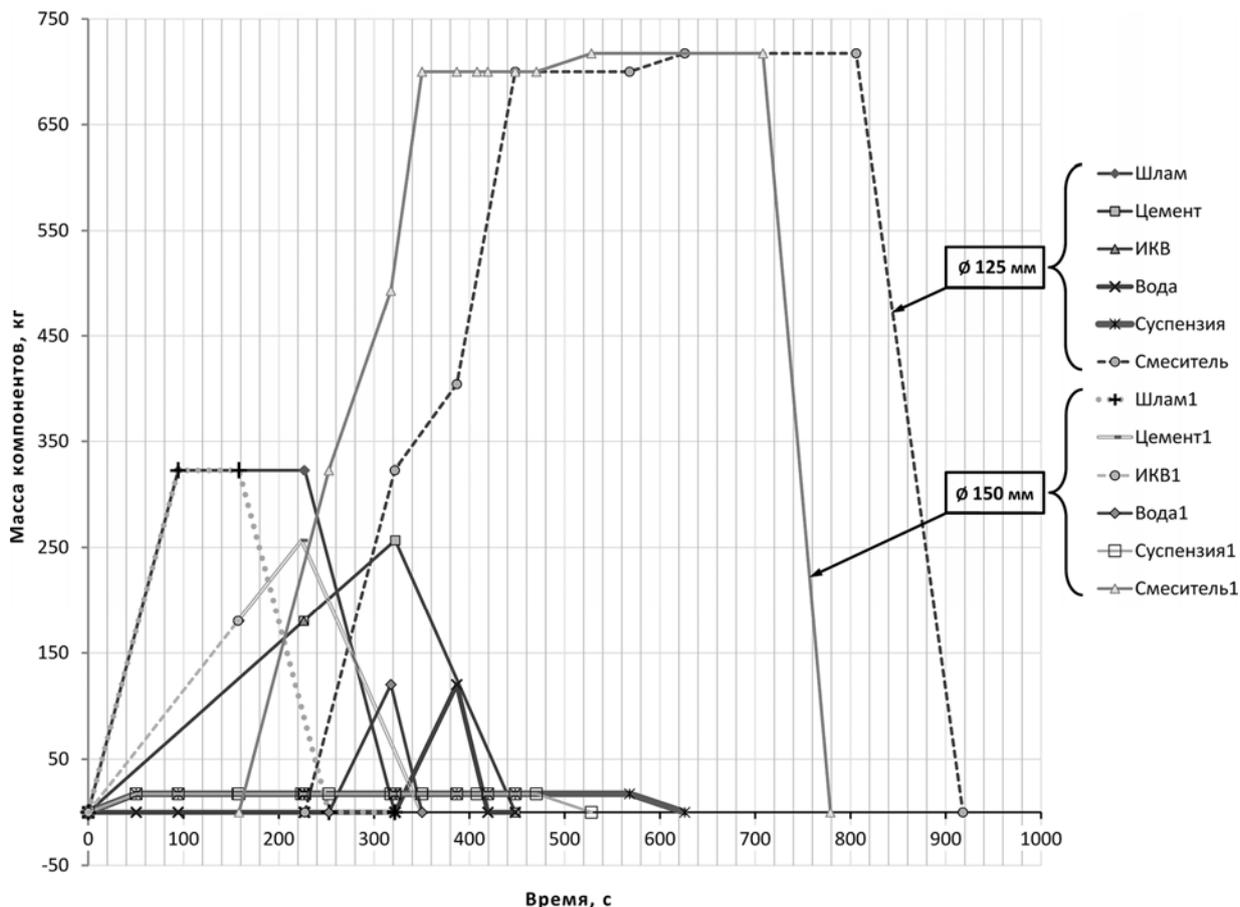


Рисунок 3 – Временная диаграмма дозирования и смешивания компонентов смеси

Таблица 3 – Показатели, характеризующие технологический процесс и деятельность оператора АСУТП

Показатель	Диаметр 125 мм			Диаметр 150 мм			Диаметр 200 мм			Оптимальное (предельное) значение
	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	
Коэффициент загрузки	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,06	0,09	0,09	(0,75)
Максимальный период занятости, мин	1,88	3,35	2,93	1,31	2,33	2,03	0,66	1,31	1,14	(15 ÷ 20)
Средняя длина очереди	0,66	0,11	0,33	0,46	0,43	0,25	0,23	0,43	0,43	2 ÷ 3
Максимальная длина очереди	2	2	2	2	2	2	2	2	2	(5 ÷ 9)
Период цикла ТП, с	767	918	883	656	780	752	546	643	623	Директивное время 1020

Результаты эксперимента для линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» показали, что используемые заслонки набора цемента и ИКВ (диаметр 125 мм), более чем в пять раз ограничивают входной поток в дозатор сухих, вырабатываемый шнеком, так как поток сухих компонентов через полностью открытую заслонку, составил $6,13 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

С целью нахождения оптимального (с точки зрения общего времени цикла приготовления смеси газобетона и времени работы электропривода смесителя, определяющих рациональное использование энерго-ресурсов) варианта диаметра заслонки было проведено моделирование с заслонками больших диаметров (150 и 200 мм) для трех рецептов, с различным пропорциональным составом сухих и жидких компонентов. Кроме вышеуказанного рецепта №6, проведено моделирование для рецепта №1 (ИКВ – 100 кг, цемент – 110 кг; суспензия – 25 кг, шлам – 300 кг, вода – 50 кг) и №9 (ИКВ – 160 кг, цемент – 81 кг; суспензия – 14 кг, шлам – 290 кг, вода – 140 кг).

Эксперимент с заслонкой диаметром 200 мм, для всех трех рецептов ожидаемо привел к сокращению времени цикла приготовления газобетона (табл. 3).

Однако, переход на большие диаметры входных заслонок дозатора сухих линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» влечет за собой организационные, конструктивные сложности и большие финансовые затраты, а также уменьшает точность дозирования из-за увеличения инерционности исполнительного механизма.

Как следует из данных табл. 3, максимальное время цикла ТП для рецепта №6 и заслонки 125 мм составляло 918 с (15 минут 18 с), что не превысило директивное время 17 минут при соблюдении точности дозирования. Поэтому, с учетом того, что результаты моделирования для заслонки диаметром 150 мм показали для всех рецептов существенное сокращение времени цикла с максимальным приближением момента окончания выгрузки жидких компонент к моменту окончания выгрузки сухих, а также учитывая приемлемое для сохранения точности дозирования время срабатывания заслонки такого диаметра, считаем данный вариант оптимальным.

Ни один из приведенных в табл. 3 показателей, характеризующих деятельность оператора, для всех проведенных экспериментов не превысил рекомендуемого в [1, 9] оптимального или предельно допустимого (приведены в скобках) значения. Это свидетельствует об отсутствии информационных перегрузок оператора в ходе рассматриваемого в данной статье «идеализированного» процесса функционирования.

ВЫВОДЫ

В работе построен набор аналитических моделей процессов дозирования, смешивания, а также деятельности оператора, образующих комплексную модель процесса автоматизированного управления ТП приготовления газобетона. Совместно с построенной на ее основе ИМ, они образуют комбинированную аналитико-имитационную модель, эксперименты с которой позволяют проводить анализ и синтез АСУТП и алгоритмов деятельности оператора на основе количественных и временных показателей.

Научной новизной работы, является предложенная комбинированная модель, которая в отличие от известных моделей ТП дозирования и приготовления смеси газобетона, позволяет формализовать деятельность человека-оператора АСУТП, количественно оценить показатели его информационной загрузки, а также дополнительно учитывать в процессе дозирования влияние динамической составляющей веса набора компонентов в бункера дозаторов и скорость истечения компонентов из расходных емкостей.

Практическая ценность работы заключается в том, что комбинированная модель может быть использована для оптимизации структуры, способов управления ТП, в процессе разработки АСУТП, а также в качестве основы для разработки иммерсивных интерфейсов или интеллектуальных тренажеров для подготовки операторов газобетонного производства или производств со сходными физическими процессами. Полученные с помощью данной модели временные и количественные показатели ТП позволяют оценить влияние параметров технологического оборудования и исполнительных механизмов, как на длительность всего цикла приготовления газобетонной смеси, так и на длительность и соотношение его отдельных ключевых элементов.

чевих етапов. На основі аналізу результатів експериментів пропонується варіант діаметрів заслонок набору сухих компонентів, що дозволяє оптимізувати час циклу ТП, збереженням вимоги точності дозування (для шламу і води 1%, для суспензії і сухих 0,5%).

Перспективи подальших досліджень складаються у розвитку запропонованого математичного забезпечення, з метою урахування випадкових впливів на систему «оператор – АСУТП».

БЛАГОДАРНОСТІ

Автори висловлюють подяку керівництву НПО «ЭТНА» (г. Запоріжжя) за надані результати виробничого експерименту лінії приготування газобетонної суміші ЗАО «Мотор Сич».

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Душков Б. А. Основи інженерної психології : учебник для студентів вузів / Б. А. Душков, А. В. Корольов, Б. А. Смирнов. – М. : Академічний проект, 2002. – 576 с.
2. Сердюк С. М. Ергономічні питання проектування людино-машинних систем : навчальний посібник / С. М. Сердюк. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 319 с. ISBN 978-617-529-093-4
3. Зенков Р. Л. Бункерні пристрої / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Ісаєв. – М. : Машинобудування, 1977. – 223 с.
4. Катальмов А. В. Дозування сыпучих і вязких матеріалів: учебник / А. В. Катальмов, В. А. Любартович. – Л. : Хімія, 1990. – 240 с.
5. Видинев Ю. Д. Автоматичне неперервне дозування рідин / Ю. Д. Видинев. – М. : Енергія, 1967. – 109 с.
6. Осадчий В. В. Визначення миттєвої продуктивності виробничого пристрою на основі сигналу з датчика ваги в системі дискретного дозування / В. В. Осадчий // Вісник КДПУ. – Кременчук : КДПУ, – 2008. – Вип. 4 (51) Част. 2. – С. 91–93.
7. Осадчий В. В. Уточнення взаємозв'язків і параметрів електромеханічної системи дозування вібраційного типу / В. В. Осадчий // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Електромеханічні системи, моделювання і оптимізація» КГПУ, 15–17 травня 2007 г. – Вип. 4 (45), Част. 2. – С. 19–21.
8. Дудников Е. Г. Автоматичне управління в хімічній промисловості / Под ред. Е. Г. Дудникова. – М. : Хімія. – 1987, 368 с.
9. Смирнов Б. А. Інженерна психологія. Практичні заняття / Б. А. Смирнов. – К. : Вища школа, 1979. – 192 с.
10. Ткачев В. С. Оптимізація процесу вагового дозування сыпучих матеріалів / В. С. Ткачев, В. А. Ужеловський, В. В. Грубов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. – Дніпропетровськ: ПГАСА, 2009. – № 8. – С. 7–13.
11. Гриф М. Г. Моделі і методи оптимального проектування людино-машинних систем на основі функціонально-структурної теорії / М. Г. Гриф, Н. Д. Ганелина, Е. Б. Цой // Доклади Академії наук вищої школи Російської Федерації. – 2014. – № 4 (25). – С. 70–78. – DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-70-78
12. Тудэвагва Уранчмэг. Автоматизація проектування людино-машинних систем на основі методу послідовної оптимізації: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.17 / Тудэвагва Уранчмэг. – Новосибірськ, 2003. – 177 с.
13. Адиль Омер Юсиф Мохамед. Математичне моделювання і алгоритми оцінки ефективності системи адміністрування локальної комп'ютерної мережі: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.18, 05.13.13 / Адиль Омер Юсиф Мохамед. – М., 2007. – 177 с.
14. Інформаційно-управляючі людино-машинні системи: дослідження, проектування, випробування. Справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Ашерів, І. Л. Бердников і др.; під общ. ред. А. І. Губинського. – М. : Машинобудування, 1993. – 528 с.
15. Філатов А. Н. О виробництві і застосуванні виробів з ячеїстого бетону в Україні / А. Н. Філатов // Теорія і практика виробництва і застосування ячеїстого бетону в будівництві. Збірник наукових праць. Вип. 1. – Дніпропетровськ : ПГАСА, 2005. – С. 43–53.
16. Ашерів А. Т. Сабадаш В. В. Судово-ергономічна експертиза нещасливих випадків / А. Т. Ашерів, В. В. Сабадаш. – Харків : УІПА, 2008. – 145 с.
17. Кулінич Е. М. Підвищення ефективності автоматизації процесів управління технологічними комплексами приготування газобетону: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.07 / Кулінич Едуард Михайлович. – Запоріжжя, 2013. – 157 с.

Стаття надійшла в редакцію 25.05.2018.
Після доробки 05.07.2018.

УДК 004.514:658.5

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ГАЗОБЕТОНУ

Камінська Ж. К. – асистент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Кулінич Е. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Сердюк С. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему підвищення ефективності та якості процесів функціонування автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) виробництва газобетону. Актуальність даної проблеми обумовлюється необхідністю врахування людського фактора при розробці систем даного типу. Об'єкт дослідження – методи і засоби автоматизації процесів управління складними технологічними процесами (ТП). Предмет дослідження – моделі, методи і засоби

підвищення ефективності та якості автоматизації процесів управління технологічними комплексами газобетонного виробництва.

Мета роботи – підвищення ефективності і якості процесів управління ТП приготування газобетону на основі створення комплексної математичної моделі, що формалізує діяльність людини-оператора і фізичні процеси, що відбуваються в ході ТП, з урахуванням характеристик виконавчих механізмів і режимів їх управління, а також її практична реалізація у вигляді імітаційної моделі (ІМ) процесу управління дозуванням матеріалів газобетонної суміші на ЗАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя, Україна).

Метод. Запропоновано рішення розглянутої проблеми у вигляді ІМ процесу функціонування АСУТП приготування газобетону, заснованої на комплексній математичній моделі процесів дозування, змішування компонентів газобетонної суміші та інтерактивної взаємодії оператора з людино-машинним інтерфейсом (ЛМІ) АСУТП при вирішенні ним завдань управління ТП. В ІМ людино-машинна система (ЛМС) «оператор-АСУТП» представлена у вигляді системи масового обслуговування. Для формалізації алгоритму діяльності оператора використаний узагальнений структурний метод А. І. Губинського. Особливість даної ІМ полягає в тому, що вона може бути використана для оцінки та налагодження роботи АСУТП, алгоритмів роботи з ЛМІ.

Результати. Розроблено програмне забезпечення та імітаційна модель ТП виготовлення газобетону на ЗАТ «Мотор Січ», що реалізують запропоновану комплексну модель на основі транзактного способу організації квазіпаралелізму в ІМ.

Висновки. В роботі запропонована комбінована (аналітико-імітаційна) модель процесу автоматизованого управління технологічним процесом приготування газобетону, яка на відміну від відомих моделей управління, що включають процеси дозування та змішування, дозволяє формалізувати діяльність людини-оператора АСУТП, кількісно оцінити показники його інформаційного завантаження, а також додатково враховувати в процесі дозування вплив динамічної складової ваги набору компонентів в бункери дозаторів і швидкість витікання компонентів з витратних ємностей. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення, що дозволяє рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні завдань обґрунтування оптимального вибору структури, способів управління, варіантів ЛМІ, уточнення параметрів системи управління зазначеним ТП, а також при створенні інтелектуальних тренажерів для підготовки операторів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: математична модель, імітаційна модель, оператор, газобетон, людино-машинний інтерфейс, дозування, змішування, транзакт.

UDC 004.514:658.5

THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OPERATING ANALYSIS AND MODELING FOR AERATED CONCRETE PRODUCTION

Kaminska Zh. K. – Assistant of the Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Kulynych E. M. – PhD, Associate Professor, Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Serdiuk S. N. – PhD, Associate Professor, Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of increasing the efficiency and quality of functioning of the Automated Control System (ACS) for aerated concrete production is considered. The relevance of the problem is determined by the need to take into account the human factor in the development of systems of this type. Methods and means of control processes automation with the help of complex technological processes (TP) are the research object. The subject of the research is models, methods and means of increasing the efficiency and quality of control process automation of technological complexes in aerated concrete production.

Objective. The complex mathematical model is to be developed to bring automated control of technological processes for aerated concrete production to the advanced level of its efficiency and quality. The complex mathematical model formalizes human-operator activity and technological process on the physical level including characteristics of actuators and their control modes. Practically the complex mathematical model is implemented as a certain imitation model (IM), which represents control process for dosing the components for aerated concrete mixtures at JSC "Motor Sich" (Zaporizhzhia, Ukraine).

Method. The solution of the considered problem in the form of the IM operating process of the ACS for aerated concrete preparation is proposed. It is based on a complex mathematical model of dosing and mixing aerated concrete components and the interactive work of the operator with the human-machine interface (HMI) of the ACS when solving the TP control tasks. In the IM, the human-machine system "operator-ACS" is presented in the form of a queuing system. To formalize the operator's activity algorithm, the generalized structural method offered by A.I. Gubinsky is used. The peculiarity of this IM is that it can be used to evaluate and debug the ACS and HMI algorithms.

Results. The software and IM of the technological process for aerated concrete production at JSC "Motor Sich" was developed. That implements the proposed complex model based on a transact technique of organizing quasi-parallelism in IM.

Conclusions. The research proposes a combined (analytical-imitation) model of the automated control process for the aerated concrete preparation technology. Unlike other well-known control models which include dosing and mixing processes, this one suggests the approach that allows formalizing the activity of the ACS operator, quantifying the indicators of his information load and taking into account the influence of the dynamical changing of the components set weight in the dispenser hoppers and the components flow velocity from the consumable containers in the dosing process. The conducted experiments proved the operability of the software proposed; such software may be recommended for practical use in solving the problems of justifying the structure optimal choice, control methods, HMI variants, clarifying the ACS parameters for the specified technological processes, and also for development of intelligent simulators to be used for operator training.

© Каминская Ж. К., Кулинич Э. М., Сердюк С. Н., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-21

KEYWORDS: mathematical model, imitation model, operator, aerated concrete, human-machine interface, dosing, mixing, transact.

REFERENCES

1. Dushkov B. A., Korolev A. V., Smirnov B. A. Osnovy inzhenernoy psihologii. Moscow Akademicheskii proekt, Delovaya kniga, 2002, 576 p.
2. Serdiuk S. M. Erhonomichni pytannya proektuvannya lyudyno-mashynnykh system, Navchalnyy posibnyk. Zaporizhzhya, ZNTU, 2013, 319 p. ISBN 978-617-529-093-4 (In Ukrainian)
3. Zenkov R. L. Grinevich G. P., Isaev V. S. Bunkernyye ustroystva. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 223 p.
4. Katalymov A. V., Lyubartovich V. A. Dozirovaniye syipuchih i vyazkih materialov: uchebnyk. Leningrad, Himiya, 1990, 240 p.
5. Vidineev Yu. D. Avtomaticheskoe nepreryivnoye dozirovaniye zhidkostey. Moscow, Energiya, 1967, 109 p.
6. Osadchiy V. V. Opredeleniye mgnovennoy proizvoditelnosti vibropitatatelya na osnovanii signala s datchika vesa v sisteme diskretnogo dozirovaniya, *Visnik KDPU*. Kremenchuk, KDPU, 2008, Vip.4 (51), Chast. 2, pp. 91–93.
7. Osadchiy V. V. Utochneniye vzaimosvyazey i parametrov elektromekhanicheskoy sistemyi dozirovaniya vibratsionnogo tipa, *Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektromekhanichni sistemi, metody modelyuvannya i optimizatsiyi» KGPU, 15–17 maya 2007 g.*, Vip. 4 (45), Chast. 2, pp. 19-21.
8. Dudnikov E. G. Pod red. E. G. Dudnikova Avtomaticheskoe upravleniye v himicheskoy promyshlennosti. Moscow, Himiya, 1987, 368 p.
9. Smirnov B. A. Inzhenernaya psihologiya. Prakticheskie zanyatiya. Kiev, Vischa shkola, 1979, 192 p.
10. Tkachev V. S., Uzhelovskiy V. A., Grubov V. V. Optimizatsiya protsessu vesovogo dozirovaniya syipuchih materialov, *Vestnik Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arhitektury*. Dnepropetrovsk, PGASA, 2009, No. 8, pp. 7–13.
11. Grif M. G., Ganelina N. D., Tsoy E. B. Modeli i metodyi optimalnogo proektirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove funktsionalno-strukturnoy teorii, *Doklady Akademii nauk vysshey shkolyi Rossiyskoy Federatsii*, 2014, No. 4 (25), pp. 70–78. DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-70-78.
12. Tudevtagva Uranchimeg. Avtomatizatsiya proektirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove metoda posledovatelnoy optimizatsii: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.13.17 / Tudevtagva Uranchimeg. Novosibirsk, 2003, 177 p.
13. Adil Omer Yusif Mohamed. Matematicheskoe modelirovaniye i algoritmyi otsenki effektivnosti sistemyi administrirovaniya lokalnoy kompyuternoy seti: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.13.18, 05.13.13. Moscow, 2007, 177 p.
14. Adamenko A. N., Asherov A. T., Berdnikov I. L. i dr.; pod obsch. red. A. I. Gubinskogo Informatsionno-upravlyayushchie cheloveko-mashinnyye sistemyi: issledovaniye, proektirovaniye, ispytaniye. Spravochnik. Moscow, Mashinostroenie, 1993, 528 p.
15. Filatov A. N. O proizvodstve i primenenii izdeliy iz yacheistogo betona v Ukraine, *Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona v stroitelstve. Sbornik nauchnykh trudov. Vyip.1*, Dnepropetrovsk, PGASA, 2005, pp. 43–53.
16. Asherov A. T. Sabadash V. V. Sudebno-ergonomicheskaya ekspertiza neschastnykh sluchaev. Harkov, UIPA, 2008, 145 p.
17. Kulinich E. M. Povyisheniye effektivnosti avtomatizatsii protsessov upravleniya tehnologicheskimi kompleksami prigotovleniya gazobetona: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.13.07. Zaporozhe, 2013, 157 p.