

сравнению с микропроцессорными. Отмечен недостаток применяемого критерия оценки надежности реле защиты и предложен обобщенный критерий для такой оценки.

**Ключевые слова:** микропроцессорные устройства релейной защиты, надежность, релейная защита, срок эксплуатации, интенсивность отказов, относительное количество поврежденных.

**Гуревич В.**

#### Ще раз про надійність мікропроцесорних пристроїв релейного захисту

Стаття є продовженням циклу публікацій автора, присвячених надійності мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Наведені у статті статистичні дані, отримані автором, збігаються з даними інших авторів і підтверджують більш високу надійність електромеханічних реле у порівнянні з мікропроцесорними. Відзначено недолік критерію оцінки надійності реле захисту, який зазвичай застосовується, і запропоновано узагальнений критерій для такої оцінки.

**Ключові слова:** мікропроцесорні пристрої релейного захисту, надійність, релейний захист, термін експлуатації, інтенсивність відмов, відносна кількість пошкоджень.

УДК 621.51: 681.5.015

Э. М. Кулинич, В. В. Зиновкин д-р техн. наук  
Запорожский национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА

Предложены математическая и компьютерная модели системы автоматизированного управления многокомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона совместно с симуляцией режимов работы на базе ПЛК и пакетов (PlcSim, Step-7 и WinCC Flexible) фирмы Siemens. Это позволяет разработать инженерные методы снижения простоев исполнительных механизмов и повысить эффективность технологической линии. Приведено моделирование многокомпонентного процесса дозирования жидких составляющих газобетона.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, дозирование жидких компонентов, многопараметрическая автоматизированная система управления технологическим процессом, газобетон.

**Введение.** Технологические линии производства газобетонов, как объекты автоматизированного управления, являются многомерными, с линейными и нелинейными взаимосвязями между параметрами различной физической природы. В отдельные моменты времени это приводит к несогласованности режимов исполнительных механизмов и работе электротехнического и электротехнологического оборудования в режимах холостого хода. Это является причиной снижения эффективности технологической линии и качества выпускаемой продукции, непроизводительных потерь электроэнергии и аварийных ситуаций. Для достижения более эффективного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетонов необходимо учитывать возможные несогласованности между каналами управления в процессе дозирования и сократить технологические простои исполнительных механизмов.

Для повышения эффективности и оптимального управления технологическим процессом необходимо исследовать влияние различных факторов и возможных режимов на динамику процесса дозирования технологической смеси газобетона [1]. Для решения этой задачи целесообразно использовать интегральный критерий оптимальности многопараметрической системы автоматизированного управления [1–5]. Его сущность состоит в том, что управление осуществляется по трем обобщенным параметрам. Каждый такой параметр состоит из совокупности сигналов одноименной физической природы и их соответствующего количества [1–5]. Такой методологический подход использовался в системе многопараметрического автоматизированного управления многокомпонентного дозирования технологической линии приготовления газобетона [3, 4]. Технологический процесс состоит из ряда операций: приготовления смеси из сухих и жидких компонентов,

а также использования отходов после порезки готовой продукции. Наиболее ответственным является процесс дозирования сухих и жидких компонентов смеси газобетона.

**Целью настоящей работы является** разработка математической и компьютерной моделей оптимального автоматизированного управления дозированием жидких компонентов смесей многопараметрического технологического процесса приготовления газобетона.

**Материал и результаты исследования.** Математическая и компьютерная модели эффективного управления технологическим процессом приготовления газобетона должны удовлетворять условиям оптимального сочетания совокупности параметров различной физической природы. При этом обобщенный критерий оптимальности должен удовлетворять следующему интегральному функционалу [1, 2]:

$$\xi(x, t) = \int_{t_1}^{t_2} \zeta(x, t) \cdot q(x, t) \cdot \rho(x, t) dt, \quad (1)$$

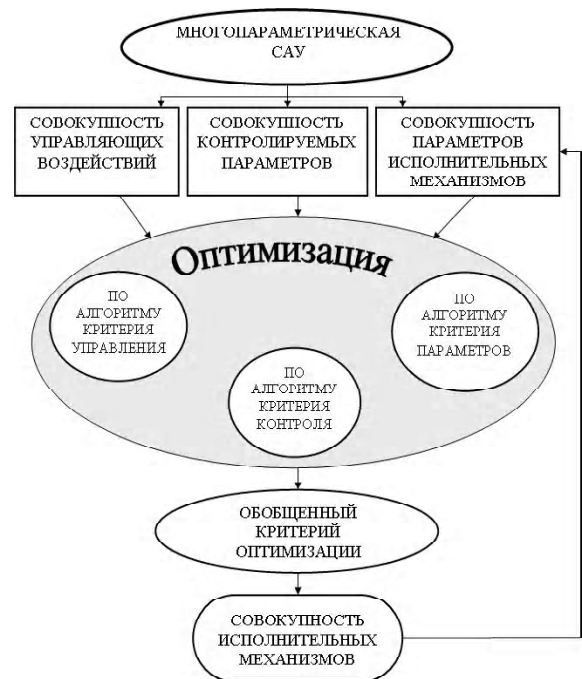
где  $\zeta(x, t) = \sum_{i=1}^{139} \alpha_i(t)$  – совокупность сигналов управления;

$q(x, t) = \sum_{j=1}^{37} \gamma_j(t)$  – контролируемые параметры;

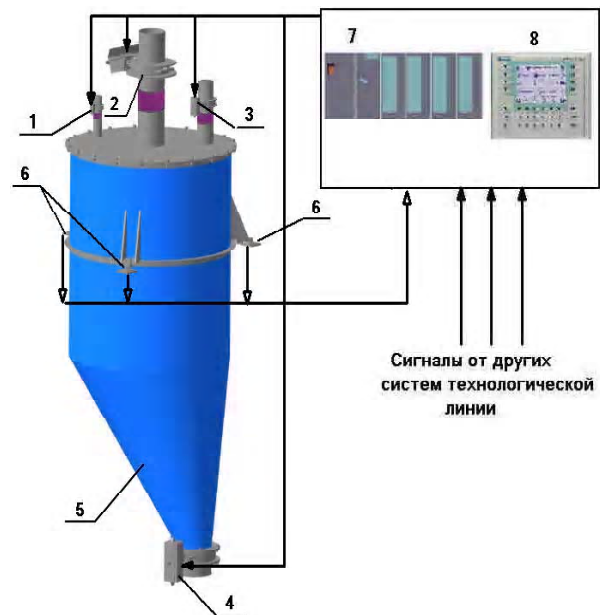
$\rho(x, t) = \sum_{k=1}^{151} \chi_k(t)$  – совокупность сигналов состояния исполнительных механизмов;  $x$  – параметр, зависящий от состояния техпроцесса.

Структурная схема взаимосвязей между обобщенными управляющими, контролирующими параметрами и параметрами состояния исполнительных механизмов многопараметрической системы автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона показана на рис. 1, а на рис. 2 показан многокомпонентный дозатор. Оптимизационный программно-аналитический поиск наиболее эффективного управления технологической линией приготовления газобетона осуществляем по этим обобщенным параметрам. Такими параметрами являются: непосредственно управляющие воздействия на соответствующие исполнительные механизмы; сигналы, характеризующие состояние технологического процесса и оборудования (контролирующие параметры); совокупность сигналов состояния исполнительных механизмов. Эффективность достижения оптимального управления зависит от степени согласованности соответствующих параметров, точностных характеристик датчиков, инерционности исполнительных механизмов, контроля потоков сухих и жидких компонентов газобетонной смеси. При этом процесс дозирования компонентов газобетона и является одним из определяющих. Он зависит

от оптимального управления и формирует эффективность и качество конечной продукции согласно (1). Оптимальное управление обеспечивает минимальное



**Рис. 1.** Структурная схема взаимосвязи между параметрами многопараметрической системы автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона



**Рис. 2.** Многокомпонентный дозатор жидких составляющих компонентов и шламов технологической линии приготовления газобетона и взаимосвязи с системой управления

время дозирования компонентов в пределах заданной точности

$$t_{\xi(x,t)} = \sum_{i=1}^3 t_{iД} \rightarrow \min, \quad \delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$$

где  $\delta$  – точность дозирования,  $\delta_{\min}$ ,  $\delta_{\max}$  – заданные пределы точности дозирования,  $t_{iД}$  – время дозирования  $i$ -го компонента.

При производстве газобетонов используется способ весового дозирования жидких и сухих компонентов. Следует отметить, что на практике используется процесс либо многокомпонентного дозирования (в один общий дозатор несколько компонентов), либо однокомпонентное дозирование (в отдельный дозатор один компонент). В данной статье рассматривается управление многопараметрическим процессом многокомпонентного дозирования жидких компонентов на примере дозатора шламов. В технологической линии этот дозатор используется для дозирования трёх компонентов: песчаного и возвратного шламов и воды обмыва. Внешний вид и расположение исполнительных механизмов дозатора, а также каналы управления и совокупность контролируемых параметров показаны на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения

основных элементов системы техпроцесса: трехпозиционные заслонки (1, 2, 3); выходная двухпозиционная поворотная заслонка (4); бункер дозатора (5); тензометрические датчики с узлами встройки (6); контроллер управления (7); устройство операторного контроля (8). Компоненты дозируются поочередно: обычно сначала песчаный, затем возвратный шлам, после этого дозируется вода обмыва. Каждый компонент дозируется своей трёхпозиционной заслонкой из соответствующей расходной ёмкости. Они образуют один канал потока компонентов газобетонной смеси. Применительно к решаемой задаче необходимым условием является использование текущей информации о динамике наполнения дозатора компонентами газобетонных смесей. Эффективное дозирование достигается путем нахождения оптимального момента переключения исполнительных механизмов в соответствующие позиционные состояния заслонок. Оценка количества жидких компонентов смеси в дозаторе осуществляется по весовым показателям. Для измерения веса используются тензометрические датчики (6).

**Структурно-логическая схема математической модели многокомпонентного дозирования технологического процесса приготовления газобетона** показана на рис. 3. Основными элементами этой модели являются узлы электропневмопривода заслонок дозатора и технологических емкостей, структурно-логическая

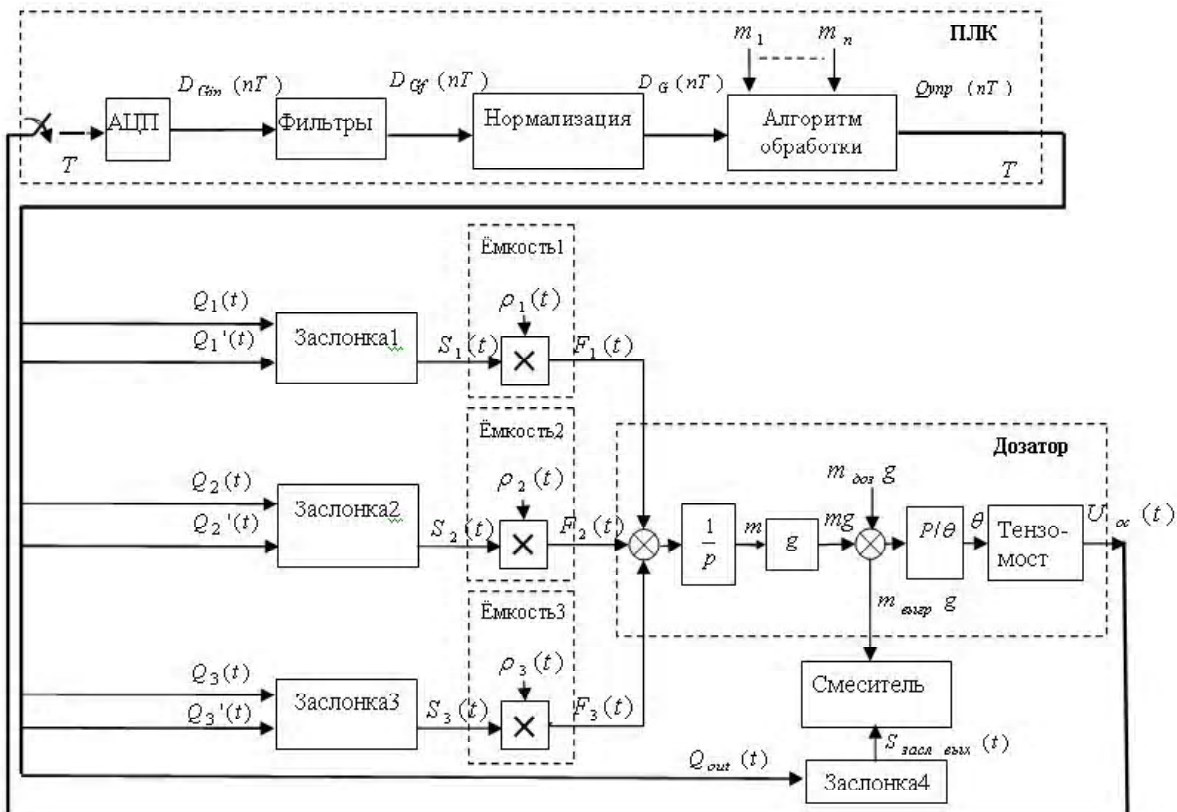


Рис. 3. Структурно-логическая схема математической модели многокомпонентного дозирования технологической линии

модель ПЛК и непосредственно многокомпонентный дозатор технологической линии приготовления газобетона. Предлагаемая математическая модель имеет существенные отличия от разработанной ранее для дозатора сухих компонентов [7]. Отличия состоят в использовании в качестве исполнительных механизмов пневмоприводов. Для набора компонентов используются трехпозиционные заслонки. Управляющие воздействия осуществляются только дискретными сигналами  $Q_i(t)$ . Назначение и функции остальных блоков соответствуют своему прямому назначению, как в [7].

На рис. 3. суммарный вес дозатора получается последовательным преобразованием изменяющегося потока жидких компонентов газобетонной смеси в весовые показатели в дозаторе и представляет собой сигнал обратной связи, который поступает для дальнейшего анализа в блок ПЛК.

На рис. 3 приняты следующие обозначения блоков: «ПЛК» – программируемый логический контроллер, осуществляющий анализ информации обратных связей и формирующий сигналы управления, оптимального для данного временного интервала; блоки «Заслонка  $i$ » предназначены для обеспечения поступления  $i$ -го компонента смеси; блоки «Емкость» формируют сигнал, пропорциональный потоку дозируемого компонента из расходной емкости. Они отображают пропускную способность заслонок и плотность дозируемого компонента. Блок «Дозатор» отображает степень загрузки дозируемыми компонентами и формирует сигнал обратной связи  $U_{oc}(t)$ , пропорциональный суммарной массе компонентов в дозаторе, согласно следующему выражению:

$$G(t) = G_{\text{доз}} + \sum_{i=1}^3 \int_{t_1}^{t_2} F_i(t, q) dt - \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{выгр}}(t, q) dt = \\ = m_{\text{доз}} \cdot g + \sum_{i=1}^3 m_i(t) \cdot g - m_{\text{выгр}}(t) \cdot g, \quad (2)$$

где  $q$  – параметр, характеризующий особенности системы управления использующихся управляющих и исполнительных устройств и механизмов,  $i$  – определяет количество дозируемых компонентов, поступающих в один дозатор,  $\alpha$  – угол открытия заслонки,  $F_i(t, q)$  – поток соответствующего компонента, зависящий от пропускной способности заслонки. Он пропорционален площади открытия заслонки  $S_i(t, q, \alpha)$  и плотности дозируемого компонента  $\rho_i$

$$F_i(t, q) = S_i(t, q, \alpha) \cdot \rho_i \cdot Q_i(t). \quad (3)$$

Масса компонента в дозаторе  $m_i$  определяется по усилию  $P$ , которое создается массами компонентов

$\sum m_i$  и пустого дозатора  $m_{\text{доз}}$ , пропорциональному весу дозатора с компонентами газобетонной смеси  $G(t)$ . Под воздействием этого усилия происходит деформация  $\theta(t)$  механической части системы тензодатчиков, в результате чего генерируется сигнал обратной связи  $U_{oc}(t)$ . Сигнал  $U_{oc}(t)$  поступает на вход блока аналогового ввода ПЛК. Этот блок содержит АЦП, который с периодом квантователя  $T$  преобразует сигнал обратной связи  $U_{oc}(t)$  из аналоговой формы в 16-разрядный цифровой код  $D_{Gin}(nT)$ . Этот цифровой сигнал содержит как полезный сигнал о весе дозатора, так и всевозможные шумы и помехи различного происхождения. Для выделения полезного сигнала в блоке ПЛК производится цифровая обработка сигнала в следующей последовательности: сначала осуществляется фильтрация и формирование сигнала  $D_{Gf}(nT)$ . Затем выполняется нормализация для отображения веса компонентов смеси в килограммах  $D_G(nT)$ . На основании последнего  $D_G(nT)$ , текущего состояния техпроцесса  $x$ , задания набора материалов  $m_i$  и совокупности сигналов состояния исполнительных механизмов  $\rho(x, t)$  формируются соответствующие сигналы управления

$$\zeta(x, t) = u(x, q(x, t), \rho(x, t), t) = u(x, G(t), \rho(x, t), t). \quad (4)$$

Применительно к рассматриваемому техпроцессу, для трёхкомпонентного дозирования, уравнение (4) примет следующий вид:

$$u(x, G(t), \rho(x, t), t) = \sum_{i=1}^3 u_i(x, G(t), \rho(x, t), t) + \\ + u_{\text{вых}}(x, G(t), \rho(x, t), t). \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой совокупность выходных цифровых сигналов  $Q_{\text{упр}}(nT)$ , генерируемых ПЛК. Они используются для управления заслонками набора компонентов смеси в дозатор, а также при выгрузке газобетонной смеси. Взаимосвязи между рассмотренными параметрами описываются следующим выражением:

$$Q_{\text{упр}}(nT) = \sum_{i=1}^3 (Q_i(t) + Q_i'(t)) + Q_{\text{out}}(t). \quad (6)$$

В выражении (6)  $Q_i(t)$  – сигнал управления привода заслонкой? грубого набора  $i$ -го компонента смеси. В этом режиме открытие и закрытие заслонок осуще-

ствляется в соответствии логическому состоянию, определяемому следующими условиями:

$$Q_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } G_i(t) < (G_{i3} - \Delta G_{iT}) \\ 0, & \text{если } G_i(t) \geq (G_{i3} - \Delta G_{iT}) \end{cases} \quad (7)$$

Сигнал управления заслонкой точного набора  $Q_i'(t)$   $i$ -го компонента смеси осуществляется в соответствии следующим условиям логического состояния (см. рис. 4):

$$Q_i'(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } [G_i(t) > (G_{i3} - \Delta G_{iупр})] \vee \\ & \vee [G_i(t) < (G_{i3} - \Delta G_{iT})] \\ 1, & \text{если } (G_{i3} - \Delta G_{iT}) \geq G_i(t) \geq (G_{i3} - \Delta G_{iупр}) \end{cases} \quad (8)$$

Согласно рис. 4 в (7) и (8) приняты следующие обозначения:  $\Delta G_{iT}$  – разность веса от заданного веса компонента  $G_{i3}$ , при которой происходит переход в режим точного дозирования  $i$ -го компонента смеси, в (8)  $\Delta G_{iупр}$  – величина веса (упреждение) от заданного веса  $G_{i3}$ , при которой производится закрытие заслонки в режиме точного дозирования  $i$ -го компонента газобетонной смеси.

**Компьютерная модель многопараметрической системы дозирования** построена в редакторе Simulink пакета Matlab. При этом использована математическая модель [1, 2]. Режимы ПЛК симулированы в связке пакетов фирмы Siemens: PlcSim, технологической линии приготовления газобетона для дозирования трёх компонентов показана на рис. 5. Модель позволяет отслеживать изменение потока компонентов газобетонной смеси и веса дозатора  $G(t)$  в зависимости от функции параметров системы управления, определяемых программой ПЛК.

Данная схема позволяет моделировать динамические режимы системы управления в соответствии фазе техпроцесса. Кроме этого, она позволяет обрабатывать режимы при последовательной дозировке. Моделирование выполнялось в следующей последовательности.

На первом этапе имитировалась загрузка дозатора 200 кг прямого шлама, а затем 180 кг обратного шлама. После выгрузки шламов производился набор и выгрузка 180 кг воды для обмыва. Результаты моделирования показаны на рис. 6, где индексы а, в и е соответствуют параметрам ( $Q1(t), Q2(t), Q3(t)$ ). Они представляют дискретные сигналы управления заслонками, соответственно для грубого дозирования прямого, обратного шлама и воды обмыва; б, з и ж ( $Q1'(t), Q2'(t), Q3'(t)$ ) – дискретные сигналы управления заслонками для точного дозирования соответственно прямого, обратного шлама и воды обмыва; з)  $G(t)$  – текущее значение веса дозатора (на рис. 5 этот сигнал подается на вход контроллера IW322). Грубое и точное регулирование дозирования компонентов осуществлялось путем изменения соответствующих сигналов управления ПЛК.

**Анализ результатов исследований** показал, что при изменении режимов дозирования наблюдается инерционность работы исполнительных механизмов, обусловленная особенностями их динамических характеристик, а также особенностями протекания техпроцесса. В связи с этим весовые показатели жидких компонентов в дозаторе изменяются с задержкой до 0,5 с относительно подачи сигналов управления на исполнительные механизмы.

После стабилизации режимов исполнительных механизмов процесс заполнения дозатора жидкими компонентами смеси газобетона возрастает по линейному закону до момента соответствующего наполнения. После отключения исполнительных механизмов в течение 0,5 с вес дозатора стабилизируется. Это сопро-

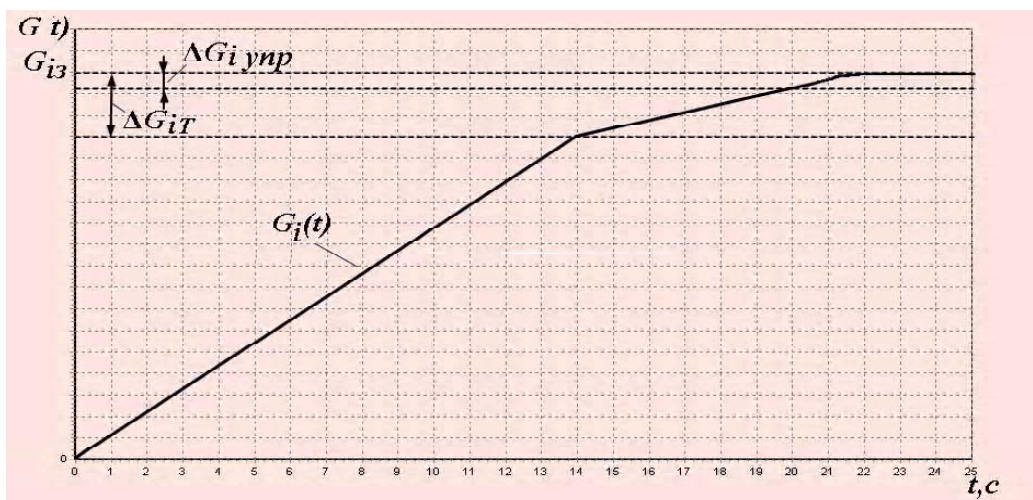


Рис. 4. Диаграмма процесса дозирования компонентов газобетонной смеси с помощью трёхпозиционной заслонки

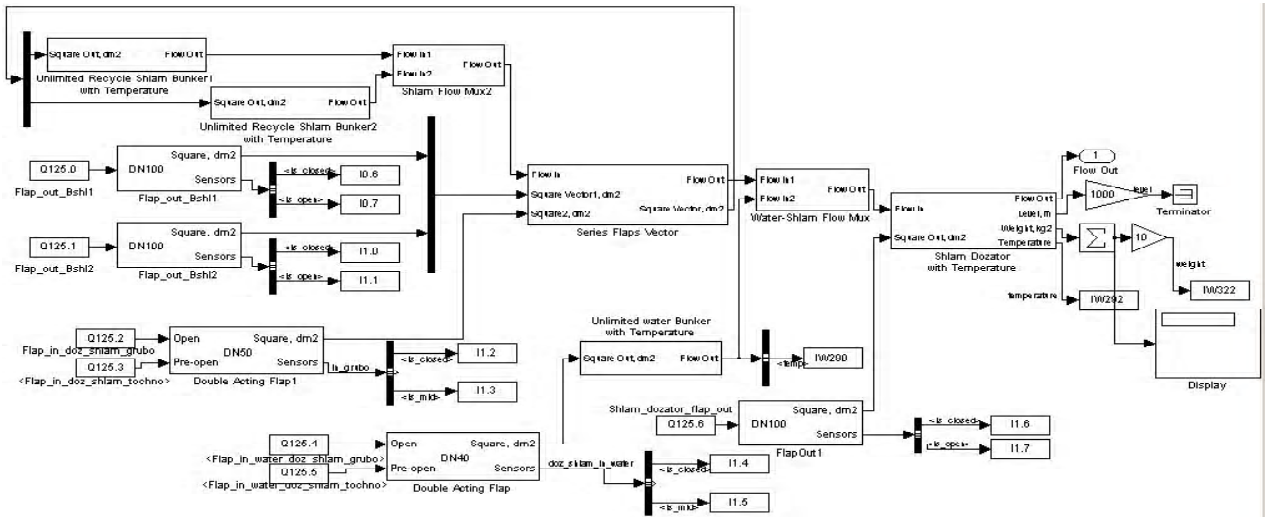


Рис. 5. Структурно-логическая схема компьютерной модели многокомпонентного дозатора газобетонной смеси технологической линии

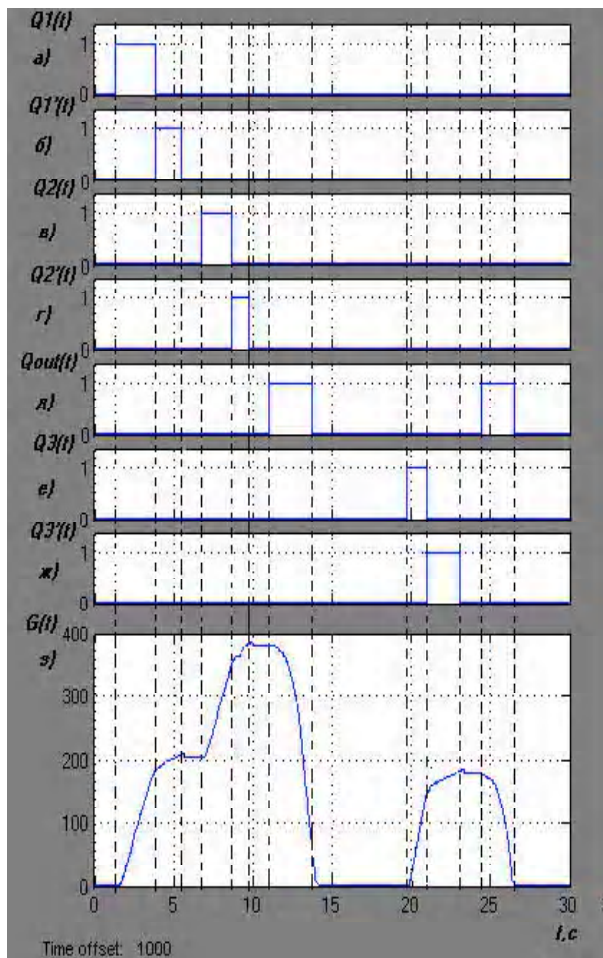


Рис. 6. Результаты моделирования динамических режимов дозатора

водится некоторым перерегулированием веса, а стабилизация достигается при меньшем значении. Это поясняется тем, что после окончания набора смеси на тензодатчики действует вес остатков компонентов, падающих в дозатор после закрытия заслонок. Ввиду того, что плотность шламов больше плотности воды, в теппроцессе наблюдается большее перерегулирование на этапе дозирования шламов. Эти перерегулирования носят систематический характер и зависят от плотности материалов, высоты падения и равномерности потока дозируемого материала. Снижение влияния перерегулирования на точность дозирования производится программным путём с помощью введения в самонастраивающейся системе коррекции упреждения работы исполнительных механизмов. Как видно на рис. 6, з, смоделированная система дозирования обеспечила отработку задания (набор 200 кг прямого и 180 кг обратного шламов, а затем 180 кг воды) с точностью до 1%. Приведённые результаты согласуются с экспериментальными данными с достаточной для инженерных задач точностью. Как видно из рис. 4 и рис. 6, моделирование позволяет оперативно отыскивать оптимальное время перехода  $\Delta G_{IT}$  для каждого компонента смеси и обеспечивает их дозирование с точностью до 1%.

**Выводы.** 1. Разработаны математическая и компьютерная модели оптимального автоматизированного управления многокомпонентным дозированием компонентов газобетонных смесей технологической линии приготовления газобетона в среде Simulink пакета Matlab совместно с симуляцией работы системы управления на базе ПЛК и пакетов (PlcSim, Step-7 и WinCC Flexible) фирмы Siemens.

2. Предложенная методика позволяет моделировать возможные режимы исполнительных механизмов в соответствующих технологических процессах на стадиях проектирования и наладки технологической линии,

а также обрабатывать алгоритмы оптимального поиска момента перехода в режим точного дозирования  $\Delta G_{IT}$  соответствующих компонентов, что сокращает время дозировки и повышает эффективность технологической линии.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Зиновкин, В. В.* Многопараметрическая система автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №3/3(39). – С. 38–43.
2. *Зиновкин, В. В.* Многокритериальная автоматизированная система управления технологическим процессом приготовления газобетона [Текст] / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI-2009) : міжнар. конф., 19–22 травня 2009 р. : тези докл. – Євпаторія, 2009. – Т. 2. – С. 608–611.
3. *Зиновкин, В. В.* Самонастраивающаяся система оптимизации автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Автоматизація технологічних і бізнес процесів. – 2010. – № 2. – С. 39–42.
4. *Зиновкин, В. В.* Критерии оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич, В. И. Бондаренко, Е. В. Васильева // «Электротехнические комплексы и системы» междунар. конф., 21–22 октября 2010 г.: тезисы докл. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – Т. 3. – С. 57–64.
5. *Зиновкин, В. В.* Критерии оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – № 1(22). – 2010. – С. 158–163.
6. *Зиновкин В. В.* Моделирование автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – № 2. – С. 49–53.
7. *Зиновкин, В. В.* Моделирование автоматизированного управления двухкомпонентным дозированием многопараметрического процесса приготовления газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6 (65) – Дніпропетровськ, 2009. – С. 53–64.
8. *Зиновкін, В. В.* Моделювання режимів дозування системи автоматизованого керування багатопараметричним технологічним процесом / В. В. Зиновкін, Е. М. Кулинич // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62). Ч. 1, С. 146–148.
9. *Зиновкин, В. В.* Моделирование процесса утилизации отходов в технологии производства газобетона / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Стратегія якості у промисловості і освіті: міжнар. конф., 6–13 червня 2009 р.: тези докл. – Варна, Болгарія, 2009. – Т. 2. – С. 176–179.
10. *Кулинич, Э. М.* Методологические основы моделирования системы управления технологическим процессом производства газобетона / Э. М. Кулинич, С. Е. Шаповалов // Стратегія якості у промисловості і освіті : міжнар. конф., 4–11 червня 2010 р. : тези докл. – Варна, Болгарія, 2010. – Т. 1(2). – С. 231–234.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2011.

Після доробки 12.03.11.

**Кулинич Е. М., Зиновкін В. В.**

**Моделювання оптимального керування процесом дозування багатоконпонентного технологічного процесу приготування газобетону**

*Запропоновано математичну і комп'ютерну моделі системи автоматизованого керування дозуванням багатоконпонентного технологічного процесу приготування газобетону спільно з симуляцією режимів роботи на базі ПЛК і пакетів (Plcsim, Step-7 і WINCC Flexible) фірми Siemens. Це дозволяє розробити інженерні методи зниження простоїв виконавчих механізмів і підвищити ефективність технологічної лінії. Наведено моделювання багатоконпонентного процесу дозування рідких складових газобетону.*

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, дозування рідких складових, багатопараметрична автоматизована система керування технологічним процесом, газобетон.

**Kulynych E.M., Zinovkin V.V.**

**Modelling of optimum batching control in the multicomponent technological process of aerocrete preparation**

*The authors propose the mathematical and computer models of the automatic batching control system for the multicomponent technological process of aerocrete preparation simultaneously with operating modes simulation based on PLC and Siemens packages (Plcsim, Step-7 and WINCC Flexible). That permits to develop engineering approaches for decreasing actuators downtime and increasing the processing line efficiency. Modeling of aerocrete liquid components batching is described.*

**Keywords:** computer modeling, liquid components batching, multiparametric automatic control system, aircrete.