

Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 6. – С. 73–84.

Надійшла 24.03.2009

Гостев В. И.

#### ПРОЕКТУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ІДЕНТИЧНИХ ДЗВІНОПОДІБНИХ ФУНКЦІЯХ ПРИНАЛЕЖНОСТІ

Отримано аналітичні вирази для керуючих впливів на виході нечіткого регулятора при ідентичних дзвоноподібних функціях приналежності, викладено питання проектування нечіткого регулятора та запропоновано практичну схему нечіткого регулятора.

**Ключові слова:** автоматичне керування, нечіткий регулятор, проектування, нечітка логіка, функції приналежності, MATLAB.

Gostev V. I.

#### DESIGNING OF THE FUZZY CONTROLLER AT IDENTICAL BELL-SHAPED MEMBERSHIP FUNCTIONS

Analytical expressions for control actions at the input of a fuzzy controller are derived at identical bell-shaped membership functions, fuzzy controller designing problems are discussed and practical design of a fuzzy controller is proposed.

**Key words:** automatic control, fuzzy controller, design, fuzzy logic, membership functions, MATLAB.

УДК.621.316.7

Зиновкин В. В.<sup>1</sup>, Кулинич Э. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

<sup>2</sup>Старший преподаватель Запорожского национального технического университета

## КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОБЕТОНА

Предложена структурно-алгоритмическая схема управления технологическим процессом приготовления газобетона. Управление осуществляется путем использования оптимизационных критериев градиентным методом по совокупности управляющих, контролируемых сигналов и исполнительных механизмов. Приведены результаты моделирования многопараметрической системы управления и испытаний в условиях работы установки на промпредприятии.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, многопараметрический технологический процесс, структурно-алгоритмическая схема, моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологическая установка производства газобетонов является многомерным, стохастическим, со сложными взаимосвязями между совокупностью управляющих сигналов, контролируемых параметров и состояния исполнительных механизмов, объектом автоматизированного управления. Необходимость оценки показателей качества готовой продукции и хода технологического процесса усложняет процесс автоматизации.

Ведущими зарубежными фирмами разработаны эффективные технологические линии по производству газобетонов с высоким уровнем автоматизации [1–4]. В них отмечается сложность и необходимость разработки систем автоматизированного управления технологическим процессом приготовления таких смесей, но методологические основы и принципы их построения практически отсутствуют [3, 5, 6].

Поэтому исследование и разработка многопараметрической системы управления технологическим процессом приготовления газобетонов представляются актуальными и востребованными промышленностью Украины [7].

### ФОРМУЛИРОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Под многопараметрической системой автоматизированного управления технологическим процессом следует понимать совокупность управляемых программно управляющих блоков и алгоритмов, которые взаимодействуют между собой для обеспечения оптимального производственного цикла приготовления изделий из газобетона. Алгоритм включает совокупность программных предписаний, определяющих управление исполнительными механизмами для обеспечения необходимой последовательности выполнения полного цикла технологического процесса. В за-

© Зиновкин В. В., Кулинич Э. М., 2010

висимости от алгоритмов управления в работе используются замкнутые цепи воздействия на исполнительные механизмы. Поскольку управление технологическим процессом осуществляется по многим параметрам [8], отдельные из которых носят вероятностный характер, общее решение будет довольно громоздким, трудно реализуемым и управляемым. Для упрощения решения задачи совокупность сигналов сгруппируем по характерным признакам и назначению в управляющие, контролирующие и состояния исполнительных механизмов. Взаимосвязи между тремя каналами совокупности этих сигналов и технологическими элементами установки показаны на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1 – компьютер диспетчера; 3–5 – емкости известковых вяжущих; 17, 18 – емкости горячей воды; 25, 26 – емкости суспензии; 27 – емкость холодной воды; 13 – смеситель; 12, 28 – насосы подачи воды; 30, 32 – дозаторы-смесители отходов; 40, 41 – емкости цемента; 33 – емкость прямого шлама, 36, 37 – емкости возвратного шлама; 11 – дозатор горячей воды; 19 – дозатор суспензии; 22 – дозатор известковых вяжущих; 23 – дозатор цемента; 6, 20 – шнеки подачи сыпучих материалов; 31 – шибер перенаправления потока подачи технологических отходов; 42 – насос обратного шлама; 43 – конвейер порезки; 34, 3, 10 – программно-логические блоки управления.

Таким образом, в настоящей работе оптимизационный программно-аналитический поиск наиболее эффективного управления технологическим процессом приготовления газобетона будем отыскивать по трем обобщенным параметрам: алгоритмам совокупности сигналов управления, контроля хода технологического процесса и электротехнического состояния исполнительных механизмов.

### КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Критерии оптимизации электротехнологического режима отображают динамику системы автоматизированного управления [9]. Они обеспечивают наилучшие сочетания совокупности управляющих сигналов и качественных параметров, а также эффективность технологического процесса приготовления газобетона [10].

Совокупность этих сигналов должна удовлетворять следующему интегральному функционалу:

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

где  $\zeta(x, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t)$  – совокупность сигналов управления;  $q(\delta, t) = \sum_{j=1}^M \gamma_j(t)$  – параметры, контролирующие ход технологического процесса;  $\rho(\delta, t) = \sum_{k=1}^K \chi_k(t)$  – сигналы исполнительных механизмов.

Обобщенный алгоритм управления изменяется, а за счет обратных связей постоянно корректируется до момента стабилизации технологического процесса. Корректировка параметров технологического процесса осуществляется градиентным методом. При этом программно-аналитический блок отыскивает оптимальное соотношение совокупности параметров, обеспечивающее переход всей системы управления в новое, более стабильное состояние. Сигналы управляющих воздействий для одного технологического этапа могут служить в качестве информационных для последующих этапов. Сигналы управляющих воздействий отражают обобщенную логическую информацию, которая соответствует оптимальному условию (1) в анализируемый момент времени технологического процесса. Сигналы исполнительных механизмов отображают их электротехнические параметры в данный момент времени и используются в качестве источника обратных связей. Их состояние отображается в виде изменения параметров относительно номинальных. При отклонении текущего состояния технологического процесса от номинального и в случае, когда исполнительные механизмы не обеспечивают его оптимальные условия, соответствующие программно-логические элементы детектируют это состояние и вырабатывают корректирующее воздействие в соответствии с новыми условиями.

Оптимизационный функционал от трех обобщенных подфункционалов позволяет отыскивать оптимальное сочетание совокупности параметров технологического процесса. Обобщенные сигналы в системе автоматизированного управления являются детерминированными функциями переменных параметров во времени. При изменениях информации о техпроцессе критерий оптимальности обеспечивается системой самонастройки за счет обратной связи. Положение экстремума определяется градиентным методом в соответствии с заданным алгоритмом программно-аналитического блока на основании поступающей информации от программно-аналитических подсистем, на которые информация поступает от исполнительных механизмов и датчиков техпроцесса.

Поиск оптимального управления технологическим процессом приготовления газобетона сводится

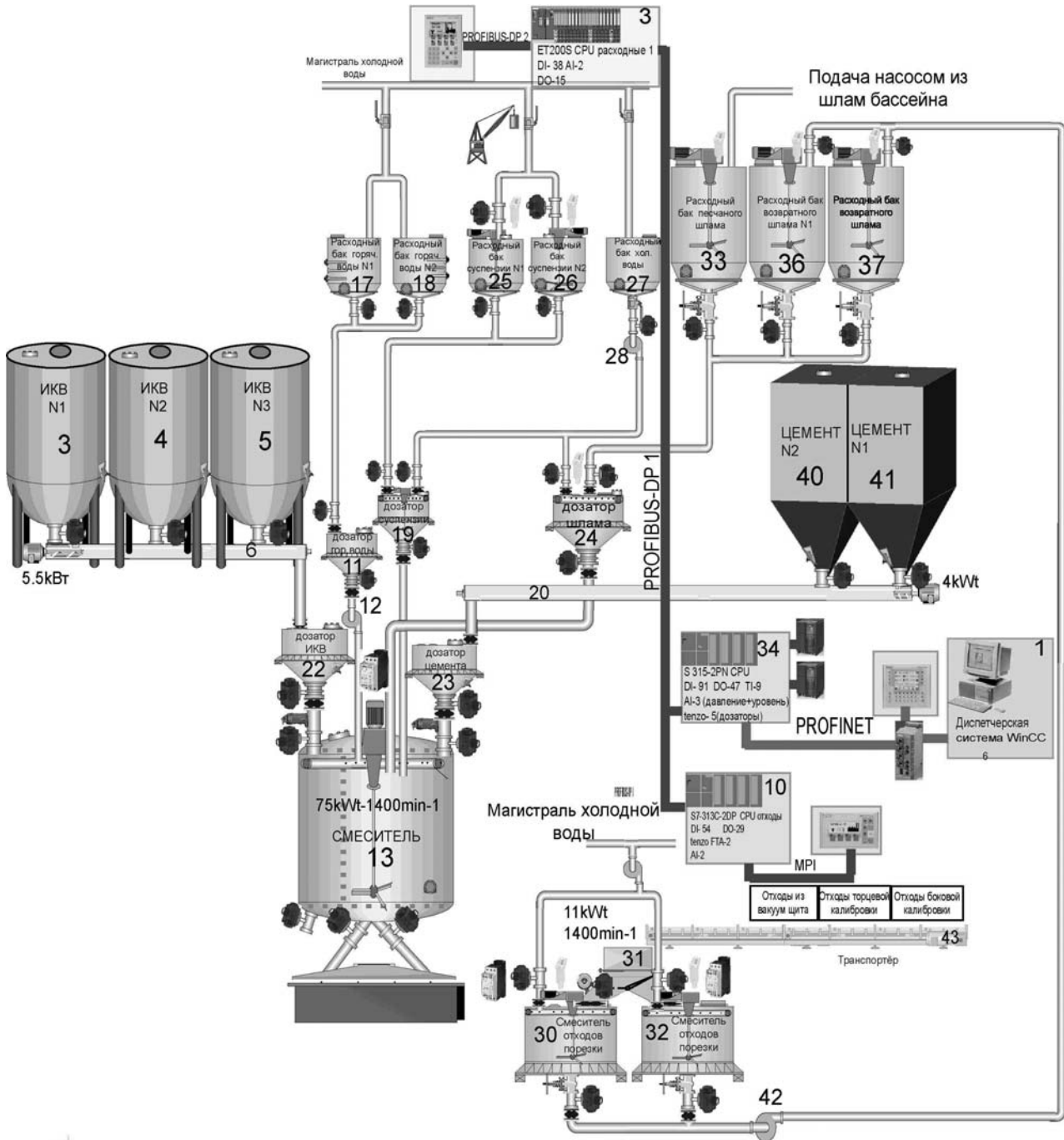


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи между управляющими, контролирующими сигналами, а также исполнительными и программно-логическими элементами технологической установки приготовления газобетона

к отысканию в фазовом пространстве совокупности параметров максимума следующего функционала:

$$\xi(t) = \int_0^T [\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t) \cdot (t_H + \Delta t)^{-1} dt] \Big|_{x = \text{const}}, \quad (2)$$

где  $T$  – время анализируемого этапа технологического процесса;  $t_H$  – время стабилизации режима;  $\Delta t$  – время подстройки отдельных параметров.

Оптимальному технологическому процессу соответствует максимум функционала (2) при соблюдении следующих условий:

$$\xi(t) = [\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t)] \cdot (t(x) + \Delta t)^{-1} dt \Big|_{x = \text{const}}, \quad (3)$$

$$T'(x) = \zeta'(x) \cdot [\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t)]^{-1}, \quad (4)$$

где  $T'(x)$  – время интервала стабилизации режимов исполнительных механизмов;  $\zeta'(x)$  – коэффициент,

зависящий от инерционности исполнительных механизмов и отработки логической информации.

Поскольку протекающий процесс рассматривается в системе фазовых координат, то оптимизационный поиск необходимо осуществлять при соблюдении следующих граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \zeta(x, t) < \zeta(x, t)_{\max}, \\ 0 \leq g(x, t) < g(x, t)_{\max}, \\ 0 \leq \rho(x, t) < \rho(x, t)_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Экстремальные значения уравнений (3), (4) в рамках (5) можно получить, решая следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial \zeta(x, t)} &= \frac{g(x, t) \cdot \rho(x, t) \cdot T(x)}{T + \Delta t} - G(t) \times \\ &\quad \times \frac{\zeta'(x)}{\zeta^2(x, t) \cdot g^y(x, t) \cdot \rho^z(x, t)} = 0; \\ \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial g(x, t)} &= \frac{\zeta(x, t) \cdot \rho(x, t) \cdot T(x)}{T + \Delta t} - G(t) \times \\ &\quad \times \frac{\zeta'(x)}{\zeta(x, t) \cdot g^{y+1}(x, t) \cdot \rho^z(x, t)} = 0; \\ \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial \rho(x, t)} &= \frac{\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot T(x)}{T + \Delta t} - G(t) \times \\ &\quad \times \frac{\zeta'(x)}{g(x, t) \cdot g^y(x, t) \cdot \rho^{z+1}(x, t)} = 0; \\ \frac{\partial \xi^{\circ}(t)}{\partial T} &= \frac{\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot \rho(x, t)}{(T + \Delta t)^2} - \lambda_m \times \\ &\quad \times T^{m-1} = 0; \\ \frac{G_{\zeta}}{\zeta(x, t) \cdot g(x, t) \cdot g^z(x, t)} - T^m &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $G(t)$  – характеристический множитель Лагранжа.

В соответствии с (1) условие Лагранжа в системе выражений (6) должно обеспечиваться при соблюдении следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \xi_n^{\circ}(x, t)}{\partial T^2(x)} < 0 \\ \frac{\partial^2 \xi^{\circ}(x, t)}{\partial \rho(x, t)} < 0 \\ \frac{\partial^2 \xi_n^{\circ}(x, t)}{\partial \zeta^2(x, t)} < 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

при этом функционал  $\partial \xi_n^{\circ}(x, t)$  должен иметь максимум.

При этом для достижения оптимального автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона, одновременно с вы-

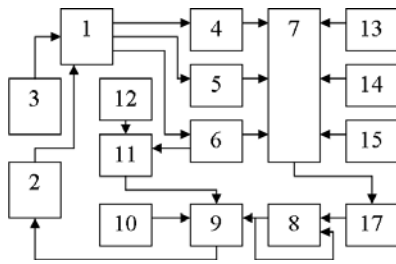
шеприведенными условиями необходимо обеспечить условия, при которых (вторые) вычитаемые параметры в системе (6) принимают наименьшие значения. Физически это означает, что постоянные времени системы управления должны быть минимальными. Для достижения большей точности управления параметры необходимо рассматривать как случайные функции технологического процесса. Однако это приведет к существенному усложнению решаемой задачи и ее практической реализации. Поэтому условия оптимального управления технологическим процессом, обеспечивающие максимум функционалу (2), следует выбирать по дискретным этапам приготовления газобетона. При этом в процессе поиска максимума компенсируется влияние вероятностных факторов за счет перехода изображающей точки слева или справа от экстремума. Необходимо отметить, что при разработке системы автоматизированного управления могут решаться линейные и нелинейные задачи. Для выбора эффективного управления технологическим процессом приготовления газобетона выполним анализ возможной реализации линейной и нелинейной задачи. В зависимости от этого системы управления классифицируются как самонастраивающиеся или системы стабилизации.

### ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МНОГО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ФУНКЦИОНАЛ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ САУ

Оптимизационный многопараметрический функционал самонастраивающейся автоматизированной системы наиболее полно отражает ход управления технологическим процессом приготовления газобетона, когда все параметры управления исполнительными механизмами и передачи логической информации будут синхронными, а взаимосвязи – нелинейными.

Самонастраивающаяся автоматизированная система приготовления газобетона позволяет более эффективно использовать электротехническое и технологическое оборудование линии с заданной производительностью. Структурная схема самонастраивающейся системы показана на рис. 2, а графическая интерпретация самонастраивающегося нелинейного алгоритма управления технологическим процессом – на рис. 3.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – обобщенный показатель технологического процесса; 2 – привод главного исполнительного механизма (шнека дозирования извести, цемента и т. д.); 3 – привод заслонок подачи сыпучих материалов; 4 – скорость подачи другого сырья; 5 – информационный блок о  $g(x, t)$ ; 6 – датчик загрузки бункеров; 7 –



**Рис. 2.** Структурная схема самонастраивающейся многопараметрической системы автоматического управления технологическим процессом приготовления газобетона

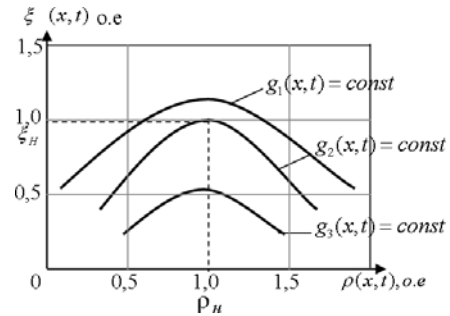
программно-преобразовательный блок; 8 – блок согласования; 9 – регулятор заслонок подачи сырья; 10 – программно-аналитический блок номинальной производительности технологической установки приготовления газобетона; 11 – устройство сопоставительного анализа; 12 – блок задания программно-аналитического режима технологического процесса; 13 – блок номинальных параметров; 14 – информационный блок текущих и обобщенных параметров; 15 – информационный блок технологического режима; 16 – блок усиления и стабилизации параметров; 17 – усредняющее устройство или фильтры среднего значения.

Аналитическая интерпретация самонастраивающейся системы с нелинейными взаимосвязями между параметрами основана на реализации градиентного метода. Оптимальное значение функционала соответствует точке, в которой производная изменяет свой знак на противоположный. Такой поиск экстремума в многопараметрической автоматизированной системе управления позволяет более эффективно управлять техпроцессом и свести к минимуму погрешности, возбуждаемые вероятностными параметрами.

Из рис. 2 и 3 видно, что для поиска оптимального технологического режима необходимо определиться с одним из обобщенных параметров, например  $g(x, t)$ . Для уменьшения погрешности в процессе работы технологической линии используются усредняющие устройства или фильтры среднего значения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Проверка многопараметрического управления технологическим процессом приготовления газобетона осуществлялась на модели с использованием алгоритма в логическом блоке Stateflow пакета MatLab и



**Рис. 3.** Графическая интерпретация самонастраивающегося нелинейного алгоритма управления технологическим процессом приготовления газобетона

в условиях работы технологической установки приготовления газобетона на промышленном предприятии. Согласование последовательной работы соответствующих исполнительных механизмов обеспечивалось путем использования разработанного годографа. Информацию о ходе технологического процесса и поступления технологических отходов на конвейер в каждый момент времени получали, используя блок Repeating Sequence Interpolated1. В качестве опорных данных в нем использовался директивный график технологического процесса. Поскольку заключительный этап технологического процесса является наиболее информационным, по нему осуществлялся анализ эффективности разработки. Результаты исследований объема технологических отходов от времени протекания технологического процесса приведены на рис. 4. Аналогичные результаты получены в реальных условиях работы технологической установки. Погрешность между смоделированными и реальными параметрами на окончательной фазе технологического процесса не превышает 6%. Варьирование наибольших и наименьших значений между собой поясняется возможными изменениями плотности технологических отходов и степени соответствия массива газобетона директивным требованиям и аппроксимацией опорных данных. На рис. 4 непрерывными кривыми обозначены смоделированные данные [11], а (○), (★), (△) – экспериментальные.

Имеющиеся отклонения соответствующих показателей между смоделированными и измеренными результатами в средней части технологического цикла поясняются проявлением вероятностного характера, что и предполагалось в постановочной части, и неоднородностью состава раствора в процессе дозирования, температурными градиентами, влияющими на показания ультразвукового датчика уровня и т. д. По

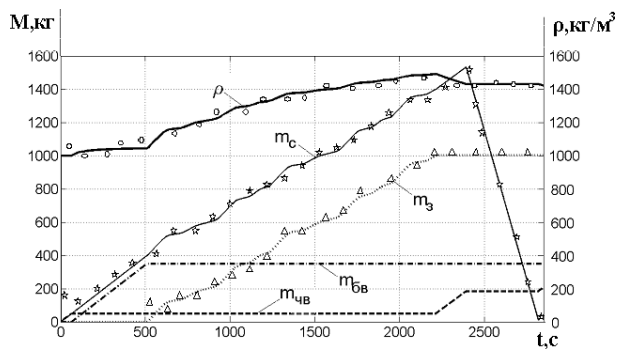


Рис. 4. Результаты исследований протекания технологического процесса приготовления газобетона

мере установления плотности и однородности эти погрешности уменьшаются, а на конечной стадии результаты моделирования и эксперимента практически совпадают.

Таким образом, анализ моделирования и экспериментальных исследований показал, что применение многопараметрической системы автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона позволило повысить эффективность технологической установки на 17 % по сравнению с установкой, использующейся ранее. Погрешность между экспериментальными и измеренными параметрами технологического процесса не превышает 6 %.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Большаков В. И.* Увеличение объемов производства и использования автоклавного газобетона – стратегический курс Украины в строительстве / Большаков В. И., Мартыненко В. А. // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 2. – С. 33–39.
2. Ворона А. Н. Производство и использование мелкоштучных изделий из ячеистого газобетона в Приднпровском регионе Украины / Ворона А. Н. // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 1. – С. 33–39.
3. *Сажнев Н. П.* Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика / Сажнев Н. П., Гончарик В. Н., Гарнашевич Г. С. и др. – Минск : Стринко, 2004. – С. 4–7.
4. *Филатов А. Н.* О производстве и применении изделий из ячеистого бетона в Украине / Филатов А. Н. // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 1. – С. 43–53.
5. *Сажнев Н. П.* Особенности производства ячеистого бетона по ударной технологии / Сажнев Н. П., Сажнев Н. Н. – 2006. – № 9–10. – С. 27–29.

6. *Царик А. М.* Как начать строительство завода по производству ячеистого бетона / Царик А. М. // Сборник трудов 3-го международного научно-практического семинара «Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве». – Севастополь, 2007. – С. 15–17.
7. *Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 р. № 684 «Програма розвитку виробництва нідрювато-бетонних виробів та їх використання у будівництві на 2005–2011 роки»* // Строительные материалы и изделия. – 2004. – № 4. – С. 34–37.
8. *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.
9. *В. В. Зиновкін.* Автоматизована система керування багатопараметричного технологічного процесу приготування газобетону / В. В. Зиновкін, Е. М. Кулинич, Ю. Н. Умеров, В. О. Мирний // Енергетика та системи керування – 2009 : тези доп. міжнар. конф., 14–16 травня 2009 р. – Львів, 2009. – С. 40–42.
10. *Зиновкин В. В.* Многокритериальная автоматизированная система управления технологическим процессом приготовления газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Матеріали міжнар. конференції «ISDMCI-2009» (Євпаторія, 19–22 травня). – 2009. – Т. 2. – С. 608–611.
11. *Зиновкин В. В.* Моделирование процесса утилизации отходов в технологии производства газобетона / Зиновкин В. В., Кулинич Э. М. // Матеріали міжнар. конференції (буде опубліковано у збірнику наукових праць 5-ї міжнародної наукової конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (6–13 червня 2009 р., Варна, Болгарія). – 2009. – Т. 2. – С. 176–179.

Надійшла 18.09.2009

Зиновкін В. В., Кулинич Е. М.

## КРИТЕРІЇ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ПРИГОТУВАННЯ ГАЗОБЕТОНУ

Запропоновано структурно-алгоритмічну схему керування багатопараметричним технологічним процесом приготування газобетону. Керування виконується шляхом використання оптимізаційних критеріїв градієнтним методом за сукупністю керуючих, контролюючих сигналів та виконавчих механізмів.

**Ключові слова:** оптимальне керування, багатопараметричний технологічний процес, структурно-алгоритмічна схема, моделювання.

Zinovkin V. V., Kulynych E. M.

## OPTIMAL CRITERIA OF MULTIPARAMETER AEROCRETE PREPARATION PROCESS CONTROL

The structure-algorithmic scheme of aerocrete preparation process control is proposed. Control is carried out using optimization criteria by the gradient method by a set of control and check signals and actuators. Results of multiparameter control system simulation and testing in the plant conditions are presented.

**Key words:** optimal control, multiparameter technological process, structurally-algorithmic scheme, modeling.