УДК 681.513.7:[691.31]

Э. М. КУЛИНИЧ, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОБЕТОНА

Предложено повышение эффективности технологической линии приготовления газобетона путем решения задачи оптимального распределения ресурсов с целевой функцией в виде позинома. Обосновано решение этой задачи методами геометрического программирования. Оптимальное управление синтезируется как распределение ресурса энергии по ее технологическим аппаратам.

Ключевые слова: оптимальное управление, технологическая линия, геометрическое программирование, позином, газобетон, материальные потоки.

Введение. Повышение эффективности процесса управления технологическими линиями производства газобетона является актуальной научно-практической задачей ввиду перспективности газобетонных изделий [1 – 3]. Решение этой задачи достигается за счет применения методов оптимального и адаптивного управления, как отдельными технологическими аппаратами, так и подсистемами технологической линии [4 – 7]. Использование этих методов для управления динамическими компонентами линии позволяет снизить затраты на управление и простои из-за ошибок регулирования, однако, наибольший эффект дает оптимальное распределение ресурсов и потоков технологической линии в целом путем решения задачи оптимизации материальных потоков [8]. Поскольку алгоритмы решения этой задачи [9, 10] опираются на методы линейного программирования или метод динамического программирования, что приводит к сложным алгоритмам управления и снижает эффективность управления.

Цель работы. Целью работы является обоснование применения оптимального управления распределением материальных потоков по оборудованию технологической линии (ТЛ) приготовления газобетона (ПГ) на основе использования позиномиального функционала цели и метода геометрического программирования для повышения эффективности ТЛ.

Методика исследования. В основу исследований положены: методы декомпозиции сложных систем при построении структуры технологической цепочки и определения основных материальных потоков и ресурсов ТЛ ПГ; методы геометрического программирования для решения задач оптимальной загрузки ТЛ ПГ и оптимального распределения материальных потоков по технологическим аппаратам.

Обсуждение результатов исследования. На основании анализа технологического процесса и определения основных материальных потоков и ресурсов линии ПГ была определена структура технологической цепочки, укрупненная схема которой приведена на рис. 1. Основываясь на данной структуре, рассмотрим задачу распределения ресурсов в технологической цепочке.

Входной поток материала постпает в дозаторы с коэффициентом передачи K_1, K_2, K_3, K_8, после дозирования материал поступает в смеситель K_4 и после сушки (вызревания массива) K_5 и порезки K_6 поступает в автоклав K_7 для термовлажностной обработки. В структуре цепочки предусмотрен рецикл отходов с коэффициентами передачи по контурам α, β, γ через дозатор-смеситель K_8.

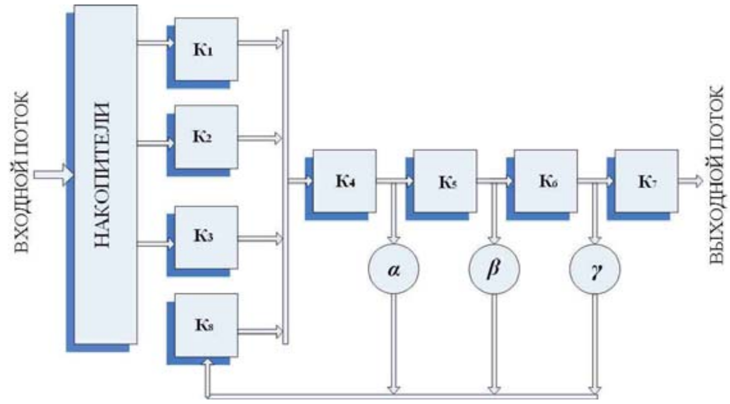

Рис. 1 – Структура технологической цепочки приготовления газобетона

Коэффициент передачи определить как массу готового к передаче на следующий аппарат цепочки материала $\rho_i V_i(t)$ отнесенную к T_i - длительности стадии процесса на данном аппарате и номинальной входной массе отнесенной к номинальному времени загрузки аппарата m^*_i/T^*_i.

$$K_i = \frac{\rho_i V_i(t)}{T_i} \frac{T_i^*}{m_i^*} \tag{1}$$

При этом $x_i(t)$ определяет состояние аппарата, как объекта управления в технологической цепочке и определяется именно количеством (объемом) передаваемого материала. Таким образом, формируем вектор $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния систем. Эффективность использования аппарата $f_i(x_i(t))$ оценивается отношением:

$$f_i(x_i(t)) = K_i = \frac{x_i(t)}{T_i} \frac{q_i^*}{q_i}, \tag{2}$$

где q_i и q_i^* - удельная и выдаваемая мощности.

Принятая форма функции цели позволяет просто оценить эффективность работы всей линии. Так как в основе частных функций цели положен коэффициент передачи материального потока и учитывая структуру частных функций цели, а также приняв

$$C_j = \prod_{i=1}^{6} \frac{\rho_i}{T_i} \frac{T_i^*}{m_i^*} \frac{q_i^*}{q_i}, \tag{3}$$

запишем функцию цели для технологической цепочки в виде:

$$f(\mathbf{x}(t)) = \sum_{i=1}^{6} C_j \prod_{j=1}^{8} x_i^{a_{iji}}(t). \tag{4}$$

Таким образом, функция цели для технологической цепочки ПГ представляет собой позином. Задача оптимизации в этом случае ставится как задача геометрического программирования, которая при неотрицательных компонентах вектора x и ограничениях в виде позиномов имеет следующий вид:

$$\begin{gathered} \mathbf{x}^* = \arg\min\ f(\mathbf{x}); \\ x_i > 0, \quad i = \overline{1,m}; \qquad g_k(\mathbf{x}) \le 1, \quad k = \overline{1,p}. \end{gathered} \tag{5}$$

Вводя ограничения как естественное требование отсутствия переполнения рабочего объема аппарата:

$$g_k(\mathbf{x}) = \frac{v_k}{v_k^{\max}} \le 1, \qquad k = \overline{1, m} \tag{6}$$

и учитывая, что для задачи поиска максимума в геометрическом программировании меняется вид функции цели:

$$\mathbf{x}^* = \arg\min f(\mathbf{x}) = \arg\min \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i} \prod_{j=1}^{m} x_j^{-a_{ij}} . \tag{7}$$

Введем обозначения

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n} u_i; \qquad \delta_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i}. \tag{8}$$

Запишем двойственную функцию в задаче с ограничениями

$$w(\delta) = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{C_i}{\delta_i} \right)^{\delta_i} \prod_{k=1}^{n} \lambda_i^{\lambda_i} , \tag{9}$$

где λ_i определяется суммой двойственных переменных ограничений

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{n} \delta_k^o . \tag{10}$$

В двойственной задаче условие нормирования и ортогональности выступают в роли ограничений.

Используя условие нормирования

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i = 1, \tag{11}$$

и условия ортогональности задаче с ограничениями

$$\sum_{i=1}^{m} a_{ij}\delta_i + \sum_{k=1}^{m} a_{kj}^o \delta_k^o = 0, \qquad j = \overline{1, p}, \tag{12}$$

можно найти оптимальное значение двойственных переменных, а также записать систему уравнений, позволяющую определить веса частных целевых функций в функции цели. Оптимально веса распределяются согласно структуре технологической цепочки, однако реальное распределение весов зависит от времени и загрузки аппаратов, в этом случае контролируя степень выполнения ограничений можно определить реальные веса

$$\delta_i^*(t) = \frac{\delta_i^0(t)}{\sum_{k=1}^{m} \delta_k^0(t)} . \tag{13}$$

Используя свойства геометрического программирования, находим значение функции цели в оптимуме в момент времени t

$$f^*(t) = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{C_i}{\delta_i^*(t)} \right)^{\delta_i^*} \prod_{k=1}^{n} \left(\sum_{k=1}^{m} \delta_k^o \right)^{\sum_{k=1}^{m} \delta_k^o} , \tag{14}$$

что открывает возможность реализации управления путем распределения затрат энергии для достижения оптимального распределения весов функции цели. Таким образом, при управлении единичной ТЛ целесообразно решение задачи оптимального распределения по аппаратам цепочки затрат энергии. Так обозначив

$$C_j = \prod_{i=1}^{6} \frac{\rho_i}{T_i} \frac{T_i^*}{m_i^*} \frac{q_i^*}{q_i} = \prod_{i=1}^{6} q_i^* \prod_{i=1}^{6} \frac{\rho_i}{T_i} \frac{T_i^*}{m_i^*} \frac{1}{q_i} = q_j C_j^* \qquad (15)$$

и найдя оптимальное распределение весов δ_i^* из ранее рассмотренной задачи (6) можно найти оптимальное распределение энергии по контурам технологической цепи

$$q_i^* \arg\min f^*(t) = \arg\max \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{q_i C_i^*}{\delta_i^*(t)} \right)^{\delta_i^*} \prod_{k=1}^{n} \left(\sum_{k=1}^{m} \delta_k^o \right)^{\sum_{k=1}^{m} \delta_k^o} . \qquad (16)$$
$$q_i^* \le q_i^{\max}$$

Решение данной задачи сводится к выравниванию материальных потоков за счет изменения подачи энергии. Существенной особенностью данного подхода является простота определения значения функции цели.

Рассматривая вектор ограничений, как измеряемый и учитывая, что особенностью является вырожденность данного позинома, так как показатель степени a_{ij} принимает значение ноль или единица, рассмотрим задачу оптимального управления. Однако данная функция цели позволяет оценить эффективность процесса и корректно поставить задачу выбора траектории доставляющей максимум функционала выхода продукта

$$\begin{aligned} &\mathbf{x}^*(t) \to \arg\max \int_{t_o}^{t_1} f(\mathbf{x}(t))dt; \\ &\mathbf{x}^*(t) \in X_{\partial on}(t); \quad X_{\partial on}(t_0) = X_0, \qquad X_{\partial on}(t_1) = X_1. \end{aligned} \qquad (17)$$

Ограничения, связанные с динамикой технологических аппаратов, в данном случае не существенны, так как качество их режимов обеспечено локальным управлением аппаратов, в отличие от оптимальности всей линии.

Задача (17) это вырожденная простая вариационная задача, так как функция цели не зависит от производной вектора состояния. Уравнение Эйлера принимает вид

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{x}}} \right) = 0 \to \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} = 0 \cdot \qquad (18)$$

Из этого следует простое утверждение, что функция цели должна быть максимальна в каждой точке траектории.

Существенной особенностью данной задачи является возможность использования метода геометрического программирования для обеспечения условия оптимальности. Предположим, что в простой задаче Лагранжа

$$(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t^*) \to \inf J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \int_{t_0}^{t_1} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)dt;$$

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \qquad \dim \mathbf{x} = \dim \mathbf{f} = n; \qquad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \qquad \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1,$$

интегрант функционала цели является позиномом (4) и на траектории выполняется условие неотрицательности.

Из стандартного для принципа максимума предположения, что целевой функционал обладает выпуклыми свойствами (квазирегулярен или регулярен - строго выпукл), что позволяет считать ограничения выпуклыми, получаем задачу выпуклого программирования.

Достоинство такой постановки задачи в том, что в случае справедливости предположения выпуклости задачи мы при решении задачи имеем единственный глобальный минимум. Условия выпуклости позволяют использовать теорему Куна-Таккера для Лагранжиана:

$$L(\mathbf{x}^*,\mathbf{u},\lambda^*) \le L(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*,\lambda^*) \le L(\mathbf{x},\mathbf{u}^*,\lambda^*).$$

Введя связь $\lambda_i = \lambda_i(\mathbf{u}), \quad i = \overline{1,n}$, запишем $H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}) \le H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*) \le H(\mathbf{x},\mathbf{u}^*)$

Функция Гамильтона в данной задаче имеет вид:

$$H(\mathbf{x},\mathbf{u},\lambda) = \lambda_0 \sum_{i=1}^{n} C_i \prod_{j=1}^{m} x_j^{a_{ij}}(t) + \left\langle \lambda^T, \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u}) \right\rangle. \tag{19}$$

Учитывая идентичность экстремальных свойств функции Лагранжа и функции Гамильтона, запишем условие Куна-Таккера в терминах функции Гамильтона $H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}) \le H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*) \le H(\mathbf{x},\mathbf{u}^*)$. Отсюда формируем прямую и двойственную задачу с разделением переменных состояния и управления:

$$\mathbf{x}^* =_{u=u^*} \arg\min H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*,\lambda^*)$$

$$\mathbf{u}^* =_{x=x^*} \arg\max H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*,\lambda^*)$$

Предполагая, что траектория движения оптимальна x = x*, переходим к двойственной задаче: $\mathbf{u}^* =_{x=x^*} \arg\max H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*,\lambda^*)$. При этом выполняются необходимые условия оптимума в канонической форме:

$\dfrac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = -\dfrac{d\lambda}{dt}; \qquad \dfrac{\partial H}{\partial \lambda} = \dfrac{d\mathbf{x}}{dt}$ и условие стационарности по управлению: $\dfrac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}.$

Так как задача стационарна $\mathbf{u}^* =_{x=x^*} \arg\max H(\mathbf{x}^*,\mathbf{u}^*,\lambda^*) = 0.$

Собственно, это и есть принцип максимума Понтрягина - на оптимальной траектории при оптимальном управлении функция Гамильтона достигает своего максимума. В таком случае для выпуклого неотрицательного интегранта в каждой точке траектории

$$\begin{gathered} \mathbf{x}^*(t) = \arg\min \sum_{i=1}^{n} C_i \prod_{j=1}^{m} x_j^{a_{ij}}(t) = f_0^*; \\ \sum_{i=1}^{n} C_i \prod_{j=1}^{m} x_j^{a_{ij}}(t) > 0; \qquad t \in (t_0, t_1). \end{gathered} \tag{20}$$

Что позволяет записать

$$\left\langle \boldsymbol{\lambda}^T, \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u}) \right\rangle = -f_0^*; \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}; \quad \frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{0}. \tag{21}$$

При этом в виду выпуклости задачи выполняется условие неположительности множителей Лагранжа $(\lambda_i \le 0)$. Следовательно, для одномерной задачи, к которой приводится задача оптимального управления линией ПГ, на каждой точке траектории x^*(t) выполняется условие

$$u^* \underset{x=x^*}{=} \arg\max f(x,u) = f_0^*. \tag{22}$$

Данное условие является частным случаем принципа максимума Понтрягина, подобным условиям оптимальности в задаче о максимальном быстродействии линейной системы. В данном случае принцип максимума не только необходимое условие, но и является достаточным условием благодаря выпуклости интегранта функционала цели задачи.

Выводы. Задача управления ТЛ ПГ является задачей распределения ресурсов с целевой функцией в виде позинома и решается методами геометрического программирования. При этом оптимальное управление синтезируется как распределение ресурса энергии по технологическим аппаратам ТЛ. При использовании позиномиального интегранта, в задаче оптимального управления приготовлением газобетона, возможно использование метода Понтрягина, при этом максимум функции Гамильтона определяется с учетом максимального значения интегранта, которое легко находится методом геометрического программирования.

Список литературы: **1.** *Сажнев, Н. П.* Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика [Текст] / *Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Гарнашевич и др.* – Минск: НПООО «Стринко», 2004. – С. 4-7. **2.** *Большаков, В. И.* Производство автоклавного газобетона в Украине [Текст] / *В. И. Большаков, В. А. Мартыненко, В. В. Ястребцов* // Строительные материалы и изделия. – 2006. – № 4. – С. 8-12. **3.** Постанова Кабінету Міністрів України від 26травня 2004р. № 684 "Програма розвитку виробництва ніздрюватобетонних виробів та їх використання у будівництві на 2005-2011 роки" // Строительные материалы и изделия. – 2004. – № 4. – С. 34–37. **4.** *Зиновкин, В. В.* Автоматизированное управление электроприводом двухкомпонентного дозирования многопараметрической технологической линии приготовления газобетона [Текст] / *В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, – № 28. – С. 412–413. **5.** *Кулинич, Э. М.* Оптимальное управление многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона [Текст] / *Э М. Кулинич, В. О. Мирный, Ю. Н. Умеров* // «Компьютерные технологии и информационные системы в электротехнике»: Всероссийский конкурс научных работ студентов, магистрантов и аспирантов (Тольятти, 29 ноября 2011 года): сборник материалов – Тольятти: ТГУ, 2011. – С. 29-37. **6.** *Кулинич Э. М.* Моделирование автоматизированного управления многокомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона [Текст] / *Э. М. Кулинич, В. В. Зиновкин, Ю. А. Крисан, С. И. Арсеньева*// Вісник національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 57/2010, – С. 271–277.**7.** *Зиновкин, В .В.* Моделирование процесса утилизации отходов в технологии производства газобетона [Текст] / *В .В. Зиновкин, Э. М. Кулинич* // Стратегія якості у промисловості і освіті : міжнар. конф., 6–13 червня 2009р. : тези докл. – Варна, Болгарія, 2009. – Т. 2. – С. 176 – 179. **8.** *Дудников, Е. Г.* Автоматическое управление в химической промышленности. [Текст] / Под ред. *Е. Г. Дудникова*, М.: «Химия» -1987.-368 с. **9.** *Карпухина, Н. В.* Методы искусственного интеллекта в задачах оперативного управления и оптимизации сложных технологических комплексов [Текст] / *Н. В. Карпухина, К. М.Пастухова, П. А. Свиридов* // Проблемы управления. 2003 №3. – С. 21-24. **10.** *Даффин Р.* Геометрическое программирование [Текст] / *Р. Даффин, Э. Патерсон, К. Зенер*. М.: «Мир». -1972. -312 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Sazhnev, N. P. , Sazhnev, N. P. , Goncharik, V. N. , Garnashevich, G. S.* (2004). Production of cellular concrete wares. Theory and practice. Minsk: NPOOO «Strinko», 4-7. **2.** *Bol'shakov, V. I., Martynenko, V. A., Jastrebcov, V. V.* (2006). Production of autoclaved aerated concrete in Ukraine. Stroitel'nye materialy i izdelija, V.4, 8-12. **3.** *Cabinet of Ministers of Ukraine* dated 26 May 2004. Number 684 (2004). Program for production cellular concrete products and their use in construction in 2005-2011 years. Construction materials and products, V.4, 34–37. **4.** *Zinovkin, V. V., Kulinich, Je. M.* (2010). Automated control by the electric drive of double-base dosage of multiparameter technological line of preparation of aircrete . Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «Harkivs'kij politehnichnij institut», V.28, 412–413. **5.** *Kulinich, Je. M., Mirnyj, V. O., Umerov, Ju. N.* (2011). Optimal control of multiparameter process of preparation of aircrete. Computer technology and information systems in electrical engineering. Tol'jatti: Publishing house TGU, 29-37. **6.** *Kulinich, Je. M., Zinovkin, V. V., Krisan, Ju. A,. Arsen'eva, S. I.* (2010). Modeling of automated control multi-component dosing process of preparation of aircrete. Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «Harkivs'kij politehnichnij institut», V. *57, 271–277.* **7.** *Zinovkin, V. V., Kulinich, Je. M.* (2009). Modeling of process waste in the production technology of aircrete. Quality strategy for industry and education: Intern. Conf., 6-13 June 2009. Varna, Bulgaria, V. 2, 176 – 179. **8.** *Dudnikov, E. G.* (1987). Automatic control in the chemical industry. Moscow: Himija. **9.** *Karpuhina, N. V., Pastuhova, K. M., Sviridov, P. A.* (2003). Artificial intelligence techniques in problems of operational control and optimization of complex technological systems. Control problems, 3, 21-24. **10.** *Daffin, R., Paterson, Je., Zener, K.* (1972). Geometric programming. Moscow: Mir.

Надійшла (received) 18.12.2014

УДК 044.03; 681.518:061

М. В. ЕВЛАНОВ, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков;
Н. В. ВАСИЛЬЦОВА, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков;
В. А. НИКИТЮК, аспирант, ХНУРЭ, Харьков

МОДЕЛИ ОПЕРАЦИЙ ИНТЕГРАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЕРВИСОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Проведен анализ основных направлений развития сервис-ориентированных информационных систем. Разработаны математические модели операций интеграции описаний отдельных функциональных сервисов в реестр актуальных сервисов информационной системы. Предложен унифицированный метод интеграции отдельных функциональных сервисов, основным преимуществом которого является возможность досрочного прекращения выполнения операции интеграции, если обнаруживается ошибка, вызванная несоответствием описаний сервиса описаниям предметной области

Ключевые слова: информационная система, сервис-ориентированная архитектура, функциональный сервис, интеграция, реестр, онтология

Введение. В соответствии с современными тенденциями в развитии информационных систем (ИС) управления предприятиями и их процессами одним из часто реализуемых подходов к построению ИС корпоративного масштаба является сервис-ориентированная архитектура (Service-Oriented Architecture, SOA). Эта архитектура предполагает построение ИС из набора гетерогенных слабосвязанных компонентов (сервисов) [1]. Поэтому обязательным условием построения и внедрения архитектуры SOA-ИС является использование единой инфраструктуры описания сервисов (репозитория сервисов), разрешенных протоколов доступа и обмена сообщениями, форматов сообщений. Эта инфраструктура образует так называемую интеграционную шину (ИШ) (Enterprise Service Bus – ESB), являющуюся одним из центральных компонентов системы. Она устанавливает единые правила публикации сервисов, управления и информационного взаимодействия между приложениями различных систем, входящих в состав интегрированной системы. Это упрощает управление приложениями и их поддержку, а также снижает риск фрагментации приложений и процессов [2].

Однако на практике руководство предприятия, для которого создается SOA-ИС, склонно забывать о необходимости эффективного управления данными и сервисами SOA-ИС до тех пор, пока не становится слишком поздно [3]. Такое опоздание приводит к неоправданным затратам финасовых и других ресурсов на эксплуатацию отдельных сервисов SOA-ИС предприятия без возможности окупить эти затраты за счет эффекта от эксплуатации SOA-ИС в целом.