

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривод и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Аспирант кафедры электропривод и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СХОДИМОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ФУНКЦИОНАЛА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАГНЕЗИТОВЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Исследованы условия сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса приготовления магнетитовых огнеупорных изделий. Показано, что сигналы различной физической природы удобно представить в виде соответствующих совокупностей параметров. Устойчивая работа многопараметрической системы управления достигается путем представления их в виде сомножителей, что позволяет более эффективно реализовать данную методику для решения инженерных задач при оптимизации промышленных линий с множеством параметров, характеризующие как отдельные этапы так и технологический процесс в целом. Поскольку другие их сочетания приводят к существенному расхождению оптимизационного функционала и неопределенностям. На ряду с вышеизложенным необходимо учитывать линейные и не линейные зависимости между анализируемыми параметрами и их совокупностями. Разработаны математическая и компьютерная модели оптимального автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления магнетитовых огнеупорных изделий. Результаты моделирования согласуются с полученными на реальной технологической линии в условиях эксплуатации, что подтверждает работоспособность предлагаемой методики.

Ключевые слова: условия сходимости, оптимизационный функционал, многопараметрическая автоматизированная система управления, технологический процесс.

НОМЕНКЛАТУРА

$\xi(x, t)$ – оптимизационный функционал;
 $\zeta(x, t)$ – совокупность сигналов управления;
 $q(x, t)$ – параметры, контролирующие ход технологического процесса;
 $r(x, t)$ – сигналы исполнительных механизмов;
 x – координаты;
 t_1, t_2 – временные интервалы;
 N, M, K – конечные условия соответствующих стадий техпроцесса;
 i, j, k – начальные условия соответствующих стадий техпроцесса;
 α, γ, χ – нормировки;
 T – период наибольшей частотной составляющей сигналов техпроцесса;
 ν – порядковый номер гармоники;
 φ – согласующая переменная функция от обобщенного временного параметра протекания технологического процесса;
 z – обобщенный временной параметр протекания технологического процесса;
 t – временная ось;
 a – пределы периода;
 $\varphi', \varphi'', \varphi'''$ – совокупности сигналов различной физической природы, определяющих режимы работы и состояние исполнительных механизмов – гидро, пневмо- и электроприводов;
 Δt – разность во времени между реальным процессом и директивным заданием;
 $S_N(\beta)$ – ограничивающая область;

$\psi(\beta)$ – обобщенный нормируемый параметр;
 β – линейное преобразование для согласования области исследований;
 f – временная функция;
 $G_\Sigma(t, \nu)$ – периодическая функция;
 a_{\min}, a_{\max} – статически заданные параметры характеризующие технологический процесс;
 δ – интервал времени, в котором исследуется периодическая функция;
 ν – частота.

ВВЕДЕНИЕ

В мировой и отечественной практике промышленности широко внедряются технологические линии приготовления различных многокомпонентных изделий (огнеупоров, ячеистых бетонов, высококачественных сталей). Такая тенденция объясняется тем, что к таким изделиям предъявляются более высокие требования к качеству и технико-экономическим показателям. Эти требования могут быть достигнуты путем оптимизации автоматизированного управления технологическими процессами.

На стадиях отработки и внедрения предложенной методики оказалось, что на отдельных стадиях технологического процесса имели место существенные отклонения от директивного задания. Анализ причинно-следственных факторов показал, что в таких случаях многопараметрический оптимизационный функционал не обеспечивал соответствующих режимов исполнительных механизмов. Это вызвано неопределенностью условий сходимости обобщенных параметров многопара-

метрической системы автоматизированного управления [1, 2]. Таким образом, потребностью практики сформирована научно-практическая задача, требующая дальнейшего исследования и развития.

Целью настоящей работы является исследование и анализ условий сходимости оптимизационного функционала автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления магнетитовых огнеупорных изделий.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть мы имеем оптимизационный функционал исполнительных механизмов (1) технологического процесса приготовления магнетитовых изделий [1–2]

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

$$\text{где } \zeta(x, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t), \quad q(x, t) = \sum_{j=1}^M \gamma_j(t), \quad \rho(x, t) = \sum_{k=1}^K \chi_k(t).$$

На основании которого, отыскивается оптимальное автоматизированное управление.

Тогда задача исследования взаимосвязей между параметрами различной физической природы сводится к анализу условий сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса приготовления магнетитовых огнеупорных изделий.

С целью придания полученному выражению физического смысла необходимо показать, что разность между директивным и реальным режимом стремится к нулю.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вопросам технологических объектов посвящено довольно большое число публикаций [3–9], однако системы многопараметрического автоматизированного управления технологическими процессами требуют дальнейшего развития. Такие технологические линии характеризуются большим количеством управляющих систем и исполнительных механизмов различной физической природы, принципов работы и назначения. При этом необходимым условием является согласование оптимальных режимов гидро-, пневмо-, электроприводов, которые располагаются на различных участках технологической линии. В совокупности они определяют энергетическое состояние оборудования в целом и обобщенного директивного режима протекания технологического процесса, качество выпускаемой продукции, технико-экономические показатели.

Предложены критерии достижения оптимального автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом при линейной и нелинейной взаимосвязях между обобщенными параметрами: управляющими, контролирующими и состояния исполнительных механизмов [4–5]. Это позволило: существенно снизить непроизводительные потери и время работы исполнительных механизмов в режимах холостого хода; обеспечить замкнутый цикл техпроцесса и использование технологических отходов [10]. Однако недостатком работ посвященным многопараметрическим

системам автоматизированного управления [1, 2, 4, 5] является отсутствие анализа разности условий сходимости между реальным технологическим процессом и директивным заданием, что ограничивает его физическое представление.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование условий сходимости оптимизационного функционала, необходимо выполнить для поиска оптимального управления технологическим процессом в рамках директивного задания. В качестве примера на рис. 1, поз.5 показан директивный график поступления технологической смеси в соответствующие технологические емкости, а поз.7 характеризует реальный технологический процесс [1]. Очевидно, что с течением времени рабочие режимы исполнительных механизмов изменяются по различным периодическим законам, что обусловлено несоблюдением условий сходимости трех обобщенных параметров. Имеющие место расхождения поясняются нарушением условий сходимости оптимизационного функционала, инерционными свойствами исполнительных механизмов, износом и изменениями механических параметров, колебаниями давления в воздушной магистрали и напряжения в питающей сети, а также неравномерностью потока компонентов технологической смеси. Это подтверждает целесообразность исследования возможных условий сходимости обобщенных параметров для обеспечения оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом.

Оптимизационный функционал многопараметрической системы управления технологическим процессом должен удовлетворять следующему уравнению [5]:

С целью анализа условий сходимости, воспользуемся нормировкой и оптимизационный функционал (1) представим в следующем виде:

$$\xi_{\Sigma}(t, v) = (c_1 \cdot 0,5) + \sum_{v=1}^N [c'_v \cdot \cos(v\pi t/a) + c''_v \cdot \sin(v\pi t/a)], \quad (2)$$

где

$$c_1 = a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) dz; \quad (3)$$

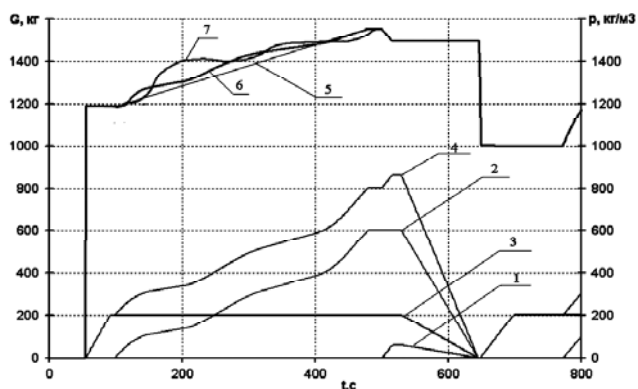


Рисунок 1 – Зависимости изменения веса (G, кг) и плотности (ρ , кг/м³) компонент технологической смеси, где 1 – специальные добавки, 2 – основная сухая смесь, 3 – вода, 4 – технологическая смесь, 5 – директивный режим, 6 – оптимизационный функционал, 7 – реальный технологический режим

$$c'_v = a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot \cos(v\pi z/a) dz; \quad (4)$$

$$c''_v = a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot \sin(v\pi z/a) dz; \quad (5)$$

$$\cos(v\pi t/a) = \cos v2\pi t = \cos v\omega t = \cos(2\pi t/T) = \cos(2\pi t/2a); \quad (6)$$

Условиям сходимости функции за пределами периода ($\gg 2a$) на временной оси (t) соответствует стремление функционала к нулю, согласно следующему выражению:

$$\xi_{\Sigma}(t, v) - [\varphi'(t \pm \Delta t) + \varphi''(t \pm \Delta t) + \varphi'''(t \pm \Delta t)] \cdot 3^{-1} \rightarrow 0 \Big|_{v \rightarrow \infty} \quad (7)$$

Путем подстановки значений постоянных (3)–(5) в (2) и последующих преобразований приходим к сумме следующих интегральных уравнений:

$$\begin{aligned} \xi_{\Sigma}(t, v) &= (2a^{-1}) \int_{-a}^a \varphi(z) dz + a^{-1} \sum_{v=1}^N \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot [\cos(v\pi z/a) \times \\ &\times \cos(v\pi t/a) + \sin(v\pi z/a) \cdot \sin(v\pi t/a)] dz = \\ &= a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot [0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi - t)/a] dz = \\ &= a^{-1} \int_{-a-t}^{a-t} \varphi(t + \beta) \cdot [0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi\beta/a)] d\beta. \end{aligned} \quad (8)$$

На основании физического представления протекающего технологического процесса анализ уравнения (8) показал, что более информативным является второй множитель. Поэтому для решения поставленной задачи целесообразно исследовать область, ограниченную следующим выражением:

$$S_N(\beta) = 0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi\beta/a). \quad (9)$$

Умножая уравнение (9) на $2\sin(\pi\beta/a)$, приходим к следующему условию для периодического сигнала:

$$\begin{aligned} S_N(\beta) \cdot \sin(\pi\beta/2a) &= \sin(\pi\beta/2a) + \sum_{v=1}^N 2\sin(\pi\beta/2a) \cdot \cos(v\pi\beta/a) = \\ &= \sin(\pi\beta/2a) + \sum_{v=1}^N [\sin(v+0,5) \cdot (\pi\beta/a) - \\ &- \sin(v-0,5)(\pi\beta/a)] = \sin(\beta+0,5)(\pi\beta/a). \end{aligned}$$

После ряда преобразований приходим к равнозначному равенству, которое позволяет оценить степень сходимости многопараметрического функционала в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_N(\beta) &= [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1} = \\ &= 0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi\beta/a). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя (10) в интегро-дифференциальное уравнение (8), приходим к выражению для частичной суммы ряда Фурье вида:

$$\begin{aligned} \xi_{\Sigma}(t, v) &= a^{-1} \int_{a_{\min} - \Delta t}^{a_{\max} - \Delta t} \{[\varphi(z + \beta) \sin((v+0,5)(\pi\beta/a))] \times \\ &\times [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta, \end{aligned} \quad (11)$$

Поскольку $\varphi(z)$ периодическая функция, изменяющаяся во времени с периодом $2a$, то в силу (10), вторые подынтегральные множители также периодические с параметром β . Это позволяет исследовать уравнение (11) и интегрировать его в пределах суммы периодов на интервале $a_{\min} < a < a_{\max}$ (т. е. сдвинуто вправо с сохранением физической сущности исследуемого процесса)

$$\xi(t, v) = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \varphi(z + \beta) \cdot \psi(\beta), \quad (12)$$

где

$$\psi(\beta) = [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) по параметру β в пределах $a_{\min} < a < a_{\max}$ приходим к следующему равенству:

$$a^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \{ \sin((v+0,5)(\pi\beta/a)) [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1} \} d\beta = (2a)^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} d\beta = 1. \quad (14)$$

На основании того, что подынтегральное выражение является четной функцией параметра β , выражение (14) мы вправе представить в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} a^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_n} [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a)) \cdot (2\sin(\pi\beta/2a))^{-1}] d\beta &= 0,5; \\ a^{-1} \int_{a_n}^{a_{\max}} [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a)) \cdot (2\sin(\pi\beta/2a))^{-1}] d\beta &= 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На основании физического представления и анализа системы (15) очевидно, что обобщенная функция множества параметров оптимизационного функционала в совокупности не должна превышать условий нормировки. На практике это обозначает формирование возможных погрешностей или пределов сходимости относительно номинальных режимов. Поскольку нам необходимо оценить условие сходимости, которое физически характеризует минимально возможные расхождения относительно номинальных параметров, то покажем, что подынтегральные функции системы (15) стремятся к нулю при $v \rightarrow \infty$. Это соответствует увеличению количества параметров, изменяющихся во времени по сложным периодическим законам. Ограничиваясь двумя осредненными параметрами и полагая, что третий остается неизменным, умножаем правое равенство (15) на

$\varphi'(t + \Delta t)$, а второе на $\varphi'(t + \Delta t)$ и складывая результат приходим к следующему выражению:

$$[\varphi'(t - \Delta t) + \varphi'(t + \Delta t)] \cdot 0,5 = a^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_n} \{\varphi(t - \Delta t) \times$$

$$\times [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta +$$

$$+ a^{-1} \int_{a_n}^{a_{\max}} \{\psi'(t + \Delta t) \cdot [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta. \quad (16)$$

Вычитая (16) из (11) приходим к следующему равенству:

$$\xi_{\Sigma}(t, v) - [\varphi'(t - \Delta t) + \varphi'(t + \Delta t)] \cdot 0,5 = a^{-1} \times$$

$$\times [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta +$$

$$+ a^{-1} \int_{a_n}^{a_{\max}} [\varphi'(t + \beta) - \varphi'(t - \beta)] \times$$

$$\times [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta. \quad (17)$$

С целью придания полученному выражению физического смысла покажем, что разность между директивным и реальным режимом стремится к нулю.

При этом рассмотрим случай, когда оба слагаемых в (17), которые представляют изменение во времени совокупности двух информационных сигналов и неизменном третьем, стремятся к нулю при увеличении членов в спектре частот ($v \rightarrow \infty$) стремящихся к бесконечности. С этой целью исследуем второй интеграл уравнения (17). Для периодической функции его удобно представить в следующем виде:

$$G_{\Sigma}(t, v) = G'_{\Sigma}(t, v) + G''_{\Sigma}(t, v), \quad (18)$$

где

$$G'_{\Sigma}(t, v) = \pi^{-1} \int_0^{\delta} [f(t + \Delta t) - f(x - \Delta t)] \cdot v_{\Sigma}^{-1} \times$$

$$\times (\pi v/2a) \cdot \sin[(v + 0,5)(\pi v/a)]\} d\delta;$$

$$G''_{\Sigma}(t, v) = a^{-1} \int_0^{\delta} [f(t + \Delta t) - f(x, -\Delta t)] \times$$

$$\times [2 \sin(v\beta/2a)]^{-1} \cdot \sin[(v + 0,5)(\pi v/a)]\} d\delta, \quad (19)$$

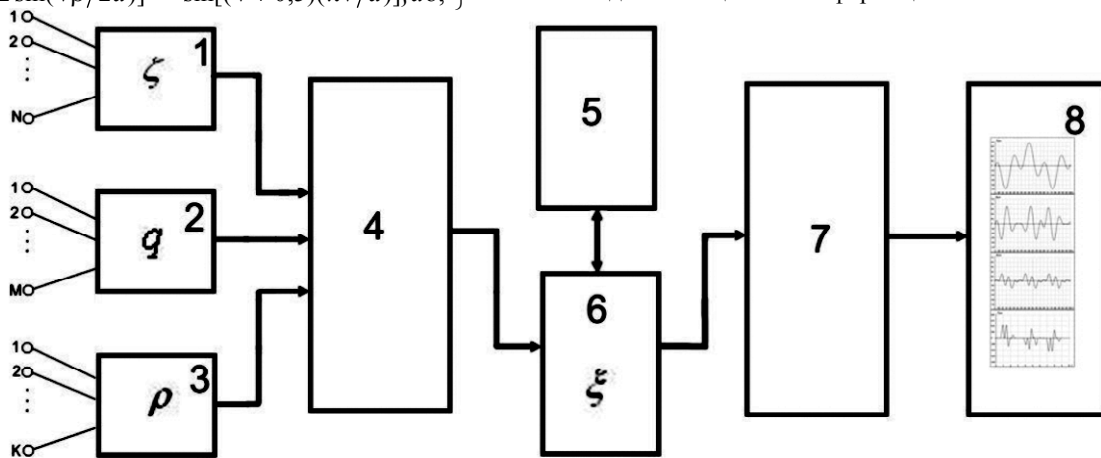


Рисунок 2 – Структурная схема компьютерной модели условий сходимости оптимизационного функционала, где: 1 – совокупность сигналов управления, 2 – параметры, контролирующие ход технологического процесса, 3 – сигналы исполнительных механизмов, 4 – блок нормировки, 5 – директивное задание, 6 – результирующий сигнал, 7 – блок логического анализа условий сходимости обобщенных параметров, 8 – результаты моделирования

– периодическая функция удовлетворяет следующим граничным условиям $(\delta_0 \div \delta_{\max}) < (a_{\min} \div a_{\max}) = 2a$.

Очевидно, что в первом уравнении системы (19) $(\pi v/2a) \cdot [\sin(\pi v/2a)]^{-1} \rightarrow 1$ при $v \rightarrow \infty$. Поэтому, при ограничении временного интервала $0 < v_1 < 2\delta \ll 2a$ до удвоенного периода первой гармоники $1 < (\pi v/2\delta) \cdot [\sin(\pi v/2\delta)]^{-1} < 2$ при действительной сумме $v = 1, 2, 3, \dots, N$ $|\sin(v + 0,5)(\pi v/a)| \leq 1$. Следовательно, первый интеграл в (19)

$$\pi^{-1} \int_0^{\delta} [f(t + \Delta t) - f(x - \Delta t)] \cdot v_{\Sigma}^{-1} \cdot (\pi v/2a) \times$$

$$\times \sin[(v + 0,5)(\pi v/a)]\} d\delta \leq (2\delta) \cdot \pi^{-1} [|f(x + \Delta t)| + 1]. \quad (20)$$

Отсюда следует, что при соблюдении номинальных режимов исполнительных механизмов технологической линии обобщенный функционал не должен превышать заданной погрешности, что на практике представляет довольно сложную инженерную задачу.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Компьютерное моделирование условий сходимости оптимизационного функционала осуществлялось согласно структурной схеме приведенной на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения.

При этом учитывалось, что во втором интеграле выражение (19) числитель и знаменатель представляют собой кусочно-непрерывную и кусочно-гладкую функции, которые при $v \rightarrow \infty$ стремятся к наименьшему значению. Исследования выполнялись на двух моделях.

В первой модели оптимизационный функционал представлялся в виде суммы обобщенных параметров согласно выражению (2), а во второй – в виде сомножителей (1). Результаты исследований, при выполнении условий нормировки, приведены на рис. 3–7. Физико-тригонометрическая интерпретация полученных результатов, соответствующих модельной задаче (2) приведена на рис. 3. С целью упрощения, в модели учитывалась, что два обобщенных информационных сигнала отобра-

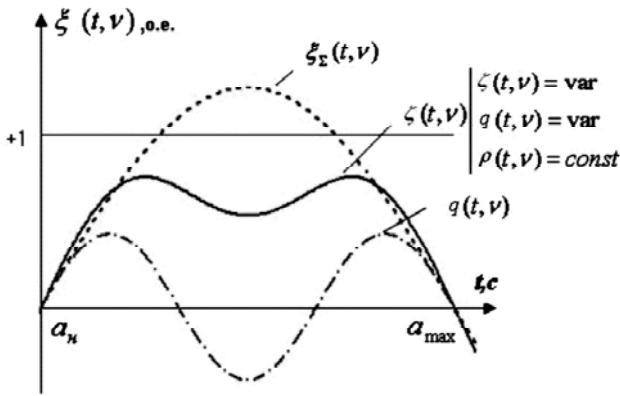


Рисунок 3 – Физико-аналитическая интерпретация условий сходимости оптимизационного функционала

жали наиболее неблагоприятное их сочетание, а третий оставался неизменным в течении времени. Так, например, совокупность первого информационного канала изменяется во времени по синусоидальному закону $\zeta(t, \nu) = 4\pi^{-1} \cdot \sin(\pi t/a)$, а второй – по несинусоидальному $q(t, \nu) = 4\pi^{-1} \cdot \sin(\pi t/a) + 3^{-1} \cdot \sin(3\pi t/a)$. Результирующий оптимизированный сигнал $\xi_{\Sigma}(t, \nu) = \zeta(t, \nu) + q(t, \nu)|_{\rho(t, \nu)=const}$ соответствовал следующему выражению: $\xi_{\Sigma}(t, \nu) = 4\pi^{-1} \cdot 3^{-1} \cdot \sin(3\pi t/a)$.

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты компьютерного моделирования, которое осуществлялось на основе собственной программы написанной в среде Visual Basic. Модель 1 для случая, когда обобщенные параметры изменялись во времени по периодическому закону (условные обозначения $\zeta(t, \nu)$ и $q(t, \nu)$). При этом информация по третьему каналу принималась неизменной $\rho(t, \nu) = const$ и изменялась в пределах нормировки. Моделирование выполнялось для наиболее неблагоприятного сочетания информационных сигналов. Результирующий сигнал $\xi_{\Sigma}(t, \nu)$ изменялся по несинусоидальному закону. При этом по абсолютной величине он превышал нормирующий на 30–45%. Очевидно, что при большом количестве информационных сигналов, представленных в нормированном виде, погрешность оптимизационного функционала будет увеличиваться. Особенно характерно это проявляется для случаев, когда информационные сигналы во времени изменяются по вероятностному несинусоидальному закону, что следует из результатов теоретических исследований.

На практике, в компьютерной и математической моделях, а также на экспериментальной установке, за оптимальное значение можно принимать номинальное или директивное задание. Условная единица характеризует нормировку в области допустимых отклонений параметров. Очевидно, что при наиболее неблагоприятных сочетаниях информационных сигналов погрешность управления будет увеличиваться, что соответствует превышению оптимизационного функционала $\xi_{\Sigma}(t, \nu)$ относительно условий нормировки.

Во второй модели оптимизационный функционал представлялся в виде множителей обобщенных параметров согласно выражению (1). Результаты исследований, при выполнении условий нормировки, приведены

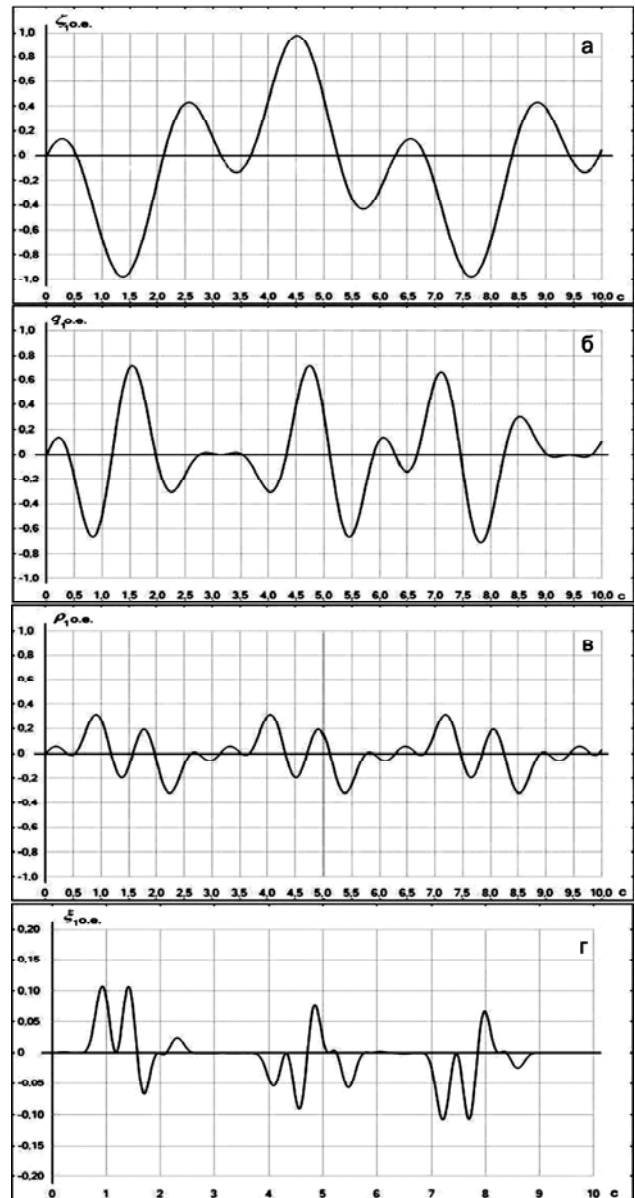


Рисунок 4 – Физико-аналитическая интерпретация условий сходимости оптимизационного функционала 1-я серия, где а, б, в – совокупности информационных сигналов ξ, q, ρ , соответственно ; г – результирующий сигнал

на рис. 4–5. Здесь показано серии опытов при различных сочетаниях трех обобщенных параметров, изменяющихся во времени по различным периодическим законам. Из приведенных графических зависимостей видно, что даже для случая, когда один из обобщенных параметров превышает условие нормировки, оптимизационный функционал не превышает 0,08–0,5 уровня нормировки. Физически это обозначает, что погрешность между директивным и реальным управлением многопараметрическим технологическим процессом существенно уменьшается по сравнению с первой моделью.

Очевидно, что оптимизационный функционал более рационально представлять в виде обобщенных множителей. Для других технологических процессов необходимо анализировать его особенности, характерные признаки, а также режимы и условия эксплуатации исполнительных механизмов и управляющих систем.

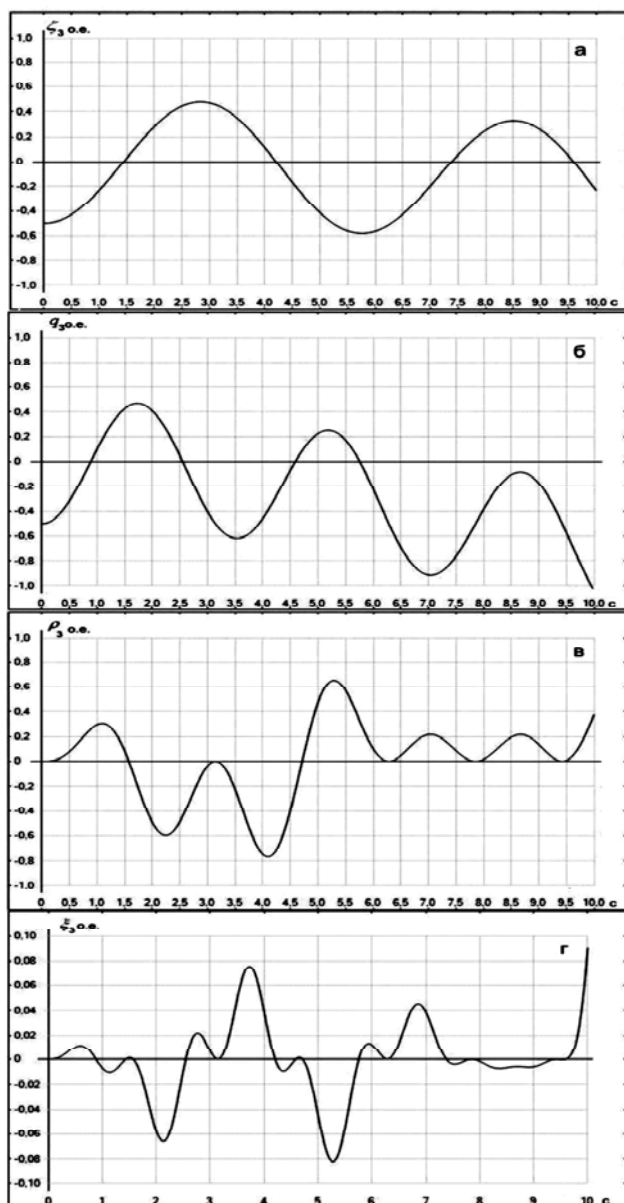


Рисунок 5 – Физико-аналитическая интерпретация условий сходимости оптимизационного функционала 4-я серия, где а, б, в – совокупности информационных сигналов ξ , q , ρ , соответственно ; г – результирующий сигнал

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 1 – Предельные значения оптимизационного функционала ξ и соответствующих совокупностей информационных сигналов ξ , q , ρ

Совокупности информационных сигналов	1-я серия	2-я серия	3-я серия	4-я серия
ξ	0,98	0,98	0,48	0,98
q	0,76	0,76	0,48	0,98
ρ	0,32	1	0,65	0,77
ξ	0,11	0,45	0,09	0,41

Основные положения теоретических исследований и компьютерного моделирования сопоставлялись с результатами, полученными на действующей технологической

линии приготовления огнеупорных изделий. Оптимизационный функционал отображался в виде всевозможных сочетаний совокупностей обобщенных сигналов как показано на рис. 1. При неизменяемых во время цикла директивных значениях компонентов, как видно из рис. 1, в процессе приготовления реальная отработка исполнительных механизмов технологической линии в отдельные моменты времени отличается от директивных (поз. 7 рис. 1).

Наибольшие отклонения наблюдаются в начальной и конечной фазах техпроцесса. Это поясняется инерционными свойствами исполнительных механизмов, износом и изменениями их механических параметров, колебаниями давления в воздушной магистрали и напряжения в питающей сети, а также неравномерностью потока компонент технологической смеси. При этом оптимизационный функционал принимает соответствующие значения и осуществляет автоматизировано корректировку поступления соответствующих компонентов в дозаторы-смесители. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что использование оптимизационного функционала (поз. 6 рис. 1) в системе автоматизированного управления технологическим процессом позволяет уменьшить погрешность от 6% до 3%, а также сократить технологические простои исполнительных механизмов линии между отдельными операциями.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросам исследования оптимального управления многопараметрическими объектами посвящено довольно большое количество публикаций [1–10]. Полученные решения учитывают характерные особенности, условия и режимы различных исполнительных механизмов и управляющих систем. По этому не один из предложенных подходов не может использоваться для решения поставленной задачи. Методологический подход для технологических линий с пневмо-, гидро-, и электроприводами наиболее полно изложены в публикациях [2, 4–6]. Однако в последних работах отсутствует всесторонний анализ условий сходимости оптимизационного функционала при различных сочетаниях информационных каналов исполнительных механизмов и управляющих систем. Отсутствие таких исследований приводит к ряду неопределенностей при различных сочетаниях информации и рассогласовании режимов исполнительных механизмов. Решение этого вопроса позволяет осуществлять оптимальное автоматизированное управление при линейных и не линейных взаимосвязях между контролируемыми и управляющими параметрами. Эффективность предложенного методологического подхода проверено на компьютерной модели и на технологической линии приготовления магнетитовых огнеупорных изделия. Это подтверждает возможность отображать одновременно работу пневмо-, гидро- и электроприводов в сочетании с управляющими устройствами. Его целесообразно использовать на стадиях отработки отдельных этапов или наладке.

Также целесообразно продолжить дальнейшие исследования оптимизационного функционала при линейных, нелинейных и комбинированных взаимосвязях между параметрами исполнительных механизмов и управляющих систем многопараметрической технологической линии.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа получено, что при разработке системы автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом оптимизационный функционал целесообразно формировать по совокупностям соответствующих информационных сигналов одинаковой физической природы и принадлежности.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в программно-аналитическом анализе на базе которого осуществляется поиск и управления оптимальным режимом управления многопараметрического комплекса с учетом нелинейных взаимосвязей.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что при внедрении на промышленных предприятиях разработанной методики автоматизированного анализа текущих параметров на основании которых осуществляется оптимальное управление технологическим процессом даст существенный экономический эффект.

Сходимость оптимизационного функционала в значительной степени зависит от выбора и соответствия начальных и граничных условий, а также от согласования их с параметрами исполнительных механизмов и программно-логических устройств реальной технологической линии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Моделирование оптимальных режимов управления многопараметрического технологического комплекса».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирный В. О. Моделирование оптимальных режимов многопараметрическими технологическими объектами / В. О. Мирный, Э. М. Кулинич, В. В. Зиновкин // Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропри-

вод: Всеукраинская научно-техническая конференция, Краматорск, 17–21 декабря 2012 г. : сборник материалов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – С. 50–51.

2. Зиновкин В. В. Моделирование условий сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса / В. В. Зиновкин, В. О. Мирный // Наукові праці Донецького національного технічного університету: Серія «Електротехніка та енергетика». – Донецьк : ДонНТУ, 2013. – № 2 (15). – С. 111–115.
3. Сажнев Н. П. Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика / Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Гарнашевич. – Минск : Стринко, 1999. – С. 4–7.
4. 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 : Міжнародна конференція, Львів, 14–16 травня 2009 р. : матеріали. – Львів : Львівська політехніка, 2009. – С. 4–42.
5. Кулинич С. М. Підвищення ефективності евтоматизації процесів керування технологічними комплексами приготування газобетону / С. М. Кулинич : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Е. М. Кулинич. – Херсон, ХНТУ, 2013. – 20 с.
6. Муровцев Д. Ю. Информационные технологии проектирования систем энергосберегающего управления динамическими объектами / Д. Ю. Муровцев // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 4 (46). – С. 82–87.
7. Волошин О. Ф. Процедури послідовного аналізу і відсіювання варіантів комбінаторних оптимізаційних задач з нечіткими функціоналами / О. Ф. Волошин, М. П. Малаяр, О. О. Швалагін // Вісник Київського національного університету. Серія : Кібернетика. – 2010. – № 10. – С. 4–7.
8. Чжан Жель-вей Одна задача синтеза оптимальных систем по принципу максимума / Жель-вей Чжан // Автоматика и телемеханика. – 1961. – Т. 22, № 10. – С. 1302–1308.
9. Kalman R. E. Contribution to the theory of optimal control / R. E. Kalman // Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana. – 1960. – Vol 5, №1. – P. 102–119.
10. Царик А. М. Как начать строительство завода по производству ячеистого бетона» / А. М. Царик // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : 3-й Международный научно-практический семинар : сборник трудов. – Севастополь, 2007. – С. 15–17.

Статья поступила в редакцию 25.09.2013.

После доработки 10.05.2015.

Зиновкин В. В.¹, Мирный В. О.²

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривод та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Аспірант кафедри електропривід та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗБІЖНОСТІ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ФУНКЦІОНАЛУ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ МАГНЕЗИТНИХ ВОГНЕТРИВКИХ ВИРОБІВ

Досліджено умови збіжності оптимізаційного функціоналу багатопараметричного технологічного процесу приготування магнетитових вогнетривких виробів. Показано, що сигнали різної фізичної природи зручно представити у вигляді відповідних сукупностей параметрів. Стійка робота багатопараметричної системи управління досягається шляхом представлення їх у вигляді співмножників, що дозволяє більш ефективно реалізувати дану методику для вирішення інженерних завдань при оптимізації промислових ліній з безліччю параметрів, що характеризують як окремі етапи так і технологічний процес в цілому. Оскільки інші їх поєднання призводять до істотного розбіжності оптимізаційного функціоналу та неточностям. На ряду з вищевикладеним необхідно враховувати лінійні і не лінійні залежності між аналізованими параметрами і їх сукупностями. Розроблено математична та комп'ютерна моделі оптимального автоматизованого управління багатопараметричних технологічним процесом приготування магнетитових вогнетривких виробів. Результати моделювання узгоджуються з отриманими на реальній технологічній лінії в умовах експлуатації, що підтверджує працездатність запропонованої методики.

Ключові слова: умови збіжності, оптимізаційний функціонал, багатопараметрична автоматизована система керування, технологічний процес.

Zinovkin V. V.¹, Mirnyj V. J.²

¹Dr.Sc., Professor, Professor of Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²Post-graduate student of Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

RESEARCH OF CONVERGENCE CONDITIONS OF THE MULTIPARAMETER OPTIMIZATION FUNCTIONAL OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MUNUFACTURING MAGNESITE REFRACTORY PRODUCTS

The conditions for the convergence of multi-parameter optimization of the functional process of preparation of magnesite refractory products were researched. It is shown that the signals of different physical nature is conveniently represented in the form of corresponding sets of parameters. Stable operation of multiparameter control is achieved by representing them as factors that allows more efficient implementation of this technique for the solution of engineering problems in the optimization of production lines with a set of parameters that characterize both the individual stages and the process as a whole. As other combinations lead to differ materially functional optimization and uncertainties. Along with the above, it is necessary to take into account the linear and non linear dependence between the analyzed parameters and their aggregate. The mathematical and computer models of optimal automated control multivariable process of preparation of magnesite refractory products. The simulation results are consistent with those obtained on a real production line in operation, which confirms the efficiency of the proposed method.

Keywords: terms of convergence, optimization functional, the multiparameter automated control system, technological process.

REFERENCES

1. Mirnyj V. O., Kulinich E'. M., Zinovkin V. V. Modelirovanie optimal'nyx rezhimov mnogoparametricheskimi texnologicheskimi ob'ektami, *Sovremennye informacionnye texnologii, sredstva avtomatizacii i e'lektroprivod: Vseukrainskaya nauchno-texnicheskaya konferenciya. Kramatorsk, 17–21 dekabrya 2012 g. : sbornik materialov.* Kramatorsk, DGMA, 2012, pp. 50–51.
2. Zinovkin V. V., Mirnyj V. O. Modelirovanie uslovij sxodimosti optimizacionnogo funkcionala mnogoparametricheskogo texnologicheskogo processa, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo texnichnogo universitetu: Seriya «Elektrotexnika ta energetyka».* Donec'k, DonNTU, 2013, No. 2 (15), pp. 111–115.
3. Sazhnev N. P., Goncharik V. N., Garnashevich G. S. Proizvodstvo yacheistobetonnyx izdelij. Teoriya i praktika. Minsk, Strinko, 1999, pp. 4–7.
4. Zinovkin V. V., Kulinich Ye. M., Umerov Yu. N., Mirnyj V. O. Avtomatyzovana sistema keruvannya bagatoparametrychnogo texnologichnogo procesu prygotuvannya gazobetonu, *Energetyka ta systemy keruvannya, 2009 : Mizhnarodna konferenciya, L'viv, 14–16 travnya 2009 r. : materialy.* L'viv, L'viv's'ka politehnika, 2009, pp. 40–42.
5. Kulinich Ye. M. Pidvyshhennya efektyvnosti avtomatyzacii procesiv keruvannya technologichnymy kompleksamy prygotuvannya gazobetonu: avtoref. dis. ... kand. techn. nauk : 05.13.07 / Ye. M. Kulinich. Kherson, KhNTU, 2013, 20 p.
6. Murovcev D. Yu. Informacionnye texnologi proektirovaniya sistem e'nergoberegayushhego upravleniya dinamicheskimi ob'ektami, *Sistemy upravleniya i iformacionnye tekhnologii,* 2011, No. 4(46), pp. 82–87.
7. Voloshin O. F., Malyar M. P., Shvalagin O. O. Proceduri poslidovnogo analizu i vidsiyuvannya variantiv kombinatornix optimizacijnix zadach z nechitkimi funkcionalami, *Visnik Kyivs'kogo nacional'nogo universitetu. Seriya: Kibernetika,* 2010, No. 10, pp. 4–7.
8. Chzhan Zhel'-vej Odnazadacha sinteza optimal'nyx sistem po principu maksimuma, *Avtomatika i telemexanika,* 1961, Vol. 22, No. 10, pp. 1302–1308.
9. Kalman R.E. Contribution to the theory of optimal control, *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana,* 1960, Vol 5, No. 1, pp. 102–119.
10. Carik A. M. Kak nachat' stroitel'stvo zavoda po proizvodstvu yacheistogo betona», *Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona v stroitel'stve : 3-j Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij seminar : sbornik trudov.* Sevastopol', 2007, pp. 15–17.