

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*Тытюк В.К., к.т.н., Михайленко А.Ю., аспирант
Криворожский технический университет
ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027
E-mail: dinalt2006@gmail.com*

Введение. Периодическим является технологический процесс, в котором за сравнительно небольшой промежуток времени (часы или дни) вырабатывается определенное, ограниченное количество конечного продукта. При этом в течение отведенного промежутка времени периодический процесс является непрерывным.

В [1] дается следующее определение для периодического режима работы технологического процесса: «Режимы, в которых характеризующие процесс переменные периодичны, а состояния процесса испытывают разрывы, называют периодическими. Обычно такие разрывы связаны с загрузкой и выгрузкой продуктов из аппарата, что сопровождается прекращением процесса и остановкой аппарата на некоторое время».

К широкому классу периодических технологических процессов относятся процессы плавки в металлургии, нагрев слитков в нагревательных колодцах и камерных печах перед горячей обработкой давлением (прокатка, прессовка, ковка), транспортировка грузов, процессы металлообработки, производство полимеров и многие другие. Очень часто встречается ситуация, когда сложный производственный процесс образуется за счет связывания отдельных процессов, когда обрабатываемые продукты движутся по цепи сложным образом соединенных технологических агрегатов, проходя, таким образом, несколько стадий производства.

В [2] указывается, что «увеличение значения факторов, улучшающих технико-экономические показатели следующей ступени, как правило, снижает эти показатели для данной ступени. ... В результате невозможно сформулировать один общий критерий оптимизации для подсистем, полностью согласующийся с выходным критерием всей системы».

В силу широкой распространенности рассматриваемого класса технологических процессов проблема дальнейшего повышения эффективности работы таких технологических процессов является весьма актуальной.

Цель работы. Исследование процессов оптимального управления в последовательно связанных многостадийных производственных

процессах и определение возможностей и направлений для повышения эффективности работы процессов такого типа.

Материал и результаты исследования. Одной из центральных проблем теории автоматического управления (ТАУ) признана [3] проблема постановки цели управления. Эта проблема выходит за рамки собственно ТАУ, являясь в то же время первым этапом решения проблемы автоматического управления любым объектом. Понятие цели управления применительно к процессам оптимального управления трансформируется в критерий оптимизации, функцию цели. Как указано в [4], «Критерий оптимизации, эффективность ... формализованный смысл наших стремлений... В любой работе выбор критерия предопределяет ее успех».

При исследовании периодических технологических процессов предлагается использовать критерии оптимизации, предложенные в [5, 6], в виду их универсальности, заключающейся в том, что при их формулировке не используется информация о конкретных особенностях технологического механизма.

В [5] предложен технико-экономический критерий для определения оптимального времени цикла периодического технологического процесса. Предложенный критерий имеет следующий вид:

$$I_c = \frac{F_T(x(T)) - F_0(x(0)) - \int_0^T f_0(u) dt - Q_B}{T + T_B} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $F_T(x(T))$ – стоимость конечного продукта;

$F_0(x(0))$ – затраты на сырье; $\int_0^T f_0(u) dt$ – затраты

на поддержание выбранного режима; Q_B – вспомогательные затраты, связанные с загрузкой и выгрузкой продукта, регенерацией катализатора и пр.; T_B – время вспомогательных операций; T – продолжительность цикла.

В [6] предложен критерий эффективности преобразования ресурсов, определяемый по выражению

$$kE = \frac{(p_e - r_e)^2}{p_e \cdot r_e \cdot t_e^2} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где p_e – стоимостная оценка выходных продуктов операции; r_e – стоимостная оценка входных продуктов операции с учетом затрат на поддержание выбранного режима; t_e – время выполнения операции, включая время вспомогательных операций. Данный критерий использует те же исходные данные, что и критерий, рассмотренный в [5].

В работе [5] предлагается оптимизировать однопродуктовый многостадийный периодический технологический процесс, состоящих из последовательно включенных установок и агрегатов с порционной подачей сырьевых продуктов, то есть, чтобы продукт из i -го аппарата поступал в $(i+1)$ -й (рис. 1). Требуется найти такой режим функционирования каждой установки (давления, температуры и т.п.) при котором общая эффективность работы схемы была максимальной. Вектор c^{n+1} характеризует количество и свойства готового продукта, а c^1 – расход и свойства сырья.



Рисунок 1 – Структура последовательно включенных установок

Для исследования связанного производственного процесса была разработана имитационная технико-экономическая модель технологического процесса, представляющая собой логико-математическое описание её свойств.

Основными характеристиками периодического технологического процесса с точки зрения изучаемых критериев управления являются длительность процесса t_e , а также стоимостные оценки входных продуктов операции с учетом затрат на поддержание выбранного режима r_e и выходных продуктов операции p_e . Стоимостная оценка выходного продукта технологической операции является практически постоянной величиной, а длительность операции и затраты на поддержание выбранного режима существенно зависят от выбранного в результате управления режима работы оборудования.

Для простоты рассмотрим элементарный технологический процесс с одним управляющим воздействием u , одним входным и одним выходным продуктами.

Затраты на выполнение отдельной технологической операции складываются из стоимостной оценки

входного продукта r_M и стоимостной оценки на поддержание выбранного технологического режима r_3

$$r_e(u) = r_M + r_3(u). \quad (3)$$

Первая составляющая этой суммы не зависит от управления и определяется в основном геометрическими размерами и нормой загрузки оборудования. Затраты на поддержание выбранного режима существенно зависят от выбранного управления. Длительность технологической операции также является функцией от выбранного режима управления $t_e = f(u)$.

Основываясь на анализе литературных источников, [8], а также на результатах собственных экспериментальных исследований [9], можно утверждать, что в первом приближении обе эти зависимости могут быть аппроксимированы квадратичной параболой, причем они могут как иметь, так и не иметь минимум в области допустимых изменений управляющего воздействия.

Таким образом, имитационную модель технологической операции периодического технологического процесса можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} t_e(u) = a_{e0} + a_{e1} \cdot u + a_{e2} \cdot u^2; \\ r_e(u) = r_M + a_{M0} + a_{M1} \cdot u + a_{M2} \cdot u^2. \end{cases} \quad (4)$$

По этим данным можно определить показатель качества отдельной технологической операции. Несложно построить и зависимость критерия от управления, визуальное определение наличия или отсутствия максимума.

Рассмотрим работу цепи из двух последовательно соединенных периодических технологических процессов, описываемых предложенной имитационной моделью.

Так как управление отдельными процессами может осуществляться независимо, то мы получаем двумерный объект управления с двумя управляющими входами.

При этом суммарные затраты на поддержание выбранного режима управления будут равняться сумме затрат отдельных процессов

$$r_e(u) = r_M + a_{M10} + a_{M11} \cdot u_1 + a_{M12} \cdot u_1^2 + a_{M20} + a_{M21} \cdot u_2 + a_{M22} \cdot u_2^2, \quad (5)$$

а суммарная длительность связанной технологической операции с учетом возможности параллельной работы обоих технологических процессов вычисляется как

$$t_e(u_1, u_2) = \max [t_{e1}(u_1), t_{e2}(u_2)]. \quad (6)$$

Эта формула учитывает появление простоев одного из процессов при несогласованности длительности отдельных процессов.

В таблице 1 приведены параметры параболической аппроксимации для зависимостей имитационных моделей отдельных технологических процессов, которые были использованы в численных расчетах.

Таблица 1 – Параметры аппроксимации для имитационных моделей технологических процессов.

Переменная	a_0	a_1	a_2
rm_1	7	-0,18	0,0015
t_{e1}	70	-0,9	0,005
rm_2	10	-0,24	0,0015
t_{e2}	65	-0,5	0,005

Воспользовавшись приведенными выше зависимостями для определения основных показателей технологической операции и критериев управления, применительно к структурной схеме (рис. 1) был выполнен расчет зависимостей критериев управления от сигналов управления $kE = f(u_i, u_{i+1})$ и $I_c = f(u_i, u_{i+1})$.

Соответствующие графики приведены на рис. 2.

Оба критерия имеют поверхность отклика в форме параболоида с единственным экстремумом в области изменения сигналов управления.

Используя метод последовательного приближения, были уточнены координаты экстремумов критериев управления.

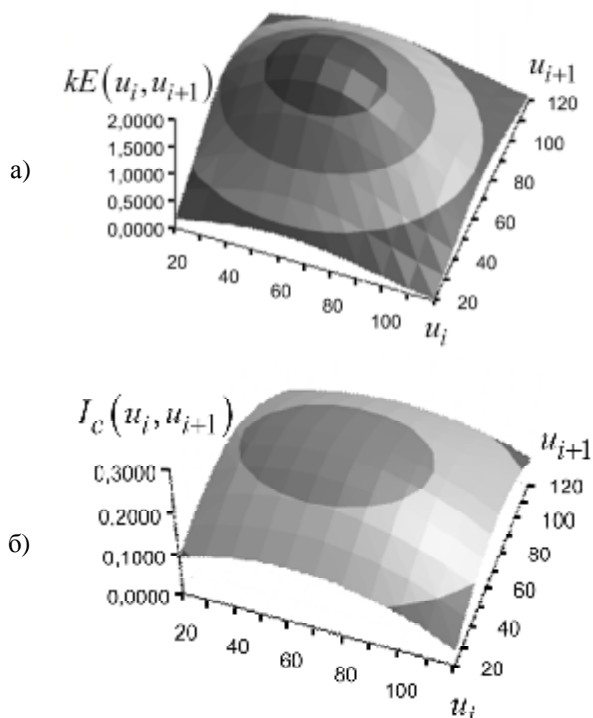


Рисунок 2 – Результаты имитационного моделирования поверхности критериев управления для двухстадийного технологического процесса: а) двумерная функция отклика при оптимизации по критерию эффективности использования ресурсов; б)

при оптимизации по критерию, предложенному Цирлиным А.М.

Для показателя эффективности преобразования ресурсов максимум достигается в точке с координатами $kE_{max}(60; 69, 75) = 1,8302$. Абсолютный эффект операции в этой точке составил 12,8424 стоимостных единиц на операцию при длительности операции $t_e = 54,4503$ с.

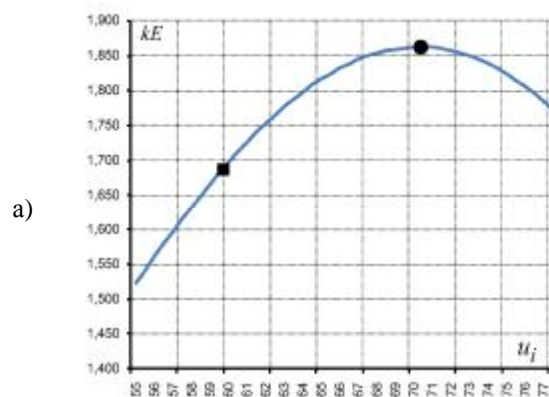
Для показателя Цирлина А.М. максимум достигается в точке с координатами $I_{cmax}(60; 60, 75) = 0,2363$. Абсолютный эффект операции в этой точке составил 12,7367 стоимостных единиц на операцию при длительности операции $t_e = 54,9028$ с.

Как изменился бы оптимальный режим работы каждого из механизмов, если бы эти механизмы работали раздельно? Каждый из технологических процессов имеет собственную зависимость критерия управления от величины управляющего воздействия. Используя параметры из таблицы 1, можно рассчитать, каковы значения критериев управления при условии раздельной, не взаимосвязанной работы технологических процессов.

На рис. 3 и 4 приведены графики зависимостей критериев управления технологических механизмов от управляющего воздействия при условии их раздельной работы.

Представленные показатели управления имеют один экстремум в области допустимых управлений.

Для i -го механизма максимум показателя эффективности достигается при управлении $kE_{max}(70, 5) = 1,861$; максимум критерия Цирлина достигается при управлении $I_{cmax}(72) = 0,19871$.



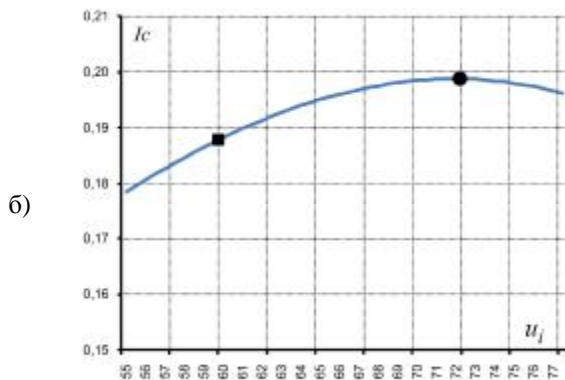


Рисунок 3 – Собственные зависимости критериев управления для i -го механизма: а) одномерная функция отклика при оптимизации по критерию эффективности использования ресурсов; б) при оптимизации по критерию Цирлина А.М.

Для $(i+1)$ -ого механизма максимум показателя эффективности достигается при управлении $kE_{max}(72,5) = 0,30335$; максимум критерия Цирлина достигается при управлении $I_{cmax}(71,6) = 0,11844$.

Непосредственное сравнение абсолютных эффектов, получаемых при отдельной и совместной работе механизмов, выполнить нельзя, так как эти режимы работы различаются еще и длительностью исполнения технологических операций.

Обращает на себя внимание тот факт, что при взаимосвязанной работе двух механизмов в общем оптимальном режиме их рабочие точки не совпадают с собственными оптимальными условиями работы.

На графиках (рис. 3, 4) круглыми маркерами обозначены точки собственных оптимальных режимов работы механизмов i (рис. 3) и $i+1$ (рис. 4). Квадратными маркерами обозначены вынужденные рабочие точки тех же механизмов при оптимизации последовательно соединенной цепи агрегатов.

Анализ результатов имитационного моделирования позволяет прийти к заключению, что при оптимизации технологического процесса, состоящего из двух последовательно соединенных агрегатов, каждый из них будет функционировать в режиме, далеком от оптимального.

При взаимосвязанном режиме работы многостадийных технологических процессов оптимальный режим работы достигается как компромисс между режимами работы отдельных процессов. При этом ни один из входящих в цепочку процессов не работает в оптимальном режиме. Как и упоминалось в [2], оптимизация работы отдельного технологического процесса в цепи приводит к ухудшению показателей многостадийного процесса в целом.

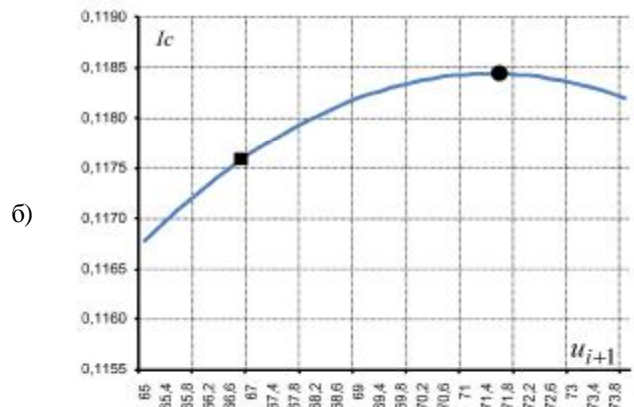
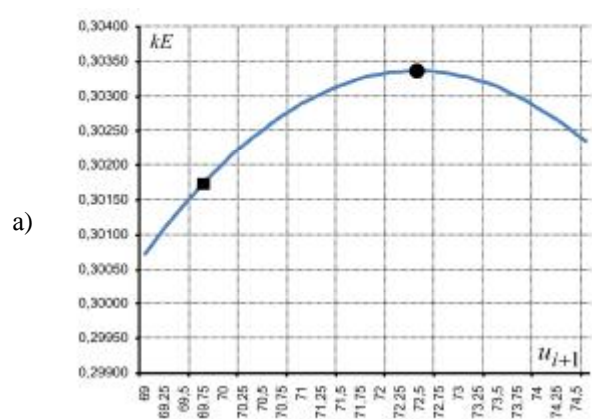


Рисунок 4 – Собственные зависимости критериев управления для $(i+1)$ -ого механизма: а) одномерная функция отклика при оптимизации по критерию эффективности использования ресурсов; б) при оптимизации по критерию Цирлина А.М.

Как показывает подробный анализ различий режимов индивидуальной работы технологического процесса по сравнению с его работой в составе многостадийного процесса, основной проблемой стыковки отдельных процессов является обеспечение «бесшовной» стыковки механизмов во временной области с целью минимизации непроизводительных простоев отдельных процессов. В приведенном примере в оптимальном режиме работы двухстадийного процесса первый технологический процесс находится в состоянии непроизводительного ожидания до 30% от общего времени работы.

В реальных условиях за счет тщательного подхода к проектированию машин и агрегатов, предназначенных для работы в составе многостадийных технологических процессов, такое рассогласование будет меньше.

Используя проектно-конструкторские решения и тщательное планирование производства, можно уменьшить непроизводительные простои оборудования, но избавиться от них полностью, ограничиваясь таким набором решений, невозможно.

Для дальнейшего повышения эффективности работы многостадийных технологических процессов

необходима структурная оптимизация таких процессов путем соединения всех или некоторых отдельных технологических процессов цепочки через разделительные управляемые системы [9].

При этом могут быть обеспечены оптимальные режимы отдельных технологических процессов и повышение эффективности многостадийного процесса в целом. На данном этапе исследований можно предположить, что увеличение эффективности работы многостадийного технологического процесса сделает экономически выгодным использование дополнительных разделительных систем.

Выводы. Установлено, что основной причиной, ограничивающей эффективность многостадийных технологических процессов, является несогласованность длительности отдельных процессов. Оптимизация управления отдельными технологическими процессами, как правило, ухудшает показатели работы многостадийного процесса в целом. Дальнейшее повышение эффективности многостадийных технологических процессов лежит в области структурной оптимизации за счет применения разделительных управляемых систем и развития процессов управления разделительными системами.

Необходимо выполнить более тщательное исследование многостадийных периодических технологических процессов на реалистичных математических моделях с целью более адекватной оценки перспектив структурной оптимизации таких процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шорин В.Г., Стрельников Л.П., Пейсахович Г.Я. Автоматизация подземных транспортных машин и комплексов. – М.: Недра, 1973. – 392 с.

2. Моркун В.С., Барский С.Н. Анализ критериев эффективности управления технологическими процессами на горно-металлургических предприятиях с позиций их статической и динамической оптимизации // Разработка рудных месторождений. – Вып. 11, 2006. – С. 133-137.

3. Автоматическое управление / Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: АН СССР, 1961.

4. Барский Л.А., Козин В.З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1978. – 486 с.

5. Цирлин А.М. Оптимальное управление технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

6. Луценко И.А. Технологии эффективного управления. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2004. – 152 с.

7. Ерёмин А.О. Современные способы отопления нагревательных печей // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2008. – С. 139-151.

8. Оптимальная система управления технологическими процессами с порционной подачей сырьевых продуктов «ОСАУ-ПП1» / А.Ю. Михайленко, И.А. Луценко, В.К. Тьтюк [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №4/8(40). – С. 4-10.

9. Луценко И.А., Гнатюк Ю.И., Михайленко А.Ю. Разработка критерия эффективности использования ресурсов для оценивания процессов разделительных систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №5/3(41). – С. 4-11.

