

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В. К. Тытюк, О. Е. Мельник

Криворожский национальный университет

ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: dinalt2006@gmail.com

Рассмотрены требования к критерию оптимального управления периодическими технологическими процессами, определен круг задач, которые необходимо решить для совершенствования управления такими процессами. На основании анализа ранее предложенной классификации критериев управления непрерывными разделительными процессами предложена расширенная классификация критериев оптимизации с указанием определенных особенностей и недостатков.

Ключевые слова: критерий оптимального управления, классификация.

АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ УПРАВЛІННЯ ПЕРІОДИЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕССАМИ

В. К. Титюк, О. Є. Мельник

Криворізький національний університет

вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: dinalt2006@gmail.com

Розглянуто вимоги до критерію оптимального управління періодичними технологічними процесами, визначено коло завдань, які необхідно вирішити для вдосконалення управління такими процесами. На підставі аналізу раніше запропонованої класифікації критеріїв управління безперервними розділовими процесами запропонована розширена класифікація критеріїв оптимізації з зазначенням певних особливостей і недоліків.

Ключові слова: критерій оптимального управління, класифікація.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Методологической основой создания автоматизированных систем управления технологическими процессами является системный подход, обеспечивающий комплексное решение задач оптимального управления технологическими процессами. Необходимость системного подхода определяется тем, что современные технологические процессы являются сложными объектами управления с большим числом входных и выходных переменных. Осуществление технологических процессов должно удовлетворять нескольким, зачастую противоречивым, требованиям к качеству готовой продукции и производительности установки.

Периодические технологические процессы (ТП) широко распространены как в горно-металлургическом комплексе, так и в других отраслях промышленности.

Поэтому задача выработки достаточно мощного и универсального критерия управления для этого класса технологических процессов, а также разработка систем оптимального управления на их основе является актуальной научной и практической задачей.

Глубокий анализ процессов целеполагания выполнен проф. Растригиным Л.А. в его основополагающих работах [1, 2]. «Говоря об управлении как о целенаправленном процессе, нельзя обойти того, чьи цели реализуются в процессе управления. Для этого необходимо ввести понятие «субъекта управления», который является источником целей, реализуемых управлением» [1]. Говоря об управлении, мы безусловно подразумеваем оптимальное в некотором смысле управление. «Мало кого устроит управление вообще: нужно в определенном смысле наилучшее, оптимальное управление...» [1]. Именно наличие оптимизации отличает процессы управления от процессов регулирования.

В современной теории управления получили глубокое развитие как поисковые методы построения систем оптимального управления, так и беспысковые методы, основанные на аналитических вычислениях условий экстремума функционала качества, без использования пробных воздействий на объект.

Однако в последнее время появляются критические оценки развитых подходов к построению систем оптимального управления [3]. В основе критического отношения лежит очевидный факт несоответствия теоретических результатов их практической значимости. Достаточно сказать, что в составе программно-технических комплексов лишь очень немногих ведущих фирм мира заявляются адаптивные контроллеры, а случаи уверенного использования адаптивных регуляторов в промышленной практике встречаются еще реже.

Сложность создания систем оптимального управления сопряжена не только со сложностями, присущими объекту управления, такими, как многосвязность, нестационарность параметров и возмущающих воздействий, но и со сложным характером используемого критерия управления, являющегося неотъемлемой частью процесса управления и влияющего, в том числе, и на аппаратную реализацию системы управления.

Использование более простого критерия управления потенциально способствует снижению сложности системы управления и повышению качества его процессов.

Определение универсальных критериев управления, применимых для класса периодических ТП, и совершенствование процессов управления, основанное на таких критериях, имеет большое научное и прикладное значение.

Целью настоящей работы является изучение и обобщение особенностей используемых критериев оптимального управления, анализ перспектив создания систем оптимального управления на основе достаточно мощных и универсальных критериев управления с максимально простой структурой.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Одной из центральных проблем теории автоматического управления (ТАУ) признана проблема постановки цели управления, [4]. Она выходит за рамки собственно ТАУ, являясь в то же время первым этапом решения проблемы управления любым объектом. Понятие цели управления применительно к процессам оптимального управления трансформируется в критерий оптимизации.

Чаще всего критерий оптимального управления [5] представляется в виде функционала вида

$$J(\bar{c}) = \int_X Q(\bar{x}, \bar{c}) p(\bar{x}) dx,$$

где J – критерий управления; $\bar{c} = (c_1, \dots, c_N)$ – вектор управляющих воздействий; $\bar{x} = (x_1, \dots, x_N)$ – вектор случайного дискретного или непрерывного процесса, плотность распределения которого равна $p(\bar{x})$, а $Q(\bar{x}, \bar{c})$ – некоторая заранее заданная функция. Если предположить, что этот функционал непрерывен по \bar{c} , то необходимое условие экстремума можно представить в виде уравнения:

$$\nabla J(\bar{c}) = \text{grad}(\bar{c}) = \left(\frac{\partial J(\bar{c})}{\partial c_1}, \dots, \frac{\partial J(\bar{c})}{\partial c_N} \right) = 0.$$

Однако в практических приложениях управления технологическими процессами подобная степень абстрагирования от особенностей прикладной области не всегда возможна.

Вопросы, связанные с разработкой критериев оптимизации, интересовали и продолжают интересовать большое количество исследователей. Весомый вклад в развитие этого научного направления внесли В.М. Глушков, А.Г. Ивахненко, Л.А. Барский, В.С. Моркун, А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, И.А. Луценко и др. По мере развития автоматизации выбор критерия оптимальности стал технической необходимостью, обуславливающей точность и быстроту решения поставленной задачи [5].

В современной научно-технической литературе по управлению технологическими процессами используется значительное число критериев управления, зависящих от вида технологического процесса, характеристик производимой продукции, от предпочтений (иногда субъективных) исследователей.

В работе [5] выдвигаются следующие основные правила выбора критерия управления и требования к нему, вытекающие из сложности и многофакторности процессов:

- должен наиболее полно отвечать представлениям об эффективности процесса. Оптимальные значения эффективности должны быть наиболее благоприятными для следующей по иерархии системы;

- для сложной системы выбирается как компромисс нескольких видов оценок, что выражается в виде соотношения этих оценок или вектора выходных параметров;

- должен быть максимально прост, понятен и, по возможности, иметь физический смысл;

- при формировании критерия оптимизации необходимо учесть стохастичность критерия оптимизации. Критерий оптимизации должен как можно меньше зависеть от случайных колебаний процесса (статистическая эффективность) и как можно больше – от управляющих воздействий (чувствительность критерия).

Отметим высказанное в [5] важное требование к иерархической подчиненности критериев управления, к согласованности критериев управления на различных иерархических уровнях управления. Важность согласованности критериев управления для разных уровней процессов управления обусловлена эмергентностью – свойством управляемой системы обладать чертами, не присущими ни одному из ее элементов [5]. Как показано в [6], многоступенчатое управление, описываемое жесткой математической моделью при числе ступеней $n \geq 3$, принципиально неустойчиво.

На практике часто встречаются многокритериальные задачи оптимизации, когда оптимизируемый объект имеет несколько выходных параметров. Обычно оптимизируется один, наиболее важный из выходных параметров, а менее значимые параметры используются в качестве ограничений. Выбор наиболее важного параметра оптимизации может быть определен методами корреляционного анализа.

В условиях, когда исследуемый объект характеризуется множеством выходных параметров, среди которых затруднительно выделить наиболее значимый, применяется обобщение (свертка) в единый количественный признак. Сложности, возникающие при этом, и пути их преодоления изложены, например, в [7].

Обобщая опыт предыдущих исследователей, выделим наиболее важные, на наш взгляд, требования, предъявляемые к критерию оптимизации: мощность (полнота) критерия, понимаемая как способность наиболее полно характеризовать оптимизируемый процесс или объект; критерий оптимизации должен быть иерархичным, применимым на различных уровнях иерархии управления; критерий оптимизации должен быть числовым и по возможности иметь простой физический смысл.

Был выполнен обзор научных публикаций по соответствующей тематике за последние годы. В [8] приведен краткий аналитический обзор перспективных критериев управления, используемых при оптимизации процессов управления периодическими технологическими процессами. В [8] предлагается использовать обобщенный информационный функционально-статистический критерий, для формирования которого «використовуються поняття реальної і потенційної (ідеальної) моделі створюваної системи управління».

В [9] «предложены новые показатели эффективности системы управления производством, в качестве которых приняты норма управляемости U и функция сложности решаемой задачи K .»

Для обеих приведенных работ следует отметить, что авторами не пояснен физический смысл критериев, нет связи с экономическими показателями функционирования, ведь управляемость системы не всегда приводит к необходимым результатам управления.

В [10] указывается, что «без вирішення проблеми оптимізації електроспоживання під час руху електровозу ... досягти бажаної ефективності неможливо. ... При вирішенні задачі оптимізації слід зазначити, що необхідно знайти субоптимальну поверхню для протирічущих цілей затрат енергії E та часу руху потягу T » [10].

В [10] предлагается следующий критерий оптимального управления движением транспортного средства, обеспечивающий компромисс между энергетическими затратами на процесс перемещения и временем движения:

$$\min_{V(t)} [E + \lambda T],$$

«де γ – ваговий коефіцієнт, який залежить від ряду обмежень.

Вибір коефіцієнта γ , який входить в цільову функцію, здійснюється за допомогою обчислювального експерименту; для цього були розраховані та побудовані криві субоптимальних рішень в умовах компромісу».

Для определения эффективности литейного производства в [11] предлагается использовать комбинированный критерий, в котором применяется комплекс следующих показателей: коэффициент использования металла, определяемый как отношение массы готового изделия к массе исходных материалов; показатель удельных энергетических затрат в условном топливе; показатель трудоёмкости продукции, например, нормативную трудоёмкость; показатель фондоёмкости производства; эргономические факторы и охрана труда.

Для полного учёта всех параметров была использована линейная форма отдельных параметров – функция желательности Харрингтона.

В [12] «под эффективностью функционирования интегрированной автоматизированной системы управления (ИАСУ) промышленным производством (ПП) понимают степень её приспособленности к выполнению стоящих перед ней задач при заданных условиях. Однако при этом возникают затруднения, обусловленные тем, что любая система управления является подсистемой (ПС) системы более высокого уровня, и между ними возникает взаимосвязь».

В силу динамики структуры и разнообразия решаемых задач ИАСУ функционирует с различными показателями качества. Каждое состояние H_i системы характеризуется выходным эффектом F_i . Вероятность нахождения системы в этом состоянии определяется величиной $P(H_i)$. Поскольку величины H_i и F_i независимы, то эффективность функционирования системы определяется выражением:

$$E = \sum_{i=1}^n P(H_i) F_i.$$

Таким образом, в [12] предложен вероятностный критерий оценки работы «промышленного производства» как системы, объединяющей несколько технологических процессов, в работе не содержится критерия управления, пригодного для управления отдельным технологическим процессом. Кроме того, необходимо отметить, что неэкспериментальными методами невозможно получить достоверные оценки вероятностей $P(H_i)$. А в условиях нестационарности и неэргодичности технологических процессов ослабляется возможность определения этих вероятностей и экспериментальными методами. Все это сужает область применения предложенного в [12] критерия.

Тем не менее, возможно разделить критерии управления на достаточно крупные универсальные группы, присутствующие во всех разновидностях областей управления. Так, в [5] приведена классификация критериев управления непрерывными разделительными процессами, имеющими место в обогащении полезных ископаемых. Выделяются такие группы критериев: технологические критерии, представляющие собой комбинацию основных параметров процесса обогащения; кинетические критерии; статистические критерии; экономические критерии.

Чтобы ориентироваться в многообразии критериев управления, приведем некоторую классификацию, развивающую результаты работ [5, 7]. Мы не стремимся к созданию полной и непротиворечивой классификации критериев управления. Наша задача состоит в том, чтобы обозначить основные группы наиболее распространенных критериев и сравнить между собой группы критериев, сообразуясь с требованиями к критерию управления, описанными выше. Предлагаемая классификация критериев управления приведена на рис. 1.

Критерии оптимизации, отнесенные к прочим, не имеют, как правило, выраженной числовой оценки.

Для критериев этой группы характерны ранговые оценки с ограниченной областью определения. В простейшем случае эта область содержит два значения («хорошо» – «плохо»). Ранговые оценки носят условный, субъективный характер.

Технологические критерии, к которым относятся критерии, специфичные для какого-либо конкретного специфического процесса, например, физико-химические характеристики готовых продуктов, обладают слабым уровнем универсальности (полноты) критерия, т.к. не могут быть никоим образом использованы в других технологических процессах. Также критерии этой группы абсолютно неприменимы на более высоких иерархических уровнях управления. Область применения таких критериев – стабилизация показателей качества готового продукта, системы управления нижнего иерархического уровня.

Технические критерии обладают высоким уровнем универсальности критерия, так как они связаны с таким фундаментальным показателем, как время. Такие показатели, как быстродействие, продолжи-

тельность процесса, используются для оценки самых разных технологических процессов. Недостатком технических показателей является то, что они не учитывают экономические аспекты функционирования технологического процесса и не могут быть использованы на верхних иерархических уровнях управления.

Экономические критерии занимают важнейшее место в практике управления предприятиями, в процессах управления верхнего иерархического уровня.

числения и другие. Автор [5] с сожалением отмечает, что «приведенные ... критерии сложны, требуют привлечения дополнительной информации и для оперативных расчетов непригодны».

Важным отличием данной классификации является разделение технолого- и технико-экономических критериев управления.

Технолого-экономические критерии, как правило, являются более полными, чем технологические критерии. Однако эти критерии неприменимы вне

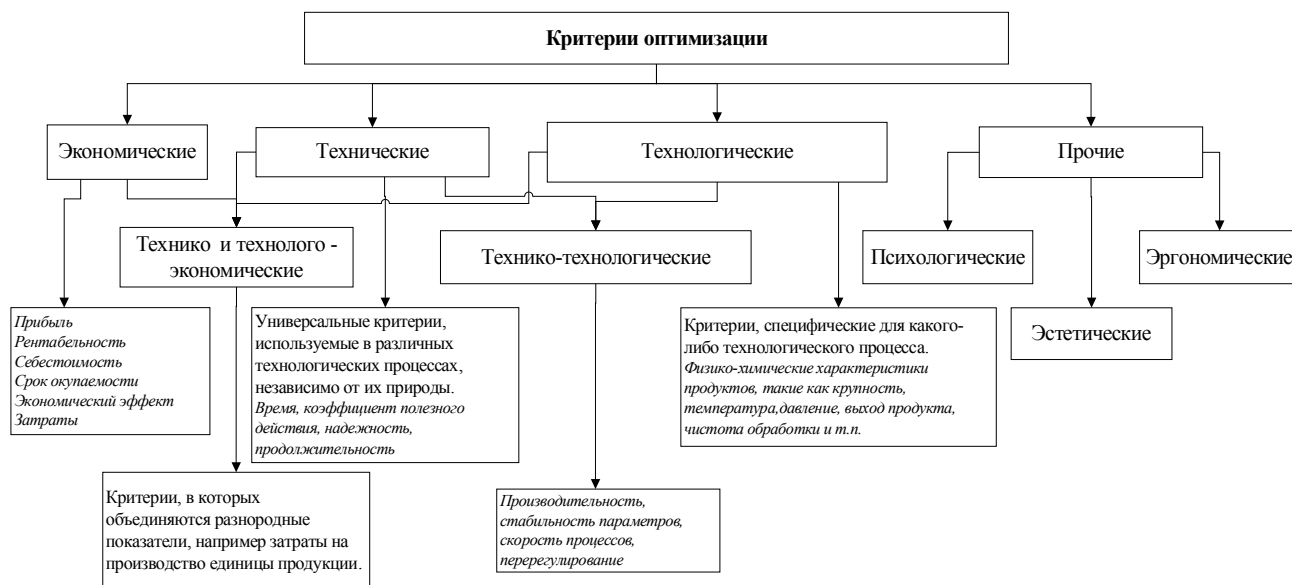


Рисунок 1 – Классификация критериев оптимизации

Важность учета экономических аспектов в процессах управления технологическими процессами признавалась отечественными и зарубежными учеными с самого начала становления теории автоматического управления.

Важность технико-экономических критериев управления признавалась и подчеркивалась с первых шагов становления науки об управлении. В [4] указано, что для производственных процессов «формулировка цели управления – это по существу экономическая и технологическая задача». В формулировке проф. Солодовникова В.В. экономический аспект управления совершенно справедливо помещен перед технологическим. Преимущество экономических критериев состоит в том, что они органично совпадают с глобальной целью самого высшего уровня в иерархии процессов управления. Применительно к производственным предприятиям такой глобальной целью являются, на наш взгляд, финансовые результаты работы предприятия.

Попытки применить экономические критерии оптимизации к практике управления технологическими процессами приводят к появлению смешанных, комбинированных технолого-экономических критериев. В [5] приведена группа технико-экономических критериев, в состав выражений для которых входят такие переменные, как себестоимость добычи 1 т руды, цена 1 т концентрата, содержание металла в шихте, стоимость и расход j-го материала, время процесса, амортизационные от-

рамок технологического процесса, для которого они были предложены.

Технико-экономические критерии по структуре схожи с технолого-экономическими критериями. Однако эти критерии используют наиболее общие технические и экономические критерии, которые присутствуют во всех разновидностях технологических процессов. К таковым относятся длительность процесса, затраты на выполнение технологического процесса, результативность процесса. Исторически самым первым технико-экономическим критерием является, безусловно, длительность процесса, минимизация которой приводит нас к задачам на оптимизацию по быстродействию.

Во многих (но не во всех) случаях повышение быстродействия технологического процесса, приводя к повышению производительности, действительно улучшает экономические показатели технологического процесса. Практически всегда повышение скорости технологического процесса сопровождается ростом затрат на выполнение технологического процесса, сопровождается повышенным износом технологического оборудования. И критерий быстродействия ничего не «знает» об экономических последствиях, порождаемых ростом быстродействия.

В [13] предложен технико-экономический критерий для определения оптимального времени цикла периодического технологического процесса:

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

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 критерий входят стоимостные оценки входных и выходных продуктов операции, затрат на выполнение технологической операции, время выполнения операции. Комбинация универсальных экономических (стоимостные оценки) и технических (время операции) составляющих критерия позволяют отнести его к технико-экономическим критериям.

В последнее время получила развитие теория эффективности преобразования ресурсов, развиваемая Луценко И.А., Моркуном В.С. и др. В [14] приводится следующий критерий оптимизации для технологических процессов, реализующих сфокусированные операции:

$$kE = \frac{(pe - re)^2}{pe \cdot re \cdot te^2} \rightarrow \max,$$

где pe – стоимостная оценка выходных продуктов операции, re – стоимостная оценка входных продуктов операции с учетом затрат на поддержание выбранного режима; te – время выполнения операции, включая время вспомогательных операций. Данный критерий использует те же исходные данные, что и критерий, предложенный в [13].

Так же, как оптимизация по технологическим критериям не приводит к однозначно положительным экономическим результатам, так же и управление по технико-экономическим критериям не гарантирует достижения удовлетворительных показателей качества готовой продукции и показателей динамики управления по технологическим параметрам.

В иерархии «предприятие – технологический процесс» предприятие относится к классу открытых систем, а подчиненные технологические процессы – к классу закрытых систем. В закрытых производственных системах обмен информацией, энергией, материальными продуктами замкнут внутри предприятия – открытой родительской системы. Денежный оборот в закрытых производственных системах также отсутствует. Этот факт значительно усложняет непосредственное использование приведенных выше технико-экономических критериев.

ВЫВОДЫ. Предложена классификация критериев оптимального управления, в которой разделены технико-экономические критерии и технико-экономические критерии.

Применение мощных технико-экономических критериев управления позволит унифицировать структуру процессов управления и аппаратную реализацию таких систем для широкого круга периодических технологических процессов. Для использования технико-экономических критериев оптимизации

необходимо решить ряд научно-технических проблем: определение стоимостных оценок входных и выходных продуктов технологического процесса, проблему влияния управления на технологические аспекты процесса и качество готовой продукции, разработку унифицированных систем оптимального управления периодическими ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
2. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
3. Красовский А.А. Теория самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией // Современная прикладная теория управления (в 3-х частях). – Ч. I. «Оптимизационный подход в теории управления» / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – С. 268–311.
4. Автоматическое управление / Под ред. проф. Солодовникова В.В. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.
5. Барский Л.А., Козин В.З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1978. – 486 с.
6. Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. – М.: МЦНМО, 2008. – 32 с.
7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
8. Лисогор В.М., Веселовська Н.Р. Моделі ідентифікації та управління якістю продукції технологічних періодичних процесів у нормальних і екстремальних станах функціонування // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – 2006. – Вип. 2 (5). – С. 29–33.
9. Балтовский А.А. Иерархическая система управления и алгоритмы автоматизированного синтеза оптимальной структуры // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – 2008. – Вип. 6 (53). – С. 11–13.
10. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Ключка О.С., Берідзе Т.М. До питання оптимізації руху рудникових електровозів по мінімуму рейсового електроспоживання // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – 2009. – Вип. 3/2009 (56). – С. 28–32.
11. Семёнова Т.В. Методика выбора оптимальных технологий производства литых заготовок // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – 2009. – Вип. 1(54). – С. 46–48.
12. Лисяной Г.В. Модели оценки эффективности функционирования интегрированной автоматизированной системы управления // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – 2009. – Вип. 2 (55). – С. 7–9.
13. Цирлин А.М. Оптимальное управление технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
14. Моркун В.С., Цокуренько А.А., Луценко И.А. Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами. – Кривой Рог: Минерал, 2005. – 261 с.

ANALYSIS OF CONTROL CRITERIA FOR PERIODIC TECHNOLOGICAL PROCESSES

V. Titjuk, O. Melnik

Kryvov Rog National University

ul. XXII Partsiyeda, 11, Kryvov Rog, 50027, Ukraine. E-mail: dinalt2006@gmail.com

The paper discusses the requirements for the criteria of optimal control for periodic technological processes, defined set of tasks that must be solved to improve the management such processes. Based on the analysis of the previously proposed classification criteria for continuous separation process offered an extended classification of optimization criteria indicating the specific features and shortcomings.

Key words: criteria of optimal control, classification.

REFERENCES

1. Rastrigin L.A. *Adaptation of complex systems*. – Riga: Zinatne, 1981. – 375 p. [in Russian]
2. Rastrigin L.A. *Modern principles of management of complex objects*. – M.: Sov. Radio, 1980. – 232 p. [in Russian]
3. Krasovskiy A.A. *The theory of self-organizing optimal controller with extrapolation* // Modern Applied control theory (in 3 parts). – Part 1 / "An optimization approach to the theory of management" / Ed. Kolesnikov A.A. – Taganrog: TRTU, 2000. – PP. 268–311. [in Russian]
4. *Automatic control* / Ed. Solodovnikov V.V. – M.: USSR Academy of Sciences, 1961. [in Russian]
5. Barsky L, Kozin V. *System analysis in mineral processing*. – M.: Nedra, 1978. – 486 p. [in Russian]
6. Arnold V.I. "Hard" and "soft" the mathematical model. – M.: MCNMO, 2008. – 32 p. [in Russian]
7. Adler Y.P., Markova E.V., Granovsky Y.V. *Design of an experiment in finding the optimal conditions*. – M.: Nauka, 1976. – 279 p. [in Russian]
8. Lisogor V.M., Veselovska N.R. Model identification and quality management process of periodic processes in normal and extreme conditions of operation // *Bulletin of the Kremenchuk Polytechnic University*. – 2006. – Iss. 2 (5). – PP. 29–33. [in Ukrainian]
9. Baltovsky A.A. Hierarchical control and optimal algorithms for automated synthesis of the structure // *Bulletin of the Kremenchuk Polytechnic University*. – 2008. – Iss. 6/2008 (53). – PP. 11–13. [in Russian]
10. Sinchuk O.M., Sinchuk I.O., Klyuchka O.S., Beridze T.M.. On optimizing the movement of electric mine sited on a minimum energy consumption // *Bulletin of the Kremenchuk Polytechnic University*. – Iss. 3/2009 (56). – PP. 28–32. [in Ukrainian]
11. Semenova T.V. Methods of choosing the optimal technology production of castings. // *Bulletin of the Kremenchuk Polytechnic University*. – 2009. – Iss. 1/2009 (54). – PP. 46–48. [in Russian]
12. Lisyanoy G.V. *Models evaluating the performance of the integrated automated control system-centered* // *Bulletin of the Kremenchuk Polytechnic University*. – 2009. – Iss. 2/2009 (55). – PP. 7–9. [in Russian]
13. Tsirlin A.M. *Optimal control of technological processes: Textbook*. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 400 p. [in Russian]
14. Morkun V.S., Tsokurenko A.A., Lutsenko I.A. *Adaptive optimal control of technological processes*. – Krivoy Rog: Mineral, 2005. – 261 p. [in Russian]

Стаття надійшла 17.01.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.