

## ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ НЕПРЕРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ СЫРЬЯ

**И. С. Конох**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: icegun.ik@gmail.com

Приведена модель системы непрерывной обработки сырьевой продукции, в которой выделена транспортирующая и обрабатывающие части. Осуществляется расчет динамики изменения качественного показателя, от которого зависит стоимость единицы выходного продукта. Модель обеспечивает количественную оценку параметров, непосредственно влияющих на эффективность и определяющая общую эффективность процесса по верифицированному критерию с учетом производительности, суммарных затрат с учетом ресурса и стоимости готовой продукции. Осуществлен синтез модели системы экстремального управления, которая базируется на архитектуре дифференциальных и шаговых поисковых систем. В состав модели входят модули, осуществляющие индивидуальный расчет эффективности для каждого из исследуемых на текущей итерации режимов. Результаты расчетов используются блоком логического управления для выбора следующего базового режима. Таким образом, осуществляется последовательное приближение к экстремуму эффективности.

**Ключевые слова:** максимальная эффективность, оптимизация, экстремальная система, непрерывные процессы.

## ЕКСТРЕМАЛЬНЕ ЕФЕКТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ОБРОБКИ СИРОВИНИ

**І. С. Конох**

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: icegun.ik@gmail.com

Наведено модель системи безперервної обробки сировинної продукції, в якій виділена транспортна і обробна частини. Режими роботи визначаються шляхом завдання споживаної потужності оброблюваної частини і продуктивності транспортуваної частини. Здійснюється розрахунок динаміки зміни якісного показника, від якого залежить вартість одиниці вихідного продукту. Модель забезпечує кількісну оцінку параметрів, які безпосередньо впливають на ефективність, і визначає загальну ефективність процесу за верифікованим критерієм з урахуванням сумарних витрат і вартості готової продукції. Тривалість технологічної операції визначена як час проходження умовної порції через технологічну установку. При оцінці ефективності враховуються вартісні оцінки енергії, що витрачається і ресурсу частини обробки і транспортної частини, вартісні оцінки обсягу і якості вихідної продукції. Це дозволяє визначити чисельне значення критерію ефективності для сформованого технологічного режиму. Встановлено, що поверхня, яка описувала залежність критерію від керуючих впливів, має складний характер, але при згладжуванні стає можливим визначити глобальний екстремум та ідентифікувати найбільш оптимальний режим із заданою точністю. Здійснено синтез моделі системи екстремального керування, яка базується на архітектурі диференціальних та крокових пошукових систем. До складу моделі входить набір модулів, які здійснюють індивідуальний розрахунок ефективності для кожного з досліджуваних на поточній ітерації режимів. Результати розрахунків використовуються блоком логічного керування для вибору наступного базового режиму. Таким чином, здійснюється послідовне наближення до режиму з екстремальною ефективністю. Проведене дослідження на обчислювальній моделі показало працездатність структури екстремальної системи і валідність способу пошуку екстремуму. Практичне значення роботи полягає в розробці керуючого алгоритму і програмної процедури, які забезпечить знаходження екстремуму ефективності технологічних установок з безперервною подачею сировини і енергії.

**Ключові слова:** максимальна ефективність, оптимізація, екстремальна система, безперервні процеси.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Большинство технологических процессов горнорудного, металлургического и химического производств являются непрерывными [1]. Для штатных режимов характерна постоянная подача сырьевых и энергетических продуктов, непрерывный расход ресурса оборудования.

В современных условиях предприятия вынуждены работать в условиях, когда часто изменяется спрос на продукцию, цены на продукцию и энергоносители [2, 3], качество сырья. Соответственно, для поддержания высокой эффективности необходимо корректировать план производства и задавать различные режимы работы основного технологического оборудования от одной рабочей смены к другой. Отсюда происходит необходимость создания мето-

дов и моделей, которые обеспечат переход от общих требований эффективности к задающим значениям регуляторов технологических величин.

Исходя из того, что указанные выше производства характеризуются большими объемами, являются энерго- и ресурсоемкими, потери от неправильно выбранных режимов может составлять десятки тысяч гривен в месяц.

При анализе литературных источников, которые посвящены вопросам оптимизации, было установлено следующее. В источниках [4] доказано условие достижения глобального оптимума операции, определяемого через показатели эффективности. Максимальная эффективность операции достигается при минимизации стоимости сырья и других входных

затрат, минимальных затрат ресурса и энергии, минимальном времени операции и максимальной стоимости готового продукта [4, 5].

Научные исследования оптимального управления непрерывными технологическими процессами обжига окатышей, сушки сыпучих продуктов, обогащения руды [6, 7] используют многокритериальную оптимизацию. При этом, ни в одной из работ не обосновано, каким образом комбинировать критерии для обеспечения наибольшего соответствия результатам работы оборудования целям владельца предприятия. В результате могут возникать ситуации, когда неоправданно снижается производительность при высоком спросе на продукт или завышаются качественные показатели при перерасходе энергоносителей, ресурса и времени работы оборудования. Все это в целом снижает рентабельность предприятий.

Обзор источников позволяет утверждать, что в настоящее время недостаточно развиты методы и модели формирования режимов с экстремальной эффективностью для непрерывных технологических процессов.

Целью работы является автоматизация поиска оптимальных режимов по критерию максимальной эффективности с использованием моделей экстремального управления для установок с одностадийной непрерывной обработкой сырья.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Выбор критерия оптимизации.**

Можно выделить два часто используемых подхода к формированию критериев качества процесса управления технологическим оборудованием. Один базируется на обеспечении максимального уровня качества выходной продукции при сохранении минимально приемлемой производительности. Другой подход заключается в обеспечении максимального уровня производительности при сохранении минимально приемлемого качества. Оба подхода подразумевают также и снижение издержек производства. Одно и то же технологическое оборудование может настраиваться и управляться исходя из этих двух подходов, причем на производстве они периодически меняются, исходя из обстановки на рынке и оперативной ситуации.

Например, часто применяемый интегральный критерий качества может содержать требования минимального отклонения управляемой величины от заданного значения и минимального расхода топлива:

$$I = \int_{t_1=t_0}^{t_2=t_k} \left( a_1 \left( \frac{y_s - y_a}{y_s} \right)^2 + a_2 u \right) dt, \quad (1)$$

где  $t_0, t_k$  – соотв. начальное и конечное время интервала наблюдения;  $a_1, a_2$  – весовые коэффициенты слагаемых критерия, определяющие степень их вклада (важность) в итоговое значение;  $y_s, y_a$  – заданное и конечное значение управляемой величины;  $u$  – значение управляющего воздействия, которому прямо пропорционален расход топлива.

Для сравнения применим в вышеописанной мо-

дели критерий качества, регламентирующий точность стабилизации расхода, температуры и минимум энергопотребления:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \left( a_1 \left| \frac{Tmpr_{set} - Tmpr_{act}}{Tmpr_{set}} \right| + a_2 \left| \frac{F_{set} - F_{act}}{F_{set}} \right| + a_3 Enrg \right) dt, \quad (2)$$

где  $Tmpr_{set}, Tmpr_{act}$  – заданная и текущая температура выходного продукта;  $F_{set}, F_{act}$  – заданный и текущий расходы;  $Enrg$  – суммарное энергопотребление.

Такой критерий не учитывает требований по производительности и расходу ресурса, которые могут в текущей оперативной обстановке перевесить требования качества и экономии энергии. Также, задающие значения расхода и температуры могут быть выбраны такие, что технологическая установка будет работать в режиме пониженной эффективности (убыточном) и выражение (2) не позволяет это увидеть.

Как правило, функционалы вида (1, 2) формулируются таким образом, чтобы решать задачу минимизации выражения критерия качества.

Также для систем этого класса известен критерий эффективности следующего вида:

$$Eff = sign(PE \cdot Yr - RE) \frac{(PE \cdot Yr - RE)^2 T_1^2}{PE \cdot Yr \cdot RE \cdot T_{op}^2}, \quad (3)$$

где  $PE$  – стоимость конечного продукта;  $RE$  – суммарные затраты;  $T_1$  – коэффициент размерности;  $T_{op}$  – время операции;  $Yr=f(F_{set}, F_{act})$  – функция корректировки стоимости продукта в зависимости от качественных или количественных показателей;  $F_{set}, F_{act}$  – соответственно, заданная и актуальная величины показателя.

Функция корректировки стоимости продукта  $Yr(F_{set}, F_{act})$  для критерия (3) может быть построена на основе гауссовой функции, значения которой могут находиться в диапазоне  $[a; 1]$ .

Критерий вида (3) позволяет проводить сравнительную оценку режимов и из доступного множества выбрать те, которые обеспечат наибольшую стоимость готовой продукции при минимальной стоимости потребленных сырья, энергии и ресурса. Также обеспечивается чувствительность к технологическим ограничениям через корректировку оценочной стоимости готовой продукции. Критерий прошел верификацию [8] и его можно принять для решения задачи автоматизации поиска оптимальных режимов для установок с одностадийной непрерывной обработкой сырья.

*Модель системы экстремального управления.* Технологические режимы в самом простом случае формируются путем задания производительности транспортирующей и обрабатывающей частей. При этом меняется общая производительность установки и качественные характеристики готового продукта. Также изменяются стоимость единицы продукции, энергетические и ресурсные затраты на единицу продукции. Необходимо учитывать ограничения на качественные и количественные характеристики

выходной продукции. Общая модель продуктовой канальной системы как структуры функциональных блоков приведена на рис. 1.

Можно выделить технологическую подсистему, непосредственно осуществляющую преобразование сырья и энергии в готовый продукт, и управляющую, которая формирует технологический режим. При этом система управления (СУ) преобразует заданные ограничения на производительность и качество продукта в управляющие воздействия. Оптимальное управление требует наличия в составе системы модулей, обеспечивающих расчет и анализ составляющих критерия (3).

При вычислении стоимостной оценки  $RE$  входных продуктов необходимо учитывать следующие параметры [8]: стоимость входного продукта –  $PE_{in}$ ; стоимость энергии на обработку продукта –  $RE_{proc}$ ; стоимость энергии на транспортировку продукта –  $RE_{traff}$ ; стоимость потраченного ресурса обрабатывающей части –  $RE_{res1}$ ; стоимость потраченного ресурса транспортирующей части –  $RE_{res2}$ ; постоянные затраты, не зависящие от режима работы оборудования, куда входят стоимость рабочего времени персонала, налоговые и арендные платежи, приходящиеся на единицу времени –  $RE_{add}$ .

Таким образом, вычисление затрат следует производить по формуле:

$$RE = PE_{in} + RE_{proc} + RE_{traff} + RE_{res1} + RE_{res2} + RE_{add} =$$

$$= C_{in} \int_{t1}^{t2} F \cdot dt + C_{E1} \int_{t1}^{t2} P_{proc} \cdot dt + C_{E2} \int_{t1}^{t2} P_{traff} \cdot dt +$$

$$C_{res1} \int_{t1}^{t2} fV_1(P_{proc}) \cdot dt + C_{res2} \int_{t1}^{t2} fV_2(P_{traff}) \cdot dt + C_{add} \int_{t1}^{t2} 1 \cdot dt$$

где  $t1, t2$  – начальное и конечное время работы установки;  $C_{in}$  – стоимость единицы входного продукта (сырья);  $C_{E1}$  – стоимость единицы энергии на обработку продукта;  $C_{E2}$  – стоимость единицы энергии на транспортировку продукта;  $C_{res1}$  – стоимость единицы ресурса обрабатывающей части технологической установки;  $C_{res2}$  – стоимость единицы ресурса транспортирующей части технологической установки;  $C_{add}$  – стоимость единицы времени работы технологической установки, не зависящей от режима;  $F$  – поток продукта (например, кг/с);  $P_{proc}$  – мощность обрабатывающей части технологической установки;  $P_{traff}$  – мощность транспортирующей части технологической установки;  $fV_1(\cdot), fV_2(\cdot)$  – функции, определяющие скорость расходования ресурса, соответственно, обрабатывающей и транспортирующей частей технологической установки в зависимости от потребляемой мощности.

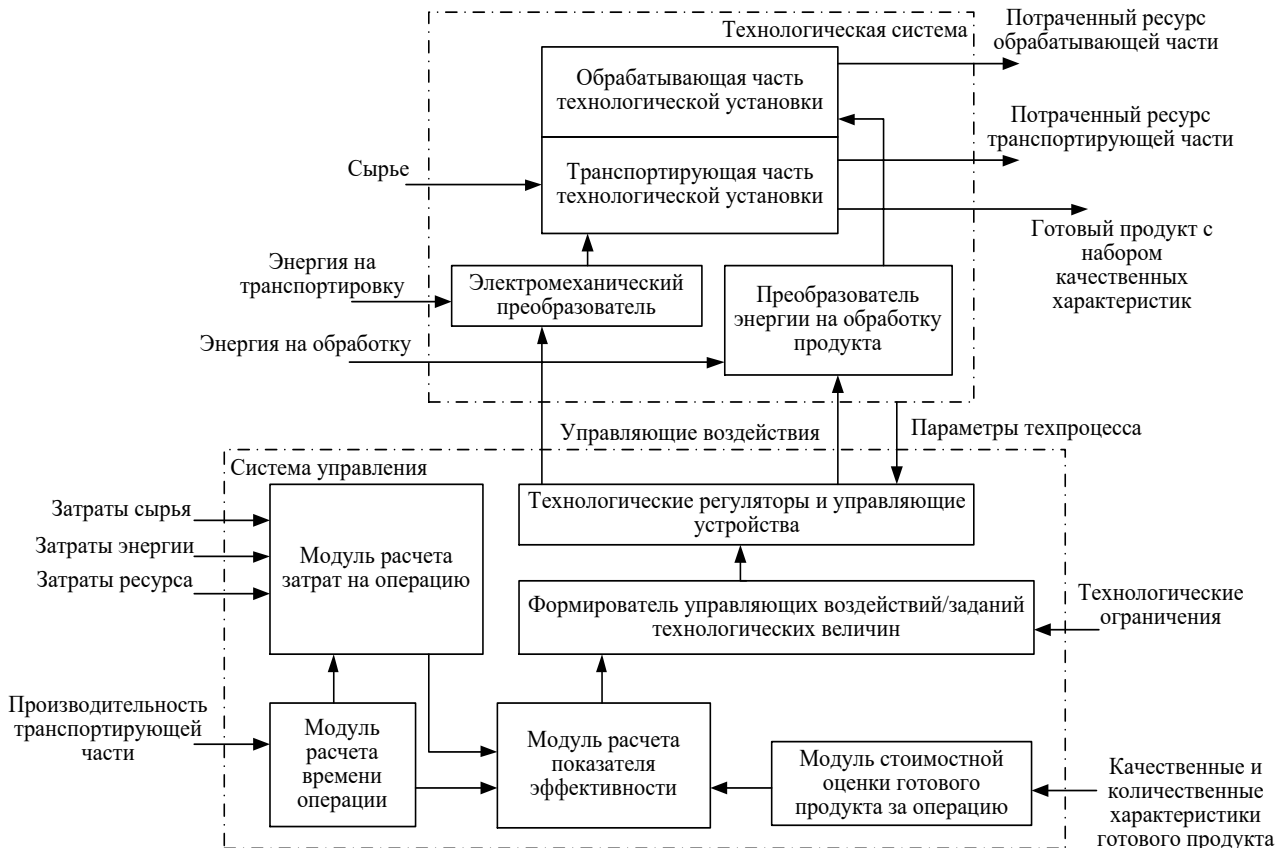


Рисунок 1 – Общая модель системы потоковой обработки

Можно считать, что разность  $t1$  и  $t2$  соответствует времени прохождения условной порции продукта через технологическую установку и тогда  $Top=t2-t1$ .

Изменение мгновенного расхода ресурса в зависимости от интенсивности работы оборудования описывается степенной функцией, а стоимость рабочего времени персонала и сопутствующие затраты постоянны.

Стоимостная оценка выходного продукта (без учета вторичного энергетического продукта) зависит от его количества и качественного показателя (например, в случае потокового нагрева – от температуры):

$$PE = Cf(Q) \int_{t1}^{t2} F \cdot dt \quad (5)$$

где  $Cf()$  – функция, определяющая стоимость продукции в зависимости от значения качественной характеристики;  $Q$  – качественная характеристика (в случае потокового нагревателя – температура, для сушильной установки – влажность).

С учетом выбранного критерия модель системы непрерывного преобразования канализируемого продукта может быть представлена структурой на рис. 2. Фактически, качественные модели реальных технологических процессов, используемые для оптимизации, являются вычислительными, а не аналитическими. Следовательно, модель рис.2 является необходимой для задачи синтеза экстремальной СУ.

С ее помощью, возможно, организовать направленный поиск глобального экстремума эффективности.

Из теории систем оптимального управления известен метод поиска экстремума функции нескольких переменных [9, 10, 11]. Применительно к рассматриваемой задаче, такой функцией является показатель эффективности, а входными фазовыми переменными – управляющие воздействия на транспортирующую и обрабатывающую части установки. Из множества известных структур и способов построения экстремальных САУ целесообразно использовать комбинацию САУ дифференциального и шагового типа. С учетом выбранного метода поиска и разработанной модели процесса, алгоритм экстремальной СУ будет включать следующие шаги:

1. Задание начального режима;
2. Формирование пробных поисковых шагов;
3. Выполнение циклов моделирования сформированных технологических режимов;
4. Оценка результатов моделирования и определение направления наискорейшего роста критерия;
5. Если все вариации режима приводят к снижению значения критерия оптимальности, то закончить поиск;
6. Выполнение рабочего шага в сторону максимизации критерия, переход к п. 2.

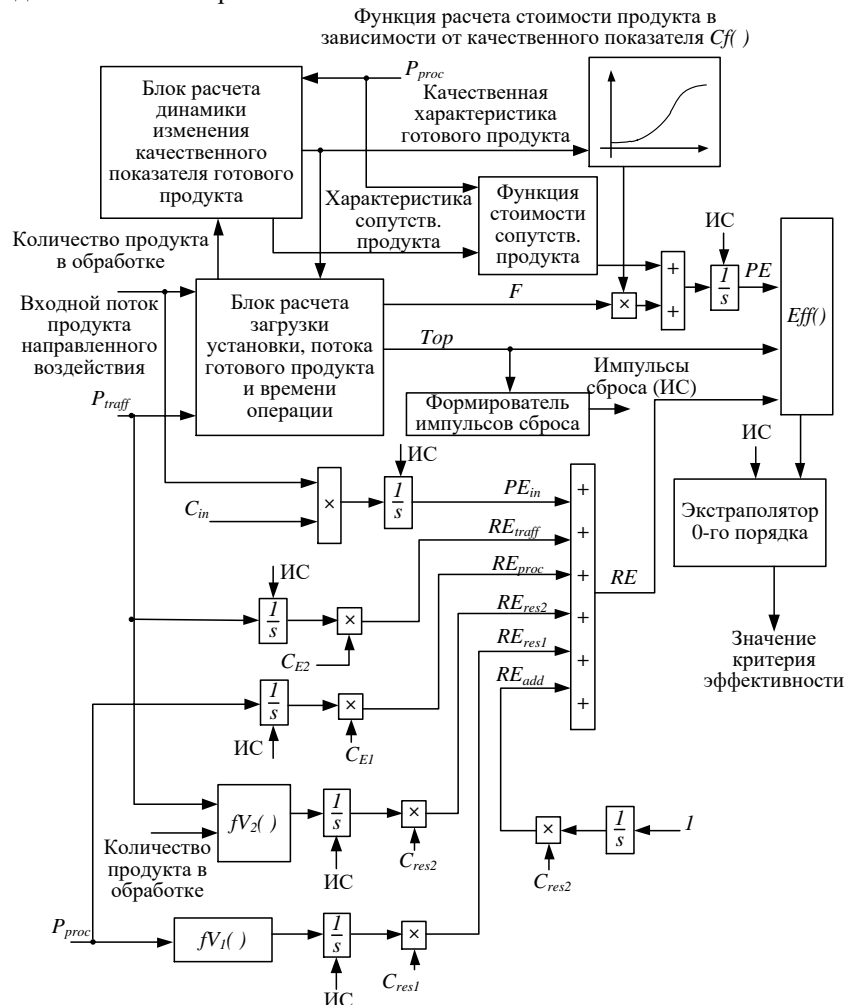


Рисунок 2 – Структура кибернетической модели непрерывного преобразования канализируемого продукта

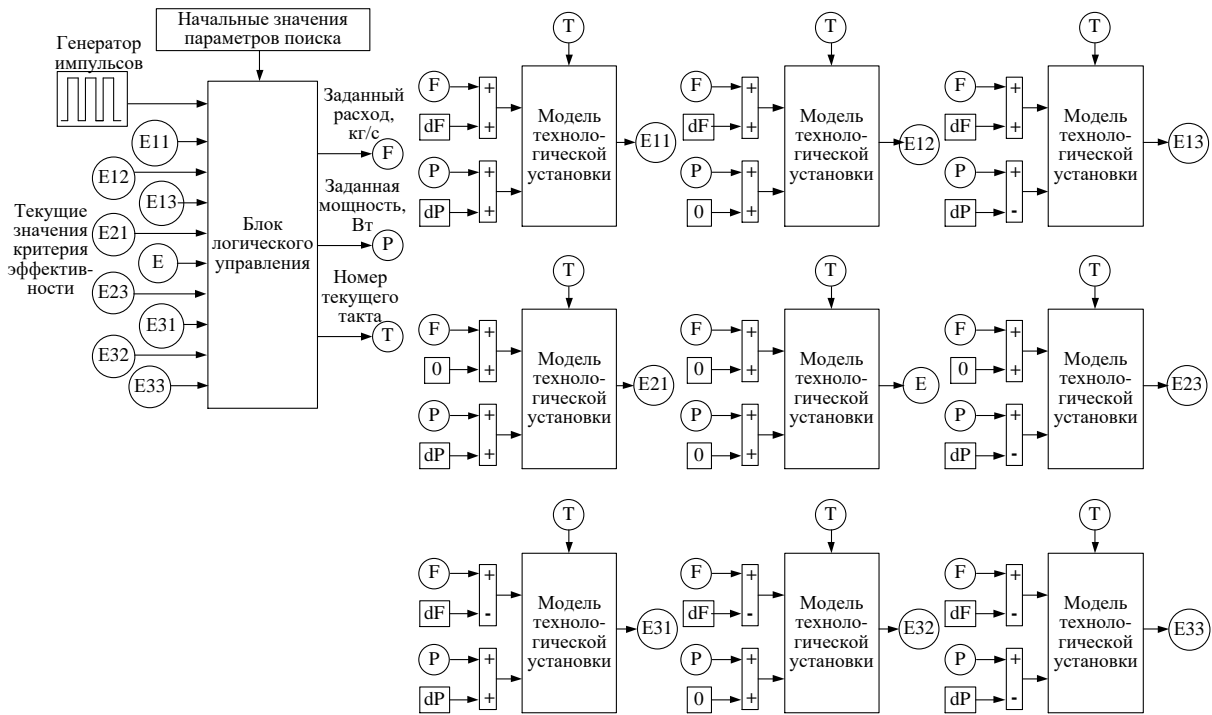


Рисунок 3 – Модель поисковой системы экстремального управления

На основании выбранного метода поиска экстремума и составленной кибернетической модели непрерывного преобразования канализируемого продукта разработана вычислительная модель экстремальной СУ (рис.4). В ней используется показатель эффективности (3) как критерий оптимизации технологического процесса. В основе модели лежит набор однотипных блоков моделирования технологической установки, реализующих структуру рис. 2. Для двух управляющих воздействий число возможных комбинаций управлений составляет девять. На рис. 3 вариации продуктивности обозначены как  $dF$ , мощности обрабатывающей части как  $dP$ , отсутствие изменений как  $0$ . Это решение обеспечивает скорость расчетов и простоту реализации вычислительной модели. Экстраполяторы нулевого порядка внутри каждого блока моделирования технологической установки обеспечивают сохранение значений критерия на текущем шаге моделирования, так как фактическое время операции для каждого режима может быть разным.

Генератор импульсов задает максимальную длительность шага поиска. Блок логического управления обеспечивает пошаговый поиск экстремума в соответствии с выбранным алгоритмом.

*Экспериментальные исследования работы системы.* Для подтверждения справедливости приведенных выше рассуждений была реализована модель проточного водного электрического нагревателя, используя которую возможно проверить возможность поиска экстремума эффективности средствами автоматического управления.

Примем для исследовательской модели следующие параметры:

- масса условной порции продукта, кг: 3;
- диапазон изменения подачи воды, кг/с: 0,02–0,09;

- соответствующий диапазон изменения мощности насоса, Вт: 200–400;
- диапазон изменения мощности нагревательного элемента, Вт: 500–14000;
- время прохождения условной порции через нагреватель, с: 30 – 96.

На рис. 4 показана необходимая для моделирования зависимость стоимости единицы продукции от качественного показателя – температуры.

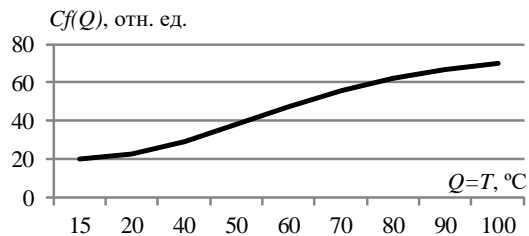


Рисунок 4 – Зависимость стоимости единицы продукции от температуры

Для случая проточного нагревателя входными воздействиями будет скорость движения потока воды и мощность нагревательного устройства. В соответствии с принципом построения дифференциальных САУ необходимо сформировать варьированные входные воздействия и подать их на модели технологической установки. Получается восемь комбинаций изменения воздействий и девять значений показателя эффективности.

Работа исследовательской модели разбита на такты, в течении каждого из которых выполняется моделирование работы технологической установки с выбранным вариантом управляющих воздействий. Параллельно модель рассчитывает варианты, образованные возможным комбинированием базовых управляющих воздействий и их положительных, отрицательных и нулевых приращений.

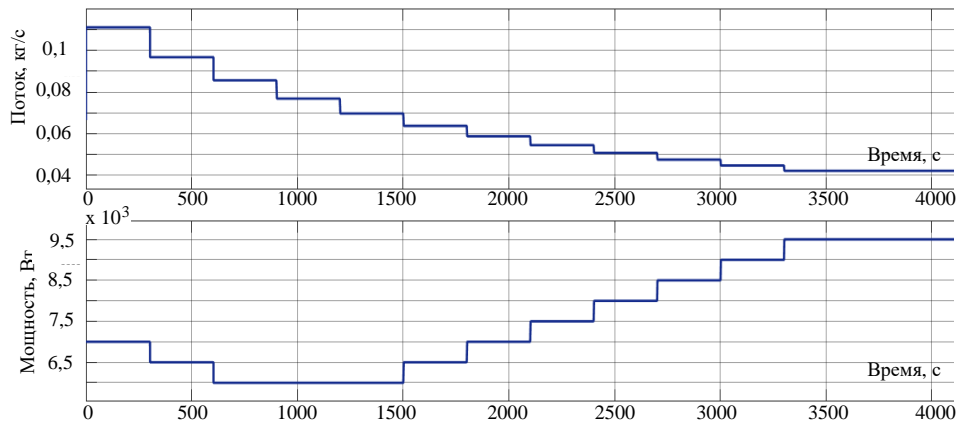


Рисунок 5 – Процесс поиска оптимальных управляющих воздействий экстремальной САУ

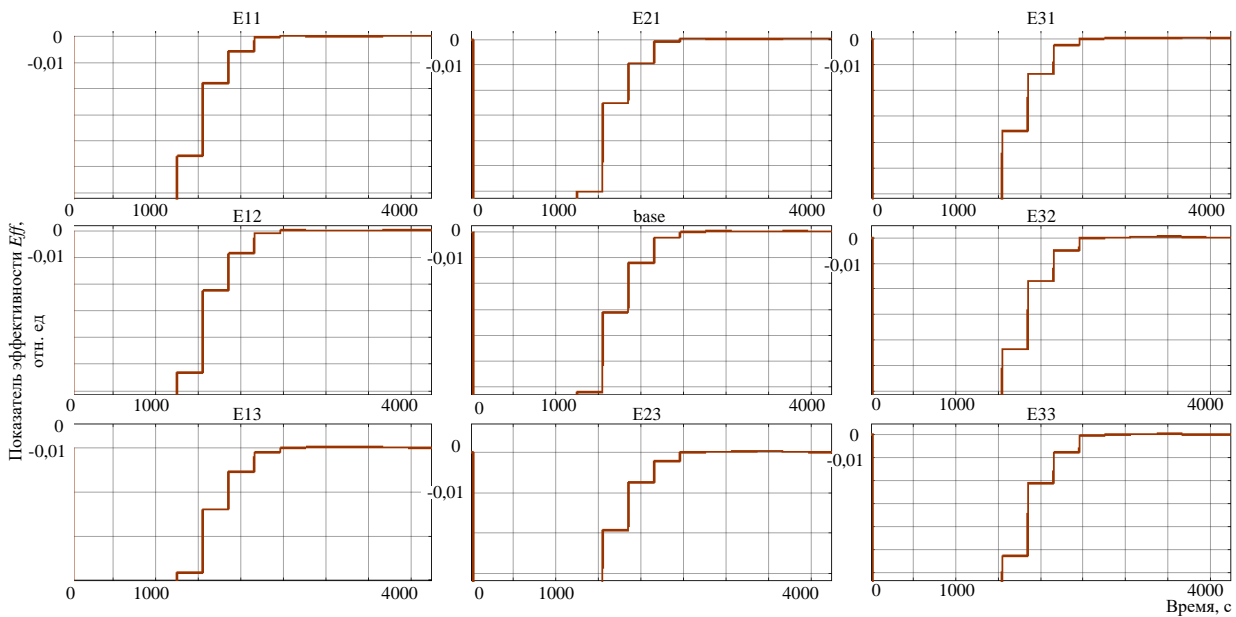


Рисунок 6 – Изменения показателей эффективности операции для каждой модели, входящей в состав экстремальной САУ

Блок логического управления содержит процедуру, которая ожидает окончания такта моделирования, задаваемого генератором импульсов, выбирает из полученных вариантов лучший и в его направлении совершает рабочий шаг. В дальнейшем действия повторяются с новыми значениями базового расхода продукта и мощности нагревателя. Динамику поиска экстремума позволяет оценить графики на рис. 5 и 6.

На рис. 5 представлены временные диаграммы процесса достижения области экстремума для показателя эффективности (3). О том, что экстремум найден с заданной точностью, говорит или появление низкоамплитудных периодических колебаний в области оптимальных управлений (это свойство практически всех моделей экстремального управления), или установление управляющих воздействий на фиксированном уровне.

На рис. 6 видно последовательное достижение максимума эффективности путем смены основного рабочего режима установки. Наглядно видно, что начальная точка, с которой осуществляется поиск, является убыточной (показатель эффективности отрицательный). С каждым новым тактом работы экстремальной САУ показатель эффективности

(график base, рис. 6) возрастает. В области экстремума он положительный, что означает прибыльность данного режима функционирования технологической установки. При достижении области экстремума и определении оптимальных управляющих воздействий их вариации показывают ухудшение эффективности. Достижимая температура продукта в области экстремума эффективности 69 °С.

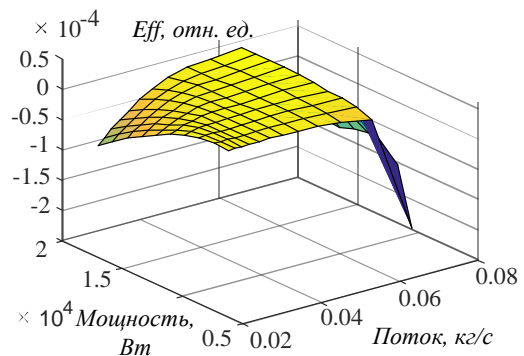


Рисунок 7 – Поверхность отклика показателя эффективности проточного жидкостного нагревателя в зависимости от потока сырья и мощности нагревателя

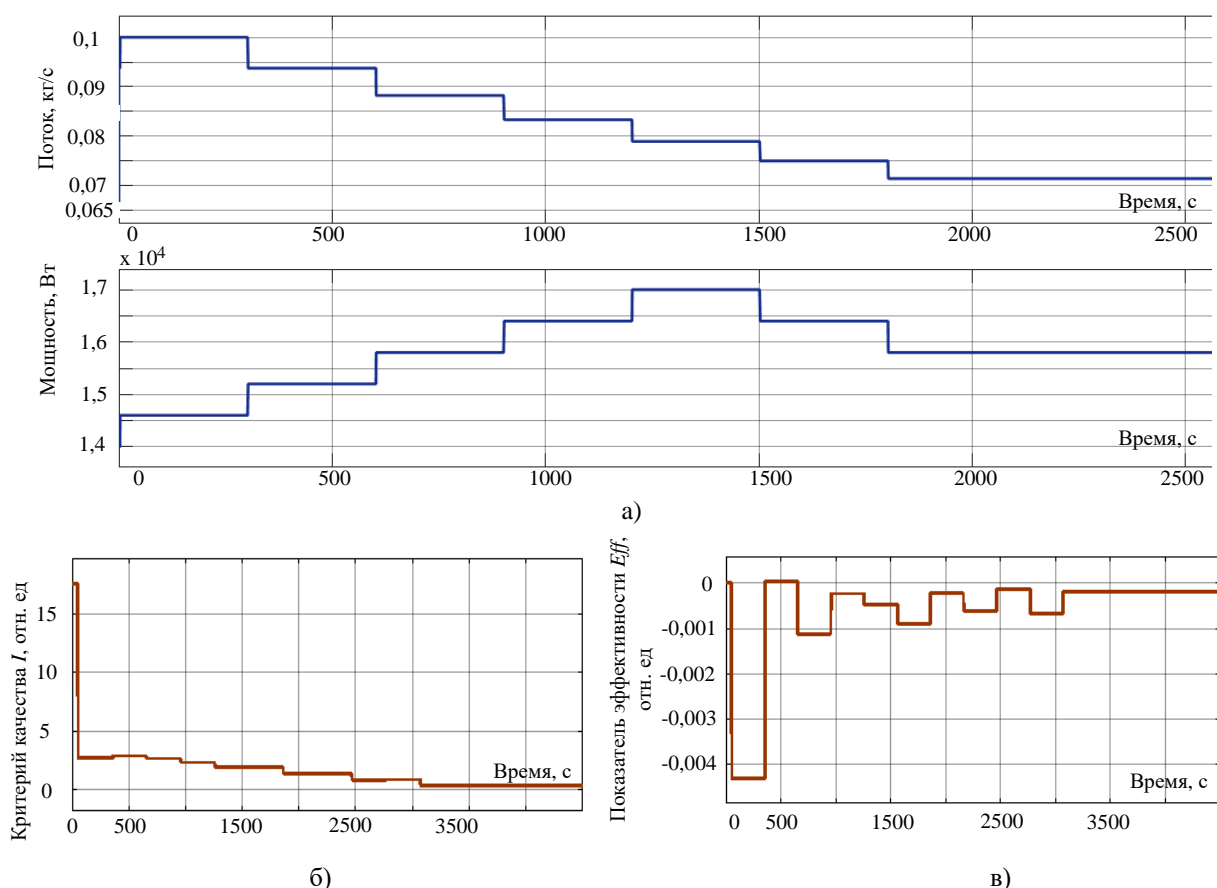


Рисунок 8 – Поиск экстремума показателя качества: а) динамика изменения управляющих воздействий; б) изменение критерия качества; в) изменение показателя эффективности

Перебор возможных значений управлений в процессе модельных исследований данного частного случая позволяет построить зависимость, описывающую значение показателя эффективности для различных режимов (рис. 7). Можно видеть, что функция эффективности непрерывна, на поверхности имеются малоамплитудные выпуклости и впадины, требующие обоснования выбора величин поисковых шагов. В области экстремума наблюдается низкая скорость роста критерия. В табл. 1 приведены числовые показатели эффективности, которые подтверждают этот вывод.

Для сравнения на той же модели был исследован поиск экстремума при использовании критерия качества вида (2) при заданной температуре 65 °C и расходе 0,043 кг/с. Критерий качества имеет вид:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \left( 14 \left| \frac{65 - Tmp_{act}}{65} \right| + 10 \left| \frac{0,043 - F_{act}}{0,043} \right| + 12 Enrg \right) dt \quad (6)$$

Вычислительная модель была модифицирована для отыскания минимума критерия (6). На рис. 8 показан процесс поиска экстремального значения критерия качества (6). Несмотря на достижение экстремума качества, показатель эффективности технологического режима меньше возможного. Сравнительные значения показателей эффективности приведены в табл. 1.

Можно отметить, что без использования показателя эффективности сложно выбрать наилучший режим работы технологической установки, если диапазоны технологических параметров допускают различные режимы. Использование только критерия качества помогает выдержать технологические ограничения, но не гарантирует прибыльность режима.

Таблица 1 – Сравнительные результаты поисковой оптимизации

Варианты технологических режимов	Значение показателя эффективности при оптимизации по критериям (3)/(6), отн. ед.
E11	2,82e-04/ 1,7e-04
E12	2,5e-04/ -8,7e-06
E13	4,1e-04/ -4,59e-04
E21	2,46e-04/ 1,45e-05
base	4,5e-04/ -1,875e-04
E23	0,1e-05/ -1,135e-03
E31	2,9e-04/ -4,9e-05
E32	1,14e-05/ -6,72e-04
E33	-1,05e-04/ -2,265e-03

Результаты моделирования доказывают достижение глобального максимума эффективности с помощью синтезированной модели. Увеличить точность и скорость нахождения экстремума эф-

фективности возможно использованием переменного шага по каждому управляющему воздействию, вычисляя частные производные показателя эффективности.

**ВЫВОДЫ.** Технологические системы потоковой непрерывной обработки сырья требуют применения специальных методов и моделей для глобальной оптимизации технологических режимов с использованием верифицированных критериев эффективности. Это позволит обеспечить наибольшее соответствие результатов функционирования технологических систем целям владельцев. В общем случае технологические режимы определяются заданием производительности транспортирующей части установки и величиной потребления энергии обрабатываемой части.

Синтезированная модель системы экстремального управления имеет в своем составе набор однотипных модулей расчета количественных и качественных результатов операции для сравнительной модельной полнофакторной проверки возможных режимов по критерию эффективности. Это позволяет осуществить поисковое движение в сторону максимума эффективности и осуществить глобальную оптимизацию технологического режима с заданной точностью.

На основе проведенных исследований можно утверждать следующее:

- поверхность, описывающая зависимость критерия оптимальности от управляющих воздействий имеет “бугристый” вид и требует сглаживания для достижения глобального экстремума;

- вследствие нелинейной зависимости критерия оптимальности от управляющих воздействий, затруднительно реализовать градиентную зависимость величины рабочего шага поиска;

- для обеспечения заданной точности и скорости поиска экстремума целесообразно экспериментально определить фиксированные значения рабочих шагов по каждой управляемой координате для быстрого и грубого поиска, и отдельно для точного поиска;

- экспериментально доказано, что разработанные вычислительные модели и управляющие процедуры являются адекватными и работоспособными для поиска глобального экстремума эффективности для установок с управлением производительностью транспортирующей части и интенсивностью обрабатываемой части;

- сравнительные исследования поиска оптимальных режимов по критериям максимальной эффективности (3) и комбинированному критерию качества и энергопотребления (2) показали разность в прибыльности при выполнении ограничений на качество и производительность в обоих случаях; это доказывают необходимость применения критериев,

основанных на показателях эффективности, что позволяет строго обосновать оптимальность технологических режимов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ивановский В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Омск, 2004. 229 с.
2. Жданко Е. Железорудная продукция Украины: стоимость, качество и конкурентоспособность. URL: <http://uaprom.info/article/1049-zhelezorudnaja-produkcija-ukrainy-stoimost-kachestvo-i-konkurentosposobnost-chast-1.html> (дата звернення: 01.10.2018).
3. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 2. Issue 2 (74). P. 35–40. doi: 10.15587/1729-4061.2015.38963
4. Lutsenko I. Definition of efficiency indicator and study of its main function as an optimization criterion / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6. Issue 2 (84). P. 24–32. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85453
5. Lutsenko I., Vihrova E., Fomovskaya E., Serduik O. Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 2. Issue 4 (80). P. 42–50. doi: 10.15587/1729-4061.2016.66307
6. Ляхомский А. В., Вахрушев С. В., Петров М. Г. Моделирование поверхности показателей качества энергоэффективности обогатительных производств горных предприятий. / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №10. С. 313–316.
7. Carrington C.G., Sun Z.F., Sun Q., Bannister P., Chen G. Optimizing efficiency and productivity of a dehumidifier batch dryer. Part 1: capacity and airflow International / Journal of Energy Research. 2000. Vol. 24. Issue 3. DOI: 10.1081/DRT-120014056.
8. Konokh I. S. Synthesis of the structure for the optimal system of flow treatment of raw materials / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3. Issue 2 (87). P. 47–55. doi: 10.15587/1729-4061.2017.103731
9. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М.: «Книга по Требованиям», 2013. 414 с.
10. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. Пиксель, 2013. 620 с.
11. Zhang Yu., Zhi Guo Feng, Xinsong Y. Finite-time stabilization for a class of nonlinear systems via optimal control / Mathematics and Computers in Simulation. Web of Science Core Collection. 2018. T. 146. PP. 14–26.



## EXTREME EFFECTIVE CONTROL OF CONTINUOUS RAW MATERIAL PROCESSING

### I. Konokh

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: icegun.ik@gmail.com

**Purpose.** The purpose of the article is to research automation of optimum search of modes by maximal efficiency criterion for technological equipment with raw material processing. This is realized by using of extreme management models for installations with one-stage continuous processing of raw materials. **Methodology.** The article uses the theory of building extremal control systems, the theory of efficiency, methods for finding the extremum of a function of several variables, and modeling in specialized software packages. **Results.** The using of a verified performance indicator as a criterion for optimizing technological regimes is substantiated. Extreme control model with step search engine is compiled. It allows for a finite number of steps to achieve maximum efficiency, changing the performance of the transporting and processing parts of the process unit. To determine the direction of motion, a set of identical computational models of the technological process is used. It reproduces the modes obtained by possible combinations of control actions relative to the current operating point. It was determined that the models should include links that determine the dynamics of changes in the quality indicator of the product. Depending on this, the valuation of the results of the technological process varies. **Originality.** The model of an extreme control system has been improved, which incorporates a set of one-type modules for calculating quantitative and qualitative results of an operation for a comparative model full-factor check of possible modes according to the criterion of efficiency. This allows you to carry out search movement in the direction of maximum efficiency and implement a global optimization of the technological mode with a given accuracy. **Practical value.** The results allow the use of the developed algorithms and software procedures for the implementation of a directional search for the optimal mode of process equipment with flow rate control and material processing. These can be installations for heating or drying bulk materials for the chemical, mining or food industries. The selected criterion allows you to mathematically justify the efficiency of the achieved mode and maximize the profitability of the process. References 13, tables 1, figures 8.

**Key words:** maximum efficiency, optimization, extreme system, continuous processes.

### REFERENCES

1. Ivanovskiy, V. I. (2004), *Tekhnicheskii uglerod. Protsessy i apparaty*, [Technical carbon. Processes and Apparatuses], Omsk, Russia.
2. Zhdanko, E. *Zhelezorudnaya produkcija Ukrainy: stoimost', kachestvo i konkurentosposobnost'*. URL: <http://uaprom.info/article/1049-zhelezorudnaja-produkcija-ukrainy-stoimost-kachestvo-i-konkurentosposobnost-chast-1.html> (accessed 06, August 2018).
3. Lutsenko, I. (2015), Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, Issue 2 (74), PP. 35-40. doi: 10.15587/1729-4061.2015.38963
4. Lutsenko, I. (2016), Definition of efficiency indicator and study of its main function as an optimization criterion, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6., Issue 2 (84), PP. 24-32. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85453
5. Lutsenko, I., Vihrova, E., Fomovskaya, E., Serduik, O. (2016), Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, Issue 4 (80), PP. 42-50. doi: 10.15587/1729-4061.2016.66307
6. Liakhomskii, A. V., Vakhrushev, S. V., Petrov, M. G. (2006), Modelling the surface of energy-efficient indicators of the enrichment processes of mining enterprises, *Mining informational and analytical bulletin*, №10, PP. 313-316.
7. Carrington, C. G., Sun, Z. F., Sun, Q., Bannister, P., Chen, G. (2000), Optimizing efficiency and productivity of a dehumidifier batch dryer. Part 1: capacity and airflow International, *Journal of Energy Research*, Vol. 24, Iss. 3. DOI: 10.1081/DRT-120014056.
8. Konokh, I. S. (2018), Synthesis of the structure for the optimal system of flow treatment of raw materials, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3. Iss. 2 (87), PP. 47–55. doi: 10.15587/1729-4061.2017.103731
9. Boltyanskiy, V. G. (2013), *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimal control], Kniga po Trebovaniyu, Moscow, Russia.
10. Vasilev, F. P. (2013), *Metody optimizatsii*. Pikel', Russia.
11. Zhang, Yu., Zhi Guo Feng, Xinsong, Y. (2018), Finite-time stabilization for a class of nonlinear systems via optimal control, *Mathematics and Computers in Simulation, Web of Science Core Collection*, T. 146, pp. 14-26.

Стаття надійшла 08.10.2018.