

СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 517.977.57

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ СЫРЬЯ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

КОНОХ И.С., ИСТОМИНА Н.Н., ОКСАНИЧ А.П.

Исследуется вопрос оптимизации простых технологических операций обработки сырьевого продукта на основе верифицированного показателя эффективности, который комплексно учитывает стоимость выходного продукта, материальные и временные затраты. Доказывается, что формирование оптимального закона управления возможно при использовании аддитивного критерия оптимальности, весовые коэффициенты которого рассчитываются на основе показателя эффективности. Описывается метод оптимизации закона управления в функции качественного показателя продукта и приведены экспериментальные доказательства его работоспособности на примере порционного нагрева жидкости.

Ключевые слова: фазовая траектория, экономическое обоснование, модельные исследования, метод оптимизации закона управления.

Key words: phase trajectory, economic justification, model studies, method of control law optimization.

1. Введение

В настоящее время наблюдаются стремления повысить рентабельность предприятий металлургической и химической промышленности путем внедрения современных систем управления технологическими процессами. Кроме задач комплексной автоматизации и повышения качества выходной продукции на их базе возможно внедрение новых методов и алгоритмов управления, которые сформируют технологический режим с максимально возможной эффективностью. Таким образом, будет выполняться главная задача производственного предприятия – обеспечение такого режима функционирования, чтобы результаты его процессуальной деятельности были максимально согласованы с целью владельца и удовлетворяли потребителя продукции [1].

Такую степень соответствия результатов работы предприятия можно назвать эффективностью и представить в виде аналитического выражения. Достижение максимальной эффективности соответствует решению задачи глобальной оптимизации.

Сами по себе такие действия как максимизация прибыли, минимизация затрат, повышение производительности, выполнение ограничений на качественные показатели выходной продукции не гарантируют повышения эффективности. Общая эффективность предприятия зависит от отдельных технологических процессов, управление которыми должно быть подчинено общей цели и взаимно синхронизировано.

В работах [1, 2] обоснован и верифицирован критерий эффективности процесса порционной обработки продукта, который учитывает суммарные затраты (куда входят стоимость сырья, стоимость энергии, стоимость затраченного ресурса), стоимость выходного продукта, временные затраты:

$$E = \frac{(PE - RE)^2 T_1^2}{PE \cdot RE \cdot TO^2}, \quad (1)$$

где PE – стоимость конечного продукта; RE – суммарные затраты; T_1 – время базовой операции; TO – фактическое время операции.

С помощью выражения (1) возможно выполнить сравнительную оценку операций порционной или потоковой обработки, но остается открытым вопрос разработки специализированных методов определения законов управления в функции времени или в функции качественного показателя для формирования оптимальной фазовой траектории. Анализ литературных источников [1, 2] подтверждает актуальность этого вопроса.

2. Постановка задачи

Цель данной работы заключается в формировании экономически обоснованных технологических режимов обработки сырья путем разработки и применения специализированного метода оптимизации на основе верифицированного критерия эффективности.

Применительно к задаче управления процессами обработки сырья необходимо следующее:

1. Составить вычислительные модели оценки динамического процесса обработки сырья с точки зрения эффективности.
2. Оценить возможность использования выражения (1) как основу для критерия оптимизации фазовой траектории. При необходимости обосновать переход к другим аналитическим выражениям.
3. Обобщить результаты модельных исследований и разработать метод оптимизации закона управления для формирования технологического

режима, характеризующегося максимальной эффективностью.

4. Выполнить экспериментальную проверку работоспособности разработанного метода поиска максимально эффективного режима и определения оптимального закона управления.

3. Динамическое моделирование операции обработки на примере порционного нагрева жидкости.

Основываясь на работе [3], можно представить структурную схему системы порционной обработки сырья в виде взаимосвязанных динамических звеньев и арифметических функций.

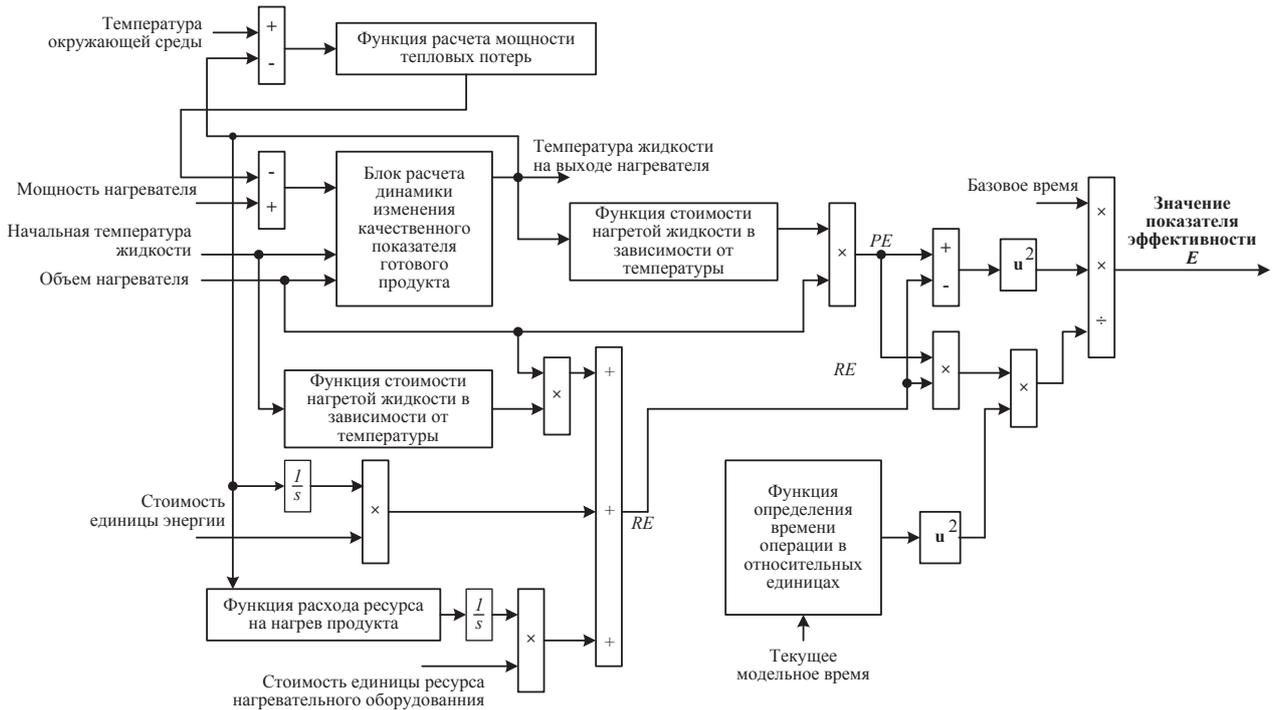


Рис. 1. Структура модели порционного нагрева жидкости

Величина затрат на операцию определяется как сумма стоимостных оценок входного сырья, электроэнергии, ресурса:

$$RE = PE_{in} + RE_{proc} + RE_{res} = C_{in}M + C_{E1} \int_{t1}^{t2} P \cdot dt + C_{res1} \int_{t1}^{t2} fV(P) \cdot dt \quad (2)$$

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_{res1} – стоимость единицы ресурса обрабатывающей части технологической установки; M – масса обрабатываемого сырья, кг; P – мощность обрабатывающей части технологической установки; $fV()$ – функция, определяющая скорость расходования ресурса обрабатывающей части технологической установки (нагревателя) в зависимости от потребляемой мощности.

На рис. 1 показан общий вид модели системы порционного нагрева жидкости с блоками вычисления показателя эффективности.

Зададим следующие параметры модели: масса нагреваемой жидкости 1000 кг; диапазон изменения мощности нагревателя, 45-80 кВт; начальная/конечная температура жидкости, 20/70°C; теплоемкость жидкости, 4183 Дж/градус; стоимость электроэнергии, 0,319 у.е./кВт; масштаб времени, (модельное/реальное), 1/60; длительность базовой операции, 3600 с; диапазон стоимостных оценок сырья, 10-45 у.е.

Стоимость сырья как функция от качественного показателя (температуры) определяется зависимостью:

$$PE_{in} = 0.7(temp - 20) + 10, \quad (3)$$

где $temp$ – температура жидкости.

Скорость расхода ресурса нагревательной установки определяется показательной функцией от величины потребляемой электрической мощности. Стоимость ресурса рассчитывается по следующей формуле:

$$RE_{res} = 17.4 \int_{t1}^{t2} (0.0015 \cdot P)^2 dt, \quad (4)$$

здесь $t1$, $t2$ – соответственно, начальное и конечное время операции, с; P – потребляемая мощность нагревательного элемента, кВт.

Величина тепловых потерь пропорциональна разности температур нагреваемой жидкости и внешней среды. Таким образом, при постоянном

управляющем воздействии скорость роста температуры постепенно снижается.
 Реализация вычислительной модели выполнена в пакете Matlab/Simulink. При помощи компьютерной модели можно исследовать переходные процессы нагрева жидкости и получить численные значения показателя эффективности для любого закона управления.

Если ограничиться “жестким” управлением, при котором величина управляющего воздействия постоянна на протяжении всего переходного процесса, и выполнить дискретизацию возможных управлений, можно оценить изменение отдельных составляющих показателя эффективности (рис. 2).

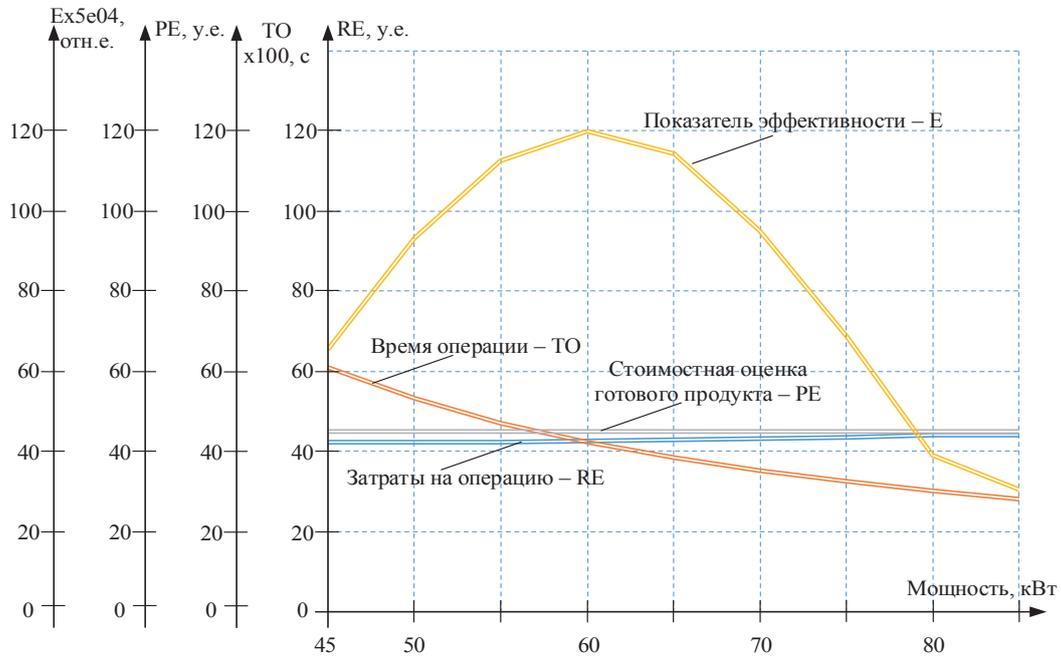


Рис. 2. Графики изменения показателей операции в зависимости от потребляемой мощности

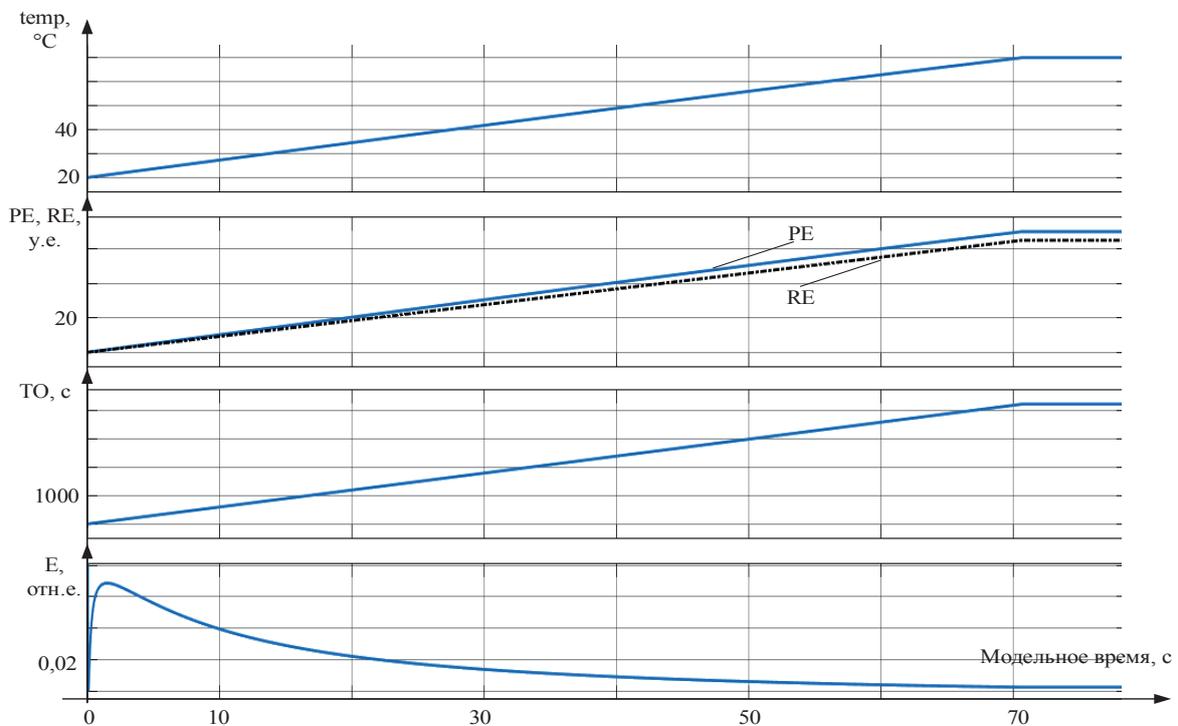


Рис. 3. Переходной процесс при постоянном управляющем воздействии 60 кВт

Результаты исследования приведены в табл. 1, из которых виден оптимальный режим по критерию эффективности.

Таблица 1. Результаты модельных исследований режимов при постоянном управляющем воздействии

P, кВт	RE	TO	PE	E
45	42,33	6089	45	0,00131
50	42,22	5315	45	0,00187
55	42,29	4715	45	0,00225
60	42,48	4237	45	0,00240
65	42,76	3847	45	0,00228
70	43,12	3523	45	0,00190
75	43,52	3249	45	0,00137
80	43,96	3015	45	0,00078
85	44,14	2812	45	0,00061

Изменение температуры продукта и показателей эффективности в ходе переходного процесса показано на рис. 3. Нагрев 1000 кг жидкости с теплоемкостью воды при наличии потерь и мощности нагревателя 70 кВт составляет около одного часа, что согласуется с расчетными данными [4]. Можно видеть, что наилучший режим при выбранных параметрах технологической установки получается при постоянной работе нагревательного элемента на мощности 60 кВт. Актуальным остается вопрос – возможно ли увеличить эффективность операции за счет “гибкого” управления, т.е. изменяя управляющее воздействие в ходе переходного процесса.

4. Синтез метода оптимизации закона управления

При наличии вычислительной модели представленного типа возможно решение задачи поиска закона управления, обеспечивающего глобальный оптимум технологических операций.

При фиксации граничных значений (20; 70) и дискретизации качественного показателя с заданным шагом (например, 10 градусов) управляющего воздействия [45; 85] с шагом в 5 кВт можно рассчитать количество возможных вариантов как:

$$k = p^m = 9^5 = 59049, \quad (5)$$

где p – количество вариантов управляющих воздействий; m – количество выделенных диапазонов качественного показателя (20-30; 30-40; 40-50; 50-60; 60-70 °С для варианта нагрева жидкости от 20 до 70 °С).

Даже пример с грубой дискретизацией иллюстрирует необходимость разработки метода оптимизации для поиска закона управления в функции качественного показателя, обеспечивающего максимум показателя (1). Можно предпо-

ложить, что подходящим методом решения (особенно, если учесть наличие ограничений) будет метод динамического программирования (ДП). Динамическое программирование представляет собой математический метод для нахождения оптимальных решений многошаговых (многоэтапных) задач [5]. Некоторые из таких задач естественным образом распадаются на отдельные шаги (этапы), но имеются задачи, в которых разбиение приходится вводить искусственно, для того чтобы их можно было решить методом ДП. Обычно методами ДП оптимизируют работу некоторых управляемых систем, эффект которой оценивается аддитивной, или мультипликативной, целевой функцией. Аддитивной называется такая функция нескольких переменных $f = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, значение которой вычисляется как сумма некоторых функций f_j , зависящих только от одной переменной

$$x_j : f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_1^n f_j(x_j).$$

Слагаемые аддитивной целевой функции соответствуют эффекту решений, принимаемых на отдельных этапах управляемого процесса.

В случае с показателем (1) условие аддитивности не выполняется и использовать его напрямую в качестве критерия в методе ДП невозможно. Сказанное подтверждает табл. 2, в которой записаны значения показателя эффективности (1) на локальных участках фазовых траекторий при фиксированных управляющих воздействиях.

Если судить по показателю эффективности (1), самая оптимальная траектория получается при максимальном управляющем воздействии (строки, имеющие серые клетки), однако, как было показано выше, это не так. Можно предположить, что целесообразно от показателя (1) перейти к критерию, имеющему аддитивные свойства [6].

Зададим следующий общий вид линейной функции затрат для j -го участка фазовой траектории:

$$R_j^* = RE_j + k_{time} \cdot TO_j, \quad (6)$$

где k_{time} – коэффициент перевода временных затрат стоимостную оценку (у.е./с);

Зададим следующий общий вид модифицированного критерия эффективности для j -го участка фазовой траектории:

$$E_j^* = PE_j - (R_{j-1}^* + RE_j + k_{time} \cdot TO_j), \quad (7)$$

где R_{j-1}^* – суммарные затраты на предыдущем участке.

Таблица 2. Результаты оценки эффективности промежуточных этапов обработки при постоянном управляющем воздействии

P	RE	TO	PE	E(20-30)	RE	TO	PE	E (30-40)	RE	TO	PE	E (40-50)
45	6,218	0,122	12,3	32,76	6,256	0,123	18	81,29	6,347	0,125	23,7	128,8
50	6,229	0,107	12,3	42,37	6,262	0,108	18	105,6	6,342	0,109	23,7	168,4
55	6,268	0,0954	12,3	52,4	6,297	0,096	18	131,8	6,368	0,097	23,7	211,6
60	6,325	0,086	12,3	62,64	6,352	0,086	18	159,3	6,417	0,087	23,7	257,7
65	6,398	0,0783	12,3	73,01	6,422	0,079	18	188	6,481	0,079	23,7	306,6
70	6,48	0,0718	12,3	83,22	6,504	0,072	18	217,5	6,558	0,073	23,7	357,2
75	6,571	0,0664	12,3	93,1	6,593	0,067	18	247,5	6,645	0,067	23,7	409,3
80	6,668	0,0617	12,3	102,8	6,689	0,062	18	278	6,737	0,062	23,7	463,3
85	6,772	0,0576	12,3	111,8	6,79	0,058	18	308,4	6,837	0,058	23,7	517,8
P	RE	TO	PE	E(50-60)	RE	TO	PE	E(60-70)				
45	6,566	0,1288	29,3	162,1	6,954	1310	35	24,4063				
50	6,533	0,1123	29,3	215,3	6,865	1133	35	33,2606				
55	6,539	0,0995	29,3	273,9	6,831	997,7	35	43,2111				
60	6,571	0,0893	29,3	337,2	6,834	891,5	35	54,0841				
65	6,622	0,081	29,3	404,8	6,861	805,7	35	65,8294				
70	6,689	0,0741	29,3	475,8	6,91	735,1	35	78,2473				
75	6,766	0,0683	29,3	549,8	6,97	675,7	35	91,4203				
80	6,852	0,0634	29,3	626,5	7,044	625,3	35	105,073				
85	6,944	0,0591	29,3	705,5	7,126	581,9	35	119,232				

Задача поиска оптимального закона управления будет иметь вид:

$$S = \sum_{j=1}^m E_j^*(u) \rightarrow \max, u \in \Omega, \quad (8)$$

где u – управляющее воздействие (в случае электрической нагревательной установки – мощность P , потребляемая нагревателем); Ω – область допустимых управлений.

Критерии вида (7) хорошо известны [7, 8], но теперь можно обоснованно выбрать величину k_{time} . Значение этого коэффициента должно быть таким, чтобы максимум функции $E^*(u)$ совпадал с максимумом показателя (1) в тех случаях, когда это может быть верифицировано. Для рассматриваемой системы нагрева жидкости от 20 до 70 °С имеем следующее условие:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE(P_1)}{dP} = \frac{d}{dP} \frac{(PE(P_1) - RE(P_1))^2 T_1^2}{PE(P_1) \cdot RE(P_1) \cdot TO^2(P_1)} = 0; \\ P_1 \in [45000; 85000] Bm \\ \frac{dE^*(P_1)}{dP} = \frac{d}{dP} (PE(P_2) - (RE(P_2) + k_{time} \cdot TO(P_2))) = 0; \quad (9) \\ P_2 \in [45000; 85000] Bm \\ P_1^{\max} = P_2^{\max}; \\ E^*(P_2^{\max}) > 0. \end{array} \right.$$

Выражение (9) регламентирует такой коэффициент времени k_{time} , который обеспечит наличие

экстремумов (максимумов) функций $E(P)$ и $E^*(P)$ при одинаковых значениях P .

Система (9) в общем виде имеет множество вариантов решения. В результате экспериментальных исследований можно предложить следующий способ определения коэффициента k_{time} :

1. Выполняется проверочное моделирование от начального до конечного значения управляемого параметра (полученные данные содержатся в табл. 1).
2. Выполняется проверочное моделирование для первого диапазона изменения управляемого параметра.
3. Для каждого из двух случаев рассчитывается свое значение коэффициента k_{time} и проводится их усреднение.

Все сказанное выше иллюстрирует табл. 3.

Результат усреднения коэффициента:

$$k_{time} = (0,00059 + 0,00064) / 2 = 0,000615.$$

На следующем этапе можно рассчитать значение аддитивного критерия E^* для каждой промежуточной стадии нагрева. Фрагмент поисковых таблиц приведен в табл. 4-6. Как видно из таблиц, значение критерия качества на каждом этапе позволяет сравнить эффективность, а следовательно, и оптимальность каждого промежуточного этапа общей операции.

После составления поисковых таблиц для дискретного процесса возможно определение закона изменения управляющего воздействия.

Для этого надо просмотреть поисковые таблицы 4-6 от начального этапа нагрева до конечного, двигаясь по тем строкам, в которых значение критерия E^* наибольшее.

Таблица 3. Результаты расчета модифицированного критерия E^* и подбора коэффициента времени k_{time}

P	RE	TO	PE	$E(20-70)$	E^*	RE	TO	PE	$E(20-30)$	E^*	
45	42,33	6089	45	0,00131	-0,923	16,218	1171	17	0,0008	0,0326	
50	42,22	5315	45	0,00187	-0,356	16,229	1028	17	0,0011	0,1131	
55	42,29	4715	45	0,00225	-0,072	16,268	915	17	0,0012	0,1461	
60	42,48	4237	45	0,0024	0,0202	16,325	825	17	0,0012	0,1469	
65	42,76	3847	45	0,00228	-0,03	16,398	751	17	0,0012	0,1212	
70	43,12	3523	45	0,0019	-0,199	16,48	689	17	0,0011	0,0788	
75	43,52	3249	45	0,00137	-0,437	16,571	637	17	0,0008	0,0213	
80	43,96	3015	45	0,00078	-0,739	16,668	592	17	0,0006	-0,047	
85	44,14	2812	45	0,00061	-0,799	16,772	553	17	0,0003	-0,126	
$k \quad time$				0,00059				0,00064			

Таблица 4. Поисковые таблицы (диапазоны 20-40 °С)

P	RE	TO	PE	$E^*(20-30)$	P	R^*	RE	TO	PE	$E^*(30-40)$
(от 50 кВт)										
45	16,8612	6,256	1178	24	0,15831					
50	16,8612	6,262	1033	24	0,241485					
55	16,8612	6,297	919,6	24	0,276226					
60	16,8612	6,352	828,7	24	0,27713					
65	16,8612	6,422	754,1	24	0,253009					
70	16,8612	6,504	691,9	24	0,209262					
75	16,8612	6,593	639,1	24	0,152734					
80	16,8612	6,689	593,8	24	0,084593					
85	16,8612	6,79	554,5	24	0,007763					
(от 55 кВт)										
45	16,218	1171	17	0,061835	45	16,831	6,256	1178	24	0,188559
50	16,229	1028	17	0,13878	50	16,831	6,262	1033	24	0,271734
55	16,268	915,4	17	0,169029	55	16,831	6,297	919,6	24	0,306475
60	16,325	825,2	17	0,167502	60	16,831	6,352	828,7	24	0,307378
65	16,398	751,2	17	0,140012	65	16,831	6,422	754,1	24	0,283257
70	16,48	689,4	17	0,096019	70	16,831	6,504	691,9	24	0,23951
75	16,571	637	17	0,037245	75	16,831	6,593	639,1	24	0,182982
80	16,668	592	17	-0,03208	80	16,831	6,689	593,8	24	0,114842
85	16,772	553	17	-0,112095	85	16,831	6,79	554,5	24	0,038011
(от 60 кВт)										
45	16,8325	6,256	1178	24	0,187032					
50	16,8325	6,262	1033	24	0,270207					
55	16,8325	6,297	919,6	24	0,304948					
60	16,8325	6,352	828,7	24	0,305851					
65	16,8325	6,422	754,1	24	0,28173					
70	16,8325	6,504	691,9	24	0,237984					
75	16,8325	6,593	639,1	24	0,181455					
80	16,8325	6,689	593,8	24	0,113315					
85	16,8325	6,79	554,5	24	0,036485					

Таблица 5. Поисковые таблицы (диапазоны 40-60 °С)

P	R*	RE	TO	PE	E*(40-50)	P	R*	RE	TO	PE	E*(50-60)
(от 50 - 60 кВт)						(от 55 - 55 -60 кВт)					
45	23,7229	6,347	1196	31	0,1945895	45	30,6253	6,566	1237	38	0,0479035
50	23,7229	6,342	1046	31	0,2918395	50	30,6253	6,533	1078	38	0,1786885
55	23,7229	6,368	930	31	0,3371795	55	30,6253	6,539	954,9	38	0,248395
60	23,7229	6,417	837	31	0,345313	60	30,6253	6,571	857,2	38	0,2764805
65	23,7229	6,481	761	31	0,3281145	65	30,6253	6,622	777,6	38	0,2744345
70	23,7229	6,558	698	31	0,290044	70	30,6253	6,689	711,6	38	0,2480245
75	23,7229	6,645	644	31	0,236008	75	30,6253	6,766	655,9	38	0,20528
80	23,7229	6,737	598	31	0,172298	80	30,6253	6,852	608,3	38	0,148554
85	23,7229	6,837	558	31	0,096775	85	30,6253	6,944	567,1	38	0,081892
(от 55 - 55 кВт)						(от 55 - 60 -60 кВт)					
45	23,6935	6,347	1196	31	0,223935	45	30,6244	6,566	1237	38	0,048807
50	23,6935	6,342	1046	31	0,321185	50	30,6244	6,533	1078	38	0,179592
55	23,6935	6,368	930	31	0,366525	55	30,6244	6,539	954,9	38	0,2492985
60	23,6935	6,417	837	31	0,3746585	60	30,6244	6,571	857,2	38	0,277384
65	23,6935	6,481	761	31	0,35746	65	30,6244	6,622	777,6	38	0,275338
70	23,6935	6,558	698	31	0,3193895	70	30,6244	6,689	711,6	38	0,248928
75	23,6935	6,645	644	31	0,2653535	75	30,6244	6,766	655,9	38	0,2061835
80	23,6935	6,737	598	31	0,2016435	80	30,6244	6,852	608,3	38	0,1494575
85	23,6935	6,837	558	31	0,1261205	85	30,6244	6,944	567,1	38	0,0827955
(от 55 - 60 кВт)						(от 55 - 60 -65 кВт)					
45	23,6926	6,347	1196	31	0,2248385	45	30,6416	6,566	1237	38	0,0316085
50	23,6926	6,342	1046	31	0,3220885	50	30,6416	6,533	1078	38	0,1623935
55	23,6926	6,368	930	31	0,3674285	55	30,6416	6,539	954,9	38	0,2321
60	23,6926	6,417	837	31	0,375562	60	30,6416	6,571	857,2	38	0,2601855
65	23,6926	6,481	761	31	0,3583635	65	30,6416	6,622	777,6	38	0,2581395
70	23,6926	6,558	698	31	0,320293	70	30,6416	6,689	711,6	38	0,2317295
75	23,6926	6,645	644	31	0,266257	75	30,6416	6,766	655,9	38	0,188985
80	23,6926	6,737	598	31	0,202547	80	30,6416	6,852	608,3	38	0,132259
85	23,6926	6,837	558	31	0,127024	85	30,6416	6,944	567,1	38	0,065597

Таблица 6. Поисковые таблицы (диапазон 60-70 °С)

P	R*	RE	TO	PE	E*(60-70)
(от 55 - 60 -60 -60 кВт)					
45	37,7226	6,954	1310	45	-0,4495
50	37,7226	6,865	1133	45	-0,2561
55	37,7226	6,831	998	45	-0,1423
60	37,7226	6,834	892	45	-0,0826
65	37,7226	6,861	806	45	-0,059
70	37,7226	6,91	735	45	-0,0663
75	37,7226	6,97	676	45	-0,0913
80	37,7226	7,044	625	45	-0,1355
85	37,7226	7,126	582	45	-0,1919
(от 55 - 60 -60 -65 кВт)					
45	37,7247	6,954	1310	45	-0,4516
50	37,7247	6,865	1133	45	-0,2581
55	37,7247	6,831	998	45	-0,1443
60	37,7247	6,834	892	45	-0,0847
65	37,7247	6,861	806	45	-0,0610
70	37,7247	6,91	735	45	-0,0684
75	37,7247	6,97	676	45	-0,0933
80	37,7247	7,044	625	45	-0,1376
85	37,7247	7,126	582	45	-0,194

Продолжение табл. 6

(от 60 - 60 -60 -65 кВт)					
45	37,795	6,954	1310	45	-0,5219
50	37,795	6,865	1133	45	-0,3285
55	37,795	6,831	998	45	-0,2146
60	37,795	6,834	892	45	-0,155
65	37,795	6,861	806	45	-0,1314
70	37,795	6,91	735	45	-0,1387
75	37,795	6,97	676	45	-0,1637
80	37,795	7,044	625	45	-0,2079
85	37,795	7,126	582	45	-0,2643

Для рассматриваемого примера найденный оптимальный закон управления, как функцию качественного показателя – температуры, можно представить в табличном виде (табл. 7).

Таблица 7. Оптимальный закон управления

temp, °C	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
P, кВт	55	60	60	60	65

Проверочные циклы моделирования при помощи вычислительной модели в среде Matlab/Simulink доказывают адекватность полученных результатов. На рис. 4 представлен переходной процесс и графики изменения показателей эффективности при оптимальном “гибком” управлении, а табл. 8 демонстрирует сравнительную эффективность процессов на основе показателя (1) при вариациях управляющих воздействий. Наглядно видно, что эффективность процессов, у которых управление на отдельных этапах отличается от оптимальных значений, снижается.

Таблица 8. Показатели эффективности операции при оптимальном и частично отличающемся от оптимального управлении

Закон управления (оптимальный)	temp1, °C	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
	P, кВт	55	60	60	60	65
RE1	42,45					
TO1	4242					
PE1	45					
E1	0,002453					
Закон управления 2	temp2, °C	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
	P, кВт	55	60	60	60	60
RE2	42,42					
TO2	4327					
PE2	45					
E2	0,002412					
Закон управления 3	temp3, °C	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
	P, кВт	60	60	60	60	65
RE3	42,51					
TO3	4151					
PE3	45					
E3	0,002444					
Закон управления 4	temp4, °C	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
	P, кВт	55	60	60	65	65
RE4	42,5					
TO4	4162					
PE4	45					
E4	0,002444					

Таким образом, для поставленной задачи можно сформулировать разработанный метод оптимизации в общем виде:

1. Определить границы допустимых значений управления и управляемой переменной.
2. Выполнить дискретизацию процесса управления по управляющему воздействию и управляемой переменной.

3. Определить базовую длительность операции.
 4. Для всех выделенных дискретных значений управляющего воздействия, лежащих в предполагаемой области экстремума, экспериментально определить параметры операции и показатели эффективности при “жестком” управлении, когда управляющее воздействие постоянно.
 5. Рассчитать численное значение весового коэффициента для временных затрат по зависимостям (9) для каждого диапазона изменения управляемой переменной процесса.
 6. Для первого диапазона изменения управляемой переменной процесса экспериментально определить оптимальное управляющее воздействие из всех допустимых, при котором модифицированный аддитивный критерий (8) будет достигать максимального значения.
 7. Вычислить и запомнить стоимостную оценку затрат на лучший вариант операции по формуле (6).
 8. Выбрать следующий диапазон управляемой переменной, экспериментально определить параметры процесса на данном участке для всего возможного набора управлений. По формуле (7) рассчитать для исследуемых вариантов значение критерия оптимальности с учетом затрат на предыдущем шаге, вычисленных в пункте 7.
 9. Определить наилучшее возможное значение управляющего воздействия на текущем шаге.
 10. Если еще остаются не просмотренными диапазоны управляемой переменной, то перейти к пункту 7. Иначе, сформировать таблицу по примеру табл. 7 (закон оптимального управления и закончить поиск).
- Следует отметить, что при малом количестве возможных управлений можно ограничиться простым перебором, при больших – использовать градиентные методы поиска экстремума для определения наилучшего управления (п. 6 и 8). Для осуществления эффективного поиска в соответствии с представленным методом необходима модель, содержащая в своей структуре модули вычисления динамики изменения качественного показателя, расхода энергетического и ресурсного продуктов (см. рис. 1). Кроме того, модель должна содержать вычислительные блоки для расчета стоимостных оценок затрат и готового продукта, а также времени операции, что позволит определить и показатель эффективности (1), и критерий оптимизации вида (7).

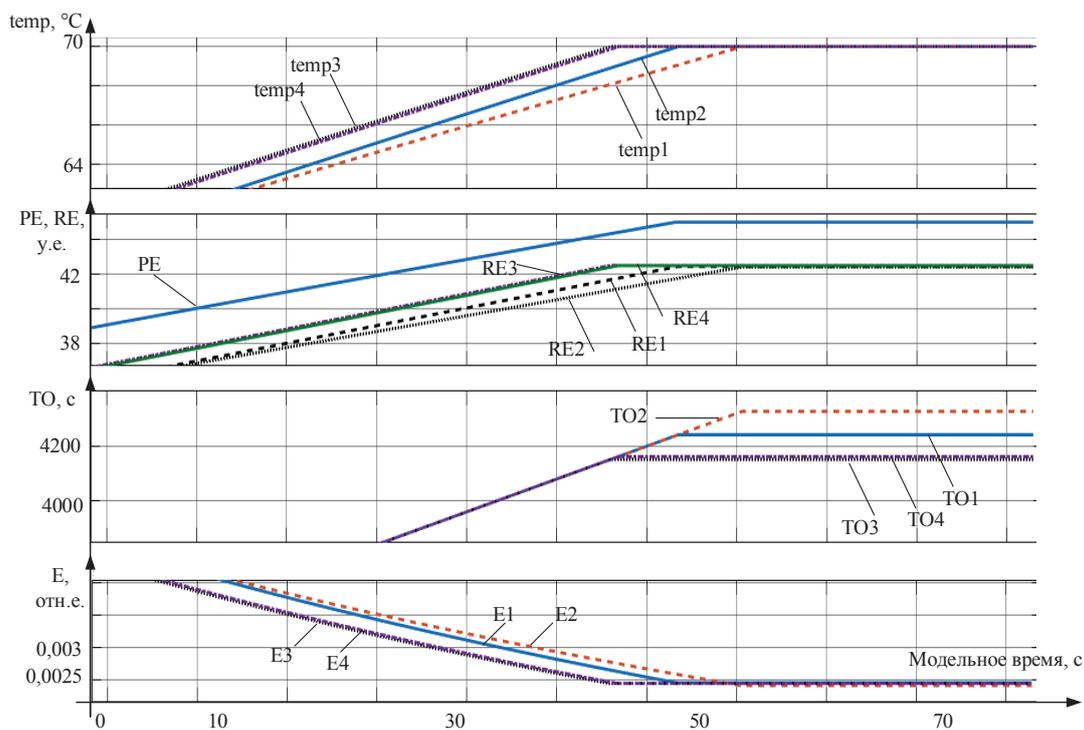


Рис. 4. Переходные процессы при оптимальном и частично отличающемся от оптимального управлении

Представленный метод может быть расширен на задачи управления потоковой обработкой сырья с несколькими последовательными ступенями обработки. Это актуально для целого ряда технологических установок:

- установки проточного нагрева/охлаждения жидкости или газов в трубопроводах;
- конвейерные установки сушки или охлаждения сыпучей продукции (например, участок преднагрева окатышей перед обжигом);
- обжиговые печи с движением материала через печь;
- барабанные сушильные установки для сушки технического углерода, строительных смесей, пищевой продукции;
- химические реакторы проточного типа.

В таких случаях при фиксированной производительности необходимо определить подачу энергетического продукта и/или реагентов для каждой ступени обработки. В результате необходимо обеспечить заданное качество выходной продукции и максимальную эффективность процесса как сочетание стоимости выходной продукции, затрат сырья, энергии, ресурса и времени.

В таком случае дискретизация управляемой переменной выполняется с привязкой к имеющимся ступеням обработки.

5. Выводы

Результаты исследования дают основание утверждать, что получил развитие метод глобальной оптимизации управляющих воздействий для простых технологических процессов обработки сырья, отличающийся тем, что используется ад-

дитивный критерий поиска, учитывающий временные затраты с весовым коэффициентом, определяемый на основе верифицированного показателя эффективности. Это позволяет реализовать поиск оптимального закона управления, гарантирующий достижение максимальной эффективности потоковой или периодической обработки сырья с заданной точностью.

Метод требует дискретизации по возможным управлениям и управляемой переменной.

На основании проведенных исследований можно утверждать:

- метод требует предварительного изучения для расчета весового коэффициента временных затрат, без чего невозможно составить обоснованный критерий оптимизации;
- для адекватного поиска закона управления на любом промежуточном этапе необходимо знать стоимостную оценку затрат, понесенных на доведение качественного показателя продукта до текущего значения; учет предыдущих затрат позволяет дифференцировать текущее положение системы в фазовом пространстве и соблюсти принцип оптимальности Беллмана;
- в рассмотренном примере разработанный метод оптимизации позволяет снизить количество поисковых шагов до 117, что по вычислительным операциям в 504 раза менее затратно, чем простой перебор;
- контрольное исследование на динамической вычислительной модели доказывает корректность полученных результатов оптимизации;

– результаты имеют физический смысл, так как по мере нагрева продукта возрастают тепловые потери, что требует увеличения мощности нагревательного элемента при повышении температуры.

Следует отметить, что в рассмотренном примере использовалась линейная зависимость стоимости продукта (*PE*) от качественного показателя – температуры (*temp*). При нелинейной зависимости работоспособность предложенного метода необходимо проверять.

Представленный метод может быть расширен на задачи управления потоковой обработкой сырья с несколькими последовательными ступенями обработки, что актуально для целого ряда технологических установок химической и металлургической промышленности.

Литература: 1. *Lutsenko I.* Identification of target system operations. development of global efficiency criterion of target operations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2015, 2 (2 (74)), P. 35–40. 2. *Lutsenko I., Vihrova E., Fomovskaya E., Serdiuk O.* Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, 2 (4 (80)). P. 42–50. 3. *Конох И.* Экстремальное эффективное управление процессом непрерывной обработки сырья // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 2018, Вип. 5(112), С. 30–38. 4. *Lutsenko I., Fomovskaya O., Konokh I., Oksanych I.* Development of a method for the accelerated two-stage search for an optimal control trajectory in periodical processes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, no 2 (87), P. 47-55. 5. *Bellman R. E.* Dynamic Programming. Princeton University Press. 2003. 401 p. 6. *Löber J.* Analytical Approximations for Optimal Trajectory Tracking // Bulletin of Volcanology, 2017, vol. 78, issue 10, P. 119–193. 7. *Ляхомский А.В., Вахрушев С.В., Петров М.Г.* Моделирование поверхности показателей энергоэффективности обогащительных производств горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2006, № 10, С. 313–316. 8. *Головицына М.* Задачи оптимизации как основа для управления качеством промышленной продукции. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/650/506/lecture/11497?page=3> (дата обращения 10.01.2019).

Transliterated bibliography:

1. *Lutsenko I.* Identification of target system operations. development of global efficiency criterion of target operations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. 2 (2 (74)), P. 35–40. 2. *Lutsenko I., Vihrova E., Fomovskaya E., Serdiuk O.* Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. 2 (4 (80)). P. 42–50. 3. *Konokh I.* Extreme effective control of continuous raw material processing // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2018, Iss. 5(112), P. 30–38.

4. *Lutsenko I., Fomovskaya O., Konokh I., Oksanych I.* Development of a method for the accelerated two-stage search for an optimal control trajectory in periodical processes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, no 2 (87), P. 47-55.

5. *Bellman R. E.* Dynamic Programming. Princeton University Press. 2003. 401 p.

6. *Löber J.* Analytical Approximations for Optimal Trajectory Tracking // Bulletin of Volcanology, 2017, vol. 78, issue 10, P. 119–193.

7. *Liakhomskii A.V., Vakhrushev S.V., Petrov M.G.* Modelirovanie poverkhnosti pokazatelei energoeffektivnosti obogatitelnykh proizvodstv gornykh predpriatii // Mining Informational and Analytical Bulletin, 2006, no. 10, P. 313–316.

8. *Golovitsyna M.* Zadachi optimizatsii kak osnova dlia upravleniia kachestvom promyshlennoi produktsii. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/650/506/lecture/11497?page=3> (дата обращения 10.01.2019).

Поступила в редколлегию 27.02.2019

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Шевченко И. В.

Конох Игорь Сергеевич, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации и информационных систем, КрНУ. Научные интересы: автоматизированные системы контроля и управления производством. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366)30157. E-mail: icegun.ik@gmail.com

Истомина Наталия Николаевна, ст. преп. кафедры автоматизации и информационных систем, КрНУ. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157. E-mail: nmistomina@gmail.com

Оксанич Анатолий Петрович, д-р. техн. наук, профессор, директор НИИ технологии полупроводников и информационно-управляющих систем КрНУ, заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем. Научные интересы: методы и аппаратура контроля структурно-совершенных полупроводниковых монокристаллов, пористые полупроводники. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366)30157. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua

Konokh Ihor Sergeevich, Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Information and Control Systems, KrNU, Research interests: automated control systems and production management. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomayskaya Str, 20, tel.: (05366)30157. E-mail: icegun.ik@gmail.com

Istomina Nataliia Nikolaevna, Senior Lecturer, Department of Information and Control Systems, KrNU, Research interests: automation of production management processes. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomayskaya Str, 20, tel.: (05366)30157. E-mail: nmistomina@gmail.com

Oksanich Anatolii Petrovich, Dr. Tech. Sciences, Professor, Director of the Institute of Semiconductor Technology and Information Management Systems, KrNU, Head of Department of Information and Control Systems. Research interests: methods and equipment for the control of structurally perfect semiconductor single crystals, porous semiconductors. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomayskaya Str, 20, tel.: (05366)30157. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua