

## Системы экстремального регулирования на основе комбинации поисковых оптимизационных алгоритмов

*Рассмотрены подходы к созданию систем экстремального регулирования, основанных на одновременном комбинированном использовании различных алгоритмов поиска оптимума функции качества. Показаны особенности реализации подобных систем на базе подходов конкуренции и компромисса, а также их преимущества и возможные способы организации настройки.*

**Ключевые слова:** системы экстремального регулирования; настройка систем управления; многомодульные и гибридные системы управления; интеграция алгоритмов управления

### Введение

Структура и методы проектирования систем экстремального регулирования (СЭР) в значительной степени зависят от принятого и реализуемого алгоритма поиска экстремума функции  $y = f(x)$ . По этому признаку СЭР подразделяются на следующие типы [1, 2]:

- с определением производной показателя качества  $dy/dx$  или  $dy/dt$ ;
- с определением знака производной показателя качества;
- шаговые системы, реагирующие на знак и значения приращений выходного сигнала  $u$ ;
- с модулирующим поисковым сигналом, которые определяют направление движения к экстремуму по сдвигу фазы между входными и выходными сигналами;
- с запоминанием экстремума, реагирующие на разность между оптимальным, достигнутым в предыдущие моменты времени, и текущим значением выхода  $u$  или его производной, как правило, первого или второго порядка.

В работах 50...60-х годов XX века В. В. Казакевича, Л. М. Либерзона, А. Б. Родова и многих других были подведены итоги интенсивного, скачкообразного развития теории СЭР этих лет. При исследовании и решении задач проектирования СЭР на этом этапе ставились задачи определения: установившегося периода автоколебаний около экстремума; амплитуды колебаний входа и выхода объекта; среднего уровня автоколебаний или потерь на поиск.

Определение указанных параметров одним из разработанных в эти годы методов [1, 3, 4] позволяет в дальнейшем решить задачу об устойчивости системы экстремального регулирования.

Конец XX — начало XXI века связаны с очередным интенсивным, скачкообразным развитием СЭР, что подтверждается значительным числом работ как за рубежом, так и в отечественной литературе (подробный их обзор дан в работе [8]).

В работах отечественных авторов этого периода можно выделить ряд направлений. Одно из них связано с совершенствованием СЭР, функционирующих на основе использования оценок градиента

оптимизируемого параметра или критерия по управляющим (входным) параметрам. Данный класс систем можно выделить в отдельную категорию. Динамика градиентных квазистационарных систем рассмотрена А. А. Красовским [9], Г. А. Французовой [8] и др. Для данных систем можно выделить важное обстоятельство, облегчающее их синтез, — это отсутствие нелинейной поисковой подсистемы, реализуемой в виде релейного элемента или подсистемы запоминания. Дополнительно в ряде случаев, если экстремальная характеристика может быть представлена параболой, можно выполнить замену экстремальной статической характеристики, перейдя непосредственно к линейному выражению для градиента, что позволяет рассматривать эквивалентную линейную систему. Указанное обстоятельство привело к появлению множества модифициаций градиентных систем.

Другим направлением совершенствования СЭР является развитие идей В. В. Казакевича, связанных с практическими аспектами использования СЭР, основанных на методах статистики и прогнозирования. Так, в работах [10—12] показано, что подобные системы в отдельных случаях позволяют обеспечить высокое качество поисковых процессов, достижение которого другими способами затруднительно в силу ограничений на допустимые значения управляющих воздействий.

Основным недостатком подобных систем являются сложности, связанные с их расчетом и точной настройкой для условий конкретного объекта управления. Одним из возможных направлений решения этой проблемы является разработка СЭР, основанных на комбинировании различных поисковых оптимизационных алгоритмов.

### Способы интеграции поисковых оптимизационных алгоритмов

В СЭР интеграцию различных поисковых алгоритмов можно выполнить на уровнях дискретных или аналоговых сигналов. При этом независимо от типа сигнала можно выделить два разных подхода:

- конкуренция, когда каждый поисковый алгоритм, завершив свой рабочий цикл, может изменить

направление, а также, возможно, и скорость движения к оптимуму, если это позволяет разрешающий противоречия алгоритм блокировки (рис. 1, а);

- компромисс между поисковыми алгоритмами, например, путем взвешенного суммирования сигналов управления согласно схеме, показанной на рис. 1, б, при

$$U = \sum_{l=1}^L \lambda_l U_l, \quad (1)$$

где  $\lambda$  определяет вклад отдельного поискового алгоритма;  $L$  — число поисковых алгоритмов.

Выбор  $\lambda$  может быть основан на решении таких задач, как:

- закрепление за каждым алгоритмом отдельной области пространства состояний системы. Если  $\lambda$  принимает дискретное значение исходя из соответствия состояния системы заданным условиям, то СЭР относится к классу гибридных систем;
- оценка характеристик качества работы, например, путем оценок ошибок подсистем предвидения отдельных алгоритмов по способу, представленному в работе [13];
- организация постепенной настройки СЭР в соответствии с условиями конкретного объекта, при которой на первом этапе  $\lambda$  выше для подсистем с развитой методологией проектирования.

В СЭР с интеграцией на базе конкуренции алгоритм блокировки разрешает работу отдельных алгоритмов исходя из принципа обеспечения возможности доступа каждого алгоритма к управлению, например, блокируя алгоритмы, пытающиеся монополизировать функцию управления. Для решения этой задачи алгоритм блокировки анализирует в первую очередь управляющие команды алгоритмов и может информировать их о фактическом управлении и о необходимости перезапуска.

### Пример СЭР на основе компромисса между поисковыми алгоритмами

В качестве примера рассмотрим СЭР на основе компромисса между градиентным алгоритмом поиска [8] и алгоритмом, использующим технологии прогнозирования, отличные от линейной экстраполяции [11, 14]. Структуры подсистем на основе этих алгоритмов показаны на рис. 2.

Характерные особенности градиентного алгоритма (рис. 2, а) хорошо известны и рассмотрены в работах [8, 9]. Остановимся более подробно на алгоритме, показанном на рис. 2, б. Вариант этого

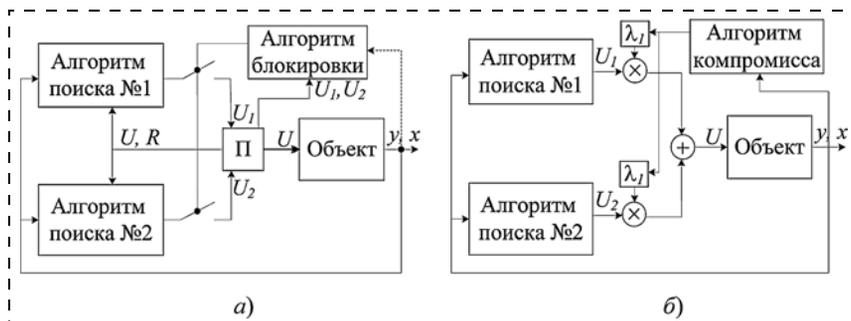


Рис. 1. Подход к экстремальному регулированию путем интеграции различных поисковых алгоритмов на основе: а — конкуренции; б — компромисса (П — блок переключения направления движения к экстремуму; R — сигнал перезапуска)

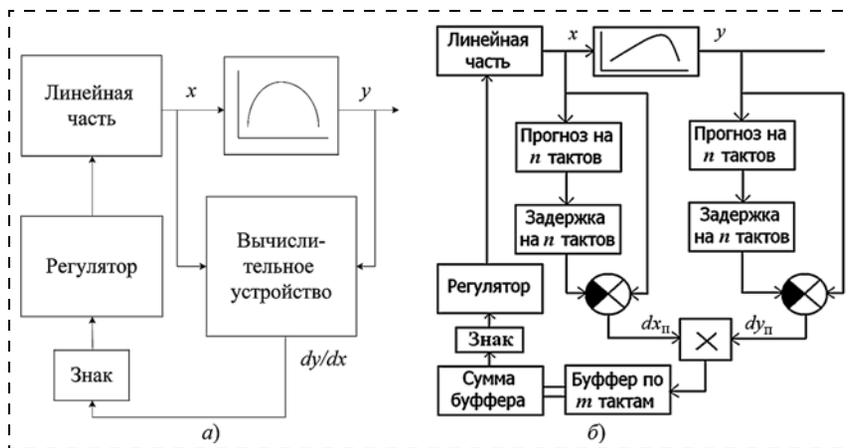


Рис. 2. Поисковые оптимизационные алгоритмы: а — на основе градиентного алгоритма поиска с вычислительным устройством согласно работе [8]; б — на основе алгоритма поиска с отдельными прогнозами  $x$  и  $y$  [14]

алгоритма предложен в работе [14] для оперативного поиска экстремума зависимости активной мощности электрической дуги  $y$  от переменного тока  $x$  в дуговой сталеплавильной печи. Принцип его работы можно сформулировать следующим образом: проведенные с момента прогноза изменения в управлении относительно предварительно прогнозируемой динамики изменения  $x$  должны положительно повлиять на динамику изменения выходного параметра  $y$  относительно его прогнозируемого уровня. Подобная система оказывается эффективна при наличии одновременных возмущений по  $x$  и  $y$  вследствие роста качества отдельного прогноза при известных особенностях технологического процесса.

При работе системы [14] выходной сигнал  $y$  с объекта управления аппроксимируется полиномом второго порядка, который используется для получения спрогнозированного значения выходного параметра  $y_n(t + n\Delta t)$ , которое, задержавшись на  $n$  тактов, поступает на элемент сравнения, где формируется разница между текущим действительным и спрогнозированным ранее значениями выходного параметра:

$$\Delta y_n = y(t) - y_n(t). \quad (2)$$

Величина  $\Delta x_{\Pi}$  формируется как разница между текущим действительным и спрогнозированным ранее значениями входного параметра. В рассматриваемом примере, чтобы исключить влияние особенностей модуляции сигналов управления, используются знаковые версии для обоих алгоритмов на рис. 2. Это позволяет в алгоритме на рис. 2, б использовать знак произведения  $\Delta x_{\Pi} \Delta y_{\Pi}$  для выбора направления дальнейшего движения к экстремуму. Для повышения устойчивости поискового процесса рассчитывается сумма произведения  $\Delta x_{\Pi} \Delta y_{\Pi}$  по последним  $m$  тактам работы системы. Таким образом, разница (2), связанная как с изменениями в управлении, так и с неточностью прогнозирования, используется при выборе направления дальнейшего движения к экстремуму:

$$U = \text{sign} \left( \sum_{i=1}^m \Delta x_{\Pi}(i) \Delta y_{\Pi}(i) \right). \quad (3)$$

Экстремальная статическая характеристика объекта представлена зависимостью  $y = -x_2 + 10x + 100$ . Моделью линейной части является инерционное звено первого порядка с постоянной времени 10 с.

Для сравнительного изучения влияния параметров настройки алгоритма, показанного на рис. 2, б, на качество поисковых процессов системы автоматической оптимизации управления (САОУ) был проведен автоматизированный вычислительный эксперимент в среде VisSim (более  $10^5$  опытов). Полученные результаты представлены на рис. 3 в форме зависимости интегральных потерь на поиск от комбинации числа тактов задержки  $n$  и общего числа тактов  $N$ , по которым выполняется аппроксимация. При этом для каждой комбинации было подобрано значение  $m$ , оптимальное по следующему критерию:

$$\Pi \rightarrow \min,$$

$$\Pi = \max[\Pi_{\omega_1}^{\text{BГ}}, \Pi_{\omega_1}^{\text{B}}, \Pi_{\omega_1}^{\text{Г}}, \Pi_{\omega_2}^{\text{BГ}}, \Pi_{\omega_2}^{\text{B}}, \Pi_{\omega_2}^{\text{Г}}], \quad (4)$$

где  $\Pi_{\omega}^{\text{B}}$ ,  $\Pi_{\omega}^{\text{Г}}$ ,  $\Pi_{\omega}^{\text{BГ}}$  — интегральные оценки качества поиска при соответственно вертикальном, гори-

зонтальном и комбинированном дрейфе статической характеристики с частотой  $\omega$ ;  $\omega_1 = 0,15$  Гц;  $\omega_2 = 1$  Гц.

Также было получено выражение для приближенного определения рационального значения коэффициента усиления пропорционального регулятора:

$$\lg(K_y) = 0,429\vartheta_2 + 0,323\vartheta_1 - 0,059_1\vartheta_2 + 1,483;$$

$$\vartheta_1 = \lg\left(\frac{T}{S_t \tau}\right); \quad \vartheta_2 = \lg\left(\frac{T}{T_w}\right), \quad (5)$$

где  $T/(S_t \tau)$  характеризует связь быстродействия исполнительных устройств с частотой опроса датчиков и вызова алгоритма САОУ;  $T/T_w$  — связь инерции линейной части с частотой действующих возмущений;  $T_w$  — период возмущений;  $T$  — постоянная времени инерционного звена модели линейной части;  $S_t \tau$  — дискретность работы алгоритма во времени при шаге моделирования  $\tau$ .

На рис. 4 показаны примеры поисковых процессов как при раздельном, так и при совместном использовании алгоритмов в условиях одновременного горизонтального и вертикального дрейфа статической характеристики частотой 0,15 Гц. При моделировании раздельную работу и интеграцию осуществляли при одинаковых коэффициентах усиления 125 единиц по каналу каждого из алгоритмов с ограничением суммы управляющих сигналов на этом же уровне. Ограничение позволяет выявить результат именно от интеграции алгоритмов, а не от усиления общего коэффициента передачи вследствие суммирования двух управляющих сигналов.

Из рис. 4 видно, что интеграция градиентного алгоритма с системой на базе прогноза в отдельных случаях позволяет улучшить качество поисковых процессов по сравнению с работой каждого из алгоритмов в отдельности.

Альтернативой рассматриваемой СЭР с интеграцией алгоритмов может, например, являться использование градиентного поискового алгоритма с пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором. Промышленные правила его ручной на-

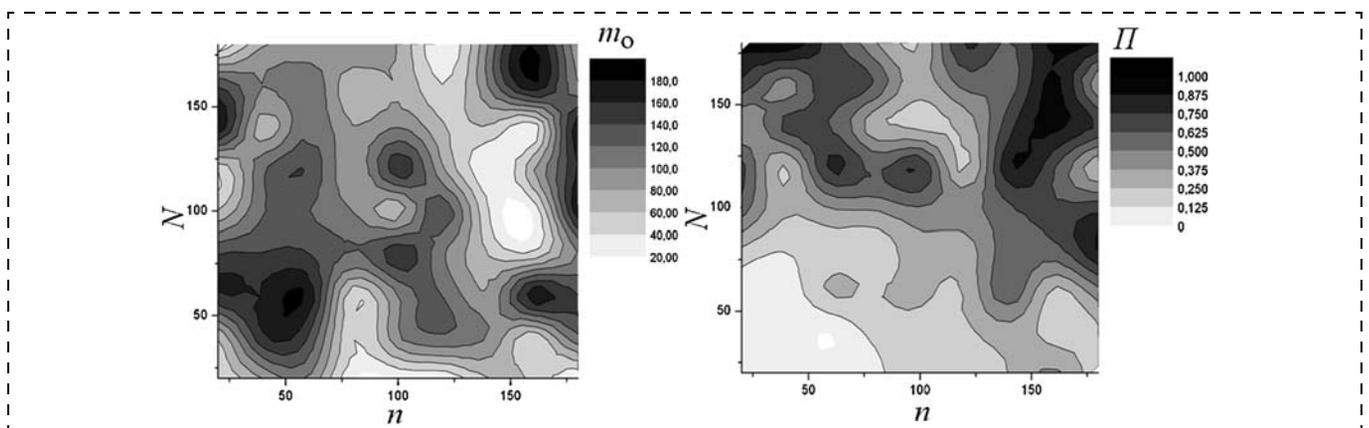
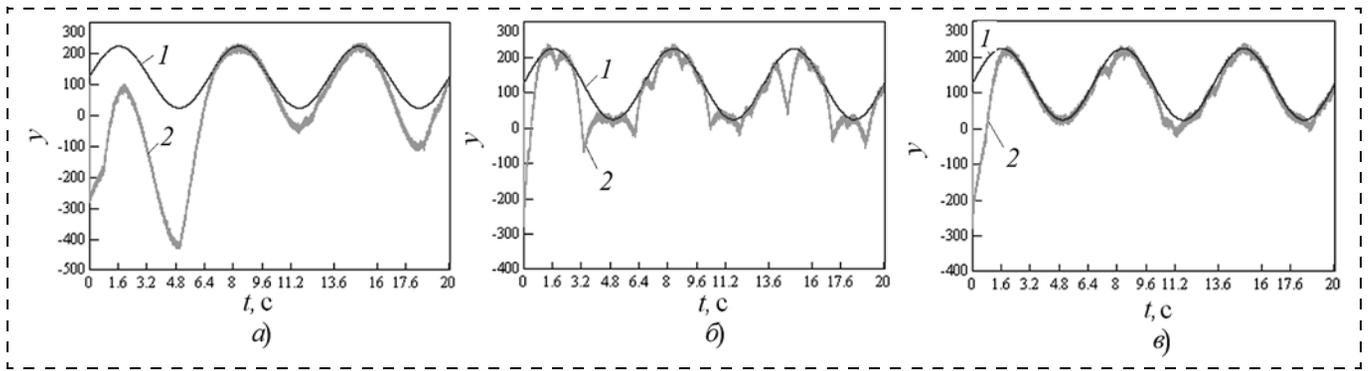


Рис. 3. Зависимость качества поисковых процессов САОУ от  $n$  и  $N$ :

$\Pi$  — значения критерия (4); светлый цвет — высокое качества поиска;  $m_0$  — оптимальное согласно минимуму  $\Pi$  значение параметра  $m$  при комбинациях  $n$  и  $N$



**Рис. 4. Процессы при работе алгоритмов поиска:**  
 а — градиентного; б — на базе прогноза входного и выходного параметра; в — при их совместной работе (1 — значения дрейфующего экстремума; 2 — фактическое значение  $y$ )

стройки для систем стабилизации предполагают следующий алгоритм:

- задать минимальные значения  $K_p$  и время дифференцирования  $T_d$ ;
- увеличивать  $K_p$  до появления быстро затухающих колебательных переходных процессов;
- увеличивать  $T_d$  до тех пор, пока колебания не будут устранены или до появления высокочастотных колебаний, свидетельствующих об избыточном дифференциальном управлении;
- повторять установки в соответствии с двумя предыдущими шагами до тех пор, пока колебания не удастся устранить.

Изучение работы СЭР показало, что интеграция алгоритмов позволяет дополнительно увеличить коэффициент усиления для прогнозирующего алгоритма по аналогии с настройкой  $T_d$  ПД регулятора в системе стабилизации. О достижении предельного уровня могут свидетельствовать высокочастотные составляющие, присутствующие на рис. 4, б, в.

### Пример СЭР с интеграцией конкурирующих алгоритмов

Подход к созданию СЭР на основе конкуренции в случае дискретных команд отдельных алгоритмов основан на использовании общего триггера, определяющего направление движения к оптимуму.

При отсутствии алгоритма согласования противоречий они могут разрешаться за счет "захвата" процесса поиска более активным алгоритмом, чаще выполняющим изменение направления движения к оптимуму. При этом более высокая активность отдельного алгоритма может быть обусловлена одновременным действием ряда факторов:

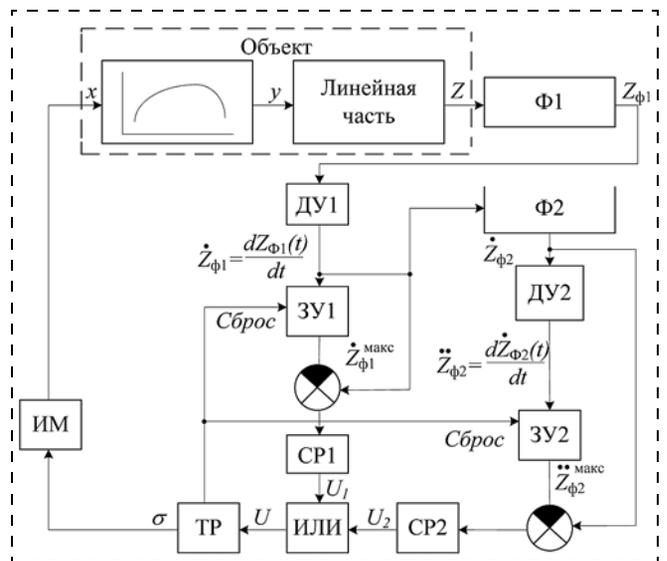
- более совершенным алгоритмом управления;
- противодействием работе других алгоритмов в силу противоречий;
- неустойчивой работой.

Указанные причины могут приводить к существенному росту интенсивности изменений направления движения к экстремуму в процессе поиска. В то же время, некоторые алгоритмы в таких условиях могут оказаться неработоспособны, поскольку им, например, может потребоваться некоторое время

для оценки эффекта от примененного к системе тестирующего воздействия.

Это означает, что используемые в СЭР алгоритмы должны учитывать возможность отличия сформированного от фактически поданного на объект управления. В отдельных алгоритмах уже содержатся способы разрешения указанной проблемы. Например, при использовании алгоритма, основанного на запоминании оптимального значения параметра, сброс запомненного значения в момент переключения направления движения к экстремуму в результате команды любого алгоритма позволяет учесть фактически поданное управление.

Вариант организации процесса интеграции конкурирующих алгоритмов и возможные преимущества этого рассмотрим на примере поисковой системы, показанной на рис. 5. Объектом является



**Рис. 5. СЭР с одновременным использованием поисковых алгоритмов запоминания экстремума первой и второй производной оптимизируемого параметра:**

Ф1-2 — фильтры  $1/(p + 1)^2$ ; ДУ1-2 — дифференцирующие устройства; ЗУ1-2 — блоки запоминания максимального значения; СП1-2 — реле, формирующие команду на изменение направления перемещения вала ИМ; ТР — триггер реверса, изменяющий направление перемещения вала ИМ на противоположное; ИМ — исполнительный механизм

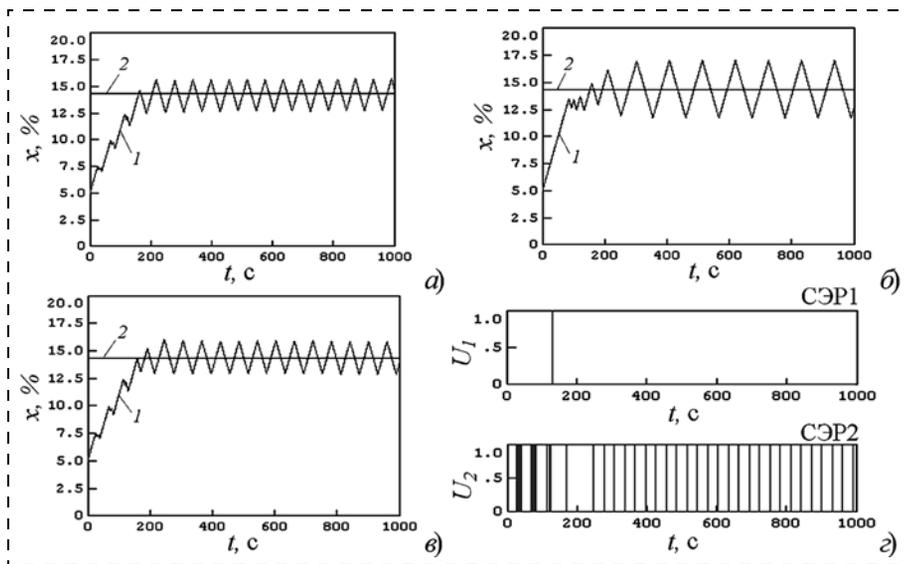
модель нагрева купола доменного воздушнонагревателя. Статические свойства зависимости температуры купола  $y$  от положения жалюзи воздушного вентилятора горелки  $x$  представлены зависимостью  $y = -5,4x^2 + 155x + 283$ . При отсутствии дрейфа оптимум  $1395^\circ\text{C}$  достигается при  $x = 14,3\%$ . Динамические свойства терморпары в защитном чехле, расположенном в кладке купола, представлены последовательным соединением двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени  $T_1 = 60$  и  $T_2 = 2$ . Контур содержит модель исполнительного механизма постоянной скорости  $0,1\%/с$ .

Особенностью СЭР является одновременное использование контуров на основе двух алгоритмов оптимизации: с запоминанием максимума первой производной выходной величины (СЭР1) и с запоминанием максимума второй производной (СЭР2), которые работают совместно. Управляющие сигналы  $U_1$  и  $U_2$  алгоритмов СЭР1 и СЭР2 формируются согласно следующим условиям:

$$U_1 = \begin{cases} 0 & \text{при } \dot{z}_{\Phi 1} \geq \dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}} - \Delta Z_{\Phi 1}; \\ 1 & \text{при } \dot{z}_{\Phi 1} < \dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}} - \Delta Z_{\Phi 1}; \end{cases} \quad (6)$$

$$U_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } \ddot{z}_{\Phi 2} \geq \ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}} - \Delta Z_{\Phi 2}; \\ 1 & \text{при } \ddot{z}_{\Phi 2} < \ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}} - \Delta Z_{\Phi 2}. \end{cases}$$

где  $\dot{z}_{\Phi 1}$ ,  $\ddot{z}_{\Phi 2}$  — текущие значения первой и второй производных оптимизируемого параметра по времени;  $\dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}}$ ,  $\ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}}$  — запомненные максимальные на текущий момент значения  $\dot{z}_{\Phi 1}$ ,  $\ddot{z}_{\Phi 2}$ ;  $\Delta Z_{\Phi 1}$ ,  $\Delta Z_{\Phi 2}$  — зоны нечувствительности.



**Рис. 6.** Перемещение вала ИМ (1) и оптимальное его положение (2) при: а — отдельной работе СЭР2 ( $\Delta Z_{\Phi 2} = 0,02$ ); б — отдельной работе СЭР1; в — совместной работе СЭР1 и СЭР2; г — импульсы на изменение направление движения вала ИМ при совместной работе СЭР1 и СЭР2

Выбор направления перемещения вала ИМ  $\sigma$  формируется в зависимости от  $U_1$  и  $U_2$ :

$$U = \begin{cases} 0 & \text{при } U_1 = 0 \text{ и } U_2 = 0; \\ 1 & \text{при } U_1 = 1 \text{ или } U_2 = 1; \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma(\tau) = \begin{cases} \sigma(\tau) & \text{при } U = 0; \\ -\sigma(\tau) & \text{при } U = 1. \end{cases}$$

При смене направления перемещения вала ИМ ( $U = 1$ ) выполняется сброс запомненных блоками ЗУ максимальных значений производных:

$$\dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}} = \begin{cases} \dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}} & \text{при } \dot{z}_{\Phi 1} \leq \dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}} \text{ и } U = 0; \\ \dot{z}_{\Phi 1} & \text{при } \dot{z}_{\Phi 1} < \dot{z}_{\Phi 1}^{\text{макс}} \text{ или } U = 1; \end{cases} \quad (8)$$

$$\ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}} = \begin{cases} \ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}} & \text{при } \ddot{z}_{\Phi 2} \leq \ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}} \text{ и } U = 0; \\ \ddot{z}_{\Phi 2} & \text{при } \ddot{z}_{\Phi 2} < \ddot{z}_{\Phi 2}^{\text{макс}} \text{ или } U = 1. \end{cases}$$

При постоянных параметрах фильтров Ф1-2 качество работы СЭР определяется зонами нечувствительности  $\Delta Z_{\Phi 1}$  и  $\Delta Z_{\Phi 2}$ . При их значениях  $0,4$  и  $0,02$ , соответственно, переходные процессы определяются работой контура с запоминанием второй производной. Из рис. 6, а и б, в видно совпадение поисковых процессов при отдельной работе СЭР2 и СЭР с интеграцией алгоритмов, т. е. при совместном использовании алгоритмов качество поиска не снизилось.

Увеличение зоны нечувствительности СЭР2 до  $\Delta Z_{\Phi 2} = 0,06$  приводит к существенному снижению качества поиска при отдельной работе СЭР2 (рис. 7, а). При работе СЭР с интеграцией алгоритмов качество процесса теперь определяется работой СЭР1. Видно соответствие процессов на рис. 6, б и 7, б. Из рис. 7, б видно, что увеличилось время выхода в область экстремума. Причиной являются возникающие противоречия между алгоритмами управления СЭР1 и СЭР2.

Полученные результаты говорят о возможности организации последовательной настройки СЭР. Например, на первом этапе требуемое качество поисковых процессов можно обеспечить за счет СЭР1, а далее выполнить постепенную подстройку зоны нечувствительности СЭР2 по второй производной, рациональные значения которой может быть трудно определить заблаговременно.

Рассмотрим поведение СЭР при наличии дополнительного блока разрешения противоречий путем введения блокировки управления от отдельных алгоритмов. Блокировка работы обоих алгоритмов выполняется

на заданное время после подачи принятой к исполнению команды на изменение направления движения вала ИМ. Прием для СЭР1 время блокирования 1 с, а для СЭР2 — 2 с. Полученные поисковые процессы представлены на рис. 8.

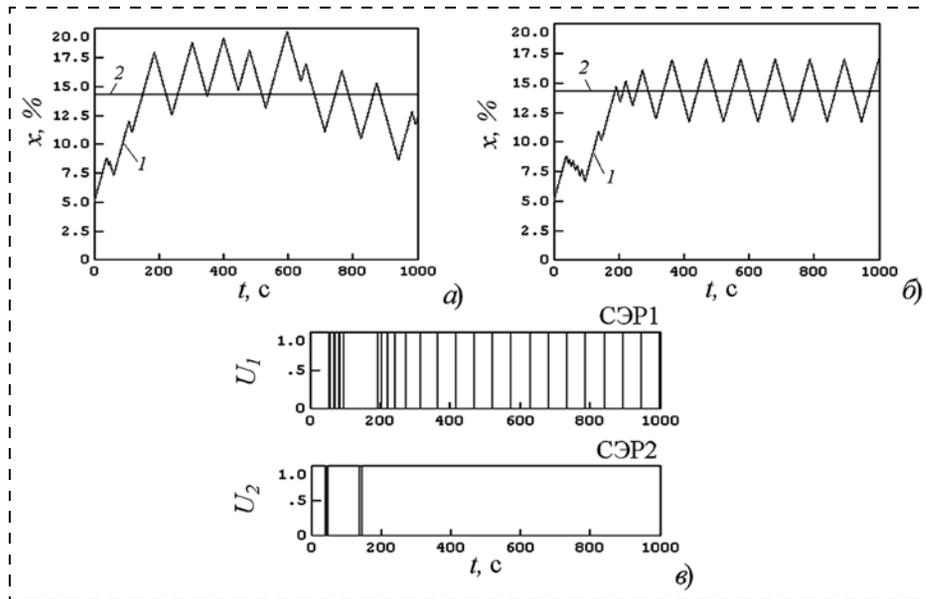
Видно, что СЭР с интеграцией алгоритмов успешно справляется с задачей поиска экстремума. Наличие блокировки позволило снизить интенсивность подачи управляющих воздействий от СЭР1 и СЭР2 и добиться качественной работы системы. Изучение различных вариантов блокировки показало, что в данном случае для достижения приемлемого качества поисковых процессов требуется блокировка СЭР2 после подачи команд как от СЭР1, так и от СЭР2. Работа СЭР1 может блокироваться подачей команд только от СЭР1.

Необходимо отметить, что после введения блокировки СЭР1 оказывает значимое воздействие на процесс движения к экстремуму на этапе, когда вследствие приближения к экстремуму значения производных непрерывно уменьшаются.

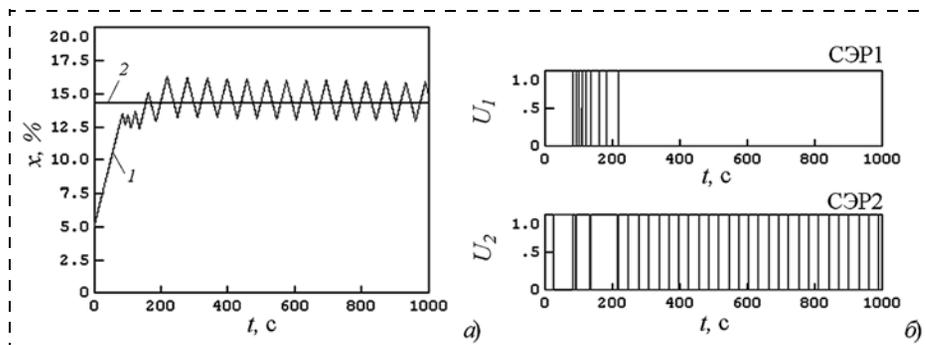
### Заключение

Подводя итоги, отметим, что разработка единого способа интеграции работы алгоритмов СЭР различных типов позволяет в перспективе создать систему, качественно решающую поисковые задачи даже при неточной настройке ряда параметров отдельных ее компонентов, а также предложить некоторый алгоритм последовательного подбора параметров настройки такой системы, который не приводил бы к существенным нарушениям процесса поиска экстремума.

Основным отличием предлагаемого подхода к управлению является предоставление свободы отдельным конкурирующим алгоритмам. Задачей алгоритма интеграции в таких условиях является реализация эффективных правил конкуренции. Перспективным направлением дальнейших исследований в данной области является разработка алгоритма настройки параметров выдержки блокирующей системы, что позволяет управлять частотным разделением диапазонов работы различных поисковых оптимизационных алгоритмов.



**Рис. 7. Перемещение вала ИМ (1) и оптимальное его положение (2) при:** а — отдельной работе СЭР2 с запоминанием второй производной ( $\Delta Z_{\Phi 2} = 0,06$ ); б — совместной работе СЭР1 и СЭР2; в — импульсы на изменение направление движения вала ИМ при совместной работе СЭР1 и СЭР2



**Рис. 8. Совместная работа СЭР1 и СЭР2 при наличии подсистемы разрешения конфликтов:** а — показано положение вала ИМ (1 — перемещение в ходе поиска; 2 — оптимальное); б — импульсы на изменение направление движения вала ИМ

### Список литературы

1. **Либерзон Л. М., Родов А. Б.** Системы экстремального регулирования / Под ред. В. В. Казакевича. М.: Энергия. 1965. 160 с.
2. **Либерзон Л. М., Родов А. Б.** Шаговые экстремальные системы. М.: Энергия, 1969. 96 с.
3. **Ивашенко Н. Н.** Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.
4. **Воронов А. А.** Основы теории автоматического управления. Часть III. Оптимальные, многосвязные и адаптивные системы. Л.: Энергия, 1970. 328 с.
5. **Frantsuzova G.** Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. V. 48. P. 438–446.
6. **Frantsuzova G. A.** Design of Two-Loops Extremum Seeking System by Means of Localization Method // Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control and Information Technology (ACIT-in 2005). Anaheim-Calgary-Zurich: ACTA Press, 2005. P. 415–419.
7. **Joon-Young C, Miroslav K., Kartik B. Ariyur, Jin S. Lee.** Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems // IEEE Transactions on automatic control. 2002. V. 47. N. 2. P. 318–323.
8. **Французова Г. А.** Синтез систем экстремального регулирования для нелинейных нестационарных объектов на основе принципа локализации: Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. Новосибирск, 2004.
9. **Красовский А. А.** Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. М.: Физматгиз, 1963.

10. Усачев М. В. Система автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей переменного тока. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Москва, 2009.

11. Рябчикова Е. С., Рябчиков М. Ю., Парсункин Б. Н. Применение прогнозной модели для оптимизации управления энергетическим режимом ДСП // Автоматизированные технологии и производства. 2012. № 4. С. 179—189.

12. Пыхова О. В. Автоматическая оптимизация управления технологическим процессом измельчения рудных материалов //

Автоматизированные технологии и производства. 2014. № 6. С. 165—177.

13. Чернодуб А. Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейрорегулирования // Проблемы программирования. 2011. № 2. С. 79—94.

14. Рябчиков М. Ю., Парсункин Б. Н., Рябчикова Е. С. Оптимизация управления электрическими режимами работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока с использованием прогнозирующей системы // Автоматизация в промышленности. 2014. № 11. С. 52—56.

## Extreme Control Systems Based on a Combination of Search Optimization Algorithms

M. Yu. Ryabchikov, mt\_mgn@mail.ru, E. S. Ruabchikova, mika.elena@mail.ru,  
Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov,  
Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000, Russian Federation

Received on October 13, 2014

The authors consider approaches to development of the extreme control systems (ECS) based on a simultaneous combination of different algorithms of search for a fitness function optimum. Such systems require a method for integration of the results of different algorithms. As a distinctive feature an algorithm can have high performance under certain conditions, developed methods of configuration, effective means of estimation of the future, current and past system states. Sometimes a system solution for a control problem was no good. This was a result of an excessive simplification of the search algorithm, e.g. carried out in order to facilitate the proceeding system design and performance of the structural transformations of the control system loops. In the authors' opinion, the approach based on integration of different algorithms, first of all, is aimed at preservation of high quality extreme control of a system. Weighted summation of the separate control signals is the traditional way to integrate the algorithms into the control systems. This method is a "compromise" between the controls proposed by different algorithms. However, in this paper the authors consider another way available for the extreme control systems. They examine ways of integration of the search algorithms as exemplified by the systems, which include not only the well-known algorithms with developed methods of design and algorithms of high efficiency, but also a complex configuration in terms of specific tasks. The authors demonstrate that in certain cases the methods of integration under consideration allow us to achieve a higher quality of the search processes than each algorithm taken separately. They show possible methods to organize configuration for such systems. They suggest high quality performance based on separate search algorithms, at the first stage, and a further "manual" parameter of configuration.

**Keywords:** extreme control systems, control system configuration, hybrid and multimodule systems, integration of search optimization algorithms

For citation:

Ryabchikov M. Yu., Ruabchikova E. S. Extreme Control Systems Based on a Combination of Search Optimization Algorithms, *Mechatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 300—306.

DOI: 10.17587/mau.16.300-306

### References

1. Liberzon L. M., Rodov A. B. *Sistemy ekstremal'nogo regulirovaniya* (Extremum seeking systems), Moscow, Energiya, 1965, 160 p. (in Russian).

2. Liberzon L. M., Rodov A. B. *Shagovye ekstremal'nye sistemy* (Stepping extremum seeking systems), Moscow, Energiya, 1969, 96 p. (in Russian).

3. Ivashchenko N. N. *Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriya i elementy sistem* (Automatic control. Theory and system elements), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 736 p. (in Russian).

4. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chast' III. Optimal'nye, mnogosvyaznye i adaptivnye sistemy* (Fundamentals of the theory of automatic control. Part III. Optimal multi-variable and adaptive systems Leningrad: Energiya), 1970, 328 p. (in Russian).

5. Frantsuzova G. Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, Allerton Press, 2012, no. 48, pp. 438—446.

6. Frantsuzova G. A. Design of Two-Loops Extremum Seeking System by Means of Localization Method, *Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control and Information Technology (ACIT-in 2005)"*, Anaheim-Calgary-Zurich, ACTA Press, 2005, pp. 415—419.

7. Joon-Young C., Miroslav K., Kartik B. Ariyur, Jin S. Lee. Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 2002, vol. 47, no. 2, pp. 318—323.

8. Frantsuzova G. A. Sintezy sistem ekstremal'nogo regulirovaniya dlya nelineinykh nestatsionarnykh ob"ektov na osnove printsi pa lokalizatsii: dissertation doctor of Engineering Sciences: 05.13.01, Novosibirsk, 2004 (in Russian).

9. Krasovskii A. A. *Dinamika nepreryvnykh samonastroyayushchikhsya sistem* (Dynamics of continuous adaptive systems), Moscow, Fizmatgiz, 1963, 468 p. (in Russian).

10. Usachev M. V. Sistema avtomaticheskogo upravleniya energeticheskim rezhimom elektrodugovykh pechei peremennogo toka: dissertation candidate of Engineering Sciences: 05.13.06, Moscow, 2009 (in Russian).

11. Ryabchikova E. P., Ryabchikov M. Yu., Parsunkin B. N. *Primeneniye prognoznoi modeli dlya optimizatsii upravleniya energeticheskim rezhimom DSP* (Predictive model for management optimization of arc furnace power mode), *Avtomatizirovannye Tekhnologii i Proizvodstva*, 2012, no. 4, pp. 179—189 (in Russian).

12. Pykhova O. V. *Avtomaticheskaya optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskim protsessom izmel'cheniya rudnykh materialov* (Automatic control optimization for ore materials grinding process), *Avtomatizirovannye Tekhnologii i Proizvodstva*, 2014, no. 6, pp. 165—177 (in Russian).

13. Chernodub A. N., Dzyuba D. A. *Obzor metodov neuroupravleniya* (Review methods neurocontrol), *Problemy programmirovaniya*, 2011, no. 2, pp. 79—94 (in Russian).

14. Ryabchikov M. Yu., Parsunkin B. N., Ryabchikova E. P. *Optimizatsiya upravleniya elektricheskimi rezhimami raboty dugovykh stalaplavil'nykh pechei peremennogo toka s ispol'zovaniem prognoziryuyushchei sistema* (Management optimization of electric operating modes of arc furnaces of alternating current using predicting system), *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2014, no. 11, pp. 52—56 (in Russian).

Corresponding author:

Ryabchikov Mikhail Yu., Ph. D., Associate Professor at the department of automated control systems, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000, Russian Federation, e-mail: mt\_mgn@mail.ru