УДК 004.652:623.81

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ТОПЛИВА

Ходаковский А.В.
Херсонская государственная морская академия

Работа посвящена разработке процедуры поиска оптимума функции цели в условиях действия значительных шумов, вызванных недостаточной точностью измерений. Показано, что процедуры с малым шагом, в данном случае, обладают плохой сходимостью и стремление повысить точность за счет уменьшения шага и усреднения не приводят к положительному результату. Предложено использование модифицированного симплекс метода. Показано, что, применение модифицированной симплекс-процедуры не только упрощает программное обеспечение, но и резко повышает скорость сходимости. Главным преимуществом метода является высокая помехоустойчивость. Так ни градиентная процедура, ни покоординатный подъем не работоспособны уже при ошибке измерения в пределах процента, в то время как симплекс сохраняет сходимость и при десятипроцентных ошибках. Данное свойство симплекс-процедуры основано на значительном охвате факторного пространства и сопровождается тенденцией к движению к глобальному оптимуму.
Ключевые слова: экстремальное управление, симплекс-процедура, магнитная обработка топлива, модифицированный симплекс метод.

Состояние вопроса: требование повышения экономичности и экологической чистоты двигателей внутреннего сгорания обуславливают интерес к технологиям позволяющим повысить эффективность использования топлива. Одним из таких путей является использование операций магнитной обработки органического энергоносителя, что в условиях лаборатории позволяет достичь экономии до пятнадцати процентов топлива. Однако в системе координат – время обработки, напряженность поля, положение оптимума зависит от режима и состояния двигателя, качества топлива и многих неконтролируемых возмущений.

Цель работы: с целью обеспечения максимальной эффективности использования технологии магнитной обработки топлива, разработать метод построения процедуры поиска оптимального соотношения время обработки – интенсивность поля, в условиях ограниченной точности измерения.

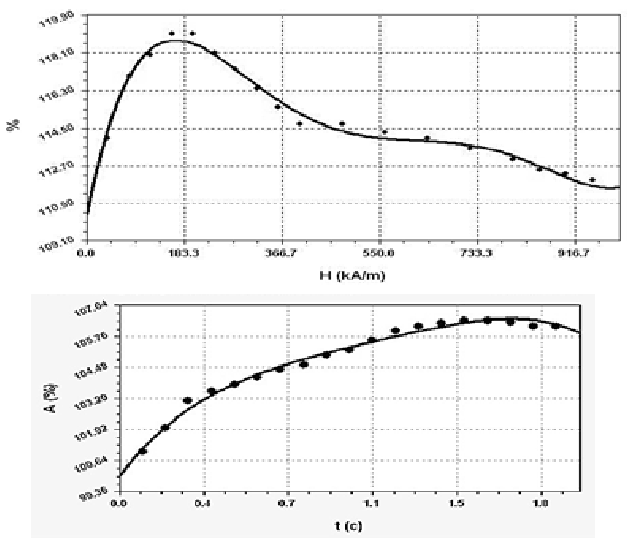


Рис. 1. Реализации зависимостей качественных показателей от параметров магнитной обработки углеродного топлива

Содержание работы. Исходя из результатов экспериментальных исследований, функцию цели формируем на координатах напряженности магнитного поля и времени обработки топлива. Так как, как показано в третьем разделе, зависимости эффективности топлива от магнитной обработки определяется многими причинами и можно только рассматривать реализации этих зависимостей. Для моделирования использованы две реализации рис. 1.

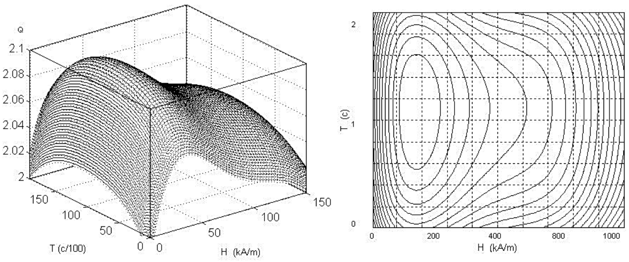


Рис. 2. Использованная при моделировании функция цели и картина её линий равного уровня

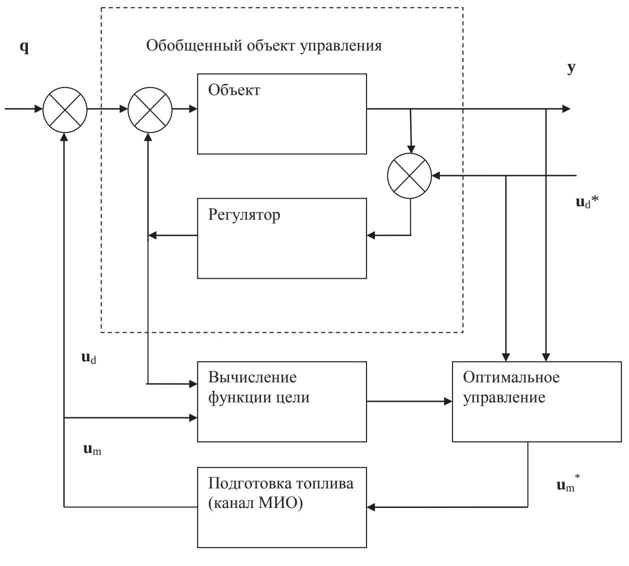


Рис. 3. Структурная схема системы оптимального управления по каналу магнитной подготовки топлива

На основе данных реализаций построены регрессионные модели

$$G(t) = 100.02 + 12.5 \cdot t^2 - 13.2 \cdot t + 7.28 \cdot t^3 - 1.831 \cdot t^4;$$
$$Q(H) = 110.4 + 0.13 \cdot H - 0.65 \cdot 10^{-4} \cdot H^2 + 1.32 \cdot 10^{-6} \cdot H^3 - 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot H^4 \quad (1)$$

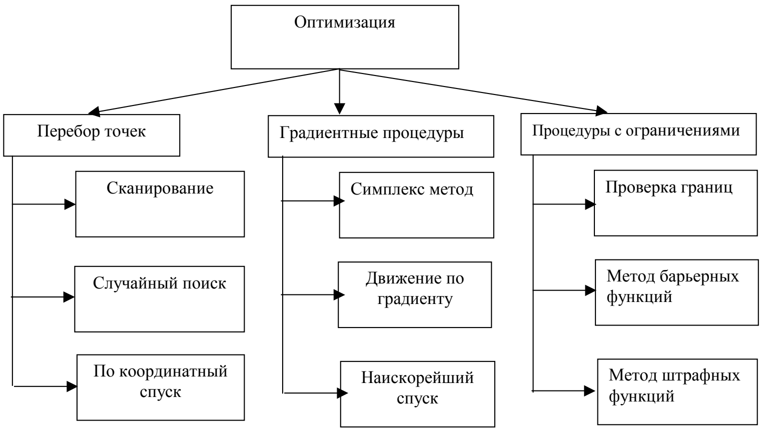


Рис. 4. Методы построения процедуры оптимизации

Исходя из аддитивности влияний воздействий на качественные характеристики топлива, функцию цели формируем как сумму

$$f(t,H)=G(t)+Q(H) \qquad (2)$$

На рис. 2. приведен вид использованной при моделировании функции цели.

Характер линий равного уровня подчеркивает унимодальность [1] и достаточную уплощенность области максимума.

Предположение о унимодальности функции цели позволяет поставить простую задачу экстремального управления

$$\mathbf{u}=\begin{bmatrix} t \\ H \end{bmatrix}; \qquad t\in(0,t_{\max}); \qquad H\in(0,H_{\max});$$

$$f(t,H)=G(t)+Q(H); \qquad \begin{matrix} u_m(1)_{\min}<u_m(1)<u_m(1)_{\max}; \\ u_m(2)_{\min}<u_m(2)<u_m(2)_{\max}; \end{matrix} \qquad (4.9)$$

$$\mathbf{u}^*\to\max f \quad .$$

Структурная схема системы, в этом случае имеет вид, рис. 3.

Следовательно, для достижения наибольшей эффективности использования топлива необходимо использование оптимальной в смысле минимума критерия f системы управления. Особенностью данной системы является априорная не стационарность вида функции цели и объекта управления и воздействие случайных возмущений, определенных недостаточной точностью измерения, что требует тщательного выбора метода построения алгоритма оптимального управления

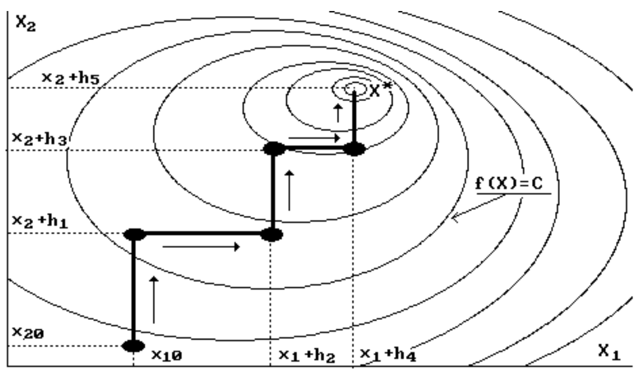


Рис. 5. Метод покоординатного спуска

Методы решения данной задачи можно классифицировать по методу определения направления движения к оптимуму. Укрупненная классификация методов построения оптимизационной процедуры [1, 2, 3] приведена на рисунке 4.

Использование алгоритма сканирования позволяет построить функции цели. Таким образом при поиске оптимального режима выполняются движения по направлению требуемого характера изменения функции цели, рис. 5.

Полученная точка оптимума (x_{10}, x^*_2) либо доставляет оптимум исходной функции цели, если случайно взято $x_{10} = x^*$, либо может быть взята как начальная точка для следующего шага процедуры: $x_{20} = x^*_2 = const$, $f(x_1 + x_{10}, x_{20}) = f_{20}(x_1)$. В дальнейшем процедура повторяется до достижения точки оптимума. Критерием достижения оптимума, в данном случае служит «зацикливание», то есть движение к точке оптимума прекращается и на каждом последующем шаге процедуры наблюдается изменение направления.

Таким образом, данная процедура опирается на свойство выпуклости сечений выпуклой функции и при выполнении данного условия достаточно эффективна. Скорость сходимости (число шагов необходимое для достижения оптимума), в данном случае зависит от выбора начальной точки и при строгой выпуклости не превосходит Nmax:

$$N\le N\max=\mathrm{int}[(x^*_1-x_{01})/h]+\mathrm{int}[(x^*_2-x_{02})/h]$$

где h – шаг движения.

Вторым эффективным методом построения оптимизационной процедуры является градиентный метод.

Так как вектор градиента функции цели всегда направлен в сторону наибольшего возрастания функции цели легко получить процедуру поиска оптимума, для движения к максимуму – идем по направлению градиента:

$$x_{i+1}=x_i+\nabla f_{xi}(x).$$

Для координат:

$$x_{j,i+1}=x_{j,i}+\left.\frac{\partial f(x)}{\partial x_j}\right|_{x_{j,i}}; \qquad j=1,\dots,n$$

При движении к минимуму идем по антиградиенту:

$$x_{j,i+1}=x_{j,i}-\left.\frac{\partial f(x)}{\partial x_j}\right|_{x_{j,i}}; \qquad j=1,\dots,n$$

На рисунке 2 приведена иллюстрация градиентного метода.

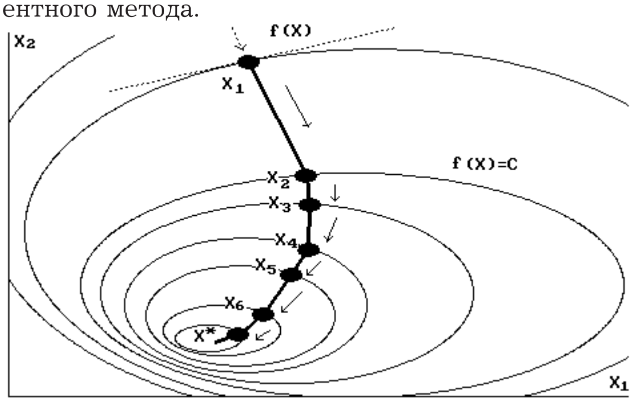


Рис. 6. Градиентный метод

Однако шаг движения в данном случае не постоянен и процедура плохо сходится из-за «разгона» на участках с большой скоростью изменения функции цели. Существует множество методов нормирования шага в градиентной процедуре, простейший это нормирование на модуль градиента, что дает движение с единичным, или взвешенным на постоянный коэффициент h, шагом:

$$\mathrm{x}_{i+1} = \mathrm{x}_i + h\frac{\nabla f_{xi}(\mathrm{x}).}{|\nabla f_{xi}(\mathrm{x}).|}.$$

Сходимость градиентного метода зависит от характера функции цели и при строгой выпуклости выше чем при использовании метода покоординатного спуска.

Признаком завершения процедуры может служить стремление модуля градиента к нулю или «зацикливание».

Однако, не смотря на простоту алгоритмов, рассматриваемые процедуры чувствительны к возмущениям, особенно в окрестности оптимума.

Однако при наличии ошибок измерения, которые оцениваются как случайный процесс, изменяющий своё значение при каждом такте измерения, а следовательно спектральная характеристика которого сдвинута в область высоких частот, возникает ошибка оценки градиента

$$grad f(\mathbf{x}) = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix}. \qquad (3.21)$$

При этом компонента вектора градиента оценивается со значительной ошибкой вызванной наличием шума ξ

$$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i} \approx \frac{f(\mathbf{x}_{i-1} + \Delta\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_{i-1})}{|\Delta\mathbf{x}_i|} + \frac{\xi_i - \xi_{i-1}}{|\Delta\mathbf{x}_i|}. \qquad (3.21)$$

И если стремление к нулю шага Δx обеспечивает уменьшение разности между отсчетами функции и стремление оценки градиента к его точному значению, то одновременно резко возрастает влияние ошибок измерения. Данное свойство градиентных процедур переносится на все методы с малым шагом по координатам. Уменьшить влияние шумов возможно за счет накопления информации, но это только снижает влияние шума.

С другой стороны для больших Δx разность в отсчетах функции возрастает, а значение шума не изменяется, что позволяет снизить влияние ошибок измерения на определение траектории движения к оптимуму.

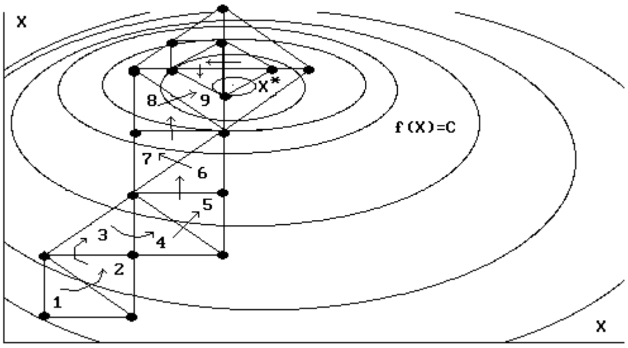


Рис. 7. Симплекс метод

Достаточно простой и эффективный метод поиска оптимума можно получить используя процедуру определения направления движения к оптимуму при сниженных требованиях к точности определения направления. На рис. 7 приведена иллюстрация данного подхода.

На первом шаге сформируем в пространстве X для начальной точки (x_1, x_2) «симплекс»:

$$\left.\begin{matrix}(x_1, x_2) \\ (x_1 + h, x_2) \\ (x_1, x_2 + h)\end{matrix}\right\},$$

и найдем максимальное значение функции цели в узлах симплекса, предположим это точка (x_1, x_2). Повернем «симплекс» в направлении убывания функции цели вокруг оси (x_1 + h, x_2), (x_1, x_2 + h) и получим новый «симплекс»:

$$\left.\begin{matrix}(x_1 + h, x_2 + h) \\ (x_1 + h, x_2) \\ (x_1, x_2 + h)\end{matrix}\right\},$$

что дает новый исходный симплекс и можно повторить всю процедуру.

Признаком завершения процедуры является «зацикливание симплекса». При обнаружении зацикливания, в случае если точность определения координат оптимума недостаточна необходимо уменьшить h.

Симплекс метод обеспечивает не только высокую скорость сходимости но и очень экономичен с точки зрения вычислений, а главное позволяет получать информацию достаточную для построения регрессионных моделей, что определяет его чувствительность по отношению к глобальности оптимума.

Для получения более простой и эффективной процедуры рассмотрим максимальную размерность симплекса когда количество точек в плане равно размерности факторного пространства. В этом случае исходные размеры симплекса велики, что позволяет надеяться на чувствительность к глобальности оптимума и резкое подавление влияния ошибок измерения.

Так как разрабатывается конкретное приложение используем процедуру с конечным и фиксированным числом шагов и сжатием симплекса, рис. 8.

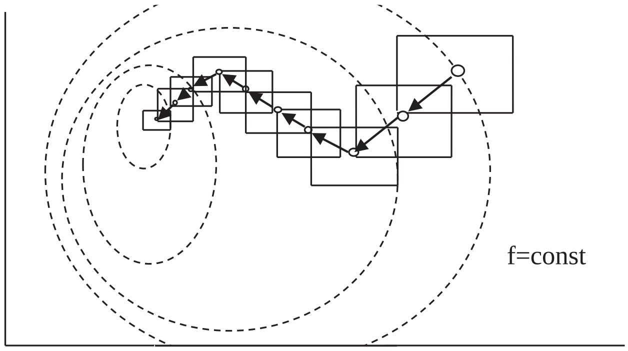


Рис. 8. Траектория движения к оптимуму при использовании модификации симплекс метода

Предлагаемая процедура теоретически менее чувствительна к шумам и обладает высокой скоростью сходимости. С целью обоснования выбора метода построения процедуры поиска экстремума в системе содержащей динамический объект, проведено моделирование системы в среде Simulink.

Вычисление оценки градиента выполняется по модели измерением функции цели в двух точках, рис. 9.

При моделировании введено случайное возмущение в цепи измерения функции цели, рис. 10. Как показали результаты моделировании даже при незначительных возмущениях и достаточно большом шаге, 0.1 диапазона измерения, градиентная процедура теряет сходимость.

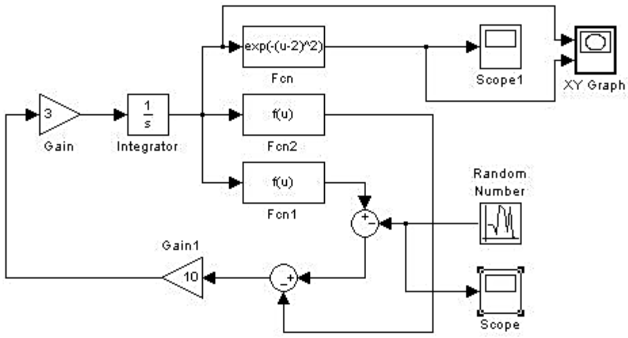
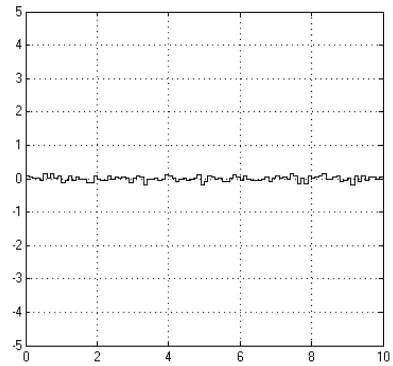
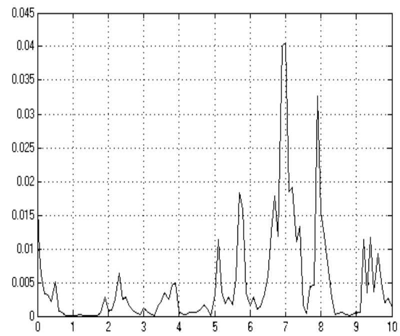


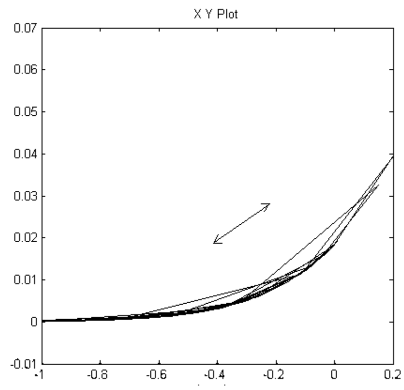
Рис. 9. Схема моделирования градиентной процедуры поиска максимума



1. Возмущения



2. Функция цели



3. Траектория

Рис. 10. Потеря сходимости градиентной процедурой при наличии шумов

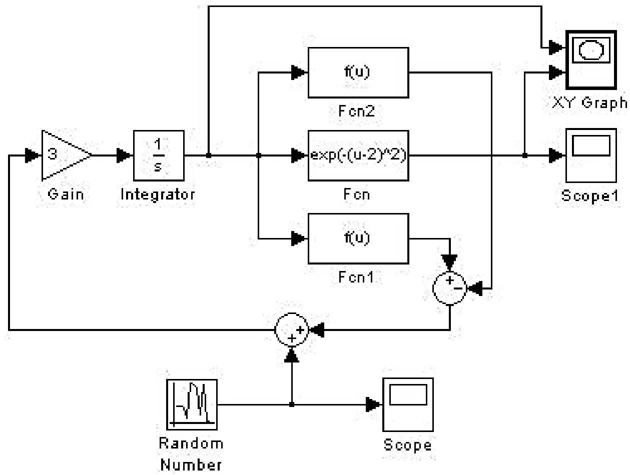
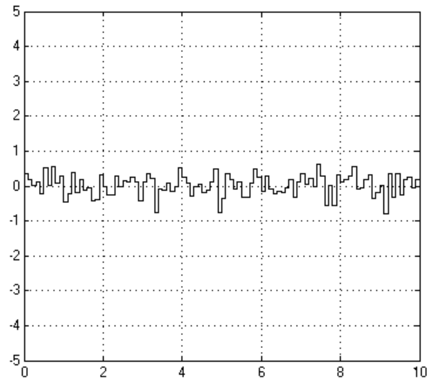
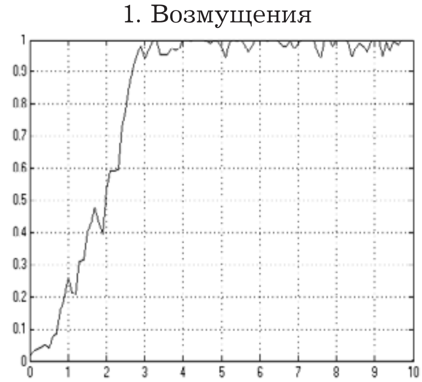


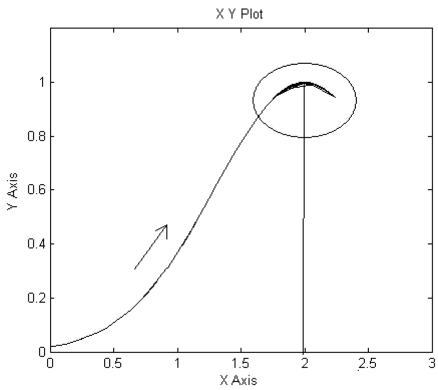
Рис. 11. Схема моделирования процедуры модифицированного симплекс метода



1. Возмущения



2. Функция цели



3. Траектория

Рис. 12. Результаты моделирования процедуры модифицированного симплекс метода

Таким образом использование градиентной процедуры, в контуре оптимизации режима, вызывает сомнения.

Для проверки выдвинутой ранее гипотезы о высокой устойчивости к помехам предложенной модификации симплекс метода проведено моделирование. Схема модели приведена на рис. 11.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 12 подтверждают выдвинутое предположение.

Действительно процедура основанная на модифицированном симплекс методе сохраняет сходимость при гораздо более значительных ошибках измерения, чем градиентная процедура.

Для уточнения результата построена модель процедур с использованием метода Рунге-Кутта первого порядка в среде MATLAB, что наилучшим образом отражает особенности использования процедуры.

На рис. 13 показана траектория движения системы из точки (0 0) в область максимума при использовании градиентной процедуры поиска максимума, при отсутствии ошибок измерения .

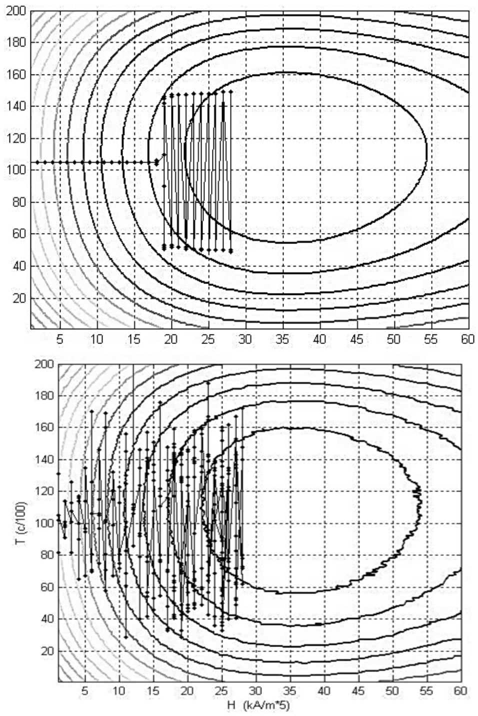


Рис. 13. Траектория градиентной процедуры без и при наличии возмущений

Причина резкого ухудшения сходимости заключается в обострении верхних частот, в которых сосредоточен спектр возмущений, при вычислении производных. Получение более гладкой траектории движения системы к точке оптимума достигается уменьшением шага процедуры. Однако при этом резко возрастает время необходимое системе для выхода на оптимальный режим, что затрудняет использование метода в задачах с малыми градиентами функции цели при наличии ошибок измерений и возмущениях объекта.

С другой стороны, как видно из рис. 13, в начале траектории система движется вдоль направлений основных координат. Данная особенность вызвана видом функции цели и началом движения из точки 0, 0. Учитывая данную особенность целесообразно использование метода покоординатного подъема, позволяющего в данном случае, использовать большие шаги и не требующий точных измерений, так как отсутствует процедура оценки градиента функции цели.

На рис. 14 приведена траектория движения системы при использовании метода покоординатного подъема при отсутствии и наличии ошибок измерения.

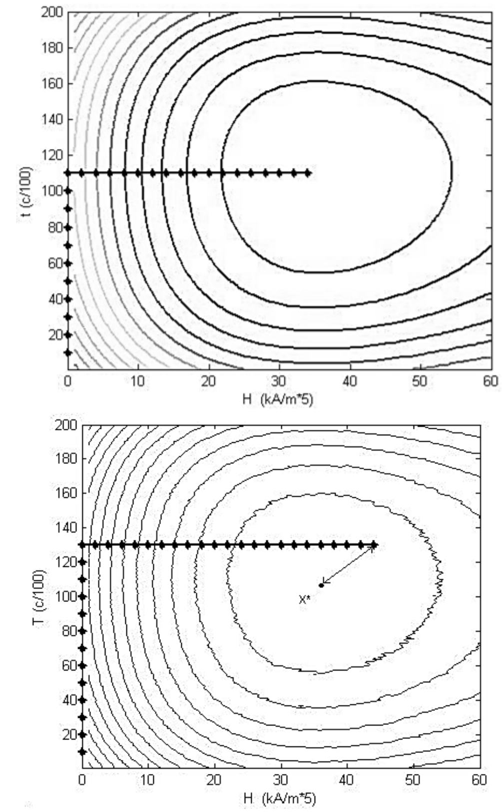
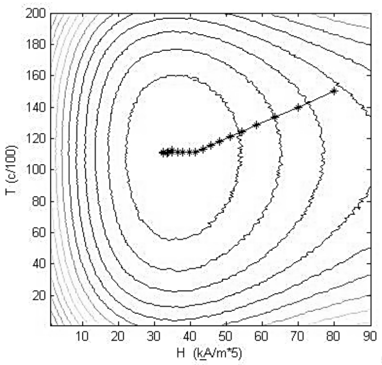


Рис. 14. Влияние ошибок измерений на процедуру покоординатного подъема

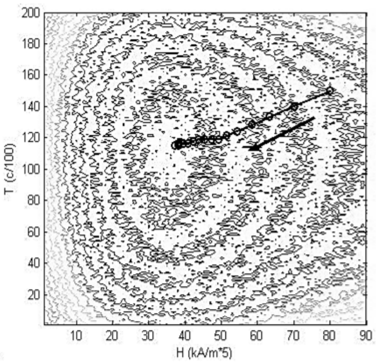
Действительно метод позволяет улучшить сходимость системы и сократить количество шагов в траектории движения, что, в данном случае, делает данную процедуру более выгодной для использования. Причем существенно, что система ориентирована на микропроцессорную реализацию работающую в реальном масштабе времени, что делает желательным использование алгоритмов структурно позволяющих получить высокую производительность системы.

Существенной особенностью предложенного метода является его высокая устойчивость по отношению к ошибкам измерения и шумам. На рис. 15 показана траектория движения при однопроцентном диапазоне ошибки и при ошибке измерения достигающей десяти процентов.

Таким образом применение модифицированной симплекс процедуры не только упрощает программное обеспечение, но и резко повышает скорость сходимости. Так для градиентной процедуры для достижения окрестности точки оптимума потребовалось 50 шагов, для покоординатного подъема 27 шагов, то для симплекс метода достаточно 20 шагов процедуры. Но главным преимуществом метода является высокая помехоустойчивость. Так ни градиентная процедура ни покоординат-



Ошибка измерения один процент



Ошибка измерения десять процентов

Рис. 15. Траектории движения к оптимуму при использовании модифицированного симплекс метода

ный подъем не работоспособны уже при ошибке измерения в пределах процента, в то время как симплекс сохраняет сходимость и при десяти процентных ошибках. Данное свойство симплекс процедуры основано на значительном охвате факторного пространства и сопровождается тенденцией к движению к глобальному оптимуму.

Выводы: – стремление повысить точность определения координат экстремума за счет уменьшения шага траектории, при наличии ошибок измерения, вызывает потерю сходимости процедуры;

– использование предложенной процедуры модифицированного симплекс метода обладает значительно большей устойчивостью к ошибкам измерения чем классические процедуры;

– в задаче экстремального управления магнитной обработкой топлива возможно использование процедуры с фиксированным количеством шагов.

Список литературы:

1. Пантелеев А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. Пособие / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – М.: Высш. шк., 2002. – 544 с.
2. Лутманов С. В. Курс лекций по методам оптимизации / С. В. Лутманов. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 368 с.
3. Алексеев В. М. Оптимальное управление / В. М. Алексеев, В. М. Тихомиров, С. В. Фомин. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. – 1979. – 432 с.

Ходаковський О.В.
Херсонська державна морська академія

ЕКСТРЕМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА

Анотація
Робота присвячена розробці процедури пошуку оптимуму функції мети в умовах дії значних шумів, викликаних недостатньою точністю вимірювань. Показано, що процедури з малим кроком, в даному випадку, мають поганий збіжністю і прагнення підвищити точність за рахунок зменшення кроку і усереднення не призводять до позитивного результату. Запропоновано використання модифікованого симплекс методу. Показано, що, застосування модифікованої симплекс-процедури не лише спрощує програмне забезпечення, а й різко підвищує швидкість збіжності. Головною перевагою методу є висока завадостійкість. Так ні градієнтна процедура, ні покоординатно підйом не працездатні вже при помилці виміру в межах відсотка, у той час як симплекс зберігає збіжність і при десятипроцентній помилках. Дана властивість симплекс-процедури засноване на значній охопленні факторного простору і супроводжується тенденцією до руху до глобального оптимуму.
Ключові слова: екстремальне управління, симплекс-процедура, магнітна обробка палива, модифікований симплекс метод.

Khodakovskiy A.V.
Kherson State Maritime Academy

EXTREME CONTROL SYSTEM OF MAGNETIC FUEL TREATMENT

Summary
The work is dedicated to the development of treatments for global optimization objective function under conditions of significant noise caused by inadequate measurement accuracy. It was shown that the procedure with a small pitch, in this case, have a poor convergence and the desire to increase accuracy by decreasing the averaging step and do not lead to positive results. Proposed use of the modified simplex method. It is shown that the use of a modified simplex procedure not only simplifies the software, but also dramatically increases the rate of convergence. The main advantage of this method is high noise immunity. So no gradient procedure nor coordinatewise recovery is operable even when measurement error within a percent, while the simplex preserves convergence and ten percent error. This property simplex procedure is based on the considerable coverage factor space and is accompanied by a tendency to move to the global optimum.
Keywords: extreme control, simplex procedure, magnetic fuel treatment, the modified simplex method.