МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 517

Ю.В. Бугаев

Бугаев Юрий Владимирович родился в 1952 г., окончил в 1975 г. Воронежский государственный университет, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования технологических систем Воронежской государственной технологической академии. Имеет более 30 научных работ, посвященных математическому моделированию технологических процессов глубокой переработки древесины, а также фундаментальным исследованиям в области векторной оптимизации и принятия решения.

РЕГРЕССИОННЫЙ МЕТОД ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предложен метод понижения размерности задачи многокритериальной оптимизации с помощью исключения критериев, представляющих собой выпуклую комбинацию остальных; эффективность метода продемонстрирована на примере оптимизации процесса прессования древесностружечных плит.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, множество Парето, уравнение регрессии, технологический процесс.

Функционирование любого сложного технологического процесса определяется большим числом показателей. Как правило, его качество не может полностью характеризоваться каким-либо одним критерием. Иными словами, при оптимизации технологического режима исследователь имеет дело с векторной задачей оптимизации вида

$$y_i(x) \to \text{opt},\ i = 1,\ldots,m;\ \ x \in D \subseteq E^n, \qquad (1)$$

где x – вектор входных параметров;

m – число критериев качества;

D – область допустимых значений x;

E^n – n-мерное пространство.

В настоящее время наибольшее распространение получила двухэтапная [9] схема решения задачи (1). На первом этапе с помощью формальных алгоритмов строят набор неулучшаемых точек (обычно Парето-оптимальных), из которых с помощью неформальных процедур с использованием экспертной информации находят оптимальный вариант.

Иногда применяют трехэтапный подход [5]. В этом случае на втором этапе находят не одну, а несколько (3 – 4) достаточно хороших и разнообразных альтернатив, которые поступают в распоряжение лица, принимающего решение. Из них с помощью детального анализа каждого варианта формируют окончательный выбор. К такой схеме прибегают тогда, когда принятие решения требует какой-либо дополнительной информации, например проведение добавочных экспериментов или применение более точных методов исследования.

Основная сложность второго этапа заключается в большой размерности решаемой задачи. Число критериев может достигать десятка и более, а построенный набор Парето-оптимальных точек – сотен и тысяч. Психологические эксперименты, описанные в [5–6], показывают, что человек при сравнении многомерных векторов не может работать со слишком большими размерностями и часть показателей просто не учитывает.

Анализ литературы, посвященной оптимизации процессов различных отраслей лесного комплекса (лесное хозяйство, лесная и деревообрабатывающая промышленность), показывает, что многие авторы применяют многокритериальный подход (например [1, 3, 4, 7, 8, 10]). Часто для решения проблемы многокритериального выбора они используют метод аддитивной или иной свертки. Суть метода сводится к оптимизации скалярной функции, например вида

$$F(x) = \sum_{j=1}^{m} \lambda_j y_j(x) \to \mathrm{opt}, \qquad (2)$$

где весовым коэффициентам λ_j задаются значения, которые, по мнению исследователя, адекватно отражают значимость каждого критерия и его вклад в общую полезность альтернативы.

Можно отметить, как минимум, три ошибки, которые при этом совершаются. Первые две весьма очевидны. Во-первых, известная теорема С. Карлина [2] утверждает, что оптимизация свертки (2) позволяет получить эффективную точку только для задачи выпуклого программирования, т. е. в общем случае нет никаких гарантий, что точка экстремума функции (2) будет не только лучшей, но даже эффективной по Парето.

Во-вторых, при задании значений λ_j необходимо учитывать масштабы критериев, поскольку каждый из них обычно имеет собственную единицу измерения и собственный диапазон изменения, и критерий, имеющий превосходящее численное значение, станет определяющим в формуле (2), влияние же остальных критериев не будет ощутимо.

Третья ошибка проистекает из невозможности детально проанализировать геометрию множества Парето в пространстве критериев. Назначая какие-либо значения λ_j, исследователь полагает, что указанные им соотношения между весами каким-то образом перенесутся на соответствующие значения критериев в найденной оптимальной точке. Например, если положить $\lambda_1 = 1/3$; $\lambda_2 = 2/3$, то ожидается, что найденное значение критерия $y_2(x)$ будет в два раза ближе к своему оптимальному значению, чем $y_1(x)$. На самом деле, результат такого действия обычно непредсказуем и иногда парадоксален.

В подтверждение этого рассмотрим пример. Пусть имеем следующую двухкритериальную задачу:

$$y_1 = x_1 \to \max;$$
$$y_2 = x_2 \to \max$$

при ограничениях

$$\begin{gathered} x_1 \geq 0; \quad x_2 \geq 0; \\ (x_1 + 10)^2 + (x_2 + 10)^2 \leq 221. \end{gathered} \tag{3}$$

В этом примере соблюдаются как условия выпуклости, так и равного масштаба: $0 \leq y_i \leq 1,\ i = 1,2$.

Положим $\lambda_1 = 19/40$; $\lambda_2 = 21/40$, ожидая, что в найденной оптимальной точке оба критерия будут удовлетворены примерно в равной степени. Однако, как несложно убедиться, максимум функции

$$F(x) = \frac{19}{40} x_1 + \frac{21}{40} x_2$$

при ограничениях (3) достигается при значениях $x_1 = 0$; $x_2 = 1$, которые соответствуют максимуму второго критерия, первый критерий вообще проигнорирован. Использование, например, $\lambda_1 = 21/40$; $\lambda_2 = 19/40$ дает противоположную точку $x_1 = 1$; $x_2 = 0$, в которой достигается максимум $y_1(x)$.

Данный пример, несмотря на явную искусственность, отнюдь не является исключением из правил. Дело в том, что в правильно поставленной задаче условной оптимизации экстремум достигается, как правило, на границе области D допустимых решений. А если два критерия действительно конфликтуют между собой, то их оптимальные точки находятся на достаточном удалении друг от друга. Именно эти точки устойчивы по отношению к варьированию коэффициентов λ_j.

Чтобы получить оптимальную точку где-то посредине между ними, значения λ надо задавать очень точно. Однако эти значения весьма приближенно будут отражать представления исследователя о значимости каждого критерия.

Высказанные замечания относятся не только к случаю применения функции (2). Можно привести примеры неудачного выбора весов и при использовании других популярных сверток:

мультипликативной

$$F(x) = \prod_{j=1}^{m} \left[y_j(x) \right]^{\lambda_j},$$

логической

$$F(x) = \min_j \lambda_j y_j(x).$$

Таким образом, необходимы специальные методы исследования наборов эффективных альтернатив с целью понижения размерности их описания до уровня, доступного экспертному анализу. Результатом явится комплекс реально конфликтующих критериев, т.е. такая их группа, в которой улучшение любого из них с неизбежностью приводит к ухудшению других. Исследования в этой области [12] показывают, что между критериями качества любой функционирующей системы возможны взаимодействия различного типа, причем конфликт не является обязательным явлением.

За основу предлагаемого метода возьмем две известные теоремы [9], согласно которым:

всякое решение, слабо-эффективное (эффективное по Слейтеру) на сокращенном наборе критериев, является слабо-эффективным и на полном наборе;

если какой-либо критерий является выпуклой комбинацией остальных, то его можно отбросить (при условии, что все критерии надо минимизировать или максимизировать).

Таким образом, предстоит выяснить существование выпуклых зависимостей каких-либо критериев от остальных, т.е. зависимостей вида

$$y_k(x) = \beta + \sum_{i \neq k} \alpha_i y_i(x); \quad \alpha_i \geq 0, \tag{4}$$

на множестве слабо-эффективных решений. Важно отметить, что подобная зависимость может не наблюдаться на всем множестве D [9]. Эту задачу можно с успехом решить средствами регрессионного анализа. После этого можно отбросить зависимые критерии и решать задачу принятия решений на сокращенном наборе целевых функций. Продемонстрируем этот метод на следующем примере.

Технологический режим процесса прессования древесностружечных плит определяют значениями двух входных параметров: x_1 – влажность осмоленной стружки, %; x_2 – параметр скорости сжатия, мин/мм. Имеется шесть показателей качества полученного изделия: y_1, y_2 – пределы прочности плит при статическом изгибе и растяжении, МПа; y_3 – количество токсинов, мг; y_4 – степень разбухания, %; y_5 – стоимость, руб./м^2; y_6 – атмосферная стойкость, усл.ед. В результате исследований, проведенных на кафедрах механической технологии древесины и автоматизации производственных процессов Воронежской ГЛТА [8], найдены регрессионные уравнения, связывающие значение каждого показателя с параметрами x_1 и x_2:

$$
\begin{aligned}
&y_1 = -36{,}5967 + 4{,}6714x_1 + 90{,}1706x_2 - 0{,}1057x_1^2 - 61{,}3329x_2^2 - \\
&\qquad - 1{,}9048x_1x_2 \to \max; \\
&y_2 = -1{,}7303 + 0{,}1209x_1 + 4{,}5836x_2 - 0{,}0023x_1^2 - 4{,}1729x_2^2 - \\
&\qquad - 0{,}0476x_1x_2 \to \max; \\
&y_3 = 13{,}8849 - 0{,}3380x_1 - 5{,}0621x_2 + 0{,}0094x_1^2 - 4{,}1729x_2^2 - \\
&\qquad - 0{,}4762x_1x_2 \to \min; \qquad (5) \\
&y_4 = 30{,}7117 - 3{,}4884x_1 + 172{,}3569x_2 + 0{,}1729x_1^2 - 183{,}9715x_2^2 - \\
&\qquad - 5{,}0000x_1x_2 \to \min; \\
&y_5 = -348{,}0898 + 18{,}0227x_1 + 2081{,}7143x_2 - 0{,}3306x_1^2 - 1985{,}7800x_2^2 + \\
&\qquad + 41{,}4286x_1x_2 \to \min; \\
&y_6 = -23{,}8373 + 0{,}5352x_1 + 70{,}8052x_2 - 0{,}0270x_1^2 - 143{,}4075x_2^2 + \\
&\qquad + 5{,}0000x_1x_2 \to \max.
\end{aligned}
$$

При поиске оптимального технологического режима были наложены следующие ограничения:

$$11 \le x_1 \le 17; \quad 0{,}36 \le x_2 \le 0{,}50;$$

$$y_1(x) \ge 22; \quad y_2(x) \ge 0{,}4; \quad y_3(x) \le 10; \quad y_4(x) \le 22.$$

При таком большом количестве критериев процедура поиска оптимального варианта весьма сложна. Поэтому применим метод понижения размерности. Прежде всего, необходимо получить достаточно большой набор слабо-эффективных решений (или близких к ним), чтобы можно было выявить существование зависимости (4). Это легко сделать с помощью метода построения ЛПτ-последовательности [11]. В результате при N = 16384 пробных точках было получено 164 эффективных решения, область которых на множестве D входных параметров приближенно может быть определена условием

$$0{,}5482(x_1 - 15{,}5000) + 83{,}2055(x_2 - 0{,}4839) \ge 0,$$

а значения критериев укладываются в следующие границы:

$$23{,}81 \le y_1(x) \le 25{,}88; \quad 0{,}4000 \le y_2(x) \le 0{,}5128; \quad 5{,}933 \le y_3(x) \le 7{,}256;$$

$$19{,}06 \le y_4(x) \le 22{,}00; \quad 649{,}5 \le y_5(x) \le 759{,}3; \quad 11{,}04 \le y_6(x) \le 19{,}52.$$

На полученном наборе, после переориентации всех критериев на минимум, с помощью стандартной программы регрессионного анализа было проверено наличие зависимости (4). Установлено, что критерии y_1, y_2 , y_4 связаны такой зависимостью с y_3, y_5 , y_6, т. е. можно отбросить y_1, y_2 , y_4 и делать выбор посредством оставшихся целевых функций.

Было решено, что критерий стоимости y_5 менее важен, чем два других. Поэтому был проведен поиск достаточно различающихся точек, в которых относительные величины y_3 и y_6 составляют соответственно не более 0,4 и не менее 0,6 от своего полного диапазона варьирования. Это означает,

Номер по порядку	x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
1	15,45	0,5000	25,38	0,4694	6,317	19,65	715,8	16,17
2	15,90	0,5000	25,57	0,4807	6,406	19,40	728,6	17,15
3	16,43	0,5000	25,73	0,4927	6,512	19,18	743,5	18,30

что в натуральных единицах отобранные точки должны удовлетворять ограничениям

$$6{,}52 \geq y_3(x); \qquad 16{,}14 \leq y_6(x).$$

Найденный набор состоит из трех альтернатив, приведенных в таблице.

Выбор оптимального режима потребует (для повышения достоверности и точности) проведения дополнительных экспериментов вблизи отобранных точек, поскольку результат был получен на основе уравнений (5), имеющих определенную погрешность, но это выходит за рамки данной статьи.

Вывод

Предложенный метод успешно решает проблему понижения размерности задачи многокритериальной оптимизации при большом числе критериев и может быть рекомендован для поиска компромиссных решений при оптимизации процессов в отраслях лесного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гудков А.Ю.* Оптимизация раскряжевки хлыстов при лесозаготовках в малолесных районах: дисс. … канд. техн. наук / А.Ю. Гудков. – Воронеж, 2003.
2. *Карлин С.* Математические методы в теории игр, программировании и экономике / С. Карлин. – М.: Мир, 1964.
3. *Князев А.В.* Обоснование параметров и разработка конструкции многоступенчатого вальцового сепаратора для сортировки семян: дисс. … канд. техн. наук / А.В. Князев. – Воронеж, 2001.
4. *Кочегаров А.В.* Обоснование конструкции и параметров бункера-дозатора решетной установки: дисс….канд. техн. наук / А.В. Кочегаров. – Воронеж, 2002.
5. *Ларичев О.И.* Наука и искусство принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: наука, 1979.
6. *Ларичев О.И.* Проблемы выявления предпочтений лиц, принимающих решение при бинарной оценке альтернатив и двоичных оценок на шкале критериев / О.И. Ларичев [и др.] // Тр. ВНИИСИ. – 1978. – Вып. 5.
7. *Лихачева Л.Б.* Прессование древесины вдоль волокон при изготовлении торцевого щитового паркета: дисс….канд. техн. наук / Л.Б. Лихачева. – Воронеж, 2001.
8. *Платонов А.Д.* Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация технологии горячего прессования древесностружечных плит: дисс. … канд. техн. наук / А.Д. Платонов. – Воронеж, 1996.
9. *Подиновский В.В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: наука, 1982.

10. *Сафонов А.О.* Разработка теории и метода энергосберегающей автоматизированной технологии сушки древесных частиц в барабанных агрегатах: дисс. … докт. техн. наук / А.О. Сафонов. – Воронеж, 2003.

11. *Соболь И.М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболь, Р.В. Статников. – М.: наука, 1981.

12. *Сысоев В.В.* Конфликт. Сотрудничество. Независимость. Системное взаимодействие в структурно-параметрическом представлении / В.В. Сысоев. – М.: Моск. академия экономики и права, 1999.

Воронежская государственная
технологическая академия

Поступила 15.07.04

Yu.V. Bugaev

Regression Method of Decision Making Support in Technological Processes Optimization

Method of reducing dimension of multicriterion optimization problem using criteria exclusion represented by convex combination of other criteria is offered. The method efficiency is demonstrated based on the example of optimization process of wood chipboard pressing.