

Использование метода попарных сопоставлений при оптимизации работы машины шоковой заморозки сельхозпродуктов

АМБАРЦУМОВА Т.Т., ГРИБОВ Д.И., КОПЫЛОВ С.И

Принцип шоковой заморозки продуктов известен давно. В представленной работе с учетом особенностей замораживаемого продукта вырабатываются рекомендации по снижению энергозатрат и повышению надежности оборудования машин шоковой заморозки. Задача формулируется следующим образом: имеется ряд вариантов объекта (или моделей объекта) с набором критериев. Причем критерии, как правило, «противоречивые» (улучшение одного из них может привести к ухудшению других). Требуется на основе данной информации выбрать ранжированный ряд объектов (моделей). Предложенный алгоритм может быть использован как для самостоятельной оценки оптимального варианта, так и в качестве вспомогательного к другим оптимизационным методам.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энергопотребление, шоковая заморозка продуктов, попарные соответствия, матрица смежности

Суть метода попарных сопоставлений заключается в формировании таблицы, содержащей в верхней строке и верхнем столбце наилучший вариант. На пересечении строки и столбца фиксируется номер варианта, который оказывается наиболее важным при попарном сопоставлении. Рассмотрим реализацию данного метода на примере проектных решений машины шоковой заморозки (МШЗ) [1] с четырьмя критериями: время замораживания продукта, мощность вентиляторов, суммарное энергопотребление компрессоров, суммарное потребление энергии электродвигателей, компрессоров и вентиляторов. В рассматриваемом примере — семь вариантов. Обычно это различные виды сельхозпродукции. Кроме того, сравниваются сами вышеуказанные критерии по значимости, которая зависит от задачи проектирования. Например, в одном случае главный критерий — время замораживания продукта, в другом — суммарное энергопотребление электродвигателей, компрессоров и вентиляторов. [2, 3].

Итак, обозначим семь вариантов через $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$. Сопоставим все варианты по первому критерию. При этом $x_1 < x_2$ означает, что вариант x_1 хуже варианта x_2 и т.д. Сравнение всех возможных вариантов приведено в табл. 1.

Таблица 1

$x_1 < x_2$	$x_2 < x_3$	$x_3 > x_4$	$x_4 > x_5$	$x_5 < x_6$	$x_6 = x_7$
$x_1 < x_3$	$x_2 = x_4$	$x_3 > x_5$	$x_4 < x_6$	$x_5 < x_7$	—
$x_1 < x_4$	$x_2 > x_5$	$x_3 < x_6$	$x_4 < x_7$	—	—
$x_1 > x_5$	$x_2 < x_6$	$x_3 < x_7$	—	—	—
$x_1 < x_6$	$x_2 < x_7$	—	—	—	—
$x_1 < x_7$	—	—	—	—	—

Затем построим матрицу смежности (табл. 2), заменяя знаки $>, =, <$ коэффициентами предпочтения, например 1,5; 1; 0,5, соответственно.

Последние два столбца содержат абсолютные $P_i(1)$ и относительные $P'_i(1)$ приоритеты по первому критерию. Значения $P_i(1)$ определяются посредством суммирования каждого элемента строки матрицы смежности по первому критерию (табл. 2), умноженного на элементы столбца 8. Например, для первой строки $P_1(1) = 1,0 \cdot 5 + 0,5 \cdot 6,5 + 0,5 \cdot 8 + 0,5 \cdot 6,5 + 7,5 \cdot 4,0 + 0,5 \cdot 9,5 + 0,5 \cdot 9,5 = 31$, при этом $P'_i(1)$ определяется по формуле:

$$P'_i(1) = \sum_{i=1}^7 P_i(1).$$

Составим табл. 3 попарных соответствий по второму критерию (мощность вентиляторов).

Затем строим матрицу смежности по второму критерию мощности вентиляторов (табл. 4) предпочтения 1,5; 1; 0,5, (аналогично табл. 2).

Для третьего критерия (суммарное энергопотребление компрессоров) имеем табл. 5 попарного соответствия.

Рассчитываем матрицу смежности по третьему критерию суммарного потребления компрессоров (табл. 6). Табл. 7 — попарные соответствия по четвертому критерию.

Строим матрицу смежности (табл. 8) по четвертому критерию (суммарное потребление энергии электродвигателей, компрессоров и вентиляторов).

Аналогично тому, как были посчитаны приоритеты вариантов, рассчитываем приоритеты критериев. Пусть в данном примере МШЗ первый кри-

Таблица 2

Варианты:	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Сумма по строке	$P_i(1)$	$P'_i(1)$
x_1	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	5	31	0,098
x_2	1,5	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	6,5	40	0,126
x_3	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	0,5	0,5	8,0	50,5	0,160
x_4	1,5	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	6,5	40,5	0,126
x_5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	4,0	26,5	0,084
x_6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	9,5	64,0	0,202
x_7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	9,5	64,0	0,202

Таблица 3

$x_1 = x_2$	$x_2 > x_3$	$x_3 = x_4$	$x_4 = x_5$	$x_5 < x_6$	$x_6 > x_7$
$x_1 > x_3$	$x_2 > x_4$	$x_3 = x_5$	$x_4 < x_6$	$x_5 = x_7$	—
$x_1 > x_4$	$x_2 > x_5$	$x_3 < x_6$	$x_4 = x_7$	—	—
$x_1 > x_5$	$x_2 = x_6$	$x_3 = x_7$	—	—	—
$x_1 = x_6$	$x_2 > x_7$	—	—	—	—
$x_1 > x_7$	—	—	—	—	—

Таблица 4

Варианты:	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Сумма по строке	$P_i(2)$	$P'_i(2)$
x_1	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	9	60	0,187
x_2	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	9	60	0,187
x_3	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	5,5	35,5	0,110
x_4	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	5,5	35,5	0,110
x_5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	5,5	35,5	0,110
x_6	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	9	60	0,187
x_7	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	5,5	35,5	0,110

Таблица 5

$x_1 < x_2$	$x_2 > x_3$	$x_3 < x_4$	$x_4 < x_5$	$x_5 > x_6$	$x_6 < x_7$
$x_1 > x_3$	$x_2 > x_4$	$x_3 < x_5$	$x_4 = x_6$	$x_5 < x_7$	—
$x_1 = x_4$	$x_2 < x_5$	$x_3 < x_6$	$x_4 < x_7$	—	—
$x_1 < x_5$	$x_2 > x_6$	$x_3 < x_7$	—	—	—
$x_1 = x_6$	$x_2 < x_7$	—	—	—	—
$x_1 < x_7$	—	—	—	—	—

Таблица 6

Варианты:	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Сумма по строке	$P_i(3)$	$P'_i(3)$
x_1	1,0	0,5	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	6	38	0,128
x_2	1,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	0,5	8	50,5	0,160
x_3	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	4	24,5	0,083
x_4	1,0	0,5	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	6	38,0	0,128
x_5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	9	60,5	0,204
x_6	1,0	0,5	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	6	38	0,128
x_7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	10	70	0,236

Таблица 7

$x_1 < x_2$	$x_2 > x_3$	$x_3 < x_4$	$x_4 = x_5$	$x_5 > x_6$	$x_6 > x_7$
$x_1 > x_3$	$x_2 = x_4$	$x_3 < x_5$	$x_4 > x_6$	$x_5 > x_7$	—
$x_1 < x_4$	$x_2 = x_5$	$x_3 < x_6$	$x_4 > x_7$	—	—
$x_1 < x_5$	$x_2 > x_6$	$x_3 > x_7$	—	—	—
$x_1 = x_6$	$x_2 > x_7$	—	—	—	—
$x_1 > x_7$	—	—	—	—	—

Таблица 8

Варианты:	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	Сумма по строке	$P_i(4)$	$P'_i(4)$
x_1	1,0	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	6,5	40	0,126
x_2	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	9	60	0,189
x_3	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	5	31	0,098
x_4	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	9	60	0,189
x_5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	9	60	0,189
x_6	1,0	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	6,5	40	0,126
x_7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	4	26,5	0,083

Таблица 9

$k_1 > k_2$	$k_2 > k_3$	$k_3 = k_4$
$k_1 > k_3$	$k_2 > k_4$	—
$k_1 > k_4$	—	—

Таблица 10

Критерий:	k_1	k_2	k_3	k_4	Сумма по строке	β_j	β'_j
k_1	1,0	1,5	1,5	1,5	5,5	21,25	0,357
k_2	0,5	1,0	1,5	1,5	4,5	16,25	0,273
k_3	0,5	0,5	1,0	1,0	3,0	11	0,185
k_4	0,5	0,5	1,0	1,0	3,0	11	0,185

Таблица 11

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Комплексный приоритет	0,133	0,163	0,12	0,134	0,133	0,17	0,161

Таблица 12

Ранг варианта	1	2	3	4	5	6	7
Номер варианта	6	2	7	4	1	5	3

терий — самый значимый, второй критерий — второй по значимости, а третий и четвертый имеют равную значимость. Обозначим критерии через k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , тогда матрица попарных соответствий критериев имеет вид табл. 9.

Как и в случае матрицы смежности вариантов по критерию, построим аналогично матрицу смежности критериев, заменяя знаки $>$, $=$, $<$ коэффициентами предпочтения 1,5; 1,0; 0,5 соответственно. Получим матрицу смежности критериев по значимости в виде табл. 10.

Последние два столбца — абсолютные β_j и относительные β'_j приоритеты критериев. Значение β_j определяется суммированием умножения элемента строки на элемент столбца 5. Например,

$$\beta_1 = 1,0 \cdot 5,5 + 1,5 \cdot 4,5 + 1,5 \cdot 3,0 + 1,5 \cdot 3,0 = 21,25 \quad \text{а относительный приоритет критериев } \beta'_j = \beta_j / \sum_{j=1}^4 \beta_j.$$

Комплексный приоритет каждого варианта определяется по формуле:

$$P_i = \sum_{j=1}^4 \beta_j P'_i(j), \quad (1)$$

где $i=1,2,\dots,7$.

В результате вычислений по этой формуле, получаем табл. 11 комплексных приоритетов.

Например, для первого варианта находим значение комплексного приоритета: $P_1 = 0,357 \cdot 0,098 +$

$+0,273 \cdot 0,187 + 0,185 \cdot 0,128 + 0,185 \cdot 0,126 = 0,133$ и т.д. Ранжируя варианты (чем больше комплексный приоритет, тем лучше), получаем итоговую табл. 12, дающую решение исходной задачи для данного примера.

Используя метод попарных сопоставлений, можно получить дополнительную полезную информацию. Например, в нашем случае имеются две группы, практически равнозначных вариантов: 2, 7 и 4, 1,5 работы МШЗ. С учётом особенностей замораживаемого продукта вариант 6 наиболее подходит для снижения энергозатрат и повышения эксплуатационной надёжности оборудования.

Предложенный в статье алгоритм может быть использован для накопления статического материала различных видов сельхозпродукции и выработке режимов эксплуатации МШЗ с позиции качества продукции и минимизации энергозатрат оборудования. Несмотря на кажущуюся громоздкость метод может быть рекомендован для широкого использования в практике проектирования электромеханических устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бараненко А.В., Куцакова В.Е., Борзенко Е.И., Фролов С.В. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Ч.3. Теплофизические основы — М.: КолосС, 2004, 257 с.

Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 1, pp. 51–54

2. Буянов А.Н., Воробьева Н.Н. Конвейерные морозильные аппараты, Холодильное технологическое оборудование, 2004, с. 54–68.

3. Шварц Д.Т. Интерактивные методы решения задач многокритериальной оптимизации. — Наука и образование. М.: Изд. Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 2013, № 4, с. 245–264.

4. Жилейкин М.Н., Калимулин М.Р., Мирошниченко А.В. Методика выбора оптимального схемного решения в нечётких условиях на основе многокритериального анализа вариантов при равновесных и неравновесных критериях. — Наука и образование. — М.: Изд. Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 2012, № 12, с. 107–117.

[21.08.2017]

А в т о р ы: Амбарцумова Татьяна Трофимовна окончила Московский энергетический институт (МЭИ) в 1963 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Вращающий момент асинхронной машины с учётом вихревых токов» в 1976 г. Доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов МЭИ.

Грибов Дмитрий Игоревич окончил МЭИ в 2010 г. Аспирант Российского государственного аграрного заочного университета.

Копылов Сергей Игоревич окончил МЭИ в 1979 г. Защитил докторскую диссертацию «Секционирование сверхпроводящих магнитных систем статических индуктивных регулирующих устройств» в 2005 г. Главный научный сотрудник Объединённого института высоких температур РАН.

DOI:10.24160/0013-5380-2017-12-51-54

Using the Pair-Wise Comparison Method in Optimizing the Operation of an Agricultural Production Blast Freezing Machine

AMBARTSUMOVA Tatiana T. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» («NRU «MPEI»), Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

GRIBOV Dmitrii I. (Russia State Agrarion Absentia University, Balashikha, Moscow region, Russia) — Ph. D. Student

KOPYLOV Sergei I. (Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences) — Chief Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

The product blast freezing method has been known since long ago. The article presents recommendations on achieving smaller energy consumption and more reliable operation of blast freezing machines with due regard to the specific features of the product to be frozen. The problem is formulated as follows. Given a number of process plant versions (or a process plant model) with a set of criteria, the latter being as a rule controversial ones (an attempt to improve one of them may have an adverse effect on the other ones). It is necessary to select a ranked series of process plants (models) proceeding from this information. An algorithm for solving this problem is proposed, which can be used as a self-contained tool for estimating the optimal version and as an auxiliary tool for other optimization methods.

Key words: energy consumption, blast freezing, pair-wise correspondences, adjacency matrix

REFERENCES

1. Baranenko A.V., Kutsakova V.E., Borzenko E.I., Frolov S.V. *Primery i zadachi po kholodil'noi tekhnologii pishchevykh produktov. Ch. 3. Teplofizicheskiye osnovy* (Examples and tasks on refrigeration technology of food products. 3. Thermophysical basis). Moscow, Publ. «KolosS», 2004, 257 p.

2. Buyanov A.N., Vorob'yeva N.N. *Kholodil'noye tekhnologicheskoye oborudovaniye — in Russ. (Refrigerating technological equipment)*, 2004, pp. 54–68.

3. Shvarts D.T. *Nauka i obrazovaniye — in Russ. (Science and education)*, 2013, No. 4, pp. 245–264 (Publ. of the Moscow State Technical University named N.E. Bauman).

4. Zhileikin M.N., Kalimulin M.R., Miroshnichenko A.V. *Nauka i obrazovaniye — in Russ. (Science and education)*, 2012, No. 12, pp. 107–117 (Publ. of the Moscow State Technical University named