

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 630*863.5.001.2

**Алгоритм формирования и выбора
предпочтительных вариантов
технологических линий и его применение
к проектированию гидролизных производств**

А. С. РЫВЛИН, Б. З. ШАПИРО

Всесоюзный научно-исследовательский биотехнический институт, Москва

Предложен алгоритм многокритериальной оптимизации, разработанный при решении задачи формирования и выбора наиболее предпочтительных вариантов технологических линий гидролизных производств. С помощью алгоритма сформирован новый, более эффективный по сравнению с существующими вариант технологии производства гидролизных кормовых дрожжей.

Одним из важнейших этапов разработки системы является этап формирования ее возможных вариантов (модификаций) [1]. На этом этапе на основе анализа целей создаваемой системы, изучения исходной информации о ее элементном составе и структуре формируется перечень альтернативных вариантов, из которых выбирается один или несколько наиболее предпочтительных.

Каждая сложная система состоит из ряда подсистем (для микробиологических производств — отделений), которые могут быть реализованы различными способами или с помощью различных видов оборудования. Таким образом, возникает большое число возможных вариантов системы, в целом отличающихся способами реализации каждой подсистемы.

На этапе проектирования системы используется также информация о критериях ее качества. Причем последние имеют как правило противоречивый характер (например, максимум производительности используемого оборудования при минимуме затрат), что создает для разработчиков дополнительные трудности при сравнении проектных решений. Особенно это характерно для проектирования технологических линий микробиологических производств, состоящих из большого числа отделений.

Использование формализованных методов позволяет выбрать на ранних этапах проектирования сложных систем из множества допустимых вариантов проекта подмножество рациональных, среди которых на основе дальнейшей детальной проектной проработки, опроса специалистов-экспертов и т. д. выделяется один оптимальный в многокритериальном смысле вариант.

В настоящее время разработаны различные методы решения задач многокритериальной оптимизации [1—3]. Однако все они имеют ряд существенных недостатков, которые не позволяют использовать их в задачах проектирования гидролизных производств. Так, большинство предложенных алгоритмов генерирует сразу все множество допустимых вариантов, сразу выделяет множество Парето (множество недоминируемых вариантов), не предусматривает проверку на совместимость альтернативных способов реализации разных подсистем, получает системные оценки суммированием соответствующих подсистемных.

Изучение функционирования реальных технологических линий (ТЛ) в заводских условиях требует разработки такого варианта алгоритма формирования и выбора, с помощью которого можно обрабатывать

В. Бирюков, А. Д. Воробьев,
в. М. В. Иванов, В. М. Кантере,
гл. редактора), В. Е. Матвеев,
м. гл. редактора), В. Г. Попов,
зц, О. Г. Широков

Северина

49, Добрынинская ул., дом 3,

большое количество альтернативных вариантов реализации систем целом путем предварительного сужения (усечения) общего множества альтернатив и динамического формирования множества Парето. Кроме того, алгоритм должен быть построен по принципу «устойчивости», учитывающей сравнительную важность и взаимную корреляцию критериев. Необходимость использования принципа «устойчивости» связана с тем, что при выборе варианта ТЛ часто возникает ситуация, когда из-за не возможности учета всех влияющих факторов отдельные существенные показатели, которые по результатам проектных расчетов находятся в пределах допустимых пределов, на практике оказываются вне допустимой области.

Поясним указанные принципы, лежащие в основе алгоритма, для случая максимизации критериев. Для оценки эффективности вариантов систем используется обобщенный критерий качества, являющийся произведением длин критерияльного вектора с учетом взаимной корреляции критериев, а второй учитывает сравнительную важность критериев и устойчивость варианта в смысле удаленности критерияльного вектора от координатных гиперплоскостей. При определении обобщенной длины критерияльного вектора необходимо скомпенсировать влияние взаимной корреляции критериев, а именно, уменьшить вклад в длину положительно скоррелированных критериев и увеличить вклад отрицательно скоррелированных (точная формула будет приведена ниже). Второй сомножитель в формуле для простоты в случае двух критериев. Предположим, что заданы весовые коэффициенты значимости критериев, тогда они задают на плоскости прямую идеальных соотношений критериев. Очевидно, что для получения устойчивого варианта системы выбор должен производиться в окрестности прямой идеальных соотношений. Поэтому второй сомножитель является «штрафом» за отклонение от критерияльного вектора идеальной прямой и представляет собой унимодальную положительную функцию углового параметра, обращаемую в нуль при углах, равных 0 и $\frac{\pi}{2}$, и достигающую максимума при угловом коэффициенте идеальной прямой. Аналогичная конструкция используется и в многомерном случае, при этом многомерная штрафная функция равна произведению двумерных штрафных функций по парам последовательных критериев.

Постановка задачи и описание алгоритма. Формальная постановка задачи формирования и выбора альтернативных вариантов ТЛ гидротехнических производств может быть сформулирована следующим образом. Обозначим через S сложную систему (ТЛ), которая состоит из подсистем S_i , $i=1, K$. Каждая из подсистем может быть реализована альтернативными вариантами s_{ij} , $j=1, m_i$. Для каждой пары соседних подсистем S_i и S_{i+1} задана матрица совместимости вариантов $M_i = \|m_{r,q}\|$, в которой

$$m_{r,q} = \begin{cases} 1, & \text{если комбинация } (s_{ir}; s_{i+1,q}) \text{ — допустима;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Вариант реализации системы в целом задается вектором $(s_{1j_1}, \dots, s_{kj_k})$. Для каждой подсистемы S_i выделен набор подсистемных критериев C_{iv} , где $v=1, \dots, l_i$, и каждому варианту s_{ij} реализации подсистемы сопоставлен вектор подсистемных оценок $(C_{ij1}, \dots, C_{ijl_i})$. Тем самым задано отображение $f_i: S_i \rightarrow R^i$. Кроме того, выделен набор системных критериев C_s, \dots, C_{s_k} , образующих критерияльное пространство R^l . Считаем, что задана вектор-функция $F: R^1 + \dots + R^k \rightarrow R^l$, которая по набору векторов подсистемных критериев определяет вектор системных критериев, являющийся оценкой варианта реализации системы в целом. Предпо-

тов реализации системы в ечения) общего множества множества Парето. Кроме принципу «устойчивости» и тую корреляцию критериев. «устойчивости» связана с тем, что ситуация, когда из-за невозможности отдельных существенных расчетов находятся вблизи называются вне допустимой

основе алгоритма, для слу- еktivности вариантов стро- цийся произведением двух вляет собой обобщенную взаимной корреляции критериев и устойчи- вого вектора от коорди- нированной длины критериаль- ные взаимной корреляции длину положительно скор- реляционно скоррелирован- ный. Второй сомножитель опи- сывает. Предположим, что заданы тогда они задают на плос- кость критериев. Очевидно, что для р должен производиться в р. Поэтому второй сомножи- тель критериального вектора одалную положительную в нуль при углах, рав- ным и углом коэффициента используется и в много- членная функция равна про- парам последовательных

Формальная постановка : вариантов ТЛ гидролиза : на следующим образом, которая состоит из под- ожет быть реализована : каждой пары соседних : имости вариантов $M_i =$ допустима;

вектором $(s_{1j_1}, \dots, s_{kj_k})$. подсистемных критериев реализации подсистемы $(c_{1j_1}, \dots, c_{kj_k})$. Тем самым : делен набор системных : в пространстве R^l . Счи- : $\rightarrow R^l$, которая по набору : пор системных критериев, : емы в целом. Предпопо-

жим, что вектор-функция F монотонна по всем своим координатам, т. е. при возрастании значений произвольного набора координат R^l при фиксированных остальных значениях координат в R^l не убывают. Кроме того, считаем, что или заданы весовые коэффициенты системных критериев C_{s_1}, \dots, C_{s_l} , или эти критерии разбиты на группы G_1, \dots, G_m по степени важности.

Необходимо, используя указанную выше информацию, выбрать фикси- рованное число парето-оптимальных вариантов реализации системы в целом. Условие монотонности вектор-функции F позволяет сузить рас- ссматриваемое множество вариантов реализации системы, что особенно важно при решении практических задач, так как общее множество ва- риантов реализации системы может быть очень велико. Например, в рассматриваемой задаче выбора оптимальной структуры ТЛ производства гидролизных кормовых дрожжей общее число альтернативных вариантов превышает $2,9 \cdot 10^9$. Оптимальные варианты реализации ТЛ следует искать среди множества Парето (множество недоминируемых вариантов), кото- рое вследствие условия монотонности содержится в декартовом произведе- нии подсистемных множеств Парето, что существенно уменьшает коли- чество перебираемых вариантов.

Исходными данными для решения задачи оптимизации являются набор матриц $V_i, i=1, K$ критериальных оценок вариантов реализации под- систем, набор матриц M_i совместимости вариантов последовательных подсистем, вектор-функция $F(V_1, \dots, V_k)$ системных оценок варианта системы в целом, вектор весовых коэффициентов W или группировка системных критериев на непересекающиеся множества G_1, \dots, G_m и число отбираемых вариантов NV .

Алгоритм решения

Шаг 1. Если задана группировка системных критериев G_1, \dots, G_m , то по некоторому правилу вычисляются веса критериев по группам.

Шаг 2. Для каждой подсистемы формируется подсистемное множество Парето P_i , а именно: для всех $i=1, K$ выбираются недоминируемые по подсистемным критериям строки матрицы V_i .

Шаг 3. Организуется перебор декартова произведения подсистемных множеств Парето $P = \{P_1 \times \dots \times P_k\}$.

Шаг 4. Для текущего элемента $P = P_{j_1}, \dots, P_{j_k}$ из P осуществляется проверка его допустимости. Вариант считается недопустимым, если хотя бы для одной матрицы $M_i, m_{j_i, j_i+1} = 0$. В этом случае осуществляется выбор следующего элемента.

Шаг 5. Для текущего элемента P , удовлетворяющего условию допусти- мости, вычисляется с помощью вектор-функции F вектор системных оце- нок.

Шаг 6. Осуществляется динамическое формирование системного мно- жества Парето, т. е. текущий вариант сравнивается с ранее отобранными вариантами, занесенными в массив IP . Если этот вариант доминируется каким-либо элементом массива IP , то генерируется следующий (переход к шагу 3). В противном случае возможны две ситуации. Если текущий элемент доминирует некоторое непустое подмножество массива IP , то до- минированные элементы удаляются из IP , а текущий элемент занимает одно из освободившихся мест. Если же текущий элемент не доминирует и не доминируется элементами IP , то он заносится в IP при наличии там свободного места*.

* В случае переполнения IP усечение его производится по той же схеме, что и при окончательном выборе наиболее предпочтительных вариантов (шаги 7—10).

Шаг 7. В полученном по окончании перебора усеченном системном множестве Парето IP вычисляются вектор средних значений E и матрица KR попарных корреляций значений системных критериев.

Шаг 8. Строится вспомогательная функция для вычисления обобщенного критерия качества варианта реализации системы по формуле

$$\psi(P) = \prod_{i=1}^I \varphi_i,$$

где φ_i — неотрицательная унимодальная функция, зависящая от $\frac{cs_{i+1}}{cs_i}$; cs_{i+1} и cs_i — системные оценки рассматриваемого варианта P.

φ_i достигает своего максимального значения при угле, тангенс которого равен $\frac{cs_{i+1}}{cs_i} = \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i}$, где α_i — весовой коэффициент i-го критерия. Для вычисления значений унимодальной функции используется следующая формула:

$$\varphi_i = \sin \left[\pi \left(\frac{2}{\pi} \arctg \frac{cs_{i+1}}{cs_i} \right)^{\frac{1}{\log_2 \left(\frac{2}{\pi} \arctg \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \right)}} \right].$$

Шаг 9. Вычисляется матрица квадратичной формы $A = \|a_{ij}\|$ для расчета обобщенной длины критериальных векторов:

$$A = E + I - KR,$$

где E — единичная диагональная матрица; I — матрица, все элементы которой равны 1.

(Поведение метрики, задаваемой матрицей A, хорошо иллюстрируется для случая двух критериев. При нескоррелированных критериях точки одинаковой предпочтительности — равноудаленные в построенной метрике от начала координат — лежат на прямой; при положительной корреляции критериев — на выпуклом эллипсе; при отрицательной корреляции — на вогнутой гиперболе.)

Шаг 10. Вычисляется обобщенный критерий качества варианта по формуле

$$\Phi(p) = \sum_{ij} a_{ij} cs_i cs_j \psi(p),$$

где $\sum_{ij} a_{ij} cs_i cs_j$ — длина вектора (cs_1, \dots, cs_n) в метрике, заданной корреляционной матрицей A.

Шаг 11. Из усеченного системного множества паретовских вариантов выбирается NV элементов с наибольшими значениями обобщенного критерия качества.

Применение алгоритма к задаче проектирования ТЛ производства гидролизных кормовых дрожжей. Описанный алгоритм формирования и выбора был реализован на ЭВМ и использовался для решения задачи оптимизации структуры ТЛ производства гидролизных кормовых дрожжей.

Даже упрощенная типовая схема ТЛ гидролизно-дрожжевого производства [4] является достаточно сложной и имеет разветвленную систему массопотоков. В частности, возникают большие обратные потоки оборотной воды, бражки и т. д., что не дает возможность рассматривать систему в целом как параллельно-последовательную. Общее число отделений равно двадцати двум. При решении задачи выбора оптимального варианта ТЛ рассматривались только те отделения, которые непосредственно относятся к производству дрожжей: прием, подготовка и подача сырья; гидролиз; частичное охлаждение на испарителях; инверсия; нейтрализация; осветление нейтрализата; очистка от летучих примесей; аэрация суслу; холодный отстой суслу; доохлаждение суслу; выращивание засевных дрожжей; выращивание товарных дрожжей; флотация; сепарация; плазмолиз; упаривание; сушка.

В результате проведения экспертиз с проектировщиками гидролизных

Сравнительная оценка эффективности способов реализации отделения гидролиза*

Способ реализации	Критерий									
	Качество гидролизата	Удельная себестоимость	Удельные капиталовложения	Удельная производительность	Удельная материалоемкость	Удельное энергопотребление	Удельное потребление пара	Технологическая надежность	Техническая надежность	Ремонтопригодность
Гидролиз										
одностадийный	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
двухстадийный	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2
Объем гидролизатора, увеличивающийся в направлении $a \rightarrow g$										
a	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1
b	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
v	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1
г	2	4	4	4	4	2	2	3	2	2
Перколяция:										
совмещенная с центральной подающей трубой (ЦПТ)										
с восходящим потоком	2	3	1	4	1	1	1	2	1	1
многозонный гидролиз с ЦПТ	4	4	1	2	1	1	1	1	2	1
многозонный гидролиз с восходящей перколяцией	1	2	1	3	1	1	1	3	2	2
Непрерывный гидролиз:										
перколяционный	3	1	1	1	1	1	1	3	2	2
в каскаде прямоточных шнековых реакторов	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2
высокотемпературный в прямоточном реакторе	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	2	2	2	1	3	3	3	3	3

* Приведенные оценки являются средним значениями показателей по результатам проведенных экспертиз.

производств, анализа литературы и обработки технологических регламентов для перечисленных отделений и всей ТЛ в целом были определены системные и подсистемные критерии, зависимости системных критериев от подсистемных, альтернативные способы реализации отделений, произведена оценка этих способов по подсистемным критериям. Структура полученной от экспертов информации о способах реализации отделений потребовала дальнейшего разделения некоторых отделений, в результате чего общее число полученных подсистем достигло тридцати. Общее число альтернативных вариантов ТЛ превысило $2,9 \cdot 10^9$. В качестве примера приведены данные (таблица) о способах реализации отделения гидролиза и их сравнительной оценке по подсистемным критериям.

При решении задачи оптимизаций структуры ТЛ по результатам ранжирования было выделено десять наиболее важных критериев (см. таблицу). Для оценки ТЛ в целом были использованы стандартные методы перехода от подсистемных критериев к системным.

Для решения задачи оптимизации ТЛ производства гидролизных кормовых дрожжей была осуществлена настройка программного модуля на исходную информацию решаемой задачи. Рассмотрим результаты работы основных этапов программы. После первого этапа в результате выбора паретовских вариантов подсистем общее число альтернатив сократилось до двухсот пятидесяти шести. В результате перебора полученных двухсот пятидесяти шести вариантов было сформировано усеченное множество Парето (массив IP) и вычислены значения системных критериев для этих вариантов. После вычисления обобщенного критерия качества вариантов последние были упорядочены по убыванию его значения. Пять из них с наибольшим значением обобщен-

бора усеченном системном
эдних значений E и матрица
их критериев.

для вычисления обобщен-
и системы по формуле

функция, зависящая от
матрицаемого варианта P.
при угле, тангенс которого
мент i-го критерия. Для
и используется следующая

ормы $A = \|a_{ij}\|$ для расчета

— матрица, все элементы

и, хорошо иллюстрируется
ованных критериях точки
нные в построенной метри-
при положительной корре-
и отрицательной корреля-

ества варианта по формуле

етрике, заданной корреля-

а паретовских вариантов
значениями обобщенного

ования ТЛ производства
лгоритм формирования и
лся для решения задачи
олизных кормовых дрож-

лизно-дрожжевого произ-
и имеет разветвленную
большие обратные потоки
возможность рассматри-
вательную. Общее число
задачи выбора опти-
те отделения, которые
жей: прием, подготовка и
та испарителях; инверсия;
ка от летучих примесей;
кдение суслу; выращива-
ых дрожжей; флотация;

ровщиками гидролизных

ного критерия выведены на печать. Наиболее предпочтительным из пяти отобранных является следующий:

Наименование отделения	Способ реализации, оборудование
Гидролиз	Двухстадийный гидролиз, перколяция с восходящим потоком;
Частичное охлаждение на испарителях	Испарение в три ступени
Инверсия	Инверсия под атмосферным давлением
Нейтрализация	Нейтрализация двухступенчатая
Осветление нейтрализата	Фильтр-пресс автоматический камерный
Очистка нейтрализата от летучих примесей	Вакуум-ректификация
Аэрация сусла	Продувка воздухом в дрожжевом чане
Холодный отстой сусла	Фильтрация на фильтр-прессах
Доохлаждение сусла	Пластинчатые теплообменники
Выращивание засевных дрожжей	В 6 ступеней: непрерывное культивирование со ступени 4; ферментер с мешалкой (ступени 1—3); эрлифтный ферментер (ступени 4—6) с термической стерилизацией оборудования
Выращивание товарных дрожжей	В две ступени: ферментер трубчатый с выносным теплообменником, механическим пеногашением, расщепленным вводом воздуха и нижним отбором бражки
Флотация	Двухступенчатая по пене и бражке флотация с термическим гашением флотопены
Сепарация	Двухступенчатая сепарация
Плазмолиз	Пластинчатые теплообменники
Упаривание	Пленочные испарители
Сушка	Сушка распылительная центробежная

Второй вариант отличается от наилучшего тем, что вместо двухступенчатой сепарации применяется трехступенчатая с промывкой дрожжей. Третий вариант отличается от наилучшего тем, что доохлаждение проводится на АВО, а не на пластинчатых теплообменниках. Четвертый вариант имеет оба предыдущих отличия относительно предпочтительного. В пятом варианте в отделении выращивания засевных дрожжей используется непрерывное культивирование.

Результаты проведенной работы показали, что разработанный алгоритм можно использовать при проектировании гидролизных производств. После незначительной корректировки имеющегося программного обеспечения может быть использовано для оптимизации структур ТЛ других микробиологических производств.

Поступила 01.04.86

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решений.— М.: Наука, 1979.— 199 с.
2. Гафт М. Г. Принятие решений при многих критериях.— М.: Знание, 1979.— 64 с.
3. Модели и методы формирования и многокритериального выбора предпочтительных вариантов систем. Сб. трудов. Вып. 1 — М., 1981.— 147 с.— (ВНИИСИ).
4. Корольков И. И. Перколяционный гидролиз растительного сырья.— М.: Лесная промышленность, 1978.— 263 с.

Algorithm of Formation and Selection of Preferable Variants of Technological Lines and its Application in Designing Hydrolysis Plants

A. S RYVLIN, B. Z. SHAPIRO
All-Union Research Biotechnical Institute, Moscow

An algorithm of multi-criterion optimization, developed for solving the problem of formation and selection of preferable variants of hydrolysis plants technological lines, is suggested. With its aid a new and more effective variant of technology for the production of hydrolysing fodder yeasts is created.

е предпочтительным из пяти

реализации, оборудование

гидролиз, перколяция с восходящим

1 ступени

атмосферным давлением
двухступенчатая
томатический камерный
сация

ом в дрожжевом чане
фильтр-прессах
плоообменники
прерывное культивирование со сту-
р с мешалкой (ступени 1—3); эр-
гер (ступени 4—6) с термической
орудования
ферментер трубчатый с выносным
механическим пеногашением, рас-
ходом воздуха и нижним отбором

по пене и бражке флотация с тер-
м флотопены
сепарация
лоообменники
ители
льная центробежная

его тем, что вместо двух-
нчатая с промывкой дрож-
шего тем, что доохлажде-
ных теплообменниках. Чет-
личия относительно пред-
и выращивания засевных
рование.

и, что разработанный ал-
гории гидролизных произ-
имеющееся программное
оптимизации структур ТЛ

Поступила 01.04.86

й.— М.: Наука, 1979.— 199 с.
х.— М.: Знание, 1979.— 64 с.
о выбора предпочтительных ва-
с.— (ВНИИСИ).
ного сырья.— М.: Лесная про-

of Preferable Vari-
Application in Desig-

and for solving the problem of
analysis plants technological lines,
important of technology for the pro-

ЕСЛИ ТВОЙ ШЕФ В КОМАНДИРОВКЕ, а ты пишешь для «Биотехнологии» свою первую статью, прислушайся к нашим советам.

1. Определи жанр статьи. Нам подходят три: проблемные статьи (их скорее всего напишет твой «макрошеф»); обзорные статьи (они обычно заказываются или представляются по согласованию с редакцией) и оригинальные статьи (полная свобода в рамках тематики журнала).

2. Написав статью, вычеркни первую фразу или лучше — первый абзац, где сказано, например, что антибиотики принадлежат к классу веществ с сильным биологическим действием, в связи с чем их нужно получать и изучать. Материал излагай кратко, но без излишней скованности.

3. Тщательно отбери из серии аналогичных рисунков один, который наглядно иллюстрирует полученные тобою данные. Не прикалывай к экземпляру статьи два отличающихся друг от друга рисунка под одним номером.

4. Подбирая иллюстративный материал, подумай, не перегружена ли им статья. Если да — не лучше ли дать краткое описание рисунка или таблицы в тексте. Если же описание не получается кратким, смело приводи иллюстрацию. Избегай рисунков, которые уже публиковались раньше.

5. Не бойся давать подробную подрисовочную подпись с описанием условий опыта, если, конечно, оно не дублирует данные, содержащиеся в разделе «Условия эксперимента».

6. Если ты приводишь компонентный состав в процентах, пусть их сумма не превышает 100 %.

7. Если ты пишешь, что пик активности фермента наблюдали при pH 7,5, проверь, чтобы на соответствующем рисунке он не приходился на 7,7.

8. В обсуждении часто используются спекулятивные ходы — это законный атрибут научной литературы. Но выводы, которые ты делаешь, должны непосредственно и однозначно вытекать из данных, описанных именно в этой твоей статье, а не быть результатом многоэтапных умозрительных построений.

Не забудь указать подробные сведения о себе (почтовый адрес с индексом, телефон и др.).

Желаем успеха!