

<https://doi.org/10.3176/hum.soc.sci.1979.2.05>

К. ТЕННО, А. ЛАУР

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Представил К. Хабихт

Понятие неопределенности при планировании и оптимизации экономических и других больших систем предполагает невозможность однозначно предвидеть развитие и будущее состояние системы ввиду влияния на нее многих случайных факторов, объективных и субъективных. Объективными факторами определяется невозможность точного предсказания направлений технического прогресса и динамики развития народного хозяйства, к субъективным факторам относятся ошибки планирования и проектирования, недостатки ценообразования и т. д.

Влияние фактора случайности на развитие больших систем проявляется прежде всего в погрешностях и неопределенности исходной информации. В силу этого в общем случае все параметры оптимизируемого комплекса неопределенны. Их значения могут задаваться как вероятностные или каким-либо иным путем, исходя из особенностей информации. Только в целях упрощения часть параметров, менее существенных с точки зрения оптимизации, можно принять в качестве детерминированных.

Неопределенность топливно-энергетических систем обусловлена неопределенностью таких социально-экономических факторов, как изменение топливно-энергетических ресурсов и их экономических параметров, изменение темпов развития других отраслей народного хозяйства и т. д. Ошибки проектирования энергетических объектов весьма большие, действительные затраты отличаются иногда от запроектированных на 25—30% и часто в сторону завышения [1].

Типичная ситуация неопределенности характерна и для развития сланцевой промышленности и энергетики нашей республики. Предложено несколько вариантов развития сланцевой энергетики, причем технико-экономические характеристики технологических процессов, потребность в новых генерирующих мощностях, а также вредное воздействие производств на окружающую среду неопределенны. Кроме того, в районе сланцевого комплекса — в северо-восточной Эстонии, намечается или уже строится ряд других новых производств, прежде всего, комплекс по производству минеральных удобрений. Эти проекты недостаточно увязаны между собой и разрабатываются изолированно. Чтобы оценить возможность возникновения диспропорций, косвенные и отдаленные последствия интенсивной концентрации промышленности в северо-восточной Эстонии, в Институте экономики АН ЭССР проведен комплекс исследований, в которых отраслевые аспекты проблемы рассмотрены сов-

местно с региональными и экологическими [2]. В данный комплекс исследований входят и работы, на основании которых написана настоящая статья.

В качестве оптимизационной модели принята модификация общей задачи линейного программирования, описывающая взаимосвязи действующих и проектируемых топливно-энергетических и других объектов в северо-восточной Эстонии и конкурирующих с ними вне республики. Ограничения задачи выражают использование местных и привозных природных и других ресурсов (сланца, нефти, природного газа, рабочей силы и т. д.), производство и распределение промежуточной и конечной продукции, балансы наиболее важных загрязнителей природной среды и ограничения на некоторые переменные задачи. В качестве конечной продукции рассматриваются электро- и теплоэнергия, сланцевый и нефтяной мазут, светлые нефтепродукты и некоторые химические продукты — олефины, сложные удобрения.

Технологические коэффициенты для матрицы задачи по включенным в комплекс производствам рассчитаны на основании первичных материалов исследовательских и проектных проработок.

Годовые приведенные затраты по технологическим способам включают экзогенные затраты на добычу и транспорт сырья, переработку сырья и полуфабрикатов, транспорт продукции, затраты на очистку сточных вод и обезвреживание отходов.

Основная цель развития данного комплекса — производство электроэнергии. Поэтому на описанной модели поставлена пара взаимных задач на минимум годовых приведенных затрат и на максимум отпуска электроэнергии за пределы комплекса.

Исходными данными задачи служат в основном перспективные показатели производства и потребления топлива и энергии, экономические параметры новых предприятий или новых технологических решений и т. д. Получение вероятностной характеристики такого рода показателей затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно. Неопределенные исходные данные задаются в виде интервала возможных значений признаков. Для существенных показателей эти интервалы найдены при помощи расчетов, исходя из специфики каждого, для второстепенных — путем задания отклонений от среднего значения.

После окончательного фиксирования состава неопределенных исходных параметров с соответствующими интервалами их варьирования выполняется вычислительная процедура по специальной программе, реализующей симплексный алгоритм в сочетании с генератором случайных чисел в предположении равномерного распределения значений неопределенных элементов расширенной матрицы модели в заданных интервалах. Таким путем имитируется получение требуемого количества исходных состояний исследуемого объекта и вычисляются соответствующие оптимальные планы.

Сложной проблемой является определение требуемого числа генерируемых вариантов. Авторы считают, что достаточное для анализа количество исходных вариантов в идеальном случае достигается тогда, когда в результате оптимизационных расчетов найдены все комбинации базисных переменных. Это значит, что с увеличением числа генерируемых вариантов исходных данных в оптимальных решениях новых комбинаций базисных переменных не прибавляется.

Конкретно в ходе данной работы было генерировано 305 оптимальных решений на минимум годовых приведенных затрат и 322 решения на максимум производства электроэнергии. Притом в обеих сериях неопределенными принимались 129 элементов расширенной матрицы модели.

Анализ полученного множества оптимальных вариантов осуществляется в сочетании формального и содержательного подходов. Можно выделить три основных направления анализа:

1. Анализ устойчивости и состава оптимального базиса решений.
2. Выделение и группировка похожих оптимальных вариантов.
3. Определение модальных оптимальных вариантов.

Основной формой анализа является человеко-машинный диалог, для осуществления которого составлен соответствующий комплекс программ на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ ЕС-1022.

В названный комплекс входят следующие программы:

1. Программа для группировки рассматриваемого множества оптимальных решений по совпадению состава базисных переменных.
2. Программа группировки заданного числа векторов по расстоянию между ними.
3. Программа для сравнения и оценивания степени сходства группировок.
4. Программа для определения показателя модальности по исследуемым оптимальным решениям.

Программа, реализующая анализ состава оптимального базиса решений, позволяет определить группы решений по совпадению состава как всех базисных переменных, так и любого их подмножества. Пользуясь этой возможностью, легко детализировать процедуры человеко-машинного диалога, чтобы получить ответы на множество вопросов, относящихся к вхождению в оптимальный базис рассматриваемых решений тех или иных переменных модели. Для этого предусматривается задание соответствующих списков переменных. Число этих списков, обрабатываемых на одном шаге человеко-машинного диалога, не ограничивается. При необходимости для каждой переменной в отдельности можно задавать уровень интенсивности, ниже которого значение переменной считается нулевым.

Похожие оптимальные варианты в данной работе выделяются на основе взвешенного евклидова расстояния как между векторами решений, так и между векторами, компонентами которых являются неопределенные исходные параметры (последние векторы в дальнейшем будем называть просто векторами исходных данных). Для составления программы группировки использован алгоритм, реализованный В. Г. Санеевым для ЭВМ БЭСМ-4 [3]. Полученные таким образом группировки сравниваются для оценивания соответствия между неопределенными элементами исходных данных и решениями. При помощи вариации весовых коэффициентов у компонент группируемых векторов получается несколько пар группировок. Из них выбирается пара, где соответствие группировок наиболее полно. Количественным критерием для выбора служит пронормированное расстояние Хемминга [4]. Целью такого подхода является выявление существенных неопределенных исходных параметров, имеющих наибольшее влияние на формирование оптимального плана.

В качестве модальных определяются такие варианты оптимального плана, которые состоят из наиболее часто встречающихся переменных в исследуемом множестве оптимальных решений [5]. Составлена специальная программа, позволяющая определить модальные планы при различных уровнях интенсивности технологических способов.

Алгоритм, реализуемый этой программой, состоит из следующих основных шагов:

1. Определяется частота вхождения отдельных компонент x_j вектора решения в оптимальный базис исследуемых вариантов

$$F(x_j) = \frac{s_j}{p}, \quad j = 1, \dots, n,$$

где $F(x_j)$ — частота вхождения j -го переменного в оптимальный базис в заданном наборе решений;

s_j — число вариантов, для которых $x_j \geq r_j$,

где r_j — заданный уровень интенсивности j -го технологического способа, ниже которого интенсивность считается нулевой;

n — число переменных модели;

p — число вариантов оптимальных решений в заданном наборе.

2. Строится матрица $H = \{h_{ij}\}$ следующим образом:

$$h_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{ij} < r_j, \quad i = 1, \dots, p, \\ F(x_j), & \text{если } x_{ij} \geq r_j, \quad j = 1, \dots, n, \end{cases}$$

где x_{ij} — j -я компонента i -го оптимального решения.

3. Для каждого оптимального решения определяется показатель средней частоты f_i :

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{m_i},$$

где m_i — число переменных в i -м оптимальном решении, значения которых были выше заданных уровней интенсивности.

Предполагается, что варианты оптимальных решений, имеющие наибольшее значение показателя f_i , являются модальными.

Методика настоящей работы в общем соответствует общепринятой схеме решения задач оптимизации в условиях неопределенности, предложенной, например, в [1]. При генерировании множества оптимальных решений здесь также используется монте-карловская процедура в сочетании с симплекс-методом, при анализе применяются различные методы теории распознавания образов. Конкретные алгоритмы и машинные программы, выработанные в ходе данной работы для реализации этих методов, являются специфичными.

Основными новыми моментами в настоящем исследовании следует считать выработку человеко-машинной процедуры для анализа структуры множества оптимальных решений, выделение и анализ модальных оптимальных вариантов, а также методы оценивания влияния вариации неопределенных исходных параметров на формирование оптимального плана.

В имеющихся работах по учету неопределенности конечной целью оптимизации исследуемого объекта, как правило, является выбор одного («наилучшего») варианта его развития. Для достижения этой цели используются методы теории игр, в частности, методы анализа платежной матрицы. Особенность данной работы заключается в том, что здесь такая цель не ставилась. Мы видели свою задачу в том, чтобы выделить и сопоставить качественно различные варианты развития с одновременным оцениванием исходных условий. Выводы делаются в зависимости от уровня реализации исходных состояний исследуемого объекта. Предпочтение отдается модальным оптимальным вариантам, характеризующим наиболее типичные исходные условия (сочетания неопределенных исходных параметров).

Анализ устойчивости и состава оптимального базиса всего множества полученных решений показал следующее.

Группировка векторов-решений по совпадению всех переменных модели свидетельствует о неустойчивости базиса: число совпадающих комбинаций базисных переменных незначительно. Однако, если группировка проводится лишь по тем переменным, которые с точки зрения содержания исследования являются наиболее информативными, то число совпадающих комбинаций базисных переменных резко увеличивается.

Результаты, полученные при группировке решений на основе взвешенного евклидова расстояния между векторами, показывают, что большинство оптимальных решений принадлежит к 3—5 большим группам. Остальные группы содержат сравнительно меньше элементов или единичны. Это согласуется с интуитивным представлением о многомерном нормальном распределении множества оптимальных решений. Однако пока нет достаточных оснований говорить о таком распределении данных векторов (проверка этой гипотезы не проводилась из-за малочисленности имеющихся выборок).

Что касается анализа частоты компонент оптимального базиса решений, то выяснилось, что варианты с наибольшим значением показателя средней частоты f_i (модальные варианты) входят в основном в состав тех же самых больших групп. Это значит, что результаты, полученные по двум совершенно разным методам анализа, весьма сходны. Можно утверждать, что большие группы — самые представительные, а входящие в них варианты наиболее типичны среди всех полученных вариантов оптимальных решений.

Содержательный анализ показывает, что для каждой группы можно выделить сочетание из двух-трех переменных, отличающее данную группу от остальных (разное сырье, разные технологические решения и т. д.).

Группировка векторов исходных данных при учете всех 129 изменяющихся компонент сравнительно слабо соответствует группировке оптимальных решений: пронормированное расстояние Хемминга — 0,247. Это связано прежде всего с тем, что компоненты векторов исходных данных не нормированы (их значения отличаются друг от друга на несколько порядков) и изменения компонент с большими численными значениями определяют общее расстояние между векторами. По мере уменьшения влияния разнопорядковых компонент соответствие между группировками исходных данных и оптимальных решений улучшается — расстояние Хемминга уменьшается.

Поэтому для дальнейшего анализа полученного множества решений элементы входной и выходной информации задачи разделены на существенные и второстепенные, исходя из экономического содержания задачи.

К существенным компонентам исходных данных прежде всего отнесены лимиты топливно-сырьевых ресурсов и потребности в продукции. Наиболее информативными следует признать и компоненты природоохранных ограничений, так как заданный лимит загрязнителей в крупных населенных пунктах рассматриваемого района в большинстве решений используется полностью.

Из переменных модели следует признать существенными те, наличие которых в плане принципиально отличает данный план от других. К таким переменным в данной задаче относятся прежде всего значения мощности электростанций, действующих или новых, на разных видах топлива, в разных пунктах размещения, интенсивности использования технологии переработки сланца и производства олефинов из сланцевого

сырья, величина мощности сланцевых шахт (мощность действующих шахт и разрезов ограничена).

Перечисленные элементы входной и выходной информации положены в основу дальнейшего анализа полученного множества решений. Прежде всего изучалось соответствие между группировкой оптимальных решений и группировками векторов исходных данных при постепенном уменьшении числа учитываемых компонент последних. Таким путем выявились наиболее существенные исходные данные, т. н. критические параметры, которые имеют определяющее влияние на формирование оптимального плана. Критическими оказались некоторые показатели природопользования, в частности, ограничения на выброс в атмосферу сернистых и азотных соединений. Установлена связь между значением этих выбросов и вхождением соответствующих технологических способов в оптимальный план. Прежде всего, это относится к электростанциям, так как они представляют наибольшую нагрузку на природную среду. При учете только критических параметров достигнуто также некоторое уменьшение расстояния Хемминга между группировками оптимальных решений и векторов исходных данных. Это расстояние оказалось 0,154. Учитывая уровень ошибок, связанный с самой формализацией, это значение можно считать достаточно близким к нулю.

Далее изучалось соответствие между группировками векторов исходных данных и оптимальных решений по существенным переменным. Ввиду ограниченного объема оперативной памяти ЭВМ и сокращения перфорационных работ, для примера взяты первые 100 решений задачи максимизации производства электроэнергии.

Для окончательной группировки векторов оптимальных решений сначала получена группировка по выделенным 7 существенным базисным переменным. Параллельно по тем же переменным получено несколько вариантов группировки на основе евклидова расстояния (без весовых коэффициентов, со случайными и найденными экспертным путем весовыми коэффициентами). Пересечения этих группировок с группировкой по оптимальному базису мы и считаем окончательными группировками оптимальных решений. Полученные таким образом группы имеют четко выраженные содержательные признаки, так как здесь учтены как состав базиса, так и численные значения переменных.

Группировка векторов существенных исходных данных осуществлена с учетом нескольких вариантов весовых коэффициентов, а также с нормированием компонент векторов и без него. Всего получено 8 группировок. Рассчитано расстояние Хемминга между этими группировками и группировками оптимальных решений. Самые хорошие значения этого показателя, весьма близкие к нулю (менее 0,1), получены между группировкой оптимальных решений с весовыми коэффициентами, найденными экспертным путем, и группировками векторов исходных данных с нормированием компонент и весовыми коэффициентами порядка 0,1...1,0.

Изложенные результаты количественного анализа послужили основанием для экономической интерпретации результатов решения и оценки поведения данной производственной системы в условиях неопределенности.

Упорядочение вариантов оптимального плана по значению целевой функции — производству электроэнергии — показывает, что плотность распределения вариантов по всему интервалу значений этого показателя неравномерна. Наибольшая плотность — в середине интервала, наименьшая — в зоне больших значений показателя производства электроэнергии. Естественно, это связано с условиями, при которых достигается

то или иное значение целевой функции. Большие ее значения обеспечиваются лишь при каких-то особых комбинациях исходных данных, во всех отношениях благоприятных для развития комплекса, а основная масса вариантов этим требованиям не отвечает.

Как уже отмечалось, каждая группа векторов-решений характеризуется некоторыми существенными базисными переменными, которые прочно входят во все решения данной группы. По значению целевой функции группы решений менее однородны. Можно лишь заметить, что варианты с наибольшими значениями целевой функции в основном попадают в малочисленные группы решений. Несколько бо́льшая однородность значений целевой функции вариантов наблюдается в группах векторов исходных данных.

В заключение постараемся оценить возможность реализации случайных сочетаний исходных данных, определяющих поведение производственной системы в условиях неопределенности.

Поскольку критическими компонентами исходных данных оказались коэффициенты природоохранных ограничений и установлена непосредственная связь между ними и вхождением соответствующих технологических способов в оптимальный план, частоту попадания электростанций в оптимальные решения можно с определенным допущением рассматривать и как частоту реализации благоприятных, с точки зрения параметров среды, условий для данного способа производства электроэнергии. Так, в оптимальных планах практически нет Прибалтийской ГРЭС. Причина этого — ее неблагоприятное местоположение по отношению к г. Нарве. Видимо, и проведение предусмотренных условиями задачи мероприятий по очистке дымовых газов или реконструкция по энерготехнологической схеме не дают должного эффекта.

Частота Эстонской ГРЭС в оптимальных планах значительно больше, особенно в задаче минимизации затрат. Но явное преимущество перед действующими электростанциями имеет новая мощность. Из трех альтернативных способов использования сланца с наибольшей частотой представлено прямое сжигание сланца в задаче минимизации затрат, а энерготехнологическая схема — в задаче максимизации производства электроэнергии. Это значит, что во всем множестве случайных значений критических компонент природоохранных ограничений благоприятные значения этих коэффициентов гораздо более вероятны при новых электростанциях, чем при существующих. Причина — прежде всего в местоположении новых мощностей, заданном на расстоянии до 40 км от г. Нарвы в разных направлениях.

Частота и интенсивность сланцеперерабатывающих способов в планах определяется потребностью электростанций в топливе. Самостоятельно они особой нагрузки на природную среду при заданной степени очистки не представляют.

По совокупности результатов качественного и количественного анализа можно заключить, что развитие данного производственного комплекса в заданных условиях тяготеет в основном к строительству новых энергетических мощностей в сочетании с созданием новых сланцедобывающих и перерабатывающих предприятий. Варианты расширения энергетической базы посредством переоборудования или полной реконструкции действующих предприятий, предполагающие существенное уменьшение их загрязняющего действия по сравнению с настоящим уровнем, играют незначительную роль в достижении конечных целей. Поэтому исследование зоны неопределенности оптимального решения данной задачи имеет целью прежде всего выбор топлива и технологии для новой электростанции (прямое сжигание сланца или его энерготехнологическое

использование) и выбор района размещения новой мощности (расстояния от крупных населенных пунктов).

Развитие энергетики на базе сланцевого комплекса наиболее реально в масштабах, соответствующих отпуску 14—20 млрд. кВт·ч электроэнергии в год. Производство свыше 20 млрд. кВт·ч электроэнергии предполагает реализацию наиболее низких показателей загрязняющего действия электростанций: критические компоненты природоохранных ограничений должны быть немногим выше нижней границы интервала их изменений. Новая электростанция по энерготехнологической схеме использования сланца может размещаться на расстоянии не менее 20—40 км от крупных населенных пунктов.

Использование результатов исследования зоны неопределенности оптимального решения данной задачи расширило возможности выработки долгосрочных прогнозов развития топливно-энергетического комплекса в северо-восточной Эстонии. Благодаря большому числу изменяющихся исходных параметров, их весьма широкому интервалу изменений и отказу от предварительной обработки генерированных сочетаний, зона неопределенности оптимального решения достаточно широко изучена, и в то же время она оказалась вполне обозримой. Разработанные методы анализа и рабочие приемы могут быть рекомендованы при решении других экономических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А. А., Мелентьев Л. А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. Новосибирск, 1973.
2. Каганович И. З. О комплексном анализе территориально-производственных проблем с учетом экологических факторов. — Экономика и матем. методы, 1977, т. XIII, вып. 5, с. 998—1007.
3. Макаров А. А., Лагерев А. В., Санеев Б. Г., Яскова Э. Н. Алгоритмы и программы исследования зоны неопределенности оптимального решения линеаризуемых систем (для ЭЦВМ класса БЭСМ-4). Иркутск, 1970.
4. Миркин Б. Г., Черный Л. Б. Некоторые свойства пространства разбиений. — В кн.: Математический анализ экономических моделей. Ч. III. Новосибирск, 1972, с. 126—147.
5. Каганович И. Задачи концентрации и размещения с фиксированными доплатами и их решение. — В кн.: Экономико-математические исследования народного хозяйства Эстонской ССР. Таллин, 1968, с. 151—180.

*Институт экономики
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
15/VI 1978

K. TENNO, A. LAUR

KÜTUSE- JA ENERGEETIKAKOMPLEKSI OPTIMEERIMINE MÄÄRAMATUSE KORRAL

Artiklis on käsitletud määramatuse arvestamist optimeerimisülesannetes. Aluseks on võetud Kirde-Eesti kütuse- ja energeetikakompleksi kirjeldav ülesanne. On eeldatud, et osa kitsenduste süsteemi ja sihifunktsiooni kordajaid on määramatud, nende kohta on teada ainult võimalike väärtuste intervallid. Spetsiaalse programmi abil on genereeritud nõutav arv ülesande algmaatriksi variante, kus määramatud elemendid omandavad väärtusi vastavatest intervallidest. Korduval lahendamisel on saadud otsitav optimaalsete lahendite

hulk. Selle analüüs toimub peamiselt inimese-masina dialoogi vormis, kusjuures eesmärgiks pole mitte ühe (parima) lahendivariandi leidmine, vaid kvalitatiivselt erinevate lahendite väljaselgitamine ja vastavate algtingimuste analüüs. Eelistatumaiks on loetud nn. modaalsed variandid, mis vastavad kõige tüüpilisematele määramatute algparameetrite kombinatsioonidele.

*Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Majanduse Instituut*

Toimetusse saabunud
15. VI 1978

K. TENNO, A. LAUR

OPTIMIZATION OF THE FUEL AND ENERGY COMPLEX UNDER UNCERTAINTY

The paper discusses consideration of uncertainty in optimization problems. A descriptive problem of the North-East Estonian fuel and energy complex serves as basis. Part of the multipliers of the system of constraints and of the objective function are assumed to be uncertain, only the intervals of their feasible values being known. With the help of a special program, the required number of the variants of the problem's initial matrix are generated; in so doing the uncertain elements obtain their values from the respective intervals. The set of optimum solutions sought for is found by solving the problem repeatedly. The set is analyzed mainly in the form of man — machine dialogue. At that the aim is not to look for a single (the best) solution, but to find out qualitatively different solutions and analyze the respective initial conditions. The so-called modal variants corresponding to the most typical combinations of uncertain initial parameters are preferred.

*Academy of Sciences of the Estonian SSR,
Institute of Economics*

Received
June 15, 1978