

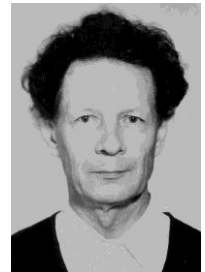
УДК [625.72:625.711.84]:51-7 +330.322.5

Г.А. Борисов, В.Д. Кукин, В.И. Кузина

Борисов Георгий Александрович родился в 1935 г., окончил в 1958 г. Ленинградский политехнический институт, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН. Имеет 53 работы в области автоматизированного проектирования лесотранспорта.



Кукин Валерий Дмитриевич родился в 1942 г., окончил в 1966 г. Горьковский университет, научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН. Имеет 37 печатных работ в области автоматизированного проектирования лесотранспорта.



Кузина Валентина Ивановна родилась в 1948 г., окончила в 1978 г. Ленинградский университет, научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН. Имеет 17 печатных работ в области автоматизированного проектирования лесотранспорта.



МЕТОДЫ ПОИСКА НАИВЫГОДНЕЙШЕГО ВАРИАНТА СЕТИ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ

Излагается новая методика оптимального проектирования сетей лесовозных дорог на основе решения задачи Штейнера – Вебера. Используются эвристические и комбинаторные методы, случайный поиск и современные методы оценки эффективности инвестиций в условиях рынка.

сеть лесовозных дорог, задача Штейнера – Вебера, итерация решения на ЭВМ.

В истории развития методов оптимизации параметров и схем транспортного освоения лесных массивов [1–7, 11, 14, 16] ясно просматриваются тенденции их усложнения и повышения точности решений при одновремен-

ном смягчении допущений в математических моделях и увеличении их адекватности объекту.

Применявшиеся в простейших аналитических моделях методы оптимизации углов примыкания, расстояний между путями одного вида, размеров и форм лесосырьевых баз [5–7, 14] давали типовые решения на основе усредненных характеристик лесосырьевых баз, не учитывающие разнообразия локальных неоднородностей территорий.

Методы линейного, нелинейного и целочисленного программирования позволили осуществлять комплексную оптимизацию положения элементов сети на заданном множестве точек [2, 16]. Основное допущение в соответствующих моделях заключалось в том, что в каждой из множества точек, априори выбранных на территории лесосырьевой базы, собирают древесину с близлежащего участка и затем доставляют на нижний склад. Это достаточно реально при концентрации древесины на погрузочных площадках и с учетом сроков примыкания лесосек.

Другое допущение заключалось в том, что из множества отрезков дорог выбирались те, которые соединяют только фиксированные точки, где сходятся пути или перегружают на автотранспорт древесину. Правда, условия в окрестности каждой из точек и на каждом участке дорог, их соединяющих, можно было учитывать обособленно и довольно точно. Возможности больших ЭВМ позволяли решать задачи с несколькими сотнями неравенств (соответственно, фиксированных точек), довольно подробно отображавших лесотранспортную сеть.

При таких методах выбора наивыгоднейшего варианта сети оказалось возможным учесть неправильность формы лесосырьевой базы предприятий, неоднородность распределения запасов леса и геологических условий строительства дорог и условий вывозки. Однако эти методы имеют и существенные недостатки: невозможно определить оптимальное положение развилки дорог и учесть фактор времени. Первый недостаток можно в некоторой степени исправить итеративными методами оптимизации координат развилки дорог [3], в большей – переходом к модифицированной задаче Штейнера [11]; второй – определением очередности строительства сети дорог с использованием методов динамического программирования [4].

В сравнении с вариантами проектировщиков и при подготовленных ими исходных данных в разных регионах страны оптимизация структуры сети и положения ее элементов на заданном множестве точек методом линейного программирования [2] позволила снизить суммарные затраты (на строительство сетей и вывозку по ним древесины): в Казахском леспромпхозе в среднем на 1,5, Кемском – на 23,1, Ертомском – на 5,8, Зеленодоском – на 10,2 %. При определении оптимальной очередности строительства участков лесотранспортной сети с использованием идеи динамического программирования [4] суммарные приведенные затраты уменьшились на 1,8 %. Решение задачи Штейнера [11] с перебором топологий и оптимизацией координат развилки на реальных сетях давало значительное снижение суммарных затрат: на отдельных фрагментах от 2 до 27 %.

В последние годы произошли кардинальные изменения в видах ответственности и соответственно в организации, технологии и экономике лесопромышленного производства. В целом можно говорить об изменении критериев и значительном расширении спектра производственных и финансово-экономических условий, которые неизбежно влияют на стратегию освоения лесных массивов. В этих условиях необходима разработка таких математических моделей и методов, которые соответствуют новым требованиям и позволяют:

учитывать возможный диапазон масштабов и технологий лесопромышленного производства, а также интересы различных производителей, в том числе и частных предпринимателей с минимальными объемами заготовки древесины;

формировать и комплексно оценивать различные варианты стратегии освоения лесосырьевой базы;

использовать современные методы оценки экономической эффективности вложения инвестиций в транспортное освоение лесосырьевой базы.

5

Учитывая эти требования и используя опыт автоматизированного проектирования сетей лесовозных дорог [1], мы разработали новый подход к решению этой проблемы в условиях ограничения инвестиций, с применением методов оптимизации и финансового менеджмента [8–10]. В основе подхода – формирование множества вариантов стратегии освоения лесосырьевой базы.

Этот подход реализуется в разрабатываемом нами прототипе системы STEIN для персонального компьютера. Система имеет два относительно самостоятельных блока: проектирования и экономического. Процесс формирования множества допустимых вариантов стратегии – итеративный диалоговый процесс, в котором, наряду с автоматизированными расчетами, требуется активное участие специалистов.

Каждая итерация может включать следующие этапы.

1. Работа с блоком проектирования системы STEIN. Для конкретной лесосырьевой базы проектируется сеть лесовозных дорог оптимальной конфигурации с минимизацией затрат на строительство и транспортировку древесины [8].

2. Формирование стратегии освоения лесосырьевой базы на предполагаемый срок функционирования. Каждый вариант включает две составляющие: план очередности освоения [9] и соответствующий ему вариант инвестирования (размер инвестиций, их распределение по годам, условия кредитования и т. д.).

3. Работа с экономическим блоком системы STEIN. Для каждого варианта стратегии освоения рассчитывают основные показатели эффективности использования инвестиций [10]: чистый дисконтированный доход (ЧДД), внутренняя норма доходности (ВНД), индекс доходности (ИД), срок окупаемости (СО).

4. Анализ вариантов стратегии транспортного освоения лесосырьевой базы с использованием полученных показателей и выбор наиболее привлекательных.

5. Оценка финансового риска выбранных вариантов и принятие решения.

Внутри некоторых этапов тоже заложен итеративный перебор. Например, при заданных условиях инвестирования и сроке освоения базы рассматриваются различные планы очередности. Рассчитываются показатели при одном и том же варианте очередности освоения, но различных экономических условиях его реализации. Поэтому, анализируя ряд взаимосвязанных изменений, можно получить не полный цикл этапов. Кроме того, на каждом этапе надо учитывать обратную связь.

Кратко поясним отдельные этапы изложенного подхода и используемые методы.

Для проектирования сети дорог на фиксированных точках запасов древесины как на вершинах графа решается задача Штейнера – Вебера: расширение известной задачи Штейнера для случая потоков с зависящими от них весами [8]. Проект сети дорог представляется моделью в виде некоей плоской реализации ориентированного графа – корневого дерева, дугами которого являются участки дорог, а вершинами – центры запасов древесины в лесных кварталах (фиксированные вершины) и свободно размещаемые развилки (точки Штейнера). В модели заложены оптимизационные методы различных классов и эвристический поиск.

При решении задачи оптимизации сети на разных этапах были преодолены трудности, порожденные рядом усложняющих особенностей объекта: многопараметричность целевой функции и разнородность управляемых параметров, перераспределение потоков при изменении топологии сети, дискретность и структурная зависимость целевой функции из-за дискретности изменения затрат при суммировании потоков в развилках.

Для нахождения локальных экстремумов на фиксированной топологии (построении дерева Штейнера) был выбран приспособленный к нашей задаче алгоритм случайного поиска экстремума многопараметрической функции с самообучением [15].

При поиске глобального экстремума (минимального дерева Штейнера) должна решаться NP-полная задача, которая даже теоретически считалась безнадежной уже при размерности 10 фиксированных вершин, а практически ее не пытались решить и при меньших размерностях. К тому же среди всех деревьев Штейнера на заданном множестве фиксированных вершин лишь незначительная часть неэквивалентна, а подавляющее большинство получается автоморфными перестановками с перенумерацией точек Штейнера. Требовался поисковый алгоритм, исключающий структурно-эквивалентные подзадачи. Для решения этой комбинаторной задачи существенным шагом был переход к дереву с полной топологией и компактным способом ее записи. Был создан оригинальный алгоритм формирования и исчерпывающего избыточного перебора полных топологий, аналогов

которого не удалось найти в литературе. Появилась возможность реализовать на компьютере работу с фрагментами сети размерности до 12 фиксированных вершин. Это позволило с помощью системы STEIN решать более простые подзадачи, перечисленные ниже.

Система STEIN позволяет автоматически производить процедуру преобразования связывающей сети в полное дерево; строить исходное полное дерево на заданном множестве фиксированных вершин геометрически достаточно близко к локальному экстремуму; искать глобальный экстремум в диалоге, используя опыт проектировщика. Среди различных приемов поиска наиболее продуктивной оказалась работа с фрагментами. Возможно автоматическое разбиение полного дерева на фрагменты или эвристическое задание фрагментов различными способами. Выделенный фрагмент решается в автоматическом режиме, как самостоятельная подзадача с полным или выборочным перебором топологий. Разработан эффективный алгоритм фильтрации – отбора сгенерированных топологий и отсечения явно неперспективных вариантов.

В результате работы с блоком проектирования системы STEIN строится схема лесотранспортной сети в виде дерева Штейнера с относительно оптимальной конфигурацией и оптимальным расположением развилок.

Формирование множества допустимых вариантов стратегии можно начинать с реализации какого-то оценочного варианта очередности освоения лесосырьевой базы. Его задают вне системы, исходя из анализа решения, полученного на предыдущем этапе. Для выбранного срока освоения строят некоторый план очередности: каждой дуге проектируемой сети приписывают год окончания строительства соответствующей дороги, каждой фиксированной вершине – год вывозки древесины из соответствующего квартала. Рассчитывают вариант очередности: находят распределенные по годам освоения базы объемы вывозки древесины по всем дугам и соответствующие потоки строительных и транспортных затрат.

Дисконтированные суммарные затраты по каждой дуге за весь срок эксплуатации лесосырьевой базы рассчитывают по формуле (1), суммарные затраты по годам – по формуле (2).

Дисконтированные суммарные затраты на дуге с номером i :

$$S(i, j) = Kd(k)K(j)Ek(i)E(j)L(i) + \sum_{t=k}^n Kd(t)T(j)Et(i)E(j)V(i, t)L(i), \quad (1)$$

где i – номер дуги;

j – категория дороги на дуге i ;

k – год строительства и начала эксплуатации дуги i ;

n – последний год эксплуатации дуги i ;

$K(j)$ – строительные затраты на 1 км дороги категории j ;

$T(j)$ – транспортные затраты на 1 м³ · км дороги категории j ;

$L(i)$ – длина дуги i , км;

$V(i, t)$ – поток по дуге i в год t , м³;

$Ek(i)$ – коэффициент строительных затрат на дуге i ;

$Et(i)$ – коэффициент транспортных затрат на дуге i ;

$E(j)$ – зональный коэффициент развития для дорог категории j ;

$Kd(t)$ – коэффициент дисконтирования года t .

Дисконтированные суммарные затраты на транспортной сети в год t :

$$Su(t) = Sr(t) + Tr(t), \quad (2)$$

где $Sr(t)$, $Tr(t)$ – соответственно дисконтированные суммарные строительные и транспортные затраты года t .

В экономическом блоке системы уточняют необходимые инвестиции и схему финансирования в целом и по годам освоения базы. Определяют план погашения кредита и выплаты процентов. Рассчитывают дисконтированные денежные потоки и находят основные показатели эффективности использования инвестиций: ЧДД, ВНД, ИД, СО – в соответствии с официальными методическими рекомендациями [12]. Анализ этих показателей позволяет отобрать наиболее привлекательные варианты стратегии освоения. В нашем случае вполне корректно ранжирование вариантов по убыванию ВНД. Во-первых, все варианты вложения инвестиций исключают друг друга, ограничены и не допускают большого разброса; во-вторых, денежные потоки, связанные со строительством дорог, являются регулярными; поэтому уравнение поиска ВНД имеет единственный положительный корень. (ВНД представляет внутреннюю процентную ставку; ее находят как корень степенного уравнения, коэффициентами которого являются элементы денежных потоков. Степень уравнения определяется сроком освоения базы.) Ранжирование позволяет сразу отбросить те варианты, у которых ВНД меньше процентной ставки, требуемой инвестором. Окончательное решение принимают после оценки рисков выбранных вариантов, при этом главным критерием служит ЧДД.

Мы полагаем, что подход, реализуемый в прототипе системы STEIN, делает ее инструментом для поиска и выбора оптимального варианта транспортного освоения лесосырьевой базы в новых экономических условиях. Система открыта для дальнейшего расширения или изменения ее функций, возможных по причинам экономического, правового и нормативного порядка. В частности, это относится к экономическому блоку системы, что связано с появлением второй редакции официальных методических рекомендаций [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Г.А. Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта. – Петрозаводск: Карелия, 1978. – 198 с.
2. Борисов Г.А., Герасимов Б.С., Сюкияйнен Р.А. Оптимизация схемы транспортного освоения лесосырьевой базы методами линейного программирования // Лесн. журн. – 1969. – № 2. – С. 123–128. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Борисов Г.А., Земляченко В.Н. Итеративный метод улучшения транспортных сетей лесозаготовительных предприятий // Лесн. журн. – 1971. – № 5. – С. 51–54. – (Изв. высш. учеб. заведений).

4. *Борисов Г.А., Земляченко В.Н.* Определение очередности транспортного освоения лесных массивов // Лесн. журн. – 1973. – № 1. – С. 145–149. – (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Венценосцев Ю.Н.* Основы теории лесопромышленных производств. – М.: Лесн. пром-сть, 1966. – 158 с.
6. *Ильин Б.А.* Проектирование и организация лесозаготовительных предприятий. – М.; Л.: Гослесбуиздат, 1955. – 428 с.
7. *Ильин Б.А., Кувалдин Б.И.* Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог. – М., 1982. – 384 с.
8. *Кукин В.Д., Кузина В.И.* Задача Штейнера и методика проектирования лесотранспортных сетей // Сб. тр. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. – Вып. 1. – С. 71–81.
9. *Кукин В.Д., Кузина В.И.* Реализация концепции очередности освоения лесосырьевой базы в системе STEIN // Методы математического моделирования и информационные технологии: Тр. ИПМИ КарНЦ РАН, 1999. – Вып. 1. – С. 169–174.
10. *Кукин В.Д., Кузина В.И.* Оценка эффективности инвестиций в освоении лесосырьевой базы // Там же. – С. 175–180.
11. *Кукин В.Д., Тяглик Л.В.* Задача Штейнера в приложении к транспортным сетям леспромхозов // Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов: Матер. Всесоюз. симпозиума. – Петрозаводск: КарФ АН СССР, 1979. – С. 50–54.
12. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Утв. Госстроем России, Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госпромом России 31 марта 1994 г. № 7-12/47.
13. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов: Офиц. изд. – 2-я ред. / Руковод. В.В. Коссов, В.И. Лившиц, А.Г. Шахназаров. – М.: ОАО «НПО «Изд-во «Экономика», 2000. – 421 с.
14. *Невесский Н.М.* Новые методы составления планов лесозаготовки лесных массивов. – М.: Гостехиздат, 1930. – Вып.1. – 40 с.
15. *Расстригин Л.А.* Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974. – 630 с.
16. *Суриков В.Т.* Экономико-математическая модель оптимальных схем лесотранспорта // Лесн. журн. – 1988. – № 3. – С. 27–31. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН

Поступила 10.03.99

G.A. Borisov, V.D. Kukin, V.I. Kuzina
**Methods of Searching the Best Profitable Variant
for the Forest Road Network**

The new technique of optimal designing for forest road networks based on the Steiner–Weber problem solution is presented. Heuristic and combinatorial methods, random search and modern methods of estimating the investment efficiency in the market conditions are used.