УДК 630.383

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕЖРЕМОНТНЫХ СРОКОВ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В.

ГОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж,
e-mail: rivelenasoul@mail.ru

В статье рассмотрен процесс оптимизации межремонтных сроков лесовозных автомобильных дорог. В качестве одного из критериев оптимизации предлагается коэффициент функциональности, позволяющий спрогнозировать межремонтные сроки. Приведена методика определения сроков начала ремонта и содержания лесовозных автомобильных дорог.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги, дорожное покрытие, межремонтные сроки, сетевой график, минимальные затраты, продолжительность работ

OPTIMIZATION OF MAINTENANCE PERIOD FOR LOGGING HIGHWAY

Skrypnikov A.V., Kondrachova E.V., Skvortcova T.V.

Voronezh State Academy of Forestry Engineering and Technologies, Voronezh,
e-mail: rivelenasoul@mail.ru

The article describes how to optimize the maintenance period of logging roads. As one of the optimization criteria proposed rate functionality, allowing to predict require repairs. A method for determining the timing of the repair and maintenance of logging roads.

Keywords: timber-roads, pavements, require repairs, the network schedule, minimum cost, duration of work

Эффективная работа лесовозной автомобильной дороги определяется необходимым уровнем технико-эксплуатационного состояния, обеспечивающего надежную и безопасную работу автомобильного транспорта, идеализацию его технических возможностей при оптимальных дорожных затратах. Для обеспечения круглогодичного, бесперебойного, безопасного и удобного движения по дорогам с заданными скоростями и нагрузками необходимо грамотное и эффективное проведение работ по их ремонту и содержанию. Появляется возможность оптимизации межремонтных сроков лесовозных автомобильных дорог.

Теоретический анализ. В качестве одного из критериев оптимизации предлагается коэффициент функциональности.

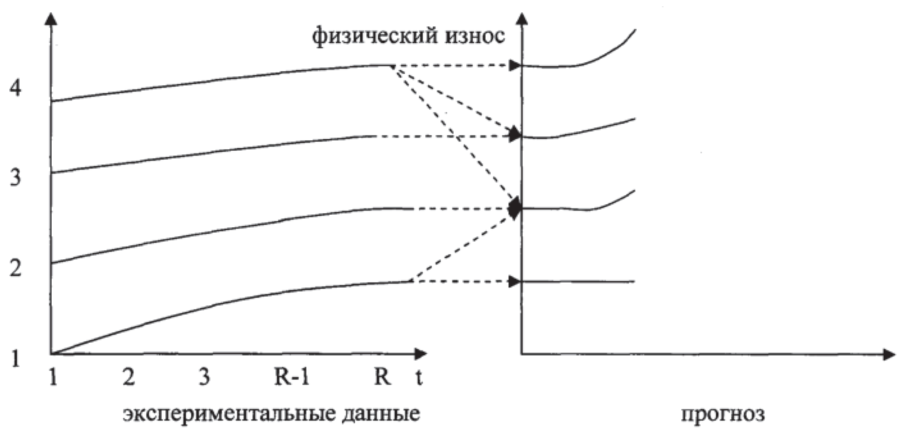
Метод прогнозирования межремонтных сроков по этому коэффициенту состоит из следующих основных этапов [1, 5]:

1-й этап. Вычисление сроков службы всех конструктивных элементов дороги (подстилающий слой, основание) по фактическим результатам диагностики или теоретическим расчётам.

2-й этап. Установление основных конструктивных элементов, влияющих на работу всей дороги.

3-й этап. Вычисление стоимости ремонтных работ C_{p_i}, восстановительной стоимости C_{B_i}.

4-й этап. Построение зависимости коэффициента функциональности дорожного покрытия от времени эксплуатации (рисунок).



Оценка физического износа конструктивных элементов

PDF-TOOLS Click to buy NOW! www.docu-track.com

Определение показателя функциональности конструктивного элемента

$$K_{\text{ф}} = 1 - \frac{C_{p_i}}{C_{B_i}}. \qquad (1)$$

Назначение вида ремонта в зависимости от коэффициента функциональности: 0,6…1,0 – проведение выборочного капитального ремонта. Решение о распределении финансовых средств принимается по результатам решения оптимизационной задачи, критерием которой является максимизация экономического эффекта от проведения ремонтно-восстановительных работ; 0,4…0,6 – проведение комплексного капитального ремонта; 0…0,4 – аварийное состояние.

5-й этап. С помощью графика коэффициента функциональности дорожного покрытия определяются межремонтные сроки, составляются перспективное планирование ремонтов конкретного вида дорожного покрытия и его экономическая эффективность при разных видах материалов дорожного покрытия [3].

Состояние конструктивного элемента в момент времени $T + r$ прогнозируется с использованием сигномиальной функции. Регрессионная модель имеет следующий вид:

$$N_{i,T+r} = \sum_{t=R-L}^{R} \sum_{i=1}^{N} k_{it} b_i \left(N_{it}\right) +$$
$$+ \sum_{t=R-N}^{R} s_t \exp\left(\sum_{i=1}^{N} m_{it} N_{it}\right), \qquad (2)$$

где N – количество конструктивных элементов, может варьироваться в зависимости от типа дороги; T – длительность периода планирования; R – длительность периода эксплуатации дороги; r – момент времени от начала периода планирования, для которого строится прогноз; N_{it} – значение износа конструктивного элементов в момент времени r от начала периода планирования; k_{it} – оценки коэффициентов регрессии линейной части, определяемые по экспериментальным данным; $b_t(N_{it})$ – базисные функции, выбираемые из условия максимальной адекватности модели; s_t и m_{it} – оценки коэффициентов нелинейных составляющих регрессионной зависимости; L, N – количество составляющих линейной и нелинейной частей модели, выбираемые из условия максимальной адекватности.

Методика. При решении задачи распределения финансовых средств учитывается, что стоимость ремонтно-восстановительных работ для любого конструктивного элемента с течением времени изменяется в связи с тем, что увеличивается физический его износ. План любого типа ремонта записывается в виде таблицы. В каждой ячейке таблицы занесены стоимости оценки затрат на ремонт i-го конструктивного элемента.

Обозначения в таблице: $З_{nT}$ – затраты на ремонт i-го конструктивного элемента в момент времени t; $Э_{nT}$ – экономическая выгода от ремонта i-го конструктивного элемента в момент времени t.

План ремонта участков j-й лесовозной автомобильной дороги

Период времени (день, неделя, месяц и т.д.)	Конструктивный элемент			
	Подстилающий слой $i = 1$	Основание $i = 2$	…	Дорожное покрытие $i = n$
1	$З_{11}Э_{11}$	$З_{21}Э_{21}$	…	$З_{n1}Э_{n1}$
2	$З_{12}Э_{12}$	$З_{22}Э_{22}$	…	$З_{n2}Э_{n2}$
…				
T	$З_{1T}Э_{1T}$	$З_{2T}Э_{2T}$		$З_{nT}Э_{nT}$

Оптимизационная задача заключается в следующем:

$$S = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \sum_{t=0}^{T} x_{ijt} \left(Э_{ijt} - З_{ij}\right) \to \max \qquad (3)$$

при следующих ограничениях:

– ограничение на объём финансовых средств

$$S = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \sum_{t=0}^{T} x_{ijt} З_{ij} \le C_t; \qquad (4)$$

– ограничение на количество одновременно проводимых работ

$$\max\left(\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p_{ij}\right) \le P_t, \qquad (5)$$

где P – максимальное количество одновременно проводимых работ; C – объём финансирования ремонтных работ на период планирования.

Ремонт лесовозных автомобильных дорог имеет свои особенности, он может вестись на различных участках и не носить линейный характер. Характерная особенность организации ремонтных работ – множественность возможных решений и их многовариантность. Основная задача заключается в создании условий для эффективного проведения ремонтных работ, под которым подразумевается их выполнение в планируемые сроки при соблюдении ограничений по техническим требованиям и условий на имеющиеся трудовые и материальные ресурсы (использование машин и механизмов) при

PDF-TOOLS Click to buy NOW! www.docu-track.com

определенных качественных показателях (затраты, прибыль и т.д.) [4].

Рассмотрим постановку задачи выбора вариантов выполнения произвольного числа работ, связанных технологической последовательностью выполнения. Причём затраты исполнителей на выполнение работы являются функцией продолжительности выполнения работ $\varphi_j(\tau_i)$, где τ_i – продолжительность i-работы. Функция $\varphi_j(\tau_i)$ имеет минимум в некоторой точке a_i, соответствующей оптимальной продолжительности i-й работы.

Естественно, что в этом случае исполнители заинтересованы в выполнении операции с минимальными затратами, то есть за время a_i. Обозначим $T(a)$ продолжительность ремонта, предусмотренную договором (длина критического пути) при условии. Рассмотрим случай, когда все работы будут выполняться исполнителями за оптимальное время, то есть продолжительность i-й операции равна a_i. Как правило, при этом продолжительность выполнения всего комплекса работ оказывается больше, чем это предусмотрено договором, то есть $T(a) > T_g$, где T_g – требуемая по договору продолжительность проекта. В этом случае возникает задача сокращения продолжительностей работ и, как следствие, увеличение затрат. Для исполнителя очень важно так выбрать варианты сокращения продолжительности выполнения работ, чтобы, с одной стороны, обеспечить выполнение договорных обязательств, а с другой минимизировать свои затраты, направляемые на эти цели.

Продолжительность ремонта можно сократить экстенсивным путём (использование максимального числа строительной техники и рабочих бригад) и интенсивным путём (повышение производительности труда рабочих, лучшее использование строительных машин и механизмов, улучшение организации труда, управления ремонтом и т.д.).

Однако сокращение продолжительности ремонта (строительства) объектов ведёт и к увеличению дополнительных затрат, связанных с насыщением фронта работ дополнительным числом машин и рабочих, увеличиваются транспортные расходы и расходы, связанные с ведением ремонтных работ в 2 и 3 смены и др.

Под технологически максимальной продолжительностью ремонта (строительства) объекта понимается последовательное выполнение всех ремонтных работ, обеспечивающих рациональную возможность выполнения работ, с максимально возможным членением объекта на участки с независимым ведением работ, максимальным насыщением фронта работ материально-техническими и людскими ресурсами.

Сокращение продолжительности ремонта (строительства) объекта от $T_{\max}$ до $T_{\min}$ изменяет себестоимость ремонта (строительства). При постановке задач будем предполагать, что технологическая и организационная зависимости между работами, подлежащими выполнению, отображаются в виде сетевого графика (сети).

Задача о минимальных сроках завершения работ по ремонту (строительству) участков лесовозных автомобильных дорог с учётом дополнительных затрат, направляемых на сокращение времени выполнения работ, складывается из соответствующих затрат, возникающих при выполнении отдельных работ, составляющих весь комплекс.

Обозначим через n число участков ремонта (строительства), а через y_i – число вариантов производства работы i. Каждому варианту производства работ соответствуют своя продолжительность строительства и свои затраты. Общая продолжительность выполнения всего комплекса работ будет зависеть от продолжительности каждой из работ.

Первый вариант будет характеризовать ситуацию, когда участок ремонтируется в нормативные сроки, а вариант с максимальным номером соответствует способу производства работ с максимальной интенсивностью за минимальные сроки. Ремонтные работы разделим на: независимые и последовательные.

Независимые работы. Обозначим через $x_{ij} = 1$, если для i-й работы выбран вариант j и $x_{ij} = 0$ в противном случае. Так как для каждой работы выбирается один вариант, то должно выполняться условие

$$\sum x_{ij} = 1, i = \overline{1,n}. \qquad (6)$$

Обозначим далее: τ_{ij} – продолжительность выполнения работы (ремонта участка) i при варианте j; S_{ij} – затраты на реализацию данного варианта производства работ. Тогда продолжительность комплекса работ определяется величиной

$$P = \max_i \sum_j x_{ij}\tau_{ij} \le P_T, \qquad (7)$$

а суммарные затраты

$$S = \sum_{i,j} x_{ij} S_{ij}. \qquad (8)$$

Задача заключается в определении $x = \{x_{ij}\}$, минимизирующих (8) при ограничениях (7). Решение этой задачи для независимых работ достаточно велико.

Примем без ограничения общности, что для всех i

$$\tau_{i1} > \tau_{i2} > \ldots > \tau_{im},$$

$$S_{i1} > S_{i2} > \ldots > S_{im}.$$

PDF-TOOLS Click to buy NOW! www.docu-track.com

В этом случае для каждой работы определяем вариант с максимальным номером j_i, такой, что $\tau_{ij} \le P_{m_i}$. Совокупность номеров $j_1, j_2, \ldots, j_n$ определяет оптимальное решение задачи с минимальными затратами $S_{\min} = \sum_i S_{ij_i}$. Меняя P_T, можно получить параметрическую зависимость минимальных затрат от продолжительности ремонта.

Последовательные работы. В случае последовательного выполнения работ продолжительность выполнения комплекса работ определяется выражением

$$T = \sum_{ij} x_{ij}\tau_{ij} \le P_T. \tag{9}$$

Задача заключается в определении $\{x_{ij}\}$ при ограничениях уравнений (6) и (9). Для решения применяется метод динамического программирования. Полученные результаты для независимых и последовательных работ применяются для решения задачи в случае агрегируемых графиков. Заметим, что последовательное множество работ можно агрегировать в одну работу с зависимостью затрат от продолжительности, получаемой в результате решения задач минимизации затрат при различных продолжительностях для этого множества.

Параллельное множество работ можно агрегировать в одну работу с зависимостью затрат от продолжительности, получаемой в результате решения задачи минимизации затрат, при различных продолжительностях для этого множества.

Итак, пусть имеется комплекс работ, подлежащих выполнению. Зависимости между работами описываются сетевым графиком. Вершины сетевого графика соответствуют работам, подлежащим выполнению. Дуги соответствуют зависимостям между работами.

Для каждой дуги заданы числа a_{ij} и b_{ij}. Первое число $a_{ij} > 0$ определяет увеличение продолжительности работы j, если зависимость (i, j) нарушается, то есть если работа j начата до окончания работы i. Второе число $b_{ij} \ge 0$ определяет увеличение затрат на выполнение работы j, если зависимость (i, j) нарушается.

Для описанной модели возможны различные постановки задач.

1 задача. Пусть заданы только числа a_{ij}. Требуется определить календарный план с минимальной продолжительности проекта.

2 задача. Пусть заданы только числа b_{ij}. Требуется определить календарный план с минимальными дополнительными затратами.

3 задача. Пусть заданы оба числа a_{ij} и b_{ij}. Определить календарный план, при котором проект выполняется за время T, а увеличение затрат минимально.

Рассмотрим возможные способы решения поставленных задач. Сначала получим алгоритм построения календарного плана с минимальной продолжительностью выполнения комплекса работ. Для этого присваиваем всем работам сетевого графика начальные индексы $\lambda_i = \tau_i,\ i = \overline{1,n}$. Рассматриваем каждую работу i. Обозначим через Q_i – множество работ, предшествующих работе i, то есть в сетевом графике существует дуга (j, i) для $j \in Q_i$. Обозначим через m_i – число дуг, заходящих в вершину i (число элементов множества Q_i). Рассмотрим все подмножества из m_i элементов (их число равно 2^{m_i}). Для каждого подмножества, содержащего вершины $P_i \subset Q_i$, вычисляем

$$t_i(P_i) = \tau_i + \max_{j \in R_i} \lambda_j + \sum_{j \in R_i} a_{ji}. \tag{10}$$

Определяем новый индекс вершины i

$$\lambda_i = \min_{R_i} t_i(P_i). \tag{11}$$

Алгоритм заканчивается, когда все индексы установятся. Конечность алгоритма следует из того, что последовательность индексов для каждого i является возрастающей. С другой стороны, индексы λ_i ограничены величиной

$$T = \tau_i + \sum_{j \in Q_i} a_{ji}. \tag{12}$$

Переходим к исследованию задачи 2. Пусть ограничение на продолжительность выполнения комплекса работ отсутствует. В этом случае задача заключается в определении очередности выполнения работ, при которой дополнительные затраты минимальны.

Для этой цели рассмотрим граф из n – вершин (по числу работ, принятых к реализации). Для вершины i и j соединим дугой (i, j), если работу i рекомендуется завершить раньше начала работы j. Каждой дуге (i, j) припишем пропускную способность $c_k j$, равную потерям при нарушении рекомендуемой очередности реализации работ i и j. Задача заключается в удалении из графа некоторого множества V дуг, такого что полученный частичный граф не будет иметь контуров и сумма пропускных способностей удаленных дуг $C(V)$ будет минимальной. Это соответствует минимизации потерь от нарушения предпочтительной очередности проектов. Множество V назовем разрезом графа, а $C(V)$ – пропускной способностью разреза. Фактически речь идёт об определении перестановки из чисел, где n – число работ. Как известно число таких перестановок $n!$. Таким образом, задача относится к классу задач комбинаторной оптимизации, трудности решения которых известны [2].

Пусть $\pi = (i_1, i_2, \ldots, i_n)$ некоторая перестановка вершин графа. Дугу (i_k, i_S) графа назовём неправильно ориентированной относительно перестановки π, если $k > s$.

Удаление множества неправильно ориентированных дуг V исключает (разрывает) все контуры графа. И наоборот, любому множеству дуг V, разрывающему все контуры графа, соответствует перестановка (возможно несколько перестановок), потенциал которой меньше или равен пропускной способности разреза $C(V)$.

Рассмотрим следующую задачу о минимальном потенциале: определить перестановку, имеющую минимальный потенциал. Опишем алгоритм решения задачи. Без ограничения общности можно считать граф сильносвязанным.

1-й шаг. Определяем все элементарные контуры графа. Выберем произвольную вершину, например вершину 1. Строим прадерево с корнем в вершине 1, пути которого соответствуют элементарным путям графа. Висячие вершины прадерева с номером 1 определяют все элементарные контуры графа, содержащие вершину 1. Эти контуры:

$$\mu_1 = (1,2,3,5,1), \quad \mu_2 = (1,2,5,1),$$

$$\mu_3 = (1,3,5,1), \quad \mu_4 = (1,3,4,2,5,1).$$

Удаляем вершину 1, снова разбиваем граф на сильно связные компоненты (если он кажется не сильно связным) и повторяем описанную процедуру для каждой из сильно связных компонент. В рассматриваемом примере после удаления вершины 1 граф остаётся сильно связным, что легко проверяется. Поэтому выбираем следующую вершину, например, вершину 2 и снова строим прадерево с корнем в вершине 2.

Его висячие вершины определяют все элементарные контуры, содержащие вершину 2. Эти контуры

$$\mu_5 = (2,3,5,4,2), \ \mu_6 = (2,3,4,2), \ \mu_7 = (2,5,4,2).$$

Если удалить вершину 2, то получим граф без контуров. Следовательно, определены все элементарные контуры графа.

2-й шаг. Определим двудольный граф $H(X, Y, V)$, вершины которого X соответствуют дугам исходного графа G, вершина Y – элементарным контурам графа G, а дуги соединяют вершину $(i, j) \in X$ с вершиной $\mu_k \in Y$, если дуга (i, j) принадлежит контуру μ_k. Получили так называемую задачу о покрытии: необходимо определить подмножество дуг U (то есть подмножество U вершин множества X), такое, что каждая вершина множества Y смежная хотя бы с одной вершиной множества U, и сумма минимальна

$$C(V) = \sum_{(i\,j)\in U} C_{ij}. \qquad (13)$$

Дадим формальную постановку задачи. Обозначим через Q_{ij} – множество контуров (то есть вершин множества Y графа H), содержащих дугу (i, j), а через R_j – множество дуг (вершин множества X графа H), принадлежащих контуру μ_j. Введём переменные $x_{ij} = 0$ или 1, причём $x_{ij} = 1$, если вершина $(x, j) \in U$ и $x_{ij} = 0$ в противном случае. Задача заключается в определении $x = \{x_{ij}\}$, минимизирующего

$$C(x) = \sum_{(ij)} c_{ij} x_{ij}, \qquad (14)$$

при ограничениях

$$\sum_{(i,\,j)\in R_k} x_{ij} \geq 1, k = \overline{1,m}, \qquad (15)$$

где m – число контуров. Заменим m ограничений одним:

$$f(x) = \min_k \sum_{(i,j)\in R_k} x_i \geq 1. \qquad (16)$$

Вывод. В расчётах величины вреда межремонтные сроки службы покрытий по критерию износа определяются интенсивностью движения транспортного потока и не зависят от показателей прочности дорожной одежды. В период сезонного ограничения движения транспортный поток уменьшается, что способствует увеличению, а не уменьшению межремонтного срока службы дорожного покрытия.

Так как продолжительность проекта является целым числом, то всегда существует целочисленное решение задачи минимизации затрат, то есть решение, в котором продолжительность всех работ является целым числом. Отмеченное свойство позволяет эффективно решать задачи оптимизации затрат для последовательных и параллельных множеств работ на каждом шаге. Особенно это относится к задаче минимизации для последовательного множества работ, которая в дискретном случае является трудной задачей дискретной оптимизации.

Список литературы

1. Мельничук И.Н. Обоснование очередности реконструкции и капитального ремонта дорог на стадии планирования / И.Н. Мельничук, Н.М. Лизин, Н.И. Гуков // Автомобильные дороги. – 1979. – № 6. – С. 20–21.
2. Могилевич В.И. Основы организации дорожно-строительных работ. – М.: Высш. шк., 1975. – 288 с.
3. Курьянов В.К. Энергосберегающие проектные решения / В.К. Курьянов, Е.В. Кондрашова, Ю.В. Лобанов // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – Вып. 7. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. – С. 57–60.
4. Повышение эффективности функционирования системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» в лесном комплексе / В.К. Курьянов, О.В. Рябова, Е.В. Кондрашова, А.В. Скрыпников, А.Ю. Чувенков. – М.: Изд-во «Флинта», «Наука», 2010. – 130 с.
5. Каганович В.Е. К вопросу оптимизации сроков реконструкции и стадийности строительства автомобильных дорог // Оптимизация сроков реконструкции и стадийности строительства автомобильных дорог. – Омск, 1973. – С. 43–52.

Рецензенты:

Подольский В.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительства автомобильных дорог ГОУ ВПО «ВГАСУ», г. Воронеж;

Сушков С.И., д.т.н., профессор, директор «Теллермановское опытное лесничество» Института лесоведения РАН, Воронежская обл.

Работа поступила в редакцию 04.04.2011.