

## Формирование оптимальных схем этапного развития лесовозных автомобильных дорог

С.Ю. Саблин<sup>1а</sup>, И.А. Высоцкая<sup>1b</sup>, А.В. Скрыпников<sup>1c</sup>, П.В. Тихомиров<sup>2d</sup>, А.Н. Брюховецкий<sup>3e</sup>, А.Ю. Жук<sup>4f</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Брянский государственный инженерно-технологический университет, пр. Станке Димитрова, 3, Брянск, Россия

<sup>3</sup> Луганский национальный аграрный университет, городок ЛНАУ, 1, Луганск, ЛНР

<sup>4</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> sablinSYu@mail.ru, <sup>б</sup> i.a.trishina@gmail.com, <sup>с</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru,

<sup>д</sup> vtichomirov@mail.ru, <sup>е</sup> bruhoveckiy@rambler.ru, <sup>ф</sup> zhuk30@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6521-9570>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>,

<sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>ф</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Статья поступила 11.01.2021, принята 19.01.2021

*Определение эффективности капитальных вложений при планировании оптимальной схемы развития лесовозной автомобильной дороги имеет целью выбор и экономическое обоснование наилучшего варианта развития сети автомобильных дорог с учетом решения технико-эксплуатационных и социально-экономических задач в данном плановом периоде и в генеральной перспективе, установление очередности и сроков строительства и реконструкции отдельных звеньев сети автомобильных дорог и объектов. В настоящей работе предложена и обоснована методика определения экономической эффективности и оптимизации формирования оптимальной схемы этапного развития лесовозной автомобильной дороги. Так как при расчетах эффективности капитальных вложений обязателен комплексный подход, т. е. необходим учет затрат и эффектов не только в лесном дорожном хозяйстве, но и на лесовозном автомобильном транспорте, то, исходя из общности задач, возникающих при этом, за основу разработки методики расчета оптимальных затрат принят подход, используемый при формировании оптимальных схем этапного развития железнодорожных линий, так как в настоящее время наиболее фундаментальные наработки по проектированию дорог имеются именно в данной отрасли. За основу принят метод расчлененного анализа, предполагающий разделение целевой функции на попарные переходы из одного состояния в другое. В качестве целевой функции выбраны суммарные затраты при двухэтапной схеме перехода из низшего состояния в более высокое, а в качестве критерия — ее минимум. Определены целесообразность включения в общую схему каждого из технических состояний, последовательность улучшения технического состояния дороги, оптимальные сроки перехода из одного состояния в другое.*

**Ключевые слова:** лесовозные автомобильные дороги; метод расчлененного анализа; двухэтапная модель распределения затрат.

## Formation of optimal schemes for the staged development of logging roads

S.Yu. Sablin<sup>1а</sup>, I.A. Vysotskaya<sup>1b</sup>, A.V. Skrypnikov<sup>1c</sup>, P.V. Tichomirov<sup>2d</sup>, A.N. Bryukhovetskiy<sup>3e</sup>, A.Yu. Zhuk<sup>4f</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolution Ave., Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Bryansk State Engineering and Technological University; 3, Stanke Dimitrov Pros., Bryansk, Russia

<sup>3</sup> Luhansk National Agrarian University; 1, LNAU Town, Luhansk, Luhansk People's Republic

<sup>4</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> sablinSYu@mail.ru, <sup>б</sup> i.a.trishina@gmail.com, <sup>с</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru,

<sup>д</sup> vtichomirov@mail.ru, <sup>е</sup> bruhoveckiy@rambler.ru, <sup>ф</sup> zhuk30@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6521-9570>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>,

<sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>ф</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Received 11.01.2021, accepted 19.01.2021

*Determination of the efficiency of capital investments when planning the optimal scheme for the development of a timber road is to select and economically substantiate the best option for the development of the road network, taking into account the solution of technical, operational and socio-economic problems in this planning period and in the general perspective, setting the priority and timing of construction and reconstruction of individual links of the road network and facilities. In this work, a method is proposed and substantiated.*

ated for determining economic efficiency and optimizing the formation of an optimal scheme for the staged development of a timber road. Since when calculating the efficiency of capital investments, an integrated approach is required, namely, it is necessary to take into account the costs and effects not only in forestry, but in timber road transport, then, based on the generality of the tasks arising in this case, the approach used in the formation of optimal schemes for the staged development of railway lines is taken as the basis for developing as currently the most fundamental road design developments are in this industry. The method of dismembered analysis is adopted as a basis, which implies dividing the objective function into pairwise transitions from one state to another. As an objective function, the total costs were selected for a two-stage scheme of transition from a lower state to a higher one, and as a criterion - its minimum. The expediency of including each of the technical conditions in the general scheme, the sequence of increasing the technical condition of the road, the optimal time for the transition from one state to another are determined.

**Keywords:** logging roads; disaggregated analysis method; two-stage cost allocation model.

**Введение.** Строительство сети лесовозных дорог обеспечивает доступ к лесным ресурсам и является одной из наиболее затратных статей расходов для лесозаготовительных предприятий. Дороги относятся к разряду капиталоемких линейно протяженных инженерных объектов, проектирование которых представляет во времени и пространстве сложный и многодельный процесс. Основой формообразования будущей дороги является ее трасса, а очертания этой трассы во многом определяют технические и транспортно-эксплуатационные качества будущей дороги.

Процесс проектирования лесовозных автомобильных дорог включает в себя технологическую последовательность проектных операций, что обуславливает необходимость разработки научно обоснованных методов проектирования и оптимизации лесотранспортной сети. При формировании оптимальной схемы развития лесовозной автомобильной дороги и выборе ее рационального положения на местности инженер сталкивается с необходимостью учитывать особенности рельефа, физико-географических процессов и явлений как факторов, определяющих в первую очередь стоимость затрат на строительство лесовозной автомобильной дороги. Как следствие, стоит задача рационального развития транспортной схемы.

Достижение цели системы технико-экономического обоснования обеспечивается формированием оптимальной схемы развития лесовозной автомобильной дороги в отношении геометрических элементов [1–7]. Под формированием оптимальной схемы следует понимать определение характеристик продольного профиля, коэффициента развития трассы, начальной ширины проезжей части и сроков их этапного изменения. Необходимым критерием при этом является минимум целевой функции сравнения вариантов при переходе из одного состояния (этапа) в другое.

Проведенный анализ позволил разработать общую методологию определения формирования оптимальных схем этапного развития строительства автомобильных дорог, учитывая затраты при эксплуатации дороги и время перехода из одного состояния в другое.

**Выбор экономически рациональной схемы развития лесовозной автомобильной дороги.** Общий характер задач, возникающих при проектировании железных и лесовозных автомобильных дорог, дает основание использовать для формирования схем развития лесовозных автомобильных дорог идеи методов, разработанных на железнодорожном транспорте. В [8; 9] предложен ряд методов формирования оптимальных схем этапного развития железнодорожных линий.

Выбор экономически рациональной схемы развития лесовозной автомобильной дороги сводится к решению комбинаторной задачи, в результате которого из множества возможных технических состояний выбирается некоторое подмножество с одновременным выявлением в выбранном подмножестве таких сроков перехода из состояния в состояние, при которых значение критерия стоимости затрат будет равно абсолютному минимуму по сравнению со значением критерия при других подмножествах и сроках перехода.

Увеличение транспортно-эксплуатационных затрат [10; 11] по мере роста интенсивности движения на лесовозных автомобильных дорогах является аддитивным процессом. Поэтому для решения задач формирования схем могут быть применены основы метода, разработанного А.П. Кондраченко и носящего название «метод расчлененного анализа». Принципы метода расчлененного анализа в совокупности с элементами метода направленного многомерного поиска, разработанного И.В. Турбиным [12] активно используются в методике формирования оптимальных схем этапного овладения железнодорожными перевозками.

Расчлененный анализ предполагает разделение целевой функции на попарные переходы из низшего состояния в более высокое и может быть представлено следующим образом [13]:

$$C = K_0 + C_{12} + C_{23} + \dots + C_{ij} + \dots + C_{in} + \sum_1^{T_p} \vartheta_t^{(n)} \eta_i, \quad (1)$$

где  $K_0$  — первоначальные единовременные затраты;

$$C_{12} = K_{12} \eta_{t12} + \sum_1^{t_{12}} (\vartheta_t^{(1)} - \vartheta_t^{(2)}) \eta_t;$$

$$C_{23} = K_{23} \eta_{t23} + \sum_1^{t_{23}} (\vartheta_t^{(2)} - \vartheta_t^{(3)}) \eta_t;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$C_{ij} = K_{ij} \eta_{tij} + \sum_1^{t_{23}} (\vartheta_t^{(i)} - \vartheta_t^{(j)}) \eta_t;$$

$K_{ij}, K_{12}, K_{23}$  — единовременные затраты, необходимые для перехода из первого состояния во второе, из второго в третье и т. д.;  $\vartheta_t^{(1)}, \vartheta_t^{(2)} \dots \vartheta_t^{(n)}$  — ежегодные затраты при эксплуатации дороги в соответствующем состоянии;  $T_p$  — принятые сроки сравнения вариантов;  $t_{ij}$  — год перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ ;  $\eta_i$  — коэффициент эффективности текущих затрат;  $\eta_{tij} = \frac{1}{(1+E)^{t_{ij}}}$  — коэффициент эффективности отдаления затрат;  $E$  — коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений.

Последний член формулы (1) выражает сумму эксплуатационных затрат, связанных с переходом из последнего состояния на следующее за ним.

Величины  $C_{ij}$  определяют затраты, вызванные отдалением срока перехода из менее мощного состояния в более мощное.

Слагаемое  $K_{ij}\eta_{ij}$  определяет величину дополнительных капитальных вложений при переходе из состояния  $i$  в состояние  $j$  в год  $t_{ij}$ , а слагаемое:

$$\sum_1^{t_{ij}} (\varepsilon_t^{(i)} - \varepsilon_t^{(j)})$$

равно сумме потерь в ежегодных расходах, которые возникают при эксплуатации дороги в менее мощном состоянии до года перехода в более мощное состояние. С отдалением года перехода  $t_{ij}$  первое слагаемое уменьшается, а второе увеличивается, и функция  $C_{ij}$  является экстремальной функцией, выражающей целесообразность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ . Год перехода, при котором величина критериальной функции  $C_{ij}$  минимальна, является экономически рациональным годом повышения технического состояния.

После того, как для каждой пары технических состояний определены  $t_{ij}$  и соответствующие ему значения  $C_{ijmin}$ , составляется общая схема развития дороги в соответствии с формулой (1).

На основе принципов динамического программирования [14–16] определяется целесообразность включения в общую схему каждого из технических состояний и таким образом определяется последовательность повышения технического состояния дороги, обеспечивающая минимум выражения (1).

Оптимальные сроки перехода из одного состояния в другое рекомендуется определять на основе выражения:

$$\eta_t K_{ij} = \Delta \varepsilon,$$

где  $\Delta \varepsilon$  — разница в годовых эксплуатационных расходах по двум состояниям.

Следующим этапом формирования оптимальной схемы является нанесение определенных сроков перехода на специальный график и подсчет величины критерия оптимальности по всем возможным схемам с последующим выбором рациональной схемы по наименьшей величине суммарных приведенных затрат.

Применение в качестве критерия минимума приведенных суммарных затрат позволяет использовать рекомендации [17–19] для практических расчетов при проектировании геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог.

#### Литература

1. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю., Ломакин Д.В. Автоматизированные уровни управления лесовозной автомобильно-дорожной системой // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 27–31.
2. Чернышова Е.В., Скрыпников А.В., Самцов В.В., Абасов М.А. Лесовозные автомобильные дороги в транспортной

В качестве базовой модели рассмотрим двухэтапную модель распределения затрат. На первом этапе все затраты распределяются на операции, а на втором — стоимость операций относится на объекты затрат. Определение оптимальных сроков перехода из одного технического состояния в более высокое производится по формуле, выражающей суммарные затраты при двухэтапной схеме [11]:

$$C = 1,1(K_i - K_j)ze^{-Et} + \sum_{t=1}^t 0,365N_0\lambda e^{-Et}S_i(t)z + \sum_{t=1}^{T_p=30} 0,365N_0\lambda e^{-Et}S_j(t)z,$$

где  $K_i$  и  $K_j$  — первоначальные капитальные вложения, необходимые для введения низшего состояния  $i$  и высшего состояния  $j$ ;  $z$  — длина трассы;  $S_i(t)$  и  $S_j(t)$  — себестоимость перевозок, соответствующие эксплуатации состояния  $i$  и состояния  $j$ .

В расчетную схему включаются несколько вариаций поперечного профиля и определенное количество вариаций продольного профиля и коэффициента развития трассы. Поэтому алгоритм расчета оптимальных сроков позволяет составить любые сочетания элементов технического состояния для данного расчетного случая.

Расчетный случай характеризуется следующими факторами:

1. Заданными размерами начальной интенсивности движения, функцией ее ежегодного прироста и количеством легковых автомобилей в потоке.
2. Рельефом местности, характеризуемым параметрами рельефа [20].
3. Строительными расходами на 1 м<sup>2</sup> дорожной одежды, на 1 тыс. м<sup>3</sup> земляных работ.

Изменение хотя бы одного из указанных факторов приводит к формированию другого расчетного случая.

**Выводы.** При проектировании и развитии сети лесовозных автомобильных дорог следует учитывать технико-экономическое обоснование с учетом взаимосвязанного выбора всех параметров проектируемой дороги. Методы расчлененного анализа используемые для решения задачи формирования оптимальной схемы этапного развития лесовозных автомобильных дорог, позволяют оптимизировать затраты, учитывая при этом переходы из одного состояния в другое. В качестве целевой функции выбраны суммарные затраты при двухэтапной схеме перехода из низшего состояния в более высокое, а в качестве критерия — ее минимум. Экономичность и оптимальность принимаемых проектных решений достигается и благодаря методам математического моделирования и оптимизации, применение которых возможно лишь в условиях системной дальнейшей автоматизации проектных работ.

сети лесопромышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 2 (368). С. 95–101.

3. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678–694.

4. Умаров М.М., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю. Применение цифровых моделей местности для трассирования лесных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 2 (362). С. 58–69.
5. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 726. P. 654–667.
6. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Levushkin D.M., Nikitin A.A., Zaikin A.N. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed // Journal of Physics: Conference Series. The proceedings International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 2019. P. 32–41.
7. Рябова О.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Тихомиров П.В. Изучение географической среды для целей дорожного проектирования // Науч. журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 84–95.
8. Богданов А.И. Математическая модель плана трассы новых железных дорог // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2019. № 7. С.17–23.
9. Кантор И.И. Изыскание и проектирование железных дорог. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 288 с.
10. Быстрянец Е.В. Исследование технологии экспертной оценки качества информационного обеспечения автомобильного транспорта // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 9. С. 429–432.
11. Борисов В.А., Камусин А.А., Скрыпников А.В., Дорохин С.В. Программа оценки и прогнозирования эксплуатационных свойств асфальтобетона при устройстве дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2014618507 26.06.2014.
12. Турбин И.В. Проектирование новых железных дорог и реконструкции эксплуатируемых линий: метод. указания к дипломному проектированию. М.: МИИТ, 1986. 48 с.
13. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.
14. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
- industry enterprise // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 2 (368). P. 95–101.
3. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678–694.
4. Umarov M.M., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Mikova E.YU. Application of digital terrain models for tracing forest highways // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2018. № 2 (362). P. 58–69.
5. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 726. P. 654–667.
6. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Levushkin D.M., Nikitin A.A., Zaikin A.N. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed // Journal of Physics: Conference Series. The proceedings International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 2019. P. 32–41.
7. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tihomirov P.V. Study of the geographical environment for road design purposes // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 1 (57). P. 84–95.
8. Bogdanov A.I. Mathematical model of the route plan of the new railways // Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznih dorog. 2019. № 7. P.17–23.
9. Kantor I.I. Railway survey and design. M.: IKC «Akademkniga», 2003. 288 p.
10. Bystryancev E.V. Research of the technology of expert assessment of the quality of information support for road transport // Automation and modern technology. 2017. V. 71. № 9. P. 429–432.
11. Borisov V.A., Kamusin A.A., Skrypnikov A.V., Dorohin S.V. Program for assessing and predicting the performance properties of asphalt concrete in the construction of pavements for timber haul roads. Certificate of registration of the computer program RUS 2014618507 06/26/2014.
12. Turbin I.V. Design of new railways and reconstruction of existing lines: metod. ukazaniya k diplomnomu proektirovaniyu. M.: MIIT, 1986. 48 p.
13. Litvinov A.S. Handling and stability of the car. M.: Mashinostroenie, 1971. 416 p.
14. Bystryancev E.V. Research of the technology of expert assessment of the quality of information support for road transport // Automation and modern technology. 2017. V. 71. № 9. P. 429–432.

#### *References*

1. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Mikova E.YU., Lomakin D.V. Automated levels of management of the timber haul road system // Automation and modern technology. 2019. V. 73. № 1. P. 27–31.
2. Chernyshova E.V., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Abasov M.A. Timber highways in the transport network of a timber