

# ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.1

© А. И. Беляев, канд. техн. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
E-mail: aibelyaev@mail.ru

© А. В. Терентьев, канд. техн. наук, доцент  
(Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет (МАДИ))  
E-mail: terentich1@rambler.ru

© А. Е. Пушкарёв, д-р техн. наук, профессор  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
E-mail: pushkarev-agn@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-123-127

© A. I. Belyaev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University of Architecture  
and Civil Engineering)  
E-mail: aibelyaev@mail.ru

© A. V. Terent'ev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Moscow State Automobile  
and Roads Technical University (MADI))  
E-mail: terentich1@rambler.ru

© A. E. Pushkarev, Dr. Sci. Tech., Professor  
(Saint Petersburg State University of Architecture  
and Civil Engineering)  
E-mail: pushkarev-agn@mail.ru

## ОЦЕНКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДОРОЖНО- СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ

### EVALUATION OF THE METHODS FOR RESTORING THE COMPONENTS OF ROAD-BUILDING MACHINES IN A MULTI-CRITERIA SETTING

Рассматривается оценка подходов при определении метода и технологии восстановления деталей дорожно-строительных машин. В математическом аспекте существующие подходы к выбору метода восстановления деталей дорожно-строительных машин выходят на необходимость решения задач в многокритериальной постановке. Проанализированы решения на этапе выбора метода восстановления деталей и на этапе формирования общей структуры технологического процесса. Новый подход позволяет достигать максимальной эффективности в структурировании технологического процесса восстановления деталей дорожно-строительных машин. Это структурирование производится по ряду обоснованных критериев при интегрировании метода районирования по принципу соблюдения соотношения вероятностей возможных состояний среды исследования в решение задачи динамического программирования. Достигается определение оптимальной траектории перехода детали из исходного в необходимое с точки зрения качества.

*Ключевые слова:* дорожно-строительная машина, восстановление детали, критерий, многокритериальный метод, метод районирования, динамическое программирование, принцип Беллмана.

The paper considers the evaluation of approaches at determining the method and technology of restoring the road-building machine components. In the mathematical aspect, the existing approaches to selecting the method of restoring of road-building machine components lead to realization of the need of solving the problems in a multi-criteria formulation. The authors have analyzed the solutions at the stage of choosing the method of the machine components' restoration and at the stage of formation of the general structure of the technological process. The new approach allows achieving the maximum efficiency in structuring the technological process of restoring the road-building machine components. This structuring is done for a number of valid criteria when integrating the zoning method based on the principle of observing the ratio of the probabilities of possible states of the research environment to the solution of the dynamic programming problem. It is possible to determine the optimal trajectory of transition of the component from the initial point to the necessary from the quality point.

*Keywords:* road construction machine, restoration of components, criterion, multi-criteria method, zoning method, dynamic programming, Bellman principle.

Проблема теоретического обоснования выбора метода восстановления деталей дорожно-строительной техники рассматривалась давно, изначально для автомобильной техники, о чем говорят работы таких известных ученых, как

В. А. Шадричев [1], В. В. Ефремов [2], В. И. Казарцев, Е. Л. Воловик и др.

Авторы [3] выделили три основных метода выбора технологического процесса восстановления детали, отличающихся различной степенью

учета технических и экономических показателей. Первый метод основан на расчетах полной себестоимости восстановления детали различными способами и сопоставлении их результатов. По второму методу сравнивают между собой комплексные величины в виде отношений технологических затрат к ресурсу деталей — новой и восстановленной. В качестве базового показателя принимают указанное отношение для новой детали. Третий метод учитывает значения комплексного показателя как функции трех критериев: применимости, долговечности и технико-экономического.

В большинстве работ, посвященных данной проблеме [4–7], для выбора оптимального технологического процесса восстановления деталей машин автомобилей либо дорожно-строительных или других машин использовали критерии, учитывающие в основном экономические факторы.

В работе [1] автор обосновал критерии выбора рационального способа восстановления детали в зависимости от различных факторов. В частности, это конструктивно-технологические особенности и условия работы деталей, величина их износа, эксплуатационные свойства самих способов, определяющих долговечность восстановленных деталей, и стоимость восстановления. Для оценки способа автором предложены частные критерии применимости, долговечности и экономичности. Окончательный выбор способа проводится с помощью технико-экономического критерия, связывающего долговечность детали с экономикой ее восстановления, по формуле

$$C_B \leq k_D C_H,$$

где  $C_B$  — стоимость восстановления детали;  $k_D$  — коэффициент долговечности восстановленной детали как отношение долговечностей восстановленной и новой детали;  $C_H$  — стоимость новой детали.

В формуле превалирует критериальный подход, который удобен и прост в использовании, но существенно суживает выбор способа восстановления. Для выбора технологии восстановления детали во всех известных способах связывают долговечность детали с экономикой, и делают это введением конкретных критериев. Например, В. А. Шадричевым предложены для оценки

выбираемого способа восстановления деталей частные критерии: применимости, долговечности и экономичности. У таких подходов есть множество недостатков. При этом показатели долговечности, введенные как составная часть в объем содержания критериев восстановления деталей, затрудняют их применение заводскими специалистами. Так, разработка технологических процессов восстановления детали с учетом величин послеремонтной наработки требует длительных исследований изменения размеров, зазоров и натягов в сопряжениях, формы и взаимного расположения поверхностей и других параметров во время эксплуатации отремонтированных агрегатов. В результате длительность таких исследований превышает приемлемые сроки технологической подготовки восстановительного производства [1, 7].

Авторы [8] предлагают оценивать конкурентные способы восстановления деталей с точки зрения качества, используя конструктивные и технологические характеристики деталей, учитывающие наиболее важные признаки: форму, размеры, толщину покрытия, твердость поверхности, усталостную прочность элементов детали, характер действующих нагрузок. На основании этих признаков определяют возможные способы восстановления и их удельные показатели: энергоемкость, материалоемкость, трудоемкость, себестоимость и относительную долговечность на единицу площади восстанавливаемой поверхности.

Существующие теории выбора восстановления деталей машин определяют, главным образом, только принципиальную возможность применения способов восстановления без учета ресурса восстановленных деталей и экономической эффективности восстановления.

На основании анализа источников, в которых решается вопрос выбора оптимального процесса восстановления деталей, можно сделать вывод, что предложенные методы выбора способа и оптимизации технологии восстановления детали обеспечивают необходимое качество детали, учитывая, в основном, критерий наименьших затрат на реализацию процесса.

Авторы [8] предлагают решать задачу выбора способа восстановления детали, отвечающего комплексному технико-экономическому критерию.



рию, и структуры технологического процесса на основе графового представления возможных вариантов сочетания технологических операций, обеспечивающих минимальное значение целевой функции. Сначала составляется морфологическая матрица основных операций технологического процесса восстановления деталей машин. Таблица формируется с разбивкой на типы операции, которые распределяются по видам. Затем присваиваются номера, которые становятся координатами вершин графа. Множество вершин графа соответствует множеству составляющих операций. Кратчайший путь между указанными вершинами определяется путем решения рекуррентного уравнения в каждой вершине графа. Выбранные на графе направления движения из его вершин обозначаются стрелками. Оптимизация задачи заключается в поиске *кратчайшего пути* из вершины верхнего ряда в одну из вершин нижнего ряда графа, и соответственно подмножество вершин на этом пути определяет оптимальный состав операций технологического процесса. Значение целевой функции проставляется в верхней вершине графа.

Автор [6] развил данную систему выбора способа восстановления детали введением значений длин дуг графа, которые приведены в их разрывах. Предложенный метод выбора технологического процесса восстановления детали основан на учете многообразия освоенных и гипотетически возможных составляющих способов создания ремонтных заготовок, обработки и упрочнения, удовлетворяет установленным ограничениям по качеству и производительности и обеспечивает наименьшие затраты на свою реализацию.

Проанализируем сказанное и сформулируем выводы:

**1. На этапе выбора метода восстановления деталей.** Существующие подходы к выбору метода восстановления деталей дорожно-строительных машин неизбежно сталкиваются с необходимостью решения задач в многокритериальной постановке. При этом, как правило, применяются распространенные методы сведения многокритериальных задач к однокритериальным (методы использования составных критериев), а именно [15, 16]:

1) максимизируют сумму критериев:

$$\sum_{i=1}^m k_i \rightarrow \max;$$

2) максимизируют произведение критериев:

$$\prod_{k=1}^m k_i \rightarrow \max;$$

3) максимизируют «взвешенную» сумму критериев:  $\sum_{i=1}^m c_i k_i \rightarrow \max$ , где  $c_i$  — «вес» (важность)  $i$ -го показателя эффективности;

4) если ряд критериев необходимо максимизировать (например, первые  $q$  критериев), а оставшиеся  $(m - q)$  критериев необходимо минимизировать, то используют дробь:

$$\prod_{i=1}^q k_i / \prod_{i=q+1}^m k_i \rightarrow \max.$$

*Все эти способы имеют один существенный недостаток: при использовании составных критериев недостаток в одном критерии компенсируется за счет другого [17].* Это объясняется тем, что в связи с интенсивным развитием технических систем, расширением спектра и увеличением сложности решаемых ими задач многокритериальная постановка является наиболее естественной, при этом число возможных решений достаточно велико. Кроме того, важен именно многокритериальный подход, поскольку стоит задача выбора технологии восстановления детали дорожно-строительной машины по разным критериям эффективности. Следовательно, целесообразно найти способ, позволяющий эффективно определять рациональные (конкурентоспособные) варианты эффективных решений. Наиболее полную картину возможных решений предоставляет метод нахождения множества эффективных планов (множества Парето), так как использование этого метода позволяет сравнить между собой все конкурентоспособные варианты [14]. Решения, полученные другими (вышеуказанными) способами, являются отдельными точками на множестве Парето (т. е. являются его частными случаями). При этом следует отметить, что ни одно решение, найденное с помощью множества Парето, не может быть улучшено по одному критерию без ущерба другому критерию. Окончательный выбор решения из множества Парето можно осуществить, применяя *метод районирования по принципу соблюдения иерархи-*

ческого соотношения вероятностей возможных состояний среды исследования [12, 13].

**2. На этапе формирования общей структуры технологического процесса.** При определении последовательности допустимых (эффективных) методов восстановления деталей, как правило, формируются конечные ориентированные графы, представленные в виде возможных вариантов сочетания технологических операций с целевой функцией затрат на их выполнение. При этом теряется важная особенность оптимизации последовательности выполняемых работ: *необходимо выбирать управление на каждом шаге так, чтобы эффект на этом шаге плюс максимальный эффект на последующих шагах был наибольшим.* Достичь необходимого результата возможно, применяя методы динамического программирования для получения оптимальной траектории перемещения детали из исходного состояния в конечное, основанные на принципе Беллмана.

В итоге можно констатировать, что *достижение максимальной эффективности в структурировании технологического процесса восстановления деталей дорожно-строительных машин по ряду обоснованных критериев возможно при использовании метода районирования по принципу соблюдения соотношения вероятностей возможных состояний среды исследования для решения задачи динамического программирования при определении оптимальной траектории перехода детали из исходного в необходимое.*

### Библиографический список

1. Шадричев В. А. Основы технологии автостроения и ремонта автомобилей. Л.: Машиностроение, 1976. 560 с.
2. Ефремов В. В. Ремонт автомобилей. М.: Транспорт, 1965. 315 с.
3. Филатов М. И., Славненко В. П. Теоретическое обоснование метода восстановления деталей автомобиля на основе информационно-энергетической оценки // Вестник ОГУ. 2011. № 10 (129). С. 151–155.
4. Кудряшов Е. А., Смирнов И. М. К выбору рационального способа восстановления работоспособности изношенных поверхностей деталей // Известия Юго-Западного гос. ун-та. 2014. № 1. С. 8–15. Сер.: «Техника и технологии».
5. Иванов В. П. Выбор способа восстановления деталей // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 9–17.

6. Бондарева Г. И. Системный анализ объектов, функций и ресурсов в процессах восстановления деталей машин // Вестник МГАУ. 2010. № 2. С. 119–124.

7. Лузан С. А. Критерий выбора способа восстановления деталей машин и определение рационального маршрута технологии // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2017. Вып. 183. С. 45–56.

8. Пантелеенко Ф. И., Лялякин В. П., Иванов В. П., Константинов В. М. Восстановление деталей машин / под ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.

9. Евтюков С. А. Совершенствование конструкций строительных машин: отчет. ЛИСИ. № ГР80007140. Л., 1980. 120 с.

10. Репин С. В., Зазыкин А. В., Кротова Н. Н., Савельев А. В. Метод планирования ремонта транспортно-технологических машин // Строительные дорожные машины. 2017. № 3. С. 53–57.

11. Репин С. В., Зазыкин А. В., Рулис К. В., Ховалыг Н.-Д. К. Методика обновления регионального парка транспортно-технологических машин на основе экономических критериев // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 209–217.

12. Терентьев А. В. Развитие метода районирования // Материалы 4-й междунар. науч.-практ. конф. «Инновации на транспорте и в машиностроении». СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. С. 127–130.

13. Prudovskiy V. D., Terentiev A. V. Investigation methods for «current repairs labour-intensiveness» factor for a vehicle // Life Science Journal. 2014. № 11(10s). Pp. 307–310.

14. Терентьев А. В., Прудовский Б. Д. Методы определения множества Парето в некоторых задачах линейного программирования // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 86–90.

15. Терентьев А. В. Многокритериальный показатель качества автомобиля // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 1 (48). С. 201–204.

16. Терентьев А. В. Методы решения автотранспортных задач // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/125-19863>

17. Терентьев А. В., Прудовский Б. Д. Методы принятия решений в условиях неопределенного состояния «внешней среды» // Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. (26–27 мая 2016 г.), СПбГАСУ. СПб., 2016. С. 145–149.

### References

1. Shadrichev V. A. *Osnovy tekhnologii avtostroeniya i remonta avtomobile* [Basics of the technology of



automotive engineering and machine repairs]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976, 560 p.

2. Efremov V. V. *Remont avtomobiley* [Automobile repairs]. Moscow, Transport Publ., 1965, 315 p.

3. Filatov M. I., Slavnenko V. P. *Teoreticheskoe obosnovanie metoda vosstanovleniya detaley avtomobilya na osnove informatsionno-ehnergeticheskoy otsenki* [Theoretical justification of car parts repair method on the basis of information and power assessment]. *Vestnik OGU – Bulletin of OSU*, 2011, no. 10 (129), pp. 151–155.

4. Kudryashov E. A., Smirnov I. M. *K vyboru ratsional'nogo sposoba vosstanovleniya rabotosposobnosti iznoshennykh poverkhnostey detaley* [To the selection of a rational way of maintenance of worn-out surfaces of parts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta. Seriya «Tekhnika i tekhnologii» – Bulletin of the Southwest State University. Ser. “Engineering and Technologies”*, 2014, no. 1, pp. 8–15.

5. Ivanov V. P. *Vybor sposoba vosstanovleniya detaley* [Choosing the way of parts` repair]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 9–17.

6. Bondareva G. I. *Sistemnyy analiz ob'ektov, funktsiy i resursov v protsessakh vosstanovleniya detaley mashin* [The system analysis of objects, functions and resources in the process of car parts repair]. *Vestnik MGAU – Bulletin of MSAU*, 2010, no.2, pp. 119–124.

7. Luzan S. A. *Kriteriy vybora sposoba vosstanovleniya detaley mashin i opredelenie ratsional'nogo marshruta tekhnologii* [Criterion of selecting the technique of repairing parts of cars and definition of a rational route of technology]. *Visnik KhNTUSG im. P. Vasilenka – Bulletin of KhNTUSG named after P. Vasilenok*, 2017, no. 183, pp. 45–56.

8. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P., Konstantinov V. M. *Vosstanovlenie detaley mashin*. [Machine parts repair]. Ed. by Ivanov V. P. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 672 p.

9. Evtyukov S. A. *Sovershenstvovanie konstruksiy stroitel'nykh mashin. Otchet* [Improvement of designs of construction machines. Report]. LISI Publ., no. GR80007140, Leningrad, 1980, 120 p.

10. Repin S. V., Zazykin A. V., Krotova N. N., Savelev A. V. *Metod planirovaniya remonta transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Method of planning the repair of transport technological machines]. *Stroitel'nye*

*dorozhnye mashiny – Construction road building machines*, 2017, no. 3, pp. 53–57.

11. Repin S. V., Zazykin A. V., Rulis K. V., Khovalyg N.-D. K. *Metodika obnovleniya regional'nogo parka transportno-tekhnologicheskikh mashin na osnove ehkonomicheskikh kriteriev* [Technique of updating of the regional park of transport technological machines on the basis of economic criteria]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 209–217.

12. Terent'ev A. V. *Razvitie metoda rayonirovaniya* [Development of the method of zoning]. *Trudy 4-y mezhdunar. nauch.-prakt.konf. «Innovatsii na transporte i v mashinostroenii»* [Proc. of the 4th Int. sci.-pract. conf. “Innovations on transport and in mechanical engineering”]. St. Petersburg, National Mineral Resources University “Gorny” Publ., 2016, pp. 127–130.

13. Prudovskiy B. D., Terentiev A. V. Investigation of methods for «current repairs labour-intensiveness» factor for a vehicle. *Life Science Journal*, 2014, no. 11(10s), pp. 307–310.

14. Terent'ev A. V., Prudovskiy B. D. *Metody opredeleniya mnozhestva Pareto v nekotorykh zadachakh lineynogo programmirovaniya* [Methods of determining the Pareto set in some problems of linear programming]. *Zapiski Gornogo institute – Journal of Mining Institute*, 2015, no. 211, pp. 86–90.

15. Terent'ev A. V. *Mnogokriterial'nyy pokazatel' kachestva avtomobilya* [Multicriteria index of the vehicle`s quality]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 1 (48), pp. 201–204.

16. Terent'ev A. V. *Metody resheniya avtotransportnykh zadach* [Methods of solving motor transportation tasks]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1. Available at: <http://www.science-education.ru/125-19863>

17. Terent'ev A. V., Prudovskiy B. D. *Metody prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennogo sostoyaniya «vneshney sredy»* [Decision-making methods in the conditions of indeterminate state of “external environment”]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 26–27 maya 2016 g. «Transportnoe planirovanie i modelirovanie»* [Proc. of the Int. sci.-pract. conf. “Transport planning and modeling” CE Publ., 2016, pp. 145–149.