

УДК: 519.8

## Дискретное моделирование процесса восстановительного ремонта участка дороги

Е. В. Мелешко<sup>1,a</sup>, Т. С. Афанасенко<sup>2,b</sup>, Ш. М. Гаджимирзаев<sup>2,c</sup>,  
Р. А. Пашков<sup>2,d</sup>, А. А. Гиля-Зетин<sup>2,e</sup>, Е. А. Цыбулько<sup>2,f</sup>,  
А. С. Зайцева<sup>2,g</sup>, А. В. Хельвас<sup>2,h</sup>

<sup>1</sup>ВУНЦ Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных сил Российской Федерации»,

Россия, 119121, г. Москва, проезд Девичьего поля, 4

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт,

Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

E-mail: <sup>a</sup> ironmelex@rambler.ru, <sup>b</sup> Taras\_a@mail.ru, <sup>c</sup> shamilgad@yandex.ru, <sup>d</sup> ruslan.pashkoff@gmail.com,  
<sup>e</sup> entuser@yandex.ru, <sup>f</sup> jen@cos.ru, <sup>g</sup> zaitseva.as@phystech.edu, <sup>h</sup> khelvas.av@mipt.ru

Получено 19.04.2022.

Принято к публикации 08.09.2022.

Работа содержит описание результатов моделирования процесса поддержания готовности участка дорожной сети в условиях воздействия с заданными параметрами. Рассматривается одномерный участок дороги длиной до 40 км с общим количеством ударов до 100 в течение рабочей смены бригады.

Разработана имитационная модель проведения работ по его поддержанию в рабочем состоянии несколькими группами (инженерными бригадами), входящими в состав инженерно-дорожного подразделения. Для поиска точек появления заграждений используется беспилотный летательный аппарат мультикоптерного типа.

Разработаны схемы жизненных циклов основных участников тактической сцены и построена событийно управляемая модель тактической сцены. Предложен формат журнала событий, формируемого в результате имитационного моделирования процесса поддержания участка дороги.

Для визуализации процесса поддержания готовности участка дороги предложено использовать визуализацию в формате циклограммы. Разработан стиль для построения циклограммы на основе журнала событий.

В качестве алгоритма принятия решения по назначению заграждений бригадам принят простейший алгоритм, предписывающий выбирать ближайшее заграждение.

Предложен критерий, описывающий эффективность работ по поддержанию участка на основе оценки средней скорости движения транспортов по участку дороги.

Построены графики зависимости значения критерия и среднеквадратичной ошибки в зависимости от длины поддерживаемого участка и получена оценка для максимальной протяженности дорожного участка, поддерживаемого в состоянии готовности с заданными значениями для выбранного показателя качества при заданных характеристиках нанесения ударов и производительности ремонтных бригад. Показана целесообразность проведения работ по поддержанию готовности несколькими бригадами, входящими в состав инженерно-дорожного подразделения, действующими автономно.

Проанализировано влияние скорости беспилотного летательного аппарата на возможности по поддержанию готовности участка. Рассмотрен диапазон скоростей от 10 до 70 км/ч, что соответствует техническим возможностям разведывательных беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа.

Результаты моделирования могут быть использованы в составе комплексной имитационной модели армейской наступательной или оборонительной операции и при решении задачи оптимизации назначения задач по поддержанию готовности участков дорог инженерно-дорожными бригадами. Предложенный подход может представлять интерес при разработке игр-стратегий военной направленности.

**Ключевые слова:** имитационная модель, управление действиями сил и средств

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-29-09090.

© 2022 Евгений Владимирович Мелешко, Тарас Сергеевич Афанасенко, Шамиль Мусиевич Гаджимирзаев, Руслан Анатольевич Пашков, Александр Александрович Гиля-Зетин, Евгения Александровна Цыбулько, Алла Сергеевна Зайцева, Александр Валериевич Хельвас

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.  
Чтобы получить текст лицензии, посетите веб-сайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>  
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC: 519.8

## Discrete simulation of the road restoration process

E. V. Meleshko<sup>1,a</sup>, T. S. Afanasenko<sup>2,b</sup>, Sh. M. Gadzhimirzayev<sup>2,c</sup>,  
R. A. Pashkov<sup>2,d</sup>, A. A. Gilya-Zetinov<sup>2,e</sup>, E. A. Tsybulko<sup>2,f</sup>, A. S. Zaitseva<sup>2,g</sup>,  
A. V. Khelvas<sup>2,h</sup>

<sup>1</sup>The Combined Arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation,  
4 Proyezd Devich'yego Polya, Moscow, 119121, Russia  
<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technologies,  
9 Institutskii per., Dolgoprudnii, 141700, Russia

E-mail: <sup>a</sup> ironmelex@rambler.ru, <sup>b</sup> Taras\_a@mail.ru, <sup>c</sup> shamilgad@yandex.ru, <sup>d</sup> ruslan.pashkoff@gmail.com,  
<sup>e</sup> entuser@yandex.ru, <sup>f</sup> jen@cos.ru, <sup>g</sup> zaitseva.as@phystech.edu, <sup>h</sup> khelvas.av@mipt.ru

Received 19.04.2022.

Accepted for publication 08.09.2022.

This work contains a description of the results of modeling the process of maintaining the readiness of a section of the road network under strikes of with specified parameters. A one-dimensional section of road up to 40 km long with a total number of strikes up to 100 during the work of the brigade is considered. A simulation model has been developed for carrying out work to maintain it in working condition by several groups (engineering teams) that are part of the engineering and road division. A multicopter-type unmanned aerial vehicle is used to search for the points of appearance of obstacles. Life cycle schemes of the main participants of the tactical scene have been developed and an event-driven model of the tactical scene has been built. The format of the event log generated as a result of simulation modeling of the process of maintaining a road section is proposed. To visualize the process of maintaining the readiness of a road section, it is proposed to use visualization in the cyclogram format.

An XSL style has been developed for building a cyclogram based on an event log. As an algorithm for making a decision on the assignment of barriers to brigades, the simplest algorithm has been adopted, prescribing choosing the nearest barrier. A criterion describing the effectiveness of maintenance work on the site based on the assessment of the average speed of vehicles on the road section is proposed. Graphs of the dependence of the criterion value and the root-mean-square error depending on the length of the maintained section are plotted and an estimate is obtained for the maximum length of the road section maintained in a state of readiness with specified values for the selected quality indicator with specified characteristics of striking and performance of repair crews. The expediency of carrying out work to maintain readiness by several brigades that are part of the engineering and road division operating autonomously is shown.

The influence of the speed of the unmanned aerial vehicle on the ability to maintain the readiness of the road section is analyzed. The speed range for from 10 to 70 km/h is considered, which corresponds to the technical capabilities of multicopter-type reconnaissance unmanned aerial vehicles. The simulation results can be used as part of a complex simulation model of an army offensive or defensive operation and for solving the problem of optimizing the assignment of tasks to maintain the readiness of road sections to engineering and road brigades. The proposed approach may be of interest for the development of military-oriented strategy games.

Keywords: simulation, optimal maintenance of the road

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 1255–1268 (Russian).

This work was supported by RFBR, project number 19-29-09090.

## Введение

Работа содержит результаты исследования, включающего создание дискретной имитационной модели процесса поддержания готовности участка дороги инженерным подразделением и анализ результатов моделирования.

Применение методов моделирования в практике подготовки и проведения военных операций имеет большую историю.

Использование моделей в практике решения военных задач варьируется от обучения уровня тактического звена до военных игр глобального масштаба.

История применения военных моделей приведена в работе профессора Raymond R. Hill «Air Force Institute of Technology» [Hill, Tolk, 2017]. В работе рассказывается об истории военного моделирования, начиная с обзора настольных военных игр и заканчивая обсуждением современного мира военного моделирования, включающего аналитические и нечеткие модели, а также распределенные обучающие и аналитические среды военного применения.

В статье с его же участием [Hill, Miller, McIntyre, 2001] обсуждаются использование военного моделирования, вопросы, связанные с военным моделированием, включая классификации различных типов военного моделирования.

Затем рассмотрены конкретные примеры моделей, разработанных авторами для US Air Force Institute of Technology.

Методология построения сложных иерархических имитационных моделей описана, например, в [Rodriguez et al., 2008].

В нашем случае мы строим модель поддержания готовности участка дороги инженерно-дорожным подразделением. Эта модель занимает один из нижних уровней в модели армейской операции.

Тенденции использования автономных устройств, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), при решении военных задач в последние годы активно изучаются, и даже в открытой печати имеется немало обзоров и публикаций, посвященных этой теме.

В качестве хорошего популярного обзора можно отметить работу Dr. Vikram Mittal из United States Military Academy's (USMA) Department of Systems Engineering [Ryan, Mittal, 2008].

Более глубокий научный анализ приведен в другой работе, принадлежащий авторам из академии US Military West Point [Kelley, Mittal, 2020].

Авторы провели анализ эффектов, которые автономная система оказывает при интеграции в подразделения сухопутных войск. На основе математического моделирования боевых действий были проанализированы сценарии ряда миссий для оценки влияния автономных систем на их успешность.

В рамках ограничений модели анализ подтвердил, что автономная система в целом влияет на результат миссии. Эти статистически значимые выводы подтверждают, что автономные системы должны быть интегрированы в воинские части, поскольку эти системы оказывают сильное положительное влияние на эффективность действия подразделений.

В работе [Somy, Shafaei, Ramezani, 2020] специалистами из Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran, предложена математическая модель для повышения устойчивости автотранспортных сетей в процессе восстановления.

Модель использует две целевые функции. Первая целевая функция минимизирует общее время восстановления автотранспортной сети. Вторая — отдает приоритет поврежденным мостам для восстановления, что обеспечивает повышение показателя готовности транспортной сети на ранней стадии выполнения работ.

В этой статье разрушенные мосты рассматриваются как ремонтные проекты и планируется сеть задач восстановления с приоритетными отношениями для восстановления каждого

моста с учетом ограниченности ресурсов. Таким образом, это похоже на проблему планирования нескольких проектов при ограниченных ресурсах. Для решения задачи оптимального планирования авторами предложен генетический алгоритм. Показано, что получаемый на основе генетического алгоритма план восстановления приводит к достижению наилучшего плана восстановления и наименьшего общего времени восстановления.

В работе [Zhang, Wang, Nicholson, 2020] предложен новый, основанный на принципе отказоустойчивости, подход к оптимизации планирования действий по восстановлению после аварий для транспортных сетей, включающих автодорожные мосты. Подход учитывает топологию сети и ее избыточность, модель транспортных потоков, уровень повреждений и доступные силы и средства для формирования стратегии восстановления сети.

Предложены две метрики для измерения скорости и эффективности восстановления сети: общее время восстановления (TRT) и перекося траектории восстановления (SRT).

TRT — это время, необходимое для восстановления сети до исходного уровня функциональности, в то время как SRT — это предложенная авторами метрика для определения характеристик процесса восстановления.

На основе этой двумерной метрики предложен метод планирования восстановления после аварий для транспортных сетей. Для решения задачи оптимизации графика восстановления для гипотетической мостовой сети с 30 узлами и 37 мостами, подвергнутыми сценарному сейсмическому воздействию, авторами использован генетический алгоритм.

В работе сотрудников Department of Civil and Environmental Engineering Lehigh University 2018 года [Sun, Vocchini, Davison, 2020] представлен обзор публикаций по показателям и методам анализа устойчивости транспортной инфраструктуры при экстремальных явлениях, что очень близко соотносится с целями и задачами нашего исследования. В обзоре рассматриваются показатели функциональности, функциональные показатели устойчивости и показатели социально-экономической устойчивости.

В работе [Sun, Vocchini, Davison, 2019] этими же авторами рассмотрены различные подходы к планированию восстановительных работ на сетевой инфраструктуре, разрушенной в результате стихийного бедствия.

В работе [Mao et al., 2020] предложена и проанализирована модель восстановления дорожной сети, основанная на отказоустойчивости. Оптимальная стратегия восстановления для дорожных сетей должна планировать ремонтные работы при ограниченных ресурсах. Авторами показано, что оптимальный график восстановления, формируемый предложенной моделью, представляет собой компромисс между совокупной потерей производительности и скоростью восстановления.

В качестве базового подхода предложено использовать имитационную нестационарную дискретную модель. Примеры такого подхода описаны в работах [Шеннон, 1978; Эльберг, Цыганков, 2017; Бусленко, 1978].

Целью дискретного имитационного моделирования является воспроизведение взаимодействий, в которых участвуют субъекты модели (в нашем случае — средства нанесения ударов по участку дороги, а также силы и средства, применяемые для поддержания готовности, включая БПЛА, используемые для разведки заграждений), и изучение поведения и функциональных возможностей исследуемой системы. Для этого выделяются состояния системы и описываются действия, которые переводят ее из одного состояния в другое. Говорят, что система находится в определенном состоянии, когда все ее компоненты находятся в состояниях, совместимых с областью значений, описывающих это состояние характеристик. Таким образом, имитация — это динамический портрет состояний системы во времени, т. е. воспроизведение поведения системы во времени.

При дискретной имитации состояние системы может меняться только в моменты свершения событий. Так как состояние системы не изменяется между этими моментами, полный динамический портрет состояний системы может быть получен путем продвижения имитационного времени от одного события к другому.

В большинстве языков дискретной имитации используется механизм продвижения времени, основанный на поиске следующего ближайшего события. Этот подход реализован, например, в SimPy для Python (см., например, [Zinoviev, 2018]).

Итоговая модель разработана на C# без применения специальных библиотек и внешних компонентов.

### Формализованная постановка задачи

Рассматривается участок дороги протяженностью  $L$ , на который осуществляется внешнее воздействие, приводящее к возникновению заграждений  $N$  типов, перечисленных в таблице 1. Каждый тип заграждения описывается плотностью вероятности возникновения и временем устранения.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

ID	Наименование типа заграждения	Время устранения $t_n$	Вероятность возникновения $p_n$
$d_1$	Заграждение типа 1	12	$8,33 \cdot 10^{-7}$
$d_2$	Заграждение типа 2	45	$2,43 \cdot 10^{-7}$
$d_3$	Заграждение типа 3	18	$3,82 \cdot 10^{-7}$
$d_4$	Заграждение типа 4	15	$10,7 \cdot 10^{-7}$

Полное время выполнения работ по поддержанию готовности участка дороги (время моделирования) составляет  $T_{\max}$ . В нашей задаче будем рассматривать  $T_{\max} = 720$  минут (12 часов).

Простая схема, иллюстрирующая постановку задачи для случая одной ремонтной бригады и заграждений одного типа, приведена на рис. 1.

В некоторый момент времени ремонтная бригада находится на участке дороги длиной  $L$  в точке с координатой  $x_{m1}$ . Заграждения находятся в точках с координатами  $x_{d1}, \dots, x_{d5}$ . БПЛА, ведущий разведку заграждений, находится в точке с координатами  $x_{UAV}$ .

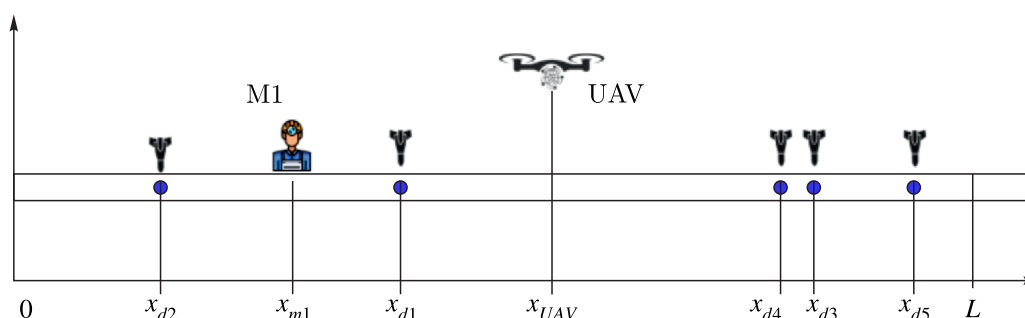


Рис. 1. Оперативная постановка задачи для случая одной ремонтной бригады и заграждений одного типа

Плотность вероятности появления заграждения  $n$ -го типа составляет  $p_n$ . Место появления заграждения на участке дороги описывается равномерным законом распределения.

Распределение появления заграждений во времени описывается распределением Пуассона, которое описывает последовательность случайных несвязанных событий.

Ликвидацией заграждений занимаются одна или несколько ремонтных бригад (инженерных подразделений с соответствующей техникой), выполняющих работы по разграждению участков дороги.

В данной работе мы считаем, что каждая бригада работает как единое целое и не может одновременно вести работы по двум заграждениям.

Среднее время на ликвидацию заграждения  $n$ -го типа составляет  $t_n$ .

Скорость перемещения бригад в интервале между ликвидацией заграждений составляет  $V_1$  (она одинакова для всех бригад, что с хорошей точностью совпадает с реальными экспериментальными данными).

Обнаружение заграждений осуществляется БПЛА, имеющим скорость  $V_2$ .

По участку в обе стороны осуществляют движение транспортные средства со скоростью  $V_3$ . При моделировании будем считать, что транспортные средства входят на участок дороги через равные интервалы времени  $\Delta T$ .

Пример структуры инженерно-дорожного подразделения приведен в таблице 2.

Таблица 2. Структура инженерно-дорожного подразделения

Номер бригады	Наименование	Тип	БПЛА	1	2	3	4
1	мсо1	1	1	1	0	0	0
2	мсо2	2	0	0	1	0	0
3	мсо3	3	0	0	0	1	1
4	мсо4	4	0	0	0	1	1

Для каждого автономного подразделения приведены его порядковый номер в модели, наименование, тип (задаваемый целым числом), наличие БПЛА в составе подразделения, возможность устранения заграждений каждого из четырех типов.

Результат работы по поддержанию состояния участка дорожной сети описывается его готовностью, определяемой некоторыми показателями эффективности, детально обсужденными в разделе «Описание выбранных метрик».

Таким образом, для типа заграждения  $n$  на участке длиной  $L = 40$  км за время поддержания готовности участка  $T_{\max} = 12$  часов появится  $M_1 = 8,33 \cdot 10^{-7} \cdot 720 \cdot 40\,000 = 24$  заграждения типа  $d_1$ .

## Алгоритм управления бригадой и БПЛА

Алгоритмы управления бригадой и БПЛА являются предметом оптимизации, что выходит за рамки данной публикации.

При отработке имитационной модели был использован простейший алгоритм, заключающийся в следующем.

Подразделение или его автономно действующая часть последовательно выполняет движение к обнаруженным заграждениям на участке дороги.

Подразделение или его автономно действующая часть после завершения восстановительных работ в некоторой точке движется к ближайшему обнаруженному заграждению, ликвидацию которого они могут выполнить. При его отсутствии — переходит в режим ожидания.

БПЛА используется для разведки повреждений участка дороги и осуществляет патрулирование участка дороги без применения специальных алгоритмов оптимизации.

## Описание выбранных метрик

В качестве метрики, описывающей результат действий сил и средств по устранению заграждений на участке дороги за время  $T$ , традиционно используется коэффициент готовности

$$K_1 = \sum_{i=1}^M \frac{\Delta T_i}{T}. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta T_i$  — интервалы времени, на протяжении которых на участке дороги отсутствуют заграждения.

Поскольку этот критерий не очень точно описывает возможность прохождения колонн через участок дороги, нами предложен критерий, описывающий увеличение времени прохождения участка за счет остановок, связанных с проведением работ по разграждению препятствий.

Более сложной и наглядной метрикой, описывающей результат действий сил и средств по устранению заграждений на участке дороги за время  $T_{\max}$ , является метрика, построенная на основе средней скорости движения транспортов по участку дороги.

В дискретной модели показатель определяется путем введения дискретного интервала  $\Delta t_2$ , описывающего интервал времени между стартами тестовых транспортных средств (колонн), для которых методом математического моделирования определяется время прохождения участка и средняя скорость движения.

Предложенная метрика может быть записана следующим образом:

$$K_2 = \frac{1}{N_{\max}} \sum_{n=1}^{N_{\max}} \frac{L_{TR}^n}{T_{TR}^n V_3}, \quad (2)$$

где  $N_{\max}$  — максимальный номер колонны, которая успевает выйти на участок в течение контрольного времени;  $T_{TR}^n$  — время прохождения  $n$ -й колонны, получаемое методом математического моделирования от начальной точки марша до конца участка или до точки, в которой транспортное средство окажется в момент времени  $T_{\max}$ ;  $L_{TR}^n$  — длина пути, пройденного  $n$ -м транспортным средством (для транспортных средств, прошедших весь участок  $L_{TR}^n = L$ );  $V_3$  — скорость движения транспортных средств.

В рамках выбранных для моделирования ограничений считаем скорость всех транспортных средств одинаковой.

## Описание входных данных

Общая продолжительность работы модели (выполнения задачи по поддержанию состояния дороги) —  $T = 720$  минут (или 12 часов).

Длина участка дороги —  $L = 5$ –50 км.

Скорость перемещения бригады в интервале между ликвидацией заграждений составляет  $V_1 = 30$  км/ч.

Скорость движения транспортов составляет  $V_3 = 40$  км/ч.

Интервал между стартами транспортов составляет  $\Delta T_2 = 20$  минут.

Обнаружение заграждений осуществляется БПЛА, имеющим скорость  $V_2 = 60$  км/ч. Автономность (время нахождения в воздухе) и время подготовки БПЛА к полету в рамках данной работы не рассматриваем, считая, что замена батарей позволяет поддерживать время нахождения БПЛА в режиме разведки, равное  $T = 720$  минут.

Количество типов заграждений для модели принято равным  $N = 4$ . Показатели для типов заграждений приведены в таблице 1.

$p_n$  представляет собой плотность вероятности. Таким образом, математическое ожидание количества заграждений, возникающих за время  $T$  на участке длины  $L$ , составляет

$$M_n = T \cdot p_n \cdot L. \quad (3)$$

Таким образом, для типа заграждения  $n$  на участке длиной  $L = 40$  км за время поддержания готовности участка  $T_{\max} = 12$  часов появится  $M_1 = 8,33 \cdot 10^{-7} \cdot 720 \cdot 40\,000 = 24$  заграждения типа  $d_1$ .

## Описание выходных данных

Первая задача состояла в построении по результатам моделирования журнала событий в машиночитаемом формате и, на его основе, в получении 12-часовой циклограммы проведения работ по содержанию путей движения в состоянии готовности.

Пример циклограммы для длины участка  $L = 24$  км приведен на рис. 2.

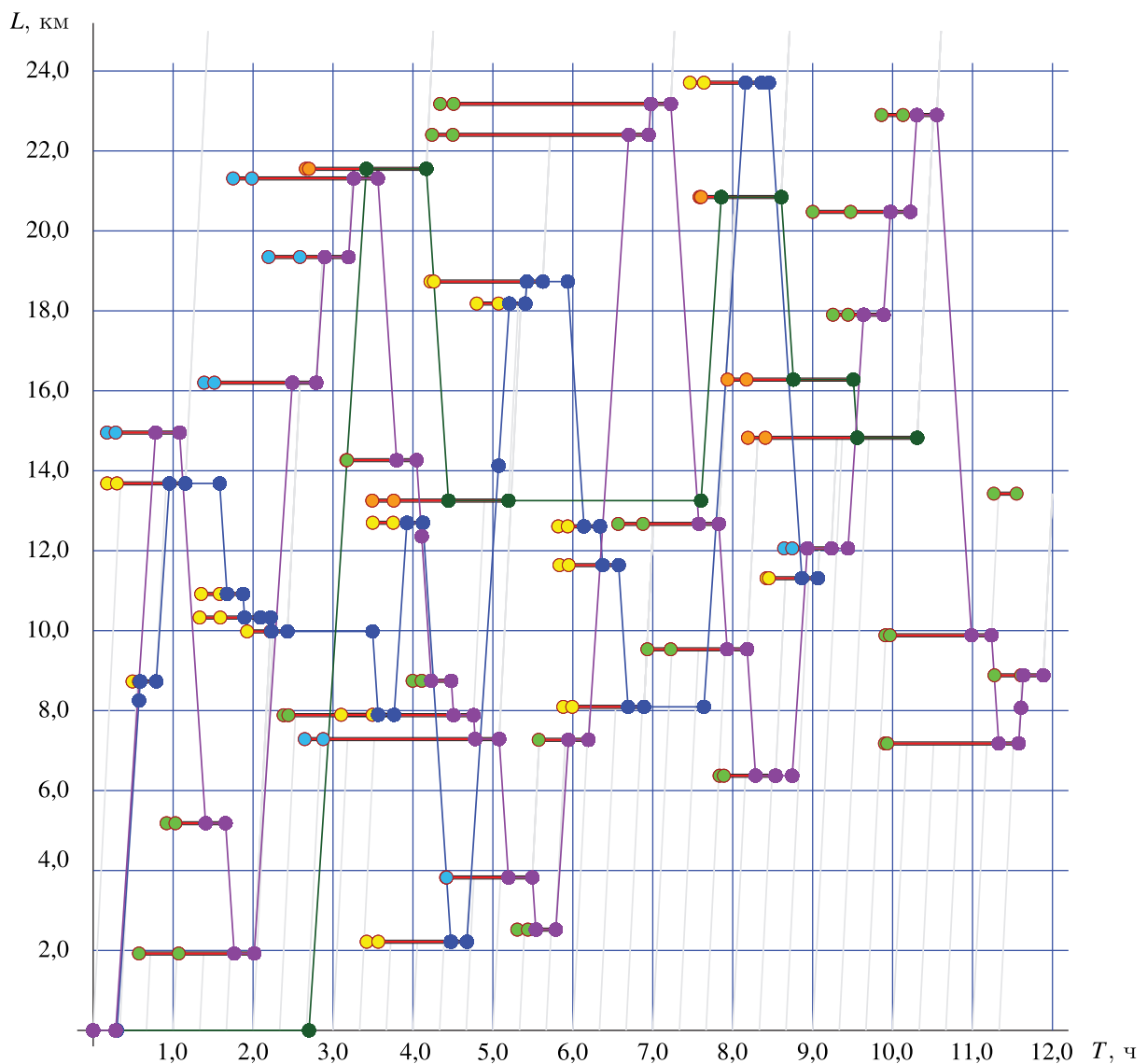


Рис. 2. Циклограмма поддержания готовности участка дороги



Далее на основе моделирования строится набор зависимостей  $K(L)$  и  $\sigma_G^2(L)$  и путем сравнения с пороговым значением для  $K(L)$  определяется длина участка, который может содержаться одной ремонтной бригадой с заданным параметром готовности.

### Описание модели

Моделирование осуществляется с помощью дискретной имитационной модели, управляемой событиями.

Виды событий в модели:

- $e_1$  – обнаружение заграждения БПЛА,
- $e_2$  – начало марша бригады,
- $e_3$  – завершение марша бригады,
- $e_4$  – начало работ по разграждению,
- $e_5$  – завершение работ по разграждению,
- $e_6$  – начало патрулирования БПЛА,
- $e_7$  – смена направления полета БПЛА,
- $e_8$  – завершение патрулирования БПЛА,
- $e_9$  – нанесение удара,
- $e_{10}$  – назначение бригады на разграждение,
- $e_{11}$  – начало марша транспорта,
- $e_{12}$  – завершение марша транспорта,
- $e_{13}$  – обнаружение заграждения транспортом и остановка,
- $e_{14}$  – отменить назначение заграждения,
- $e_{15}$  – обнаружение заграждения ремонтной бригадой,
- $e_{16}$  – выдвижение бригады на исходную позицию,
- $e_{17}$  – отведение бригады на отдых,
- $e_{18}$  – вход транспорта на участок,
- $e_{19}$  – выход транспорта с участка.

На рис. 3, 4, 5, 6 приведены упрощенные жизненные циклы объектов, используемых при моделировании.

Для заграждений жизненный цикл включает состояния, приведенные на рис. 3.

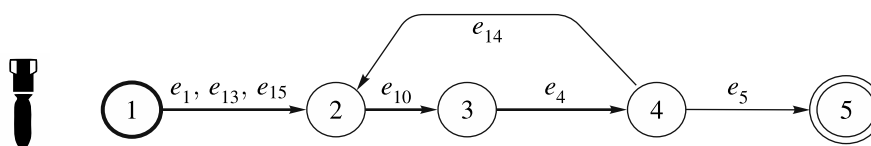


Рис. 3. Диаграмма состояний заграждения

1. Удар нанесен.
2. Удар обнаружен.
3. Удар назначен на разграждение.
4. Разграждение производится.
5. Последствия удара ликвидированы.

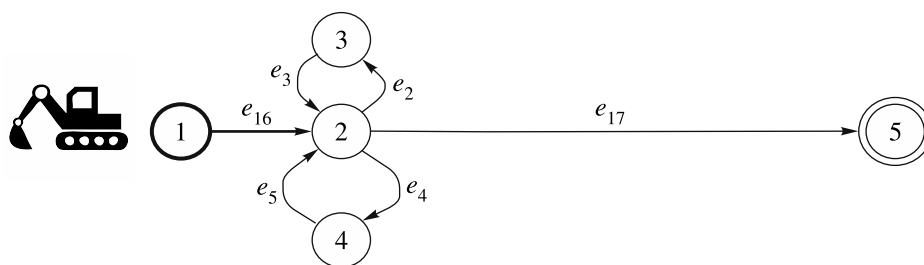


Рис. 4. Диаграмма состояний инженерно-дорожного подразделения

Для бригады, осуществляющей разграждение, жизненный цикл включает состояния, приведенные на рис. 4.

1. Выдвигаемся на позицию.
2. Стоим в режиме ожидания.
3. Двигаемся к очередной точке разграждения.
4. Осуществляем разграждение.
5. Осуществляем отвод с участка.

Для БПЛА жизненный цикл включает состояния, приведенные на рис. 5.

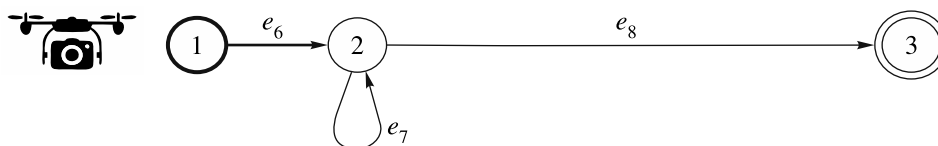


Рис. 5. Диаграмма состояний БПЛА

1. Выдвигаемся на позицию.
2. Ведем разведку.
3. Осуществляем отвод с участка.

Для транспорта жизненный цикл включает состояния, приведенные на рис. 6.

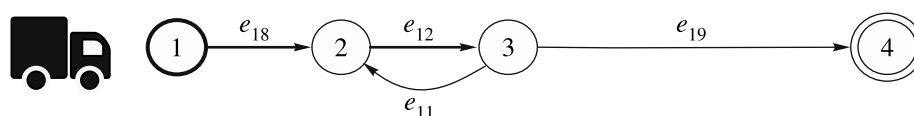


Рис. 6. Диаграмма состояний транспорта

1. Выдвигаемся на начало участка.
2. Осуществляем движение.
3. Стоим перед заграждением.
4. Покидаем участок дороги.

## Результаты моделирования

Разработана имитационная модель, выходом которой является 12-часовая циклограмма проведения работ по содержанию путей движения в состоянии готовности.

Приведем пример журнала событий.

```

EvID Time  ObjID OTypeID ETypeID Coord Det Comment
00:00:00 0344 "UAV_1" "начало патрулирования БПЛА"
00:06:59 2333 "UAV_1" "окончание патрулирования БПЛА"
01:27:56 4115 "EXP типа 1"
01:27:59 4003 "UAV_1" "начало патрулирования БПЛА"
01:28:06 4115 "UAV_1" "обнаружен взрыв типа 1"
01:28:10 4058 "UAV_1" "окончание патрулирования БПЛА"
01:28:13 4115 "RC_1" "начало ремонта МВЗ типа 1"
01:43:10 4115 "UAV_1" "начало патрулирования БПЛА"
01:43:10 4115 "UAV_1" "окончание патрулирования БПЛА"
01:43:13 4115 "RC_1" "окончание ремонта МВЗ типа 1"
01:51:44 6968 "EXP типа 1"

```

Здесь EvID — уникальный код события, ObjID — уникальный код объекта, выполняющего действие порядковые номера объектов в модели. В нашем случае есть БПЛА 1, четыре ремонтные бригады 2–5 и артиллерия противника 6; OTypeID: 0 — БПЛА, 1 — ремонтные бригады, 2 — нанесение удара силами ВКС/артиллерии, 3 — колонна; Time — время с точностью до минуты; ETypeID — код типа события; Coord — координаты события (одномерное) с точностью до метра; Det — дополнительный код (например код типа заграждения); Comment — отключаемый комментарий, обеспечивающий чтение лога человеком.

Далее на основе результатов имитационного моделирования строится набор зависимостей  $K_2(L)$  и  $\sigma_{K_2}(L)$  и на основе минимально допустимого значения метрики  $K_2$  определяется длина участка, который может содержаться одной ремонтной бригадой с заданным параметром готовности.

Моделирование проводилось исходя из гипотезы о равномерном распределении наносимых ударов по длине участка и пуассоновском распределении ударов во времени.

Общее количество проведенных численных экспериментов — 100. Графики зависимости  $K_1(L)$  и  $K_2(L)$  для  $L = 40$  км приведены на рис. 7.

Легко заметить, что оба показателя для  $L > 25$  км принимают неприемлемо маленькие значения ( $K \leq 0,25$ ). В связи с этим при дальнейшем моделировании мы ограничимся максимальной дальностью  $L = 25$ .

Анализ графика показывает, что при  $L \in (5, 25)$  зависимость  $K_2(L)$  является почти линейной и при  $L = 16$  км падение средней скорости движения транспортов составляет 50%. Также видно, что предложенная метрика  $K_2$  имеет значительно большую чувствительность и наглядность для решения задачи оценки качества процесса поддержания готовности участка дороги.

Далее при обсуждении результатов моделирования будем использовать только параметр  $K_2$ .

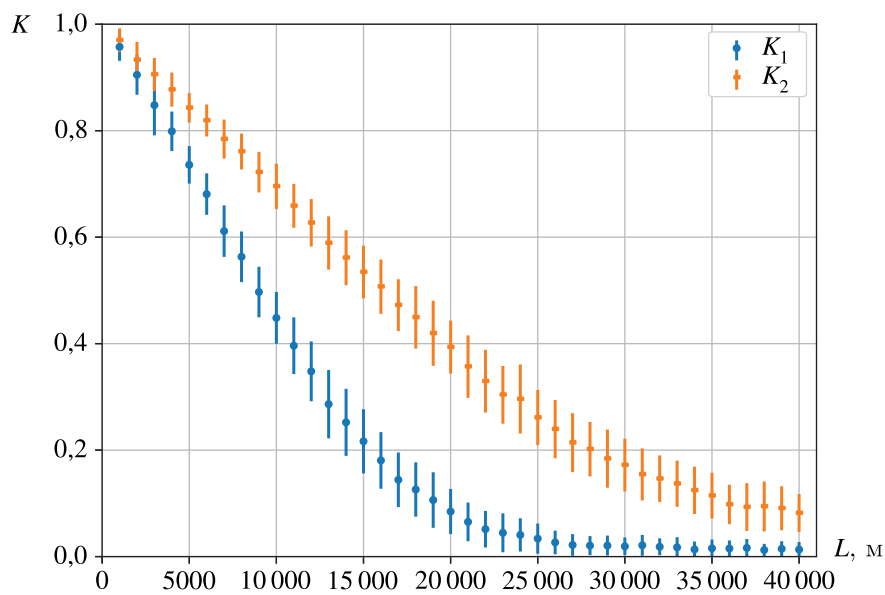


Рис. 7. Зависимость  $K_1$  и  $K_2$  от длины участка  $L$  при работе в составе трех независимо работающих бригад

## Оценка влияния скорости БПЛА на длину поддерживаемого участка

Важным параметром, описывающим процесс поддержания готовности участка, является количественный параметр, описывающий возможность проведения разведки с помощью БПЛА. В рассматриваемом случае мы имеем единственный параметр — скорость движения БПЛА  $V_2$ . Дальность действия (автономность) БПЛА мы считаем достаточной для проведения разведки на всей протяженности участка дороги.

Для оценки влияния скорости БПЛА на возможности по поддержанию готовности участка дороги проведена оценка значения метрики  $K_2$  для скоростей БПЛА от 10 до 80 км/ч.

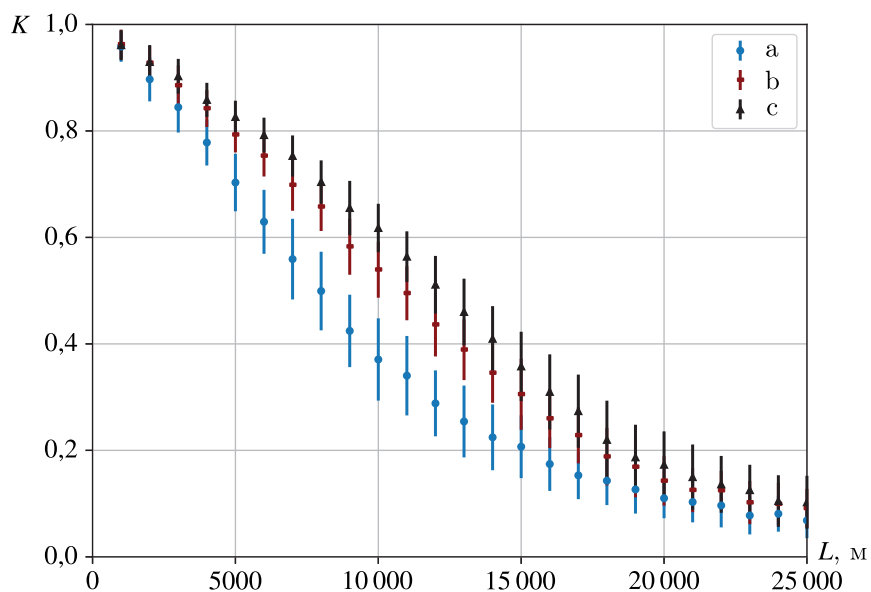


Рис. 8. Зависимость  $K_2(L)$  для различных значений скорости БПЛА  $V_2$ : а)  $V_2 = 10$  км/ч; б)  $V_2 = 30$  км/ч; в)  $V_2 = 70$  км/ч

На рис. 8 показана зависимость  $K_2(L)$  для различных значений скорости БПЛА  $V_2$ .

График *a* соответствует скорости  $V_2 = 10$  км/ч, *b* —  $V_2 = 30$  км/ч, график *c* —  $V_2 = 70$  км/ч соответственно.

Применение БПЛА для проведения разведки, таким образом, позволяет увеличить длину поддерживаемого участка  $L_{\max}$  в 1,5–2 раза.

## Оценка влияния способов действия взвода на длину поддерживаемого участка

Результаты моделирования позволяют оценить целесообразность разбиения инженерно-дорожного подразделения на несколько автономных групп, которые могут решать различные задачи по разграждению параллельно. Отдельную автономную группу при этом могут составлять группа разминирования и группа наведения временных мостовых переправ.

На рис. 9 приведены результаты моделирования для действий подразделения как единого целого и для его действий в составе трех автономных групп.

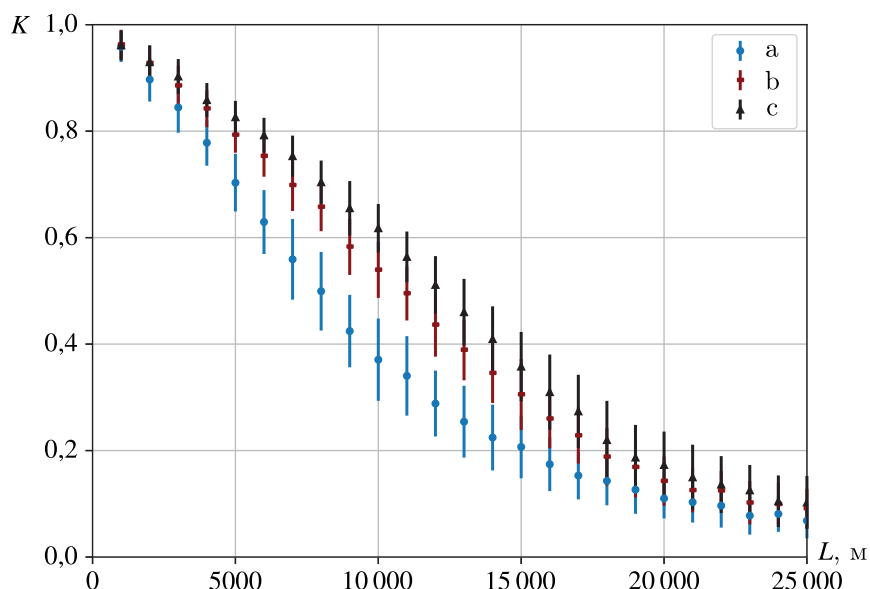


Рис. 9. Зависимость  $K_2(L)$  от способов действия инженерно-дорожного подразделения: а) в составе трех обособленных групп, б) в составе единой группы

Легко увидеть что работа несколькими автономными группами повышает эффективность работы по поддержанию готовности участка дороги. Длина участка, поддерживаемого при переходе к автономной работе трех групп, в рассматриваемом случае увеличивается с  $L = 12$  до  $L = 18$  км с сохранением средней скорости движения транспортов  $V_3 = 20$  км/ч.

## Заключение

В работе получены следующие результаты.

1. Разработана программная имитационная модель процесса поддержания готовности дорожных путей с открытым кодом.
2. Предложена метрика процесса поддержания готовности дорожных путей, построенная на основе средней скорости движения транспорта по участку дороги.
3. Получены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить максимальную длину участка дорожной сети, готовность которого может поддерживаться инженерным подразделением при заданном уровне огневого воздействия.

4. Показано влияние способов действия инженерно-дорожного подразделения на значения метрик процесса поддержания готовности дорожных путей.

5. Показано влияние скорости полета БПЛА на значения метрик процесса поддержания готовности дорожных путей.

6. Предложен формат циклограммы для анализа действий подразделения по поддержанию готовности участка дороги и разработан стиль для ее формирования на основе лога событий в XML-формате.

## Список литературы (References)

- Бусленко Н.* Моделирование сложных систем. — 2-е изд., перераб. — М.: Наука, 1978.  
*Buslenko N.* Modelirovaniye slozhnykh system [Complex systems simulation]. — Moscow: Nauka, 1978 (in Russian).
- Организация восстановления военно-автомобильных дорог: учебное пособие. — СПб.: Издательство ВАТТ, 2007. — С. 323.  
*Organizatsiya vosstanovleniya voenno-avtomobilnykh dorog* [Military Roads Recovery Organisation]. — Saint-Peterburg: VATT, 2007. — P. 323 (in Russian).
- Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем — искусство и наука / пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. — М.: Мир, 1978. — С. 418.  
*Shennon R.* Imitatsionnoye modelirovaniye system [Systems simulation. The art and science]. — Moscow: Mir, 1978. — P. 418 (in Russian).
- Эльберг М. С., Цыганков Н. С.* Имитационное моделирование: учеб. пособие / пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. — С. 128.  
*Elberg M. S., Tsygankov N. S.* Imitatsionnoye modelirovaniye [Systems simulation]. — Krasnoyarsk: SFU, 2017. — P. 128 (in Russian).
- Hill R. R., Miller J., Mcintyre G.* Applications of discrete event simulation modeling to military problems. — Vol. 1. — P. 780–788. — DOI: 10.1109/WSC.2001.977367
- Hill R., Tolk A.* A History of Military Computer Simulation. — P. 277–299. — DOI: 10.1007/978-3-319-64182-9\_13
- Kelley J., Mittal V.* Integrating autonomous systems into military units // *Industrial and Systems Engineering Review*. — Vol. 8, No. 1. — P. 59–67. — DOI: 10.37266/ISER.2020v8i1.pp59-67
- Mao X., Lou X., Yuan C., Zhou J.* Resilience-based restoration model for supply chain networks // *Mathematics*. — 2020. — Vol. 8, No. 2. — P. 163. — DOI:10.3390/math8020163
- Rodriguez J. D., Miller J. O., K. W. Jr., Neher R. E. Jr.* Methodologies for aggregating large hierarchical simulation models // *Proc. SPIE*. — 2008. — Vol. 6965. — DOI: 10.1117/12.776702
- Ryan T., Mittal V.* Potential for army integration of autonomous systems by warfighting function // *Military Review*. — Vol. 99, No. 5. — P. 122–133.
- Somy S., Shafaei R., Ramezani R.* Resilience-based mathematical model to restore disrupted road-bridge transportation networks // *Structure and Infrastructure Engineering*. — 2022. — Vol. 18. — P. 1–16. — DOI: 10.1080/15732479.2021.1906711
- Sun W., Bocchini P., Davison B. D.* Comparing decision models for disaster restoration of interdependent infrastructures under uncertainty. — DOI: 10.22725/ICASP13.238
- Sun W., Bocchini P., Davison B. D.* Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art // *Sustainable and Resilient Infrastructure*. — 2020. — Vol. 5, No. 3. — P. 168–199. — DOI: 10.1080/23789689.2018.1448663
- Xiong X., Ma L., Cui C.* Simulation environment of evaluation and optimization for moving target defense: A SimPy approach. — DOI: 10.1145/3371676.3371692
- Zhang W., Wang N., Nicholson C.* Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks // *Structure and Infrastructure Engineering*. — 2017. — Vol. 13, No. 11. — P. 1404–1413. — DOI: 10.1080/15732479.2016.1271813
- Zinoviev D.* Discrete event simulation. It's easy with SimPy! — [https://www.researchgate.net/publication/322949363\\_Discrete\\_Event\\_Simulation\\_It's\\_Easy\\_with\\_SimPy](https://www.researchgate.net/publication/322949363_Discrete_Event_Simulation_It's_Easy_with_SimPy)