

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-71-82](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-71-82)



УДК 656.025.4

UDC 656.025.4

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АГРЕГАТОВ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

**DETERMINATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF TRANSMISSION UNITS OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES OPERATED IN THE CONDITIONS OF THE FAR NORTH**

✉<sup>1</sup> **Лелиовский Константин Ярославич**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексева, РФ  
e-mail: [kleliovskiy@mail.ru](mailto:kleliovskiy@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Leliovsky Konstantin Yaroslavich**, PhD (eng), associate professor, department of "Construction and road machines", Alekseev Nizhny Novgorod state technical university, Russian Federation  
e-mail: [kleliovskiy@mail.ru](mailto:kleliovskiy@mail.ru)

**Молев Юрий Игоревич**, д-р техн. наук, доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексева, РФ  
e-mail: [moleff@yandex.ru](mailto:moleff@yandex.ru)

**Molev Yuri Igorevich**, Doctor Sciences (eng), associate professor, department of "Construction and road machines", Alekseev Nizhny Novgorod state technical university, Russian Federation  
e-mail: [moleff@yandex.ru](mailto:moleff@yandex.ru)

**Каретникова Мария Павловна**, студент, кафедра «Автомобильный транспорт», Нижегородский государственный технический университет им. Алексева, РФ  
e-mail: [karetnikovamasha@mail.ru](mailto:karetnikovamasha@mail.ru)

**Karetnikova Maria Pavlovna**, student, department of "Automobile Transport", Alekseev Nizhny Novgorod state technical university, Russian Federation  
e-mail: [karetnikovamasha@mail.ru](mailto:karetnikovamasha@mail.ru)

**Аннотация.**

Исследования, которые легли в основу настоящей статьи, проведены с целью совершенствования качества эксплуатации многофункциональных наземных автотранспортных средств, в том числе специальных. Объектом исследования приняты специальные многофункциональные колесные транспортно-технологические машины и комплексы, их агрегаты трансмиссии. Выбор обусловлен хорошей приспособленностью данных транспортных средств к эксплуатации в условиях дорожных сетей Севера, Сибири и Дальнего Востока.

**Annotation.**

The studies that formed the basis of this article were conducted in order to improve the quality of operation of multifunctional ground vehicles, including special ones. The object of the study is special multifunctional wheeled transport and technological machines and complexes, their transmission units. The choice is due to the good adaptability of these vehicles to operation in the conditions of the road networks of the North, Siberia and the Far East.

**Ключевые слова:** ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА, ДИНАМИКА ТРАНСМИССИИ, ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧ, ТРАНСПОРТНАЯ ЗАДАЧА, ЭВРИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ.

**Keywords:** VIBRATION DIAGNOSTICS, TRANSMISSION DYNAMICS, RESIDUAL LIFE OF POWER TRANSMISSIONS, TRANSPORT PROBLEM, HEURISTIC SOLUTION ALGORITHMS.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### **Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

В данной статье предлагается способ оценки остаточного ресурса элементов трансмиссии транспортных средств на стадии эксплуатации, на основе экспресс-диагностирования технического состояния, (выявления дефектов элементов трансмиссии), для целей снижения её себестоимости.

Оперативное управление техническим состоянием транспортных средств является сложной и актуальной проблемой. В процессе её эксплуатации, в силу различных причин, их технические и эксплуатационные показатели модифицируются. Их исходные значения закладываются инженерами - конструкторами на стадии проектирования и обеспечиваются на этапе изготовления.

Основным способом диагностирования механических агрегатов остается поэлементное инструментальное исследование и метрологический контроль деталей агрегата, разбираемого после некоторой нормативной наработки, что, как правило, вызывает значительные трудозатраты и нарушения приработки звеньев. Более того, может оказаться, что все детали пребывают в штатном техническом состоянии, или отказ произошел раньше ожидаемой наработки.

### **Материалы и методы**

Транспортно-технологические средства широкого спектра оперативно – функционального назначения требуют обеспечения высокого уровня качества функционирования и надежности этого перехода от планово-предупредительного обслуживания и ремонта к обслуживанию и ремонту по текущему техническому состоянию. В связи с этим возникает необходимость выявления таких параметров объекта, которые позволили бы с минимальными затратами максимально достоверно определить и прогнозировать вероятное изменение его технического состояния. Это требует научно обоснованного применения средств и методов автоматизированного контроля и диагностирования. В основу предлагаемой методики положена очевидная зависимость: изменения, появляющиеся в процессе функционирования в подвижных сопрягающихся узлах, приводящих к изменениям его вибрационных характеристик. Установив с приемлемой степенью адекватности их связь с изменениями технических параметров, можно осуществлять диагностику, вычислять вероятность и предупреждать отказы, а также осуществлять общее прогнозирование оставшегося ресурса, а, следовательно, работоспособности транспортных средств в данных эксплуатационных условиях.

Обеспечение достоверности диагноза является главной проблемой, ограничивающей применение методик вибрационной диагностики. Формулирование признаков достоверности в обобщенной форме, представляется весьма затруднительным, так как в общем случае уровень неопределенности виброотклика на неисправность довольно высок. Однако в частных случаях её можно снизить до приемлемого уровня.

Специфические условия работы объектов исследования требуют уточнения целого ряда подходов и методов их эксплуатации. Особенно - в области обеспечения оптимальных значений параметров в условиях дорожных сетей Севера, Сибири и Дальнего Востока. Данные критерии определяются на основе значений технико-эксплуатационных параметров

конструкции объектов исследования, изменяющихся в ходе эксплуатации и свидетельствующих о наличии, вероятности возникновения отказа или степени развития дефекта агрегата или узла, лимитирующего работоспособность транспортного средства. Вибрационные характеристики тоже относятся к ним и хорошо пригодны для формирования баз данных образов технических состояний и неисправностей, которые можно использовать для экспресс-диагностирования.

Существующая ныне потребность в решении транспортной проблемы при осуществлении транспортных операций при геологоразведке, нефте- и газодобыче, промышленном и дорожном строительстве, обслуживании предприятий энергетики и связи, сельского и лесного хозяйства, устранении чрезвычайных ситуаций, в районах Севера, Сибири и Дальнего Востока, обуславливает разработку научно обоснованных технических решений, направленных на обеспечение и поддержание высокой степени работоспособности эксплуатируемой в этих условиях автотранспортной техники.

Прогнозирование работоспособности и остаточного ресурса транспортно – технологических средств является значимой задачей, успешное решение которой будет способствовать решению проблемы обеспечения транспортных коммуникаций между населенными пунктами, промышленными объектами, объектами транспортной инфраструктуры в полярных и приполярных арктических районах Западной и Центральной Сибири, Дальнего Востока. Решение данной задачи будет затрагивать технический аспект рассматриваемой проблемы: поддержание автотранспортной техники в высокой степени оперативной готовности, минимизировать отказы, которые могут возникнуть в ходе выполнения транспортной работы непосредственно на маршруте. Из практики эксплуатации автотранспортной техники и оборудования в указанных регионах известно, что в случае критических отказов, приводящих к значительной или полной потере подвижности, она оставляется на месте возникновения отказа, из-за крайней затруднительности ремонтных и эвакуационных мероприятий. При этом техника может быть вполне ремонтпригодной и восстановимой. Механические ресурсы многих её узлов, агрегатов и систем могут находиться далеко от предельных состояний. Оставление техники на месте возникновения отказа в подобных случаях нельзя признать рациональным решением с технической и экономической точки зрения. Одной из этих составляющих является повышение точности осведомленности о текущем техническом состоянии транспортно – технологической машины, её агрегатов, узлов и систем, водителя – оператора, а также инженеров и техников, занимающихся техническим обслуживанием и ремонтом. Это позволит повысить безотказность, т.е. надёжность автотранспортной техники, эксплуатируемой в полярных и приполярных арктических районах Западной и Центральной Сибири, Дальнего Востока. Следовательно, повысить её эксплуатационную подвижность.

В настоящей статье для обозначенных целей рассматривается вариация одного из метаэвристических методов решения задачи маршрутизации транспорта, а именно алгоритма «пчелиной колонии». Математическая модель, которая лежит в его основе, универсальна и применима для доставки товаров клиентам, перевозки промышленных грузов, а также и для перевозки грузов сельскохозяйственного характера, всех тех, которые перевозятся при «северном завозе».

Согласно данной методике, элементы транспортной сети делятся на три типа: рабочие, (непосредственно транспортные средства), разведчики (транспортные логисты) и наблюдатели (диспетчеры). Первые «отвечают» за использование доступных «источников пищи» (маршрутов доставки грузов) и сбор информации о них (качество, длина). Под указанным термином в данном рассмотрении понимается конкретное решение задачи маршрутизации транспорта (*VRP*), то есть минимальный набор маршрутов, необходимых для полного удовлетворения спроса заданного набора потребителей товаров т.е. обеспечения населенных пунктов товарами при «северном завозе». Пчелы-работчие (водители автомобилей) также делятся информацией с пчелами-наблюдателями (логистами – расчетчиками -

маршрутизаторами), которые, в свою очередь, выбирают существующие «источники пищи», (населенные пункты, нуждающиеся в обеспечении продуктами и товарами), для дальнейшего изучения. Последние ответственны за поиск новых «источников пищи» (населённых пунктов) вокруг «улья» (складского терминала) [1]. Расчёт по методике начинается с генерации случайных решений (маршрутов) и присвоения каждой пчеле-работнику (автомобилю) соответствующего «источника пищи» (назначения транспортного средства на определенный маршрут) [1]. Затем, теоретически, во время каждой итерации каждая пчела-работник находит новый «источник пищи» (выявляются неучтённые ранее населенные пункты) рядом с первоначально назначенным (старым) с помощью оператора соседства (выявляются дополнительные потребители товаров). Затем оценивается стоимость решения (себестоимость перевозки) по формуле (1):

$$z(x) = c(x) + \alpha q(x) + \beta t(x) \quad (1)$$

где  $x$  – набор маршрутов (решение), который представлен в виде последовательности клиентов, разделенных нулями (тем самым имитируются новые маршруты);  $c(x)$  – длина (протяженность маршрута) решения  $x$ ;  $q(x)$  и  $t(x)$  – нарушение ограничений решения  $x$  по пропускной способности и продолжительности (длине, времени объезда) соответственно;  $\alpha$  и  $\beta$  – это саморегулирующиеся положительные параметры, которые изменяются на каждой итерации работы алгоритма следующим образом: если количество решений с нарушением пропускной способности больше чем  $\tau/2$ , тогда  $\alpha = \alpha \cdot (1 + \sigma)$ , иначе  $\alpha = \alpha / (1 + \sigma)$ . То же правило применяется к коэффициенту  $\beta$ .

Если значимость нового «источника пищи» (потребность в завозе) выше, чем старого, то он выбирается более приоритетным. После того, как все пчелы-работники (автомобили, занимающиеся развозом) завершили описанный выше процесс, они «делятся информацией» об «источниках пищи» (водители сдают соответствующую товарно-транспортную документацию) с пчелами-наблюдателями (лицам, отвечающим за транспортную логистику). Затем каждый «наблюдатель» выбирает источник пищи случайным способом (проводит необходимые расчёты), где вероятность выбора  $i$ -ого решения (маршрута до определённого населённого пункта) определяется по формуле (2):

$$p(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^{\tau} f(x_j)} \quad (3)$$

где  $f(x_i) = \frac{1}{z(x_i)}$  – пригодность источника пищи (решения);  $\tau$  – количество решений.

Значимость (маршрутный лист, выдаваемый водителям автомобилей), в общем случае, представляет собой целевую функцию алгоритма. Поскольку задача сводится к минимизации стоимости, тогда решение с минимальной стоимостью, как с точки зрения организации перевозочных процессов, так и с точки зрения технической эксплуатации транспортных средств, будет обладать максимальной «привлекательностью» для выбора.

### Результаты исследований

Резервом повышения всего ряда указанных характеристик автотранспортных средств являются мероприятия по диагностике. В рассматриваемых условиях работы наиболее эффективным следует рассматривать их реализацию в экспресс формате. Для этого необходимо включить в перечень предрейсового или послерейсового осмотров диагностические операции, в частности, направленные на прогнозирование технического состояния агрегатов трансмиссии, с применением специализированного оборудования. В

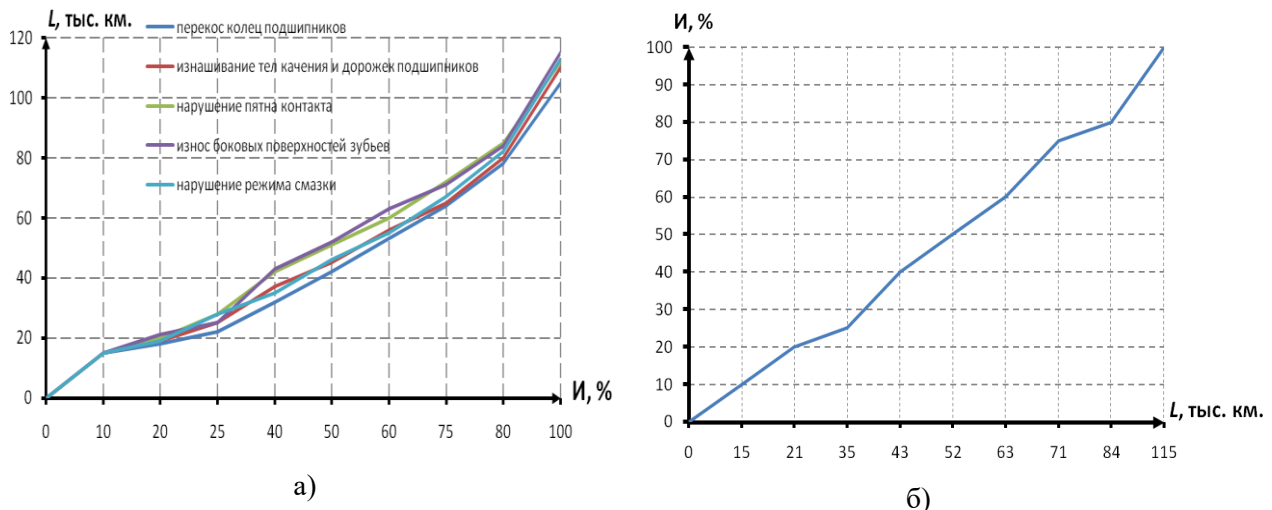
качестве такого, в данном случае, могут выступать переносные вибродиагностические измерительные комплексы, которые, по потребности, устанавливаются на агрегаты трансмиссии. Регистрация необходимой для вынесения прогноза выборки сигналов осуществлялась при пробеге транспортного средства по тестовому мерному участку местности. Для его организации выбран ровный грунтовый участок местности с супесчаным покрытием длиной 100 метров, очищенный от валунов, коряг и прочих мелких, средних и крупных помех движению. Транспортное средство с установленной на него диагностической аппаратурой приводится в движение на данном контрольно-измерительном участке. При движении выбирается передача в трансмиссии и скорость движения, выбираемые наиболее часто при его движении на перегонах при выполнении транспортно-технологической работы. По результатам контрольных заездов специализированные программные комплексы, установленные на электронно-вычислительную аппаратуру, осуществляют математические исчисления по диагностике текущего технического состояния агрегатов трансмиссии, вероятному наличию в них каких-либо дефектов и повреждений и т.п. Испытания, аналогичные описываемым, проводились в ходе выполнения исследований, по результатам которых написана данная статья.

В ходе ремонтных работ посредством дефектовки с применением метрологических приборов и методов, уточняется диагноз, даётся непосредственная оценка степени развития дефектов и повреждений коробки передач, наличие которых математически вычислено на основе косвенных признаков.

Рассмотренные ранее мероприятия по экспресс- диагностике технического состояния перед рейсом или после него, позволяют изменить величины: времени на ремонт и устранение неисправностей - в меньшую сторону, времени на обслуживание и заправку – так же в сторону снижения. Это связано с тем, что предлагаемые диагностические мероприятия, позволят непрерывно отслеживать техническое состояние агрегатов трансмиссии, своевременно получать информацию о возникновении и прогрессировании дефектов и повреждений их элементов. В связи с этим появляется возможность назначения автотранспортной техники на техническое обслуживание и ремонт только по мере необходимости, что позволяет рационально расходовать материальные ресурсы, требующиеся на обеспечение её работоспособности, т.е. эксплуатационной подвижности (мобильности). Кроме этого, появляется возможность осуществления прогнозирования ресурса коробок передач, а также любого другого агрегата трансмиссии. Т.е. определения вероятного пробега машины до отказа одного из изучаемых агрегатов трансмиссии или их перехода в предельное состояние. При этом обязательно принимаются во внимание условия эксплуатации, являющиеся типичными для изучаемой транспортно-технологической машины.

На основании результатов экспериментальных и теоретических исследований, выполним пример прогнозирования ресурса коробки передач изучаемых транспортных средств с использованием программного пакета *STATISTICA Neural Networks 6.1*. В него вводим математические параметры базовой, теоретически обоснованной кривой изнашивания [2,3], а также данные, реализующие её привязку к условиям эксплуатации, являющимися типичными для изучаемой транспортно-технологической машины. Пример результатов прогнозирования приведем на (рис. 1, а, б). На (рис. 1, а) представлены результаты моделирования прогноза нарастания степени изнашивания (или развития) наиболее критичных дефектов исследуемых коробок передач.





а) в зависимости от развития наиболее критичных эксплуатационных дефектов;  
 б) в обобщённом представлении.

Рисунок 1 - Графики зависимости изменения степени изнашивания коробки передач ТТС 3007, ТТС 3910 от их пробега при эксплуатации в условиях приполярных и заполярных районах Западной и Центральной Сибири и Дальнего Востока, рассчитанные в ходе его прогнозного имитационного моделирования

К таковым можно отнести: перекося внутренних колец опорных подшипников валов, изнашивание беговых дорожек подшипников и тел качения, нарушение расположения пятна контакта в зацеплении шестерен, износ боковых поверхностей шестерен, нарушение режима смазки (масляное «голодание»). На (рис. 1, б) представлены результаты моделирования обобщённого прогноза долговечности (ресурса) исследуемой коробки передач в сборе, с учётом условий эксплуатации, являющихся типичными для изучаемой транспортно-технологической машины [4-6]. По характеру графиков видно, что в целом общая зависимость долговечности коробок передач, используемых в трансмиссиях ТТС 3007 и ТТС 3910, эксплуатируемых в условиях приполярных и заполярных районах Западной и Центральной Сибири и Дальнего Востока, соответствует характеру теоретически обоснованной кривой изнашивания механических деталей машин [7,8].

Однако, как видно из графика на (рис. 1,б), в отличие от классического вида данной кривой, в нашем случае характер её изменения приближается к линейному, прямо пропорциональному, отсутствует так называемая «полка», соответствующая установившейся, медленно возрастающей скорости изнашивания, характерной для приработавшихся поверхностей сопряжённых деталей. Её отсутствие можно объяснить тяжелыми условиями эксплуатации объектов исследования в рассматриваемых регионах, что обуславливает значимые величины скоростей изнашивания деталей [9-12]. На графике, представленном на (рис. 1, а), характер зависимости кривых, в общем, соответствует характеру теоретически обоснованной кривой изнашивания механических деталей машин. Таким образом, линии, полученные в ходе обработки результатов экспериментов средствами программного пакета *STATISTICA Neural Networks 6.1*, являются усреднёнными трендами. Поэтому их целесообразнее использовать при выборе периодичности технического обслуживания и/или ремонта разной степени трудоёмкости по планово-предупредительной стратегии поддержания работоспособности объектов исследования.

На рис. 2 приведен график тренда зависимости изменения степени изнашивания коробки передач ТТС 3007, ТТС 3910 от их пробега при эксплуатации в условиях приполярных и заполярных районах Западной и Центральной Сибири и Дальнего Востока, рассчитанные в ходе его прогнозного имитационного моделирования. Также на данном

рисунке приведена аппроксимационная зависимость данной линии тренда, вычисленная посредством алгоритмов математического анализа.

$$|I| = 0,265L^2 - 1,185L \quad (4),$$

где  $L$  – текущее значение пробега автотракторной техники в тыс. км.,  $I$  – степень изнашивания коробок передач объектов исследования.

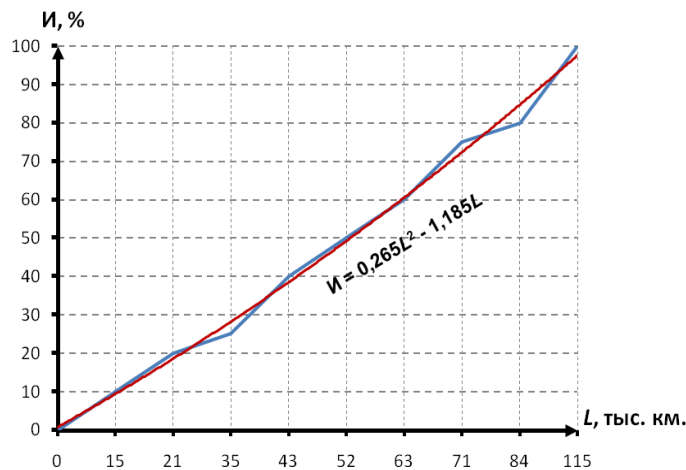


Рисунок 2 - График тренда зависимости изменения степени изнашивания коробки передач ТТС 3007, ТТС 3910 от их пробега при эксплуатации в условиях приполярных и заполярных районов Западной и Центральной Сибири и Дальнего Востока, рассчитанные в ходе его прогнозного имитационного моделирования.

Используя формулу (4), можно с приемлемой степенью вероятности осуществить прогноз остаточного ресурса (степени изнашивания) коробки передач или раздаточной коробки передач объекта исследования при текущем пробеге. Так, при подстановке значений наработки из диапазона, измеренных в ходе испытаний, проведенных с рассматриваемыми транспортно- технологическими машинами, получим следующие величины изнашивания:

$$|I_{\max}| = 0,265(10,237)^2 - 1,185(10,237) = 15,6\% \quad (5),$$

$$|I_{\min}| = 0,265(9,763)^2 - 1,185(9,763) = 13,7\% \quad (6)$$

На основании проведенных по формулам (5) и (6) расчётам видно, что остаточный ресурс исследуемых агрегатов трансмиссии в рассматриваемых условиях в настоящий момент достаточно велик. Однако следует заметить, что в испытываемой коробке передач были обнаружены серьёзные дефекты, нуждающиеся в незамедлительном устранении. Поэтому рассчитанные выше значения степеней изнашивания изучаемых конкретных агрегатов трансмиссии следует рассматривать как вероятностные, так как в ходе эксплуатации могут возникнуть скоротечно развивающиеся критичные дефекты, которые могут повлечь за собой существенные изменения характера зависимости тренда остаточного ресурса. Это обуславливает необходимость постоянного послерейсового экспресс - диагностирования агрегатов трансмиссии исследуемых автотранспортных средств с целью выявления предотказного состояния, а, следовательно, поддержания их эксплуатационной надёжности [13-15].

Для реализации *VRP* - алгоритма, а также визуализации полученных результатов была выбрана среда имитационного моделирования *AnyLogic*. В качестве языка программирования был выбран *Java*. Тестирование проводилось на базе библиотеки *VRP*-примеров, разработанных *Augerat* в 1995 году [16]. Для каждого примера установлено априори оптимальное решение, что позволяет оценить эффективность метода искусственной пчелиной колонии для целей маршрутизации грузовых перевозок.

В качестве значений параметров, участвующих в решении, были выбраны следующие [9]:  $maxIterations = 50000$ ;  $\tau = 25$ ;  $\alpha = 0,1$ ;  $\beta = 0,1$ ;  $\sigma = 0,001$ . Лимитирующее число итераций без улучшения (*iterationsWithoutImprovement*) решения было принято равным 2500. Стоит отметить, что для данных примеров нет ограничений по протяженности маршрута, поэтому третья слагаемое в расчете стоимости решения принято равным 0.

Поскольку *ABC* - алгоритм относится к классу стохастическим, то есть каждый раз дает разный результат, то из соображений целесообразности тестирование проводилось несколькими циклами вычислений. Вследствие этого, в таблицу результатов (табл. 1) занесены результаты исходя из 10 прогонов программы.

Таблица 1 – Результаты исследования

Вид(ы) перестановки	Результат, у.е.			Время, с.			Оптимальный результат, у.е.
	Лучший	Средний	Худший	Лучший	Средний	Худший	
<i>P-n23-k8</i>	529	530,6	534,3	15,79	18,09	19,56	529
<i>P-n40-k5</i>	458	469,6	477,6	59,54	61,01	62,29	458
<i>P-n51-k10</i>	757,7	772,9	785,6	68,85	70,45	73,46	741
<i>P-n55-k15</i>	989	1010,1	1019,5	87,97	89,95	92,34	989
<i>P-n60-k15</i>	1015,4	1046,7	1072,8	102,6	104,5	106,6	968
<i>A-n33-k6</i>	742	744,1	746,7	30,88	32,68	37,01	742
<i>A-n34-k5</i>	778	781,5	785,8	35,2	37,8	41,8	778
<i>A-n36-k5</i>	819,3	825,2	831,8	40,28	41,24	42,13	799
<i>A-n45-k7</i>	1185,5	1206,9	1229,5	56,4	58,7	60,3	1146
<i>A-n53-k7</i>	1062,4	1090,7	1113,5	75,62	80,57	87,53	1010

Также в таблицу занесено время, которое потребовалось для расчета примера в формате [минимальное, среднее, максимальное]. Последний столбец обозначает оптимальный результат, заложенный авторами-составителями *VRP*-примеров. Также, чтобы дать оценку эффективности *ABC* - алгоритмов, был построен график, показывающий сходимость задачи, где по оси *x* размечены итераций, а по оси *y* отложен результат, рассчитанный на данной итерации. График примера решения задачи при перестановке *P-n51-k10*, представлен на рис.3. [17].

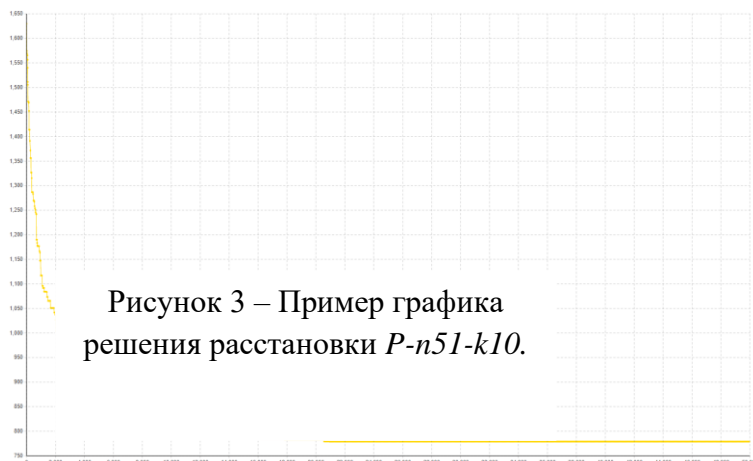


Рисунок 3 – Пример графика решения расстановки *P-n51-k10*.



**Обсуждение и заключение**

Как видно из рис.3. данный метод обладает хорошей эффективностью. Основное приближение к оптимальному результату происходит через 12000 - 15000 итераций. После этого улучшение результата практически неизменно при сколь угодно большом увеличении итераций. Данные, приведённые в табл.1. позволяют сделать вывод о том, что в 50% рассчитанных примеров было найдено оптимальное решение, тем не менее средние результаты получились несколько отличающиеся от них. Однако среднее отклонение от оптимального результата по всем приведённым примерам составило лишь 3,47%. Среднее значение разброса между худшим и лучшим результатом на данных параметрах составило 2,93%. Для наглядного сравнения результатов применения ABC – алгоритма для расчёта транспортных задач, в табл. 2. показаны результаты нескольких примеров, полученных другими методами решения задач маршрутизации транспорта [18 - 20].

Таблица 2 – Сравнительная таблица результатов

Пример	<i>Artificial Bee Colony</i>	<i>Simulated Annealing method</i>	<i>Elitist Ant System</i>
<i>P-n23-k8</i>	530,6	534,6	536,8
<i>P-n40-k5</i>	469,6	462,2	482,3
<i>P-n51-k10</i>	772,9	750,8	773,8
<i>A-n33-k6</i>	744,1	745,9	751,9
<i>A-n34-k5</i>	781,5	788,1	801,7
<i>A-n53-k7</i>	1090,7	1020,2	1081,7

Результаты приведённые в табл. 2 позволяют сделать вывод о хорошей эффективности и работоспособности предлагаемого алгоритма, сопоставимого с другими мета-эвристическими методами решения транспортных задач. Как видно, результаты его применения лучше остальных в 50 % рассмотренных примеров. В оставшейся части наиболее оптимальные решения дал *Simulated Annealing method*. В целом, ABC – алгоритм оставляет пространство для доработок. В качестве них может послужить подбор основных входных параметров для каждой группы примеров.

Ритмичность данных технологических воздействий может быть научно обоснованно корректируема сообразно графикам, полученным аналогичным образом. Назначение же технологических мероприятий по поддержанию работоспособности объекта исследования по текущему техническому состоянию (мелкий, средний ремонт) в данном случае следует назначать на основании экспресс - вибродиагностики, методология которой рассматривается в настоящей статье. В нашем случае, получив существующие в ней результаты, инженер – механик, ответственный за эксплуатацию и техническое состояние подвижного состава транспортно-технологических средств, получает основание для назначения досрочного, так называемого, упреждающего, углубленного технического обслуживания и ремонта. В нашем случае такое воздействие является обоснованным, т.к. объекты исследования имеют суммарную наработку  $10000 \pm 237$  км.

**Список литературы**

- 1 Osman., I. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem / I. Osman // Annual Operational Research. – 1993 - №41. P. 421-451.
- 2 Решетов, Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин / Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1974. – 123 с.
- 3 Генкин, М.Д. Динамические нагрузки в передачах с косозубыми колесами / М.Д. Генкин, В.К. Гринкевич. – М.: Изд-во АН СССР. 1961. – 118 с.

- 4 Айрапетов, Э.Л. Виброакустическая диагностика выкрашивания и заедания зубчатых колес на ранней стадии / Э.Л. Айрапетов, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков // Точность и надежность механических систем. Стохастическая локализация врожденности / Рижск. гос. ун-т. – Рига, 1983. С. 68 – 76.
- 5 Волчков, В.А. Диагностирование автомобильных передач по параметрам виброакустического сигнала / В.А. Волчков, В.А. Николаев // Труды МАДИ, 1977. №135. С. 86-89.
- 6 Власов, С.В. Диагностика причин повышенной виброактивности газотранспортного оборудования в условиях Крайнего Севера / С.В. Власов, С.П. Зарицкий, В.А. Якубович / Контроль и диагностика. 1998. №3. С. 23 – 26.
- 7 Лелиовский, К.Я. Динамика и вибрации трансмиссии транспортно - технологических машин при движении по различным опорным поверхностям в арктической зоне / К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, У.Ш. Вахидов // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: сборник материалов Международной научно - практической конференции. – Воронеж, 2018. С. 100 – 107.
- 8 Leliovsky, K.Y. Vibration load of transmission units at vehicle's motion over different roads / K.Y. Leliovsky, V.S. Makarov, V.V. Belyakov // Mobility of transport and technological machines: Journal of Physics. Conference Series – Warsaw, 2019. P. 7 – 14.
- 9 Абрамов, С.В. Прогнозирование состояния технических средств / С.В. Абрамов, А.Н. Розенбаум. – М.: Наука, 1990. – 357 с.
- 10 Доллежалъ, В.А. Расчетная нагрузка зубчатых передач / В.А. Доллежалъ. – М.: Машгиз, 1957. – 287 с.
- 11 Ерошкин, А.И. Экспериментальные методы обнаружения повреждений подшипников качения на ранней стадии / А.И. Ерошкин // Прочность и динамика авиационных двигателей. 1981. №6. С. 260-274.
- 12 Нахапетян, Е.Г. Определение критериев качества и диагностирования механизмов / Е.Г. Нахапетян. – М.: Наука, 1977. – 140 с.
- 13 Беляков, В.В. Диагностика сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева // Труды 1-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors «Разработка радиационностойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа», апрель 2001 г. / ННГУ им. Н.И. Лобачевского. - Н.Новгород: ТАЛАМ, 2002. С.63-99.
- 14 Беляков, В.В. Подвижность и диагностика автотракторной техники // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы / под ред. Ю.В Гуляева. – М. – Н.Новгород: ТАЛАМ, 2004. Т. 8. С. 3-24.
- 15 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдудевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. М.Д. Генкина. – М.: Машиностроение, 1981. Т5. – 496 с.
- 16 Glover, F. Tabu Search / F. Glover, M. Laguna // Kluwer Academic Publishers. – 1997. - № 2. – р. 34 – 38.
- 17 Каретникова, М.П. Использование алгоритма “пчелиной колонии” для решения задачи маршрутизации транспорта / М.П. Каретникова [и др.] // Логистический аудит транспорта и цепей поставок: матер. IV-й Междунар. науч. - практ. конф. Т.2 – Тюмень: ТИУ, 2021. – С. 300 – 310.
- 18 Augerat, P. Computational results with a branch and cut code for the capacitated vehicle routing problem. / P. Augerat, [etc.] // Universit'e Joseph Fourier: Tech. Rep. – Grenoble, 1995. P. 949 – 960.
- 19 Курейчик, В.М. Анализ и состояние задачи маршрутизации автотранспорта / В.М. Курейчик, А.А. Кажаров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону. № 4, 2013. С. 73-77.
- 20 Karaboga, D. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. / D. Karaboga, B. Basturk // Applied Soft Computing. - 2008. № 8.P. 687–697.

References

- 1 Osman., I. Metastrategy simulating annealing and taboo search algorithms for the problem of vehicle routing / I. Osman // Annual operational studies. – 1993. - No.41. p. 421-451.
- 2 Reshetov, D.N. Operability and reliability of machine parts / D.N. Reshetov. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – 123 p.
- 3 Genkin, M.D. Dynamic loads in gears with skew-toothed wheels / M.D. Genkin, V.K. Grinkevich. - M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1961. – 118 p.
- 4 Airapetov, E.L. Vibroacoustic diagnostics of discoloration and jamming of gears at an early stage / E.L. Airapetov, A.G. Sokolova, E.I. Khomyakov // Accuracy and reliability of mechanical systems. Stochastic localization of innateness / Riga State University. – Riga, 1983. pp. 68-76.
- 5 Volchkov, V.A. Diagnostics of automobile transmissions by parameters of a vibroacoustic signal / V.A. Volchkov, V.A. Nikolaev // Proceedings of MADI, 1977. No. 135. pp. 86-89.
- 6 Vlasov, S.V. Diagnostics of the causes of increased vibration activity of gas transmission equipment in the conditions of the Far North / S.V. Vlasov, S.P. Zaritsky, V.A. Yakubovich / Control and diagnostics. 1998. No.3. pp. 23-26.
- 7 Leliovsky, K.Ya. Dynamics and vibrations of the transmission of transport and technological machines when moving on various support surfaces in the Arctic zone / K.Ya. Leliovsky, V.S. Makarov, U.S. Vakhidov // Arctic: innovative technologies, personnel, tourism: collection of materials of the International Scientific and practical conference. – Voronezh, 2018. pp. 100 – 107.
- 8 Leliovsky, K.Yu. Vibration load on transmission units during vehicle movement on various roads / K.Yu. Leliovsky, V.S. Makarov, V.V. Belyakov // Mobility of transport and technological machines: Physical journal. A series of conferences – Warsaw, 2019. pp. 7-14.
- 9 Abramov, S.V. Forecasting the state of technical means / S.V. Abramov, A.N. Rosenbaum. – M.: Nauka, 1990. – 357 p.
- 10 Dollezhall, V.A. Design load of gears / V.A. Dollezhall. – M.: Mashgiz, 1957. – 287 p.
- 11 Eroshkin, A.I. Experimental methods for detecting damage to rolling bearings at an early stage / A.I. Eroshkin // Strength and dynamics of aircraft engines. 1981. No.6. pp. 260-274.
- 12 Nakhapetyan, E.G. Definition of quality criteria and diagnosis of mechanisms / E.G. Nakhapetyan. – M.: Nauka, 1977. – 140 p.
- 13 Belyakov, V.V. Diagnostics of complex technical systems / V.V. Belyakov, M.E. Bushueva // Proceedings of the 1st workshop on the NATO project with SFP-973799 Semiconductors in "Development of radio-resistant semiconductor devices for communication systems and precision measurements using noise analysis", April 2001 / N.I. Lobachevsky National Research University. - N.Novgorod: TALAM, 2002. pp.63-99.
- 14 Belyakov, V.V. Mobility and diagnostics of automotive equipment // Proceedings of the Academy of Engineering Sciences of the Russian Federation. akad. A.M. Prokhorov. Transport and technological machines and complexes / edited by Yu.V.Gulyaev. – M. – N.Novgorod: TALAM, 2004. Vol. 8. pp. 3-24.
- 15 Vibrations in technology: handbook / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [et al.]; edited by M.D. Genkin. – M.: Mechanical Engineering, 1981. T5. – 496 p.
- 16 Glover, F. The search for taboo / F. Glover, M. Laguna // Kluwer Academic Publishers. – 1997. - No. 2. – pp. 34-38.
- 17 Karetnikova, M.P. Using the “bee colony” algorithm to solve the problem of transport routing / M.P. Karetnikova [et al.] // Logistics audit of transport and supply chains: mater. IV-th International Scientific. - Practical conf. Vol.2 – Tyumen: TIU, 2021. – Pp. 300 – 310.
- 18 Ogera, P. Results of calculations using the branching and cutting code for the problem of routing vehicles with capacity. / P. Ogera, [et al.] // Joseph Fourier University: Tech. Representative – Grenoble, 1995. pp. 949 – 960.

19 Kureychik, V.M. Analysis and the state of the problem of routing vehicles / V.M. Kureychik, A.A. Kazharov // Bulletin of the Rostov State University of Railways. – Rostov-on-Don. No. 4, 2013. pp. 73-77.

20 Karaboga, D. On the performance of the artificial bee family algorithm (ABC). / D. Karaboga, B. Basturk // Applied soft computing. - 2008. No. 8.P. 687-697.

© Лелиовский К.Я., Молев Ю.И., Каретникова М.П., 2023