

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3.02:004.89

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-25-31

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ****НИКИТЧЕНКО СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ**✉, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup>  
binom\_a@rambler.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315**ГРИНЧЕНКОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup>  
grindv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0748-6096>; Scopus Author ID: 57170803600<sup>1</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения; 344038, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2<sup>2</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; 346428, Российская Федерация, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132

**Аннотация.** Бесперебойное использование сельскохозяйственной техники в период полевых работ обеспечивается поддержанием работоспособного состояния машин путём своевременного проведения технического обслуживания и оперативного устранения эксплуатационных отказов. Период неработоспособного состояния машин можно сократить при наличии на складе эксплуатирующего предприятия некоторого резерва запасных частей. При обосновании резерва, учитывающего целесообразность резервирования и расчёт потребного количества резервируемых частей, недостаточно изучены методы искусственного интеллекта. С целью обоснования метода резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники и определения эффекта от его производственного внедрения разработаны генетический алгоритм и программное обеспечение. Разработанный метод резервирования апробирован на сельскохозяйственном предприятии для обоснования сезонных резервов запасных частей комбайнов Дон-1500Б и TORUM. В информационной модели данных учитывались стоимость и количество потребляемых запасных частей по годам, количество машин, потребляющих запчасти в конкретный сезон работ, значения времени установки запчастей на машину и др. Применение генетического алгоритма позволило из 2500 наименований запасных частей выделить 66 наиболее значимых позиций, необходимых к резервированию на сезон уборки. Установлено, что метод резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники, основанный на применении генетического алгоритма в сочетании с базой данных, содержащей информацию о реальном потреблении запасных частей машинами не менее чем за 3 предыдущих года, позволяет снизить время простоя комбайнов в ожидании подвоза запчастей на 37%, увеличить дневную производительность комбайнов на 11,4%, коэффициент оперативной готовности комбайнов на 4,38%.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственная техника, запасная часть, резервирование, генетический алгоритм, программа для ЭВМ, зерноуборочный комбайн, производительность, показатель надёжности

**Формат цитирования:** Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Совершенствование методов резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники на основе генетических алгоритмов // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 6. С. 25-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>.

© Никитченко С.Л., Гринченков Д.В., 2022



## ORIGINAL PAPER

**IMPROVING THE METHODS OF RESERVING SPARE PARTS FOR AGRICULTURAL MACHINERY BASED ON GENETIC ALGORITHMS****SERGEI L. NIKITCHENKO**✉, PhD (Eng), Associate Professor<sup>1</sup>binom\_a@rambler.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-4480-9659>; Scopus Author ID: 57203408315**DMITRIY V. GRINCHENKOV**, PhD (Eng), Associate Professor<sup>2</sup>grindv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0748-6096>; Scopus Author ID: 57170803600<sup>1</sup> Rostov State Transport University; 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation<sup>2</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov; 132, Prosveshchenya Str., Novocherkassk, Rostov Region, 346428, Russian Federation

**Abstract.** The uninterrupted use of agricultural machinery performing field operations is ensured by maintaining their working condition through timely maintenance and prompt elimination of operational failures. The period of inoperative state of machines can be

reduced if there is a certain inventory stock of spare parts in the warehouse of the operating company. When determining the stock, taking into account the feasibility of the reservation and the calculation of the required number of the reserved parts, the methods of artificial intelligence are to be sufficiently studied. To justify the method of reserving spare parts for agricultural machinery and determine the effect of its industrial implementation, the authors developed a genetic algorithm and software. The developed reservation method was tested at an agricultural enterprise to determine seasonal reserves of spare parts for Don-1500B and TORUM combine harvesters. The designers of the information data model took into account the cost and quantity of consumed spare parts by year, the number of machines consuming spare parts in a particular work season, the time values for installing spare parts on a machine, etc. The use of the genetic algorithm made it possible to identify sixty-six of the most significant items out of 2,500 spare parts that need to be reserved for the harvesting season. It has been established that the method of reserving spare parts for agricultural machinery based on the use of the genetic algorithm in combination with a database containing information on the actual consumption of spare parts by machines for at least three previous years, can reduce the idle time of combines waiting for the delivery of spare parts by 37%, increase the daily productivity of combines by 11.4%, and increase the coefficient of the operational availability of combines by 4.38%.

**Keywords:** agricultural machinery, spare part, reservation, genetic algorithm, computer program, combine harvester, productivity, reliability index

**For citation:** Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Improving the methods of reserving spare parts for agricultural machinery based on genetic algorithms. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(6): 25-31. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-25-31>.

**Введение.** Сельскохозяйственная техника является основным средством производства в растениеводческих предприятиях. Время простоя тракторов и комбайнов по причине отказов можно существенно уменьшить при наличии некоторого резерва запасных частей на складе предприятия. В работах [1-3] представлены математические методы обоснования оптимального резерва запасных частей для сельхозтехники и эффекты от резервирования, связанные с увеличением производительности машин на полевых работах и повышением показателей их надёжности.

В настоящее время в мировой практике управления складской логистикой ведущее место занимают WMS-системы (Warehouse Management System) – информационные системы, предназначенные для автоматизации и роботизации управления складскими процессами и инфраструктурой склада в целом [4]. В основе функционирования таких систем лежат методы искусственного интеллекта: распознавание речи, техническое зрение, эволюционное моделирование и другие, способные организовать централизованное управление всеми складскими процессами, самостоятельно ставить задачи для персонала, формировать запросы на пополнение складских запасов, быстро решать различные производственные вопросы. Применение таких систем обеспечивает работу складской системы по принципу «Точно вовремя» [5].

При расчёте складского запаса деталей часто используют методы математической статистики, логистические методы определения складского запаса (например, на базе алгоритмов ABC-классификации и XYZ-классификации), а также имитационное моделирование и нейросети [6-9]. Такие методы, учитывающие реальное потребление деталей в прошлые периоды, позволяют обосновать складской запас с минимальной вероятностью дефицита. Однако эти методы больше подходят для предприятий с равномерным круглогодичным спросом на запасные части, что является нехарактерным для сельскохозяйственного производства. Недостатком большинства применяемых методов расчёта резерва запчастей является невозможность оценки потерь продукции от отсутствия запасных частей и затрат на хранение резервов.

Характерной особенностью современного производства является сокращение номенклатуры склада запчастей

до минимума. Ставка делается на оперативность работы внешних сервисных структур в плане устранения отказов и доставки необходимых деталей. Но анализ производства показывает, что такая практика не всегда оправдана, и часто простой техники может быть предотвращён собственными силами инженерной службы предприятия при наличии на складе потребных деталей. Важно наличие информационной системы, способной осуществлять расчёт складских резервов и анализировать возможные потери предприятия – как от отсутствия нужных деталей, так и при их наличии.

Бурное развитие компьютерной техники стимулирует использование методов искусственного интеллекта для решения сложных задач управления резервами запчастей и работоспособностью технических объектов [10, 11]. Одной из задач с множеством влияющих факторов является резервирование запасных частей на складе предприятия, эксплуатирующего сельхозтехнику.

**Цель исследований:** обосновать метод резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники предприятия, основанный на использовании генетических алгоритмов, и оценить эффект от его производственного внедрения.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели применялся метод эволюционного моделирования, являющийся разновидностью методов искусственного интеллекта [12]. Эволюционное моделирование с применением генетических алгоритмов находит широкое применение в задачах оптимизации, в том числе складских запасов [8, 13, 14].

Генетический алгоритм – это математическая модель эволюции популяции искусственных особей. Эволюционные алгоритмы базируются на коллективном обучающем процессе внутри популяции индивидуумов, каждый из которых представляет собой поисковую точку в пространстве допустимых решений данной задачи. Решение формируется в процессе искусственной селекции виртуальных особей с учётом информации об окружающей среде, причём отбираются наиболее пригодные к внешним условиям особи [8].

Особь является наименьшей неделимой биологической единицей, подверженной действию факторов эволюции. Каждая особь характеризуется своей хромосомой  $\chi_k$ . В качестве отдельной особи (хромосомы) был принят конкретный список запасных частей – заказ на резервирование. Особи

образуют популяцию – множество возможных заказов, из которых нужно выбрать наиболее эффективный. Эффективность особи оценивали по критерию максимума предотвращённого ущерба от простоя машин ввиду отсутствия запасных частей в период полевых работ.

Генетическая информация особей хранится в хромосомах, состоящих из генов. В качестве генов рассматривали отдельные записи (строки) в заказе на запчасти. Генотип характеризуется информацией о наименовании запасных частей, количестве их потребления и др. Воспроизводство новых особей реализуется механизмом рекомбинации генов – скрещиванием. Механизм скрещивания в генетическом алгоритме реализован в форме оператора размножения, который называют кроссовером. Он является аналогом механизма формирования «брачных пар» в процессе естественной эволюции. Новые особи формируются методом взаимного обмена участками «родительских» хромосом. Особей текущей популяции  $P^t$  называют «родителями»,

а особи, полученные в результате работы оператора размножения, – «потомками».

Кроссовер не является источником новой генетической информации в популяции особей. Генетическая изменчивость формируется в процессе мутации – изменения генотипов в одном или нескольких генах хромосом «потомков». Появляющиеся в результате мутации особи называются мутантами. Мутации являются стохастическими, они не зависят ни от генетических кодов особи, ни от значений ее генотипа и функции приспособленности.

Структура генетического алгоритма обычно включает в себя следующие этапы: генерирование хромосом случайным образом; декодирование каждой хромосомы для получения индивидов; оценивание пригодности каждого индивида; генерирование новой популяции путем клонирования, скрещивания и мутации хромосом наиболее адаптированных к внешним условиям индивидов [8, 13]. Схема генетического алгоритма (ГА) нашей задачи представлена на рисунке 1.

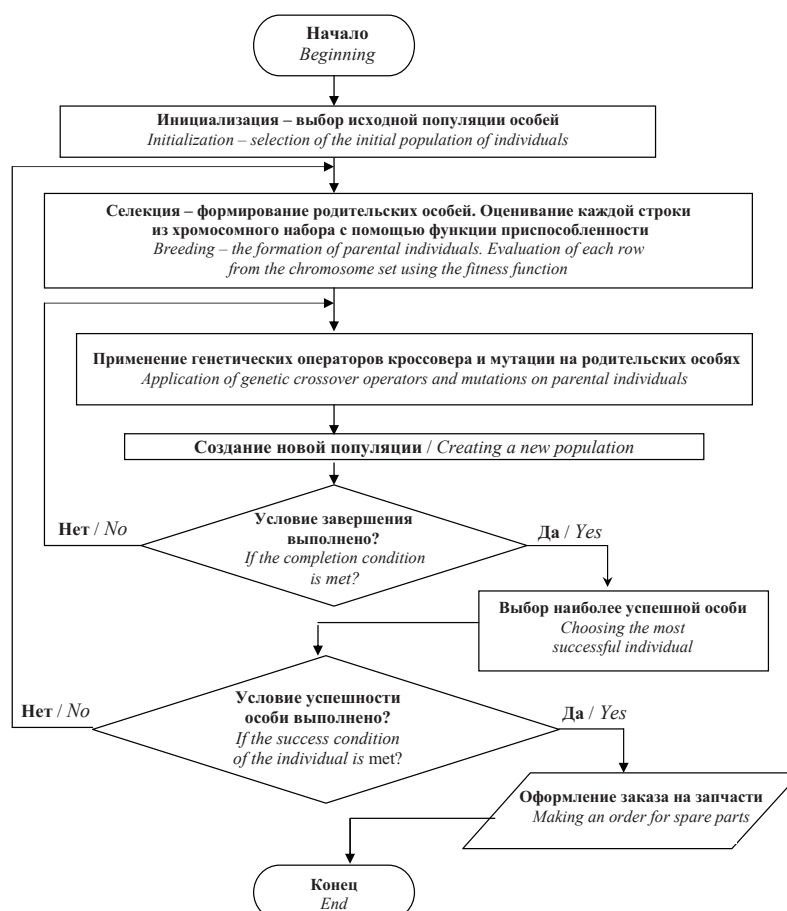


Рис. 1. Схема предлагаемого генетического алгоритма

Fig. 1. Scheme of the proposed genetic algorithm

Здесь реализуется канонический генетический алгоритм, являющийся подклассом репродукционно-популяционных алгоритмов поиска [13]. Это алгоритм поисковой оптимизации с начальной популяцией  $P^t$ , представляющей совокупность кодировок  $(\chi_1^0, \chi_2^0, \dots, \chi_v^0)$ . В данном алгоритме итеративно выполняется следующий цикл операций:

1. Оценивание с выбором исходной популяции особей  $P^t$ .
2. Селекция – выбор из популяции  $P^t, t = 0, 1, \dots$  репродукционного множества  $R^t$  (подмножества кодировок  $R^t \in P^t$ ).

3. Воспроизводство – генерация из репродукционного множества  $R^t$  новых кодировок с помощью комбинаций следующих операций:

- а) скрещивание – конструирование новых кодировок путем случайного сцепления подстрок родительских кодировок из  $R^t$ ;
- б) мутация – конструирование новых кодировок путем разыгрывания и подстановки случайных значений гена – количество запасных частей.

4. Формирование новой популяции  $P^{t+1}$  путём замены некоторых или всех кодировок  $\chi \in P^t$ .

Канонический тип ГА отвечает следующим требованиям [13]:

- все кодировки  $\chi \in S$  имеют одну и ту же длину  $L$ ;
- элементы  $\chi, \chi' \in R'$ , называемые родителями, выбираются из популяции  $P'$  случайным образом с вероятностями, пропорциональными значениям функции приспособленности;
- скрещивание осуществляется с помощью одноточечного кроссовера, когда символы  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i)$  в новой кодировке  $\chi'$ , называемой «потомком», являются символами кодировки  $\chi' \in R'$ , а индекс  $i$  называется случайной точкой кроссовера, выбираемой с равной вероятностью из интервала  $[1, L-1]$ ;
- мутации являются стохастическими операциями и не зависят от значений функции приспособленности.

Размножение родительских особей с помощью механизма одноточечного кроссовера осуществляется путём взаимного обмена участками родительских хромосом, расположенных в зонах А, В, С, D (рис. 2). При скрещивании двух родительских особей получаются два потомка, генотип которых представлен сочетанием наборов генов в зонах А-D и С-В родительских особей.

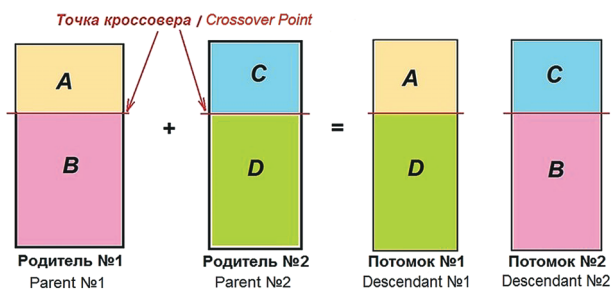


Рис. 2. Схема работы механизма одноточечного кроссовера

Fig. 2. Operating scheme of a single-point crossover mechanism

В данной задаче изменяться (мутировать) может только ген – количество потреблённых запасных частей. Принято, что мутациям подвергаются гены, имеющие наибольшую вероятность появления в хромосоме. Если анализируется потребление запасных частей в конкретный период полевых работ, например, за три прошлых года, и конкретная запасная часть (ген) была необходима каждый год, то её вероятность востребования составит  $P(\chi_i) = 3/3 = 1$ . Если ген был отмечен только в двух годах, то его вероятность составит  $2/3 = 0,6667$ , а если один год, то  $1/3 = 0,3333$ . Установлен порог возникновения мутации генов:  $P(\chi_i) \geq 0,6667$ . Значение гена у мутирующих хромосом будет определяться как случайное целое число в наблюдаемом диапазоне от min до max.

В ходе селекции при отборе родительских особей оценку жизнеспособности каждой строки хромосомного набора проводили по условию [2]:

$$C_{pi} < U_i, \tag{1}$$

где  $C_{pi}$  – затраты на резервирование  $i$ -й запасной части, руб.;  $U_i$  – ущерб предприятия при отсутствии  $i$ -й запасной части в период работ, руб.

Целесообразно резервировать запчасти, стоимость затрат на резерв которых меньше ущерба от их отсутствия в период полевых работ. Затраты на резервирование включают в себя

стоимость приобретения, доставки и хранения  $i$ -й запасной части:

$$C_{pi} = C_i + C_d + C_{xpi} \tag{2}$$

или 
$$C_{pi} = \frac{L_d}{V_{TC}} \cdot C_{TC}^1 + n_i \cdot (C_i + C_{xpi}), \tag{3}$$

где  $C_i$  – средняя стоимость  $i$ -й детали, руб/шт.;  $C_d$  – стоимость доставки деталей, руб.;  $C_{xpi}$  – стоимость хранения  $i$ -й запасной части за период, руб/шт.;  $L_d$  – расстояние доставки из торгующей организации, км;  $V_{TC}$  – средняя скорость транспортного средства, км/ч;  $C_{TC}^1$  – стоимость одного часа использования транспортного средства для доставки, руб/ч;  $n_i$  – количество резервируемых  $i$ -х запасных частей на период, шт.

Потребное количество  $i$ -й запасной части определяли по формуле:

$$n_i < \frac{1}{(C_i + C_{xp})} \cdot \lambda_i \cdot N_i \cdot T_a \cdot T_{cm} \cdot n_{cm} \cdot \frac{2 \cdot L_d}{V_{TC}} \cdot (C_{пп}^1 + C_{TC}^1), \tag{4}$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность потребления  $i$ -й детали машинами в рассматриваемый сезон по данным прошлых лет, шт/(ч · маш.);  $N_i$  – количество машин, потребляющих  $i$ -ю деталь, шт.;  $T_a$  – продолжительность сезона работ, дни;  $T_{cm}$  – продолжительность смены, ч;  $n_{cm}$  – количество смен в день, шт.;  $C_{пп}^1$  – стоимость потерь продукции за один час простоя машины, руб.

Ущерб предприятия при отсутствии  $i$ -й запасной части в период полевых работ составил:

$$U_i = n_i \cdot [t_d \cdot C_{TC}^1 + (t_d + t_{уст}^i) \cdot C_{пп}^1], \tag{5}$$

где  $t_{уст}^i$  – время установки  $i$ -й запасной части на машину, ч.

Успешность отдельной особи (заказа на запчасти из  $K$ -наименований) определяем по критерию максимума предотвращённого ущерба  $\sum U$  от простоя машин по причине отсутствия запасных частей в период работ:

$$\sum_{i=1}^K U_i \rightarrow \max. \tag{6}$$

Приложение, реализующее предлагаемый генетический алгоритм (ГА) написано авторами на языке программирования Python. Для работы программного обеспечения создана специальная информационная модель данных, в которой отражены следующие параметры: стоимость и количество потребляемых запасных частей; количество машин, потребляющих запчасти в конкретный сезон работ; параметры  $\lambda_i$ ; значения времени установки запчастей на машину и др.

В рамках статьи не рассматривается структура информационной модели. На её основе сформирована база необходимых для работы ГА производственных данных в условиях конкретного предприятия. Разработанная информационная модель интегрирована с базой данных существующей программы для управления складом запчастей «Агрокомплекс-Ресурсы» (свид. гос. регистрации № 2006611143), внедрённой на предприятиях Ростовской области. Рассматриваемая задача резервирования запчастей решалась применительно к зерноуборочным комбайнам на операции уборки зерновых культур.

Определение эффективности предлагаемых решений осуществлялось после внедрения ПО путём статистической оценки времени  $T_b$  простоя комбайнов с ожиданием подвоза запчастей, дневной производительности  $W_{дн}$  и комплексного показателя надёжности комбайнов – коэффициента оперативной готовности  $K_{ор}$ . Коэффициент  $K_{ор}$  для конкретного

типа машин предприятия в период полевых работ определяется по формуле:

$$K_{ог} = \frac{T_p}{T_p + T_в}, \quad (7)$$

где  $T_p$  – период работы машин, ч;  $T_в$  – среднее время восстановления или время простоев машин по техническим причинам, ч.

**Результаты и их обсуждение.** Окно программы, реализующей ГА, представлено на рисунке 3. В таблице слева

пользователь имеет возможность видеть потребление запасных частей в период выполнения конкретной полевой операции за последние три года и более. Программа за каждый год группирует запчасти по наименованию и составляет их общий список. После указания нужной полевой операции и нажатия на кнопку «Расчёт резерва» программа запускает предлагаемый генетический алгоритм. Результат выполнения ГА выводится программой в виде реестра рекомендуемых к заказу запасных частей (таблица справа).

Наименование детали	Выдан	Цена, руб.	Стоим.храп.	Труд.устан.
Подшипник 180310 скл.4	2.00	462.22	117.21	0.89
Предохранители скл.4	3.00	58.00	17.22	0.60
Преобразователь ПРП1М скл.4	8.00	445.01	63.97	1.00
Привод 238АК-4011210 насоса НШ-3	3.00	6728.97	159.05	1.16
Прижим 3518050-121020 головки нож	1.00	384.33	63.97	1.00
Провод ПГВА-0,75 скл.4	100.00	17.40	17.22	0.60
Пружина 10.05.09.130А мех.мн.вкл.м	1.00	3918.21	117.21	0.89
Редуктор МК 23М.04.000 борт.прав.с	1.00	3990.00	469.53	3.62
Рем.набор прокладок дв.ЯМЗ-236 Р1	1.00	894.20	63.97	1.00
Ремень 11х10-1120 скл.4	2.00	191.18	17.22	0.84
Ремень 14х13-1180 скл.4	2.00	383.79	63.97	1.00
Ремень 2УВ-2240 скл.4	3.00	6254.34	159.05	1.16
Ремень 2УВ-6000 скл.4	1.00	3675.03	117.21	0.89
Ремень 2УВ-6700 скл.4	2.00	6730.48	159.05	1.16
Ремень 3НВ-3750 скл.4	1.00	5019.61	117.21	1.16
Ремень 4НВ-3750 скл.4	1.00	9376.28	159.05	1.30
Ремень 6НВ-3600 БЦ скл.4	3.00	11664.81	159.05	1.30
Ремень УВ-3550 скл.4	1.00	1886.57	117.21	0.89
Ремень УВ 3150 скл.4	2.00	1738.14	117.21	0.89
Ресивер-осушитель скл.4	1.00	400.00	63.97	1.00
Рукав 16х25-1,6 маслобенз. скл.4	1.00	197.20	17.22	0.84
Рукав м 30х1,5 L-1050 скл.4	1.00	750.00	63.97	1.00
Рукав напорн. 75х6,3 скл.4	0.20	890.00	63.97	1.00
Рукав РВД м 16х1,5 L-600 скл.4	2.00	350.00	63.97	1.00
Рычаг купака 10.02.02.631А-01 скл.4	1.00	5064.76	117.21	1.16
Саморез 35х35 скл.4	5.00	1.93	17.22	0.60
Сварка холодная скл.4	1.00	121.14	17.22	0.60
Сегмент 10961.03К скл.4	100.00	47.20	17.22	0.60
Сегмент ножа Н066.14 скл.4	11.00	33.93	17.22	0.60

№п/п	Наименование детали	Заказать	ед.изм.
20	Кольцо уплотн. скл.4	35.0	шт.
21	Лампочка 12-1 скл.4	2.0	шт.
22	Лампочка 24-1 скл.4	2.0	шт.
23	Манжета 236-1029240 (24х46) скл.4	1.0	шт.
24	Палец шнека жатки 3518050-18037 скл.4	5.0	шт.
25	Патрубок вод.радиат. РСМ10.05.00041 скл.4	1.0	шт.
26	Пена монтажная Пен.монт. скл.4	2.0	шт.
27	Подшипник 1680206 скл.4	4.0	шт.
28	Подшипник 1680207 скл.4	4.0	шт.
29	Подшипник 180204 скл.4	9.0	шт.
30	Подшипник 180205 скл.4	2.0	шт.
31	Подшипник 180304 скл.4	1.0	шт.
32	Подшипник 180309 скл.4	1.0	шт.
33	Подшипник 180310 скл.4	2.0	шт.
34	Предохранители скл.4	3.0	шт.
35	Преобразователь ПРП1М скл.4	8.0	шт.
36	Прижим 3518050-121020 головки ножа скл.4	1.0	шт.
37	Провод ПГВА-0,75 скл.4	100.0	шт.
38	Рем.набор прокладок дв.ЯМЗ-236 РНП дв.ЯМЗ-236 скл.4	1.0	шт.
39	Ремень 11х10-1120 скл.4	2.0	шт.
40	Ремень 14х13-1180 скл.4	2.0	шт.
41	Ремень УВ 3150 скл.4	2.0	шт.
42	Ресивер-осушитель скл.4	1.0	шт.
43	Рукав 16х25-1,6 маслобенз. скл.4	1.0	шт.
44	Рукав м 30х1,5 L-1050 скл.4	1.0	шт.
45	Рукав РВД м 16х1,5 L-600 скл.4	2.0	шт.
46	Саморез 35х35 скл.4	5.0	шт.
47	Сварка холодная скл.4	1.0	шт.
48	Сегмент 10961.03К скл.4	100.0	шт.

Рис. 3. Вид окна программы с результатом расчёта резерва запасных частей на сезон уборки

Fig. 3. View of the program window with the result of calculating the reserve of spare parts for the harvesting season

При работе программа сначала осуществляет формирование трёх родительских особей. Особь № 1 представляет собой список запасных частей, потреблённых комбайнами за сезон уборки в прошлом году. При его формировании в список попадают только записи (гены), отвечающие условию (1). Особи № 2 и № 3 являются списками запасных частей, потреблённых в указанный сезон соответственно два и три года назад. Поскольку алгоритм реализуется в канонической форме, то программа выравнивает количество генов у всех родительских особей, ориентируясь на число генов наиболее успешной родительской особи. Успешность особи определяется по критерию (6). Далее выполняется процедура скрещивания родительских особей, в основе которой лежит механизм одноточечного кроссовера (рис. 2). Применяется следующий порядок скрещивания родительских особей: № 1 и № 2; № 1 и № 3; № 2 и № 3.

После 100 итераций скрещивания трёх родителей получили популяцию из 600 потомков и трёх родителей. Из полученного реестра потомков выбирается новая родительская особь с максимальной приспособленностью, то есть способная максимально снизить ущерб от простоя машин при отсутствии запасных частей. Здесь для отбора особей в новую популяцию использовался метод супериндивидуального приближения, в котором выбирается наилучшая особь среди числа родителей и их потомков – элитная хромосома [15]. Далее

новая родительская особь скрещивается с наиболее успешной из первых трёх родительских особей. В итоге в полученном реестре программа определяет номер наиболее успешной особи, а её хромосомный набор выводится программой на форму приложения (таблица справа на рисунке 3). Это и есть результат расчёта резерва запасных частей на период уборки зерновых культур, который можно распечатать в форме заявки.

Разработанное программное обеспечение применялось в сельскохозяйственном предприятии для обоснования сезонных резервов запасных частей комбайнов Дон-1500Б и TORUM. База данных склада запчастей предприятия по комбайнам содержит более 2500 наименований, большая часть которых используется в основном в период ремонта комбайнов вне сезона уборочных работ. Применение ГА позволило из имеющейся номенклатуры запасных частей выделить 66 наиболее значимых позиций, которые следует резервировать на сезон уборки. Отметим, что прежде на предприятии на период уборки запасные части комбайнов набирались без использования расчётных методов. Инженеры резервировали многие из выявленных с помощью ГА позиций, но их резервное количество при этом не соответствовало рассчитанному с помощью ГА.

В ходе исследований установлено, что случайная величина время  $T_в$  простоя комбайнов по техническим причинам с ожиданием подвоза запчастей подчиняется закону

распределения Вейбулла (табл.). Наличие резерва запчастей, обоснованного с использованием предлагаемого ПО, позволило снизить время  $T_0$  для комбайнов на 37%.

Снижение времени простоев сказывается на увеличении дневной производительности комбайнов, которая описывается нормальным законом распределения (рис. 4).

Таблица

Основные статистические характеристики параметра  $T_0$  до и после внедрения программного обеспечения

Table

Main statistical characteristics of the  $T_0$  parameter before and after the software introduction

Показатель <i>Indicator</i>	Значение $T_0$ , мин / $T_0$ values, min	
	до внедрения <i>before the introduction</i>	после внедрения <i>after the introduction</i>
Среднее значение $\bar{h}$ / Average value $\bar{h}$	102,84	64,72
Стандартное отклонение $\sigma$ / Standard deviation $\sigma$	59,78	46,96
Дисперсия $D$ / Variance $D$	3573,933	2205,72
Коэффициент вариации $V$ / Coefficient of variation $V$	0,58	0,72
Параметры закона распределения Вейбулла / Parameters of Weibull probability	$a = 120,94; b = 1,86$	$a = 75,30; b = 1,88$

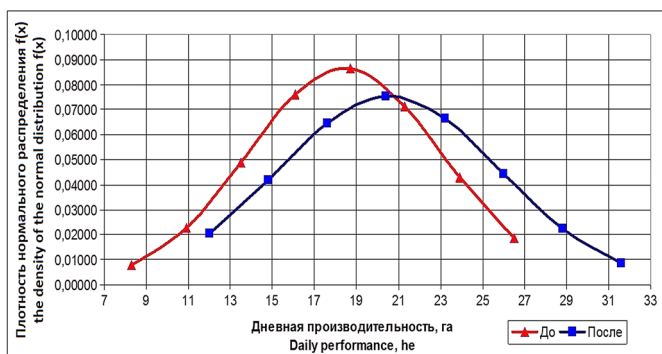


Рис. 4. Изменение дневной производительности зерноуборочных комбайнов при внедрении ПО для расчёта резервов запасных частей

Fig. 4. Changing the daily productivity of combine harvesters when implementing software for calculating the reserves of spare parts

График плотности распределения дневной производительности комбайнов после внедрения ПО смещается вправо, что говорит об увеличении производительности комбайнов. Коэффициент  $K_{ор}$  для зерноуборочных комбайнов до внедрения ПО составлял 0,893, а после внедрения увеличился до 0,932.

Выводы

Метод резервирования запасных частей для сельскохозяйственной техники, основанный на применении генетического алгоритма в сочетании с базой данных, содержащей информацию о реальном потреблении запасных частей машинами не менее чем за три предыдущих года, позволяет при сезонном резервировании запасных частей с использованием предлагаемого программного обеспечения снизить время простоя комбайнов в ожидании подвоза запчастей на 37%, увеличить дневную производительность комбайнов на 11,4%, а комплексный показатель надёжности – на 4,38%.

Список использованных источников

1. Царев Ю.А., Симон Д.В. Алгоритм управления запасами как метод управления эксплуатационной надёжностью зерноуборочных комбайнов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 115. С. 263-283. EDN: VJLQYN.
2. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. Математическое обеспечение информационной системы для резервирования запасных частей сельскохозяйственной техники // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем: Материалы IV Международной научно-практической конференции. Елец, 2020. С. 374-379. EDN: ETZXPY.
3. Филатов М.И., Юсупова О.В. Формирование резерва запасных частей для ремонта транспортно-технологических машин // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10 (171). С. 213-218. EDN: TPNRNR.
4. Рязанова Е.С., Корчагина Е.В. Экономическая эффективность WMS-систем в складском хозяйстве // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2017. С. 106-108. EDN: YNABFX.
5. Шрайбфедер Дж. Эффективное управление запасами: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 304 с.
6. Жуков О.В., Сазонов С.П., Оноприенко Ю.Г., Мершиева Г.А. Методика применения ABC/XYZ-анализа для целей управления запасами в ERP-системе предприятия // Вестник Воронежского

References

1. Tsarev Yu.A., Simon D.V. Algorithm of inventory management as a control method of operational reliability of combine harvesters. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvenno-go agrarnogo universiteta*. 2016; 115: 263-283. (In Rus.)
2. Nikitchenko S.L., Grinchenkov D.V. Mathematical support of an information system for reserving spare parts of agricultural machinery. *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadozhnosti, ustoychivosti i effektivnosti sistem: Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yelets, 2020: 374-379. (In Rus.)
3. Filatov M.I., Yusupova O.V. Formirovanie rezerva zapasnykh chastei dlya remonta transportno-tekhnologicheskikh mashin [Forming a reserve of spare parts for the repair of transport and technological machines]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 10 (171): 213-218. (In Rus.)
4. Ryzanova E.S., Korchagina E.V. Economic efficiency of WMS systems in warehousing. *Nedelya nauki SPbPU: Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Sankt-Peterburg, 2017: 106-108. (In Rus.)
5. Schreibfeder G. Efficient inventory management. Translated from English. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Alpina Business Books, 2006. 304 p.
6. Zhukov O.V., Sazonov S.P., Onoprienko Yu.G., Mershieva G.A. Methods of applying ABC/XYZ-analysis for the inventory management purposes within the ERP-system. *Vestnik Voronezhskogo*

государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 74, № 1. С. 477-484. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-477-484>

7. Рахутин М.Г. Перспективы применения нейросетей для прогноза расхода запасных частей гидрооборудования складных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 2. С. 147-148. EDN: MURJLZ.

8. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 384 с.

9. Бабина О.И. Разработка оптимизационной имитационной модели для поддержки процессов планирования складских систем // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6, № 2. С. 295-307. EDN: SITETL.

10. Проталинский О.М., Щербатов И.А., Проталинская Ю.О. Интеллектуальное управление производственными активами в энергетике // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика: Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. М.: ГУУ, 2017. С. 5-10. EDN: YVMQVB.

11. Сердюков В.И., Сердюкова Н.А., Шишкина С.И. Повышение безотказной работы изделий с использованием элементов искусственного интеллекта // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 1 (112). С. 62-72. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2017-1-62-72>

12. Волочков И.В. Эволюционное моделирование в процессе принятия решений // Экономика и предпринимательство. 2020. № 2 (115). С. 897-901. EDN: HEUCXV.

13. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. The MIT Press, Cambridge, 1992. 211 p.

14. Доронин В.А. Применение генетического алгоритма для оптимизации складских запасов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы конференции. М.: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. 2006. № 9. С. 117-123. EDN: YNWXQV.

15. Periaux J., Chen H.Q., Mantel B., Sefrioui M., Sui H.T. Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozzle optimization problems. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2001; 37 (5): 417-429. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(00\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00055-X)

#### Критерии авторства

Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Никитченко С.Л., Гринченков Д.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022

Одобрена после рецензирования 04.08.2022

Принята к публикации 22.10.2022

*gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. 2017; 74(1): 477-484. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-1-477-484> (In Rus.)

7. Rakhutin M.G. Prospects of using neural networks for forecasting the consumption of spare parts for downhole hydraulic equipment. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2002; 2: 147-148. (In Rus.)

8. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. Translated from Polish by I.D. Rudinskiy. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2013. 384 p. (In Rus.)

9. Babina O.I. Developing a simulation optimization model for supporting the planning of warehouse systems. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye*. 2014; 6(2): 295-307. (In Rus.)

10. Protalinskiy O.M., Shcherbatov I.A., Protalinskaya Yu.O. Intelligent management of production assets in the energy sector. *Shag v budushchee: iskusstvenniy intellekt i tsifrovaya ekonomika: Materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, GUU, 2017: 5-10. (In Rus.)

11. Serdyukov V.I., Serdyukova N.A., Shishkina S.I. Increase in product uptime by using elements of artificial intelligence. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*. 2017; 1(112): 62-72. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2017-1-62-72> (In Rus.)

12. Volochkov I.V. Evolutionary modeling in decision making. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2020; 2 (115): 897-901. (In Rus.)

13. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. The MIT Press, Cambridge, 1992. 211 p. ISBN0262581116.

14. Doronin V.A. Application of a genetic algorithm for inventory optimization. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh: Materialy konferentsii*. 2006; 9: 117-123. (In Rus.)

15. Periaux J., Chen H.Q., Mantel B., Sefrioui M., Sui H.T. Combining game theory and genetic algorithms with application to DDM-nozzle optimization problems. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2001; 37(5): 417-429. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(00\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(00)00055-X)

#### Contribution

S.L. Nikitchenko and D.V. Grinchenkov performed theoretical studies and, based on the results obtained, wrote the manuscript. S.L. Nikitchenko and D.V. Grinchenkov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 19.07.2022

Approved after reviewing 04.08.2022

Accepted for publication 22.10.2022