ISSN 2305-2538 HAYKA B ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA, № 2 (62), 2023

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ДИАГНОСТИКИ, ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА, ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Тип статьи: научная

УДК 623.462.22:623.465.757

DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-74-92

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РЕМОНТНО-ОБСЛУЖИВАЮЩЕЙ БАЗЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ

Юрий Викторович Родионов ¹, Евгений Андреевич Деревянко ², Александр Егорович Ломовских ³, Павел Тихонович Пантелеев ⁴, Василий Сергеевич Январёв ⁵

¹Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия ¹Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Россия ¹rodionow.u.w@rambler.ru

^{2,3,4,5}ВВА имеми профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия ³lomovskih1979@yandex.ru

Автор ответственный за переписку: Александр Егорович Ломовских, lomovskih1979@yandex.ru

Corresponding author: Alexander Lomovskih, lomovskih1979@yandex.ru

Реферат. Эффективная работа машинно-тракторного парка (МТП) современного агропромышленного комплекса требует контроля его технического состояния системой ремонтно-обслуживающих баз (РОБ). Предложена методика обоснования структуры и характеристик системы РОБ с использованием специальных систем поддержки принятия решений (СППР), что позволит реализовать стратегию технического обслуживания «по фактическому состоянию», а также сократить сроки восстановления работоспособности МТП. Методика включает в себя совокупность взаимосвязанных моделей: прогнозирования и диагностирования технического состояния МТП, функционирования системы обеспечения работоспособности МТП и формирования стоимостных зависимостей на функционирование системы РОБ. Применены алгоритмы: перераспределения затрат между мероприятиями технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР); решения оптимизационной задачи, основанный на модифицированном методе Нелдера-Мида. Выявлено, что малое значение межрегламентного интервала проведения ТО позволяет добиться достаточно высоких значений для коэффициента технической готовности (Кг). Показано, что основным мероприятием, позволяющим снизить эксплуатационные затраты и положительно влиять на значение Кг является рациональное распределение времени на проведение проверок, используемых при ТО образиа МТП. Использование 2 -6 специалистов позволяет обеспечить длительность ТО по состоянию единицы МТП от двух до четырех часов. Отклонения более 30 минут при TP от нормативных значений времени восстановления работоспособности привело к резкому снижению уровня готовности при существующем уровне параметра потока внезапных отказов. Привлечения в среднем 3 -.4 специалистов требуется для выполнения ТР. Установлено, что основным условием оптимальности работы образца МТП является индивидуальный мониторинг его технического состояния, что позволяет на 40% сократить продолжительность регулировочнонастроечных и ремонтно-восстановительных мероприятий. Условием эффективности системы РОБ является наличие в составе бригад, выполняющих эти мероприятия, не менее четырех человек инженерно-технического состава. Суммарное снижение затрат на обеспечение работоспособного состояния исследуемой техники составило порядка 18 - 20%.

Ключевые слова: диагностирование, прогнозирование технического состояния, ремонтнообслуживающая база, поиск отказов, регрессионный анализ, метод группового учёта аргументов, техническое обслуживание, ремонт.

METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF THE REPAIR AND MAINTENANCE BASE SYSTEM THAT ENSURES THE OPERABILITY OF MODERN EQUIPMENT

Yuri Rodionov¹, Evgeny Dereviank², Alexander Lomovskih³, Pavel Panteleev⁴, Vasily Yanvarev⁵

¹Tambov state technical university, Tambov, Russia ¹Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia ¹rodionow.u.w@rambler.ru

^{2,3,4,5}Air force Academy named after Professor N. E Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Voronezh, Russia ³lomovskih1979@yandex.ru

Abstract. The effective operation of the machine and tractor fleet (MTF) of a modern agro-industrial complex requires monitoring of its technical condition by a system of repair and maintenance bases (RMB). A methodology for substantiating the structure and characteristics of the ROB system using special decision support systems (SDSS) is proposed, which will make it possible to implement the maintenance strategy "by actual state", as well as reduce the recovery time of the MTF. The methodology includes a set of interrelated models: forecasting and diagnosing the technical condition of the MTF, the functioning of the system for ensuring the operability of the MTP and the formation of cost dependencies on the functioning of the RMB system. Algorithms were applied: redistribution of costs between maintenance activities (TO) and current repairs (TR); solution of the optimization problem based on the modified Nelder-Mead method. It was revealed that the small value of the maintenance interval allows to achieve sufficiently high values for the coefficient of technical readiness (Kg). It is shown that the main measure that allows to reduce operating costs and positively influence the value of Kg is the rational distribution of time for carrying out checks used during maintenance of the MTF sample. The use of 2-6 specialists makes it possible to ensure the duration of maintenance according to the state of the ICC unit from two to four hours. Deviations of more than 30 minutes at TR from the normative values of the recovery time led to a sharp decrease in the level of availability at the current level of the sudden failure flow parameter. Attracting an average of 3 - 4 specialists is required to complete the TR. It has been established that the main condition for the optimal operation of the MTF sample is individual monitoring of its technical condition, which makes it possible to reduce the duration of adjustment and repair measures by 40%. The condition for the effectiveness of the RMB system is the presence of at least four people of engineering and technical staff in the teams that carry out these activities. The total cost reduction for ensuring the working condition of the studied equipment was about 18 - 20%.

Keywords: diagnostics, forecasting of technical condition, repair and maintenance base, failure search, regression analysis, method of group accounting of arguments, maintenance, repair.

Для цитирования: Родионов Ю.В., Деревянко Е.А., Ломовских А.Е., Пантелеев П.Т., Январёв В.С. Методика обоснования структуры и характеристик системы ремонтно-обслуживающей базы, обеспечивающей работоспособность современной техники // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2023. Т. 62, № 2. С. 74-92. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-74-92.

For citation: Rodionov Y., Derevianko E., Lomovskikh A., Panteleev P., Yanvarev V. Methodology for substantiating the structure and characteristics of the repair and maintenance base system that ensures the operability of modern equipment. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 62(2): 74-92. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-74-92.

Введение. Для эффективного работы машинно-тракторного парка (МТП) современного агропромышленного комплекса (АПК) необходим надлежащий контроль за её техническим состоянием. Этот контроль осуществляется системой ремонтно-обслуживающих баз (РОБ), обеспечивающих работоспособность МТП. Ремонтно-обслуживающая база АПК представляет собой совокупность обслуживающих предприятий и подразделений, которые обеспечивают техническое обслуживание, ремонт, а также хранение сельскохозяйственной техники для её

поддержания в работоспособном состоянии.

Средства для поддержания МТП в работоспособном и исправном состоянии в сельскохозяйственных предприятиях России многообразны и достаточно мощные. Исторически сложившаяся система ремонтно-обслуживающей базы имеет три уровня: 1- фермерских хозяйств, арендных коллективов и других сельскохозяйственных предприятий, эксплуатирующих технику; 2 - районных (межрайонных) машинно-технологических станций (МТС); 3 - областных, краевых, республиканских предприятий. Объекты РОБ 1-го уровня: центральная ремонтная мастерская (ЦРМ); автогараж; машинный двор; нефтесклад; пункты технического обслуживания (ПТО); передвижные средства технического обслуживания (ТО) и ремонта в бригадах и отделениях. К объектам РОБ 2-го уровня: ремонтная мастерская общего назначения (МОН); технического обслуживания тракторов (СТОТ); станция технического обслуживания автомобилей (СТОА); станция технического обслуживания животноводческих комплексов и ферм (СТОЖ); станция технического обслуживания сельскохозяйственных машин – комбайнов (СТО СХМ (К)); технический обменный пункт (ТОП); передвижные средства ТО и ремонта [1]. К объектам РОБ 3го уровня относятся специализированные заводы и предприятия по ремонту тракторов, автомобилей, комбайнов, двигателей, гидроагрегатов, топливной электрооборудования и т.д.

Ремонтно-обслуживающие базы существуют трех типов (таблица 1). Рекомендуемые типы планировок РОБ приведены в таблице 2.

Для хозяйств каждого типа варианты планировок различаются составом зданий, сооружений, площадок для хранения и других производственных объектов. В настоящее время комплексная система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) машин в сельском хозяйстве предусматривает три стратегии ТОиР: по потребности после отказа - C_1 ; регламентированная в зависимости от наработки (календарного времени) по сроку и содержанию ремонтнообслуживающих воздействий - C_2 ; по фактическому техническому состоянию МТП с периодическим или непрерывным контролем (диагностированием) - C_3 . Каждая их этих стратегий имеет свои преимущества и недостатки. При стратегии по потребности после отказа какой-либо составной части достигается полное использование ресурса МТП и составляющих ее элементов. Но при этом снижается надёжность (безотказность), увеличиваются простои машин по техническим причинам и связанные с этими простоями потери.

Таблица 1- Типы ремонтно-обслуживающих баз

1 a	таолица 1- типы ремонтно-оослуживающих оаз											
Тип	Хозяйство	Количество	Характеристика РОБ									
РОБ		тракторов										
Α	крупное	100-200	каждое отделение (бригада) имеет самостоятельный									
			хозяйственный центр – ПТО, машинный двор, ЦРМ, автогараж,									
			нефтесклад, материально-технический склад и									
			административно-технические здания									
Б	среднее	50-100	на центральной усадьбе находится хозяйственный центр одного									
			отделения (бригады) – ПТО, машинный двор, ЦРМ, автогараж,									
			нефтесклад. Другие отделения имеют свои ПТО.									
В	небольшое	25-100	все средства сосредоточены в одном хозяйственном центре									

Таблица 2 – Типовые проекты центральных ремонтных мастерских

Tuosinga 2 Timobbie npoektisi gentipusibilisin pemontribin maetepektin									
Показатели	Значения показателей для проектов								
	816-127	816-128	816-129	816-130	816-131	816-132			
Парк тракторов хозяйства	25	50	75	100	150	200			
Производственная площадь	528,6	746,4	950,8	1035,1	1196,6	1326,7			
Число производственных рабочих	14	19	28	36	47	59			

При низкой надёжности машины применение данной стратегии практически невозможно, так как поток отказов может парализовать работу в самый ответственный период

сельскохозяйственных циклов (посевная, уборочная и др.). Сфера этой стратегии — устранение последствий случайных отказов, которые не удалось предотвратить. Неприемлемо использование стратегии 1 для большинства операций технического обслуживания, носящих обязательный характер: замена масла, фильтрующих элементов, проверка уровня тормозной жидкости и др. Поэтому практически с начала механизации сельскохозяйственного производства, работоспособность техники поддерживается на основе предупредительных стратегий обслуживания и ремонта: по регламенту C_2 и по состоянию C_3 .

В первые годы доминировала планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта (в соответствии с ГОСТ 18322-78), представляющая собой совокупность взаимосвязанных средств, документации и исполнителей, необходимых для поддержки и восстановления качества МТП, входящих в систему. Для выполнения указанных работ планово-предупредительная система предусматривает следующие ремонтно-обслуживающие действия, с помощью которых обеспечивается необходимый техническое состояние машины и ее работоспособность в течение всего периода эксплуатации: техническое обслуживание ежесменные (ЕТО), номерные (ТО-1, ТО-2, ТО-3), сезонные (СТО), при хранении; текущий ремонт (ТР); капитальный ремонт (КР).

Так как система построена на планово-предупредительном принципе, то она в полной мере не использует современные возможности вычислительных систем, а также не обладающей возможностью прогнозирования технического состояния МТП. Ведение новых методик прогнозирования, диагностирования технического состояния, а также моделирование работы системы в целом позволит принимать решения по изменению сроков обслуживания техники и перейти от планово-предупредительных принципов к обслуживанию по фактическому состоянию, что может существенно повысить коэффициент технической готовности (КТГ) МТП.

Формируя такую сложную систему необходимо определить её структуру и характеристики.

Реализация подобных средств возможна на основе применения специальных систем поддержки принятия решений (СППР). Использование таких СППР позволит реализовать стратегию технического обслуживания «по фактическому техническому состоянию», а также сократить сроки оперативного восстановления работоспособности МТП.

Так как система обеспечения работоспособности состоит из подсистем технического обслуживания и ремонта, то существует некая неопределённость при её формировании, какую из полсистем насытить больше.

Таким образом, основная задача, которую нужно разрешить в рамках исследования, заключается в необходимости поиска компромисса между затратами на достижение значений характеристик подсистем технического обслуживания и текущего ремонта (ТО и ТР) при обеспечении требуемого уровня значений показателя эффективности системы РОБ, обеспечивающей работоспособность $MT\Pi - S$, с учетом применения алгоритмов контроля и прогнозирования технического состояния образцов $MT\Pi$.

Результаты и обсуждение. Представим систему *S* в виде кортежа:

$$S = \langle U_S, F_S, Q_S, G_S, E_S \rangle, \tag{1}$$

где U_S – множество целей функционирования системы S; F_S – множество функций системы S; Q_S = $\{J_S, \delta(J_S \times J_S)\}$ – структура системы S (J_S – множество элементов подсистемы S (совокупность подразделений технического обслуживания и ремонта, а также средств технического обслуживания и ремонта), $\delta(J_S \times J_S)$ – отношения, определяющие наличие взаимосвязей между элементами S); $G_S(J_S)$ – множество характеристик элементов S; $E_S \times F_S \times J_S \times J_V$ – множество, характеризующее распределение функций между элементами системы S.

Главная цель функционирования системы S заключается в поддержании МТП в высокой готовности к использованию по назначению. Подцелями функционирования системы S являются: U_{S1} – поддержание работоспособности образцов МТП; U_{S2} – восстановление работоспособности образцов МТП. Соответственно, функциями системы S будут являться: F_{S1} – проведение технического обслуживания образцов МТП; F_{S2} – проведение текущего ремонта образцов МТП.

Реализация функций F_{SI} и F_{S2} в системе РОБ, обеспечивающих работоспособность МТП, определяется возможностью реализации в СППР функции прогнозирования изменения технического состояния образцов МТП F_{S3} и функции распознавания диагностических признаков при идентификации отказавших элементов F_{S4} [2].

Подсистемами системы S выступают: подсистема технического обслуживания, реализующая функцию F_{S1} и подсистема текущего ремонта, реализующая функцию F_{S2} . Тогда множества исследуемых структур Q_S и характеристик G_S включают в себя элементы, представленные в таблице 3

Таблица 3 — Совокупность оптимизируемых переменных системы S

			1				
№ п/п	Обозначение переменной	Принадлежнос ть к множеству	Наименование переменной				
1	$N_{{ m TOfp}}^{{ m cneq}}$	Q_S	количество специалистов в подразделении ТО				
2	$N_{\scriptscriptstyle m TOpn}^{\scriptscriptstyle m cneu}$	Qs	количество специалистов в ремонтном подразделении				
3	$T_{ m TO}$	G_S	длительность межрегламентного интервала проведения TO				
4	$ au_{ ext{TO}}$	G_S	продолжительность проведения ТО				
5	t_Π	G_{S}	среднее время поиска и локализации отказавшего элемента				

В этом случае синтез системы S возможен посредством решения оптимизационной задачи, математическая формулировка которой имеет вид: из множеств допустимых вариантов структуры Ω_{QS} и значений характеристик Ω_{GS} определить такие их значения $Q^*{}_S$ и $G^*{}_S$, при которых для рассматриваемого агропромышленного комплекса – V (являющегося для нашей системы S, суперсистемой), затраты C на функционирование варианта системы S^* будут минимальны:

$$C = f(Q_S^*, G_S^*, V) \longrightarrow \min$$
 (2)

При ограничении на значение показателя эффективности системы S:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0((Q_S, G_S) | \mathbf{V}, F_{S3})}{T_0((Q_S, G_S) | \mathbf{V}, F_{S3}) + T_B((Q_S, G_S) | \mathbf{V}, F_{S4})} \ge K_{\Gamma_{\text{type6}}}, \mathbf{U}_S = const, \mathbf{F}_S = const$$
(3)

где $K_{\Gamma_{\text{TDe}6}}$ – требуемое значение коэффициента готовности МТП.

Исходные данные для решения задачи (2, 3) представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для обоснования системы S

	таолица т теходиме даниме для обоенования енетемы в								
No	Наименование параметра	Ед. изм	Обозна-						
Π/Π	паименование параметра	ъд. изм	чение						
	Множество, характеризующее комплекс МТП, V								
	Подмножество состава комплекса МТП J_V								
1.	Тип образца МТП в комплексе		i						
2.	Количество образцов МТП <i>i</i> -го типа		J_i						
	Множество эксплуатационно-технических характеристик МТП X								
	Подмножество характеристик надежности образцов МТП X_1								
3.	Количество номенклатур типовых элементов замены в образце	IIIT.	Φ						
٥.	MTΠ	ш1.	Ψ						
4.	Количество элементов каждой номенклатуры в образце і-го типа	шт.	$l^i_{\ \phi}$						

ISSN 2305-2538 НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA, № 2 (62), 2023

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ДИАГНОСТИКИ, ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА, ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм	Обозна- чение					
5.	Средняя наработка на (до) отказа элементов каждой номенклатуры в образце <i>i</i> -го типа	Ч	T_{φ}^{i}					
6.	Интенсивность внезапных отказов элементов каждой номенклатуры	ед/ч	$\lambda arphi$					
7.	Среднее время поиска отказов элементов каждой номенклатуры на множестве признаков их проявления	Ч	$t_{\pi ip}$					
	Подмножество технологических характеристик работ с образца	ии МТП Х2						
8.	Количество проверок технического обслуживания образца МТП		К					
9.	Продолжительность рабочего дня специалистов ремонтного подразделения полка	Ч	t _{РД}					
10.	Количество рабочих дней в периоде планирования		$N_{ m PД}$					
	Подмножество стоимостных характеристик МТП Х ₃							
11.	Удельные суммарные затраты на содержание технического персонала	руб/год	$C_{ m JC}$					
12.	Удельные суммарные затраты на затраченные ГСМ	руб/год	$C_{\Gamma ext{CM}}$					
13.	Удельные суммарные затраты на затраченную электроэнергию	руб/год	$C_{\ni_{\mathbb{J}}}$					

Решение поставленной задачи требует разработки совокупности взаимоувязанных моделей: прогнозирования технического состояния МТП; диагностирования технического состояния МТП; функционирования системы S, позволяющей исследовать механизм влияния оптимизируемых параметров на коэффициент готовности МТП; формирования стоимостных зависимостей на функционирование системы S; решения оптимизационной задачи по обоснованию системы обеспечения работоспособности МТП.

Одной из основных функций системы РОБ обеспечивающей работоспособность МТП является предупреждение параметрических отказов и профилактической замены потенциально ненадёжных элементов.

Реализация указанной методики в составе комплекса специального программного обеспечения позволяет сформировать функции управления F_{S3} , которая позволяет осуществлять информационную поддержку обслуживающего персонала и обеспечение принятия решения на проведение технического обслуживания.

В зависимости от стоящей задачи по использованию техники, можно задать этот период и получить достоверный прогноз вероятности отказа, а, следовательно, и объёму технического обслуживания.

Управление техническим состоянием с учётом реализации в СППР алгоритма прогнозирования заключается в присвоении функции управления следующих значений (4) при которых, в случае F_{S3} =2 эксплуатация образца МТП останавливается, он переводится в режим текущего ремонта, в случае F_{S3} =1 эксплуатация образца МТП продолжается, осуществляется определение сроков очередного ТО, в случае F_{S3} =0 эксплуатация образца МТП продолжается в штатном режиме.

$$F_{\text{S3}} = \begin{cases} 2, \text{ если } \xi_{in} > \xi_{i}(t) > \xi_{ie} \\ 1, \text{если } \xi_{in} > \xi_{i}(t + T_{\text{ПР}}) > \xi_{ie} \\ 0, \text{для остальных случаев} \end{cases} \tag{4}$$

где ξ ін и (или) ξ ів – соответственно нижнее и верхнее предельно-допустимое значение і-го параметра; ξ ($t+T_{np}$) – экстраполируемое значение функции; T_{np} – период прогноза.

Алгоритм, реализующий методику прогнозирования технического состояния МТП, представлен на рисунке 1.

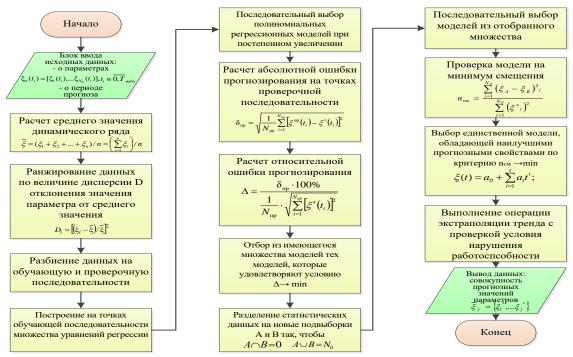


Рисунок 1 — Алгоритм, реализующий методику прогнозирования технического состояния $\mathsf{MT\Pi}$

Информационная поддержка процессов обеспечения оперативного восстановления работоспособного состояния образцов МТП основана на применении в составе СППР специализированных программно-аппаратных комплексов, которые позволяют повысить оперативность и достоверность определения места отказа за счёт использования алгоритмов интеллектуального направленного поиска. Для реализации таких алгоритмов предназначена методика диагностирования технического состояния МТП, позволяющая реализовать представление образца МТП моделью в контексте «признак – диагноз» и сформировать алгоритм поиска места отказа, который позволяет уменьшить количество контрольных диагностических операций, и, тем самым, сократить время поиска отказа. При этом функция распознавания диагностических признаков при идентификации отказавших элементов F_{S4} принимает значение «1» при возможности использования предлагаемого алгоритма и «0» при использовании традиционных методов поиска отказов.

В данной модели множеством $\mathbf{U} = \{u_1, u_2 ... u_v\}$ являются внешние признаки неисправностей (отказов) в узлах и агрегатах, а в свою очередь им соответствуют определённые множества $\mathbf{D} = \{d_1, d_2 ... d_m\}$. Условием является что множеству U, должно один или несколько диагнозов. Далее формируется \mathbf{U}_x из соединения элементов U [3]:

$$\mathbf{U}_{x} = \{u'_{1}...u'_{s}\} \subseteq \mathbf{U} = \{u_{1}...u_{n}\}$$
 (5)

 D_x формируется аналогичным способом:

$$\mathbf{D}_{x} = \left\{ d_{1}^{\prime} ... d_{r}^{\prime} \right\} \subseteq \mathbf{D} = \left\{ d_{1} ... d_{m} \right\} . \tag{6}$$

Иерархическая структура модели диагностики представлена на рисунке 2.

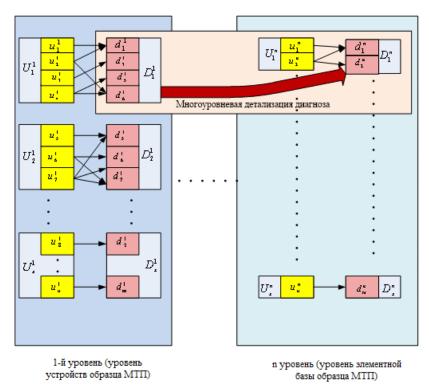


Рисунок 2 – Модель диагностики технического состояния МТП

Использование методики существенно снижает поиск времени постановки правильного диагноза за счёт изменения порядка проведения диагностических работ, в зависимости от величины вероятности и иерархичности сформированной структуры.

Остаются только решить эту задачу при большой неопределённости. Решение осуществляется применением метода Байеса. Необходимые априорные данные, будут получены из журналов функционального контроля за весь период эксплуатации в рассматриваемом подразделении или при необходимости получены опытным путём. Этими данными в нашем случае является:

 $P(D_i)$ вероятность диагноза и вероятность появления внешнего признака U_j в рассматриваемом узле или агрегате с состоянием $D_i - P(U_i/D_i)$:

$$P(D_i) = \frac{N_i}{N},\tag{7}$$

$$P(U_j/D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i}, (8)$$

где N — суммарное число отказов; N_i — число отказов с диагнозом D_i ; N_{ij} — число отказов с диагнозом D_i , обследованных по признаку U_j .

Далее необходимо полученную априорную вероятность пересчитать в апостериорную:

$$P(D_i/U_j) = \frac{P(D_i)P(U_j/D_i)}{\sum_{i=1}^{m} P(D_i)P(U_j/D_i)}$$
(9)

Новая матрица сформирована уже с учётом этого пересчёта и замены (рисунок 3).

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ДИАГНОСТИКИ, ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА, ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Диагноз ставится исходя из максимального значения вероятности.

Матрица «признак-диагноз»							Матрица «признак-диагноз»					
	D_{1}	D_2			D_{\cdot}			D_1	D_2			D_i
U_{1}	$P(U_1/D_1)$	$P(U_1/D_2)$		F	$P(U_1/D_i)$		$U_{\scriptscriptstyle 1}$	$P(D_1/U_1)$	$P(D_2/U_1)$			$P(D_i/U_1)$
U_2	$P(U_2/D_1)$	$P(U_2/D_2)$					U_{2}	$P(D_1/U_2)$				
U_{j}	$P(U_j/D_1)$			P	(U_j/D_i)		$U_{_{j}}$	$P(D_1/U_j)$				$P(D_i/U_j)$
	$P(D_1)$		<i>></i> >	F	$P(D_i)$			$P(D_1)$				$P(D_i)$
1 эт	1 этап					2 эт	гап					

Рисунок 3 – Логика построения матрицы для модели диагностики технического состояния МТП

Если диагноз недостаточно точный, то формируется новая матрица следующего уровня.

Так как в базу данных постоянно будет поступать новая информация о регистрации отказов, то самообучение будет происходит за счёт постоянного обновления и пересчёта вероятностей по указанному выше принципу.

На крайнем этапе формируется матрица времени поиска отказов $\mathbf{T}_{\Pi} = (t_{\Pi U,D})$ на основе матрицы «признак-диагноз», в качестве элементов которой выступают значения среднего времени поиска отказов (рисунок 4) [4].

Матрица времени поиска отказов по признакам их проявления											
	$egin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$										
U_{1}	$t_{\Pi 11}$	$t_{\Pi 12}$			$t_{\Pi 1i}$						
U_{2}											
U_{j}	$t_{\Pi j 1}$				$t_{\Pi ji}$						

Рисунок 4 — Вид матрицы времени поиска отказов, сформированной на основе матрицы вероятности возникновения отказов в контексте «признак — диагноз»

Указанная матрица формируется путём статистической обработки результатов поиска отказов с учетом количества затрачиваемых диагностических операций при выявлении диагноза D_i по признаку U_i :

$$t_{\Pi U,D} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{ij}} t_{\Pi ij}}{N_{ij}},$$
(10)

где $t_{\Pi ij}$ – время поиска отказов с диагнозом D_i , обследованных по признаку U_j .

Накопление информации о частоте проявления какого-либо диагноза (отказавшего элемента образца МТП) при проявлении того или иного признака позволяет снизить число диагностических процедур и ранжировать их по величине вероятностей диагнозов. Формируемая при этом матрица времени поиска отказов является исходными данными для моделирования операций текущего ремонта в модели функционирования системы обеспечения работоспособности.

Структурная схема модели системы РОБ, обеспечивающей работоспособность МТП показана на рисунке 5.

Канал технического обслуживания обработки Генератор времени результатов Образец МТП контроля ① ITIO 1 TBO 1 Блок задержка Блок контроля этомений TBO 2 Генератор длительности ТО на время Регистратор Влок опекки значений параметров пределения ср и объема ТО наработки пительности ТО времени ончания ТО текущего образца ремонта MTΠ IBO k Блок прогноза lπο 2 ГВО 1 радации параметров Блок расчета коэффициента устройств количества готовности к расчета ожидаемог времени ремонта Блок оценки Регистратор времени Генератор ГПО n ГВО 5 среднего времени времени окончания времени осстановлени ремонта образца ð ◐ Канал текущего ремонта

Система РОБ, обеспечивающая работоспособность МТП

Рисунок 5 — Структурная схема модели системы РОБ, обеспечивающей работоспособность МТП

Каждый образец МТП представляет собой совокупность элементов, схемно - объединенных в устройства. Каждое устройство оценивается на предмет работоспособности одним или несколькими параметрами.

В результате этого можно сформулировать следующую задачу модели системы S: исследование механизма влияния профилактических и восстановительных мероприятий на значение коэффициента готовности образцов МТП и возможностей подразделений ТО и ТР для реализации этих мероприятий. В конечном итоге использование этой модели позволит исходя из конкретных «надежностных» характеристик образцов МТП сформулировать требования к системе S на предмет оптимального распределения сил и средств между профилактическими или ремонтно-восстановительными работами.

Выходным показателем работы модели является величина коэффициента готовности МТП.

Принцип работы модели заключается в имитации процесса возникновения параметрических и внезапных отказов с последующим исследованием механизма влияния профилактических и восстановительных мероприятий на значение коэффициента готовности образцов и возможностей подразделений из состава системы S для реализации этих мероприятий [5].

Рассмотрим работу канала технического обслуживания.

Генератор времени контроля выдает на блок контроля значений параметров устройств сигналы заданной периодичности $T_{\rm K}$, в момент которых происходит по каждому параметру проверка условия, согласно алгоритма прогнозирования технического состояния. Если по всем параметрам условие выполняется, тогда текущие значения каждого параметра поступают в блок прогноза деградации параметров устройств. Работа этого блока осуществляется в соответствии с методикой прогнозирования технического состояния МТП.

Прогнозные значения параметров поступают в блок определения сроков и объема ТО, где используются для расчета величины межрегламентного интервала для образца МТП и объема ТО.

Для расчета величины межрегламентного интервала для образца МТП необходимо рассчитать интервалы сохранения работоспособности по каждому параметру и оценить предельно-допустимые сроки проведения TO.

В результате предельно-допустимые сроки проведения регулировочных работ по каждому параметру определяется как квантиль порядка, соответствующего заданной вероятности отказа:

$$T_{\text{TOmen}} = \min(t), t: F(t) \ge q, \tag{11}$$

где $F(t) = \int_{0}^{T_0} f(t) dt$ — функция распределения времени выхода параметра за границы допуска.

Для определения величины межрегламентного интервала для образца МТП в целом необходимо провести совмещение сроков проведения ТО по каждому параметру. Минимальное значение величины межрегламентного интервала для образца МТП будет определяться временем сохранения работоспособности параметра, имеющего наименьшее значение этого времени по отношению к остальным параметрам $T_{\rm TO}=\min t_{\rm CPi}$. к этому интервалу приурочиваются все работы, которые должны выполняться в промежутке $T_{\rm TO}$ и $2T_{\rm TO}$. Интервалы, большие $2T_{\rm TO}$, но меньшие $3T_{\rm TO}$, сокращаются до $2T_{\rm TO}$ и т. д.

Принцип построения плана-графика ТО отражен на рисунке 6.

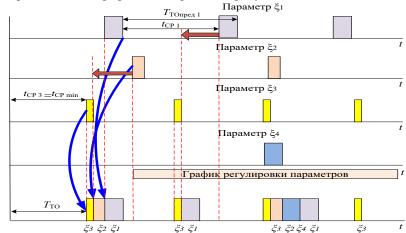


Рисунок 6 – Принцип построения плана-графика технического обслуживания

Ожидаемая длительность ТО для конкретного срока его проведения определяется как сумма продолжительностей выполнения конкретных регулировочно-настроечных работ и контрольных мероприятий:

$$\tau_{\text{TO}i} = t_{\text{K}\Phi} + \sum_{k=1}^{K_i} \tau_{\text{TO}k} + t_{\Pi\Phi},$$
(12)

где — $\tau_{\text{ТО}k}$ продолжительность k-проверки с учетом регулировки параметра ξ_k ; K_i — количество проверок, которые необходимо выполнить на периоде $T_{\text{То}i}$; $t_{\text{К}\Phi}$ — время проведения контроля функционирования и контроля значений параметров; $t_{\Pi\Phi}$ — время на проверку функционирования МТП после проведения регулировочных работ [6].

Блоки определения количества специалистов осуществляют подстройку правой границы области допустимых значений (ОДЗ) случайной величины генератора длительности ТО за счет формирования случайной величины привлекаемых к ТО специалистов. В качестве закона распределения случайной величины привлекаемых специалистов также предлагается использовать равномерный закон:

$$f(N_{\text{TO}}^{\text{спец}}) = \begin{cases} \frac{1}{N_{\text{TOmax}}^{\text{спец}} - N_{\text{TOmin}}^{\text{спец}}}, N_{\text{TO}}^{\text{спец}} \in [N_{\text{TOmin}}^{\text{спец}}, N_{\text{TOmax}}^{\text{спец}}]; \\ 0, \qquad \qquad \text{в противном случае.} \end{cases}$$
(13)

Генератор длительности ТО формирует случайную величину τ_{TO} , которая поступает в блок задержки длительности ТО на время текущего ремонта. После этого регистратор времени окончания ТО фиксирует окончательное значение длительности проведённых работ и заносит его в базу данных. В блоке оценки наработки образца производится фиксация значения наработки на отказ в случае наличия на его втором входе сигнала с регистратора отказа. Статистическая обработка средней наработки на отказ осуществляется в соответствии с выражением:

$$\hat{T}_{O} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{OTK}} t_{i}}{N_{OTK}}$$
(14)

где t_i – величина интервала работоспособности МТП до i-го отказа, $N_{\text{отк}}$ – количество отказов за период наблюдения.

Рассмотрим работу канала текущего ремонта. Генераторы внезапных отказов (ГВО) элементов на оси времени формируют поток отказов в соответствии с соответствующими законами распределения. Каждый зафиксированный отказ поступает на регистратор, который через коммутатор канала ремонта запускает блок расчета ожидаемого времени ремонта. Блок расчета ожидаемого времени ремонта реализует методику диагностирования технического состояния МТП.

Каждому ГВО, имитирующему работу элемента образца МТП, присваивается совокупность признаков отказов в соответствии с правилами формирования матрицы «признак-диагноз», рассмотренными в методике диагностирования технического состояния МТП.

Алгоритм формирования ожидаемого времени поиска отказов образцов МТП представлен на рисунке 7.

Занесение в базу данных СППР значений временных затрат на поиск и обнаружение отказавших элементов проводится вначале по априорным данным, а затем уточняется в процессе эксплуатации.

Выдача величины среднего времени текущего ремонта осуществляется следующим образом [7]:

$$t_{\mathrm{TPi}} = \begin{cases} t_{\Pi i} + T_{\mathrm{AДM}}, & \text{при } R_{\mathrm{i}} = 1 \\ t_{\Pi i} + T_{\mathrm{AДM}} + t_{\mathrm{P\Pi}}^{\mathrm{pass}}, & \text{при } R_{\mathrm{i}} = 0 \end{cases}$$
 (15)

где $T_{\rm AДM}$ — административное время, связанное с ожиданием ремонта из-за различных административных факторов; $t_{\rm P\Pi}^{\rm pass}$ — время развёртывания ремонтного подразделения.

Генератор времени восстановления имитирует работу ремонтных органов (PO) путём формирования случайной величины времени текущего ремонта $t_{\rm TP}$ в соответствии с (16).

Момент доставки элементов в РО производит запуск генератора времени восстановления (далее – ГВВ), который формирует случайную величину времени текущего ремонта t_{TP} , распределенную по закону Эрланга:

$$f(t_{\rm TP}) = \frac{\lambda_{\rm B}^k}{(k-1)!} t_{\rm TP}^{k-1} \exp(-\lambda_{\rm B} t_{\rm TP}), \tag{16}$$

где k>0, $\lambda_B>0$ — параметры распределения.

Значение t_{TP} поступает на сумматор, где происходит формирование суммарного времени восстановления образца в соответствии с выражением:

$$t_{\rm B} = t_{\rm TP} + t_{\rm goot}^{\rm O(\Gamma, P, HII)}. \tag{17}$$

Сумматор выдаёт это значение на регистратор восстановления работоспособного состояния (ВРС) для накопления статистических данных о составляющих времени восстановления, а также запускает блок сброса генератора отказов (Γ O), который обнуляет Γ O соответствующего элемента (имитирует замену отказавшей составной части образца МТП).

Блок оценки среднего времени восстановления образца является компонентом сбора и обработки информации о параметрах подсистемы текущего ремонта, а также устройством, в котором происходит индикация соответствия параметров оперативности восстановления требуемым значениям.

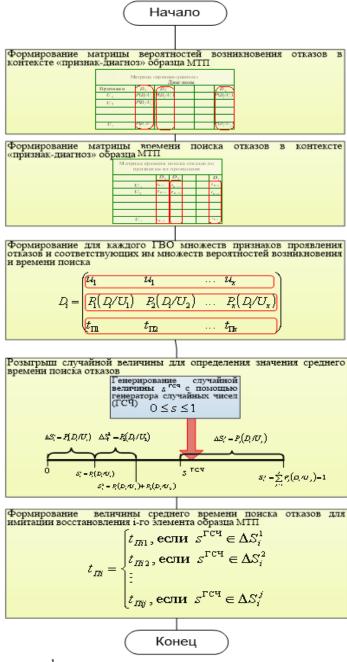


Рисунок 7 – Алгоритм формирования ожидаемого времени поиска отказов образцов МТП

Оценка величины среднего времени восстановления образца осуществляется в соответствии с выражением:

$$\hat{T}_B = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{OTK}}} t_{Bi}}{N_{\text{OTK}}}.$$
(18)

Количество специалистов, привлекаемых к текущему ремонту образцов, рассчитывается следующим образом:

$$N_{\mathrm{TP}\,\mathrm{факт}}^{\mathrm{cneц}} = egin{cases} N_{\mathrm{TP}\,\mathrm{nogp}}^{\mathrm{cneц}}, & \mathrm{ec}\,\mathrm{лu}\,\,orall i = 1...D, R_i = 1 \ N_{\mathrm{TP}\,\mathrm{nogp}}^{\mathrm{cneц}} + N_{\mathrm{TP}\,\mathrm{an}}^{\mathrm{cneц}}, \,\mathrm{B}\,\mathrm{противном}\,\,\mathrm{c}\,\mathrm{лучae} \end{cases}$$

где $N_{\mathrm{TP}\mathrm{no}\mathrm{np}}^{\mathrm{cneq}}$ – количество специалистов в подразделении, привлекаемых к текущему ремонту МТП; $N_{\mathrm{TP}\mathrm{an}}^{\mathrm{cneq}}$ – количество специалистов в ремонтном подразделении, привлекаемых к текущему ремонту МТП.

В блоке расчёта коэффициента готовности проводится оценка значения K_{Γ} образца и индикация его соответствия заданному значению. Коэффициент готовности K_{Γ} – вероятность того, что образец МТП окажется в работоспособном состоянии. При обеспечении немедленного начала восстановления отказавшего образца K_{Γ} вычисляется по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + T_{\rm B}},\tag{20}$$

где T_0 – время средней наработки на отказ образца МТП, за расчётный период; $T_{\rm B}$ – среднее время простоя образца МТП по причине восстановления.

Принятие решение о соответствии значения коэффициента готовности образца МТП поясняет рисунок 8.

Попадание значения коэффициента готовности в результате моделирования в область допустимых значений, ограниченную требованиями к конкретному образцу МТП, говорит о соответствующем уровне надежности образца и эффективности функционирования подсистем ТО и ТР [7].

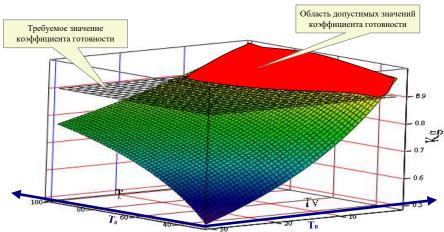


Рисунок 8 – График зависимости значений коэффициента готовности от значений средней наработки на отказ и среднего времени восстановления

В противном случае необходимо произвести оценку влияния уровня безотказности и уровня ремонтопригодности на полученное значение и скорректировать либо параметры подсистемы ТО либо параметры подсистемы ТР.

Таким образом, имеется возможность моделировать процесс функционирования любого образца МТП с учетом функционирования системы S. Проведение статистического эксперимента с использованием данной модели позволяет алгоритмически получить значение коэффициента готовности для образца МТП для любого момента времени в зависимости от длительности его пребывания в работоспособном состоянии или в состоянии регулировочных или ремонтновосстановительных работ и определить зависимость уровня готовности этого образца от параметров системы S.

В отличие от известных, эта модель позволяет исследовать степень влияния профилактических и восстановительных мероприятий на уровень готовности образцов МТП и количественно обосновать характеристики подсистем ТО и ТР в зависимости от уровня параметрической и физической надёжности образцов.

Следующим этапом исследований является разработка методики формирования стоимостных зависимостей на функционирование системы S.

Методика формирования стоимостных зависимостей на функционирование системы обеспечения работоспособности МТП.

Суммарная стоимость функционирования системы РОБ, обеспечивающей работоспособность $MT\Pi - C$, будет определяться затратами на проведение TO и TP по формуле:

$$C = C_{\text{TO}} + C_{\text{TP}},\tag{21}$$

где $C_{\rm TO}$ – стоимость выполняемых работ по техническому обслуживанию образца МТП; $C_{\rm TP}$ – стоимость выполняемых работ по ТР на образце МТП.

Рассмотрим первую составляющую выражения (21).

Стоимость технического обслуживания определяется выражением:
$$C_{\rm TO} = \tau_{\rm TO}^{\rm c} \Big(N_{\rm TO}^{\rm cneu} C_{\rm JC} + C_{\rm \Gamma CM} + C_{\rm Эл} \Big) \eqno(22)$$

где $au_{ ext{TO}}^{ ext{c}}$ – суммарная продолжительность технических обслуживаний на образце МТП; $ext{C}_{ ext{JC}}$ – удельные суммарные затраты на содержание технического персонала; $C_{\Gamma \text{CM}}$ – удельные суммарные затраты на используемые горюче-смазочные материалы (ГСМ); $C_{\mathfrak{I}_{\pi}}$ – удельные суммарные затраты на используемую электроэнергию.

Значение $au_{\mathrm{TO}}^{\mathrm{c}}$ определяется выражением:

$$\tau_{\text{TO}}^{\text{c}} = N_{\text{TO}}(t) \cdot \tau_{\text{TOcp}}, \tag{23}$$

или

$$\tau_{\text{TO}}^{\text{c}} = \frac{T_{\text{s}}}{T_{\text{TO}}} \cdot \tau_{\text{TOcp}}, \tag{24}$$

где $N_{\rm TO}(t)$ — число переводов образца МТП в режим технического обслуживания за период эксплуатации; au_{TOep} – средняя продолжительность технического обслуживания; T_{TO} продолжительность межрегламентного интервала; T_9 – рассматриваемый период эксплуатации.

Тогда получим:

$$C_{\text{TO}} = \frac{T_{\text{3}}}{T_{\text{TO}}} \cdot \tau_{\text{TOcp}} \left(N_{\text{TO}}^{\text{enen}} C_{\text{JC}} + C_{\text{TCM}} + C_{\text{3a}} \right) \tag{25}$$

Рассмотрим вторую составляющую выражения (21):

$$C_{\rm TP} = n_{\rm ork} T_{\rm B} \left(N_{\rm TP}^{\rm cneil} C_{\rm JC} + C_{\rm \Gamma CM} + C_{\ni n} \right) \tag{26}$$

где $n_{\text{отк}}$ – суммарное число внезапных отказов за время t; T_{B} – среднее время восстановления работоспособности образца МТП.

Тогда суммарная стоимость C будет определяться выражением:

$$C = \frac{T_{\text{\tiny 3}}}{T_{\text{\tiny TO}}} \cdot \tau_{\text{\tiny TOep}} \left(N_{\text{\tiny TO}}^{\text{\tiny Crieu}} C_{\text{\tiny JC}} + C_{\text{\tiny \GammaCM}} + C_{\text{\tiny 3}} \right) + n_{\text{\tiny ork}} T_{\text{\tiny B}} \left(N_{\text{\tiny TP}}^{\text{\tiny crieu}} C_{\text{\tiny JC}} + C_{\text{\tiny \GammaCM}} + C_{\text{\tiny 3}} \right), \tag{27}$$

В соответствии со схемой исследования полученная зависимость используется при формировании целевой функции и в совокупности с функцией ограничений позволяют решить научную задачу обоснования структуры и характеристик системы *S*.

Формирование целевой функции и ограничений. Анализ оптимизационной задачи и выбор метода ее решения. Особенностью системы S является тот факт, что структура Q этой системы представлена двумя подсистемами: технического обслуживания с характеристиками G_1 и текущего ремонта с характеристиками G_2 .

Задача заключается в поиске таких значений характеристик этих подсистем, которые обращают в минимум затраты C, обеспечивая при этом требуемое значение коэффициента готовности $K_{\Gamma_{\text{Треб}}}$.

Поскольку значение коэффициента готовности определяется одновременно двумя составляющими: средним временем наработки на отказ T_0 и средним временем восстановления T_B , поэтому необходимо совместно оптимизировать характеристики подсистем ТО и ТР. Это обстоятельство является причиной взаимообусловленности характеристик подсистем ТО и ТР. Снижая значение T_0 (т.е. создавая «слабую» подсистему ТО), можно за счет «усиления» подсистемы ТР снизить значение T_B и, тем самым, повысить значение коэффициента готовности. Аналогично более «сильная» подсистема ТО может в некоторой степени компенсировать «менее сильную» подсистему ТР. Исходя из этого, можно сформировать области допустимых значений характеристик подсистем технического обслуживания $\Omega_{\rm G1}$ и текущего ремонта $\Omega_{\rm G2}$, объединение которых составит допустимую область изменения характеристик этих подсистем $\Omega_{\rm G} = \Omega_{\rm G1} \cup \Omega_{\rm G2}$. Эта область ограничена интервалом [$T_{\rm Bmin}$, $T_{\rm Bmax}$] возможных значений среднего времени восстановления $T_{\rm B}$, и интервалом [$T_{\rm Omin}$, $T_{\rm Omax}$] возможных значений средней наработки на отказ T_0 и на рисунке 9 ограничена фигурой, обозначенной точками «A-Б-B-Г» [8].

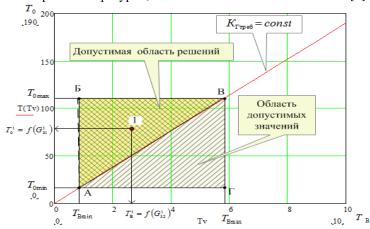


Рисунок 9 — Порядок построения допустимой области решений для поиска характеристик подсистем из состава системы РОБ, обеспечивающей работоспособность МТП

Для её определения используем выражение (28) и выразим значение T_0 через значение $T_{\rm B}$ получим соотношение вида:

$$T_0 = \frac{K_{\Gamma}}{1 - K_{\Gamma}} T_{\rm B}$$
 (28)

Исходя из того, что вариант системы S образуется структурой характеристиками подсистем технического обслуживания (Q_{S1} и G_{S1}) и текущего ремонта (Q_{S2} и G_{S2}) и учитываемые характеристики комплекса МТП V образованы множеством её характеристик X, а также то обстоятельство, что на характеристики указанных подсистем существенное влияние оказывает функция управления (F_{S3} , F_{S4}), реализуемая в СППР, то тогда вид целевой функции и функции ограничений может быть представлен следующим образом [5]:

$$C = C_{\text{TO}}(Q_{S1}, G_{S1} \mid \mathbf{X}) + C_{\text{TP}}(Q_{S2}, G_{S2} \mid \mathbf{X}) \to \min_{\substack{Q_{S1} \in \Omega_{QS1}, G_{S1} \in \Omega_{GS1}, \\ Q_{S2} \in \Omega_{QS2}, G_{S2} \in \Omega_{GS2}},$$
(29)

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0(Q_{S1}, G_{S1} \mid X, F_{S3})}{T_0(Q_{S1}, G_{S1} \mid X, F_{S3}) + T_B(Q_{S2}, G_{S2} \mid X, F_{S4})} \ge K_{\Gamma \text{rpe6}}$$
(30)

Диапазоны изменения оптимизируемых переменных составляют:

$$\begin{split} &T_{\rm TOmin} \leq T_{\rm TO} \leq T_{\rm TOmax}, \, \tau_{\rm TOmin} \leq \tau_{\rm TO} \leq \tau_{\rm TOmax}, \\ &t_{\rm Ilmin} \leq t_{\rm II} \leq t_{\rm Ilmax}, 1 \leq N_{\rm TO}^{\rm cheil} \leq N_{\rm TO\,max}^{\rm cheil}, 1 \leq N_{\rm TP}^{\rm cheil} \leq N_{\rm TPmax}^{\rm cheil}. \end{split}$$

Целевая функция будет представлена следующим выражением:

$$C = \frac{T_{\text{\tiny 3}}}{T_{\text{\tiny TO}}} \cdot \tau_{\text{\tiny TOCp}} \left(N_{\text{\tiny TO}}^{\text{\tiny cneu}} C_{\text{\tiny JC}} + C_{\text{\tiny TCM}} + C_{\text{\tiny 3},\text{\tiny 1}} \right) + n_{\text{\tiny ork}} T_{\text{\tiny B}} \left(N_{\text{\tiny TP}}^{\text{\tiny cneu}} C_{\text{\tiny JC}} + C_{\text{\tiny TCM}} + C_{\text{\tiny 3},\text{\tiny 1}} \right) \rightarrow \min_{T_{\text{\tiny TO}}, T_{\text{\tiny TO}}, N_{\text{\tiny TP}}^{\text{\tiny cneu}}, N_{\text{\tiny TP}}^{\text{\tiny cneu}}}$$
(32)

Заключение.

- 1. Разработанная методика обоснования структуры и характеристик системы РОБ, обеспечивающей работоспособность МТП с применением информационной поддержки принятия решений, включающая в свой состав совокупность взаимосвязанных моделей: прогнозирования технического состояния МТП, диагностирования технического состояния МТП, функционирования системы обеспечения работоспособности МТП и формирования стоимостных зависимостей на функционирование системы РОБ, обеспечивающей работоспособность МТП, которая отличается от известных применением: адаптивного алгоритма перераспределения затрат между мероприятиями ТО и ТР; алгоритма решения оптимизационной задачи, основанного на модифицированном методе Нелдера-Мида, осуществляющим поиск таких значений характеристик подсистем ТО и ТР, которые обращают в минимум затраты, обеспечивая при этом требуемое значение коэффициента технической готовности МТП, что позволяет сформировать систему РОБ, обеспечивающих работоспособность МТП с требуемыми характеристиками, как по структуре, так и по технологии проведения профилактических и восстановительных работ и операций.
- 2. Выявлено, что малое значение межрегламентного интервала позволяет добиться достаточно высоких значений для коэффициента готовности. При этом изменение коэффициента готовности при варьировании значением межрегламентного интервала в пределах области рекомендованных значений проведения ТО несущественно и изменяется в переделах 0.00002%. Однако дальнейшее изменение значения межрегламентного интервала приводит к существенному снижению коэффициента технической готовности. Так, если значение T_{TO} превышает значение наработки на постепенный отказ устройства, то K_{Γ} снижается ниже допустимого уровня $K_{\Gamma, \text{преб}}^* = 0,985$.
- 3. Выявлено, что основным мероприятием, позволяющим снизить эксплуатационные затраты и положительно влиять на значение K_{Γ} является рациональное распределение времени на проведение проверок, используемых при ТО образца МТП. Увеличение длительности проведения ТО приводит к расходу ресурса техники из общего лимита и, в то же время, приводит к более качественному проведению регулировочных работ. Частично снизить длительность ТО можно путем

распараллеливания проведения проверок между специалистами, учитывая технологию проведения регулировочно-настроечных работ. В данном случае рациональное значение количества специалистов составляет от двух до шести человек, что позволяет обеспечить длительность ТО по состоянию от двух до четырех часов.

- 4. В части текущего ремонта отклонения от нормативных значений времени восстановления работоспособности (более 30 минут) привело к резкому снижению уровня готовности при существующем уровне параметра потока внезапных отказов. Для выполнения текущего ремонта требуется привлечения в среднем 3...4 специалистов.
- 5. Исследование процесса обеспечения работоспособности образцов МТП показало, что основным условием оптимальности ее работы является индивидуальный мониторинг технического состояния каждого образца, в результате чего появляется возможность адаптировать характеристики системы к реальным условиям эксплуатации МТП. При этом удается примерно на 40% сократить продолжительность регулировочно-настроечных и ремонтно-восстановительных мероприятий. Условием требуемой эффективности системы РОБ, обеспечивающей работоспособность МТП, при этом, также является наличие в составе бригад, выполняющих эти мероприятия, не менее четырех человек инженерно-технического состава.

Суммарное снижение затрат на обеспечение работоспособного состояния исследуемой техники составило порядка 18...20%. Таким образом, научная задача решена, а цель исследования достигнута.

Список источников

- 1. Ломовских А.Е. Метод определения степени износа и необходимости замены трансмиссионного масла в силовых механизмах / А.Е. Ломовских, Ю.В. Родионов, И.С. Филатов, Н.В. Воронин, Д.В. Никитин, В.В. Остриков. Журнал «Наука в центральной России». Издательство: ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве». (Тамбов) 2020. С. 80–87.
- 2. Ивахненко А.Г. Принятие решений на основе самоорганизации / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Зайченко, В.Д. Димитров. М.: Сов. радио, 1976. 280 с.
- 3. Исмагилова Е.И. Булевы функции и построение логических схем: учебное пособие / Е.И. Исмагилова М: МИРЭА, 2015. 160 с.
- 4. Al-Maidi, A.A.H., Chernetsov, D.A., Rodionov, Yu.V., Lomovskikh, A.E., Mikheev, N.V. Experimental researches of the machine-tractor fleet with the yamz-238 gasdiesel engine (2020) Plant Archives, 20, pp. 200–207.
- 5. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А.Г. Ивахненко Киев, Наукова думка, 1975. 312 с.
- 6. Zaitsev, V., Konovalov, V., Gumarov, G., Rodionov, Y. Mobile trailer support arm: Modeling and analysis of breakage (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1084 (1), article № 012009.
- 7. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. М.: Радио и связь,. 1987. 120 с.
- 8. Программная реализация модели функционирования машинного парка. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021611690 Российская Федерация; правообладатель и автор: Деревянко Е.А. заявка № 2021610575 от 21.01.2021; зарег. в реестре программ для ЭВМ 03.02.2021. 16 с.
- 9. База данных модели функционирования РОБ. База данных № 2022621576 Российская Федерация; правообладатель и автор: Деревянко Е.А. заявка № 2022621461 от 15.06.2022; зарег. в реестре программ для ЭВМ 04.07.2022. 20 с.

References

- 1. Ivakhnenko A.G. Decision-making based on self-organization / A.G. Ivakhnenko, Yu.P. Zaichenko, V.D. Dimitrov. M.: Soviet Radio, 1976. 280 p.
- 2. Ismagilova E.I. Boolean functions and the construction of logical circuits: textbook / E.I. Ismagilova M: MIREA, 2015. 160 p.
- 3. Al-Maidi, A.A.H., Chernetsov, D.A., Rodionov, Yu.V., Lomovskikh, A.E., Mikheev, N.V. Experimental researches of the machine-tractor fleet with the yamz-238 gasdiesel engine (2020) Plant Archives, 20, pp. 200–207.

- 4. Ivakhnenko A.G. Long-term forecasting and management of complex systems / A.G. Ivakhnenko Kiev, Naukova dumka, 1975. 312 p.
- 5. Zaitsev, V., Konovalov, V., Gumarov, G., Rodionov, Y. Mobile trailer support: modeling and analysis of breakage Mobile trailer support arm: Modeling and analysis of breakage (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1084 (1), article No. 012009.
- 6. Ivakhnenko A.G. Modeling complex systems based on experimental data / A.G. Ivakhnenko, Yu.P. Yurachkovsky M.: Radio and Communications. 1987. 120 p.
- 7. Lomovskikh A.E. Method for determining the degree of wear and the need to replace transmission oil in power mechanisms / A.E. Lomovskikh, Yu.V. Rodionov, I.S. Filatov, N.V. Voronin, D.V. Nikitin, V.V. Ostrikov. The journal "Science in Central Russia". Publisher: All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture. (Tambov) 2020. pp. 80-87.
- 8. Software implementation of the machine park functioning model. Certificate of state registration of a computer program No. 2021611690 Russian Federation; copyright holder and author: Derevyanko E.A. application No. 2021610575 dated 21.01.2021; reg. in the register of computer programs 03.02.2021. 16 p
- 9. Database of the ROB functioning model. Database No. 2022621576 Russian Federation; copyright holder and author: Derevyanko E.A. application No. 2022621461 dated 06/15/2022; reg. in the register of computer programs 04.07.2022. 20 p.

Информация об авторах

Ю.В. Родионов – доктор технических наук, профессор; Е.А. Деревянко – адъюнкт; А.Е. Ломовских - кандидат технических наук, доцент; П.Т. Пантелеев – кандидат технических наук, доцент; В.С. Январёв – адъюнкт.

Information about the authors

Y. Rodionov - Doctor of Technical Sciences, Professor; E. Derevianko - post graduate student of department; A. Lomovskikh - Candidate of technical sciences, associate professor; P. Panteleev - Candidate of Agricultural Sciences, assistant professor; V. Yanvarev - post graduate student of department.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 10.03.2023 Принята к публикации (Accepted): 15.04.2023