

Научная статья**УДК 622.619****DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-89-98****Марат Райымбек Тимуруллы^{1,*}, Масляков Никита Сергеевич¹, Маметьев Леонид Евгеньевич²**¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»² Кузбасский государственный университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: marat.rayim@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА ДЕТАЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНОЙ МАШИНЫ

**Информация о статье**

Поступила:

20 апреля 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:
01 мая 2025 г.Принята к печати:
05 мая 2025 г.Опубликована:
05 июня 2025 г.**Ключевые слова:**

запасные части, разработка чертежа, оценка качества, реверс-инжиниринг деталей, обратное проектирование запасных частей, горные машины, погрузочно-доставочная машина, комплексная оценка качества

Аннотация.

Эффективность работы горного предприятия зависит от надежности работы технологических машин, и оперативное проведение ремонтных работ напрямую влияет на это. В случае ремонта или замены узла или детали силами предприятия возможно производство запасных частей. Однако основная проблема заключается в отсутствии оригинальных чертежей, для этого предлагается использовать методики реверс-инжиниринга. В этом случае требуется оценка того, насколько полученная деталь соответствует оригиналу. Для этого в статье представлена математическая модель комплексной оценки качества реверс-инжиниринга детали на примере запасных частей погрузочно-доставочных машин. Были определены составляющие для комплексной оценки качества, а именно геометрическая точность, точность формы и расположения, шероховатость, материал детали, а также время выполнения процесса реверс-инжиниринга детали. Данные параметры являются наиболее важными ввиду их влияния на ресурс работы детали, качество восстановляемой детали сборочного узла или агрегата в целом и пригодность для измерения, особенно в условиях ремонтного производства горных машин. Предложенная математическая модель позволяет комплексно численно оценить результат процесса реверс-инжиниринга детали, а именно насколько полученный чертеж детали соответствует оригинальному чертежу. Дан пример выполнения расчета комплексного показателя качества реверс-инжиниринга на примере детали (запасной части) гидроцилиндра подъема ковша погрузочно-доставочной машины. Предложенная математическая модель универсальна и может быть широко использована для запасных частей других видов технологических, транспортных и вспомогательных машин, применяемых при добыче полезных ископаемых

Для цитирования: Марат Р.Т., Масляков Н.С., Маметьев Л.Е. Математическая модель комплексной оценки качества реверс-инжиниринга деталей на примере запасных частей погрузочно-доставочной машины // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 2 (178). С. 89-98. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-89-98, EDN: ANWXWL

Введение

Надежность горной самоходной техники, в частности погрузочно-доставочных машин (далее ПДМ), является актуальным вопросом для любого горнодобывающего предприятия [1-2]. Поддержание рабочего состояния ПДМ зависит от многих факторов, и особое внимание уделяется восстановлению и ремонту [3-8]. В условиях санкций, дефицита и сложности поставок оригинальных запасных частей для ремонта зарубежных ПДМ ремонт воз-

можен либо с использованием запасных частей-аналогов, либо с их изготовлением. Отсутствие оригинальных чертежей на запасные части и наличие только каталожных данных не дают возможности изготовления и подбора аналогов запасных частей ПДМ [9-11].

В условиях ремонтного производства ПДМ и других видов подземной самоходной техники возможно производство запасных частей-аналогов с применением реверс-инжиниринга чертежей дета-

лей [12-16]. В работе [17] описана роль и место реверс-инжиниринга ПДМ в процессе ремонта, на основе предложенного алгоритма определяется возможность и целесообразность применения реверс-инжиниринга. Алгоритм основывается на введенном классификаторе деталей, разделяющим их по виду на типовые, стандартизированные и уникальные, и на применении двух методик реверс-инжиниринга – оперативно-аналоговой и системно-справочной. По классификации деталей к типовым деталям мы относим детали со схожей конструкцией, к стандартизованным – наиболее распространенные изделия (подшипники, крепежные изделия, уплотнения), к уникальным – детали, специфичные для данной машины. В Таблице 1 представлено описание деталей по классификации. Данное разделение необходимо ввиду широкой номенклатуры деталей и точного определения деталей, требующих проведения реверс-инжиниринга. В данной работе мы рассматриваем типовые детали.

Важным вопросом современного ремонта ПДМ с применением изготавливаемых запасных частей-аналогов является скорость и качество полученного результата реверс-инжиниринга, то есть чертежа детали, напрямую влияющего на качество производимых по нему деталей-аналогов и их ресурс работы [18-19]. Для решения данного вопроса мы разделяем используемый процесс реверс-инжиниринга на две методики – оперативно-аналоговую и системно-справочную. Суть оперативно-аналогового реверс-инжиниринга заключается в частичном копировании параметров с чертежа аналогичной детали, суть второй методики сводится к более конструкторскому подходу, классификации деталей, подбору измерительных инструментов по методическому руководству, проведению измерений по заранее выверенному технологическому процессу. Предполагается, что оперативно-аналоговая методика обеспечит более высокую скорость выполнения процесса реверс-инжиниринга. Плюсом системно-справочной методики является возможность получения более точного результата, высокая точность выявляемых параметров. На данный момент проводится сбор данных для сравнения вышеописанных методик и оценка их результатов по предложенной математической модели.

В обобщенном виде процесс реверс-инжиниринга включает следующие этапы:

- Подготовительный этап.** На этом этапе мы классифицируем деталь по классификатору деталей и определяем применяемую методику, проводим подбор измерительных инструментов и методик измерений.

- Этап измерений.** Проведение измерений по выбранным методикам, определение общих параметров.

- Конструкторский этап.** Создание рабочей модели детали по полученным данным, разработка чертежа детали.

Сам по себе чертеж представляет собой описание геометрии детали и набор технических и физических параметров [20-22], описывающих требования к ее изготовлению. Изготавливаемые по чертежам детали, входящие в восстанавливаемое изделие ремонтируемой ПДМ через допуски, посадки, шероховатость, материал, влияют на ресурс его работы, а время процесса реверс-инжиниринга детали – на интенсивность восстановления ПДМ. Таким образом, комплексную численную оценку степени соответствия оригиналу и времени выполнения процесса его обеспечения эффективно выполнить через методику безэкспертной комплексной оценки [24].

На основе методики безэкспертной оценки уровня качества, разработанной профессором Солдом Г. И., нами предложена математическая модель комплексной оценки реверс-инжиниринга чертежей запасных частей ПДМ. Полученная модель была использована в экспериментальном исследовании, в ходе которого были получены значения качества для группы деталей гидроцилиндра ПДМ. Для проведения эксперимента была выбрана деталь, на которую имелся оригинальный чертеж детали. Было принято, что оригинальный чертеж детали является базовым (эталонным) показателем качества и равен 1 (единице). Полученный по результатам расчета комплексный показатель качества реверс-инжиниринга был оценен относительно чертежа оригинальной детали.

Методы. Для визуализации всех компонентов, входящих в состав математической модели комплексной оценки качества реверс-инжиниринга детали, была составлена схема, представленная на Рис. 1.

Далее рассмотрим предложенную математическую модель и ее компоненты.

Комплексная оценка качества реверс-

Таблица 1. Классификация деталей машины
Table 1. Classification of machine parts

№ п/п	Вид	Описание
1	Типовые	Принадлежат к группе изделий схожих по конструкции и обладающих наибольшим числом конструктивных и технологических признаков группы.
2	Уникальные	Требует проведения полного реверс инжиниринга, с целью выявления всех возможных параметров изделия.
3	Стандартизованные	Распространенные изделия (подшипники качения, приводные цепи, шпонки, крепежные детали), которые обычно не подвергаются реверс инжинирингу.

инжиниринга детали. Для комплексной оценки качества реверс-инжиниринга мы вводим понятие «качество реверс-инжиниринга детали ($K_{РИ}$)», которое состоит из двух показателей – качество по времени процесса (K_{tPI}) и качество чертежа детали ($K_{черт}$).

$$K_{tPI} = K_{черт} \times K_{мат.} \quad (1)$$

Комплексная оценка качества чертежа. Оценить качество полученных параметров предлагается по комплексному показателю качества чертежа детали. В него включается качество по точности, качество по шероховатости и качество материала, он рассчитан по формуле (2)

$$K_{черт} = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m K_{i,mat}} \times \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n k_{i,шер.}} \times \sqrt{o}{\prod_{i=1}^o K_{i,tam}} \times \sqrt[p]{\prod_{i=1}^p k_{i,Ф.}} \quad (2)$$

где: m, n, o, p – количество показателей качества, $K_{точ.}$ – комплексный показатель качества по точности геометрических размеров поверхности детали; $k_{шер.}$ – единичный показатель качества по шероховатости поверхности детали, $K_{мат.}$ – комплексный показатель качества материала детали, $k_{Ф.}$ – единичный показатель качества допусков формы и расположения.

Комплексная оценка качества по точности

$$K_{mov} = \sqrt{m} \sum_{i=1}^m k_{i,T} \quad (3)$$

Единичный уровень показателя точности $k_{i,T}$, в зависимости от посадки, вычисляется по формулам

(4, 5, 6). На Рис. 2 представлены схемы распределения допусков по посадкам.

$$k_{i,T} = 1 - \frac{(P_i - \bar{P})^2}{(0,5ITP + \Delta)^2} \quad (4)$$

$$k_{i,T} = 1 - \frac{(P_i - P_{min})^2}{(ITP + \Delta)^2} \quad (5)$$

$$k_{i,T} = 1 - \frac{(P_{max} - P_i)^2}{(ITP + \Delta)^2} \quad (6)$$

Единичный уровень качества по шероховатости. Для оценки уровня качества по шероховатости была использована формула оценки уровня технологичности по шероховатости:

$$k_{шер.} = \frac{K_{шер.}}{K_{БШ}} \quad (7)$$

где: $K_{БШ}$ – базовый коэффициент шероховатости, $K_{шер.}$ – коэффициент шероховатости, полученный в результате эксперимента.

Расчет базового коэффициента шероховатости:

$$K_{шер.} = \frac{\sum n_i}{\sum Ra_i n_i} \quad (8)$$

где: n_i – количество поверхностей соответствующей шероховатости, Ra_i – значение шероховатости поверхности.

Комплексный показатель уровня качества материала.

Для оценки качества материала были выбраны физико-механические свойства, эти показатели были выбраны ввиду большого влияния на работу изделия, влияния на качество детали и

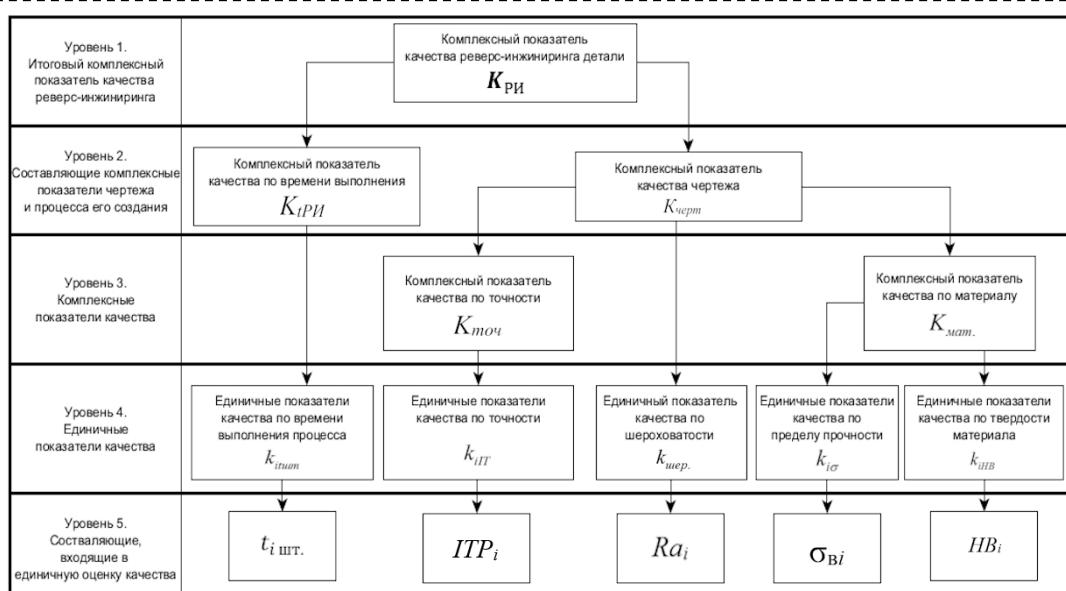


Рис. 1. Схема составляющих формул комплексной оценки качества реверс-инжиниринга детали
Fig. 1. Component of comprehensive quality assessment of reverse-engineering

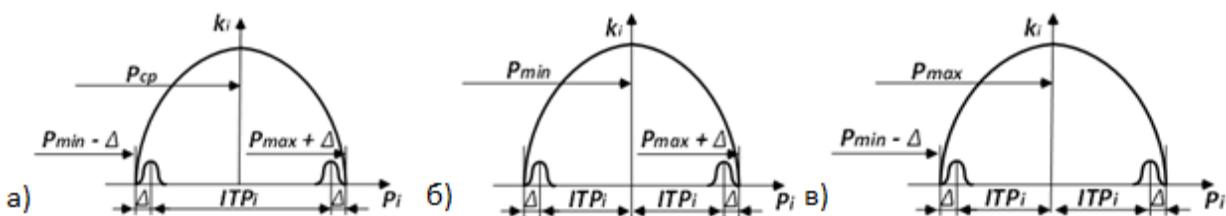


Рис. 2. Схемы распределения допусков (а – свободная посадка, б – посадка с зазором, в – посадка с натягом), где: ITP_i – допуск на i -й параметр; P , P_{min} и P_{max} – среднее, минимальное и максимальное значение i -го параметра; P_i – действительное значение параметра; Δ – абсолютная погрешность измерения.

Fig. 2. Tolerance allocation schemes (a – transition fit, b – clearance fit, c – interference fit)

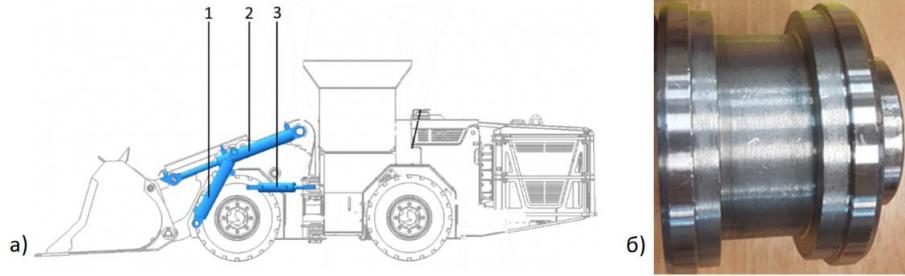


Рис. 3. Компоновка погрузочно-доставочной машины (а) и измеряемая деталь – поршень гидроцилиндра опрокидывания (б)
где: 1 – гидроцилиндр подъема, 2 – гидроцилиндр механизма опрокидывания, 3 – гидроцилиндр управления поворотом

Fig. 3. Components of load haul dump machine (a) and measured part (b)

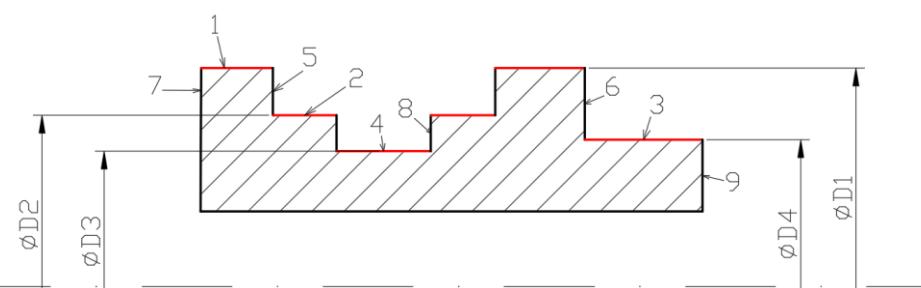


Рис. 4. Эскиз детали с изображением измеряемых поверхностей (цифрами обозначены номера поверхности)

Fig. 4. Sketch of the part showing measured surfaces (numbers indicate the surface number)

Таблица 2. Расчет комплексного показателя качества по точности

Table 2. Calculation of the comprehensive quality indicator for accuracy

Обозначение	Номинальные размеры (с чертежа)				Фактические размеры (из эксперимента)				k_i	K_{IT}
	Размер	es	ei	IT	Размер	ei	es	IT		
D1	78,3	-0,1	0,1	0,2	78,3	-0,1	0,1	0,2	0,77	0,91
D2	74,16	-0,05	0,05	0,1	74,13	-0,1	0,1	0,2	0,7	
D3	60	0	0,12	0,12	60	0	0,12	0,12	1	
D4	32	0	0,062	0,062	32	0	0,039	0,039	1	

удобства их применения для расчетов:

$$1. K_{mam} = k_i \times k_{HB} \quad (9)$$

где: $k_{i\sigma}$ – единичный показатель качества по пределу прочности, k_{HB} – единичный уровень показателя качества по твердости.

Комплексный показатель качества процесса выполнения реверс-инжиниринга детали по времени:

$$K_{IPH} = \sqrt[p]{\prod_{i=1}^p k_{tiuim}} \quad (10)$$

где: p – количество показателей времени реверс-инжиниринга чертежа детали, по которым производится оценка качества i -й детали, и k_{tiuim} – единичный показатель качества по штучному времени выполнения процесса реверс-инжиниринга (подготовка, измерения и выпуск чертежа).

Единичный показатель качества по времени

Суть показателя заключается в сравнении двух замеров времени выполнения процесса реверс-инжиниринга детали:

$$k_{tiuim} = 1 - \frac{(t_{iuim} - t_{minim})^2}{(IT_{tiuim} + \Delta)^2} \quad (11)$$

где: IT_{tiuim} – допуск на i -е штучное время; t_{minim} и t_{maxim} – минимальное и максимальное значения i -го штучного времени в технологическом процессе при соблюдении регламента; t_{iuim} – действительное значение штучного времени, полученное в технологическом процессе; Δ – абсолютная погрешность измерения.

Пример расчетов. Функциональность предложенного математического аппарата была опробована в ходе эксперимента на детали гидроцилиндра поворота погрузочно-доставочной машины (Рис. 3).

Рассмотрим расчет на примере поршня. На Рис. 4 показаны размеры, которые были использованы для расчетов уровня качества по точности и шероховатости. Полученные данные указаны в Таблице 2.

Таблица 3. Расчет единичных показателей качества по шероховатости
Table 3. Calculation of singular quality indicators for roughness

Номер поверхности	Базовые значения	Полученные значения	$K_{ш}$	$k_{шер}$
1	3,2	3,2	0,28	0,99
2	1,6	1,6		
3	6,3	12,5		
4	1,6	1,6		
5	3,2	1,6		
6	6,3	12,5		
7	6,3	12,5		
8	3,2	1,6		
9	6,3	12,5		

Таблица 4. Единичные и комплексный показатели качества материалов
Table 4. Singular and comprehensive quality indicators of material

Марка стали	$k_{i\sigma}$	k_{iHB}	$K_{мат}$
40	0,45	1	0,45
40Х	1	1	1

Таблица 5. Оценка качества допусков формы и расположения
Table 5. Quality assessment of shape and location tolerances

№ образца	Значение с оригинального чертежа, мм	Нижнее предел, мм	Верхний предел, мм	Значение, полученное в ходе эксперимента, мм	$k_{ДФ}$
1	0,05	0,03	0,08	0,05	1
2	0,05	0,03	0,08	0,08	0,96
3	0,05	0,03	0,08	0,05	1
4	0,05	0,03	0,08	0,05	1
5	0,05	0,03	0,1	0,1	0,71

Таблица 6. Комплексный показатель качества процесса выполнения реверс-инжиниринга по времени
Table 6. Comprehensive quality indicator of reverse-engineering by time

Номер замера времени	Этапы выполнения			Суммарное время выполнения реверс-инжиниринга, мин	t_{min} , мин	t_{max} , мин	$K_{tри}$
	Подготовка, мин	Измерение, мин	Конструкторский, мин				
1	47	40	146	233	233	290	1,00
2	44	48	153	245			0,95
3	45	45	148	248			0,92
4	55	57	178	290			0,80
5	54	43	148	245			0,95

Далее проведем расчет единичного показателя качества по шероховатости. В Таблице 3 показаны полученные значения.

В результате эксперимента было определено две марки стали которые используют для данной детали, в справочниках указывается стали марок 40 и 40Х. Для оценки качества были выбраны физико-механические свойства материала: твердость и предел прочности. В таблице 4 представлены показатели качества материалов. В случае простановки материала 40Х качество равнялось единице, что соответствует оригинальному чертежу.

Оценить качество допусков формы и расположения ($k_{ДФ}$) предлагается по формулам оценки еди-

ничного показателя качества по точности. За предельные отклонения возьмем технические требования, устанавливаемые в справочниках по гидроцилиндром. Для рабочей поверхности поршня устанавливается биение не более 0,03 мм, данное значение мы принимаем за минимальное. В Таблице 5 показаны значения расчета качества допусков формы и расположения.

Во время выполнения эксперимента был проведен замер времени выполнения реверс-инжиниринга детали на различных этапах. В Таблице 6 указано общее время выполнения и качества реверс-инжиниринга по времени.

Таблица 7. Показатели качества реверс-инжиниринга, полученные в результате эксперимента
Table 7. Quality indicators of reverse-engineering obtained in experiment

Образец	k_{IT}	$K_{мат.}$	$k_{шер.}$	$k_{ДФ}$	$K_{черт.}$	$K_{РИ}$	$K_{РИ}$
1	0,92	1,00	0,99	1	0,91	1,00	0,91
2	0,89	1,00	0,99	0,96	0,71	0,95	0,67
3	0,90	1,00	0,89	1	0,8	0,92	0,73
4	0,88	0,89	1,00	1	0,78	0,80	0,62
5	0,9	0,89	1	0,71	0,56	0,95	0,53

В Таблице 7 сведены несколько результатов расчета комплексного показателя качества реверс-инжиниринга детали поршень.

Предложенная математическая модель позволяет в лабораторных условиях по эталонным запасным частям и с учетом определенных ресурсов (лаборант, измерительный инструмент, методика реверс-инжиниринга) получить значения на группу однотипных деталей и вывести среднее значение по качеству, в нашем случае $K_{черт. Ср}=0,75$. Далее данное среднее значение можно использовать для реверс-инжиниринга новых деталей данного класса, на которые отсутствуют чертежи. Предполагается, что последующий полученный по результатам реверс-инжиниринга чертеж будет равен этому среднему значению, что позволяет при необходимости повысить технические требования к параметрам полученного чертежа детали.

Заключение

Представленный в работе математический аппарат дает возможность численно оценить качество процесса реверс-инжиниринга детали. Входящие в состав формулы комплексной оценки качества реверс-инжиниринга детали в полной мере дают возможность оценить полученный результат ввиду большого влияния на ресурс работы детали. Так как в работе рассматриваются детали гидроцилиндра ПДМ и материал у них четко обозначен, нет понимания результата оценки качества материала для другой номенклатуры деталей. Данный вопрос требует дополнительных исследований.

Комплексный показатель качества чертежа позволяет численно показать, насколько полученные в ходе реверс-инжиниринга параметры детали соответствуют оригинальному чертежу. Наиболее точным результатом оказался образец номер 1, $K_{черт.}=0,91$, данное значение показывает, что наш чертеж соответствует оригинальному чертежу на 91%.

Комплексный показатель качества реверс-инжиниринга является универсальным параметром и показывает оценку всего процесса с учетом влияния затрачиваемого времени, что в итоге влияет на скорость восстановления детали и ПДМ в целом. В данной работе мы не производили сравнение двух методик реверс-инжиниринга, предполагается, что затрачиваемое время по этим двум методикам будет существенно различаться, что в итоге значительно повлияет на качество реверс-инжиниринга и время восстановления деталей и ПДМ.

Из полученных результатов оценки качества чертежа детали поршень можно сделать вывод, что

изготовленная деталь будет приближена к оригиналу пропорционально качеству. Предложенная математическая модель представляет практическую значимость при обратном проектировании деталей технологических, транспортных и вспомогательных машин, применяемых при добыче полезных ископаемых.

Возможность применения данной математической модели:

- сравнение методик реверс-инжиниринга, описанных в начале статьи – оперативно-аналоговой и системно-справочной;
- установление зависимостей, таких как влияние квалификации лаборантов на качество полученных результатов, сложности детали на итоговое качество реверс-инжиниринга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вержанский А. П., Островский М. С., Мнацаканян В. У. Современные технологии технического обслуживания и ремонта горных машин и оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S1. С. 422–449. EDN SYBZDN.
2. Мнацаканян В. У., Сурина Н. В., Белянкина О. В., Сизова Е. И. Обеспечение точности сборки силовых гидроцилиндров механизированных крепей очистных забоев // Eurasian Mining. 2023. С. 50–54.
3. Lagunova Yu. A., Khoroshavin S. A., Kalyanov A. E. Durability increase of mining dump trucks through the use of protective coatings of the body // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032029
4. Болотов А. Н., Горлов И. В., Раутин М. Г. Новый способ восстановления изношенных поверхностей методом пластического деформирования // Вестник машиностроения. 2018. № 9. С. 67–72. EDN VJYEQA.
5. Симба Н. В. Х., Раутин М. Г. Влияние трещин на запас прочности ходовой части трака гусеницы экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № S14. С. 3–12. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_14_12. EDN CIYWAA.
6. Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Совершенствование технологий и техники для проведения подземных горных выработок и бурения скважин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6(154). С. 84–95. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-83-94. EDN ZISJSP.

7. Сурина, Н. В., Мнацаканян В. У. Система автоматизированного проектирования технологических процессов при ремонте горной техники // Горный журнал. 2019. № 7. С. 90–95. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.08.
8. Севагин С. В., Соловых Д. Я., Мнацаканян В. У. Выявление и обеспечение требований к качеству поверхности штока гидроцилиндра при контакте с уплотнением // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 15. С. 142–150. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-142-150.
9. Лагунова Ю. А., Хорошавин С. А., Калянов А. Е., Буялич К. Г. Повышение износостойкости щек ковшей экскаватора-драглайна // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 1(171). С. 24–30. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-24-30. EDN XWMSKR
10. Островский М. С., Масляков Н. С. Информационная поддержка технологии ремонта деталей горных машин // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (Научно-Технический Журнал). 2011. № S5. С. 62–70. EDN ONBVVJ.
11. Островский М. С., Масляков Н. С. Новый подход к созданию гибкой технологии производства запасных частей для самообеспечения горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 6. С. 23–29.
12. Масляков Н. С. Обоснование и разработка метода повышения технической готовности при эксплуатации погрузочно-доставочных машин: Автотрек. дис. канд. техн. наук. М. : МИСиС, 2016. 25 с.
13. Lingling Li, Congbo Li, Ying Tang, Yanbin Du An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 48. Pp. 39–50. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.02.004.
14. Чернов Р. С., Мишкина К. А., Стреляная Ю. О. Применение методов реверс-инжиниринга для решения производственных задач в современных реалиях // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2022. № 10. С. 48–51. DOI: 10.26160/2541-8637-2022-10-48-51.
15. Wang W. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. Boca Raton : CRC Press, 2011. 357 p.
16. Vinesh R., Kiran J. F. Reverse engineering An Industrial Perspective. London : Springer London, 2007. 242 p.
17. Марат Р. Т., Масляков Н. С., Соловых Д. Я. Реверс-инжиниринг запасных частей погрузочно-доставочных машин в ремонтной базе горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 5. С. 65–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_65.
18. Maryam Rozesara, Soroush Ghazinoori, Manouchehr Manteghi, Seyed Habibollah Tabatabaeian A reverse engineering-based model for innovation process in complex product systems: Multiple case studies in the aviation industry // Journal of Engineering and Technology Management. 2023. Vol. 69. DOI: 10.1016/j.jengtecm.2023.101765.
19. Bauer F., Schrapp M., Szijarto M. Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed tomography and additive manufacturing // Precision Engineering. 2019. Vol. 60. Pp. 63–75. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.07.008.
20. Stănașel J., Blaga F., Buidoș T., Crăciun D. Reverse engineering and CAD-CAM approach for manufacturing of spare parts. Case study // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 184. P. 4. DOI: 10.1051/matecconf/201818403004.
21. Sokół K., Cekus D., Reverse Engineering as a Solution in Parts Restoration Process // Procedia Engineering. 2017. Vol. 177. Pp. 210–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.191.
22. Konecki K., Wojtkowiak D., Talaśka K. Evaluating the Accuracy of the Reverse Engineering Process of Worn, Non-Standard Spur Gears—Pilot Studies // Applied Sciences. 2024. № 14(14). Pp. 6090. DOI: 10.3390/app14146090.
23. Michal Dúbravčík, Štefan Kender, Application of Reverse Engineering Techniques in Mechanics System Services // Procedia Engineering. 2012. Vol. 48. Pp. 96–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.491.
24. Солод Г. И. Избранные труды. Т. 1. Качество горных машин. М. : ОП МГГУ. 2011. С. 251.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Марат Райымбек Тимурулы, аспирант, НИТУ «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1, e-mail: marat.rayim@gmail.com

Масляков Никита Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, 0000-0002-3221-8990, НИТУ «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский проспект, 4, стр.1, e-mail: n.s.maslyakov@yandex.ru

Маметьев Леонид Евгеньевич, профессор, доктор технических наук, кафедра горных машин и комплексов Кузбасского государственного университета имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ), 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: mle.gmk@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Марат Райымбек Тимурулы – сбор материалов для исследования, выполнение работы по систематизации материалов, разработка математической модели, подготовка и проведение эксперимента, сбор, анализ и исследование данных, формулирование выводов по исследованию и написание текста статьи;
Масляков Никита Сергеевич – научное руководство темы исследования, постановка цели и задач исследования, разработка методологии исследования, окончательное утверждение текста статьи;
Маметьев Леонид Евгеньевич – согласование актуальности и научной новизны исследования, экспертная оценка результатов исследования и согласование текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-89-98

Rayimbek T. Marat^{1,*}, Nikita S. Maslyakov¹, Leonid E. Mametyev²

¹ NUST MISIS

² T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: marat.rayim@gmail.com

**MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX QUALITY ASSESSMENT
OF REVERSE-ENGINEERING OF A LOADING AND HAUL DUMP MACHINE PART**

Abstract.

The efficiency of a mining enterprise depends on the reliability of technological machines, and operative repair work directly affects this. In the case of repair or replacement of a machine it is possible to produce spare parts by means of the mining enterprise. However, the main problem is the lack of original drawings, for this purpose it is proposed to use reverse-engineering techniques. In this case it is necessary to estimate how much the obtained part corresponds to the original. For this purpose, this article presents a mathematical model of complex quality assessment of reverse-engineering of a part on the example of spare parts of loading-haul dump machines. The components for comprehensive quality assessment are geometric accuracy, shape and location accuracy, roughness, part material, and the time it takes to carry out the reverse-engineering process. These parameters are the most important due to their influence on the operating time of the part, the quality of the remanufactured part of the assembly or aggregate as a whole and the suitability for measurement, especially in the conditions of repair production of mining machines. The proposed mathematical model allows to comprehensively numerically evaluate the result of the process of reverse-engineering of a part, namely how much the obtained part drawing corresponds to the original drawing. An example of calculation of the complex quality index of reverse engineering is given on the example of the part (spare part) of the hydraulic cylinder of the bucket lifting of the load haul dump machine. The proposed mathematical model is universal and can be widely used for spare parts of other types of technological, transport and auxiliary machines used in mining.



Article info

Received:

20 April 2025

Accepted for publication:

01 May 2025

Accepted:

05 May 2025

Published:

05 June 2025

Keywords: spare parts, part drawings creation, quality assessment, reverse-engineering, reverse-engineering of spare parts, mining machines, load-haul-dump machines, comprehensive quality assessment

For citation: Marat R.T., Maslyakov N.S., Mametyev L.E. Mathematical model of complex quality assessment of reverse-engineering of a loading and haul dump machine part. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 2(178):89-98 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-89-98, EDN: ANWXWL

REFERENCES

1. Verzhansky A.P., Ostrovsky M.C., Mnatsakanian V.U. Modern Technology For Maintenance And Repair Of Mining Machinery And Equipment. *Mining informational and analytical bulletin (scientific*

and technical journal). 2014; S:422–449. EDN SYBZDN. [In Russ]

2. Mnatsakanian V.U., Surina N.V., Belyankina O.V., Sizova E.I. Assembly accuracy of power cylinders for powered roof supports in longwalls. *Eurasian mining*. 2023; 1:50–54. [In Russ]

3. Lagunova Yu.A., Khoroshavin S.A., Kalyanov A.E. Durability increase of mining dump trucks through the use of protective coatings of the body. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032029.
4. Bolotov A.N., Gorlov I.V., Rakhutin M.G. A New Method For Restoring Worn Surfaces By The Method Of Plastic Deformation. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2018; 9:67–72. EDN VJYEQ [In Russ]
5. Simba N.V.H., Rakhutin M.G. The Effect Of Cracks On The Safety Margin Of The Undercarriage Of The Excavator Track. *Mining informational and analytical bulletin*. 2024; S14:3–12. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_14_12. EDN CIYWAA [In Russ]
6. Mametyev L.E., Khoreshok A.A., Tsekhin A.M., Borisov A.Yu Improvement Of Technologies And Equipment For Underground Mining And Well Drilling. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022; 6(154):84–95. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-83-94. EDN ZISJSP [In Russ]
7. Surina N.V., Mnatsakanyan V.U. Automated Process Design System For Mining Equipment Repair. *Gornyi Zhurnal*. 2019; 7:90–95. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.08. [In Russ]
8. Sevagin S.V., Solovykh D.Ya., Mnatsakanyan V.U. Identification And Provision Of Requirements For The Quality Of The Surface Of The Hydraulic Cylinder Rod In Contact With The Seal. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2022; 15:142–150. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-142-150. [In Russ]
9. Lagunova Yu.A., Khoroshavin S.A., Kalyanov A.E., Buialich K.G. Increasing The Wear Resistance Of Bucket Jeeks Of Dragline Excavators. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024; 1(171):24–30. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-24-30. EDN XWMSKR. [In Russ]
10. Maslyakov N.S., Ostrovsky M.C. Information support of mining machine parts repair technology. *Mining informational and analytical bulletin*. 2011; S5:62–70. EDN ONBVVJ. [In Russ]
11. Ostrovsky M.S., Maslyakov N.S. New Approach To Creation Of The Flexible Manufacturing Technique Of Spare Parts For Self-Sufficiency Of The Mining Enterprise. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2013; 6:23–29. [In Russ]
12. Maslyakov N.S. Justification and development of a method for increasing technical readiness in the operation of loading and delivery machines. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow: NUST MISIS; 2016. 25 p. [In Russ]
13. Lingling Li, Congbo Li, Ying Tang, Yanbin Du An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017; 48:39–50. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.02.004.
14. Chernov R.S., Mishkina L.A., Strelyanaya Yu.O. Solving production tasks in modern realities. Reverse engineering methods application. *Mehatronika, avtomatika i robototechnika*. 2022; 10:48–51. DOI: 10.26160/2541-8637-2022-10-48-51. [In Russ]
15. Wang W. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. Boca Raton: CRC Press; 2011. 357 p.
16. Vinesh R., Kiran J.F. Reverse engineering An Industrial Perspective. London: Springer London; 2007. 242 p.
17. Marat R.T., Maslyakov N.S., Solovykh D.Ya. Reverse-engineering for spare parts of load-haul-dumpers at a mine service station. *Mining informational and analytical bulletin*. 2025; 5:65–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_65 [In Russ]
18. Maryam Rozesara, Soroush Ghazinoori, Manouchehr Manteghi, Seyed Habibollah Tabatabaeian A reverse engineering-based model for innovation process in complex product systems: Multiple case studies in the aviation industry. *Journal of Engineering and Technology Management*. 2023; 69. DOI: 10.1016/j.jengtecm.2023.101765.
19. Bauer F., Schrapp M., Szijarto M. Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed tomography and additive manufacturing. *Precision Engineering*. 2019; 60:63–75. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.07.008.
20. Stănel J., Blaga F., Buidoş T., Crăciun D. Reverse engineering and CAD-CAM approach for manufacturing of spare parts. Case study. *MATEC Web Conf.* 2018; 184:4. DOI: 10.1051/matecconf/201818403004.
21. Sokół K., Cekus D., Reverse Engineering as a Solution in Parts Restoration Process. *Procedia Engineering*. 2017; 177:210–217. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.191.
22. Konecki K., Wojtkowiak D., Talaśka K. Evaluating the Accuracy of the Reverse Engineering Process of Worn, Non-Standard Spur Gears—Pilot Studies. *Applied Sciences*. 2024; 14(14):6090. DOI: 10.3390/app14146090.
23. Michal Dúbravčík, Štefan Kender, Application of Reverse Engineering Techniques in Mechanics System Services. *Procedia Engineering*. 2012; 48:96–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.491.
24. Solod G.I. Selected works. Vol. 1. Mining machine quality. Moscow: MGGU; 2011. p. 251.

© 2025 The Author. This is an open (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

access article under the CC BY license

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

- Rayymbek T. Marat**, post-graduate student, NUST MISIS, Moscow, 119049, Leninskij prospekt, 4, str. 1, e-mail: marat.rayim@gmail.com
- Nikita S. Maslyakov**, Candidate of Engineering Sciences, docent, 0000-0002-3221-8990, NUST MISIS, Moscow, 119049, Leninskij prospekt, 4, str. 1, e-mail: n.s.maslyakov@yandex.ru

Leonid E. Mametyev, D. Sc. in Engineering, Professor, Department of Mining machines and complexes, T. F. Gorba-chev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Vesennyaya St., 28, e-mail: mle.gmk@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Rayymbek T. Marat – collecting materials for research, carrying out work on the systematization of materials, developing a mathematical model, preparing and conducting an experiment, collecting, analyzing and researching data, formulating conclusions on research and writing the text of the article;

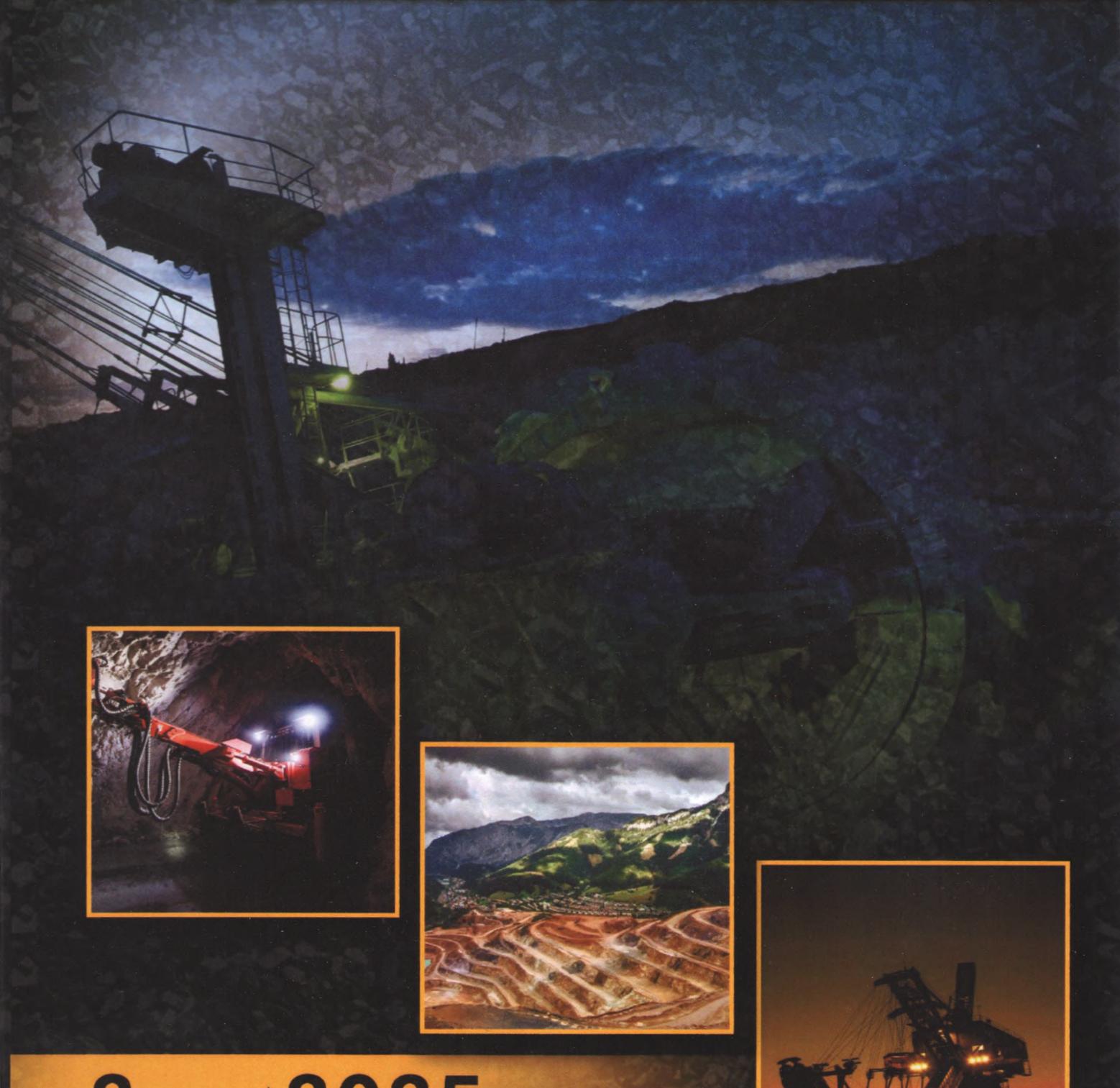
Nikita S. Maslyakov – scientific guidance of the research topic, setting goals and objectives of research, development of research methodology, final approval of the text of the article;

Leonid E. Mametyev – coordination of the relevance and scientific novelty of the research, expert assessment of the research results and coordination of the text of the article.

Authors have read and approved the final manuscript.



ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА



2 (178) • 2025

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

12+

2(178)

2025

Основан в 2000 году

Выходит 6 раз в год

ISSN 1816-4528

Главный редактор:
Хорешок А.А., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора:
Лагунова Ю.А., д.т.н., проф.
Кантович Л.И., д.т.н., проф.

Редакционный совет:
Трубецкой К.Н., акад. РАН, д.т.н.
Галкин В.А., д.т.н.
Мерзляков В.Г., д.т.н., проф.
Блюменштейн В.Ю., д.т.н., проф.
Аксенов В.В., акад. АГН, д.т.н.

Редакционная коллегия:
Андреева Л.И., д.т.н.
Аннакулов Т.Ж., к.т.н., доц.
Воронова Э.Ю., д.т.н., проф.
Галкин В.И., д.т.н., проф.
Глебов А.В., к.т.н.
Жабин А.Б., д.т.н., проф.
Зырянов И.В., д.т.н.
Ляхомский А.В., д.т.н., проф.
Певзнер Л.Д., д.т.н., проф.
Петров В.Л., д.т.н., проф.
Семёкина И.Ю., д.т.н., проф.
Тоиров О.З., д.т.н., проф.
Трифанов Г.Д., д.т.н., проф.
Хазанович Г.Ш., д.т.н., проф.
Юнгмайстер Д.А., д.т.н., проф.

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Адрес учредителя, издателя и редакции:
650000, Россия, Кемеровская область,
г. Кемерово, ул. Весенняя 28

Технический редактор:
Останин О.А.

Дизайн обложки, компьютерная верстка: Бородин Д.А.

Телефон редакции:
+7 (384-2) 39-63-14

Email: gormash@kuzstu.ru
Сайт: <http://gormash.kuzstu.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Леонова Ю.Ю., Негадаев В.А. Рациональный подход к выбору устройства компенсации реактивной мощности.....	3
Ян Янь, Чичерин И.В., Лицзюнь Чжао, Чанцзюань Лонг, Игнатьева Е.А. Разработка алгоритмов распознавания в системе управления приводами робота для сбора чайных листьев.....	12
Ефременко В.М., Скребнева Е.В., Лебедев Г.М. Анализ перерывов внешнего электроснабжения угольных шахт Кузбасса.....	22
ГОРНЫЕ МАШИНЫ	
Левашова Е.Е. Изменение структуры ремонтного цикла пальцев карьерного экскаватора	33
Афендиков Н.Г., Тыртычный С.В. Экспериментальные исследования разрушения горной породы группой резцов с различными смещениями их вдоль линий резания	40
Черных В.Г., Отроков А.В., Гринько Д.А., Гринько А.А., Миронова А.О., Богатырев А.Р. Определение параметров надежностно-ориентированного технического обслуживания автосамосвалов угольного разреза	50
Черных В.Г., Отроков А.В., Гринько Д.А., Гринько А.А., Миронова А.О., Богатырев А.Р. Разработка методических подходов к идентификации рисков неисправностей и отказов и определения их критичности для карьерных самосвалов	59
Черных В.Г., Отроков А.В., Гринько Д.А., Гринько А.А., Миронова А.О., Богатырев А.Р. Разработка блок схемы процессов риск-ориентированной системы ТОиР применительно к горнодобывающим предприятиям	69
Ефременков А.Б., Никитин Е.И., Пашков Д.А., Нозирзода Ш.С. Разработка математической модели формирования полувыпуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа геохода	78
Марат Р.Т., Масляков Н.С., Маметьев Л.Е. Математическая модель комплексной оценки качества реверс-инжиниринга деталей на примере запасных частей погрузочно-доставочной машины.....	89

Позиция редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых материалов.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала на сайте www.elibrary.ru
Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 58.14.1 ОКПД 2 ОК 034-2014 (КПЕС 2008)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций – регистрационный номер ПИ № ФС77-76284 от 19 июля 2019 г.

Журнал включен в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по направлениям (технические науки):

- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
- 2.8.8. Геотехнология, горные машины (технические науки)

Дата выхода в свет: 05.06.2025. Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Отпечатано на МФУ. Уч.-изд. л. 12,25. Тираж 70 экз. Заказ 68. Цена свободная

Адрес типографии: Издательский центр КузГТУ
650000, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, ул. Д.Бедного, 4а

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL
**MINING EQUIPMENT
AND ELECTROMECHANICS**

GORNOE OBORUDOVANIE I ELEKTROMEKHANIKA

12+

2(178)
2025

Founded in 2000

Issued 6 times a year

ISSN 1816-4528

Editor-in-chief:

Khoreshok A. A., Dr. Sc., prof.

Deputy editor-in-chief:

Lagunova, Yu. a., prof.

Kantowicz L. I., Dr. Sc., prof.

Editorial board:

Trubetskoy K. N., Acad. RAS, Dr. Sc.
Galkin V. A., Dr. Sc.
Merzlyakov V. G., Dr. Sc., prof.
Blumenstein V.Yu., Dr. Sc., prof.
Aksenov V. V., Akad. AMS, Dr. Sc.

Editorial Team:

Andreeva L. I., Dr. Sc.
Annakulov T.J., PhD, assoc. prof.
Voronova E.Yu., Dr. Sc., prof.
Galkin V. I., Dr. Sc., prof.
Glebov A.V., Ph. D.
Zhabin A. B., Dr. Sc., prof.
Zyryanov I. V., Dr. Sc.
Lakomski A. V., Dr. Sc., Prof.
Pevzner L. D., Dr. Sc., prof.
Petrov V. L., Dr. Sc., prof.
Semykina I. Yu., Dr. Sc., prof.
Toirov O.Z., Dr. Sc., prof.
Trifanov G. D., Dr. Sc., prof.
Khazanovich G. Dr. Sc., prof.
Jungmeister D. A., Dr. Sc., prof.

Founder and publisher:

T. F. Gorbachev Kuzbass state technical university

**Address of the founder, the publisher
and the Editorial office:**

Russia, 650000, Kemerovo region,
Kemerovo, 28 Vesennaya str.

Technical editor:

Ostaniin O. A.

**Cover design,
computer layout:** Borodin D. A.

Tel.: +7 (384-2) 39-63-14

Email: gormash@kuzstu.ru

Website: <http://gormash.kuzstu.ru>

CONTENTS

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Leonova Yu.Yu., Negadaev V.A. A rational approach to choosing a reactive power compensation device 3

Yan Yang, Chicherin I.V., Lijun Zhao, Chanjuan Long, Ignatieve E.A. Development of recognition algorithms in the control system of robot drives for plucking tea 12

Efremenko V.M., Skrebneva E.V., Lebedev G.M. Analysis of interruptions in the external power supply of coal-fired power plants Kuzbass mines 22

MINING MACHINES

Levashova E.E. Change in the repair cycle of excavator fingers 33

Afendikov N.G., Tyrytchny S.V. Experimental research of rock destruction by a group of cutters with different their displacements along the cutting lines 40

Chernyh V.G., Otkrov A.V., Grinko D.A., Grinko A.A., Mironova A.O., Bogatyrev A.R. Determination of parameters of reliability-oriented maintenance of coal mine dump trucks 50

Chernyh V.G., Otkrov A.V., Grinko D.A., Grinko A.A., Mironova A.O., Bogatyrev A.R. Development of methodological approaches to identify the risks of malfunctions and failures and determine their criticality for mining dump Trucks 59

Chernyh V.G., Otkrov A.V., Grinko D.A., Grinko A.A., Mironova A.O., Bogatyrev A.R. Development of a flowchart of the processes of a risk-based MRO system applied to mining enterprises 69

Efremenko A.B., Nikitin E.I., Pashkov D.A., Nozirzoda Sh.S. Development of a mathematical model for the formation of a semi-convex helicoid shape of the knife of the executive body of the geokhod 78

Marat R.T., Maslyakov N.S., Mametyev I.E. Mathematical model of complex quality assessment of reverse-engineering of a loading and haul dump machine part 78

The editorial position does not always coincide with the point of view of the authors of the published materials.

Full-text access to the electronic version of the journal is on website www.elibrary.ru

Tax relief - All-Russian product classifier

The publication corresponds to 58.14.1 OKPD 2 OK 034-2014 (KPEC 2008)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Communications - media registration number No. FS77-76284 of July 19, 2019.

The journal is included in the Russia List of the Higher Attestation Commission being the list of the leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results of theses for the academic degrees of a doctor and candidate of sciences should be published in the following areas (engineering):

- 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (engineering)
- 2.4.2. Electrotechnical complexes and systems (engineering)
- 2.8.8. Geotechnology, Mining machines (engineering)

Date of publication: 05 June 2025. Format 60×84 /8. Offset paper. Imprinted on MFPs. Published sheets 12,25. Edition 70 copies. Order 68. Free price

Address of the printing house:

Publishing center KuzSTU

Russia, 650000, Kemerovo region, Kemerovo, 4a, D. Bednogo str