

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН В РЕМОНТНОЙ БАЗЕ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Р.Т. Марат¹, Н.С. Масляков¹, Д.Я. Соловых¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: marat.rayim@gmail.com.

Аннотация: Рассмотрены суть и роль реверс-инжиниринга при ремонте погрузочно-доставочных машин зарубежного производства. Для этого проведена классификация деталей погрузочно-доставочной машины по видам на типовые, уникальные и стандартизированные. Исходя из классификации деталей, методы реверс-инжиниринга разделены на уровни по степени сложности и трудоемкости выполнения. Предложен алгоритм, демонстрирующий место и роль уровней реверс-инжиниринга в процессе ремонта погрузочно-доставочной машины, который позволяет оценить возможность и целесообразность применения разработанной оперативно-аналоговой методики реверс-инжиниринга типовых и уникальных деталей. В результате работы выполнено информационно-функциональное моделирование процесса реверс-инжиниринга запасной части по образцу оригинальной детали с применением методологии Icam DEfinition for Function Modeling. Данная модель разработана с целью декомпозиции и системного описания процесса реверс-инжиниринга, определения всех входящих и выходящих данных, необходимых трудовых и материальных ресурсов, механизмов управления, ограничений и нормативов на каждом этапе процесса реверс-инжиниринга. Для демонстрации применения оперативно-аналоговой методики реверс-инжиниринга в ремонтной базе горнодобывающего предприятия приведен пример реверс-инжиниринга поршня гидроцилиндра погрузочно-доставочной машины. Описанный пример демонстрирует разработку чертежа детали по реальному образцу для изготовления детали-аналога, используемой при ремонте погрузочно-доставочной машины в рамках ее технического сервиса взамен отсутствующей оригинальной запасной части.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, обратный инжиниринг, обеспечение запасными частями, технический сервис, горные машины, создание чертежей, импортозамещение запасных частей, погрузочно-доставочные машины, запасные части, методология функционального моделирования.

Для цитирования: 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.

Reverse engineering for spare parts of load–haul–dumpers at a mine service station

R.T. Marat¹, N.S. Maslyakov¹, D.Y. Solovyh¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: marat.rayim@gmail.com.

Abstract: The essence and role of reverse engineering in repair of load-haul-dumpers (LHD) at foreign manufacturers are discussed. To that end, spare parts of LHD are classified into typical, unique and standardized. Based on the classification of spare parts, the reverse engineering methods are rated by the level of their complexity and labor content. The proposed algorithm demonstrates the place and role of the reverse engineering in the process of LHD repair, and makes it possible to assess possibility and expediency of application of the elaborated analog operating process of the reverse engineering for the typical and unique spare parts. As a result of the study, the function-and-information modeling of the reverse engineering was performed for a sample of an original part using methodology Icam DEFinition for Function Modeling. The latter model is developed for the decomposition and system description of the reverse engineering process, and for determining all input and output data, necessary human and material resources, as well as controlling mechanisms, limitations and standards at each stage of the reverse engineering. By way of illustration of application of the analog operating reverse engineering process at a repair station of a mine, the reverse engineering of a hydraulic cylinder piston of LHD is described. This example illustrates the spare part drafting using a real sample to manufacture an analog spare part to replace the absent original part of LHD during its maintenance support.

Key words: reverse engineering, spares backing, maintenance support, mining machines, drafting, import substitution of spare parts, load-haul-dumpers, spare parts, function modeling methodology.

For citation: Marat R. T., Maslyakov N. S., Solovyh D. Y. Reverse engineering for spare parts of load-haul-dumpers at a mine service station. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):65-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_65.

Эффективность работы современного горнодобывающего предприятия, ведущего горные работы как открытым, так и подземным способом, в большой степени зависит от надежности работы технологических машин и оборудования. Горно-шахтная самоходная техника, широко применяемая в подземных горных работах, эксплуатируется в тяжелых условиях. Оперативное проведение внеплановых ремонтов неисправной техники напрямую влияет на эффективность работы [1].

В случае отказа технологической машины, в частности погрузочно-доставочной машины (ПДМ), горное предприятие сталкивается с необходимостью оперативного обеспечения требуемыми запасными частями или деталями-аналогами.

В случаях замены узла или детали предприятию необходимо иметь определенный страховой резерв запасных частей на складе либо покупать у производителя. Однако на практике по ряду причин это часто приводит к простоям ПДМ в ожидании запасных частей, затратам на хранение и производственным потерям от простоев.

При этом часть запасных частей, необходимых для внеплановых ремонтов, возможно произвести на месте эксплуатации, однако основная проблема в этом случае заключается в отсутствии оригинальных чертежей либо даже информации об изделии. Для решения данной проблемы предлагается использовать методики реверс-инжиниринга [2, 3].

На начальном этапе исследования было принято решение ввести классифика-

Таблица 1

Классификация деталей машины
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	Стандартизированные	Распространенные изделия (подшипники качения, приводные цепи, шпонки, крепежные детали), которые обычно не подвергаются реверс-инжинирингу
3	Уникальные	Требует проведения полного реверс-инжиниринга с целью выявления всех возможных параметров изделия

тор, необходимый для разделения всех деталей машины по определенному виду или параметру ввиду их широкой номенклатуры [4]. Классификация запасных частей, представленная в табл. 1, идет по их видовому различию. К типовым мы соотносим детали, имеющие схожую конструкцию. Стандартизированные включают в себя подшипники, крепежные изделия, фланцы, уплотнения и т.д. Детали, специфичные для определенного вида самоходной техники, входят в третью группу — уникальных деталей.

Исходя из требуемых задач и составленного классификатора, весь процесс реверс-инжиниринга был разделен на три уровня, с последующим усложнением. В табл. 2 указана получаемая инфор-

мация на каждом уровне и его область применения.

Проведение частичного и полного реверс-инжиниринга зависит от задач, стоящих перед сервисом самоходной техники. Частичный проводится для дефектовки, сканирования, контроля геометрических параметров детали [5, 6].

Под полным реверс-инжинирингом подразумевается воссоздание конструкторской документации изделия с целью дальнейшего изготовления аналога [7]. В процессе изучения исходной детали проводят измерения геометрических параметров изделия, анализ свойств, параметров и характеристик материала, определение качественной точности и других параметров, описывающих деталь [8].

Таблица 2

Уровни реверс-инжиниринга деталей машин
Levels of reverse engineering

№ уровня	Уровень	Получаемая информация	Область применения
I	Элементный	Измерение определенных параметров детали	Контроль геометрических параметров
II	Частичный	Проведение измерений с применением универсального или специализированного измерительного инструмента	Поиск аналогов и дефектовка. Контроль геометрических параметров
III	Полный	Проведение полного реверс-инжиниринга изделия подбором материала, определение качественной точности, отклонений, шероховатости и других описывающих деталь параметров	Поиск аналогов и дефектовка. Контроль геометрических параметров. Изготовление детали аналога

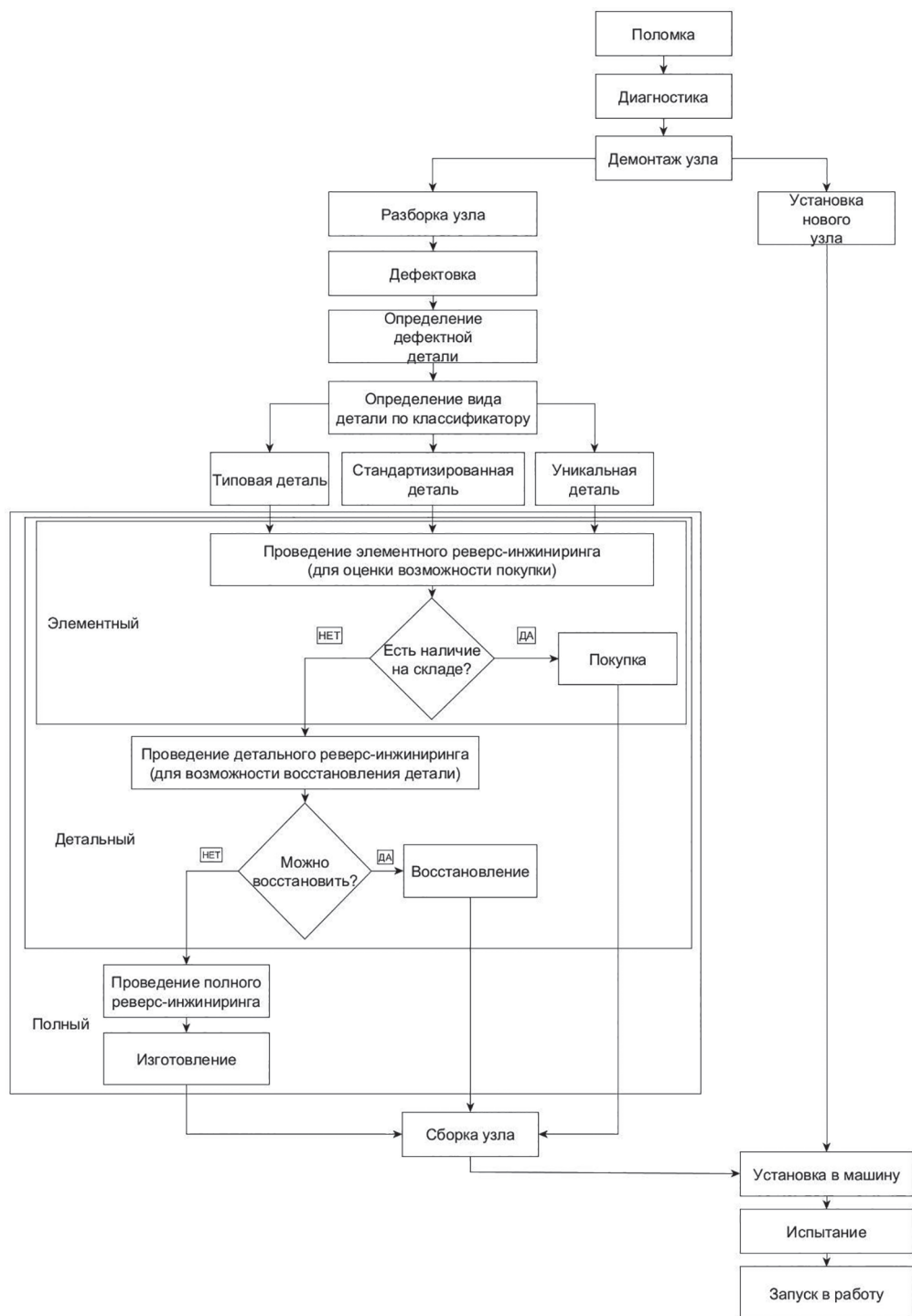


Рис. 1. Алгоритм выбора метода реверс-инжиниринга в техническом сервисе горной техники
 Fig. 1. Algorithm of selection method of reverse-engineering in technical service of mining machines

Таблица 3

Этапы реверс-инжиниринга
Stages of reverse-engineering

Этапы	Действия
Подготовительный этап	Осмотр детали, составление ее эскиза с габаритными размерами
	Подбор чертежей типовой детали с целью выявления измеряемых параметров
	Подбор измерительных методик, измерительных инструментов и приспособлений
Измерительный этап	Проведение измерений по выбранным методикам
	Измерение геометрических параметров
	Определение общих параметров
Конструкторский этап	Создание рабочей модели детали по полученным данным
	Разработка чертежа детали

Полный процесс реверс-инжиниринга включает в себя, кроме измерения геометрических и физических параметров, также работу с технической документацией (определение допусков и посадок, чертежи схожих деталей) [9].

Место и алгоритм выбора методики реверс-инжиниринга в сервисе горнодобывающей самоходной техники представлен на рис. 1. На рисунке можно увидеть разделение процесса на три вида (элементный, детальный, полный), применяемых в различных ситуациях. Их различие будет рассмотрено далее.

Реверс-инжиниринг (обратное проектирование, обратный инжиниринг) пред-

ставляет собой процесс разработки чертежа либо получения информации о детали на основе исходных данных, полученных в виде готового образца детали (чертеж не разрабатывается с нуля, а восстанавливается по образцу детали путем снятия с него размеров и изучения других его параметров) [10].

Сам процесс реверс-инжиниринга состоит из следующих этапов (табл. 3).

Для детального описания полного процесса реверс-инжиниринга разработана информационная модель с применением методологий SADT (Structured Analysis and Design Technique) и IDEF0 (Icam DEFinition for Function Modeling) — ме-

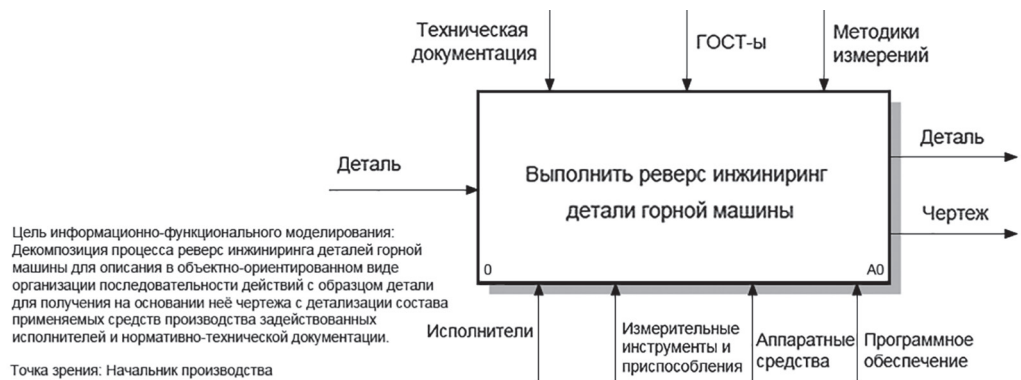


Рис. 2. Модель процесса реверс-инжиниринга верхнего уровня

Fig. 2. High level model of reverse engineering process

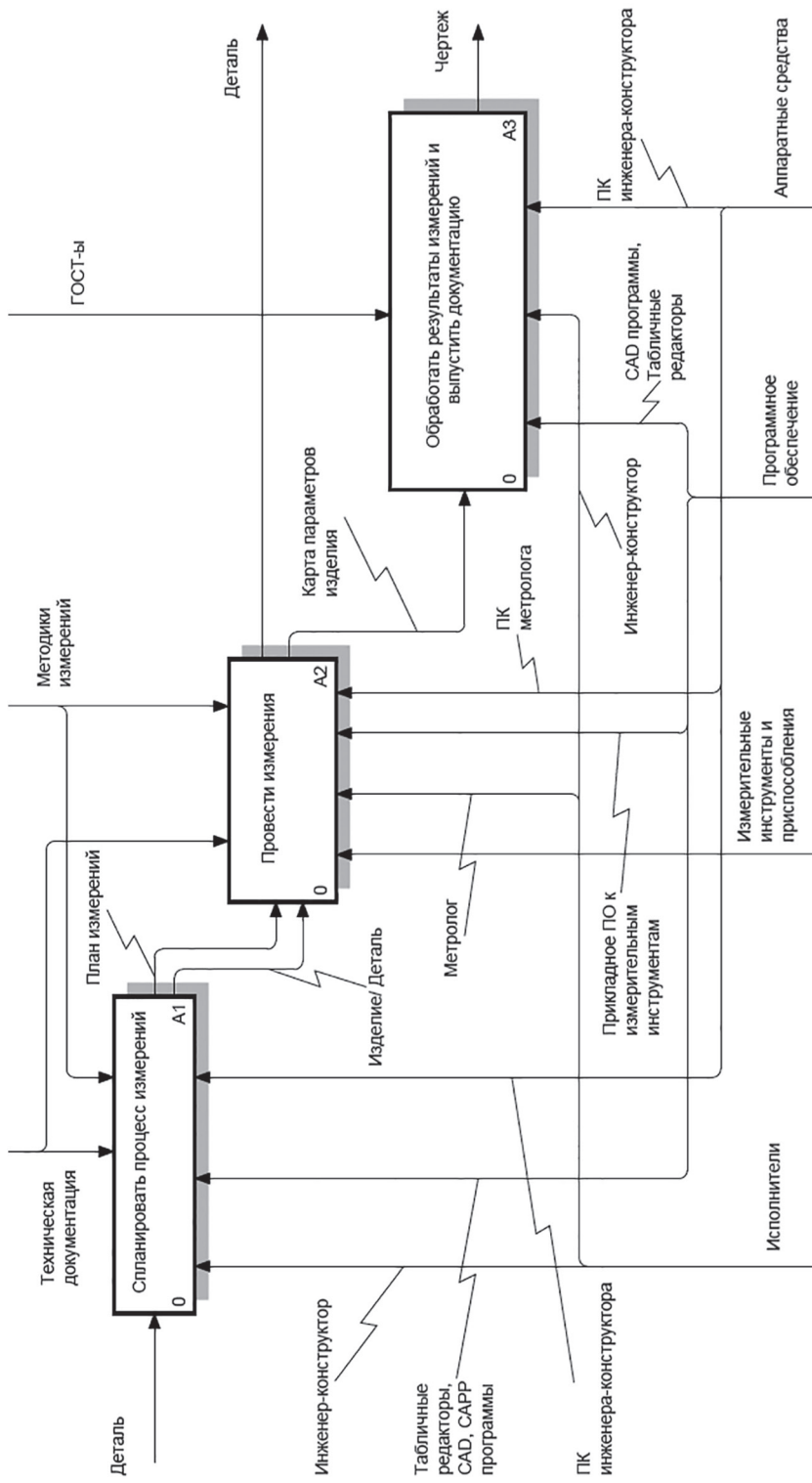


Рис. 3. Декомпозиция процесса «Выполнить реверс инжиниринг-детали горной машины»
 Fig. 3. Decomposition of process «Perform reverse engineering process of mining machine's part»

тода функционального моделирования, разработанного для описания функций различных систем путем создания наглядной графической модели. Моделирование системы используется для создания функциональной модели, в которой отображены процессы и функции системы, а также указана входящая информация и объекты, преобразуемые системой [11, 12].

Информационно-функциональная модель «Реверс-инжиниринг детали (запасной части) горной машины» верхнего уровня приведена на рис. 2.

На рисунке представлена модель процесса «Выполнить реверс-инжиниринг детали горной машины» верхнего уровня с точки зрения начальника производства. Цель моделирования — декомпозиция процесса для описания последовательности действий с реальным образцом детали для получения чертежа. Стрелки, направленные слева внутрь, являются входящими данными/информацией процесса и включают образец реальной детали. Исходящая вправо стрелка показывает результаты действий — измеренный образец детали и чертеж. Входящие стрелки сверху — контроль, механизм управления процессом, включает техническую документацию, ГОСТы или другие стандарты, методики измерений. Входящие стрелки снизу — механизмы исполнения, необходимые для осуществления данного действия, такие как исполнители, измерительные инструменты и приспособления, аппаратные средства, программное обеспечение (ПО).

Для получения более детализированной информации по основному процессу производится декомпозиция модели на подпроцессы (функции), а также детализация физических и информационных потоков.

На рис. 3 показана декомпозиция процесса «Выполнить реверс-инжиниринг детали горной машины».

Для планирования процесса измерений инженер-конструктор выполняет по технической документации с применение методик измерений. В результате формируется план измерений, который передается вместе с деталью метрологу для проведения измерений [13, 14].

Для процесса «Провести измерения» входящей информацией становится деталь и план измерений, полученный из предыдущего процесса. Руководствуясь планом измерений, метролог проводит измерения детали, параллельно заполняя карту параметров изделия. Полученная в итоге карта параметров передается обратно инженеру-конструктору для формирования конструкторской документации.

Выполняя последний процесс обработки результатов для выпуска конструкторской документации, инженер-конструктор руководствуется технической документацией, ГОСТами или другими стандартами, чертежами аналогов детали и картой параметров изделия.

Далее каждый процесс можно декомпозировать в отдельности (рис. 4–6).

На рис. 4 описано разделение на этапы отдельно взятого процесса. Входящей информацией первого процесса (стрелка слева) является измеряемая деталь. Инженер-конструктор определяет вид объекта измерения по классификатору изделий, далее определяются параметры для измерений [15]. По данным параметрам устанавливаются методики измерений и формируется список измерительных инструментов и приспособлений. Из всей полученной информации составляется план измерений для метролога, который передается на следующий этап (см. рис. 5) [16].

Проводя измерения геометрических параметров, физико-механических свойств изделия, метролог использует план измерений, составленный инженером-конструктором. В ходе процесса он запол-

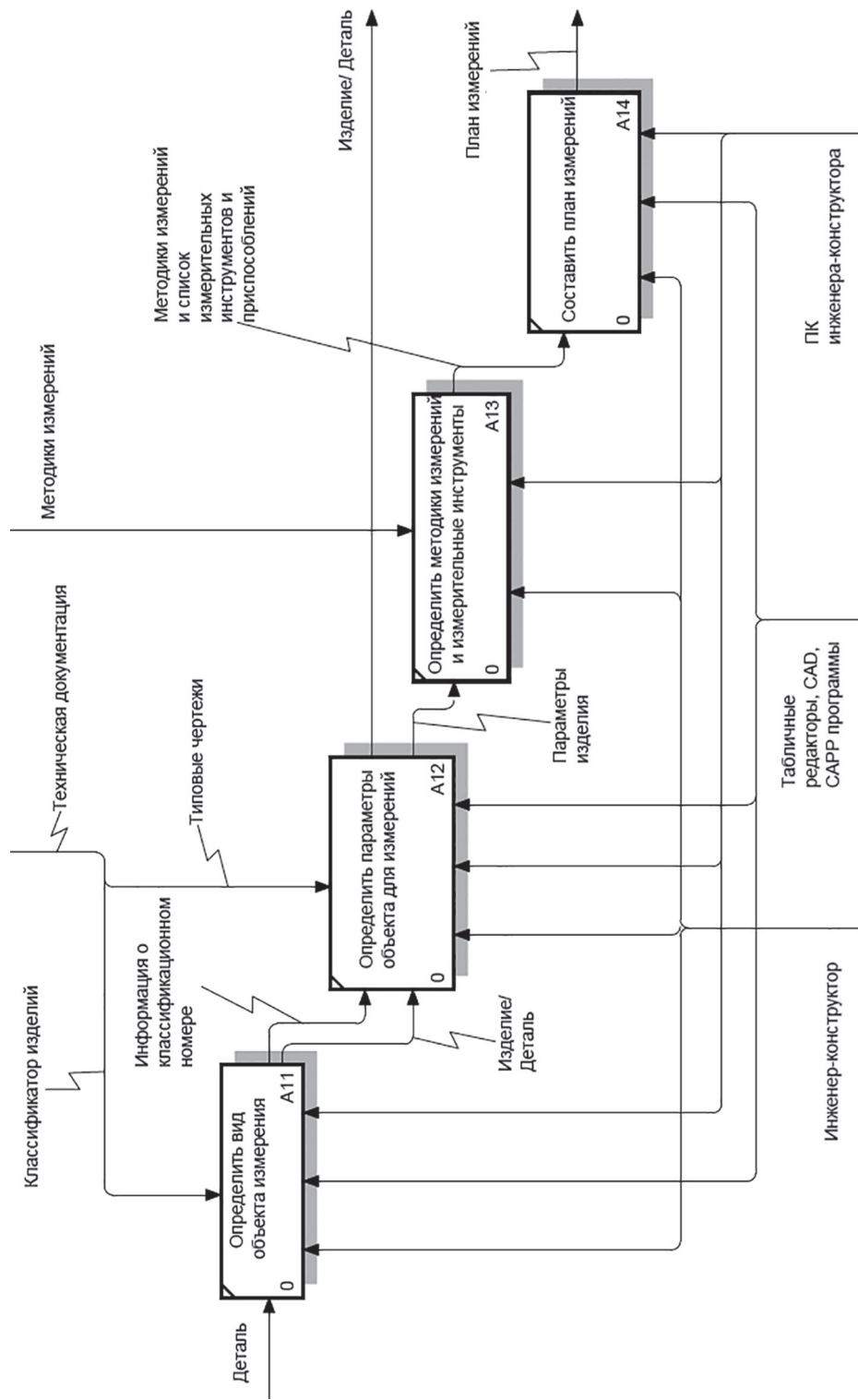


Рис. 4. Декомпозиция процесса «Спланировать процесс измерения»

Fig. 4. Decomposition of process «Plan the measuring process»

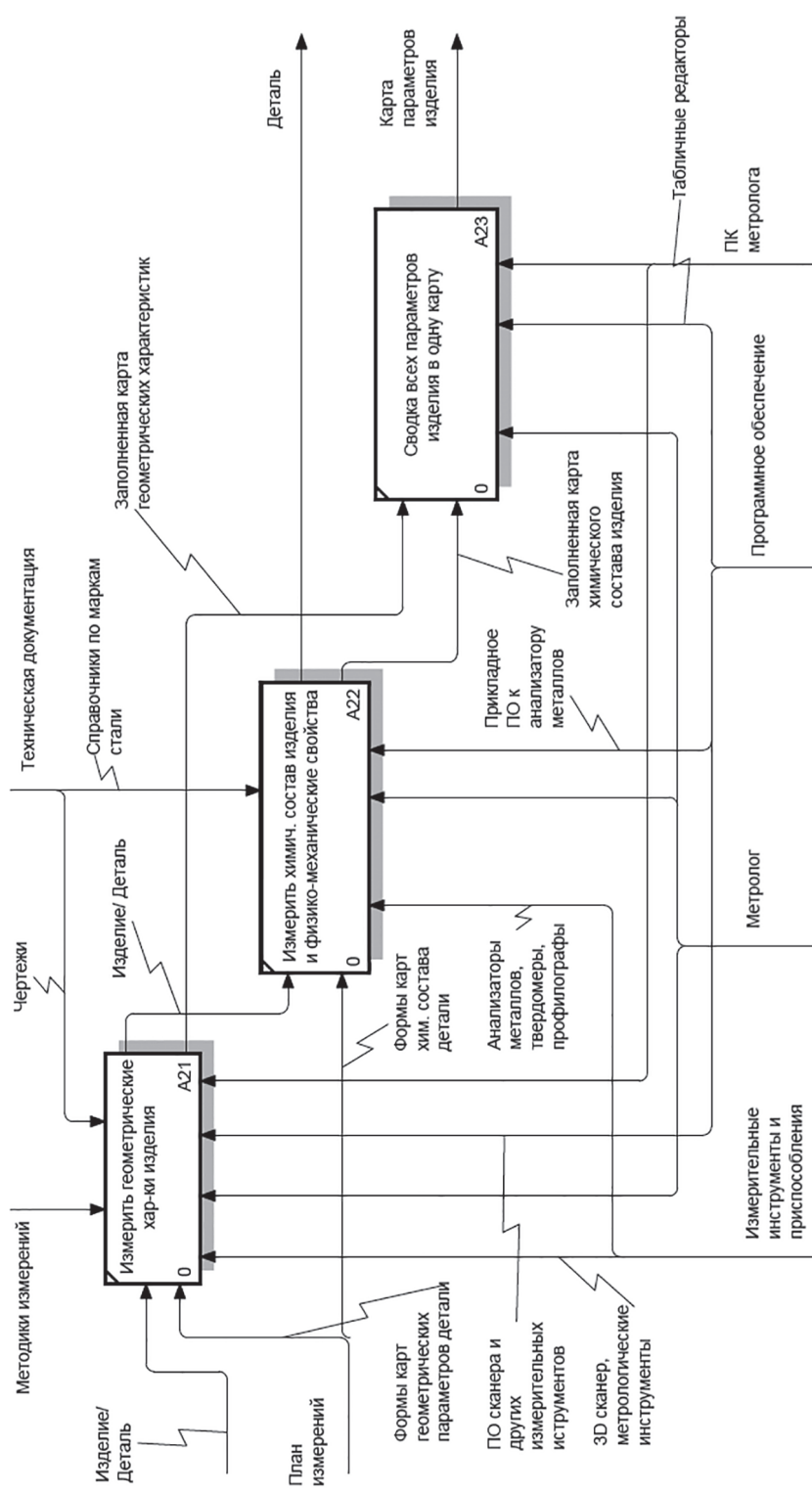


Рис. 5. Декомпозиция процесса «Провести измерения»
 Fig. 5. Decomposition of process «Perform measurements»

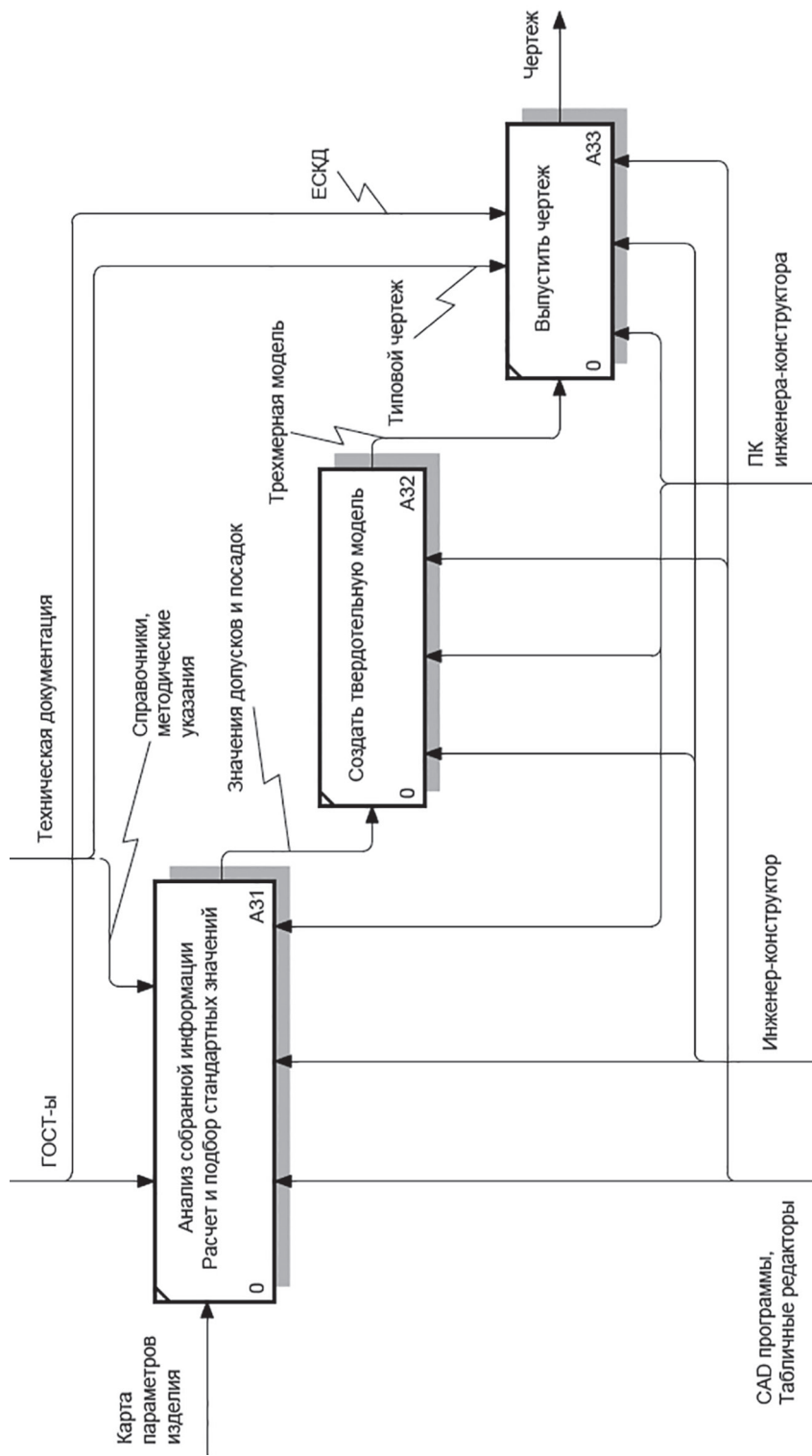


Рис. 6. Декомпозиция процесса «Обработка результатов измерений»
 Fig. 6. Decomposition of process «Process the results of measurements»

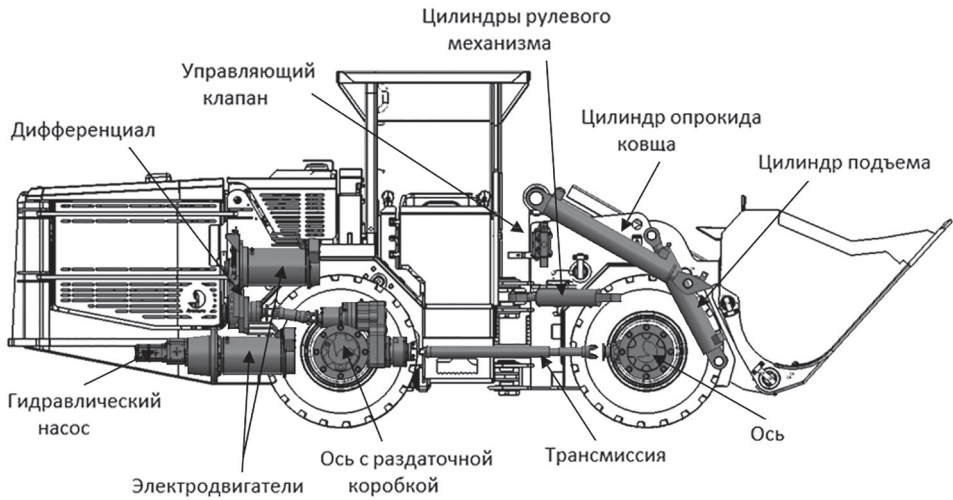


Рис. 7. Силовые узлы погрузочно-доставочной машины Aramine L140B
 Fig. 7. Components of load-haul-dump machines Aramine L140B

няет карту параметров, необходимую инженеру-конструктору для выпуска конструкторской документации.

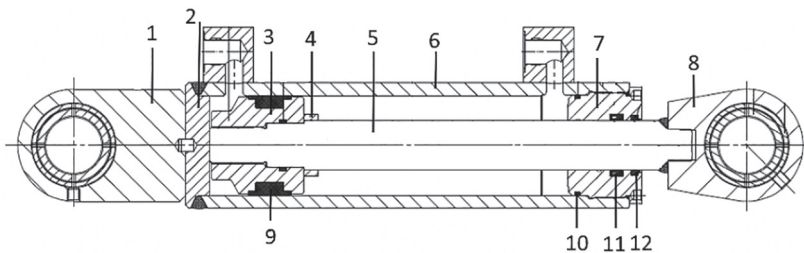
На рис. 6 показана декомпозиция последнего процесса «Обработать результаты измерений». Перед созданием модели и выпуском конструкторской документации инженер-конструктор проводит анализ и последующую обработку полученной информации [17]. Процесс заключен в сравнении полученных параметров с чертежом аналогом детали и работе со справочниками, технической документацией. После этого создается

твердотельная модель детали, по которой в дальнейшем выпускается чертеж [18, 19].

Пример выполнения реверс-инжиниринга при ремонте гидроцилиндра погрузочно-доставочной машины

Процесс реверс-инжиниринга будем рассматривать на примере гидроцилиндра погрузочно-доставочной машины (ПДМ) ARGO L140B.

На рис. 7 представлен общий вид ПДМ с отмеченными основными узлами.



1 – проушина; 2 – крышка; 3 – поршень; 4 – прокладка; 5 – шток; 6 – гильза; 7 – грундебукса;
 8 – проушина; 9 – резиновое уплотнение; 10 – уплотнительное кольцо; 11 – резиновое уплотнение;
 12 – грязесъемник

Рис. 8. Гидроцилиндр управления поворота ПДМ Aramine L140B
 Fig. 8. Hydraulic cylinder of turning LHD Aramine L140B

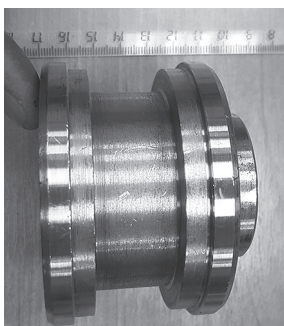


Рис. 9. Поршень гидроцилиндра ПДМ Aramine L140B

Fig. 9. Hydraulic piston LHD Aramine L140B

Основные технические характеристики машины:

Грузоподъемность — 1300 кг;

Объем ковша — 0,6–0,8 м³;

Вес без нагрузки — 4500 кг;

Вес с нагрузкой — 5000 кг;

Тип привода — электрический от аккумуляторной батареи.

На рис. 8 показан рассматриваемый гидроцилиндр управления поворота ПДМ, номерами отмечены детали, входящие в состав узла.

В соответствии с уровнями реверс-инжиниринга детали гидроцилиндра были разделены на аналогичные уровни:

- элементный — метизы, комплект уплотнений, прокладки; эти детали стан-

дартизированы и подбираются из справочников;

- полный — гильза;
- частичный — шток, грундбукса, поршень; большую часть информации по этим деталям гидроцилиндра возможно получить из справочников.

Рассмотрим пример выполнения реверс-инжиниринга. В качестве примера выбрана деталь — поршень гидроцилиндра (рис. 9).

На этапе планирования проведения процесса определяется тип детали и уровень реверс-инжиниринга. По классификации поршень относится к типовым деталям, уровень реверс-инжиниринга — частичный. Далее подбираются чертежи схожих деталей с целью выявления параметров для измерения и сравнения с выпускаемым чертежом, после чего определяются методики измерений и подбираются измерительные инструменты и приспособления (рис. 10, 11).

На этапе измерений проводятся измерения геометрических параметров детали, физико-механических свойств (схема измерений представлена на рис. 12). На рис. 13 и в табл. 4 для примера показаны результаты измерений наружных поверхностей детали. Так как истинное значение размера неизвестно, необхо-



Рис. 10. Рабочее место

Fig. 10. Work place



Рис. 11. Измерительные инструменты
Fig. 11. Measuring instruments

можно оценить его с заданной вероятностью.

Истинное значение измеряемой величины равно ее математическому ожиданию, задача сводится к оценке математического ожидания при помощи доверительных границ:

$$X - t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq m \leq X + t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где X — среднее арифметическое результатов измерений; σ — среднее квадратичное отклонение результатов измерений; t_p — аргумент функции Лапласа, табличное значение.

Среднее арифметическое для поверхности D1:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \\ &= \frac{77,98 + 78 + 78,01 + 78,01 + 78 + 77,98 + 78 + 78 + 78,01}{9} = 77,998 \end{aligned} \quad (2)$$

Аргумент Лапласа:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}} = \\ &= \sqrt{\frac{78,01 - 77,998}{8}} = 0,03 \end{aligned} \quad (3)$$

где x_i — крайнее значение измерений.

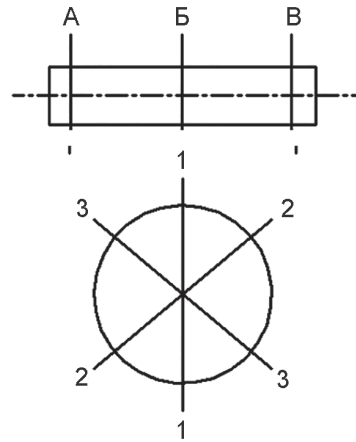


Рис. 12. Схема измерений
Fig. 12. Measurement scheme

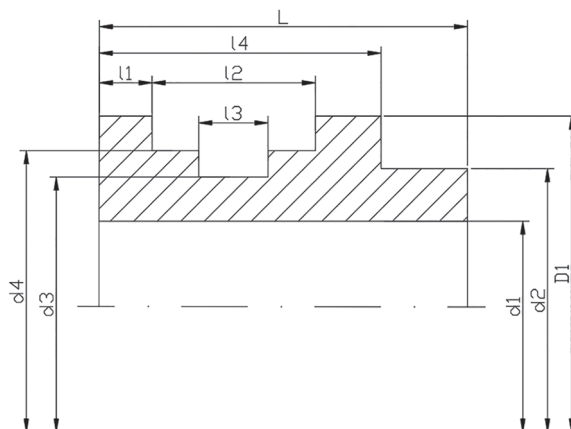


Рис. 13. Эскиз детали «поршень»
Fig. 13. Sketch of the piston

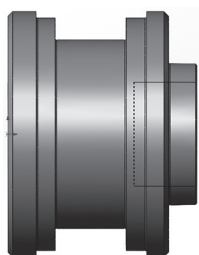


Рис. 14. Твёрдотельная модель детали «поршень» ПДМ Aramine L140B
Fig. 14. Solid state model of the piston LHD Aramine L140B

Таблица 4

Результаты измерений наружных поверхностей детали «поршень», мм
Results of measurements, mm

№ п/п	Продольные сечения								
	1-1			2-2			3-3		
	Поперечные сечения								
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
D1	77,98	78,00	78,01	78,01	78,00	77,98	78,00	78,00	78,01
d4	74,00	74,05	74,00	74,00	74,02	74,00	74,05	74,05	74,00
d3	59,99	59,95	59,97	59,97	59,99	59,99	59,95	59,95	59,97
d2	45,01	44,98	44,98	44,98	44,97	45,01	44,98	44,98	44,98

Таблица 5

Действительные значения размеров
Actual values of dimensions

Размер	X	x_i	σ	m_1	обозначение	m_2
d4	74,018	74,000	0,006	74,014	$\leq m \leq$	74,022
d3	59,970	59,970	0,000	59,970	$\leq m \leq$	59,970
d2	44,986	44,980	0,002	44,984	$\leq m \leq$	44,987

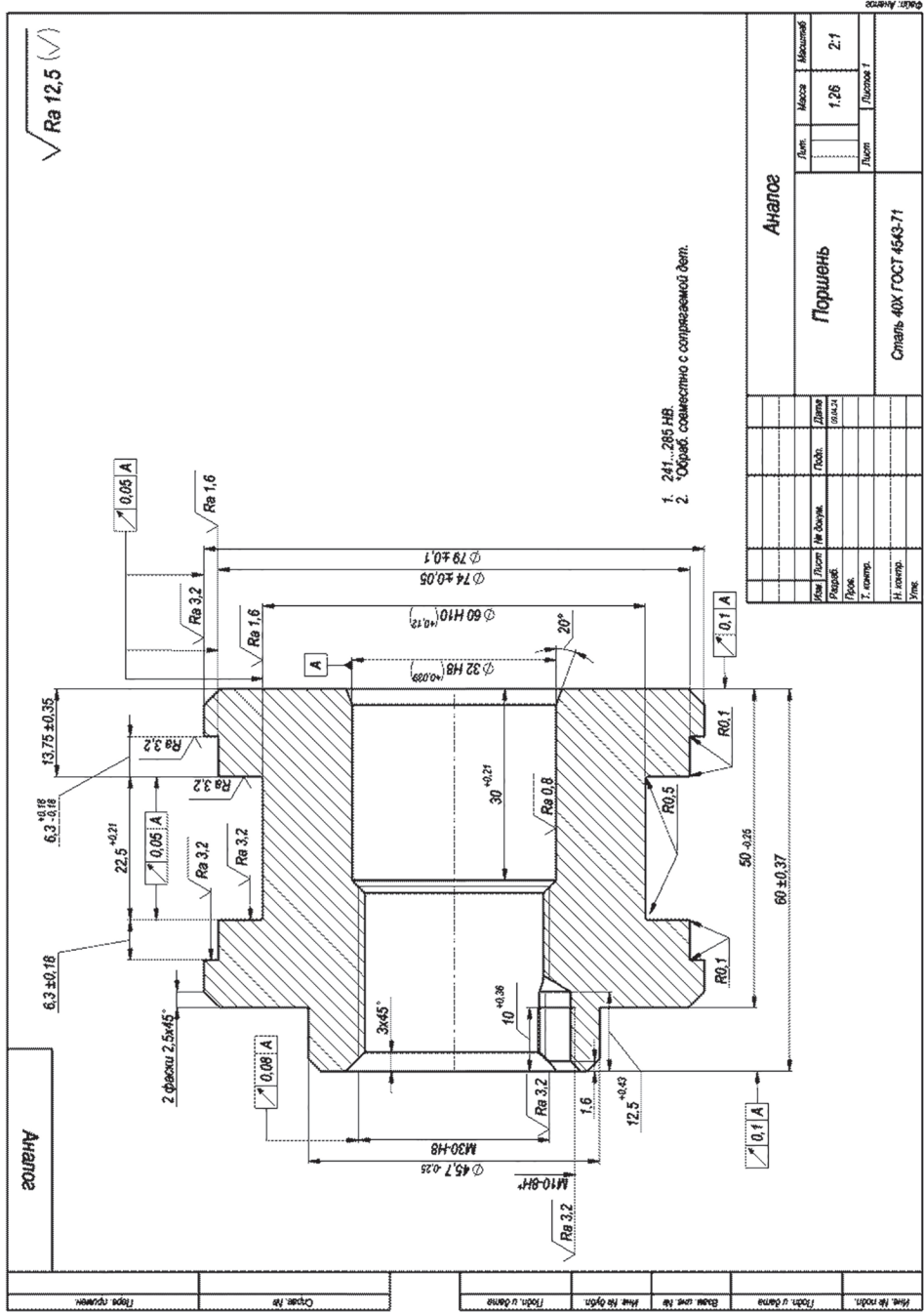


Рис. 15. Чертеж детали «поршень ПДМ Агамине L140В»
 Fig. 15. Drawing of piston LHD Aramine L140B

Подставим в формулу (1) получившиеся значения:

$$77,978 \leq m \leq 78,0176 .$$

Истинное значение размера находится в промежутке двух значений.

Принимаем, что истинное номинальное значение поверхности D1 равно 78 мм.

Найдем истинные значения для остальных поверхностей (табл. 5).

После проведения измерений на основании передачи данных, полученных метрологом, инженером-конструктором создается твердотельная модель детали (рис. 14).

В случае типовой детали основная информация по посадкам, шероховатости, материалу детали устанавливается по справочным материалам и ранее подобранному типовым чертежам. На рис. 15 показан готовый чертеж детали, полученный реверс-инжинирингом.

Заключение

Можно отметить, что от эффективности выполнения процессов технического сервиса зависит бесперебойная работа самоходной техники. При этом технический сервис в части выполнения внеплановых ремонтов начинается с поиска и диагностики неисправности, демонтажа узла, его разборки, дефектовки, определения дефектной детали, ее классификации и выбора уровня ее идентификации, которая в условиях отсутствия возможности поставки оригинальных запасных частей по каталогам возможна только путем выбора и выполнения требуемого вида реверс-инжиниринга [19].

В этих условиях реверс-инжиниринг является ключевым процессом, обеспе-

чивающим возможность идентификации детали. Особенно остро стоит вопрос касательно типовых и уникальных деталей, которые нет возможности приобрести, а только восстановить или изготовить аналог [20, 21]. Для этих целей проведен всесторонний анализ, формализация и описание процесса полного реверс-инжиниринга, с применением инструмента информационно-функционального моделирования IDEF0 с определением входной информации, результатов, ресурсов и инструментов для реализации, нормативов и ограничений. Описан механизм выполнения реверс-инжиниринга, представлена подробная детализация его этапов, необходимых ресурсов и нормативной документации. Реализация разработанной модели расписана на примере производства поршня гидроцилиндра погрузочно-доставочной машины Aramine L140B — от определения вида детали до выпуска чертежа.

Предложенная информационно-функциональная модель реверс-инжиниринга однозначно формализует и описывает процесс создания чертежа детали по ее образцу для обеспечения возможности ее изготовления с гарантированными показателями качества, установленными обоснованными требованиями, предъявляемыми к деталям и узлам машин. Налаженный процесс реверс-инжиниринга и использование отработанного алгоритма дает возможность не только оперативно выпускать чертежи различных деталей изделий в случае поломок самоходной техники, сокращая время ее простоя, но и давать предварительную оценку наиболее целесообразного метода обеспечения требуемой запасной части в нужное время и в нужном месте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Масляков Н. С.* Обоснование и разработка метода повышения технической готовности при эксплуатации погрузочно-доставочных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МИСиС, 2016. — 25 с.

2. Сыркин С. С., Хайруллин Н. Д., Кротов А. О., Печенкин М. В. Применение методов обратного инжиниринга применительно к контролю сложнопрофильных деталей машиностроения / Современные проблемы развития техники, экономики и общества. Материалы II Международной научно-практической конференции. — Казань, 2017. — С. 121–125.

3. Саса Д. А., Тараховский А. Ю. Использование многофункционального измерительного манипулятора для контроля параметров, получаемых после механической обработки // Вестник современных технологий. — 2020. — № 3. — С. 54–59.

4. Messler R. W. Reverse engineering: Mechanisms, structures, systems & materials. New York: McGraw Hill Professional, 2013, 448 p.

5. Епифанцев К. В. Анализ программных пакетов, применяемых для автоматизации измерений // Альманах современной метрологии. — 2021. — № 3. — С. 167–181.

6. 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.

7. Григорьев П. А., Неклюдов А. Н., Трошко И. В. Реверс-инжиниринг деталей наземных транспортно-технологических средств с применением методов 3D-сканирования // Высокие технологии в строительном комплексе. — 2022. — № 2. — С. 69–72.

8. Wang W. Reverse engineering: Technology of reinvention. Boca Raton: CRC Press, 2011, 357 p.

9. Vinesh R., Kiran J. F. Reverse engineering an industrial perspective. London: Springer London, 2007, 242 p.

10. Селищев Д. Н. Автоматизация проектирования на основе реверс-инжиниринга // Шаг в науку. — 2019. — № 2. — С. 62–64.

11. Сурина Н. В., Мнацаканян В. У. САПР технологических процессов ремонтного производства // Современные проблемы теории машин. — 2019. — № 8. — С. 94–96. DOI: 10.26160/2307-342X-2019-8-94-96.

12. 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.

13. Федорова И. Г., Филимонова Т. С., Журавлев Е. В., Васильев В. В. Оценка возможности применения реверс-инжиниринга в авиационной промышленности // Computational Nanotechnology. — 2019. — Т. 6. — № 3. — С. 68–73. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-68-73.

14. Тараховский А. Ю., Смирнов И. А. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2023. — № 18. — С. 91–97. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97.

15. Stănăşel J., Blaga F., Buidoş T., Crăciun D. Reverse engineering and CAD-CAM approach for manufacturing of spare parts. Case study // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 184, article 4. DOI: 10.1051/mateconf/201818403004.


16. 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.

17. 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.

18. Anwer N., Mathieu L. From reverse engineering to shape engineering in mechanical design // CIRP Annals. 2016, vol. 65, no. 1, pp. 165–168. DOI: 10.1016/J.CIRP.2016.04.052.

19. 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.

20. Rozesara M., Ghazinoori S., Manteghi M., Tabatabaeian S. H. 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.jengtecman.2023.101765.

21. Dúbravčík M., Kender S. 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. 

REFERENCES

1. Maslyakov N. S. *Obosnovanie i razrabotka metoda povysheniya tekhnicheskoy gotovnosti pri ekspluatatsii pogruzochno-dostavochnykh mashin* [Justification and development of a method for increasing technical readiness in the operation of loading and delivery machines], Candidate's thesis, Moscow, MISiS, 2016, 25 p.
2. Syrkin C. C., Khayrullin N. D., Krotov A. O., Pechenkin M. V. Application of reverse engineering methods to the inspection of complex-profile mechanical engineering components. *Sovremennyye problemy razvitiya tekhniki, ekonomiki i obshchestva. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems of technology, economy and society development. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference], Kazan, 2017, pp. 121–125. [In Russ].
3. Sasa D. A., Tarahovski A. U. Application of a multifunctional measuring manipulator for controlling parameters obtained after machining operation. *Journal of modern technologies*. 2020, no. 3, pp. 54–59. [In Russ].
4. Messler R. W. *Reverse engineering: Mechanisms, structures, systems & materials*. New York: McGraw Hill Professional, 2013, 448 p.
5. Epifancev K. V. Analysis of software packages used for automation of measurements. *Al'manac of modern metrology*. 2021, no. 3, pp. 167–181. [In Russ].
6. Chernov R. S., Mishkina L. A., Strelyanaya Yu. O. Solving production tasks in modern realities. *Mehatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2022, no. 10, pp. 48–51. [In Russ]. DOI: 10.26160/2541-8637-2022-10-48-51.
7. Grigorev P. A., Nekludov A. N., Troshko I. V. Modern 3D printing technologies for import substitution details of ground vehicles. *Vysokie tekhnologii v stroitel'nom komplekse*. 2022, no. 2, pp. 69–72. [In Russ].
8. Wang W. *Reverse engineering: Technology of reinvention*. Boca Raton: CRC Press, 2011, 357 p.
9. Vinesh R., Kiran J. F. *Reverse engineering an industrial perspective*. London: Springer London, 2007, 242 p.
10. Selishchev D. N. Automation of design on the basis of reverse engineering. *Shag v nauku*. 2019, no. 2, pp. 62–64. [In Russ].
11. Surina N. V., Mnatsakanyan V. U. Cad of technological processes of repair production. *Modern problems of the theory of machines*. 2019, no. 8, pp. 94–96. [In Russ]. DOI: 10.26160/2307-342X-2019-8-94-96.
12. Surina N. V., Mnatsakanyan V. U. Automated process design system for mining equipment repair. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 90–95. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.08.
13. Fedorova I. G., Filimonova T. S., Zhuravlev E. V., Vasiliev V. V. Estimation of the possibility of using reverse engineering in the aviation industry. *Computational Nanotechnology*. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 68–73. [In Russ]. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-68-73.
14. Tarakhovskiy A. Yu., Smirnov I. A. Reverse engineering of the compressor crankshaft. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023, no. 18, pp. 91–97. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97.
15. Stănăşel J., Blaga F., Buidoş T., Crăciun D. Reverse engineering and CAD-CAM approach for manufacturing of spare parts. Case study. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 184, article 4. DOI: 10.1051/mateconf/201818403004.
16. 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.
17. 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.
18. Anwer N., Mathieu L. From reverse engineering to shape engineering in mechanical design. *CIRP Annals*. 2016, vol. 65, no. 1, pp. 165–168. DOI: 10.1016/J.CIRP.2016.04.052.
19. 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.
20. Rozesara M., Ghazinoori S., Manteghi M., Tabatabaieian S. H. A reverse engineering-based model for innovation process in complex product systems: Multiple case studies in the aviation in-

dustry. *Journal of Engineering and Technology Management*. 2023, vol. 69. DOI: 10.1016/j.jengtec-man.2023.101765.

21. Dúbravčík M., Kender S. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Марат Райымбек Тимурулы*¹ – аспирант,

e-mail: marat.rayim@gmail.com,

*Масляков Никита Сергеевич*¹ – канд. техн. наук,

доцент, e-mail: n.s.maslyakov@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3221-8990,

*Соловых Данила Янисович*¹ – канд. техн. наук,

доцент, e-mail: podzem mash@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8734-1796,

¹ НИТУ МИСИС.

Для контактов: Марат Р.Т., e-mail: marat.rayim@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*R.T. Marat*¹, Graduate Student,

e-mail: marat.rayim@gmail.com,

*N.S. Maslyakov*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: n.s.maslyakov@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3221-8990,

*D.Y. Solovyh*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: podzem mash@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8734-1796,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: R.T. Marat, e-mail: marat.rayim@gmail.com.

Получена редакцией 26.09.2022; получена после рецензии 16.12.2024; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 26.09.2022; received after the review 16.12.2024; accepted for printing 10.04.2025.

