

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 32-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 32-38.

Научная статья
УДК 621.01
doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-32-38

Алгоритм технологии изготовления сложных сборных изделий с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих систем

Борис Анатольевич Якимович, д.т.н.
Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия,
yakimovich52@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** Современное машиностроительное производство находится в стадии фундаментального переосмысления и радикального перепроектирования конструкторских и технологических этапов, с целью достижения коренных улучшений наиболее важных показателей его деятельности – стоимость, качество и производительность. Цель исследования работы – анализ современных методов реверс-инжиниринга с учётом непрерывного развития цифровых технологий проектирования, изготовления и сборки машиностроительных изделий. Создание эффективного алгоритма технологии изготовления и сборки сложных сопрягаемых деталей. В статье представлена усовершенствованная технология изготовления и сборки изделий машиностроения, использующая методы реверс-инжиниринга. Выполнен анализ успешно решенных задач с использованием реверс-инжиниринга в различных сферах практической деятельности. Показано, что дальнейшее развитие современных методов цифрового проектирования и конструирования сложных изделий машиностроения и разработки оптимальных технологий их изготовления, требует переосмысления целей, задач и возможности использования реверс-инжиниринга при создании эффективных технологий. Впервые предложен алгоритм технологии изготовления деталей сложных сборочных изделий, основанный на принципах реверс-инжиниринга с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих высокотехнологичных систем. Разработанный алгоритм защищён изобретением к патенту, как способ изготовления сборного изделия. Проанализирована проблема защиты от копирования конкурентоспособной продукции машиностроения. Рассмотрены различные способы защиты от копирования изделий получаемых с использованием современных методов реверс-инжиниринга. Разработанный способ позволяет значительно сократить количество технологических операций, требуемых для изготовления второй детали, за счёт внедрения одной контрольной операции для первой детали, при выполнении которой осуществляется измерение элементов сопряжения первой детали и создаётся компьютерная модель второй детали, с учётом проведённых измерений и выполнение четырёх операций механической обработки на станке с ЧПУ.*

***Ключевые слова:** реверс-инжиниринг, цифровая модель детали, сложные сборочные изделия, виртуальное производство, методы защиты от копирования, эффективные технологии проектирования, измерения и изготовления*

***Для цитирования:** Якимович Б.А. Алгоритм технологии изготовления сложных сборных изделий с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих систем // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 32–38. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-32-38*

Algorithm of manufacturing technology for complex assembled products using digital measuring and processing systems

Boris A. Yakimovich, D.Eng.
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
yakimovich52@gmail.com

Abstract. Modern machine-building production is being radically reinterpreted and redesigned in technological stages and total restructuring for fundamental improvements in the most important significatives of its activities - cost, quality and productivity. The purpose of the research is to analyze modern methods of reverse engineering, taking into account the continuous development of digital technologies for designing, manufacturing and assembling machine-building products. It is effective algorithmization that can be useful for manufacturing and assembling complex mating parts. The article presents an improved technology for manufacturing and assembling machine-building products using reverse engineering methods. The analysis of successfully solved tasks using reverse engineering in various fields of practical activity is carried out. It is shown that the further development of modern methods of digital design and construction of complex mechanical engineering products and the development of optimal manufacturing technologies requires some rethinking of the goals and objectives. There should be a possibility of using reverse engineering for making effective technologies. For the first time, an algorithm for manufacturing parts of complex assembly products based on the principles of reverse engineering using digital measuring and high-tech processing systems has been proposed. The developed algorithm is protected by the patent application as a method of manufacturing an assembled product. Duplication protection problem in case of competitive machine-building products is analyzed. Various methods of protection against duplication of products obtained through modern techniques of reverse engineering are viewed. The developed method makes it possible to reduce significantly the number of technological operations required for the manufacture of the second part by introducing one control operation for the first part, during which the coupling elements of the first part are measured and a computer model of the second part is created, taking into account the all performed measurements and four machining operations on a CNC machine.

Keywords: reverse engineering, digital model of a part, complex assembly products, virtual production, duplication protection methods, effective design, measurement and manufacturing technologies

For citation: Yakimovich B.A. Algorithm of manufacturing technology for complex assembled products using digital measuring and processing systems / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 23–38. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-32-38

Введение

Современное машиностроительное производство находится в стадии фундаментального переосмысления и радикального перепроектирования конструкторских и технологических этапов, с целью достижения коренных улучшений наиболее важных показателей его деятельности – стоимость, качество и производительность.

Цель исследования работы – анализ современных методов реверс-инжиниринга с учётом непрерывного развития цифровых технологий проектирования, изготовления и сборки машиностроительных изделий. Создание эффективного алгоритма технологии изготовления и сборки сложных сопрягаемых деталей.

Реверс-инжиниринг получил своё развитие в различных сферах человеческой деятельности [1]. Суть его заключается в том, что, когда лидеры различных профессий используют реверс-инжиниринг к результатам выдающегося (чужого, уже полученного) труда, чтобы извлечь и формализовать скрытые идеи, сформировать новые компетенции в области творчества и креативности. От более общего понятия реверс-инжиниринга постараемся проанализировать его использование в

технике. А если конкретнее, в машиностроительной отрасли. В многочисленных работах, посвящённых реверс-инжинирингу в машиностроении, даются различные его понятия и определения [2 – 6]. В рамках настоящей работы, рациональным, на наш взгляд будет следующее определение реверс-инжиниринга: реверс-инжиниринг – процесс копирования одной из сопрягаемых деталей машиностроительного изделия, получение 3D-модели второй сопрягаемой детали, изготавливаемой на оборудовании с числовым программным управлением, с целью снижения затрат на изготовление сложных машиностроительных изделий. Данный подход применим и в том случае, когда в изделии могут быть и более двух сопрягаемых деталей.

При реализации разработанного алгоритма актуальной является задача определения первой и последующих сопрягаемых деталей. Критерием здесь безусловно являются затраты на их изготовление. Чем выше трудоёмкость изготовления деталей и стоимость норма/часа работы оборудования, тем рациональнее вероятность выбора в качестве первой сопрягаемой детали, имевшей наибольшие затраты.

Проблема выбора первой сопрягаемой детали по величине затрат заключается в том, что при определении их традиционными

методами (отраслевые нормативы, типовые технологические процессы, хронометраж) требуется разработка технологических процессов. В нашем случае это практически не реализуемо. Приемлемым способом является использование методов прогнозного нормирования (определение трудоёмкости методом аналогий, экспертного оценивания, метод оценки конструктивно-технологической сложности) [7]. Наиболее приемлемым с точки зрения цифровизации и автоматизации (включение в виде отдельного модуля в CAD/CAM/CAE системы) является метод оценки трудоёмкости с использованием конструктивно-технологической сложности отдельных деталей и машиностроительного изделия в целом [8]. Блок-схема обобщенного алгоритма основных вычислительных процедур метода конструктивно-технологической сложности показана на рисунке 1.

Вопросы повышения эффективности изготовления и сборки изделий машиностроения

содержательно рассмотрены в классической работе по технологии машиностроения [9]. В условиях массового, крупносерийного и серийного производств, при сборке изделий как правило используется методы, обеспечивающие полную взаимозаменяемость. Данный способ обеспечивает качественную сборку при соединении любых сопрягаемых деталей из всей партии. При этом допуск замыкающего звена рассчитывают по максимальным значениям допуска размеров всех составляющих звеньев. Использование метода полной взаимозаменяемости, особенно для сложных и высокоточных сборочных изделий приводит к резкому удорожанию производимой продукции из-за необходимости назначения жёстких допусков на размеры составляющих звеньев. Введение технологических операций пригонки или подгонки позволяют увеличить допуски на размеры деталей образующих размерную цепь (способ неполной взаимозаменяемости) [10, 11].

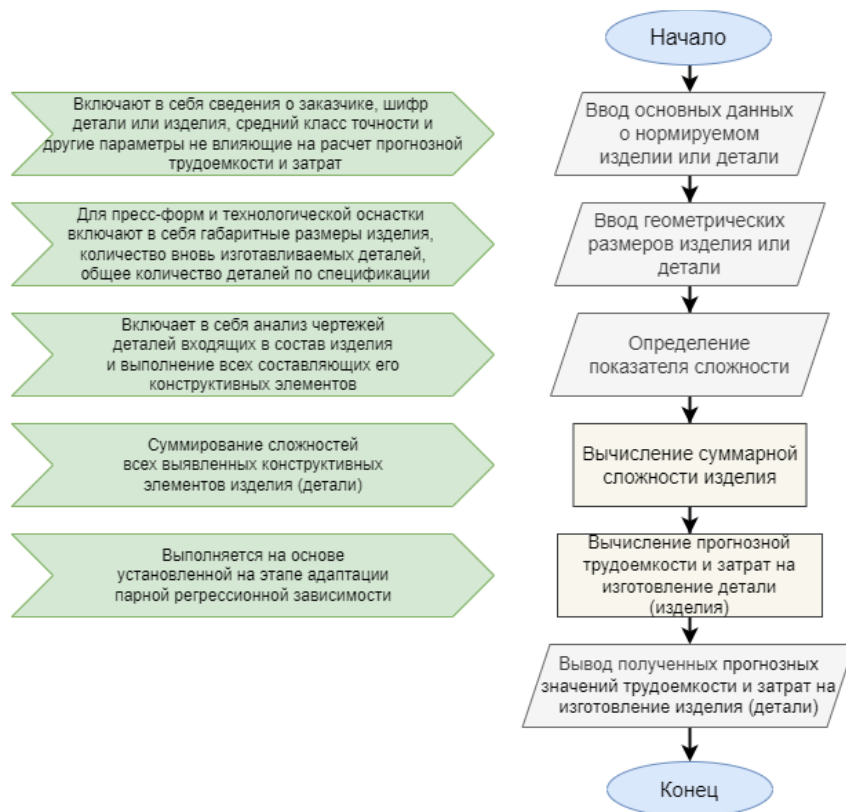


Рис. 1. Блок-схема обобщенного алгоритма основных вычислительных процедур при определении показателя сложности

Fig. 1. Block diagram of the generalized algorithm of the main computational procedures for determining the complexity index

Способ неполной взаимозаменяемости имеет существенные недостатки тех случаев,

когда требуется обеспечить точность размеров и качество сопряжения одновременно по

нескольким поверхностям. Затраты на изготовление изделий с применением способа неполной взаимозаменяемости значительно возрастают из-за введения дополнительных контрольных операций.

Разработанный и внедрённый на ряде промышленных предприятий алгоритм рациональной технологии изготовления сложных сборных изделий с использованием метода реверс-инжиниринга представлен на рис. 2 [12].

Реализацию алгоритма рассмотрим на примере сборочной единицы, состоящей из двух сложных деталей (рис. 3, рис. 4). Исходя из оценки метода конструктивно-технологической сложности более трудоёмкой является деталь, изображённая на рис. 3.

Укрупнённый технологический процесс с использованием способа неполной взаимозаменяемости представлен в табл. 1.

1. Технологический процесс с использованием способа неполной взаимозаменяемости

1. Flow process using the method of incomplete interchangeability

№ п/п	Перечень операций	Значение
1	Изготовление первой детали суммарной трудоёмкостью операций механической обработки	300 мин
2	Контроль параметров первой детали	12 мин
3	Изготовление второй детали суммарной трудоёмкостью	72 мин
4	Контроль второй детали трудоёмкостью КД2	6 мин
5	Операция слесарной пригонки второй детали СД2	30 мин

Типового структура технологического процесса изготовления второй детали

представлен на рис. 5. Он обеспечил выполнение требований, представленных в таб. 2.

2. Обеспечение технических требований ко второй детали

2. Technical requirements for the second part

№ п/п	Технические требования	Значения
1	Наименьшая шероховатость, Ra	6,3 мкм
2	Допуск перпендикулярности	0,05 мм
3	Плоскостность	0,2 мм
4	Симметричность	0,025 мм
5	Допуск по контуру	0,2 мм

Разработанный способ позволяет значительно сократить количество технологических операций, требуемых для изготовления второй детали, за счёт внедрения одной контрольной операции для первой детали, при выполнении которой осуществляется измерение элементов сопряжения первой детали и создаётся компьютерная модель второй детали, с учётом проведённых измерений и выполнение четырёх

операций механической обработки на станке с ЧПУ.

В приведённом примере трудоёмкость изготовления второй детали была снижена в два раза, а себестоимость её изготовления уменьшена на 30 %. В расчётах не учтено снижение затрат на изготовление первой детали вследствие предъявление менее жёстких требований к точности её размеров.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма основных вычислительных процедур предлагаемого способа изготовления сборного изделия

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for the main computational procedures of the proposed manufacturing technique of an assembled product

Активное развитие методов реверс-инжиниринга, с целью копирования и изготовления передовых конкурентоспособных технических решений определило необходимость создания комплекса мер противодействия. Коротко остановимся на трёх подходах: технологическом, эволюционном и сетевом. Первый подход заключается в разработке и реализации технологии недоступной конкурентом. Достижение уникальности, высокого качества и производительности путем технологического

превосходства требует высокой стоимости на реализацию высоких технологий и подготовленного персонала. Эволюционный подход основан на непрерывных усовершенствованиях выпускаемого продукта. Прежде всего в усложнении конструкции или добавления новых функций. Если ведётся сетевое проектирование, то с целью исключения копирования часть продуктов (сервисное) выполняется недоступной, в отличие от аппаратной части.

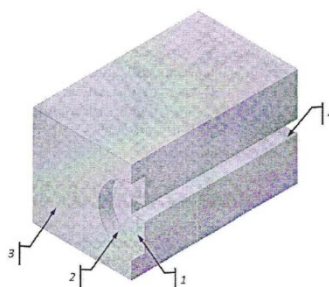


Рис. 3. Первая деталь

Fig. 3. The first workpiece

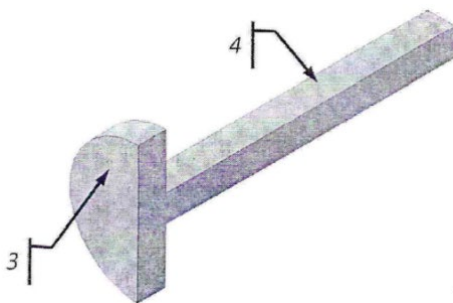


Рис. 4. Вторая деталь

Fig. 4. The second workpiece

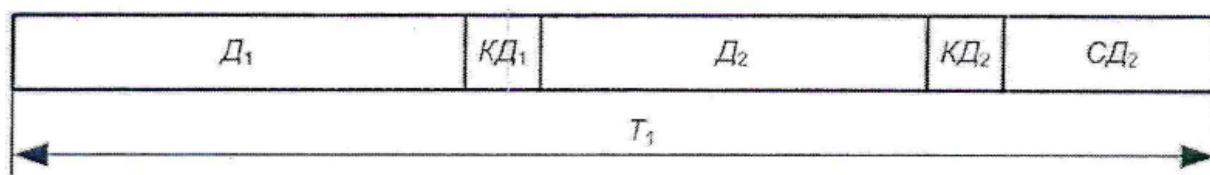


Рис. 5. Структурная схема традиционного технологического процесса изготовления второй детали

Fig. 5. Block diagram of the traditional manufacturing process of the second workpiece

Заключение

1. Методы реверс-инжиниринга применимы не только для копирования и изготовления сложных деталей машиностроения, но и для совершенствования технологий их изготовления и сборки.

2. Развитие способов защиты от копирования стимулирует создание сложных конструктивных и технологических решений, что не всегда способствует увеличению их функциональности и снижению производственных издержек.

3. Развитие реверс-инжиниринга несомненно получит своё дальнейшее развитие в системах, реализующих алгоритмы искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман Р. Обратная разработка великих свершений. Реверс-инжиниринг как путь к мастерству. М: Попурри, 2021. 149 с.
2. Кугаевский С.С. Реверс-инжиниринг и быстрое прототипирование в машиностроении: учебно-методическое пособие / Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2023. 98 с.

3. Власов В.Н., Губанов А.В. Компьютерные технологии реверсивного проектирования [Электронный ресурс] URL: <https://sapr.ru/article/6661> (дата обращения: 25.07.2022).

4. Ведмидь П.А. Практический подход к реверсивному инжинирингу // САПР и графика. 2001. № 11. С. 77–81.

5. Реверс-инжиниринг изделий в Siemens NX от «А» до «Я» [Электронный ресурс] URL: <https://cccp3d.ru/topic/110958> (дата обращения: 08.12.2022)

6. Рубанова К.А. Исследование применения обратного инжиниринга российскими промышленными компаниями // Human Progress / Человеческое развитие. 2024. Выпуск 1. Том 10. ISSN 2414-4916.

7. Якимович Б.А., Коршунов А.И., Кузнецов А.П. Теоретические основы конструктивно-технологической сложности изделий и структур-стратегий производственных систем машиностроения: монография / Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. 132 с.

8. Шарин Ю.С. Теория сложности / Ю.С. Шарин, Б.А. Якимович, В.Г. Толмачев, А.И. и др. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. 280 с.

9. Технология машиностроения / Суслов А.Г.: учебник. М: КНОРУС, 2020. 336 с.

10. Холмогорцев Ю.П., Крамаренко А.П. Способ взаимной притирки сопряжений / Оpubл. 25.07.1981. Бюл. № 26. 2 с.

11. Бирин Б.В., Перец М.И., Солью С. Способ обеспечения взаимозаменяемости при притирке сопрягаемых деталей /. Розенберг. Оpubл. 07.12.1979. Бюл. №45. 4 с.

12. Патент № 2554243 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 11/00. Способ изготовления сборного изделия, состоящего из двух сопрягаемых деталей: № 2013159122/02: заявл. 30.12.2013: опубл. 27.06.2015 / Б. А. Якимович, Ю. В. Пузанов, В. В. Тарасов, А. Г. Бажин.

REFERENCES

1. Friedman R. Reverse engineering of great achievements. Reverse engineering as a way of best practices. Moscow: Popourri, 2021, 149 p.

2. Kugaevsky S.S. Reverse engineering and rapid prototyping in mechanical engineering: an courseware / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2023, 98 p.

3. Vlasov V.N., Gubanov A.V. Computer technologies of reverse engineering [Electronic resource] URL: <https://sapr.ru/article/6661> (date of access: 07/25/2022).

4. Vedmid P.A. A practical approach to reverse engineering // CAD and graphics. 2001, no. 11. pp. 77–81.

5. Reverse engineering of products in Siemens NX from "A" to "Z" [Electronic resource] URL: <https://cccp3d.ru/topic/110958> (date of access: 08.12.2022)

6. Rubanova K.A. A study of the application of reverse engineering by Russian industrial companies // Human Progress / Human development. 2024, Issue 1, vol 10. ISSN 2414-4916.

7. Yakimovich B.A., Korshunov A.I., Kuznetsov A.P. Theoretical foundations of the constructive and technological complexity of products and structures-strategies of production systems of mechanical engineering: monograph / Izhevsk: IzGTU Publishing House, 1999, 132 p.

8. Sharyn Yu. S. Theory of complexity / Yu. S. Sharin, B.A. Yakimovich, V.G. Tolmachev, A. I. God. et al. Izhevsk: Publishing house of IzhSTU, 2007, 280 p.

9. Technology of mechanical engineering / Suslov A.G.: textbook. Moscow: KNORUS, 2020. 336 p.

10. Kholmogortsev Yu.P., Kramarenko A.P. Method of mutual lapping of fits / Publ. 07/25/1981. Bul. no. 26, 2 p.

11. Birin B.V., Pepper M.I., Salt S. A method for ensuring interchangeability for lapping mating parts / Rosenberg, Publ. 12/07/1979, Bul. no. 45. 4 p.

12. Patent No. 2554243 S1 Russian Federation, IPC b23p 11/00. Method of manufacturing an assembled product consisting of two mating parts: No. 2013159122/02: application 30.12.2013: published 27.06.2015 / B. A. N. Yakimovich, Yu. N. V. Puzanov, V. N. V. Tarasov, A. N. G. N. Bazhina.

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 26.02.2025.

The article was submitted 12.02.2025; approved after reviewing 20.02.2025; assepted for publication 26.02.2025.