

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9; 621.927.7; 621.951.4; 553.179; 519.876.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-60-68



РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ АДАПТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СУБТРАКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕЗВИЙНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Сергеев Ю.С.¹, Гоголев В.П.¹, Платов С.И.², Сергеев С.В.¹, Толмачев Е.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современная степень цифровизации проведения геологоразведочных работ, обустройства и эксплуатации скважин на разведанных месторождениях, а также изготовления деталей высокотехнологичной техники в металлообработке требует создавать технологическую подготовку производства высокого уровня с использованием цифровых двойников процессов и искусственного интеллекта. Для практической реализации такой концепции требуется глубокое понимание динамики физических весьма близких по сути процессов бурения и сверления скважин и отверстий. Полученные знания позволили получить адекватные реальным математические (имитационные) модели, которые будут полезны при проектировании и реализации таких технологических процессов. Это позволит исключить погрешности обработки, ошибки проектирования и снизить затраты на подготовку производства. Математическое моделирование повышает культуру производства и позволяет прогнозировать точность обработки на стадии проектирования операций. **Цель работы.** Разработка и практическая реализация концепции цифрового двойника процесса формообразования точных отверстий (скважин) вращающимися концевыми многолезвийными инструментами. **Используемые методы.** Представленные в статье модели получены на основе имитационного моделирования с использованием аналитических методов, базирующихся на фундаментальных физических законах и основных положениях механики резания и вибрационной механики, а также теории пластической деформации материала в зоне стружкоотделения. Научная новизна приведенных в данной статье исследований заключается в разработке цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности, который впервые учитывает взаимосвязь стружкоотделения и влияние его на точность обработки с учетом режимов резания и виброперемещений инструмента. **Результат.** В статье представлена часть разработанного впервые методологического и математического обеспечения для цифрового двойника формообразования отверстий (скважин) вращающимися концевыми многолезвийными инструментами. Применение цифрового двойника на производстве имеет большую практическую значимость, так как позволяет осуществлять точностную верификацию управляющих программ для станков с ЧПУ и бурового оборудования.

Ключевые слова: формообразование отверстий и скважин, вращающиеся концевые многолезвийные инструменты, стружкоотделение, имитационное моделирование, точностная верификация управляющих программ, цифровой двойник

© Сергеев Ю.С., Гоголев В.П., Платов С.И., Сергеев С.В., Толмачев Е.В., 2026

Для цитирования

Развитие методологии адаптивного интеллектуального проектирования с использованием цифровых двойников субтрактивных процессов формообразования внутренних поверхностей лезвийными инструментами / Сергеев Ю.С., Гоголев В.П., Платов С.И., Сергеев С.В., Толмачев Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 60-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-60-68>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE INTELLIGENT DESIGN METHODOLOGY USING DIGITAL TWINS OF SUBTRACTIVE PROCESSES FOR INTERNAL SURFACE FORMATION WITH CUTTING TOOLS

Sergeev Yu.S.¹, Gogolev V.P.¹, Platov S.I.², Sergeev S.V.¹, Tolmachev E.V.¹

¹ South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The current level of digitalization in geological exploration, well development and operation at explored deposits, as well as in the manufacturing of high-tech machinery parts in metalworking, requires the creation of advanced technological production planning based on the use of digital twins and artificial intelligence. The practical implementation of this concept requires a deep understanding of the dynamics of physically similar processes such as drilling wells and machining holes. The knowledge obtained has made it possible to develop mathematical (simulation) models that adequately reflect real processes and can be effectively applied in the design and implementation of such technological processes. This approach makes it possible to eliminate processing inaccuracies, design errors, and decrease pre-production costs. Mathematical modeling improves the production culture and enables prediction of processing accuracy at the process design stage. **Objectives.** The study is aimed at developing and practically implementing the digital twin concept for precision hole (well) formation using rotating end multi-edge tools. **Methods Applied.** The models presented in the article are obtained using simulation modeling based on analytical methods grounded in fundamental physical laws, the basic principles of cutting and vibration mechanics, as well as the theory of plastic deformation of the material in the chip separation zone. The scientific novelty of the research lies in the development of a digital twin for surface formation, which for the first time considers the interrelation of chip separation and its effect on processing accuracy, taking into account cutting modes and tool vibration displacements. **Result.** The article presents a part of the methodological and mathematical software developed for the first time for the digital twin of hole (well) formation using rotating end multi-edge tools. The application of the digital twin in industrial practice has significant practical importance, as it enables accuracy verification of control programs for CNC machines and drilling equipment.

Keywords: holes and wells formation, rotating end multi-edge tools, chip separation, simulation modeling, accuracy verification of control programs, digital twin

For citation

Sergeev Yu.S., Gogolev V.P., Platov S.I., Sergeev S.V., Tolmachev E.V. Development of an Adaptive Intelligent Design Methodology Using Digital Twins of Subtractive Processes for Internal Surface Formation with Cutting Tools. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 60-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-60-68>

Введение

Для выполнения требуемых точностных показателей поверхностей, например отверстий в машиностроительных изделиях [1-4] и скважин в геологоразведке и нефтегазодобыче [4-9], требуется технологическая подготовка производства высокого уровня, которая позволяет исключить погрешности обработки, ошибки проектирования переходов и операций, а также ошибки в управляющих программах (УП), потенциально приводящие, например, к аварийным столкновениям инструмента с исполнительными органами станка [10, 11]. Для предотвращения таких негативных последствий на всех стадиях технологического проектирования производства изделия требуется предварительная проверка, которая заключается в минимизации физических (не цифровых) испытаний [10, 11], например, таких как отладка УП формообразования отверстий в первой детали (скважине) и их последующее полное исключение с заменой на

цифровые (виртуальные) испытания. При этом цифровое (виртуальное) моделирование процесса сверления (бурения) определяет как количественные, так и качественные показатели изделия, например полученной внутренней поверхности (ВП) [11-14]. Поэтому развитие цифровых технологий существенно повышает роль цифровых двойников компьютерного моделирования на всех этапах проектирования технологий изготовления изделий промышленности, позволяя повысить эффективность, минимизировать состав и количество натуральных испытаний, заменив их цифровыми, что позволит сократить затраты на создание и эксплуатацию изделия, в частности внутренней поверхности [3, 10, 11-14].

Цифровая модель по сути является имитационной, то есть воспроизводящей описание последовательных физических состояний технологической системы в динамике, обладающей высокими анимационными возможностями, позволяющими визуализи-

ровать поведение и функционирование реальной системы и моделируемых сценариев. Такая модель должна иметь информационную природу, обеспечивающую развитый обмен входной и выходной информации и знаниями между физической системой и ее модельным аналогом. Для этого цифровая модель должна быть открытой и саморазвивающейся системой, легко адаптируемой на основе дополнительных физических данных и поддерживать развитую аналитику реального времени [11].

Современное проектирование и строительство геологоразведочных и газонефтедобывающих скважин, подобно как и современное машиностроительное производство, сегодня находятся в весьма жестких конкурентных экономических условиях. Например, предприятия, выпускающие высокотехнологичную технику авиационного и ракетно-космического назначения, вынуждены непрерывно совершенствовать свою продукцию, при освоении которой постоянно повышаются требования к точности изготовления ее деталей. Достижение требуемых точностных параметров деталей обеспечивается при формообразовании их поверхностей. Формообразование любой поверхности детали – это достаточно трудная задача, тем более, что сам по себе процесс формообразования ВП вращающимися концевыми многолезвийными инструментами (ВКМИ) типа сверл, зенкеров, разверток, фрез, буров и т.п. сложный. Сложность процесса объясняется воздействием, во-первых, статических факторов (геометрия режущей части инструмента, погрешности ее заточки, износ, режимы обработки и т.п.) на силы резания, а через площади срезаемых слоев и на погрешности формообразования поверхностей, причем оно хорошо изучено и на практике легко устраняется [15]. Во-вторых, на образование погрешностей обработанных поверхностей существенно влияют еще и динамические факторы, которые не всегда принимают во внимание.

В частности, нами установлено, что процесс работы любого ВКМИ не имеет собственной радиальной устойчивости, то есть его режущая часть, образуя неголономную связь с поверхностью резания, совершает радиальные колебания [10]. Колебания ВКМИ, возникающие в процессе формообразования поверхности отверстия в детали (скважины), полностью исключить невозможно, но можно управлять их параметрами, а значит, и оперативно влиять на перераспределение сечений срезаемых слоев и, соответственно, на размеры и форму образуемой поверхности. То есть нужно срезаемые слои, путем изменения параметров колебаний инструмента, перераспределить на каждом зубе таким образом, чтобы вся совокупность срезаемых слоев могла обеспечить требуемые размер и форму образуемой поверхности. При этом необходимо срезаемые слои связать системой координат с соответствующими режущими лезвиями, имеющими жесткую координатную связь с осью инструмента и совершающими вместе с инструментом сложное движение (вращательное движение вокруг оси инструмента и квазикруговое колебательное от-

носительно собственной оси вращения). Тогда такие срезаемые слои можно назвать координированными, а всю их совокупность – массивом удаляемого материала, размеры и форма поверхности которого будут отображением формируемой поверхности детали. То есть если, просчитав параметры срезаемых слоев каждым зубом ВКМИ сложить их геометрически и вычесть этот суммарный объем из массива заготовки, то, не прибегая к расчету сил резания, можно легко получить размеры и форму формообразуемой поверхности.

Полученные результаты и их обсуждение

Итак, ранее нами были описаны механизмы [16] перераспределения сечений срезаемых слоев из-за радиальных (поперечных) и осевых автоколебаний вращающегося концевого многолезвийного инструмента. Осевые и крутильно-осевые автоколебания ВКМИ сами по себе не нарушают симметрии его режущей части, но в сочетании с поперечными автоколебаниями приводят к нарушениям точности обработки, так как в процессе формообразования отверстия происходит перераспределение срезаемых слоев, при этом за каждое полное колебание центра инструмента зуб с фактической нулевой скоростью в данный момент времени смещается на дискретный угол.

Физически процесс формообразования происходит таким образом, что одно из лезвий не режет, а сминая материал, например металл своей задней поверхностью, то есть фактическая скорость на этом лезвии равна нулю. Рост силы смятия будет продолжаться до тех пор, пока она не уравнивает суммарную положительно направленную тангенциальную силу резания на остальных зубьях. При этом образуется неголономная связь инструмента с поверхностью резания, а инструмент совершает как бы «планетарное качение» своими зубьями по поверхности резания, оставляя «риски».

Рассмотрим движение ВКМИ с точки зрения сферического движения твердого тела [17]. Скорости точек твердого тела в каждый момент времени определяются как их вращательные скорости при одновременном вращении вокруг мгновенной оси Ω (рис. 1, а). Зная положение мгновенной оси вращения Ω и угловую скорость тела ω , можно определить скорость V любой точки M тела как скорость этой точки во вращательном движении вокруг мгновенной оси Ω . Если мгновенное положение оси Ω уже установлено, то для нахождения угловой скорости ω достаточно знать скорость перемещения оси какой-либо точки A , не лежащей на мгновенной оси Ω (рис. 1, б).

Вектор $\vec{\omega}$ откладывается от неподвижной точки O по мгновенной оси Ω . Его направление определяется направлением скорости \vec{V}_A . Сложное сферическое движение твердого тела получается при сложении двух вращательных движений вокруг пересекающихся осей: переносное с угловой скоростью ω_e и относительное с угловой скоростью ω_r .

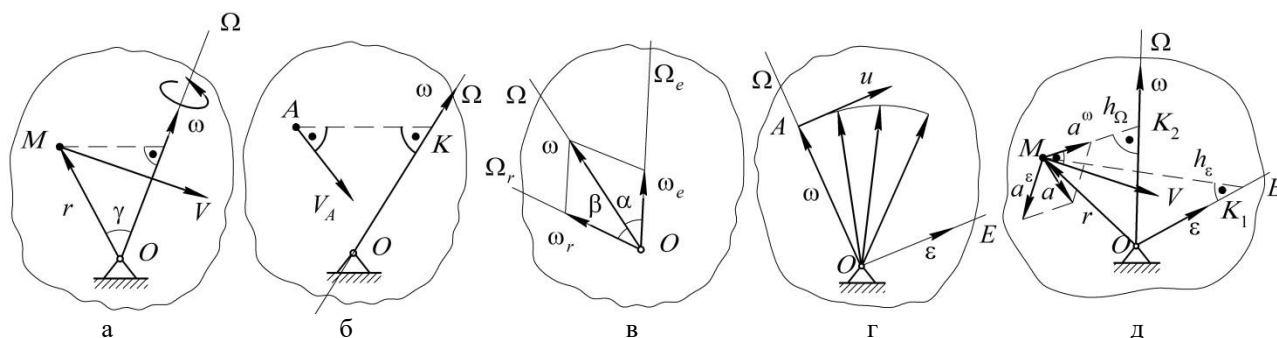


Рис. 1. Схемы скоростей твердого тела при сферическом движении: а – векторная диаграмма скорости V точки M ; б – схема для нахождения угловой скорости ω ; в – схема абсолютного вращения тела со скоростью $\bar{\omega}$; г – годограф вектора угловой скорости \bar{u} точки A ; д – схема для нахождения ускорений точки M

Fig. 1. Diagrams of the velocities of a solid body in spherical motion: а is vector diagram of the velocity V of point M ; б is diagram for identifying the angular velocity ω ; в is diagram of the absolute rotation of a body with a velocity $\bar{\omega}$; г is a hodograph of the angular velocity vector \bar{u} of point A ; д is a scheme for identifying accelerations of point M

Скорость абсолютного вращения тела $\bar{\omega}$ вокруг мгновенной оси определим как геометрическую сумму угловых скоростей составляющих вращений (рис. 1, в). Если величина и направление угловой скорости $\bar{\omega}$ известны для любого момента времени, то угловое ускорение $\bar{\epsilon}$ найдем, построив годограф вектора угловой скорости \bar{u} , определим скорость \bar{u} движения точки A – конца вектора угловой скорости $\bar{\omega}$ – по годографу в момент времени t (рис. 1, г). Радиусом-вектором точки A является вектор $\bar{\omega}$, а скорость точки равна производной от радиуса-вектора по времени t . Поскольку при сферическом движении твердого тела [17] векторы углового ускорения $\bar{\epsilon}$ и угловой скорости \bar{u} хоть и равны по величине, но направлены они по разным прямым (см. рис. 1, г), то в соответствии с теоремой Ривальса ускорение любой точки тела равно геометрической сумме вращательного и центростремительного ускорений (рис. 1, д).

Модуль ускорения точки M находится как диагональ параллелограмма ускорений. Вследствие того, что векторы угловой скорости $\bar{\omega}$ и углового ускорения $\bar{\epsilon}$ направлены по разным осям, вращательная составляющая ускорения a^e может быть направлена по отношению к вектору скорости \bar{V} под любым углом, оставаясь перпендикулярной вектору \bar{r} . В этом существенное различие между вращением твердого тела вокруг неподвижной оси и движения тела, имеющего одну неподвижную точку. Применим законы сферического движения тела к ВКМИ и обозначим: Z – ось неподвижного конуса и переносного движения; Z_1 – ось относительно перемещения подвижного конуса; O – центр тяжести сверла; O_1 – точка пересечения Z_1 и проекций режущих кромок на плоскости ZOX ; Y_0 – угол увода оси сверла; Y – угол между образующей и осью Z_1 подвижного конуса; l – длина вылета сверла (отрезок BO_1); z – расстояние от оси сверла до центра тяжести сверла (отрезок OO_1);

$D_{ин}$ – диаметр сверла; φ – половина угла в плане сверла; $\omega_{вр}$ – угловая скорость вращения сверла вокруг своей оси Z_1 ; ω – угловая скорость вращения сверла; h_A – расстояние от точки A до мгновенной оси вращения Ω ; точка B – неподвижная точка, вокруг которой происходит движение сверла; точка K_1 – неподвижная точка режущей кромки сверла, лежащая на мгновенной оси Ω и точка пересечения режущей кромки сверла и образующей подвижного конуса; A – точка режущей кромки сверла, не лежащая на мгновенной оси Ω ; ω_k – частота колебаний ВКМИ; ρ – радиус колебаний ВКМИ; F – сила инерции сверла от высокочастотных колебаний; $P_{ос}$, $P_{рад}$ – осевая и радиальная составляющие сил резания; $P_{уп}$ – сила упругости сверла (рис. 2, а). Мгновенная ось конуса Ω совпадает с образующей конуса BK_1 , поскольку скорости точек этой образующей равны нулю.

Скорость вращения точки A равна

$$\frac{\omega_r \cdot D_{ин}}{2} = \frac{\omega \cdot D_{ин}}{2}. \quad (1)$$

Выразив модули абсолютной, относительной и переносной скоростей вращения через (1), получим скорость точки O_1 :

$$\begin{aligned} V_{O_1} &= \omega_e \cdot \rho = \omega \cdot K_1 O_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - Y - \varphi\right) = \\ &= \frac{\omega \cdot D_{ин} (Y + \varphi)}{2 \cdot \sin \varphi} = \frac{\omega_{вр} D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi)}{4 \cdot \sin \varphi \cdot \cos Y}, \end{aligned} \quad (2)$$

и радиус-вектор ρ ее перемещения

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\omega \cdot D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi)}{\omega_e \cdot 2 \cdot \sin \varphi} = \frac{\omega \cdot D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi) \cdot \sin Y_0}{\omega \cdot 2 \cdot \sin Y \cdot \sin \varphi} = \\ &= \frac{D_{ин} \cdot \sin(Y + \varphi) \cdot \sin Y_0}{2 \cdot \sin Y \cdot \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (3)$$

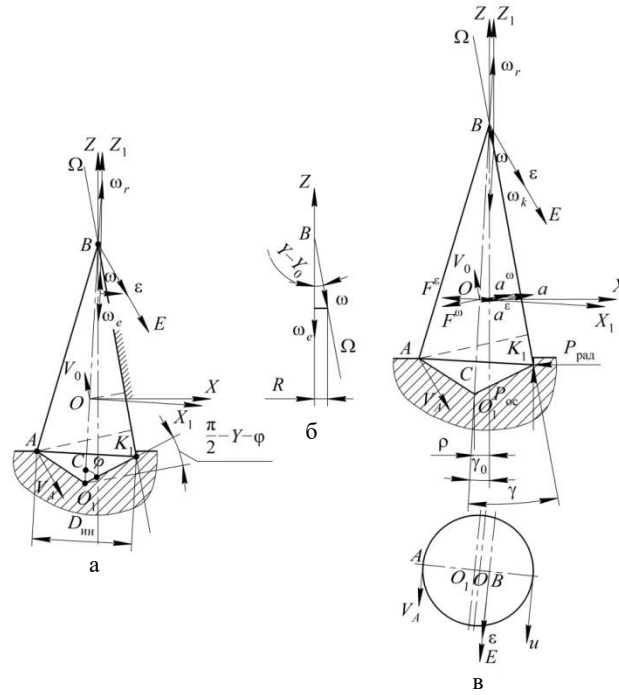


Рис. 2. Сферическое движение ВКМИ: а – схема для нахождения скоростей и ускорений ВКМИ; б – годограф вектора угловой скорости \vec{u} ; в – схема сил, действующих на ВКМИ
 Fig. 2. Spherical motion of the REMT: a is a scheme for identifying the velocities and accelerations of the REMT; б is a hodograph of the angular velocity vector \vec{u} ; в is diagram of the forces acting on the REMT

Для определения углового ускорения $\vec{\epsilon}$ необходимо построить годограф угловой скорости \vec{u} (рис. 2, б). При качении конуса по основанию BK_1 вектор $\vec{\omega}$ поворачивается вокруг оси Z . Так как модуль его не изменяется, то конец вектора $\vec{\omega}$ описывает окружность радиусом $R = \omega \cdot \sin(Y - Y_0)$ вокруг оси Z в горизонтальной плоскости (рис. 2, в). Вектор $\vec{\epsilon}$ геометрически равен скорости \vec{u} конца вектора $\vec{\omega}$. В данном случае скорость \vec{u} является вращательной вокруг оси Z . Находим ее как вращательную скорость точки – конца вектора угловой скорости $\vec{\omega}$ – при вращении вектора вокруг оси Z .

Определим модуль скорости и вектор углового ускорения $\vec{\epsilon}$:

$$\begin{aligned} \epsilon = u = \omega_e \cdot R = \omega_e \cdot \omega \cdot \sin(Y - Y_0) = \\ = \omega^2 \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_0)}{\sin Y_0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Найдем ускорение a_0 точки O (центра тяжести сверла):

$$a_0 = \omega^4 \cdot Q^2 \cdot \left[\frac{1 + \left[\frac{\sin(Y - Y_0)}{\sin Y_0} \right]^2}{\sin Y_0} - 2 \cdot \frac{\cos(Y + Y_0) \cdot \sin(Y - Y_0)}{\sin Y_0} \right] \quad (5)$$

Зная одну из трех угловых скоростей $\omega_r = \omega_{вр}$ и положение всех трех осей вращения, построим параллелограмм угловых скоростей и определим две другие угловые скорости. Как мы видим, переносная скорость ω_e , как и мгновенная скорость, направлены в обратную сторону вращению ВКМИ, при этом $\omega_k = \omega_e$. Аналогичным способом можно найти ускорение точки O_1 . Теперь рассмотрим силы, действующие на ВКМИ (рис. 2, в). На сверло действуют осевая $P_{ос}$ и радиальная $P_{рад}$ составляющие сил резания, сила упругости сверла $P_{уп}$ и F – сила инерции виброперемещений сверла, равная векторной сумме составляющих ее проекций F^{ω} , F^{ϵ} на соответствующие оси. Рассмотрим силы, действующие на сверло по оси Z_1 , направленной вдоль оси сверла:

$$(P_{уп} - P_{рад}) \sin Y_0 + P_{ос} \cos Y_0 = F^{\omega} \cdot \cos Y. \quad (6)$$

Исходя из того, что

$$\omega_k = \omega_e = \omega_{вр} \cdot \frac{\operatorname{tg} Y}{2 \cdot \sin Y_0}, \quad (7)$$

и выполнив соответствующие тригонометрические преобразования, из (3) и (7) найдем угол Y_0 :

$$Y_o = \arccos \left[\frac{P_{oc}}{\sqrt{(P_{yn} - P_{рад})^2 + P_{oc}^2}} \right] \pm \quad (8)$$

$$\pm \arccos \left[\frac{F^\omega \cdot \cos Y}{\sqrt{(P_{yn} - P_{рад})^2 + P_{oc}^2}} \right],$$

$$\operatorname{tg} Y = \frac{D_{ин}}{2 \cdot l - D_{ин} \cdot \operatorname{ctg} \varphi}. \quad (9)$$

В соответствии с теоремой Ишлинского [17], найдем телесный угол Ω_1 подвижного конуса инструмента:

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos Y) = 2\pi \left(1 - \frac{2 \cdot l - D_{ин} \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{\sqrt{(2 \cdot l - D_{ин} \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2 + D_{ин}^2}} \right). \quad (10)$$

Ω_1 – угол, на который повернется образующая, описывающая наружную коническую поверхность сверла за один его оборот относительно своего предыдущего положения. То есть образующая сверла за каждый его оборот будет поворачиваться на угол $2\pi + \Omega_1$. Поскольку ось Z_1 вращается вокруг оси Z с угловой скоростью $\omega_k = \omega_e$, не равной нулю, то угол, на который повернется Z_1 ВКМИ (сверла) обозначим φ_2 , а приравняв $\varphi_2 = 2\pi$ вычислим период вращения центра масс сверла T_2 :

$$T_2 = \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{b \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}} = \quad (11)$$

$$= \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{\frac{\omega_{вп} \cdot \operatorname{tg} Y}{\sin Y_o} \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}},$$

а величина угла φ_2 , на который повернется ось сверла после одного оборота, будет равна

$$\varphi_2 = \Omega_2 + \omega_e T_2 + \varepsilon \cdot \frac{T_2^2}{2} =$$

$$= 2\pi(1 - \cos Y_o) + \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{2 \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}} + \quad (12)$$

$$+ \frac{\omega_{вп}}{4 \cdot \cos Y_o} \cdot \left[\frac{\sqrt{1 + \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o) \cdot \cos Y}{\sin Y_o}} - 1}{\frac{\omega_{вп} \cdot \operatorname{tg} Y}{\sin Y_o} \cdot \frac{\sin Y \cdot \sin(Y - Y_o)}{\sin Y_o}} \right]^2,$$

где Ω_2 – телесный угол конуса, образованного перемещением (вращением) оси Z_1 относительно оси Z , который определяется аналогично Ω_1 .

Полученная математическая модель доказывает существование дискретного угла, на который за каждое полное поперечное колебание центра инструмента смещается лезвие ВКМИ с фактической нулевой скоростью в текущий момент времени. Эта модель позволяет определять положение инструмента в любой момент времени, скорость и ускорение любой точки инструмента в текущий момент времени, угол отклонения оси сверла от поворотной оси симметрии, дискретный угол поворота (смещения) каждого зуба (лезвия) ВКМИ. Кроме того, она используется в программах как исходная для расчета площадей срезаемых слоев на зубьях ВКМИ при их перераспределении из-за поперечных колебаний инструмента.

Программы [12] предназначены для высокоточного моделирования, верификации и визуализации в режиме реального времени динамических процессов формообразования отверстий на языке *ISO 7-bit*. Любая из этих программ встраивается в какой-либо программный пакет, например *VeriCut*, *Sprut NCTuner*, *Siemens NX* и т.п. Перед обработкой управляющей программы на реальном программном станке производят ее оптимизацию по точности размера и продольной формы отверстий посредством того же точностного субтрактивного симулятора. Оптимизацию производят, изменяя соотношения частот радиальных и осевых колебаний посредством управления режимами резания. Тем самым перераспределяют объемы срезаемых слоев на зубьях инструмента и, соответственно, оперативно влияют на геометрические параметры формируемой поверхности детали, то есть на точность размера и продольной формы отверстия (рис. 3, а). После ввода исходных данных симулятор производит расчет геометрии отверстия с визуализацией и в таблицу выдает отчет. Для корректировки режимов резания частоту ω изменяют до тех пор, пока величина диаметальной разбивки не будет удовлетворять требованиям чертежа (это можно пошагово сделать вручную и автоматически). Помимо этого, симулятор позволяет показывать «мгновенную» разбивку в любом поперечном сечении отверстия и даже рассчитывать «мгновенный» объем срезанного материала каждым зубом в любой момент времени, что позволяет визуально наблюдать за обработкой в режиме реального времени. Работа симулятора позволяет визуализировать влияние совместного действия осевых и радиальных колебаний инструмента на точность продольной формы отверстий. В окно ввода исходных данных этого симулятора добавлены окна для задания амплитуды осевых колебаний инструмента.

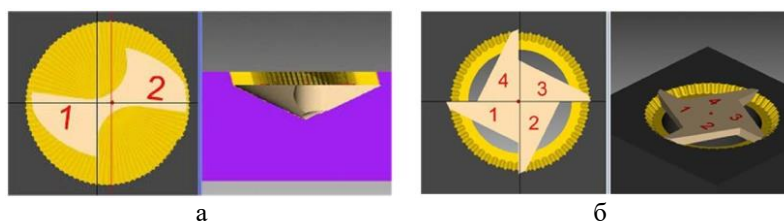


Рис. 3. Скриншоты работы симулятора: а – визуализация влияния амплитуды осевых колебаний на величину увода отверстия; б – полученные данные замера величины увода оси отверстия
 Fig. 3. Screenshots of the simulator: a is visualization of the effect of the axial vibrations amplitude on the amount of hole deflection; б is the obtained data for measuring the amount of hole axis deflection

При наличии осевых колебаний инструмента ось отверстия во время обработки начинает отклоняться в сторону. Причем чем больше амплитуда колебаний ВКМИ, тем больше будет величина увода оси отверстия (см. рис. 3, а). Численные значения геометрии профиля продольного сечения отверстия можно зафиксировать, используя в программе инструменты замера (рис. 3, б). Корректируя режимы резания, амплитуду осевых колебаний инструмента изменяют до тех пор, пока величина искажения продольного сечения отверстия не попадет в регламентированный допуск (это можно пошагово сделать вручную и автоматически). В симуляторе также есть функция расчета объема срезанного материала за любой промежуток времени с учетом осевых колебаний инструмента.

Заключение

1. Разработана цифровая модель перемещений ВКМИ при формообразовании круглых отверстий (скважин), позволившая установить физическую сущность процесса формообразования и основные закономерности функционирования вращающихся концевых многолезвийных инструментов, заключающиеся в том, что режущая часть таких инструментов независимо от конструкции, не имея собственной радиальной устойчивости и образуя неголономную связь с поверхностью резания совершают колебания. Из-за колебаний многозубого инструмента на процесс накладывается взаимодействие зубьев через перераспределение сечений срезаемых слоев на зубьях. Эти изменения вызывают колебания сил резания на каждом зубе и неоднозначность коллективного поведения всех зубьев. В свою очередь, изменения размеров срезаемых слоев по зубьям, а значит, и элементов стружки с частотой колебаний приводит к изменению формы дрейфовой траектории движения режущей части ВКМИ. А форма траектории определяет размеры и форму образуемой поверхности.

2. Разработаны теоретические основы метода оперативного управления размерами и формой обрабатываемых поверхностей деталей и стружки. Метод основан на перераспределении площадей срезаемых слоев на зубьях ВКМИ путем управления параметрами колебаний.

3. Разработана методология проектирования процессов обработки поверхностей различными ВКМИ,

отличающаяся тем, что она основана на управлении размерами срезаемых слоев в зоне резания посредством механизма колебаний режущей части инструмента. А это, в свою очередь, позволяет адекватно реальным процессам в системе 2D- и 3D-моделирования с учетом динамических факторов делать проектный расчет выходных параметров переходов (операций) непосредственно при составлении программы для программных станков и ее верификации, например, в программе *Vericut*.

Разработанная методология проектирования процессов обработки внутренних поверхностей различными ВКМИ, реализованная в виде субтрактивных симуляторов, применима в металлообработке, горном деле и полезна для специалистов технологической подготовки производства при разработке и верификации УП к станкам с ЧПУ, а также у разработчиков АСТПП (автоматизированной системы технологической подготовки производства) и эффективно используется на производстве некоторых оборонных предприятий Челябинской области.

Список источников

1. Лычкина Н.Н., Павлов В.В. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов Казань, 2023. С. 139-149.
2. Киселев Е.С., Илюшкин М.В. Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников // Научно-технические достижения в машиностроении. 2023. Т. 2023. № 8. С. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-3-11
3. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106
4. Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И. Ключевые аспекты создания цифрового двойника процесса системы менеджмента качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 105-116. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116

References

5. Кармысsoва А. К. Использование цифровых двойников в геологоразведке и добыче нефти: потенциал, практика и вызовы внедрения // Символ науки. 2025. №8-1. С. 6-10
6. Accelerating well construction using a digital twin demonstrated on unconventional well data in North America / Saini G., Ashok P., van Oort E., Isbell M.R. // SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 23-25 July 2018: Proceedings. Houston, Texas, USA, 2018. Paper URTEC-2902186-MS. 13 p. DOI: 10.15530/URTEC-2018-2902186.
7. Derek N., Maryam Gholami M., Rolv R. Drilling with Digital Twins. Conference: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, August 2018. ResearchGate Paper. DOI:10.2118/191388-MS.
8. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation // International Journal Of Scientific & Technology Research. 2020, vol. 9, iss. 10, pp. 171-174.
9. Сучок С.Н., Корнев Р.В., Кушманов П.В. Цифровой двойник бурения как операционная среда повышения эффективности процесса строительства скважин // Сетевоe издание «Бурение и нефть» [Электронный ресурс]. 2021. URL: <http://www.burneft.ru> (дата обращения: 08.11.2025).
10. Сергеев С.В. Повышение эффективности вибрационных процессов при обработке различных материалов: монография. Челябинск, 2004. 262 с.
11. Сергеев С.В., Шелегов А.А., Сергеев Ю.С. Особенности верификации управляющих программ по точности формообразования поверхностей // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск, 2015. С. 1772- 1776.
12. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2015662879 РФ. Симулятор для точностной верификации управляющих программ обработки отверстий перераспределением координированных срезаемых слоев на зубьях многолезвийных инструментов / С.В. Сергеев, Ю.С. Сергеев, В.П. Гоголев, А.А. Шелегов. Заявка № 2015619790. Приоритет изобретения 15.10.2015. Зарегистрирован 04.12.2015. Патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).
13. Сергеев С.В., Сергеев Ю.С., Решетников Б.А. Динамический способ управления трассой скважины при направленном бурении // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2013. №5. С. 89-103. URL: http://ogbus.ru/authors/SergeevSV/SergeevSV_3.pdf
14. Сергеев С.В., Сергеев Ю.С. Влияние синхронизации автоколебаний бурового инструмента на формирование трассы скважины // Нефтегазовое дело. 2014. №12-4. С. 12-17.
15. Козлов А.В. Повышение эффективности процессов многопереходной обработки отверстий концевыми мерными инструментами и их технологической подготовки на основе математического моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Челябинск, 1993. 20 с.
16. А.с. СССР №1710213. Способ обработки отверстий мерным многолезвийным инструментом / Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Сергеев С.В. 07.02.1992. Патентообладатель ЧПИ им. Ленинского комсомола.
17. Фомичев А.В. Кинематика точки и твердого тела: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2021. 128 с.
1. Lychkina N.N., Pavlov V.V. The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin. *Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2023). Sbornik trudov odinnadtsatoy vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti* [Simulation modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023). Proceedings of the eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference on simulation modeling and its application in science and industry]. 2023;139-149. (In Russ.)
2. Kiselev E.S., Ilyushkin M.V. Computer modeling of the drilling process of complex packages of titanium alloy and composite material using digital twins. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroyenii* [High-tech technologies in mechanical engineering]. 2023;2023(8):3-11. (In Russ.) DOI: 10.30987/2223-4608-2023-3-11
3. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. Digital twin shaping of the treated surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile during circular mortise grinding. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(4):98-106. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106
4. Zaporozhtsev A.V., Khazova V.I., Khazova V.I. Key aspects of creating a digital twin of the quality management system process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(4):105-116. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116
5. Karmyssova A. K. The use of digital twins in geological exploration and oil production: potential, practice and challenges of implementation. *Simvol nauki* [A symbol of science]. 2025;(8-1). (In Russ.)
6. Saini G., Ashok P., van Oort E., Isbell M.R. Accelerating well construction using a digital twin demonstrated on unconventional well data in North America. SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 23-25 July 2018: Proceedings. Houston, Texas, USA, 2018, 13 p. DOI: 10.15530/URTEC-2018-2902186.
7. Derek N., Maryam Gholami M., Rolv R. Drilling with Digital Twins. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, August 2018. ResearchGate Paper. DOI:10.2118/191388-MS.
8. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2020;9(10):171-174.
9. Suchok S.N., Korenev R.V., Kushmanov P.V. Digital twin drilling as an operational environment for improving the efficiency of the well construction process. *Setevoe izdanie «Burenie i nefть» - 2021* [Online publication “Drilling and Oil” - 2021]. Available at: <http://www.burneft.ru> (Accessed on August 11, 2025). (In Russ.)
10. Sergeev S.V. *Povyshenie effektivnosti vibratsionnykh protsessov pri obrabotke razlichnykh materialov: Monografiya* [Improving the efficiency of vibration processes in the processing of various materials. Monograph]. Chelyabinsk, 2004, 262 p. (In Russ.)

11. Sergeev S.V., Shelegov A.A., Sergeev Yu.S. Features of verification of control programs for the accuracy of surface shaping. *Nauka YuUrgu: materialy 67-oy nauchnoy konferentsii. Sektsii tekhnicheskikh nauk* [SUSU Science: proceedings of the 67th Scientific Conference. Sections of technical sciences]. Chelyabinsk, 2015. Pp. 1772-1776. (In Russ.)
12. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S., Gogolev V.P., Shelegov A.A. *Simulyator dlya tochnostnoy verifikatsii upravlyayushchih programm obrabotki otverstiy pereraspredeleniem koordinirovannykh srezayemykh sloev na zubyakh mnogolezviynykh instrumentov* [Simulator for precision verification of control programs for processing holes by redistributing coordinated cut layers on the teeth of multi-blade tools]. State registration of the computer program No. 2015662879 of the Russian Federation, 2015.
13. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S., Reshetnikov B.A. *A dynamic method for controlling the well route during directional drilling. Neftgazovoe delo: electron. nauch. zhurn.* [Oil and gas business: electronic scientific journal]. 2013;(5):89-103. Available at: http://ogbus.ru/authors/SergeevSV/SergeevSV_3.pdf (In Russ.)
14. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S. The influence of synchronization of self-oscillations of drilling tools on the formation of the well route. *Neftgazovoe delo* [Oil and gas business]. 2014;(12-4):12-17. (In Russ.)
15. Kozlov A.V. *Povyshenie effektivnosti protsessov mnogoperekhodnoy obrabotki otverstiy kontsevymi mernymi instrumentami i ikh tekhnologicheskoy podgotovki na osnove matematicheskogo modelirovaniya: avtoref. dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the efficiency of the processes of multi-junction hole processing with end measuring tools and their technological preparation based on mathematical modeling. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. 1993, 20 p.
16. Lakirev S.G., Khilkevich Ya.M., Sergeev S.V. *Sposob obrabotki otverstiy mernym mnogolezviynym instrumentom* [A method of processing holes with a dimensional multi-blade tool]. A.S. USSR, no. 1710213, 1992.
17. Fomichev A.V. *Kinematika tochki i tverdogo tela: ucheb. posobie* [Kinematics of a point and a solid body: textbook]. Moscow: MFTI, 2021, 128 p. (In Russ.)

Поступила 26.11.2025; принята к публикации 12.02.2026; опубликована 31.03.2026
Submitted 26/11/2025; revised 12/02/2026; published 31/03/2026

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Гоголев Вадим Петросович – соискатель степени кандидата технических наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: govadimgo@gmail.com. ORCID 0009-0002-2085-302X

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, заведующий кафедрой, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Сергеев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Толмачев Евгений Владимирович – ассистент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: tolmachev@susu.ru. ORCID 0009-0004-4960-6828

Yuriy S. Sergeev – PhD (Eng.), Head of Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Vadim P. Gogolev – degree-seeking applicant, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: govadimgo@gmail.com. ORCID 0009-0002-2085-302X

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Head of Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Sergey V. Sergeev – PhD (Eng.), Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Evgeniy V. Tolmachev – assistant, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: tolmachev@susu.ru. ORCID 0009-0004-4960-6828