

УДК 621.91

Г.А. Борисенко канд. техн. наук, Г.Н. Иванов канд. техн. наук, Ю.Н. Тимошенко преп., МГТУ «СТАНКИН».

## **19. Проектирование технологических процессов изготовления деталей с заданными качественными показателями в горном машиностроении.**

Процесс эксплуатации горных машин требует обеспечения контролируемого сочетания эксплуатационных свойств узлов и деталей машин. Формирование и управление инженерии поверхности деталей горных машин проходит многоэтапный процесс: - проектирование, изготовление, контроль, испытание, диагностику, эксплуатацию, ремонт, восстановление и утилизацию. Использование новых математических, алгоритмических и программных средств, разработанных в процессе проведения исследований в области обеспечения требуемого жизненного цикла объектов машиностроения, позволяет с определенной степенью инвариантности к характеристикам объектов производства, а также производственных систем разрабатывать и реализовывать процессы управления ими. Последние необходимы для эффективного решения задач изготовления и реновации широкого класса высокоточной продукции, в частности, с помощью технологий абразивной обработки.

Своевременное и эффективное решение основных задач горного машиностроения в значительной степени возможно за счет обеспечения уже на этапе проектирования заданных динамических, точностных, качественных, экономических и экологических показателей оборудования, реализуемых на нем технологических процессов (ТП) и производимых изделий. Сложность этой проблемы обуславливается высоким уровнем требований к перечисленным показателям, а также степенью ответственности за точность их обеспечения, что в большинстве случаев приводит к необходимости разработки и внедрения новых методов и средств решения подобных задач.

К объектам подобного класса относятся, в первую очередь, ответственные элементы оборудования и детали объектов горного машиностроения: гидроцилиндры, направляющие, подшипники, валы, клапана, лопасти и, соответственно, технологические процессы формирования их ответственных поверхностей при их изготовлении или реновации методами высокоточной многокоординатной механической обработки на станках с ЧПУ.

Технологические процессы, как разновидность нелинейных непрерывных динамических объектов (ДО) реализуются или функционируют для достижения определенной цели, как правило, за ограниченное время с требуемой точностью в

условиях различных пространственных, временных, физических, экономических, экологических ограничений.

В работе [1] представлен разработанный метод синтеза оптимальных законов управления в замкнутом виде. В работе [2] представлены критерии качества поверхностного слоя деталей машин. В работах [3,4] представлены результаты моделирования и реализации метода синтеза оптимальных законов управления в замкнутом виде. В развитие метода синтеза оптимальных законов управления в замкнутом виде была проведена работа по имитационному моделированию инженерии поверхностей деталей подвергаемых механической обработке на примере технологического процесса врезной кругло-шлифовальной обработки рабочего конуса выпускного клапана. Собственно технологический процесс круглого врезного шлифования представляет собой нелинейную динамическую систему, динамика которой в процессе обработки заготовки может быть описан с помощью дифференциального уравнения вида:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), x(t_0) = x_0; \quad (1),$$

где  $x(t)$  -  $n$  - мерный вектор её состояния,  $u(t)$  -  $m$  - мерный вектор управления,  $f$  - непрерывная по  $x$  и  $u$  вектор функция,  $t$  - время.

При проектировании ТП обработки необходимо получить алгоритм инженерии поверхностей деталей горных машин и управления технологическим процессом (1) круглого врезного шлифования вида  $u(t) = U(x(t))$ , обеспечивающий минимум функционалу качества вида:

$$I(x(t), u(t)) = \int_{t_0}^{\infty} \Phi(e(x(t)), u(t)) dt, \quad (2),$$

$$e(t) = x(t) - x_{зад}(t)$$

при ограничениях на фазовые координаты вида:

$$g_*(t) \leq g(x(t)) \leq g^*(t); \quad (3),$$

за время  $t \leq t_K - t_0$  и обеспечивающий заданные показатели устойчивости и качества переходных процессов в замкнутой системе СПИД. При этом для круглого врезного шлифования всегда  $\exists i: (1 \leq i \leq n) \wedge (x_i(t) = D(t)) \wedge (x_{зад_i} = D_{зад_i})$ , где  $D(t), D_{зад_i}(t)$  - текущий и заданный диаметры обрабатываемой заготовки типа тела вращения в определяемом конструкторами сечении.

Предполагается, что  $g$  - непрерывно - дифференцируемая по  $x(t)$  вектор-функция, неравенства (3) выполняются покомпонентно и, как правило, с точки зрения большинства практических задач круглого врезного шлифования необходимо, чтобы

$$\exists i, j: (1 \leq i \leq s) \wedge (1 \leq j \leq s) \wedge (g_i(x(t)) = R_a(t)) \wedge (g_i^* = R_{a_{3AD}}) \wedge (g_j(x(t)) = \theta(t)) \wedge (g_j^* = \theta_{MAX}),$$

то есть предполагается наличие математических моделей инженерии поверхностей деталей горных машин и ограничений на шероховатость шлифуемой поверхности, а также на температуру в зоне обработки.

Функция  $\Phi$  непрерывно - дифференцируема в пространстве  $R^{n+m}$ ,  $\forall t \in [t_0, t_K]$ . Величина  $t_K$  может принимать любое значение из полуинтервала  $[0, +\infty)$ . Структура функционала качества (2) определяется, как правило, конкретной постановкой задачи круглого наружного шлифования. Очевидно, что векторное неравенство (3) формализует в пространстве  $R^s$  замкнутую допустимую область.

Для обеспечения выдерживания фазовых ограничений в подынтегральную функцию критерия оптимальности вводится аддитивная составляющая вида:

$$\Phi_o = \|e_o(t)\|_{Q_1}^2, \quad (4),$$

где  $Q_1$  - положительный весовой коэффициент.

$$e_o(t) = z(g(x(t))) - g(x(t)), \quad (5),$$

а  $z(g(x(t)))$  - функция вида :

$$z_i(g_j(x(t))) = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ g_j(x(t)) & i = j \wedge g_*(t) \leq g_j(x(t)) \leq g^*(t) \\ g_{*j}(t) & i = j \wedge g_j(x(t)) < g_*(t) \\ g_j^*(t) & i = j \wedge g_j(x(t)) > g^*(t) \end{cases} \quad (6),$$

$$i = \overline{1, s}; \quad j = \overline{1, s}; \quad \text{то есть } z(g) = \text{sat}(g).$$

Функция  $\Phi_o$ , с одной стороны, является непрерывно дифференцируемой, а с другой стороны, ее минимум соответствует нахождению вектора состояния динамической системы в допустимой области.

Кроме того, в функционал качества аддитивно вводится величина  $\left\| \dot{x}(t) \right\|_{Q_2}^2$ , что позволяет в последующем уже на этапе синтеза алгоритмов управления технологическим процессом обеспечить заданные показатели устойчивости и качества переходных процессов в замкнутой системе СПИД.

Таким образом, осуществляется переход к решению вспомогательной задачи аналитического синтеза с открытым классом допустимых элементов и позволяющей на этапе синтеза закона управления учесть фазовые ограничения исходной задачи.

Для модели технологического процесса круглого врезного шлифования (8) требуется определить закон управления в замкнутом виде, то есть  $u(t) = U(x(t))$ , минимизирующий критерий качества вида:

$$I_{BC}(x(t), u(t)) = \int_{t_0}^{\infty} \left\{ \Phi(e(x(t)), u(t)) + \Phi_o(e_o(x(t)), u(t)) \right\} dt, \quad (7),$$

где функция  $\Phi$  определяется (4), вектор-функция  $e(t)$  имеет вид (5); вектор-функция  $z(g)$  строится в соответствии с (6), то есть  $z(g) = sat(g)$ , а функции  $g(x(t)), g_*(t), g^*(t)$  определяются фазовыми ограничениями (3) исходной задачи.

Далее формируется вспомогательная задача аналитического синтеза, в которой все имеющиеся в исходной формализованной постановке задачи нелинейные зависимости заменяются линейными нестационарными моделями и которая формулируется следующим образом.

Для технологического процесса круглого врезного шлифования вида:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + C(t), \quad (8),$$

где коэффициенты определяются в соответствии с выражениями:

$$A(t) = \frac{\partial f(x(t), u(t))}{\partial x(t)}, \quad (9),$$

$$B(t) = \frac{\partial f(x(t), u(t))}{\partial u(t)}, \quad (10),$$

$$C(t) = f(x(t), u(t)) - A(t)x(t) - B(t)u(t), \quad (11),$$

необходимо найти закон управления  $u(t) = u(x(t))$ , доставляющий минимум функционалу качества вида:

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_k}^{t_k} \left\{ \|e_1(t)\|_{Q_1(t)}^2 + \|e_2^M(t)\|_{Q_2(t)}^2 + \|\dot{x}(t)\|_{Q_3(t)}^2 + \|u(t)\|_{R(t)}^2 \right\} dt, \quad (12),$$

где вектор - функции моделей ошибок управления и выдерживания фазовых ограничений определяются соответственно из выражений:

$$e_1(t) = x(t) - x_{3AD}(t) = H(t)x(t) + h(t) \quad (13),$$

$$e_2^M(t) = z(g^M(x(t), t)) - g^M(x(t), t) \quad (14),$$

$$g^M(x(t), t) = G(t)x(t) + d(t)$$

$$H(t) = E_n, \quad h(t) = -x_{3AD} \quad (15),$$

$$G(t) = \frac{\partial}{\partial x} g^0(x(t), t), \quad d(t) = g^0(x(t), t) - G(t)x(t)$$

$$z(g) = Z(t)g(x(t),t) + z_1(t),$$

$$Z(t) = \frac{\partial}{\partial g} z(g(x(t),t)), \quad (16).$$

$$z_1(t) = z(g(x(t),t) - Z(t)g(x(t),t))$$

Полученные законы управления, легли в основу разработанной технологии имитационного моделирования автоматизированного проектирования и моделирования систем автоматического управления ТП при наличии фазовых ограничений АССЕ (Automatic Control with Constraints Engineering) и реализующего ее программного комплекса (ПК) имитационного моделирования и проектирования инженерии поверхностей деталей горных машин, моделирования и обучения ЕМТ (Engineering, Modelling, Teaching).

Технология АССЕ является иерархически структурированной, в связи с тем, что предполагает возможность решения аналитических задач различного уровня, в том числе:

- проектирования технологий автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки с учетом инженерии поверхностей деталей машин;
- проектирования технологических процессов абразивной обработки (ТП АО) в автоматизированном режиме;
- реализация спроектированных ТП АО.

Указанная технология на перечисленных уровнях формализована с использованием методологии SADT и программных средств Vpwin (Рис.1,3) и Erwin. (Рис. 2,4).

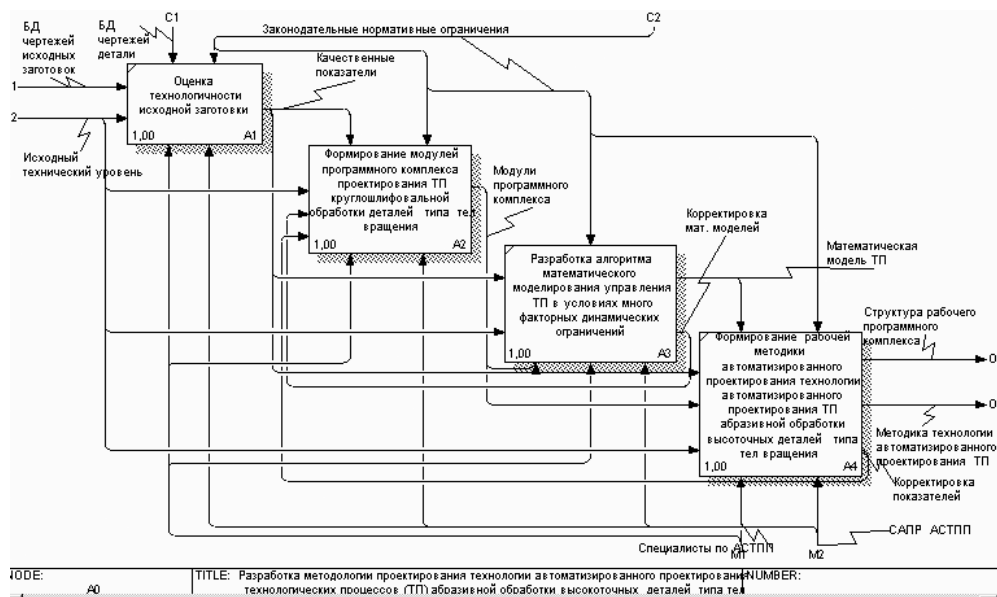


Рис. 1. Функциональная модель технологии проектирования технологий автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки.

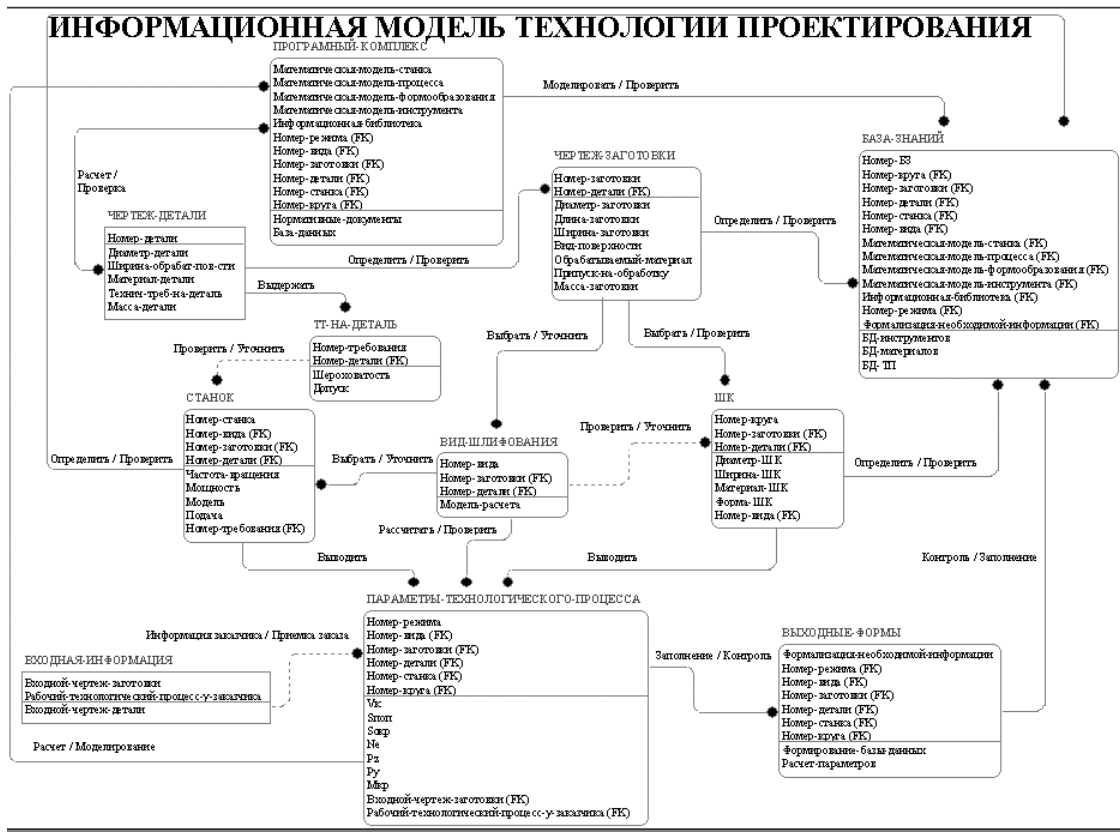


Рис. 2. Информационная модель технологии проектирования технологий автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки.

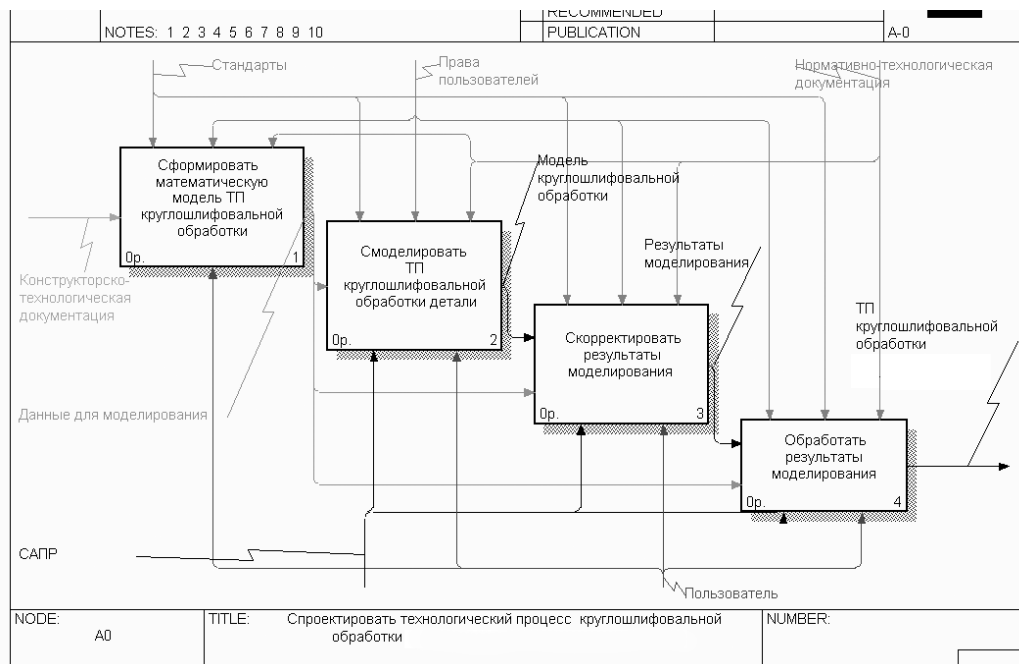


Рис. 3. Функциональная модель технологии автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки.

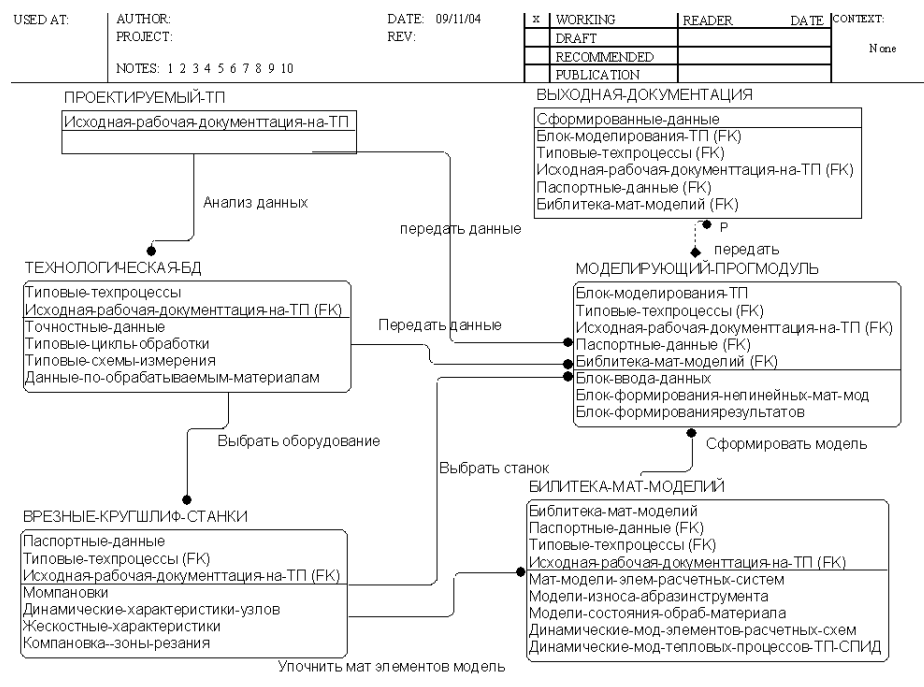


Рис. 4. Информационная модель технологии автоматизированного проектирования технологических процессов абразивной обработки.

В состав ПК для имитационного моделирования нелинейной динамики процессов инженерии поверхностей деталей горных машин подвергаемых механической обработке входят:

1. Иерархический комплекс SADT - диаграмм. Содержит функциональную и информационную модели собственно технологии ACCE, а также SADT модели проектирования технологических процессов и изготовления деталей и узлов.

2. Иерархический комплекс взаимосвязанных через гиперссылки MathCAD файлов, в которых находится с требуемой для конкретного уровня степенью детализации текстовая и необходимая для проектирования и моделирования расчетная информация об интересующей пользователя компоненте.

3. Совокупность баз данных. В стандартной конфигурации это базы данных по инструментам, материалам, станкам, переходным процессам, полученным при имитационном моделировании динамики элементов оборудования, инженерии поверхностей деталей горных машин и процессов обработки.

4. Интерфейсы: пользовательский, внутренние и связи с модулем разработки ЧПУ - программ.

Проектирование ТП предполагает наличие четырех основных этапов: формирования моделирующей программы в среде MathConnex путем заполнения специально разработанного объектно-ориентированного файла в формате \*.mxcr соответствующими рассматриваемой задаче блоками; отладки программы, моделирования

инженерии поверхностей деталей горных машин, ТП обработки и получения ЧПУ-программы. Топология указанного файла соответствует топологии SADT – диаграмм, формализующих технологию ACSE применительно к конкретной задаче.

Предложенные математические, алгоритмические и программные средства были использованы при решении ряда практических задач обеспечения инженерии поверхности деталей машин, в том числе при изготовлении выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания (Рис. 5).

На рис. 6 представлены результаты проектирования и моделирования инженерии поверхностей деталей машин в процессе ТП круглого врезного шлифования посадочного конуса выпускного клапана.

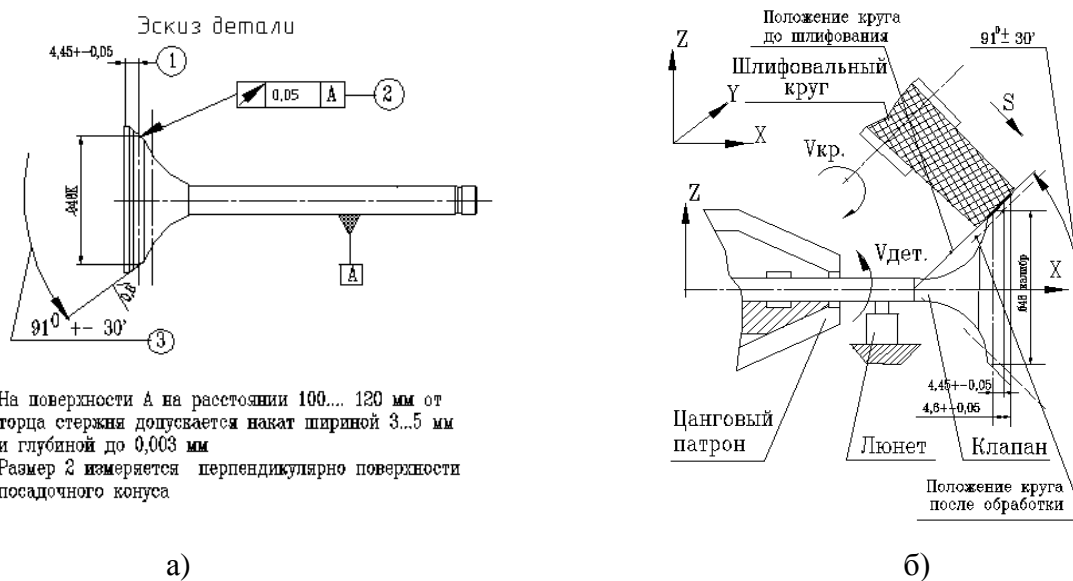


Рис. 5. Выпускной клапан (а) двигателя внутреннего сгорания, схема круглошлифовальной обработки посадочного конуса выпускного клапана (б).



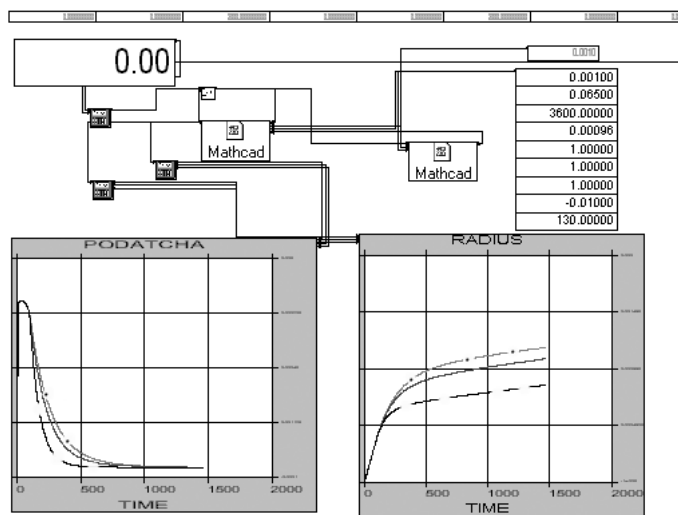


Рис. 6. Результаты моделирования имитационным комплексом проектирования ТП абразивной обработки с использованием технологии АССЕ для оптимизации инженерии поверхности деталей машин для получения заданного размера и качества поверхностного слоя за заданное время обработки.

Предложенная технология имитационного моделирования нелинейной динамики процессов инженерии поверхностей деталей горных машин подвергаемых механической обработке, позволяет формировать ресурсные показатели, выбирать ТП восстановления реновируемых поверхностей. Очень важную роль занимает документооборот в реновационных технологиях. Для упрощения доступа к информации необходимо использовать СЭД (Системы Электронного Документооборота). СЭД - это новое поколение систем управления предприятием, процессом проектирования, в которых основными объектами автоматизации являются документы и процессы, представляющие собой как движение документов, так и их обработку. В автоматизации учетной деятельности предлагается выделять следующий методический подход: «от первичных документов к операциям» и «управления процессами». Программная система, реализующая первый подход, обслуживает потребности пользователя, по формированию и учету необходимой документации. Открытые стандартизованные форматы документов, хорошо описаны и легко доступны. Одним из таких форматов является ODF. Open Document Format (ODF- Open Document Format for Office Application — открытый формат документов для офисных приложений) — открытый формат файлов документов для хранения и обмена редактируемыми офисными документами, в том числе текстовыми документами (такими как заметки, отчёты и книги), электронными таблицами, рисунками, базами данных, презентациями. Стандарт был разработан индустриальным сообществом OASIS и основан на XML-формате, изначально созданном OpenOffice.org. 1 мая 2006 года принят как международный стандарт ISO/IEC 26300, стандарт был совместно и публично

разработан различными организациями, доступен для всех и может быть использован без ограничений. Open Document представляет собой альтернативу частным закрытым форматам, включая DOC, XLS и PPT (форматы используемые в Microsoft Office 97—2007), а также формату Microsoft Office Open XML.

#### **Список литературы:**

1. **Акаев. А. Б.**, «Проектирование и моделирование нелинейной динамики технологических процессов в машиностроении», М.: МГТУ "Станкин", 1999, 222 с., ISBN 5-7028-0095-8.

2. **Суслов А.Г.** «Качество поверхностного слоя деталей машин», М. Машиностроение, 2006 г.

3. **Акаев А.Б., Иванов Г.Н.** «Информационные технологии в нелинейной динамике машиностроительных процессов». В сб.: Научный вестник МГТУ ГА №74 (4) серия Информатика. Прикладная математика. М.: МГТУ ГА, 2004 г. ISBN 5-86311-423-1, с.53-55

4. **Тимошенко Ю.Н.** «Технология моделирования изменение качества поверхностного слоя в процессе механической обработки». В сб.: Материалы XI научной конференции МГТУ «Станкин» и «Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ «Станкин»- ИММ РАН» математическому моделированию и информатике» 23-25 апреля 2008 г., ИЦ ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2008 г., с.282